cd-rom voor de technische praktijk

POLY TECHNISCH Zakboek

versie 2004

Met geavanceerde fulltext
zoekmogelijkheden
hyperlinks
en support via internet

Reed Business Information

Bediening

In het linkergedeelte vindt u de inhoudsopgave van de cd-rom. Wanneer u op een onderwerp klikt zal dit onderwerp in het rechtergedeelte van het scherm worden weergegeven. Staat er een ⊞-teken naast het onderwerp, dan zijn er nog sub-onderwerpen, die weergegeven worden als u op het ⊞-teken klikt.

In het rechtergedeelte van het scherm worden alle onderwerpen weergegeven. U kunt ook gewoon door de tekst bladeren met de pijltjestoetsen, en met Page Up en Page Down. In de tekst worden sommige woorden blauw weergegeven. Wanneer u daarop klikt wordt naar het betreffende onderwerp gesprongen. Als u een internet-aansluiting heeft leiden rode links u naar de betreffende internet site.

De werkbalk boven in het scherm biedt u nog verschillende keuzes. Voor uitgebreide zoekmogelijkheden klikt u op de `verrekijker' (). Nu heeft u een index geopend, waardoor u snel kunt zoeken op trefwoorden. Met de knoppen naast de `verrekijker' kunt u nu door het document `springen' naar de gevonden trefwoorden.

Uitgebreide informatie vindt u in de helptekst, die u te zien krijgt na het klikken op **Help** in het menu boven aan uw scherm en vervolgens **Acrobat Reader Help**.

Klik hier voor online tips en trucs

Eenheden en symbolen A1

1 Overzicht eenheden
- 1.1 Basisgrootheden en grondeenheden (SI)
- 1.2 Aanvullende grootheden en eenheden
- 1.3 Afgeleide SI-eenheden met eigen naam
- 1.4 Afgeleide grootheden en eenheden
- 1.5 Niet tot SI behorende eenheden
- 1.6 Berekening herleidingsfactoren
- 1.7 Decimale voorvoegsels (SI)
- 1.8 SI-symbolen (alfabetisch) met naam

2 Romeinse cijfers

3 Griekse lettertekens

1 Overzicht eenheden

1.1 Basisgrootheden en grondeenheden (SI)[1)]

Lengte (symbool *l*)

De **meter** (m) is de lengte van de weg die het licht in vacuüm aflegt gedurende een tijdinterval van 1/299 792 458 gedeelte van een seconde.

Massa (symbool *m*)

De **kilogram** (kg) is de eenheid van massa; het is gelijk aan de massa van het internationale prototype van het kilogram.

Tijd (symbool *t*)

De **seconde** (s) is de tijdsduur van 9 192 631 770 perioden van de straling overeenkomend met de overgang tussen de twee hyperfijnniveaus van de grondtoestand van het atoom cesium 133.

Elektrische stroom (symbool *I*)

De **ampère** (A) is de constante stroom die, indien hij wordt onderhouden in twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, welke geplaatst zijn in het luchtledige op een afstand van 1 meter, tussen deze twee geleiders een kracht veroorzaakt gelijk aan 2×10^{-7} newton voor iedere meter lengte (1 ampère = 1 coulomb/s).

Thermodynamische temperatuur (symbool *T*)

De **kelvin** (K) is gelijk aan het 1/273,16 gedeelte van de thermodynamische temperatuur van het tripelpunt van water.

Hoeveelheid stof (symbool *n*)

De **mol** (mol) is de hoeveelheid stof van een systeem die evenveel elementaire entiteiten bevat als er atomen zijn in 0,012 kilogram koolstof 12.

[1)] SI: Système International.

Opmerking. Bij gebruikmaking van de mol moeten de elementaire entiteiten worden gespecificeerd; deze kunnen atomen, moleculen, ionen, elektronen, andere deeltjes of bepaalde groeperingen van dergelijke deeltjes zijn.

In de praktijk (*technische notatie*) wordt het gebruik van de **kilomol** (kmol) aanbevolen, o.a. door de *International Organization for Standardization* (ISO). Men vermijdt dan een factor 1000 die optreedt wanneer men de mol in combinatie met andere grootheden gebruikt.
Bijv.: $M = 10^{-3}\ M_r$ kg/mol, resp. $M = M_r$ kg/kmol.
Met de mol als uitgangspunt zouden pH-waarden 3 kleiner worden dan wanneer de kmol als uitgangspunt wordt gehanteerd.

Lichtsterkte (symbool I)

De **candela**[1)] (cd) is de lichtsterkte, in een bepaalde richting, van een bron die monochromatische straling uitzendt van een frequentie van 540×10^{12} Hz en een stralingssterkte in die richting heeft van 1/683 watt per steradiaal.

1.2 Aanvullende grootheden en eenheden

(Vlakke) hoek (symbool α, β, ...)

De **radiaal** (rad) is de vlakke hoek tussen twee stralen van een cirkel, die op de omtrek een boog afsnijden waarvan de lengte gelijk is aan de straal.
2π rad $\mathrel{\widehat{=}}$ 360°.

Ruimtehoek (symbool Ω, ω)

De **steradiaal** (sr) is de ruimtehoek die, wanneer zijn top samenvalt met het middelpunt van een bol, op die bol een oppervlak uitsnijdt gelijk aan die van een vierkant met de straal van de bol als zijde.
De totale *driedimensionale ruimte* omvat 4π sr.

[1)] Uitspraak: kandéela.

1.3 Afgeleide SI-eenheden met eigen naam

Tabel 1.1 Overzicht afgeleide SI-eenheden met eigen naam

eenheid		grootheid
naam	symbool	
becquerel[1)]	Bq	(Radio)activiteit
coulomb[2)]	C	Elektrische lading
farad[3)]	F	Elektrische capaciteit
gray[4)]	Gy	Geabsorbeerde dosis
henry[5)]	H	Elektrische inductantie (permeantie)
hertz	Hz	Frequentie
joule[6)]	J	Arbeid, energie, hoeveelheid warmte
lumen	lm	Lichtstroom
lux	lx	Verlichtingssterkte
newton[7)]	N	Kracht
pascal	Pa	Druk, spanning
siemens	S	Elektrische geleiding
sievert	Sv	Dosis equivalent
tesla	T	Magnetische inductie
volt	V	Elektrische spanning, potentiaal
watt	W	Vermogen, energiestroom
weber	Wb	Magnetische flux
ohm	Ω	Elektrische weerstand

Uitspraak: [1)] bekkerèl [2)] koeloñ [3)] fárat [4)] grei (zachte k) [5)] hènri [6)] dzjoel [7)] njòèton

1.4 Afgeleide grootheden en eenheden

De gegeven eenheid is de meest gangbare voor de betreffende grootheid. De grootte van deze eenheid wordt uitgedrukt in grondeenheden (zie tabel 1.1 t/m 1.10). Zie voor een alfabetische lijst van SI-symbolen, par. 1.8.

Tabel 1.2 Ruimte, tijd en periodieke verschijnselen

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Breedte	b	m	
Cirkelfrequentie hoeksnelheid	ω	rad/s	
Cirkelrepetentie	k	m^{-1}	
Compressibiliteit	κ	Pa^{-1}	
Decrescentie (dempingscoëff.)	δ	s^{-1}	
Diameter	D, d	m	
Dikte	d, δ	m	
Fase, faseverschil	φ	rad	
Fasecoëfficiënt	β	m^{-1}	
Frequentie	f, ν	Hz	$(= s^{-1})$
Golfgetal = repetentie	σ	m^{-1}	
Golflengte	λ	m	
Hoek, vlakke –	α, β, γ, φ	rad	
Hoekversnelling	α	rad/s^2	
Hoogte	h	m	
Inhoud	V	m^3	
Lengte	l	m	
Oppervlakte	A	m^2	
Periode	T	s	
Rotatiefrequentie	n	s^{-1}	
Ruimtehoek	Ω, ω	sr	
Snelheid	u, v, w, c	m/s	
Straal	R, r	m	
Tijd	t	s	
Tijdconstante	τ	s	
Versnelling	a	m/s^2	
Versnelling van de vrije val	g	m/s^2	
Verzwakkingscoëfficiënt	α	m^{-1}	
Volume	V	m^3	
Volumestroom	q_v, $\dot{V}$	m^3/s	
Voortplantingscoëfficiënt	γ	m^{-1}	
Weglengte	s	m	

Tabel 1.3 Mechanica algemeen

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Arbeid (energie)	W, A	J	= Nm
Areïeke massa	ϱ_A	kg/m^2	
Dichtheid	ϱ	kg/m^3	
Draaistoot	D	N·m·s	
Druk	p	Pa	= Pascal = N/m^2
Energie	E (W, U)	J	= N·m
Energiedichtheid	w	J/m^3	
Energiestroom = vermogen	P	W	= J/s
Gewicht	G	N	
Gravitatieveldsterkte	γ	N/kg	
Hoeveelheid van beweging	p	kg·m/s	
Impuls (stoot)	I	N·s	
Impulsmoment (hoev. draaiing)	L	kg·m^2/s	
Kinetische energie	E_k	J	
Koppel	T	N·m	
Kracht	F	N	
Lineïeke massa	ϱ_l	kg/m	
Massa	m	kg	
Massastroom	q_m, $\dot{m}$	kg/s	
Massastroomdichtheid	Φ	kg/(m^2·s)	
Moment per lengte	m	N	
Normaalspanning	σ	Pa	= N/m^2
Potentiële energie	E_p	J	
Relatieve dichtheid	d, ϱ_v	–	
Schuifspanning	τ	N/m^2	
Soortelijke (specifieke) massa	ϱ	kg/m^3	
Soortelijk (specifiek) volume	v	m^3/kg	
Traagheidsmoment	J, I	kg·m^2	
Traagheidsstraal	i	m	
Vermogen, mechanisch	P	W	
Wrijvingscoëfficiënt	μ, f	–	
Zwaartevelddsterkte	g	N/kg	= m/s^2

Tabel 1.4 Vaste-stof mechanica

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Afschuiving (schuifhoek)	γ	–	
Afschuivingsmodulus	G	Pa	$= \mathrm{N/m^2}$
Compressibiliteit	κ	$\mathrm{Pa^{-1}}$	
Compressiemodulus	K	Pa	
Elasticiteitsmodulus	E	Pa	
Kerfslagwaarde	K	J	= vervormingsarbeid
Kwadratisch oppervlaktemoment	I	$\mathrm{m^4}$	
Lineair oppervlaktemoment, statisch moment	S	$\mathrm{m^3}$	
Poisson-verhouding	μ	–	
Relatieve rek	ε	–	
Relatieve volumeverandering	ϑ	–	
Schuifhoek (afschuiving)	γ	–	
Spanning, druk	p	Pa	$= \mathrm{N/m^2}$
Sterkte (rekgrens)	R	Pa	$= \mathrm{N/m^2}$
Trekspanning, trekvastheid	σ	$\mathrm{N/m^2}$	
Veerstijfheid	c, k	N/m	
Weerstandsmoment	W	$\mathrm{m^3}$	

Tabel 1.5 Gas- en vloeistofmechanica (stromingsleer)

grootheid	Symbool	eenheid	toelichting
Circulatie (wervelsterkte)	Γ	$\mathrm{m^2/s}$	
Compressibiliteitsfactor	z	–	
Fluïditeit	Φ	$\mathrm{Pa^{-1}{\cdot}s^{-1}}$	
Impulsmomentstroom	$\dot{L}$	N·m	
Impulsstroom	$\dot{p}$	N	
Oppervlaktespanning	σ, γ	N/m	
Potentiaalfunctie = snelheidspotentiaal	Φ	$\mathrm{m^2/s}$	
Viscositeit (dynamisch)	η	Pa·s	
Viscositeit (kinematisch)	ν	$\mathrm{m^2/s}$	
Weerstandscoëfficiënt	ζ	–	
Weerstandsfactor voor pijpen	λ	–	

Tabel 1.6 Elektriciteit en magnetisme

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Admittantie	Y	S	siemens
Arbeidsfactor	λ	–	
Blind(reactief-) vermogen	Q (P_q)	var	
Capaciteit (elektr.)	C	F	farad
Conductantie, qeleiding	G	S	
Conductiviteit, soort qeleiding	γ, σ	S/m	
Diëlektrische constante (permittiviteit)	ε	F/m	
Elektrisatie	E_i	V/m	
Elektrisch(e)			
dipoolmoment	p	C·m	
energie	W, E	J	=W.sec
flux	Ψ	C	coulomb
fluxdichtheid	D	C/m^2	
lading	Q	C	coulomb
ladingsdichtheid (vol. lading)	ϱ	C/m^3	
polarisatie	P, D_i	C/m^2	
potentiaal	V, φ	V	
potentiaalverschil	V	V	volt
spanning	U, V	V	
stroom	I	A	ampère
stroomdichtheid	J	A/m^2	
susceptibiliteit	χ	–	
veldsterkte	E	V/m	N/C
vermogen	P	W	watt
verplaatsing	D	C/m^2	ohm
weerstand, impedantie	R	Ω	
Elektromotorische kracht (emk)	E	V	
Geleiding	G	S	
Hoeveelheid elektriciteit (lading)	Q	C	
Impedantie	Z	Ω	
Inductantie	L	H	henry
Koppelfactor	k	–	
Lekfactor (spreidingscoëff.)	σ	–	
Magnetisatie	M	A/m	
Magnetisch(e)			
bronspanning (mmk)	U_m (F_m)	A	
dipoolmoment	j	Wb·m	
energie	W	J	
flux	Φ	Wb	weber
fluxdichtheid (inductie)	B	T	tesla
moment	m	A·m^2	
polarisatie	J	T	
spanning	U	A	
susceptibiliteit	κ, χ_m	–	
vectorpotentiaal	A	Wb/m	
veldsterkte	H	A/m	= N/Wb
weerstand (reluctantie)	R_m	H^{-1}	

Tabel 1.6 (vervolg)

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Magnetische spanning	U_m	A	
Omstroming, oppervlaktestroomdichtheid	A	A/m	
Permeabiliteit	μ	H/m	
Permeantie	Λ	H	henry
Permittiviteit diëlectrische constante	ε	F/m	
Poynting vector	S	W/m^2	$S = E.H$
Reactantie	X	Ω	ohm
Relatieve permeabiliteit	μ_r	–	
Relatieve permittiviteit	ε_r	–	
Reluctantie	R_m	H^{-1}	
Soortelijke geleiding, conductiviteit	γ, σ	S/m	
Soortelijke weerstand (resistiviteit)	ϱ	Ω·m	
Spreidingscoëff. (lekfactor)	σ	–	
Susceptantie	B	S	siemens
Verliesfactor	d	–	
Verlieshoek	δ	rad	
Vlakteladingsdichtheid	σ	C/m^2	
Volumieke lading (ladingsdichtheid)	ϱ	C/m^3	
Wederzijdse inductie	M	H	henry
Werkzaam elektr. Vermogen	P	W	watt
Zelfinductie	L	H	henry

Tabel 1.7 Warmte en thermodynamica

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Enthalpie	H	J	
Entropie	S	J/K	
Hoeveelheid warmte	Q	J	
Inwendige energie	U, E	J	
Overgangsenergie	L	J	
Relatieve spanningscoëfficiënt	β, α_p	K^{-1}	
Soortelijke			
enthalpie	h	J/kg	
entropie	s	J/(kg·K)	
inwendige energie	u, e	J/kg	
overgangsenergie	l	J/kg	
vrije energie	f	J/kg	
vrije enthalpie	g	J/kg	
warmte (capaciteit)	c	J/(kg·K)	
warmteverhouding	γ	–	$= c_p/c_y$
Temperatuur (absolute)	T	K	Kelvin
Temperatuur vereffeningscoëff.	a	m^2/s	$a = \lambda/\rho \cdot c_p$
Uitzettingscoëfficiënt (lineaire)	α, λ	K^{-1}	
Uitzettingscoëfficiënt (kubieke)	γ, α_V	K^{-1}	
Vermogen (thermisch)	P	W	
Vrije energie	F	J	
Vrije enthalpie	G	J	
Warmte			
capaciteit	C	J/K	
doorgangscoëfficiënt	K	$W/(m^2 \cdot K)$	
geleiding	G	W/K	
geleidingscoëfficiënt	λ	W/(m·K)	
-isolatiecoëfficiënt	M	$K \cdot m^2/W$	
-overdrachtscoëfficiënt	α, h	$W/(m^2 \cdot K)$	
stroom	$\dot{Q}$, Φ	W	
stroomdichtheid	q	W/m^2	
weerstand	R	K/W	

Tabel 1.8 Chemische stof en materie

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Aantal elementaire deeltjes	N	–	
Atoommassa (relatief)	A_r	–	
Atoomnummer	Z	–	
Chemische potentiaal van comp. B	μ_B	J/mol	
Deeltjesdichtheid	n	m^{-3}	
Diffusiecoëfficiënt	D	m^2/s	
Dissociatiegraad	α	–	
Hoeveelheid stof	n	mol	
Ionensterkte	I	mol/kg	
Massaconcentratie van comp. B	ρ_B	kg/m^3	
Massafractie van comp. B	w_B	–	
Molair(e)			
concentratie van comp. B	c_B	mol/m^3	
fractie van comp. B	x_B	–	
massa	M	kg/mol	
volume	V_m	m^3/mol	
Molaliteit van comp. B	m_B	mol/kg	
Molecuul-concentratie van comp. B	C_B	m^{-3}	
Molecuul-dichtheid	n	m^{-3}	
Osmotische druk	Π	Pa	N/m^2
Thermodiffusie-coëfficiënt	D_T	m^2/s	

Tabel 1.9 Elektromagnetische straling en licht

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Absorptiecoëfficiënt (spectrale)[2)]	$a(\lambda)$	m^{-1}	
Absorptiefactor (spectrale)[2)]	$\alpha(\lambda)$	–	
Belichting	H	lx·s	
Bestralingssterkte[1)] (irradiantie)	E, E_e	W/m^2	
Brekingsindex	n	–	
Emissiefactor (spectrale)[2)]	$\varepsilon(\lambda)$	–	
Emittantie (licht)	M, M_v	lm/m^2	
Golflengte	λ	m	
Hoeveelheid licht	Q, Q_y	lm·s	
Lichtsnelheid (in vacuüm)	c	m/s	
Lichtsterkte	I, I_v	cd	candela
Lichtstroom	Φ, Φ_v	lm	lumen
Luminantie	L, L_v	cd/m^2	
Radiantie	L, L_e	$W/(m^2 \cdot sr)$	
Reflectiefactor (spectrale)[2)]	$\rho(\lambda)$	–	
Stralings-			
emittantie	M, M_e	W/m^2	
energie	Q, Q_e, W	J	
energiedichtheid	w	J/m^3	
flux	Φ, Φ_e	W	
fluxdichtheid	φ	W/m^2	
intensiteit (sterkte)	I, I_e	W/sr	
Transmissiefactor (spectrale)[2)]	$\tau(\lambda)$	–	
Verlichtingssterkte	E, E_v	lx	lux
Verzwakkingscoëfficiënt (spectrale)[2)]	$\mu(\lambda)$	m^{-1}	

[1)] Van de grootheden E_e, I_e, L_e, M_e, Q_e, w en Φ_e bestaat een *spectrale concentratie* over een golflengtegebiedje $d\lambda$, aan te geven met index λ in het symbool. In de eenheid en afleiding komt een extra factor m^{-1}.

[2)] Grootheden die een functie zijn van λ worden aangegeven door (λ), bijv. $\varepsilon(\lambda)$.

Tabel 1.10 Geluid

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Akoestische impedantie	Z_a	Pa·s/m^3	
Akoestisch vermogen	P	W	
Deeltjessnelheid (momentaan)	u, v	m/s	
Geluidsdruk (momentaan)	p	Pa	
Geluidsdrukniveau, -intensiteitsniveau	L_pL_i	(dB)	$L_p = 20\lg\left(\frac{P}{P_\circ}\right)$
Geluidsenergiedichtheid	E	J/m^3	
Geluidsintensiteit	I	W/m^2	
Geluidssnelheid	c	m/s	
Mechanische impedantie	Z_m	N·s/m	
Specifieke akoestische impedantie	Z_s	Pa·s/m	
Statische druk	p_s	Pa	

Tabel 1.11 Atomaire en moleculaire verschijnselen

grootheid	symbool	eenheid	toelichting
Activiteit	A	Bq	becquerel
Desintegratieconstante (vervalconst.)	λ	s^{-1}	
Dosis (geabsorbeerde)	D	Gy	gray
Dosisequivalent	H	Sv	sievert
Dosistempo	$\dot{D}$	Gy/s	
Exposie	X	C/kg	
Exposietempo	$\dot{X}$	C/(kg·s)	
Halveringstijd	$T_{1/2}$	s	
Neutronental	N	–	
Nucleonental	A	–	
Protonental (= atoomnummer)	Z	–	
Specifieke activiteit	a	Bq/kg	

1.5 Niet tot SI behorende eenheden

In tabel 1.12 zijn een aantal nog voorkomende eenheden gegeven die niet tot het SI behoren. De meeste hiervan mogen niet meer officieel gebruikt worden (de zgn. *oude eenheden*, aangegeven met een kruisje). De tabel geeft verder de herleiding van de vermelde eenheden naar SI-eenheden. Een volledige alfabetische lijst met (oude) Europese en Amerikaanse eenheden en hun herleiding naar SI kan men vinden in NEN 3049 (zie literatuurlijst).

Tabel 1.12 Niet tot SI behorende eenheden

eenheid	[1]	symbool	herleiding[2]
ampère-uur	×	Ah	$= 3{,}6 \times 10^3$ C
angström	×	A	$:= 10^{-10}$ m $= 0$, 1 nm
are		a	$:= 100$ m^2
astronomische eenheid		AE	$:= 149{,}6 \times 10^9$ m
atmosfeer (fysische, 760 mm Hg)	×	atm	:= 101 325 Pa
atmosfeer (technisch, kgf/cm^2)	×	at	= 98 066,5 Pa
bar		bar	$:= 10^5$ Pa
calorie (Internat. Table)	×	cal	:= 4,1868 J
calorie, thermochemisch	×	cal_{thch}	:= 4,184 J
curie	×	Ci	$:= 37 \times 10^9$ Bq
dag (24 h)		d	$:= 86{,}4 \times 10^3$s
denier (= 1/9 tex)	×	den (Td)	$:= 1/9 \times 10^{-6}$ kg/m
dioptrie		dpt (δ)	:= 1 m^{-1}
dyne (= g·cm/s^2)	×	dyn	$:= 10^{-5}$ N
elektronvolt		eV	$\approx 0{,}160\ 2177 \times 10^{-18}$ J
erg (= dyn·cm)	×	erg	$= 10^{-7}$ J
fermi	×	fm	$:= 10^{-15}$ m
gauss (eme-stelsel)	×	G	$:= 10^{-4}$ T
gilbert (eme-stelsel)	×	Gb	$:= 10/(4\pi) \approx 0{,}795774$ A
graad (decimale)		gon (...^{g})	$:= \pi/200$ rad $\approx 15{,}7080$ mrad
graad (hoek)		...$^\circ$	$:= \pi/180$ rad $\approx 17{,}4533$ mrad
gramatoom	×	grat	:= mol atomen
grammolecuul	×	grol	:= mol moleculen
Hardheid (Duitse)		$^\circ$d	= 10 mg CaO per liter
hectare		ha	10,000 m^2
jaar (365 dagen)		j	$= 31{,}536 \times 10^6$s
jaar (tropisch)		a	$\approx 365{,}2422$d
			$\approx 31{,}5569 \times 10^6$s
karaat (metriek-)		Kt, ct	$:= 0{,}2 \times 10^{-3}$ kg[3]
kilocalorie/uur	×	kcal/h	= 1,162 W
kilogramkracht = kilopond	×	kgf, kp	:= 9,806 65 N
kilometer per uur		km/h	$\approx 0{,}277\ 778$ m/s
kilowattuur		kWh	$:= 3{,}6 \times 10^6$ J
knoop (zeemijl/uur)		kn	$\approx 0{,}514\ 444$ m/s of 1,852 km/h
lambert	×	L	$:= 10^4/\pi$ cd/m^2
lichtjaar	×	ly	$\approx 9{,}46053 \times 10^{15}$ m
liter		L(l)	$:= 10^{-3}$ m^3
maxwell (eme-stelsel)	×	Mx	$:= 10^{-8}$ Wb
meter waterkolom	×	m H_2O	:= 9,806 65 kPa
micron	×	µ	$:= 10^{-6}$ m
mm kwikkolom	[4]	mm Hg	$\approx 133{,}322$ Pa
minuut (hoek)		...$'$	$\approx 0{,}290\ 888$ mrad
minuut (tijd)		min	:= 60s

Tabel 1.12 (vervolg)

eenheid	[1]	symbool	herleiding[2]
nit	×	nit	:= 1 cd/m^2
octaaf		oct	:= $\log_2(f_2/f_1)$
oersted (eme-stelsel)	×	Oe	:= $10^3/(4\pi) \approx 79,5775$ A/m
omwentelingen per min.		omw/min	$\approx$ 0,104 720 rad/s
paardekracht	×	pk	$\approx$ 735,499 W
paardekrachtuur	×	pkh	$\approx 2,6478 \times 10^6$ J
parsec		pc	$\approx 30,8572 \times 10^{15}$ m
phot	×	ph	:= 10^4 lx
poise (= dyn·s/cm^2)	×	P	:= 0,1 Pa·s
rad (stralingsdosis)	×	rd	:= 10^{-2} Gy
registerton (= 100 ft^3)			$\approx$ 2,83168 m^3
rem (dosisequivalent)	×	rem	:= 10^{-2} Sv
röntgen	×	R	$\approx 258 \times 10^{-6}$ C/kg
seconde (hoek)		$\ldots''$	$\approx 4,84814 \times 10^{-6}$ rad
stilb	×	sb	:= 10^4 cd/m^2
stokes	×	St	:= 10^{-4} m^2/s
technische massa-eenheid	×	TME	:= 9,806 65 kg
tex		tex	:= 10^{-6} kg/m
ton		t	:= 10^3 kg
torr (mm kwikdruk)	×	torr	$\approx$ 133,322 Pa
uur		h	:= 3600 s
zeemijl (internationaal)		(nmile)	:= 1852 m[5]

[1] × betekent officieel gebruik niet toegestaan.
[2] := betekent per definitie gelijk aan.
[3] Voor edelmetalen is de *karaat* een maat voor de *zuiverheid*. Zuiver goud is 24-karaats goud.
[4] Alleen toegestaan voor druk van lichaamsvocht (bloed).
[5] Is gelijk aan een boogminuut op het aardoppervlak.

Tabel 1.13 Overzicht van de meest voorkomende Engelse (UK) en Amerikaanse (US) eenheden (het wordt aangeraden deze niet meer te gebruiken)

eenheid	symbool	herleiding
lengte		
mil (= 0,001 in)	mil	25,4 × 10^{-6} m
inch	in	:= 25,4 × 10^{-3} m (1 cm = 0,3937 inch)
foot (= 12 in)	ft	= 0,3048 m (1 m = 3,2808 ft)
yard (= 3 ft)	yd	= 0,9144 m
fathom (= 6 ft)	fath	= 1,8288 m
mile (= 1760 yd) (Engelse landmijl)	mi	= 1609,344 m (1 km = 0,6214 mile)

Tabel 1.13 (vervolg)

eenheid	symbool	herleiding
oppervlakte		
acre	acre	$\approx$ 4046,86 m^2 (1 ha = 2,47 acre)
circular inch	cir in	$\approx$ 0,506 707 $\times$ 10^{-3} m^2
sq.foot	sq.ft	$\approx$ 0,0929 m^2 (m^2 = 10.76459 ft)
inhoud (UK)		
fluid ounce	fl oz	$\approx$ 28,4131 $\times$ 10^{-6} m^3 (cc)
pint (= 20 fl oz)	pt	$\approx$ 0,568261 dm^3
quart (= 2 pt)	qt	$\approx$ 1,136 52 dm^3
gallon (= 4 qt)	(UK) gal	= 4,546 09 dm^3
bushel (= 8 gal)	bu	$\approx$ 36,3687 dm^3
quarter (= 8 bu)	qr	$\approx$ 0,290 950 m^3
cubic foot	cu.ft	$\approx$ 0,02832 m^3 (1 m^3 = 35,3148 cu.ft)
inhoud (US, voor vloeistoffen)		
fluid ounce	fl oz	$\approx$ 29,5735 $\times$ 10^{-6} m^3 (cc)
liquid pint (= 16 fl oz)	liq pt	$\approx$ 0,473 176 dm^3
liquid quart (= 2 liq pt = 1/4 gallon)	liq qt	$\approx$ 0,946 353 dm^3
gallon (= 4 liq qt)	(US) gal	= 3,785 41 dm^3
barrel (= 42 gal) (petroleum)	bbl	$\approx$ 0,158 987 m^3
inhoud (US, voor droge stoffen)		
dry pint	dry pt	$\approx$ 0,550 610 dm^3
dry quart (= 2 dry pt)	dry qt	$\approx$ 1,101 22 dm^3
dry gallon (= 4 dry qt)	dry gal	$\approx$ 4,404 88 dm^3
peck (= 2 dry gal)	pk	$\approx$ 8,809 77 dm^3
bushel (= 4 peck)	bu	$\approx$ 35,2391 dm^3
dry barrel (= 7056 in^3)	dry bbl	$\approx$ 0,115 627 m^3
massa		
ounce (UK, US) (= 1/16 1b)	oz	$\approx$ 28,3495 gram
pound (UK, US)	lb	= 0,453 592 37 kg
stone (UK, US) (= 14 lb)	st	$\approx$ 6,350 29 kg
quarter (UK, US) (= 28 lb)	qr	$\approx$ 12,7006 kg
hundredweight (US) (= 100 lb)	sh cwt	$\approx$ 45,3592 kg
hundredweight (UK) (= 112 lb) (= long hundredweight in US)	(UK) cwt	$\approx$ 50,8023 kg
US ton = short ton (= 2000 lb)	US ton	$\approx$ 907,185 kg
UK ton = long ton (US) (= 2240 lb)	UK ton	$\approx$ 1,016 05 $\times$ 10^3 kg

Tabel 1.13 (vervolg)

eenheid	symbool	herleiding
kracht, arbeid, vermogen, druk		
poundal	pdl	≈ 0,138 255 N
pound (kracht)	lbf	≈ 4,448 22 N
horsepower (= 550 ft·lbf/s)	hp	≈ 0,7457 kW
British Thermal Unit (=1 kcal·lb·°F/(kg·K))	BTU	≈ 1055,06 J (=0,252 kcal)
pound per sq. inch	psi	≈ 6894,76 Pa (=0,06895 bar) (1 bar = 14,504 psi)
pound-foot	lbf	≈ 1,356 Nm
snelheid		
mile/kr (≈ 1,47 ft/s)	mi/h	≈ 1,609 km/h (=0,447 m/s)
1 knot (knoop)	zeemyl/h	≈ 0,5144 m/s of 1,852 km/u
overig		
mil = strich	mil	$= 2\pi/6400$ rad ≈ 0,981 748 mrad
foot candle	fc	≈ 10,764 lux
foot lambert	fL	≈ 3,4263 cd/m^2
cycle per second	c/s	= 1 Hz
revolutions per minute	rpm	$= 1/60\,\mathrm{s}^{-1} = 16{,}6 \cdot 10^{-3}$ Hz
°Fahrenheit	°F	$T(\mathrm{K}) = 5/9[t(^\circ\mathrm{F}) + 459{,}67]$

Tabel 1.14 Nog voorkomende, verouderde eenheden van viscositeit

graad Engler °E	sec Redwood I	sec Redwood II	sec Saybolt (S.U.)	herleiding m^2/s (1 cS = 10^{-6} m^2/s)
1,0	27	–	28	$1{,}0 \times 10^{-6}$
5,0	154	17	181	$37{,}3 \times 10^{-6}$
10,0	311	32	365	77×10^{-6}
15	466	47	548	114×10^{-6}
20	621	62	730	152×10^{-6}
25	776	78	910	190×10^{-6}

1.6 Berekening herleidingsfactoren

Herleidingsfactoren treden op:

1 Bij overgang van samengestelde (oude) eenheden naar andere eenheden (bijv. SI).
2 Als in een formule grootheden worden uitgedrukt in andere dan gewenste eenheden.

Berekening vindt plaats d.m.v. de substitutiemethode: voor elke te vervangen enkelvoudige eenheid wordt de grootte in de gewenste eenheid uitgedrukt, gesubstitueerd. Voorbeelden:

1 $$1\,\frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2\cdot\text{h}} = \frac{1055{,}06\,\text{J}}{(0{,}3048\,\text{m}^2\cdot 3600\,\text{s}} = 3{,}154\ 60\,\frac{\text{J}}{\text{m}^2\cdot\text{s}} = 3{,}15460\,\text{W/m}^2$$

2 $R = \dfrac{\rho\cdot l}{A}$, waarin: ρ in Ωm, l in m, A in m^2, R in Ω

Gegeven: ρ in $\mu\Omega\cdot$cm, l in cm, d in mm $\left(A = \dfrac{\pi}{4}d^2\right)$

Gevraagd: R uit te drukken in mΩ

Formule wordt: $R = k\dfrac{\rho\cdot l}{d^2}$, waarin k te berekenen.

$$k = \frac{R\cdot d^2}{\rho\cdot l} = \frac{\dfrac{R}{\text{m}\Omega}\cdot\dfrac{4}{\pi}\dfrac{A}{\text{mm}^2}}{\dfrac{\rho}{\mu\Omega\cdot\text{cm}}\cdot\dfrac{}{\text{cm}}} = \frac{\dfrac{R}{10^{-3}\Omega}\cdot\dfrac{4}{\pi}\dfrac{A}{10^{-6}\,\text{m}^2}}{\dfrac{\rho}{10^{-8}\Omega\text{m}}\cdot\dfrac{}{10^{-2}\,\text{m}}}$$

$$= \frac{4}{\pi}\cdot\frac{10^{-10}}{10^{-9}}\cdot\frac{\dfrac{R}{\Omega}\cdot\dfrac{A}{m^2}}{\dfrac{\rho}{\Omega\cdot\text{m}}\cdot\dfrac{1}{\text{m}}} = \frac{4}{\pi}\cdot\frac{10^{-10}}{10^{-9}} = \frac{0{,}4}{\pi}$$

1.7 Decimale voorvoegsels (SI)

Tabel 1.15 Decimale voorvoegsels volgens SI

naam	symbool	waarde	naam	symbool	waarde
peta	P	10^{15}	deci	d	10^{-1}
tera	T	10^{12}	centi	c	10^{-2}
giga	G	10^{9}	milli	m	10^{-3}
mega	M	10^{6}	micro	µ	10^{-6}
kilo	k	10^{3}	nano	n	10^{-9}
hecto	h	10^{2}	pico	p	10^{-12}
deca	da	10^{1}	femto	f	10^{-15}

Opmerkingen:
- Het wordt aanbevolen de voorvoegsels *hecto*, *deca*, *deci* en *centi* zoveel mogelijk te vermijden.
- Het symbool van een voorvoegsel vormt één geheel met het symbool van de eenheid waaraan het is toegevoegd.
- Combineren van voorvoegsels is niet toegestaan.

1.8 SI-symbolen (alfabetisch) met naam

Tabel 1.16 SI-symbolen (alfabetisch) met naam (zie par. 1.1 t/m 1.4 voor meer gegevens)

symbool	naam	symbool	naam
A	activiteit	c_B	molaire concentratie van component B
	arbeid	c_p	soortelijke warmte bij constante druk
	(lineïeke) omstroming, oppervlaktestroomdichtheid	c_V	soortelijke warmte bij constant volume
	magnetische vectorpotentiaal	c_0	lichtsnelheid in vacuüm
	nucleonental	c_1	eerste stralingsconstante
	oppervlak(te)	c_2	tweede stralingsconstante
	vrije energie	D	diffusiecoëfficiënt
A_r	relatieve atoommassa (van een element)		draaistoot, aanzwengeling
a	soortelijke vrije energie		elektrische verplaatsing, elektrische fluxdichtheid
	temperatuurvereffeningscoëfficiënt		(geabsorbeerde) dosis
	versnelling	$\dot{D}$	dosistempo
$a(\lambda)$	(spectrale) absorptiecoëfficiënt	D_i	elektrische polarisatie
B	(magnetische) inductie, magnetische fluxdichtheid	D_T	thermodiffusiecoëfficiënt
		d	dikte
	susceptantie		middellijn
B_i	magnetische polarisatie		relatieve (massa)-dichtheid
b	breedte		verliesfactor
	impulsmoment	E	bestralingssterkte, irradiantie, ontvangen areieke stralingsenergiestroom
C	capaciteit		
	warmtecapaciteit		elasticiteitsmodulus
C_B	molecuulconcentratie van component B		elektrische veldsterkte
c	geluidsnelheid		elektromotorische kracht
	snelheid		energie
	electromagnetische golfsnelheid (lichtsnelheid) in vacuüm		(geluid)energiedichtheid
			inwendige energie
	soortelijke warmte(capaciteit)		verlichtingssterkte
	compliantie		

Tabel 1.16 (vervolg)

symbool	naam	symbool	naam
E_e	bestralingssterkte, irradiantie, ontvangen areëleke stralingsenergiestroom		warmteoverdrachtscoëfficiënt
		$\hbar$	constante van *Dirac*
		I	kwadratisch oppervlaktemoment
E_i	elektrisatie		(elektrische) stroom
E_k	kinetische energie		enthalpie
E_p	potentiële energie		(geluid)intensiteit
E_v	verlichtingssterkte		ionensterkte
e	elementaire lading		lichtsterkte
F	constante van *Faraday*		(massa)traagheidsmoment
	kracht		stoot, impuls
	omvatte stroom, magnetomotorische kracht		stralingssterkte, stralingsintensiteit, stralingsenergiestroom per ruimtehoek
	vrije energie		
Fo	kengrootheid van *Fourier*		
Fr	kengrootheid van *Froude*		
F_m	omvatte stroom, magnetomotorische kracht	I_e	stralingssterkte, stralingsintensiteit, stralingsenergiestroom per ruimtehoek
f	frequentie		
	soortelijke vrije energie		
	wrijvingscoëfficiënt	I_v	lichtsterkte
G	afschuivingsmodulus	i	soortelijke enthalpie
	geleiding, conductantie		traagheidsstraal
	gravitatieconstante	J	magnetische polarisatie
	gewicht		(massa)traagheidsmoment
	vrije enthalpie		stroomdichtheid
	warmtegeleiding	j	magnetisch dipoolmoment
Gr	kengrootheid van *Grashof*		
g	soortelijke vrije enthalpie	K	compressiemodulus
	versnelling van de vrije val		kerfslagwaarde
	zwaarteveldsterkte		warmtedoorgangscoëfficiënt
g_n	gestandaardiseerde zwaarteveldsterkte	k	cirkelrepetentie
			constante van *Boltzmann*
H	belichting		koppelfactor
	enthalpie		veerstijfheid
	magnetische veldsterkte		warmteqeleidingscoëfficiënt
h	constante van *Planck*		
	hoogte	L	geluiddrukniveau, geluiddrukpeil
	soortelijke enthalpie		

Tabel 1.16 (vervolg)

symbool	naam	symbool	naam
	impulsmoment	m_e	rustmassa van een elektron
	luminantie	m_n	rustmassa van een neutron
	overgangsenergie, overgangswarmte	m_p	rustmassa van een proton
	radiantie	m_u	(geünificeerde) atoommassaconstante
	zelfinductie, (elektrische), inductantie	N	aantal deeltjes, bijv. moleculen
$\dot{L}$	impulsmomentstroom		neutronental
L_A	verschil in amplitudeniveau	*Nu*	kengrootheid van *Nusselt*
L_e	radiantie	N_A	constante van *Avogadro*
L_P	verschil in vermogensniveau	n	brekingsindex
L_p	geluiddrukniveau, geluiddrukpeil		deeltjesdichtheid, volumiek aantal
L_v	luminantie		hoeveelheid stof
L_W	vermogensniveau, vermogenspeil		molecuuldichtheid, deeltjesdichtheid
l	lengte		rotatiefrequentie
	soortelijke overgangsenergie	P	actief vermogen, werkzaam vermogen
M	(licht)emittantie		(akoestisch) vermogen
	magnetisatie		elektrische polarisatie
	molaire massa		vermogen, energiestroom
	moment van kracht	P_q	reactief(blind-) vermogen
	stralingsemittantie	*Pr*	kengrootheid van *Prandtl*
	warmte-isolatiecoëfficiënt	p	druk, spanning
	wederkerige inductie		elektrisch dipoolmoment
Ma	kengrootheid van *Mach*		(van een molecuul)
M_e	stralingsemittantie		hoeveelheid beweging,
M_r	relatieve molecuulmassa (van een stof)		impuls (van een massa), momentum
M_v	(licht)emittantie		momentane geluiddruk
m	(elektro)magnetisch moment		(wisseldruk)
	massa	P_e	effectieve druk
$\dot{m}$	massastroom	$\dot{p}$	impulsstroom
m_B	molaliteit van component B in oplossing	p_s	statische druk, evenwichtsdruk

Tabel 1.16 (vervolg)

symbool	naam	symbool	naam
Q	(elektrische) lading	U	(elektrische) spanning,
	hoeveelheid licht		(elektrische) bron-
	hoeveelheid warmte		spanning, potentiaal-
	kwaliteitsfactor		verschil
	reactie-energie		energie
	stralingsenergie		inwendige energie
$\dot{Q}$	warmtestroom		magnetische spanning,
Q_e	stralingsenergie		magnetische bron-
Q_v	hoeveelheid licht		spanning, magnetisch
q	warmtestroomdichtheid		potentiaalverschil
q_m	massastroom	U_m	magnetische spanning,
q_V	volumestroom, (volume)-		magnetische bron-
	debiet		spanning, magnetisch
R	(elektrische) weerstand,		potentiaalverschil
	resistantie	u	(akoestische) momentane
	molaire gasconstante		deeltjessnelheid
	sterkte, belastinggrens,		snelheid
	rekgrens		soortelijke inwendige
	warmteweerstand		energie
Re	kengrootheid van	V	(elektrische) potentiaal
	Reynolds		(elektrische) spanning,
R_m	reluctantie		(elektrische) bron-
r	straal		spanning, potentiaal-
S	entropie		verschil
	lineair oppervlakte-		volume, inhoud
	moment, statisch	$\dot{V}$	volumestroom, (volume)-
	moment		debiet
	schijnvermogen	V_m	molair volume
	vector van *Poynting*		molair volume van ideaal
Sh	kengrootheid van		gas
	Sherwood	v	(akoestische) momentane
s	soortelijke entropie		deeltjesdichtheid
	weg(lengte)		snelheid
T	moment van koppel		specifiek volume
	periode(duur), trillings-		volumestroomdichtheid
	tijd	W	arbeid
	temperatuur		energie
$T_{1/2}$	halveringstijd		stralingsenergie
t	tijd		weerstandsmoment

Tabel 1.16 (vervolg)

symbool	naam
w	energiedichtheid
	snelheid
	stralingsenergiedichtheid
w_λ	spectrale stralingsenergiedichtheid (per qolflengte-interval)
X	exposie
	reactantie
$\dot{X}$	exposietempo
x_B	molaire fractie van component B
Y	admittantie
Z	atoomnummer, protonental
	impedantie
Z_a	akoestische impedantie
Z_m	mechanische impedantie
Z_s	specifieke akoestische impedantie
z	compressiebiliteitsfactor
α	dissociatiegraad
	hoekversnelling
	lineaire uitzettingscoëfficiënt
	verzwakkingscoëfficiënt
	warmteoverdrachtscoëfficiënt
$\alpha(\lambda)$	(spectrale) absorptiefactor
α_p	relatieve spanningscoëfficiënt
α_V	kubieke uitzettingscoëfficiënt
$\alpha, \beta, \ldots$	hoek (kleine Griekse letter naar keuze)
β	fasecoëfficiënt
	relatieve spanningscoëfficiënt
Γ	circulatie, wervelsterkte
γ	afschuiving, schuifhoek
	gravitatieveldsterkte
	kubieke uitzettingscoëfficiënt
	oppervlaktespanning
	soortelijke geleiding, conductiviteit
	verhouding c_p/c_V
	voortplantingscoëfficiënt
δ	dempingscoëfficiënt, decrescentie
	dikte
	verlieshoek
ε	emissiefactor
	permittiviteit, diëlektrische constante
	relatieve rek, (relatieve) dwarscontractie
$\varepsilon(\lambda)$	(spectrale) emissiefactor
ε_r	relatieve permittiviteit
ε_0	elektrische constante, permittiviteit van het vacuüm
ζ	weerstandscoëfficiënt
η	(dynamische) viscositeit,
θ	temperatuur
ϑ	relatieve volumevergroting
κ	compressibiliteit
	crescentie
	magnetische susceptibiliteit
Λ	permeantie
Λ_m	molaire geleiding
λ	arbeidsfactor
	golflengte
	lineaire uitzettingscoëfficiënt
	gemiddelde vrije weglengte

Tabel 1.16 (vervolg)

symbool	naam	symbool	naam
	warmtegeleidingscoëfficiënt		normaalspanning
	weerstandsfactor voor pijpen		oppervlaktespanning
			repetentie
μ	permeabiliteit		soortelijke geleiding, conductiviteit
	Poisson-verhouding		
	wrijvingscoëfficiënt		spreidingscoëfficiënt, lekfactor
$\mu(\lambda)$	(lineieke)(spectrale) verzwakkingscoëfficiënt		vlakteladingsdichtheid
	end of page	τ	schuifspanning
μ_B	chemische potentiaal van component **B**		tijdconstante
		$\tau(\lambda)$	(spectrale) transmissiefactor
μ_r	relatieve permeabiliteit	Φ	fluïditeit
μ_0	magnetische constante, permeabiliteit van het vacuüm		lichtstroom
			magnetische flux
ν	frequentie		massastroomdichtheid
	kinematische viscositeit		snelheidspotentiaal, potentiaalfunctie
	Poisson-verhouding		
Π	osmotische druk		stralingsflux, stralingsenergiestroom
ϱ	(massa)dichtheid, volumieke massa, massa per volume		warmtestroom
		Φ_e	stralingsflux, stralings energiestroom
	soortelijke weerstand, resistiviteit	Φ_v	lichtstroom
	volumieke lading, (ruimtelijke) ladingsdichtheid	φ	(elektrische) potentiaal
			faseverschil, faseverschuiving
$\varrho(\lambda)$	(spectrale) reflectiefactor		stralingsfluxdichtheid
ϱ_A	areïeke massa, massa per oppervlakte	χ, χ_e	elektrische susceptibiliteit
		χ_m	magnetische susceptibiliteit
ϱ_B	(massa)concentratie van component B	Ψ	elektrische flux
		Ω	ruimtehoek
ϱ_l	lineïeke massa, massa per lengte	ω	cirkelfrequentie, pulsatie
			hoeksnelheid
σ	constante van *Stefan-Boltzmann*		ruimtehoek

2 Romeinse cijfers

I = 1	VI = 6	L = 50
II = 2	VII = 7	C = 100
III = 3	VIII = 8	D = 500
IV = 4	IX = 9	M = 1000
V = 5	X = 10	

Bij het samenstellen van een getal gelden de volgende regels:
- *Waardevergroting* krijgt men door *achter* een cijfer één (of meer) cijfer(s) met gelijke of kleinere waarde te zetten.
- *Waardevermindering* krijgt men door *vóór* een cijfer één cijfer met kleinere waarde te zetten.
- Bij verdere samenstelling neemt de waarde van cijfers of cijfercombinaties van links naar rechts af.

Voorbeelden:
1692 = MDCXCII
1989 = MCMLXXXIX
1997 = MCMXCVII of MXMVII

3 Griekse lettertekens

Tabel 3.1 Eenvoudige en duidelijke tekens voor de Griekse letters, toe te passen in drukwerk en bij het schrijven met sjablonen, redispennen e.d. (de letters zijn gebaseerd op de klassieke Griekse lettertekens)

drukletters		sjabloonletters		naam
hoofd-letter	kleine letter	hoofd-letter	kleine letter	
Α	α	Α	α	alfa
Β	β	Β	β	bêta
Γ	γ	Γ	γ	gamma
Δ	δ	Δ	δ	delta
Ε	ε	Ε	ε	epsilon
Ζ	ζ	Ζ	ζ	zêta
Η	η	Η	η	êta
Θ	θ,ϑ	Θ	ϑ	thêta
Ι	ι	Ι	ι	iôta
Κ	κ	Κ	κ	kappa
Λ	λ	Λ	λ	lambda
Μ	μ	Μ	μ	mu
Ν	ν	Ν	ν	nu
Ξ	ξ	Ξ	ξ	xi(ksi)
Ο	ο	Ο	ο	omikron
Π	π	Π	π	pi
Ρ	ρ,ϱ	Ρ	ϱ	rhô
Σ	σ	Σ	σ	sigma
Τ	τ	Τ	τ	tau
Υ	υ	Υ	υ	upsilon
Φ	φ, ϕ	Φ	φ	fi
Χ	χ	Χ	χ	chi[1)]
Ψ	ψ	Ψ	ψ	psi
Ω	ω	Ω	ω	omega

[1)] De *ch* uitspreken als in het woord '*schat*'.

Literatuur

- Bosschaart, J.
  Grootheid = getal × eenheid
  Uitgave Nederlandse Ingenieursvereniging (NIRIA)
- *International Standard (ISO) 1000*
  SI Units and recommandations for the use of their multiples and of certain other units.
- Male, J. van
  SI Vademecum
  Amsterdam, Elsevier.
- Parmley, R.O.
  Field Engineer's Manual
  New York, McGraw-Hill.
- *NEN 999, Het Internationaal Stelsel van Eenheden (SI)*
  Delft, Nederlands Normalisatie-instituut (NNI).
- *NEN 1000, Regels voor het hanteren van het Internationaal Stelsel van Eenheden (SI)*
  Delft, Nederlands Normalisatie-instituut (NNI).
- *NEN 3049, Herleiding van eenheden tot SI-eenheden*
  Delft, Nederlands Normalisatie-instituut (NNI).
- *NEN 3069, Grootheden, eenheden en getallen; schrijf- en zetwijzen*
  Delft, Nederlands Normalisatie-instituut (NNI).
- *Winkler Prins Technische Encyclopedie*
  Amsterdam/Brussel, Elsevier.

Wiskunde A2

1 Symbolen en tekens

2 Algebra en rekenkunde
- 2.1 Hoofdbewerkingen
- 2.2 Vergelijkingen
- 2.3 Rijen en reeksen
- 2.4 Functies
- 2.5 Limieten
- 2.6 Complexe rekenwijze
- 2.7 Afronden en nauwkeurigheid

3 Meetkunde
- 3.1 Coördinaten en hoeken
- 3.2 Driehoeken
- 3.3 Vierhoeken
- 3.4 Veelhoeken
- 3.5 Cirkels
- 3.6 Omtrek, oppervlakte, inhoud

4 Gonio- en trigonometrie, boldriehoeksmeting
- 4.1 Goniometrie
- 4.2 Trigonometrie (vlakke driehoeksmeting)
- 4.3 Boldriehoeksmeting

5 Analytische meetkunde

6 Differentiaal- en integraalrekening
- 6.1 Differentiaalrekening
- 6.2 Integraalrekening
- 6.3 Toepassingen integraalrekening
- 6.4 Gewone differentiaalvergelijkingen
- 6.5 Partiële differentiaalvergelijkingen

7 Transformaties (Fourier, Laplace)
7.1 Fourier-analyse
7.2 Fourier-transformatie
7.3 Laplace-transformaties
7.4 z-transformaties
7.5 Analyse van enkele golfvormen

8 Lineaire algebra
8.1 Matrices
8.2 Matrixrekening
8.3 Determinanten
8.4 Lineaire (deel) ruimten, lineaire transformaties
8.5 Eigenwaarden, eigenvectoren
8.6 Lineaire vergelijkingen
8.7 Kwadratische vormen, kwadratische oppervlakken

9 Vectoralgebra en -analyse
9.1 Vectoren
9.2 Vectoralgebra
9.3 Vectoranalyse

10 Numerieke wiskunde
10.1 Schatting nulpunten
10.2 Interpolatie, differentiatie en integratie
10.3 Differentiaalvergelijkingen
10.4 Lineaire vergelijkingen

1 Symbolen en tekens

Tabel 1.1 Symbolen en tekens in de wiskunde

teken of symbool	betekenis	toepassing/toelichting
$=$	gelijk aan	$a = b$
$\neq$	niet gelijk aan	$a \neq b$
$\equiv$	identiek met	$x \equiv t$; de variabele x is identiek met de tijdvariabele t (niet gebruiken in de betekenis van 'gelijk per definitie', zie hierna)
$\triangleq$	correspondeert met	als 1 cm op de kaart overeenkomt met 10 km in het terrein : 1 cm $\triangleq$ 10 km
$:= (\stackrel{\text{def}}{=})$	is gedefinieerd als *of* per definitie gelijk aan	$a := b$ a wordt gedefinieerd door b; in enkele programmeertalen gebruikt als toekenningsteken : a wordt (krijgt de waarde van) b
$\approx$	ongeveer gelijk aan	$a \approx b$
$\simeq (\sim)$	asymptotisch gelijk	$a \simeq b$
$\sim (\propto)$	evenredig met ook : gelijkvormig	$a \sim b$
$\rightarrow$	nadert (tot)	$x \stackrel{\lim}{\rightarrow} 0$
$<$	kleiner dan	$a < b$
$>$	groter dan	$a > b$
$\leqq (\leqslant)$	kleiner dan of gelijk aan	$a \leqq b$
$\geqq (\geqslant)$	groter dan of gelijk aan	$a \geqq b$ } $\leqq$ en $\geqq$ voorkeur
$\lll$	veel kleiner dan	$a \lll b$
$\ggg$	veel groter dan	$a \ggg b$
$\{\ \}$	aanduiding verzameling	$V = \{a,b,c\}$
$\in$	element verzameling	$3 \in \{\text{oneven getallen}\}$
$\mid$	waarvoor geldt dat	$\{x \in V \mid p(x)\}$
$\notin$	geen element verzameling	$4 \notin \{\text{oneven getallen}\}$
$\subset$	deelverzameling	$\{3,4\} \subset \{1,2,3,4,5\}$

Tabel 1.1 (vervolg)

teken of symbool	betekenis	toepassing/toelichting
$\cap$	doorsnede (twee verzamelingen zijn *disjunct* wanneer hun doorsnede leeg is)	$\{1,2,3,4\}\cap\{3,4,5\}=\{3,4\}$
$\cup$	vereniging	$\{1,2,3\}\cup\{1,3,5\}=\{1,2,3,5\}$
Ω	universum (bij kansverdeling: uitkomstenruimte)	
$\emptyset$	lege verzameling	$\emptyset=\{\ \}$; als $l\cap V=\emptyset$ is $l/\!/V$
\	verschilverzameling	$\{0,1,2,3,4,5\}\backslash\{1,3,5\}=\{0,2,4\}$
...	enzovoort	$\mathbb{N}=\{0,1,2,3,4,\ldots\}$
$\wedge$	en	$x\in\mathbb{N}\wedge x>5$
$\vee$	of	$a\in A\vee a\in B$
...$\Rightarrow$...	als..., dan...	$a=2\Rightarrow a^2=4$
...$\Leftrightarrow$...	als..., dan...en omgekeerd dan en slechts dan als	a is veelvoud van $b\Leftrightarrow b$ is deler van a
[...]	gesloten interval	[2, 5] het interval van 2 tot 5 met inbegrip van 2 en 5
[...$\rangle$	interval, aan één zijde open, aan één zijde gesloten	[2, 5$\rangle$ 2 hoort er wél bij; 5 niet
$\langle$...]	idem	$\langle$2, 5] 2 hoort er niet bij; 5 wél
$\langle$...$\rangle$	aan beide zijden open interval	$\langle$2, 5$\rangle$ 2 en 5 horen er niet bij
$+$	optellen, som	$a+b$
$-$	aftrekken, verschil	$a-b$
$\cdot$ of $\times$	vermenigvuldigen, product	$a\cdot b$ of $a\times b$ of ab
: of— of /	delen, quotiënt	$a:b$ of $\dfrac{a}{b}$ of a/b
*	convolutie	$x*y$
| |	modulus of absolute waarde	$\lvert-5\rvert=5$ en $\lvert5\rvert=5$
Σ	sigma- of somteken	$\sum_{n=1}^{4} n^2=1^2+2^2+3^2+4^2$
Π	pi- of productteken	$\Pi_{n=1}^{4}a_n=a_1\times a_2\times a_3\times a_4$

Tabel 1.1 (vervolg)

teken of symbool	betekenis	toepassing/toelichting
!	faculteit	$4! = 1 \times 2 \times 3 \times 4$
$\binom{n}{k}$	n boven k : $\frac{n!}{k!(n-k)!}$	$\binom{3}{2} = \frac{3!}{2! \cdot 1!} = 3$
$\infty(\sim)$	oneindig groot	
$\mathbb{N}$	verzameling natuurlijke getallen met nul	$\mathbb{N} = \{0,1,2,3,\ldots\}$
$\mathbb{N}^+$	verzameling natuurlijke getallen zonder nul	$\mathbb{N}^+ = \{1,2,3,\ldots\}$
$\mathbb{Z}$	verzameling gehele getallen	$\mathbb{Z} = \{0, -1, 1, -2, 2, -3, 3, \ldots\}$
$\mathbb{Z}^+$	verzameling positieve gehele getallen	$\mathbb{Z}^+ = \{ x \in \mathbb{Z} \mid x > 0\}$
$\mathbb{Z}^-$	verzameling negatieve gehele getallen	$\mathbb{Z}^- = \{x \in \mathbb{Z} \mid x < 0\}$
$\mathbb{Q}$	verzameling rationale getallen	$\mathbb{Q} = \left\{ \frac{p}{q} \mid p \in \mathbb{Z} \wedge q \in \mathbb{N}^+ \right\}$
$\mathbb{Q}^+$	verzameling positieve rationale getallen	$\mathbb{Q}^+ = \{x \in \mathbb{Q} \mid x > 0\}$
$\mathbb{Q}^-$	verzameling negatieve rationale getallen	$\mathbb{Q}^- = \{x \in \mathbb{Q} \mid x < 0\}$
$\mathbb{R}$	verzameling reële getallen	alle elementen uit $\mathbb{R}$ zijn op getallenrechte af te beelden
$\mathbb{R}^+$	verzameling positieve reële getallen	$\mathbb{R}^+ = \{x \in \mathbb{R} \mid x > 0\}$
$\mathbb{R}^-$	verzameling negatieve reële getallen	$\mathbb{R}^- = \{x \in \mathbb{R} \mid x < 0\}$
$\mathbb{R}_0^+$	verzameling positieve reële getallen met nul	$\mathbb{R}_0^+ = \{x \in \mathbb{R} \mid x \geqslant 0\}$
$\mathbb{R}_0^-$	verzameling negatieve reële getallen met nul	$\mathbb{R}_0^- = \{x \in \mathbb{R} \mid x \leqslant 0\}$
$\mathbb{C}$	verzameling complexe getallen	$\mathbb{R} \subset \mathbb{C}$
(a, b)	geordend paar	
$\{a, b\}$	ongeordend paar	

Tabel 1.1 (vervolg)

teken of symbool	betekenis	toepassing/toelichting
$A \times B$	cartesisch product van de verzamelingen A en B	$A \times B = \{(a,b) \mid a \in A \wedge b \in B\}$ $A = \{-2,0,1\}; B = \{1,2\}$ $A \times B = \{(-2,1),(-2,2),(0,1),(0,2),(1,1),(1,2)\}$
$f: x \to \ldots$	aanduiding voor functies van één variabele	$f: x \to x^2$
of $f = \{(x,y) \in V \times W \mid \ldots\}$ of $f(x)$, $x \in V$		of $f = \{(x,y) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \mid y = x^2\}$ of $f(x) = x^2$, $x \in \mathbb{R}$
D_f	domein van de functie f	als $f(x) = \sqrt{1-x^2}, x \in \mathbb{R}$; dan
B_f	bereik van de functie f	$D_f = [-1,1]$en; $B_f = [0,1]$
f^{inv}	inverse functie van f	$f(x) = \mathrm{e}^x$; $f^{\text{inv}}(x) = \ln x$
$\sqrt{\ }$	wortel (tweedemachtswortel)	$\sqrt{a} = x \Leftrightarrow a = x^2, x \geqslant 0$; $\sqrt{a^2} = \lvert a \rvert$
$\sqrt[n]{\ }$	n^{e}-machtswortel	$\sqrt[n]{a} = b \Leftrightarrow b^n = a$
$\log_g x$	logaritme van x voor grondtal g	$\log_g b = \mathrm{a} \Leftrightarrow g^a = b$
$\ln x$	natuurlijke logaritme van x (grondtal e)	
$\log x$	logaritme van x voor grondtal 10	komen voor in de log-tafel : Briggse logaritmen
$\lim_{x \to a} f(x)$	limiet, de waarde waartoe $f(x)$ nadert, als x tot a nadert	$\lim_{x \to 1} \dfrac{2(x^2-1)}{x-1} = 4$
$\lim_{x \uparrow a} f(x)$	linker limiet, $x \to a$ én $x < a$	$\lim_{x \uparrow 1} \dfrac{x-1}{\lvert x-1 \rvert} = -1$
$\lim_{x \downarrow a} f(x)$	rechter limiet, $x \to a$ én $x > a$	$\lim_{x \downarrow 1} \dfrac{x-1}{\lvert x-1 \rvert} = -1$
//	evenwijdig met	l // m
#	evenwijdig met en gelijk aan	$a \# b$
$\perp$	loodrecht op	$l \perp m$; AB $\perp$ BC
$\sim$	gelijkvormig met	$\Delta ABC \sim \Delta PQR$
$\cong$	congruent met	$\Delta ABC \cong \Delta PQR$
Δ	driehoek	ΔABC

Tabel 1.1 (vervolg)

teken of symbool	betekenis	toepassing/toelichting
$\angle$	hoek	$\angle ABC$; $\angle A$; $\angle (l, m)$
$\llcorner$ $\llcorner$ $\llcorner$	rechte hoek	
$^\circ$ $'$ $''$	graad, minuut en seconde	$60^\circ\ 13'\ 14''$
rad	radiaal	π rad $= 180^\circ$
$P(x, y)$	punt P met coördinaten x en y	$P(3, 2)$: $x = 3$ en $y = 2$
S_l	spiegeling in lijn l	$A' = S_l(A)$
S_P	spiegeling in punt P	$A' = S_P(A)$
S_V	spiegeling in vlak V	$A' = S_V(A)$
$D_{O;+\alpha}$	draaiing om punt O van α graden links om	$A' = D_{O;+\alpha}(A)$
T_{PQ}	translatie over een verschuivings-vector PQ	$A' = T_{PQ}(A)$
$\circ$	operatieteken voor en na elkaar uitvoeren van transformaties	$(S_l \cdot S_m)(A) = S_l(S_m(A)) =$ spiegeling in l na een spiegeling in m
$V_{O,k}$	vermenigvuldiging vanuit punt O met factor k	$V_{O,k}(AB) = (A'B')$, waarin $A'B' = k \cdot AB$
$\rightarrow$	vector	$\overrightarrow{AB}$ is een vector met grootte AB en richting A$\rightarrow$B
$\boldsymbol{a}$	vectoraanduiding	$\boldsymbol{a}$ is een vectoriële grootheid
$\odot$	cirkel	$\odot(M;r)$ = cirkel met middelpunt M en straal r
bg (of $\cap$)	boog	bg AB (of $\cap AB$) is boog AB
Δ	differentie of absolute fout	$\Delta f(x) = f(x + \Delta x) - f(x)$ $a \pm \Delta a$
δ	relatieve fout	$\delta a = \dfrac{\Delta a}{a}$
f' of $\dfrac{df(x)}{dx}$ of $\dfrac{dy}{dx}$	eerste afgeleide	bijv. $y = x^2, \dfrac{dy}{dx} = 2x$
$f^{(n)}$ of $\dfrac{d^n f(x)}{dx^n}$ of $\dfrac{d^n y}{dx^n}$	hogere afgeleide	bijv. $y = x^2, \dfrac{d^2 y}{dx^2} = 2$

Tabel 1.1 (vervolg)

teken of symbool	betekenis	toepassing/toelichting
$df(x)$ of dy	differentiaal	$df(x) = f'(x)dx$ $dx^2 = 2x\,dx$
$\frac{\partial z}{\partial x}$	partiële afgeleide	bijv. $z = x^2y^3$; $\frac{\partial z}{\partial x} = 2xy^3; \frac{\partial z}{\partial y} = 3x^2y^2$
dz	totale differentiaal	$dz = \frac{\partial z}{\partial x}dx + \frac{\partial z}{\partial y}dy$
$\int$	integraalteken	$\int f(x)dx = F(x) + C(C \in \mathbb{R})$, $\frac{dF}{dx} = f(x)$
$\int_b^a$	bepaalde integraal tussen de grenzen a en b	$\int_0^4 dx = x\|_0^4 = 4 - 0 = 4$
$\oint_{\mathscr{C}}$	kringintegraal langs contour $\mathscr{C}$	
$\oiint_{\mathscr{S}}$	integraal over gesloten oppervlak $\mathscr{S}$	
$\iint, \iiint$	herhaalde integratie (over 2 resp. 3 variabelen)	
z^* (soms $\bar{z}$)	complex toegevoegde van z	$z = 1 + i3$; $z^* = 1 - i3$ ($\bar{z}$ liever niet gebruiken)
$\mathrm{Re}(z)$	reële deel van z	$\mathrm{Re}(1 + 2i) = 1$
$\mathrm{Im}(z)$	imaginaire deel van z	$\mathrm{Im}(1 + 2i) = 2$
arg	argument	$\varphi = \arg(z) \in \langle -\pi, \pi]$ $\varphi = \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(x)}{\mathrm{Re}(x)}\right)$ $= \arctan\left(\frac{2}{1}\right) \approx 64^\circ$

Tabel 1.1 (vervolg)

teken of symbool	betekenis	toepassing/toelichting
∇	nabla-'vector'	$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$
grad	gradiënt van	grad $\varphi = \nabla\varphi$
div	divergentie van	div $\boldsymbol{v} = \nabla \cdot \boldsymbol{v}$
rot	rotatie van	rot $\boldsymbol{w} = \nabla \times \boldsymbol{w}$
Δ of $\nabla \cdot \nabla$	Laplace-operator	$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$
$\mathfrak{L}\{\ \}$	Laplace-getransformeerde	
$\mathfrak{F}\{\ \}$	Fourier-getransformeerde	
det(A) of $\lvert A \rvert$	determinant van matrix A	
$\forall$	universele kwantor: voor alle elementen uit de gegeven verzameling geldt	$\underset{p \in \mathbb{R}}{\forall}[a > b \Leftrightarrow a + p > b + p]$
$\exists$	existentie-kwantor: voor minstens één element van de verzameling geldt	$\exists_{x \in \mathbb{R}}[(-1)^x = 1]$
$\exists!$	unieke existentie-kwantor: voor juist één element geldt	$\exists!_{x \in \mathbb{R}}[(1+x)(1-x) = 1 + x^2]$
e	grondtal natuurlijke logaritme	$= 2{,}718\ 281\ 828$
π	verhouding omtrek en middellijn cirkel	$= 3{,}141\ 592\ 654$

2 Algebra en rekenkunde

2.1 Hoofdbewerkingen

Wetten bij algebraïsche bewerkingen
Commutatief: $a+b=b+a$; $ab=ba$
Associatief: $a+(b+c)=(a+b)+c$; $a\ (bc)=(ab)\ c$
Distributief: $c(a+b)=ca+cb$

Breuken

$$\frac{a}{b}\pm\frac{c}{d}=\frac{ad\pm bc}{bd};\frac{a}{b}\times\frac{c}{d}=\frac{ac}{bd};\frac{a}{b}:\frac{c}{d}=\frac{a}{b}\times\frac{d}{c}=\frac{ad}{bc}$$

Exponenten $(m,\ n\ \in\ \mathbb{R}\wedge a\ \in\ \mathbb{R})$
Mits de voorkomende machten bestaan geldt:

$$a^m\times a^n=a^{m+n};(a^m)^n=a^{mn};(ab)^m=a^mb^m$$

Voor $a\neq 0$ *geldt*:

$$a^0=1;\quad a^{-m}=\frac{1}{a^m};\quad a^m:a^n=a^{m-n}$$

$0^p\ (p\in\mathbb{N}^+)=0\quad(0^0$ kan soms 1 zijn)
Als $m\notin\mathbb{N}^+$ heet a^m een *oneigenlijke macht* van a.

Wortels (hoofdwaarden)

$$\sqrt[n]{}=a^{1/n};\sqrt[m]{\sqrt[n]{}}a=\sqrt[mn]{}a;\sqrt[n]{-a}=-\sqrt[n]{}a\ (n\text{ oneven},a\geq 0)$$
$$a^{m/n}=\sqrt[n]{a^m}(a>0;\text{soms } a<0)$$

Ongelijkheden

$$\forall_{p\in\mathbb{R}}[a>b\Leftrightarrow a+p>b+p]\qquad\forall_{p\in\mathbb{R}^-}[a>b\Leftrightarrow pa<pb]$$
$$\forall_{p\in\mathbb{R}^+}[a>b\Leftrightarrow pa>pb]\qquad\forall_{a,b\in\mathbb{R}^+}\left[\frac{1}{a}>\frac{1}{b}\Leftrightarrow a<b\right]$$
$$\forall_{a,b\in\mathbb{R}^+}[a>b\Leftrightarrow a^2>b^2]\qquad\forall_{a,b\in\mathbb{R}^-}[a<b\Leftrightarrow a^2>b^2]$$
$$\forall_{a,b\in\mathbb{R}}[|a|>|b|\Leftrightarrow a^2>b^2]$$

Logaritmen

Twee gebruikelijke grondtallen:

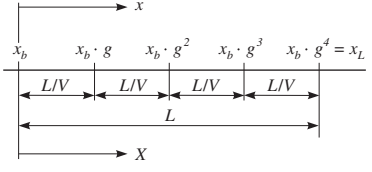
- 10 voor Briggse logaritme, notatie $\log_{10} x = \log x$
- e voor natuurlijke logaritme, notatie $\log_e x = \ln x$ $(e = 2{,}7182818\ldots)$

$$\log x = (0{,}4343\ldots) \cdot \ln x \text{ en } \ln x = (2{,}3026\ldots) \cdot \log x$$

Opmerking. In sommige Amerikaanse literatuur worden de notaties $\log x$ en $\ln x$ verwisseld t.o.v. de Europese notatievorm.

$$\log_g a = x \Leftrightarrow g^x = a \text{ oftewel } g^{\log_g a} = a \qquad (a \in \mathbb{R}^+; g \in \mathbb{R}^+; g \neq 1)$$
$$\log_g ab = \log_g a + \log_g b \qquad (a > 0 \wedge b > 0)$$
$$\log_g \tfrac{a}{b} = \log_g a - \log_g b \qquad (a > 0 \wedge b > 0)$$
$$\log_g a^n = n \log_a a \qquad (n \in \mathbb{R} \wedge a > 0)$$
$$\log_g a = \frac{\log_p a}{\log_p g} \qquad (p \in \mathbb{R}^+ \backslash \{1\} \wedge a > 0)$$

Logaritmische as



uit te zetten waarden voor een grootheid x, bijv. frequentie in Hz

bijbehorende afstanden op de logaritmische schaal, bijv. in cm

x = uit te zetten grootheid

X = afstand vanaf beginpunt schaal

x_b = beginwaarde uitgezette schaal

$x_L = x_b \cdot g^n$ = eindwaarde uitgezette schaal

L = totale lengte schaal

$V = \log_g \left(\frac{x_L}{x_b}\right)$

g = grondtal logaritme

Uitzetten van de waarde $x (x_b \leqslant x \leqslant x_L)$:

$$X = \frac{L}{V} \log_g \left(\frac{x}{x_b}\right)$$

Aflezen van waarde behorende bij afstand X vanaf beginpunt:

$$x = x_b \cdot g^{[X/(L/V)]}$$

Voorbeeld ($x_b = 20$ Hz; $x_L = 320$ Hz; $g = 2$; $L = 12$ cm)

— Uitzetten van $x = 90$ Hz:

$$\begin{aligned} V &= \log_g\left(\frac{x_L}{x_b}\right) = \log_2\left(\frac{320}{20}\right) = 4 \\ X &= \frac{L}{V}\log_g\left(\frac{x}{x_b}\right) = \frac{12}{4}\log_2\left(\frac{90}{20}\right) \\ &= 6,51 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\log_2(a) = \frac{\log_{10}(a)}{\log_{10}(2)}$$

– Aflezen van x op afstand 6,51 cm:

$$x = x_b \cdot g^{[X/(L/V)]} = 20 \cdot 2^{[6,51/(12/4)]} = 90 \text{ Hz}$$

Merkwaardige producten

$$(a+b)(a-b) = a^2 - b^2$$
$$(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$$
$$(a+p)(a+q) = a^2 + (p+q)a + pq$$
$$(a \pm b)(a^2 \mp ab + b^2) = a^3 \pm b^3$$

Merkwaardige quotiënten

$$\frac{a^{2n+1} + b^{2n+1}}{a+b} = \sum_{k=0}^{2n} (-1)^k a^{2n-k} b^k$$

$$\frac{a^{2n} - b^{2n}}{a+b} = \sum_{k=0}^{2n-1} (-1)^k a^{2n-k-1} b^k$$

$$\frac{a^n - b^n}{a-b} = \sum_{k=0}^{n-1} a^{n-k-1} b^k$$

Binomium van Newton

$$(a+b)^n = \sum_{k=0}^{n} \binom{n}{k} a^{n-k} b^k (n,k \in \mathbb{N})$$

De *binomiaal-coëfficiënten* worden genoteerd als:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}; n,k \in \mathbb{N}, n \geqslant k$$

De binomiaal-coëfficiënten kunnen als volgt worden gerangschikt (*driehoek van Pascal*):

$n=0$	$\binom{0}{0}$	1
$n=1$	$\binom{1}{0}\binom{1}{1}$	1 1
$n=2$	$\binom{2}{0}\binom{2}{1}\binom{2}{2}$	1 2 1
$n=3$	$\binom{3}{0}\binom{3}{1}\binom{3}{2}\binom{3}{3}$	1 3 3 1
$n=4$	$\binom{4}{0}\binom{4}{1}\binom{4}{2}\binom{4}{3}\binom{4}{4}$	1 4 6 4 1

enz.

Voorbeeld: $(a+b)^3 = a^3 + 3a^2\ b + 3ab^2 + b^3$

2.2 Vergelijkingen

Lineaire (eerste graads)vergelijkingen met één onbekende

$$5x + 3 = 2x + 9$$

Termen met x links;bekende termen rechts:

$$5x = 2x = 9 - 3; 3x = 6; x - 2$$

Oplossingsverzameling: $\{2\}$

Twee lineaire vergelijkingen met twee onbekenden

Eliminatiemethode:

$$\begin{cases} 3x + y = 2 \mid 2 \\ -2x - 3y = 1 \mid 3 \end{cases} \quad \begin{array}{r} 6x + 2y = 4 \\ -6x - 9y = 3 \\ \hline -7y = 7 \end{array} +$$

Oplossingsverzameling: $\{(x, y) \mid x = 1;\ y = -1\} = \{(1, -1)\}$

Substitutiemethode:

$x = (2 - y)/3$ geeft in de tweede vergelijking

$-2(2 - y)/3 - 3y = 1$ of $-4 + 2y - 9y = 3$ enz

n lineaire vergelijkingen met n onbekenden

Hier een aantal malen de eliminatiemethode toepassen. Zie ook par. 8.6, regel van Cramer.

Kwadratische vergelijking (vierkantsvergelijking/ tweedegraadsvergelijking)

$$ax^2 + bx + c = 0$$

Discriminant: $D = b^2 - 4ac$

Als $D > 0$ twee verschillende oplossingen in $\mathbb{R}$

$D = 0$ twee gelijke oplossingen in $\mathbb{R}$

$D < 0$ geen oplossingen in $\mathbb{R}$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Som van de oplossingen: $x_1 + x_2 = -b/a$

Product van de oplossingen: $x_1 \cdot x_2 = c/a$

Hogere graadsvergelijking ($n \in \mathbb{N}^+$)

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \ldots + a_1 x + a_0 = 0$$

Verkorte schrijfwijze:

$$\sum_{k=0}^{n} a_k x^k = 0 \quad (k \in \mathbb{N})$$

Voor $n > 3$ bestaat er geen algemene expliciete oplossing.

Wederkerige vergelijking:

$$a_0x^{2n} + a_1x^{2n-1} \ldots + a_1x + a_0 = 0$$

Te reduceren door $x + \dfrac{1}{x} = y$ te stellen.

Gewone binomiaal-vergelijking: $x^n = 1$ $\qquad (n \in \mathbb{N}^+)$

Oplossingsverzameling:

$$x_k = \cos\frac{k \cdot 2\pi}{n} + i \sin\frac{k \cdot 2\pi}{n} \qquad (k = 0, 1, 2, \ldots, n-1)$$

2.3 Rijen en reeksen

Rekenkundige rijen (r.r.)
Als S_n de som is van a, $a+v$, $a+2v$, … l (n termen), dan geldt:

$$l = a + (n-1)v \quad S_n = \tfrac{1}{2}n(a+l) = \tfrac{1}{2}n\{2a + (n-1)v\}$$

S_n is dus een kwadratische functie van n die de r.r. bepaalt.

Meetkundige rijen (m.r.)
Als S_n de som is van a, ar, ar^2, … l (n termen) dan geldt:

$$l = ar^{n-1}, S_n = \frac{rl - a}{r-1} = \frac{a(r^n - 1)}{r-1} = \frac{a}{1-r} - \frac{ar^n}{1-r}$$

r is de reden.
Als $|\ r\ | < 1$, terwijl n oneindig groot wordt, geldt:

$$S = \lim_{n\to\infty} S_n = \frac{a}{1-r}$$

Harmonische rijen (h.r.)
De omgekeerden van de termen van een rekenkundige rij vormen een harmonische rij.
Verband tussen de drie opvolgende termen t_k, t_{k+1} en t_{k+2}:

$$(t_k - t_{k+1}) : (t_{k+1} - t_{k+2}) = t_k : t_{k+2}$$

n^{e} term t_n:

$$t_n = \frac{t_1 t_2}{(n-1)t_1 - (n-2)t_2}$$

Gemiddelden

Getallen: $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$

R = rekenkundig gemiddelde $= \dfrac{a_1 + a_2 + \ldots + a_n}{n}$

M = meetkundig gemiddelde $= (a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \ldots \cdot a_n)^{1/n}$
(elke $a > 0$)

H = harmonisch gemiddelde (elke $a_k > 0$):

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{n}\left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \ldots + \frac{1}{a_n}\right)$$

Voorbeeld: $n = 2; R = \dfrac{a_1 + a_2}{2}; M = \sqrt{a_1 a_2}$

$$H = \frac{2a_1 a_2}{a_1 + a_2} \Rightarrow M^2 = R \times H$$

Machtreeksen

Reeksontwikkeling functies (met convergentievoorwaarde).

Algemene vorm: $a_0 + a_1\, x + a_2\, x^2 + a_3\, x^3 + \ldots$; of: $\displaystyle\sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots \qquad (|x| < \infty)$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots \qquad (|x| < \infty)$$

$$\tan x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \frac{17x^7}{315} + \ldots \qquad (|x| < \tfrac{1}{2}\pi)$$

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots \qquad (|x| < \infty)$$

$$a^x = e^{mx} = 1 + \frac{m}{1!}x + \frac{m^2}{2!}x^2 + \frac{m^3}{3!}x^3 + \ldots \qquad (a>0, |x|<\infty)$$
$$m = \ln a$$

$$(1+x)^p = 1 + \binom{p}{1}x + \binom{p}{2}x^2 + \binom{p}{3}x^3 + \ldots \qquad (|x| < 1)$$

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \ldots \qquad (|x| < 1)$$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \ldots \qquad (-1 < x \leqq 1)$$

Reeks van Taylor

$$f(a+h) = f(a) + hf'(a) + \frac{h^2}{2!}\cdot f''(a) + \ldots + \frac{h^n f^{(n)}(a)}{n!} + R_n$$
$$R_n = \frac{h^{n+1}}{(n+1)!}f^{(n+1)}(a+\theta h) \quad (0 < \theta < 1)$$

Voor $a = 0$ wordt de reeks van Taylor ook wel de reeks van McLaurin genoemd.

2.4 Functies

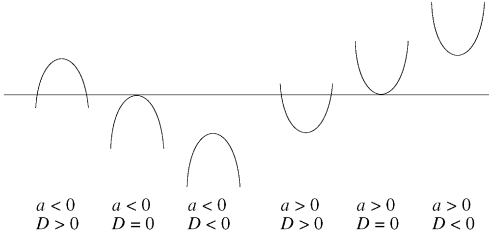
Lineaire (eerstegraads) functie : $f(x) = ax + b$
$(a \neq 0 \text{ en } a, b, x \in \mathbb{R})$

$l : y = a_1x + b_1$; $\quad m : y = a_2x + b_2$.
$l \| m$ als $a_1 = a_2$; $\quad l \perp m$ als $a_1a_2 = -1$.

Kwadratische (tweedegraads) functie : $f(x) = ax^2 + bx + C$
$(a \neq 0 \text{ en } a, b, c, x \in \mathbb{R})$
$D = b^2 - 4ac$

De grafiek is een *parabool* met verticale as.

Standen t.o.v. de X-as :

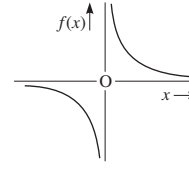


Gebroken functies

$$f(x) = \frac{1}{x}$$

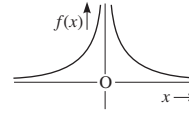
$(x \in \mathbb{R}); x \neq 0$

orthogonale hyperbool



$$f(x) = \frac{1}{x^2}$$

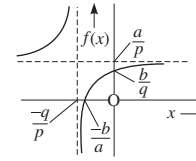
$(x \in \mathbb{R}; x \neq 0)$



$$f(x) = \frac{ax + b}{px + q}$$

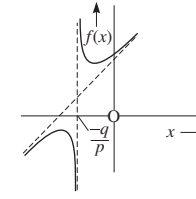
$$\left(a, b, p, q, x \in \mathbb{R}; p \neq 0 \text{ en} \frac{a}{p} \neq \frac{b}{q}\right)$$

(verschoven) orthogonale hyperbool

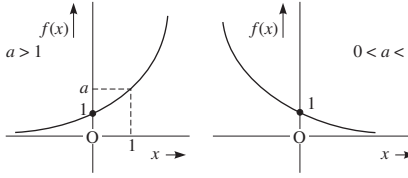


$$f(x) = \frac{ax^2 + bx + c}{px + q}$$

(a, b, c, p, q, $x \in \mathbb{R}$; $a \neq 0$ en $p \neq 0$)
hyperbool

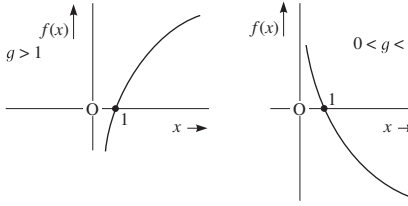


Exponentiële functie: $f(x) = a^x$ $(a \neq 0)$



Logaritmische functie: $f(x) = \log_g x$

$(x \in \mathbb{R}^+; g \in \mathbb{R}^+ | g \neq 1)$



Goniometrische functies: zie par. 4.1.

2.5 Limieten

Voor 'lim' kan hieronder worden ingevuld:

$$\lim_{x\to a};\quad \lim_{x\downarrow a};\quad \lim_{x\uparrow a};\quad \lim_{x\to\infty};\quad \lim_{x\to\infty}$$

$\lim C = C, \quad f(x) = C$ voor alle $x \in D_f$
$\lim C \cdot f(x) = C \cdot \lim f(x)$
$\lim \{f(x) + g(x)\} = \lim f(x) + \lim g(x)$
$\lim \{f(x) \cdot g(x)\} = \lim f(x) \cdot \lim g(x)$
$\lim \{f(x)/g(x)\} = \lim f(x)/\lim g(x), \quad (\lim g(x) \neq 0)$
$\lim \{f(g(x)\} = f\{\lim g(x)\}, \quad f'(x)$ continu

Standaardlimieten

$$\lim_{x\to\infty} \frac{1}{x^p} = 0 \quad (p > 0)$$

$$\lim_{x\to\infty} e^{-px} = 0 \quad (p > 0)$$

$$\lim_{x\to\infty} \frac{\ln(x)^p}{x^a} \quad (p \text{ en } a \text{ constant}, a > 0)$$

$$\lim_{n\to\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \mathrm{e}$$

$$\lim_{n\to\infty} \left(1 + \frac{b}{n}\right)^n = e^b$$

$$\lim_{n\to\infty} \left(1 + \frac{b}{n}\right)^{cn} = \mathrm{e}^{bc}$$

$$\lim_{x\to 0} \frac{\sin x}{x} = 1$$

$$\lim_{x\to 0} \frac{\tan x}{x} = 1$$

$$\lim_{x\to 0} \frac{\cos x}{x} \text{ bestaat niet}$$

Regel van l'Hôpital

$$\lim_{x\to a} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x\to a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

als: $f(a) = g(a) = 0$ of $f(a) = \pm\infty$ en $g(a) = \pm\infty$
$g'(x) \neq 0$ in de omgeving van a

Voorbeeld: $\lim_{x\to 0} \frac{\sin x}{x} \lim_{x\to 0} \frac{\cos x}{1} = 1$

2.6 Complexe rekenwijze

Complexe getallen

Een *complex getal* z wordt voorgesteld door $z = a + b\mathrm{i}$, met $\mathrm{i}^2 = -1$, $a \in \mathbb{R} \wedge b \in \mathbb{R}$. In de elektrotechniek gebruikt men veelal de j i.p.v. de i om verwarring met de i van stroomsterkte te voorkomen. Deze schrijfwijze wordt hier ook verder gehanteerd.

Er geldt: $\mathrm{j}^2 = -1; \mathrm{j}^3 = -\mathrm{j}; \mathrm{j}^4 = 1; \mathrm{j}^5 = \mathrm{j}; \ldots$

$$(a + b\mathrm{j}) + (c + d\mathrm{j}) = (a + c) + (b + d)\mathrm{j}$$

$$(a + b\mathrm{j})(c + d\mathrm{j}) = (ac - bd) + (ad + bc)\mathrm{j}$$

$$\frac{a + b\mathrm{j}}{c + d\mathrm{j}} = \frac{(a + b\mathrm{j})(c - d\mathrm{j})}{(c + d\mathrm{j})(c - d\mathrm{j})} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}\mathrm{j}$$

Schrijfwijze

$z = a + b\mathrm{j} = r(\cos\varphi + \mathrm{j}\ \sin\ \varphi) = r\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}$

Reëel deel : $a = \mathrm{Re}(z) = \mathrm{Re}(a + b\mathrm{j})$

Imaginair deel: $b = \mathrm{Im}(z) = \mathrm{Im}(a + b\mathrm{j})$

Modulus : $|z| = |a + b\mathrm{j}| = \sqrt{a^2 + b^2} = r$
$\cos\varphi = a/r; \sin\varphi = b/r; \tan\varphi = b/a$

Argument : $\varphi = \arg(z) = \arg(a + b\mathrm{j}) = \arctan(b/a)$
$\varphi \in \langle -\pi, \pi]$

Toegevoegd complex of complex geconjugeerde:
z^*(soms $\overline{\mathrm{z}}$); $z = a + b\mathrm{j}, z^* = a - b\mathrm{j}$

Stelling van Euler

$$\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} \cos\varphi + \mathrm{j}\ \sin\varphi$$

$$\sin\varphi = \frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} - \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}}{2\mathrm{j}}; \quad \cos\varphi = \frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} + \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}}{2}$$

Stelling van de Moivre

$$(\cos\varphi + \mathrm{j}\sin\ \varphi)^n = \cos n\varphi + \mathrm{j}\sin n\varphi = \mathrm{e}^{\mathrm{j}n\varphi}$$

Hyperbolische functies

$\sinh z = \frac{1}{2}(e^{z} - e^{-z}) = -j \sin jz$; $\quad \cosh z = \frac{1}{2}(e^{z} + e^{-z}) = \cos jz$
$\tanh z = \sinh z / \cosh z$
$\sinh jz = j \sin z$; $\quad \cosh jz = \cos z$
$\tan jz = j \tanh z$; $\quad \tanh jz = j \tan z$

Complexe voorstelling sinusvormige grootheden

$a = \hat{a} \cos(\omega t + \alpha) = A\sqrt{2}\cos(\omega t + \alpha)$ is voor te stellen als:

– *Zonder tijdindicatie*:
  complexe amplitude: $\underline{\hat{a}} = \hat{a}\, e^{j\alpha} = \hat{a} \exp(j\alpha)$
  complexe effectieve waarde: $\underline{A} = A\, e^{j\alpha}$
– *Met tijdindicatie*:
  complexe momentane waarde: $\underline{a} = \hat{a}\, e^{j(\omega t + \alpha)}$

Voorbeelden:

$a = 10 \cos(\omega t + \frac{5}{12}\pi)$

$b = 5 \cos(\omega t + \frac{1}{6}\pi)$

$\varphi_{ab} = \alpha - \beta = \frac{5}{12}\pi - \frac{1}{6}\pi = \frac{1}{4}\pi$

$c = 10 \cos(\omega t + \frac{4}{5}\pi)$

$d = 5 \cos(\omega t + \frac{2}{5}\pi)$

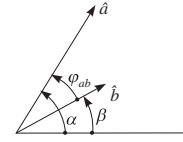
$\varphi_{cd} = \alpha - \beta = -\frac{4}{5}\pi - \frac{2}{5}\pi = \frac{6}{5}\pi$

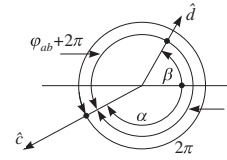
$a \rightarrow \underline{\hat{a}} = 10\, e^{j(5\pi/12)}$

$$\underline{A} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j(5\pi/12)}$$

$\underline{a} = 10\, e^{j[\omega t + (5\pi/12)]}$

Analoog: b, c en d.





2.7 Afronden en nauwkeurigheid

Afronden

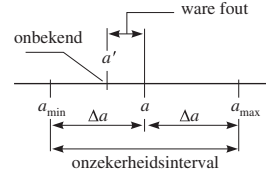
Op *n significante cijfers* afronden: is het $(n+1)$ ste cijfer $\geqq 5$ dan omhoog afronden, anders omlaag.

Voorbeeld. In notatie met drie significante cijfers wordt:
- 5,135 of 5,138 na afronding 5,14;
- 5,314 na afronding 5,31.

Nauwkeurigheid

Werkelijke waarde : a'
Gevonden waarde : a
Maximale absolute fout: Δa

Relatieve fout : $\delta a = \dfrac{\Delta a}{a}$



Rekenregels

$\Delta(a_1 \pm a_2 \pm \ldots a_n) = \Delta a_1 + \Delta a_2 + \ldots \Delta a_n$
$\delta(a_1 \cdot a_2 \cdot \ldots \cdot a_n) = \delta(a_1) + \delta(a_2) + \ldots \delta(a_n)$
$\delta(a/b) = \delta(a) + \delta(b)$

Wanneer $f = f(a_1, a_2, \ldots a_n)$ dan geldt:

$$\Delta f = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\delta f}{\delta a_i} \right| \Delta a_i; \quad \delta f = \frac{\Delta f}{f}$$

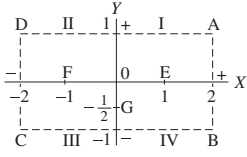
Δf van afronden op één *significant cijfer.*
Begint Δf met een 1, dan afronden op twee cijfers.
Afronden f laten bepalen door Δf.
Voorbeeld: $f = 3{,}168 \pm 0{,}41$ wordt $3{,}2 \pm 0{,}4$.

3 Meetkunde

3.1 Coördinaten en hoeken

Rechthoekige of Cartesische coördinaten

Twee assen : horizontale as of X-as, verticale as of Y-as.
Vier kwadranten : I, II, III, IV.

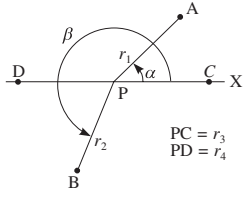


Punten worden aangegeven door 2 coördinaten; de eerste gemeten langs de X-as (*abscis*) en de tweede langs de Y-as (*ordinaat*).

A (2, 1); B (2, -1); C (-2, -1); D (-2, 1)
O(0, 0); E(1, 0); F(-1, 0); G(0, $-\frac{1}{2}$)

Poolcoördinaten

Eén horizontale as en een punt P daarop : de pool.



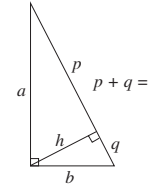
A (r_1, α)
B(r_2, β)
C (r_3, 0°) of (r_3, $k \cdot 2\pi$) $k \in \mathbb{N}$
D (r_4, 180°)

Hoeken

Rechte hoek : 90°
Scherpe hoek : $< 90°$
Stompe hoek : $> 90°$
Complement : aanvulling tot 90°
Supplement : aanvulling tot 180°

3.2 Driehoeken

Zie ook par. 4.2 *Trigonometrie*.
Algemeen geldt: som van de hoeken is 180°.

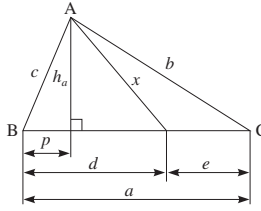


Rechthoekige driehoek

Stelling van Pythagoras:

$$a^2 + b^2 = c^2$$
$$h^2 = pq; \quad b^2 = qc; \quad ab = hc$$

Scheefhoekige driehoek



Projectiestelling:
$b^2 = a^2 + c^2 \pm 2ap$ (+ als $\angle B$ stomp; − als $\angle B$ scherp is)

Stelling van Stewart:

$$x^2 \times a = b^2 \times d + c^2 \times e - ade$$

Hoogtelijn op zijde a:

$$h_a = \frac{2}{a}\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}, \text{waarin } s = \tfrac{1}{2}(a+b+c)$$

Zwaartelijn voor zijde a

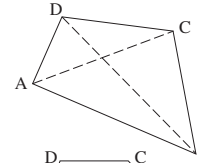
$$m_a^2 = \tfrac{1}{2}b^2 + \tfrac{1}{2}c^2 - \tfrac{1}{4}a^2$$

Bissectrice van hoek A:

$$d_a^2 = bc - rs$$

waarin: r en s de stukken waarin d_a de zijde a verdeelt. Als r aan c grenst is $r : s = c : b$

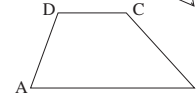
3.3 Vierhoeken



Algemeen
Som van de hoeken 360°
Twee diagonalen: AC en DB

Trapezium
2 zijden evenwijdig, AB//DC

$$\angle A + \angle D = \angle B + \angle C = 180°$$

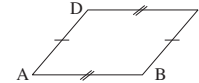


Parallellogram
Zijden 2 aan 2 evenwijdig

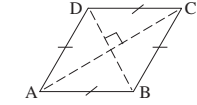
$AB//DC; AB = DC; AD//BC; AD = BC$:

$\angle A + \angle B = \angle B + \angle C =$

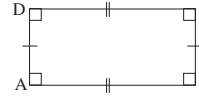
$\angle C + \angle D = \angle D + \angle A = 180°$



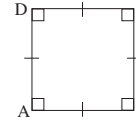
Diagonalen delen elkaar middendoor.



Ruit
Parallellogram met 4 gelijke zijden
Diagonalen loodrecht op elkaar.

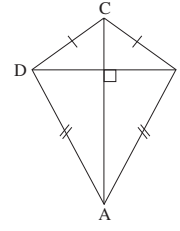


Rechthoek
Parallellogram met 4 rechte hoeken.



Vierkant
Parallellogram met 4 gelijke zijden en 4 rechte hoeken, óf: ruit met 4 rechte hoeken.

Vlieger
Aanliggende zijden twee aan twee gelijk. Diagonalen loodrecht op elkaar.



3.4 Veelhoeken

Algemeen

Een n-hoek is een willekeurige veelhoek met n zijden.
Som van de hoeken van een n-hoek: $(n-2)\ 180^\circ$
Aantal diagonalen in een n-hoek: $\frac{1}{2}n\ (n-3)$.

Regelmatige veelhoeken

Van een regelmatige veelhoek zijn de n hoeken gelijk (dus elk gelijk aan $\dfrac{n-2}{n} \cdot 180^\circ$) en zijn de n zijden gelijk. In en om een regelmatige n-hoek kan een cirkel beschreven worden.
Straal omgeschreven cirkel is R.
Zijde regelmatige n-hoek is a_n.
Dan is:

$$a_3 = R\sqrt{3};\ a_4 = R\sqrt{2};\qquad a_5 = \tfrac{1}{2}R\sqrt{10-2\sqrt{5}};$$
$$a_6 = R;\qquad a_8 = R\sqrt{2-\sqrt{2}};\ a_{10} = \tfrac{1}{2}R(\sqrt{5}-1)$$
$$a_{12} = R\sqrt{2-\sqrt{3}}$$

Gulden snede (u.m. verdeling)

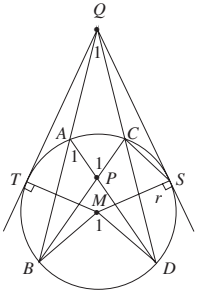
De gulden snede verdeelt een lijnstuk a in twee delen. Het grootste deel noemen we x. Er geldt: de verhouding tussen geheel (a) en grootste deel (x) is gelijk aan de verhouding tussen grootste deel en kleinste deel ($a-x$).

Oftewel: $\dfrac{a}{x} = \dfrac{x}{a-x}$, waaruit volgt: $x^2 = a(a-x)$

Dit geeft $x = \dfrac{1}{2}a(-1+\sqrt{5}) \approx 0{,}618a$

a_{10} = grootste stuk van de volgens de gulde snede verdeelde straal R van de omgeschreven cirkel.
Andere benaming: verdeling van een lijnstuk in uiterste en middelste reden (of u.m. verdeling).

3.5 Cirkels



Algemeen

AB, CD, CS zijn koorden.
QS en QT zijn raaklijnen; QS $\perp$ MS.

$\angle A_1 = \frac{1}{2}$ bg BD/r

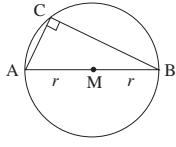
$\angle M_1 =$ bg BD/r

$\angle P_1 = \frac{1}{2}(\text{bg } AC + \text{bg } BD)/r$

$\angle Q_1 = \frac{1}{2}(\text{bg } BD - \text{bg } AC)/r$

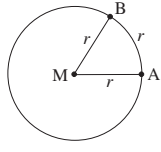
$\angle CSQ = \frac{1}{2}\text{bg } CS/r$

$QA \times QB = QC \times QD = QS^2 = QM^2 - r^2 =$ macht van Q ten opzichte van cirkel (M, r)
$PA \times PD = PC \times PB =$ macht van P ten opzichte van cirkel (M, r).
$QS = QT$.



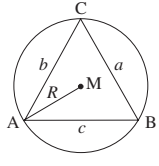
AB is een middellijn van cirkel (M, r).
$AM = MB = r =$ straal van de cirkel (M, r).
$\angle$ ACB $= 90^\circ$ ($= \frac{1}{2}$ bg AB).
$\angle A = \frac{1}{2}$ bg BC; $\angle B = \frac{1}{2}$ bg AC.

Lengte boog $AB = r$
$\angle$ AMB $= 1$ radiaal
1 rad $= 57^\circ\ 17'44{,}8''$



Oppervlakte sector
met sectorhoek van p
radialen $= \frac{1}{2}\,pr^2$

Omgeschreven cirkel driehoek



$$R = \frac{abc}{4\ O}$$

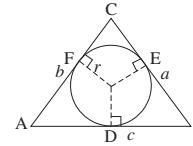
$O =$ oppervlakte Δ ABC

Ingeschreven cirkel driehoek

$$r = \frac{O}{s}$$

$$AD = AF = s - a$$

$$s = \tfrac{1}{2}(a + b + c)$$

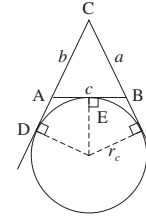


Aangeschreven cirkel driehoek

$$r_c = \frac{O}{s - c}$$

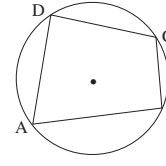
$$CD = CF = s$$

$$AE = AD = s - b$$



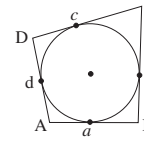
Omgeschreven cirkel vierhoek

Om een vierhoek ABCD, waarvoor geldt $\angle A + \angle C = \angle B + \angle D$ $(= 180^\circ)$ kan een cirkel worden beschreven. *ABCD* is dan een *koordenvierhoek*. Hieraan voldoen o.a.: rechthoek, vierkant, en gelijk benig trapezium.



Ingeschreven cirkel vierhoek

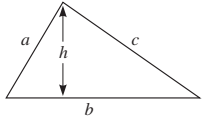
In een vierhoek ABCD, waarvoor geldt $AB + CD = BC + AD$ kan een cirkel worden beschreven. ABCD is een *raaklijnenvierhoek*. Hieraan voldoen o.a.: vierkant, ruit, vlieger.



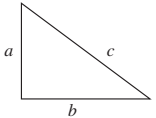
3.6 Omtrek, oppervlakte, inhoud

Tabel 3.1 Vlakken

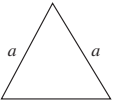
figuur (nr.)	omtrek	oppervlakte
1 Driehoek	$a+b+c=2s$	$\frac{1}{2}$bh $\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$
2 Rechth. driehoek	$a+b+c$	$\frac{1}{2}ab$
3 Gelijkz. driehoek	$3a$	$\frac{1}{4}a^2\sqrt{3}$
4 Vierhoek	$a+b+c+d$	Som van 2 driehoeken
5 Trapezium	$a+b+c+d$	$\frac{1}{2}(d+b)h$
6 Parallellogram	$2(a+b)$	bh
7 Ruit	$4a$	ah of $\frac{1}{2}$ product diagonalen
8 Rechthoek	$2(a+b)$	ab
9 Vierkant	$4a$	a^2 of $\frac{1}{2}$ product diagonalen



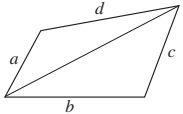
1



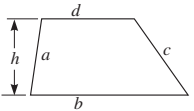
2



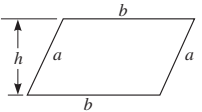
3



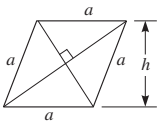
4



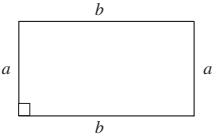
5



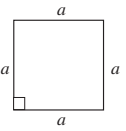
6



7



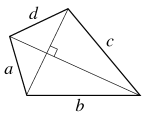
8



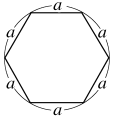
9

Tabel 3.1 (vervolg)

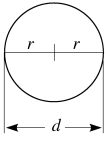
figuur (nr.)	omtrek	oppervlakte
10 Vierhoek; diag. $\perp$	$a+b+c+d$	$\frac{1}{2}$ prod. diag.
11 Regelm. zeshoek	$6a$	$\frac{3}{2}a^2\sqrt{3}$
12 Cirkel	$2\pi r$ of πd	πr^2 of $\frac{1}{4}\pi d^2$
13 Sector van p°	$2r+\frac{p}{360}2\pi r$	$\frac{p}{360}\pi r^2$
14 Segment	$k+bg$	sector minus driehoek
15 Ellips	$\approx 2\pi a\frac{\sqrt{1+\frac{35}{72}m^2+\frac{2}{15}m^4}}{1+m}$ $m=(a-b)/(a+b)$	πab



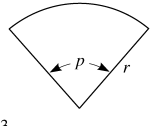
10



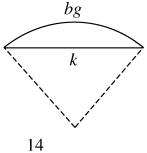
11



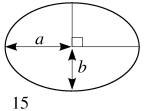
12



13



14



15

* Dit is een benadering ! Voor de omtrek s van een ellips geldt $(a > b)$:

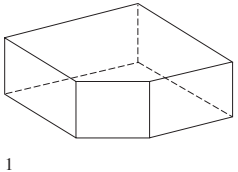
$$s = 4\int_0^a \sqrt{\frac{a^2-e^2x^2}{a^2-x^2}}\,\mathrm{d}x, \quad \text{met } e=\frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a}$$

Met $x = a\sin\varphi$ wordt: $s = 4a\int_0^{\pi/2}\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}\,\mathrm{d}\,\varphi$

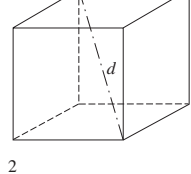
$E = \int_0^{\pi/2}\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}\,d\,\varphi$ is een *elliptische integraal* die met e als parameter is getabelleerd (zie publicatie Abramowitz, blz. 609) of numeriek kan worden benaderd.

Tabel 3.2 Lichamen

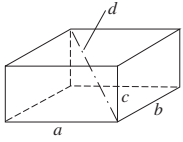
figuur (nr.)	betekenis letters (tenzij anders vermeld: A_g = grondvlak; h = hoogte; N = normaal-doorsnede)	inhoud V oppervlak A manteloppervlak A_m
1 Recht prisma		$V = A_g h$
2 Kubus	a = ribbe d = lichaams-diagonaal	$V = a^3$ $A = 6a^2$ $d^2 = 3a^2$
3 Rechthoeking parallel-lepipedum	a, b en c de ribben in één hoekpunt d = lichaams-diagonaal	$V = abc$ $A = 2(ab + ac + bc)$ $d^2 = a^2 + b^2 + c^2$
4 Scheef prisma	a = opstaande ribbe	$V = A_g h$ of Na $A_m = a \times$ omtrek N
5 Afgeknot driezijdig prisma	a, b en c de op staande ribben	$V = \frac{1}{3}(a + b + c)N$
6 Piramide		$V = \frac{1}{3} A_g h$
7 Afgeknotte piramide	A_g en A_b = eindvlakken	$V = \frac{1}{3} h(A_g + A_b + \sqrt{A_g A_b})$



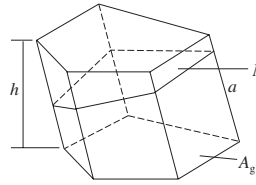
1



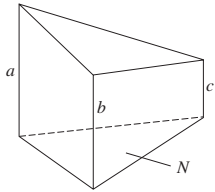
2



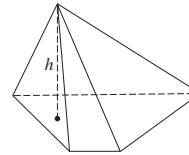
3



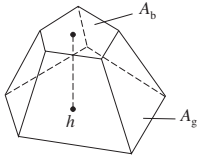
4



5



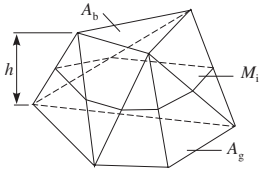
6



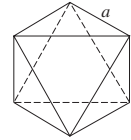
7

Tabel 3.2 (vervolg)

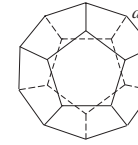
figuur (nr.)	betekenis letters (tenzij anders vermeld: A_g = grondvlak; h = hoogte; N = normaal-doorsnede)	inhoud V oppervlak A manteloppervlak A_m
8 Prismoïde	A_b = bovenvlak M_i = midden-doorsnede	$V = \frac{1}{6}h(A_g + A_b + 4\ M_i)$
9 Octaëder (8 gelijkz. driehoeken)	a = ribbe	$V = \frac{1}{3}a^3\sqrt{2}$ $A = 2a^2\sqrt{3}$
10 Dodecaëder (12 gelijkz. vijfhoeken)	a = ribbe	$V = \frac{1}{4}a^3(15 + 7\sqrt{5})$ $A = 3a^2\sqrt{5(5 + 2\sqrt{5})}$
11 Icosaëder (20 gelijkz. driehoeken)	a = ribbe	$V = \frac{5}{12}a^3(3 + \sqrt{5})$ $A = 5a^2\sqrt{3}$
12 Cilinder		$V = A_g h$
13 Rechte cirkelcilinder	r = straal grondvlak	$V = \pi r^2 h$ $A_m = 2\pi rh$ $A = 2\pi r(r + h)$
14 Holle cilinder (buis)	R = uitwendige straal r = inwendige r = inwendige straal $d = R - r$ = dikte	$V = \pi h(R^2 - r^2)$ $= \pi hd(2R - d)$ $= \pi hd(2R - d)$ $= \pi hd(2r + d)$
15 Rechte cirkelkegel	A_g = grondvlak r = straal grondvlak s = beschrijvende lijn	$V = \frac{1}{3}A_g h$ $= \frac{1}{3}\pi r^2 h$ $s = \sqrt{(r^2 + h^2)}$ $A_m = \pi rs$
16 Afgeknotte cirkelkegel	R = straal grondvlak r = straal bovenvlak S = beschrijvende lijn	$V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr)$ $s = \sqrt{[h^2 + (R - r)^2]}$ $A_m = \pi s(R + r)$



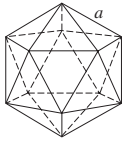
8



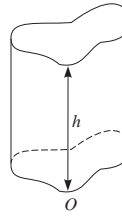
9



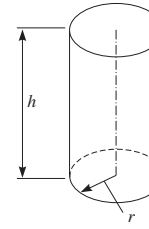
10



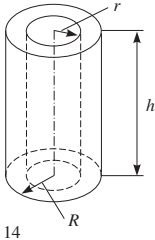
11



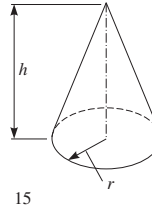
12



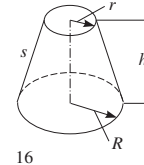
13



14



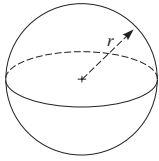
15



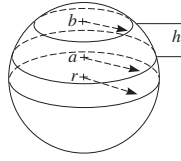
16

Tabel 3.2 (vervolg)

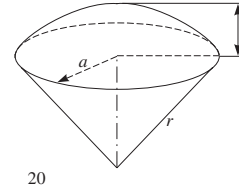
figuur (nr.)	betekenis letters (tenzij anders vermeld: A_g = grondvlak; h = hoogte; N = normaal-doorsnede)	inhoud V oppervlak A manteloppervlak A_m
17 Bol	r = straal $d = 2r$ = diameter	$V = \frac{4}{3}\pi r^3$ $= \frac{1}{6}\pi d^3$ $A = 4\pi r^2 = \pi d^2$
18 Holle Bol	R = uitwendige straal r = inwendige straal D = uitwendige diameter d = inwendige diameter	$V = \frac{4}{3}\pi(R^3 - r^3)$ $= \frac{1}{6}\pi(D^3 - d^3)$
19 Bolschiif	r = straal bol a en b stralen der platte vlakken	$V = \frac{1}{6}\pi h(3a^2 + 3b^2 + h^2)$ $A_m = 2\pi rh$
20 Bolsector	r = straal bol p = pijl a = straal grondvlak segment	$V = \frac{2}{3}\pi r^2 p$ $A = \pi r(2p + a)$
21 Bolsegment	r = straal bol p = pijl a = straal grondvlak	$V = \frac{1}{6}\pi p(3a^2 + p^2)$ $= \frac{1}{3}\pi p^2(3r - p)$ $A_m = 2\pi rp$ $= \pi(a^2 + p^2)$
22 Ellipsoïde	a, b en c de drie halve assen	$V = \frac{4}{3}\pi abc$
23 Omwentelings-paraboloïde	r = straal grondvlak	$V = \frac{1}{2}\pi r^2 h$
24 Ring	r = straal doorsnede d = diameter doorsnede $D = 2R$ = diameter neutrale lijn	$V = 2\pi^2 Rr^2$ $= \frac{1}{4}\pi^2 Dd^2$ $A = 4\pi^2 Rr$ $= \pi^2 Dd$
25 Vat	d = grootste middellijn d_1 = bodemmiddellijn	$V = \frac{1}{12}\pi h(2d^2 + d_1^2)$



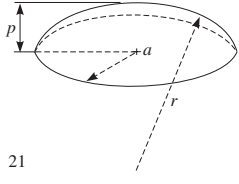
17



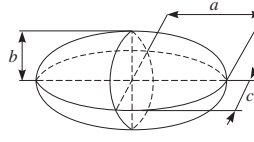
19



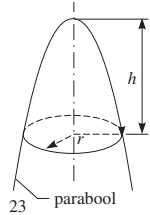
20



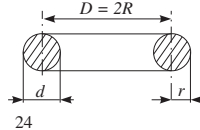
21



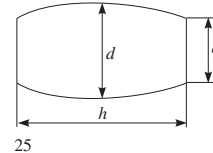
22



23 parabool



24



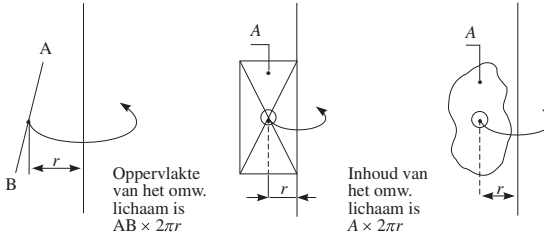
25

Regels van Guldin

1 Wanneer een vlakke kromme of rechte lijn wentelt om een in het vlak van die lijn gelegen as, die de lijn *niet* snijdt, dan is de oppervlakte van het omwentelingsoppervlak gelijk aan het product van de lengte van de roterende lijn en de weg, die het *oppervlakte-middelpunt* (of *zwaartepunt*) van die lijn doorloopt.

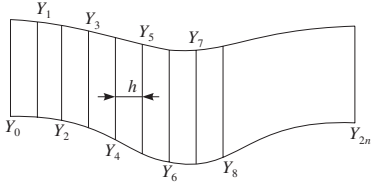
2 Wanneer een gesloten vlakke figuur wentelt omeen in het vlak van die figuur gelegen as, die de figuur *niet* snijdt, dan is de inhoud van het omwentelingslichaam gelijk aan het product van de oppervlakte A van de wentelende figuur en de weg, die het *oppervlakte-middelpunt* (of *zwaartepunt*) van de figuur doorloopt.

Voorbeelden (zie ook par. 6.5):



De oppervlakte O van een *omwentelingslichaam* = som van de oppervlakten beschreven door de zijden van de wentelende figuur.

Oppervlakte en inhoud van onregelmatige figuren



Regel van Simpson voor oppervlakten. Verdeel de figuur door verticalen Y in een *even* aantal ($2n$) *even brede* (h) stroken. Bepaal:

$$\left.\begin{aligned} S_1 &= Y_0 + Y_{2n} \\ S_2 &= 4(Y_1 + Y_3 + \ldots Y_{2n-1}) \\ S_3 &= 2(Y_2 + Y_4 + \ldots Y_{2n-2}) \end{aligned}\right\} \text{oppervlakte } A \approx \tfrac{1}{3}h(S_1 + S_2 + S_3)$$

Trapeziumregel:

$$A \approx \left(\frac{Y_0 + Y_{2n}}{2} + Y_1 + Y_2 + Y_3 \ldots + Y_{2n}\right) \cdot h$$

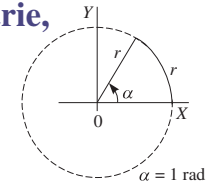
Opmerking: de trapeziumregel is ook toepasbaar op een oneven aantal stroken.

Regel van Simpson voor inhoud omwentelingslichaam:

$$V \approx \tfrac{1}{3}d\{A_0 + A_{2n} + 4(A_1 + A_3 + \ldots A_{2n-1}) + 2(A_2 + A_4 + \ldots A_{2n-2})\}$$

waarin: A_n = oppervlakte van snijvlak Y_n

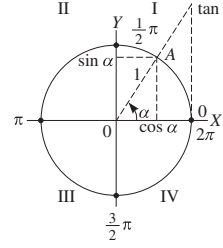
4 Gonio- en trigonometrie, boldriehoeksmeting



4.1 Goniometrie

Goniometrische verhoudingen

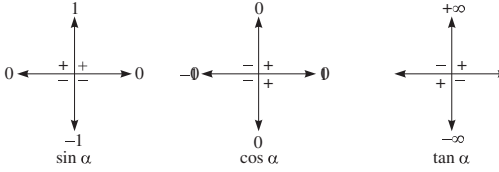
Hoeken worden in aangegeven richting gemeten. Eenheid is **graad** met 360° in volledige cirkel óf eenheid is **radiaal** met 2π radialen in cirkel. Omrekening met $180^\circ = \pi$ radialen $\approx$ 3,1416; $1^\circ \approx 0{,}01745$ rad; 1 rad $\approx 57{,}296^\circ$

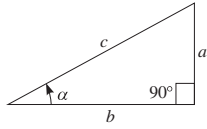


Eenheidscirkel (straal 1) en punt $A\ (x_A, y_A)$:
sin $\alpha = y_A$ tussen -1 en $+1$
cos $\alpha = x_A$ tussen -1 en $+1$

$\tan\alpha = \dfrac{y_A}{x_A}$, elke waarde mogelijk

Periode: $\sin\alpha = \sin(\alpha + k \cdot 360°) = \sin(\alpha + k \cdot 2\pi)$
$\cos\alpha = \cos(\alpha + k \cdot 360°) = \cos(\alpha + k \cdot 2\pi)$
$\tan\alpha = \tan(\alpha + k \cdot 180°) = \tan(\alpha + k \cdot \pi)$



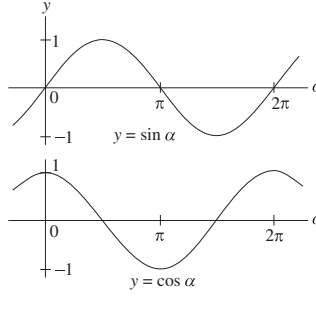


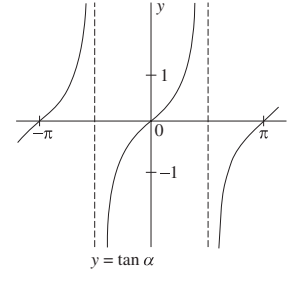
$\sin\alpha = \dfrac{a}{c}$ $\quad \operatorname{cosec}\alpha = \dfrac{c}{a}$

$\cos\alpha = \dfrac{b}{c}$ $\quad \sec\alpha = \dfrac{c}{b}$

$\tan\alpha = \dfrac{a}{b}$ $\quad \cot\alpha = \dfrac{b}{a}$

Basisvormen goniometrische relaties





Basisformules

$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1; \quad 1 + \tan^2\alpha = \sec^2\alpha; \quad 1 + \cot^2\alpha = \operatorname{cosec}^2\alpha;$
$\sin\alpha \operatorname{cosec}\alpha = 1; \quad \cos\alpha \sec\alpha = 1; \quad \tan\alpha \cot\alpha = 1$

$$\tan\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{\sec\alpha}{\operatorname{cosec}\alpha}; \quad \cot\alpha = \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha} = \frac{\operatorname{cosec}\alpha}{\sec\alpha}$$

Reductieformules

$\sin(-\alpha) = -\sin\alpha;$ $\cos(-\alpha) = \cos\alpha;$
$\tan(-\alpha) = -\tan\alpha;$ $\cot(-\alpha) = -\cot\alpha$
$\sin(\pi/2 \pm \alpha) = \cos\alpha;$ $\cos(\pi/2 \pm \alpha) = \mp\sin\alpha;$
$\tan(\pi/2 \pm \alpha) = \mp\cot\alpha;$ $\cot(\pi/2 \pm \alpha) = \mp\tan\alpha$
$\sin(\pi \pm \alpha) = \mp\sin\alpha;$ $\cos(\pi \pm \alpha) = -\cos\alpha;$
$\tan(\pi \pm \alpha) = \pm\tan\alpha;$ $\cot(\pi \pm \alpha) = \pm\cot\alpha$

Tabel 4.1 Bijzondere waarden goniometrische relaties

	kwadranten				hoeken						
	I	II	III	IV	0(of 2π) 0°(of 360°)	$\pi/6$ 30°	$\pi/4$ 45°	$\pi/3$ 60°	$\pi/2$ 90°	π 180°	$3\pi/2$ 270°
sin	+	+	−	−	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	1	0	−1
cos	+	−	−	+	1	$\frac{1}{2}\sqrt{3}$	$\frac{1}{2}\sqrt{2}$	$\frac{1}{2}$	0	−1	0
tan	+	−	+	−	0	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}$	$\pm\infty$	0	$\pm\infty$
cot	+	−	+	−	$\pm\infty$	$\sqrt{3}$	1	$\frac{1}{3}\sqrt{3}$	0	$\pm\infty$	0

Formules met twee hoeken

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\sin\beta$$
$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha\cos\beta \mp \sin\alpha\sin\beta$$
$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan\alpha \pm \tan\beta}{1 \mp \tan\alpha \cdot \tan\beta}; \quad \cot(\alpha \pm \beta) = \frac{\cot\alpha \cdot \cot\beta \mp 1}{\cot\beta \pm \cot\alpha}$$
$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\tfrac{1}{2}(\alpha+\beta) \cdot \cos\tfrac{1}{2}(\alpha-\beta)$$
$$\sin\alpha - \sin\beta = 2\cos\tfrac{1}{2}(\alpha+\beta) \cdot \sin\tfrac{1}{2}(\alpha-\beta)$$
$$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos\tfrac{1}{2}(\alpha+\beta) \cdot \cos\tfrac{1}{2}(\alpha-\beta)$$

$$\cos\alpha - \cos\beta = -2\sin\tfrac{1}{2}(\alpha+\beta)\cdot\sin\tfrac{1}{2}(\alpha-\beta)$$

$$\tan\alpha \pm \tan\beta = \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\cos\alpha\cdot\cos}; \quad \cot\alpha \pm \cot\beta = \frac{\sin(\beta\pm\alpha)}{\sin\alpha\cdot\sin\beta}$$

$$2\sin\alpha\cdot\sin\beta = \cos(\alpha-\beta) - \cos(\alpha+\beta)$$
$$2\cos\alpha\cdot\cos\beta = \cos(\alpha-\beta) + \cos(\alpha+\beta)$$
$$2\sin\alpha\cdot\cos\beta = \sin(\alpha+\beta) + \sin(\alpha-\beta)$$
$$2\cos\alpha\cdot\sin\beta = \sin(\alpha+\beta) - \sin(\alpha-\beta)$$

Formules voor dubbele en halve hoek

$$\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha$$
$$\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha = 1 - 2\sin^2\alpha = 2\cos^2\alpha - 1$$
$$\tan 2\alpha = \frac{2\tan\alpha}{1-\tan^2\alpha}; \quad \cot 2\alpha = \frac{\cot^2\alpha - 1}{2\cot\alpha}$$
$$\sin 3\alpha = (3 - 4\sin^2\alpha)\sin\alpha$$
$$\cos 3\alpha = -(3 - 4\cos^2\alpha)\cos\alpha$$
$$\tan 3\alpha = \frac{3-\tan^2\alpha}{1-3\tan^2\alpha}\tan\alpha$$
$$\sin\tfrac{1}{2}\alpha = \pm\sqrt{\tfrac{1}{2}(1-\cos\alpha)}; \quad \cos\tfrac{1}{2}\alpha = +\sqrt{\tfrac{1}{2}(1+\cos\alpha)}$$
$$\tan\tfrac{1}{2}\alpha = \frac{\sin\alpha}{1+\cos\alpha} = \frac{1-\cos\alpha}{\sin\alpha}$$

sin ($n\alpha$) en cos($n\alpha$) zijn ook te berekenen met de stelling van *De Moivre* (zie par. 2.6) samen met $\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$.

Inverse functies (arcfuncties, boogfuncties, cyclometrische functies)

Uitkomst arcsin x: $[-\frac{1}{2}\pi, \frac{1}{2}\pi]$
Uitkomst arccos x: $[0, \pi]$
Uitkomst arctan x: $\langle -\frac{1}{2}\pi, \frac{1}{2}\pi\rangle$

$$\arcsin x + \arccos x = \tfrac{1}{2}\pi$$
$$\arctan x + \operatorname{arccot} x = \tfrac{1}{2}\pi$$
$$\arctan\frac{x}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x$$

Goniometrische vergelijkingen

$\sin\alpha = \sin\beta$ geeft $\alpha = \beta + k \cdot 2\pi$ òf $\alpha = (\pi - \beta) + k \cdot 2\pi$
$\cos\alpha = \cos\beta$ geeft $\alpha = \beta + k \cdot 2\pi$ òf $\alpha = -\beta + k \cdot 2\pi$
$\tan\alpha = \tan\beta$ geeft $\alpha = \beta + k \cdot \pi$

Oplossingsmethoden :

- Willekeurige vorm herleiden tot basisvorm.
- Niet-lineaire vorm door middel van substitutie terugbrengen tot lineaire vorm.
- Lineaire vorm $a\cos x + b\sin x$ schrijven als $\sqrt{a^2+b^2}\cos(x-\varphi)$ met $\tan\varphi = \dfrac{b}{a}$ èn $\cos\varphi = \dfrac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}$

4.2 *Trigonometrie (vlakke driehoeksmeting)*

Rechthoekige driehoeken

Berekeningen in de rechthoekige (en in gelijkbenige) driehoeken kunnen worden uitgevoerd met de stelling van Pythagoras (zie par. 3.2) en de definities van de zes goniometrische verhoudingen (zie par. 4.1).

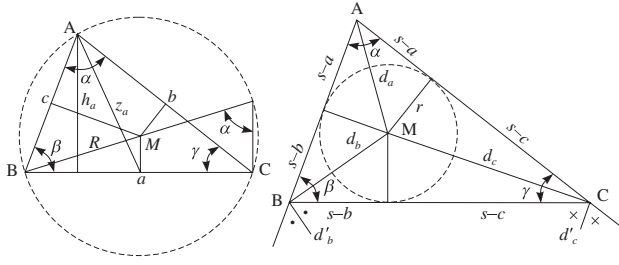
Scheefhoekige driehoeken

Sinusregel : $\dfrac{a}{\sin\alpha} = \dfrac{b}{\sin\beta} = \dfrac{c}{\sin\gamma} = 2R$

R is straal *omgeschreven cirkel* ΔABC.

Cosinusregel : $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos\alpha$

Tangensregel : $\dfrac{\tan\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\tan\frac{1}{2}(\alpha-\beta)} = \dfrac{a+b}{a-b}$



Oppervlakte $\Delta ABC = O$

$O = \frac{1}{2} bc \ \sin\alpha$

$O = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$

waarin: $s = \frac{1}{2}(a+b+c)$

$$O = \frac{a^2 \sin\beta \sin\gamma}{2 \sin\alpha}$$

Hoogtelijnen $(h_a; id.h_b, h_c)$:

$$\begin{aligned} h_a &= b\sin\gamma = c\sin\beta \\ &= 2\ R\sin\beta\sin\gamma \\ &= \frac{a\sin\beta\sin\gamma}{\sin(\beta+\gamma)} \end{aligned}$$

Zwaartelijnen $(z_a;$ id. $z_b, z_c)$:

$$z_a^2 = \tfrac{1}{4}b^2 + \tfrac{1}{4}c^2 + \tfrac{1}{2}bc\ \cos A$$

Binnenbissectrices $(d_a;$ id. $d_b, d_c)$:

$$d_a = \frac{c\sin\beta}{\sin(\frac{1}{2}\alpha+\beta)} = \frac{b\sin\gamma}{\sin(\frac{1}{2}\alpha+\gamma)} = \frac{2bc\cos\frac{1}{2}\alpha}{b+c}$$

Buitenbissectrices $(d_a';$ id. $d_b', d_c')$:

$$d_a' = -\frac{b\sin\gamma}{\cos(\frac{1}{2}\alpha+\gamma)} = \frac{2bc\sin\frac{1}{2}\alpha}{b-c}$$

Straal omgeschreven cirkel R:

$$R = \frac{a}{2\sin\alpha} = \frac{b}{2\sin\beta} = \frac{c}{2\sin\gamma}$$

$$R = \frac{abc}{4O} \qquad O = \text{oppervlakte } \Delta ABC$$

Straal ingeschreven cirkel r:

$$r = \frac{c\sin\frac{1}{2}\alpha\sin\frac{1}{2}\beta}{\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)} = (s-a)\tan\tfrac{1}{2}\alpha = \frac{O}{S}$$

Straal aangeschreven cirkel[1)] *aan zijde* a:

$$r_a = \frac{a\cos\frac{1}{2}\beta\cos\frac{1}{2}\gamma}{\sin\frac{1}{2}(\beta+\gamma)} = (s-b)\cot\tfrac{1}{2}\gamma = s\tan\tfrac{1}{2}\alpha = \frac{O}{s-a}$$

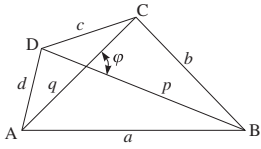
[1)] De aangeschreven cirkel aan zijde a heeft als middelpunt het snijpunt van de buitenbissectrices d_b' *en* d_c'.

Berekening hoeken ΔABC:

$$\sin\tfrac{1}{2}\alpha = \sqrt{\frac{(s-b)(s-c)}{bc}}; \quad \cos\tfrac{1}{2}\alpha = \sqrt{\frac{s(s-a)}{bc}}$$

Oppervlakten vierhoeken

Zijden: a, b, c, d.
Hoeken: A, B, C, D.
Diagonalen: p, q;
hoek tussen p en q is φ.



Willekeurige vierhoek:

$$O = \tfrac{1}{2}pq\sin\varphi$$
$$= \sqrt{(s-a)(s-b)(s-c)(s-d) - abcd\cos^2\tfrac{1}{2}(A+C)}$$

waarin: $s = \tfrac{1}{2}(a+b+c+d)$

Koordenvierhoek:

$$O = \sqrt{(s-a)(s-b)(s-c)(s-d)} = \tfrac{1}{2}(ad+\mathrm{bc})\sin\varphi$$

Raaklijnenvierhoek: $O = \sqrt{abcd}\cdot\sin\tfrac{1}{2}(A+C)$
Bicyclische vierhoek[1)]: $O = \sqrt{abcd}$

4.3 Boldriehoeksmeting

Rechthoekige boldriehoek

$\cos c = \cos a \cdot \cos b$ $\qquad$ $\tan a = \cos\beta \cdot \tan c$
$\cos c = \operatorname{cotg}\alpha \cdot \operatorname{cotg}\beta$ $\qquad$ $\tan a = \tan\alpha \cdot \sin b$
$\sin a = \sin\alpha \cdot \sin c$ $\qquad$ $\cos\alpha = \cos a \cdot \sin\beta$

Regel van Neper. Laat men in de rechthoekige boldriehoek de rechte hoek buiten beschouwing en vervangt men de beide rechthoekszijden door hun complementen dan is de cosinus van een element gelijk aan het product van de cotangenten van de beide aanliggende elementen of gelijk aan het product van de sinussen van de beide afliggende elementen.

[1)] Vierhoek die zowel raaklijn- als koordenvierhoek is (dus zowel een in- als omschreven cirkel), bijv. een vierkant.

In de rechthoekige boldriehoek zijn een rechthoekszijde en de overstaande hoek altijd gelijksoortig.

Scheefhoekige boldriehoek

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\alpha} = \frac{\sin\gamma}{\sin b} = \frac{\sin\gamma}{\sin c} \qquad \text{(sinusregel)}$$

$$\frac{\tan\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\tan\frac{1}{2}(\alpha-\beta)} = \frac{\tan\frac{1}{2}(a+b)}{\tan\frac{1}{2}(a-b)} \qquad \text{(tangensregel)}$$

$$\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b + \sin c \cdot \cos\alpha \qquad \text{(lecos.-regel)}$$

$$\cos\alpha = -\cos\beta \cdot \cos\gamma + \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \cos a \qquad \text{(2ecos.-regel)}$$

Formules van Euler:

$$\sin\tfrac{1}{2}\alpha = \sqrt{\frac{\sin(s-b)\cdot\sin(s-c)}{\sin b\cdot\sin c}} \qquad s = \tfrac{1}{2}(a+b+c)$$

$$\cos\tfrac{1}{2}\alpha = \sqrt{\frac{\sin s\cdot\sin(s-a)}{\sin b\cdot\sin c}}$$

$$\tan\tfrac{1}{2}\alpha = \sqrt{\frac{\sin(s-b)\cdot\sin(s-c)}{\sin s\cdot\sin(s-a)}} = \frac{n}{\sin s\cdot\sin(s-a)}$$

$$n = \sqrt{\sin s\cdot\sin(s-a)\cdot\sin(s-b)}\cdot\sin(s-c)$$

$$\sin\tfrac{1}{2}a = \sqrt{\frac{-\cos S\cdot\cos(S-\alpha)}{\sin\beta\cdot\sin\gamma}} \qquad S = \tfrac{1}{2}(\alpha+\beta+\gamma)$$

$$\cos\tfrac{1}{2}a = \sqrt{\frac{\cos(S-\beta)\cdot\cos(S-\gamma)}{\sin\beta\cdot\sin\gamma}}$$

$$\tan\tfrac{1}{2}a = \sqrt{\frac{-\cos S\cdot\cos(S-\alpha)}{\cos(S-\beta)\cdot\cos(S-\gamma)}} = \frac{N}{\cos(S-\beta)\cdot\cos(S-\gamma)}$$

$$N = \sqrt{-\cos S\cdot\cos(S-\alpha)\cdot\cos(S-\beta)\cdot\cos(S-\gamma)}$$

Formules van Delambre:

$$\frac{\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\cos\frac{1}{2}\gamma}=\frac{\cos\frac{1}{2}(a-b)}{\cos\frac{1}{2}c} \qquad \frac{\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\sin\frac{1}{2}\gamma}=\frac{\cos\frac{1}{2}(a+b)}{\cos\frac{1}{2}c}$$

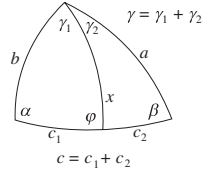
$$\frac{\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\cos\frac{1}{2}\gamma}=\frac{\sin\frac{1}{2}(a-b)}{\sin\frac{1}{2}c} \qquad \frac{\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\sin\frac{1}{2}\gamma}=\frac{\sin\frac{1}{2}(a+b)}{\sin\frac{1}{2}c}$$

Analogieën van Neper:

$$\frac{\tan\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\cot\frac{1}{2}\gamma}=\frac{\cos\frac{1}{2}(a-b)}{\cos\frac{1}{2}(a+b)} \qquad \frac{\tan\frac{1}{2}(a+b)}{\tan\frac{1}{2}c}=\frac{\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}$$

$$\frac{\tan\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\cot\frac{1}{2}\gamma}=\frac{\sin\frac{1}{2}(a-b)}{\sin\frac{1}{2}(a+b)} \qquad \frac{\tan\frac{1}{2}(a-b)}{\tan\frac{1}{2}c}=\frac{\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}{\sin\frac{1}{2}(\alpha+\beta)}$$

Eerste stelling van Stewart:
$\cos x \cdot \sin c =$
$\cos a \cdot \sin c_1 + \cos b \cdot \sin c_2$

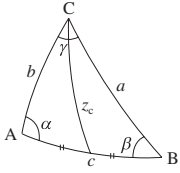


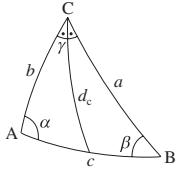
Tweede stelling van Stewart:
$\cos\varphi \cdot \sin\gamma =$
$\cos\beta \cdot \sin\gamma_1 + \cos\alpha \cdot \sin\gamma_2$

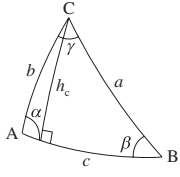
$$\cos z_c = \frac{\cos a + \cos b}{2\cos\frac{1}{2}c}$$

$$cot\ d_c = \frac{\cot a + \cot b}{2\cos\frac{1}{2}\gamma}$$

$$\sin h_c = \frac{2n}{\sin c} = \frac{2N}{\sin\gamma}$$

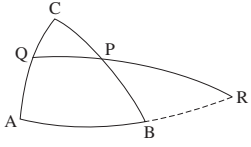






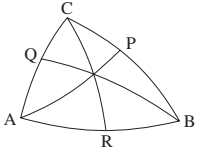
Stelling van Menelaos:

$$\frac{\sin PB}{\sin PC}\cdot\frac{\sin QC}{\sin QA}\cdot\frac{\sin RA}{\sin RB}=1$$



Stelling van Ceva:

$$\frac{\sin PB}{\sin PC}\cdot\frac{\sin QC}{\sin QA}\cdot\frac{\sin RA}{\sin RB}=-1$$



Als $E=\alpha+\beta+\gamma-180^\circ$:

$$\tan\tfrac{1}{4}E=\sqrt{\tan\tfrac{1}{2}s\cdot\tan\tfrac{1}{2}(s-a)\cdot\tan\tfrac{1}{2}(s-b)\cdot\tan\tfrac{1}{2}(s-c)}\quad\text{(Lhuilier)}$$

$$\cot\tfrac{1}{2}E=\frac{\cot\tfrac{1}{2}a\cdot\tfrac{1}{2}b+\cos\gamma}{\sin\gamma}$$

$$\sin\tfrac{1}{2}E=\frac{\sin\tfrac{1}{2}a\cdot\sin\tfrac{1}{2}b\cdot\sin\gamma}{\cos\tfrac{1}{2}c}\left(=\frac{n}{2\cos\tfrac{1}{2}a\cdot\cos\tfrac{1}{2}b\cdot\cos\tfrac{1}{2}c}\right)$$

(Cagnoli)

R en r zijn de stralen op het boloppervlak van de omgeschreven, resp. ingeschreven cirkel.

$$\tan R=\frac{\tan\tfrac{1}{2}c}{\cos(S-\gamma)}=\frac{\sin\tfrac{1}{2}c}{\cos\tfrac{1}{2}a\cdot\cos\tfrac{1}{2}b\cdot\sin\gamma}$$

$$=\frac{2\sin\tfrac{1}{2}a\cdot\sin\tfrac{1}{2}b\sin\tfrac{1}{2}c}{n}=\frac{-\cos S}{N}$$

(voor n, s, N en S zie pag. A2/46)

$$\cot r=\frac{\cos\tfrac{1}{2}\gamma}{\sin\tfrac{1}{2}\alpha\cdot\sin\tfrac{1}{2}\beta\cdot\sin c}=\frac{\cot\tfrac{1}{2}\gamma}{\sin(s-c)}$$

$$=\frac{2\cos\tfrac{1}{2}\alpha\cdot\cos\tfrac{1}{2}\beta\cdot\cos\tfrac{1}{2}\gamma}{N}=\frac{\sin s}{n}$$

5 Analytische meetkunde

Zie ook par. 2.4.

Rechte lijn
Algemene vergelijking:

$$Ax + By + C = 0 \text{ of: } y = mx + n$$

waarin:
$m = \tan \alpha$ (richtingscoëfficiënt)
α = hoek die de rechte maakt met de X-as
n = dat deel van de Y-as dat door de rechte wordt 'afgesneden'

Rechte die delen a en b van resp. X-as en Y-as afsnijdt:

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$$

Rechte door punt (x_1, y_1) met richtingscoëfficiënt m:

$$(y - y_1) = m(x - x_1)$$

Rechte door de punten (x_1, y_1) en (x_2, y_2):

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

Cirkel
Middelpuntsvergelijking (middelpunt in O; straal r):

$$x^2 + y^2 = r^2$$

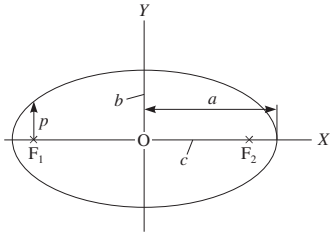
Cirkel met middelpunt M(p, q) en straal r:

$$(x - p)^2 + (y - q)^2 = r^2$$

Raaklijn aan deze cirkel in punt (x_1, y_1):

$$(x_1 - p)(x - p) + (y_1 - q)(y - q) = r^2$$

Ellips



Vergelijking op de symmetrie-assen (middelpunt in oorsprong):

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$$

Vergelijking bij middelpunt (x_0, y_0), met symmetrie-assen // coördinaatassen:

$$\frac{(x-x_0)^2}{2}+\frac{(y-y_0)^2}{b^2}=1$$

Brandpunten: $(x_0 \pm c, y_0)$

$$c=\sqrt{a^2-b^2};\ \text{excentriciteit } e=\frac{c}{a}(<1)$$

Richtlijnen: $x=x_0\pm\dfrac{a^2}{c}$

Parameter: $p=\dfrac{b^2}{a}$ (halve koorde door brandpunt $\perp$ hoofdas)

Raaklijn in (x_1, y_1):

$$\frac{(x_1-x_0)(x-x_0)}{a^2}+\frac{(y_1-y_0)(y-y_0)}{b^2}=1$$

Normaal in (x_1, y_1):

$$\frac{(x_1-x_0)(y-y_1)}{a^2}=\frac{(y_1-y_0)(x-x_1)}{b^2}$$

Subnormaal[1]: $\dfrac{b^2}{a^2}(x_1-x_0)$

[1] De *subnormaal* is de (grootte van de) projectie op de X-as van de normaal tussen zijn voetpunt en zijn snijpunt met de X-as.

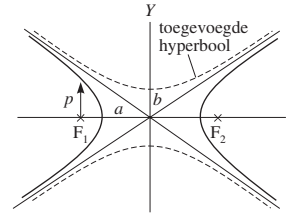
Toegevoegde richting (bij vergelijking op de symmetrie-assen):

$$m \cdot m' = -\frac{b^2}{a^2} \quad (m' \text{ is toegevoegde richtingscoëff.})$$

Hyperbool

Vergelijking op de symmetrie-assen (middelpunt in oorsprong):

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$$



Toegevoegde hyperbool:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = -1$$

Vergelijking bij middelpunt (x_0, y_0), met symmetrie-assen // coördinaatassen:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1$$

Asymptoten: $\dfrac{(y-y_0)}{b} = \pm\dfrac{(x-x_0)}{a}$

Vergelijking op de asymptoten: $(x-x_0)(y-y_0) = \pm\ \frac{1}{4}c^2$

Brandpunten: $(x_0 \pm c, y_0)$

$c = \sqrt{a^2+b^2}$; excentriciteit $e = \dfrac{c}{a} (> 1)$

Richtlijnen: $x = x_0 \pm \dfrac{a^2}{c}$

Parameter: $p = \dfrac{b^2}{a}$

Raaklijn in (x_1, y_1):

$$\frac{(x_1 - x_0)(x - x_0)}{a^2} - \frac{(y_1 - y_0)(y - y_0)}{b^2} = 1$$

Normaal in (x_1, y_1):

$$\frac{(y - y_1)(x_1 - x_0)}{a^2} = -\frac{(y_1 - y_0)(x - x_1)}{b^2}$$

Subnormaal: $\dfrac{b^2}{a^2}(x_1 - x_0)$

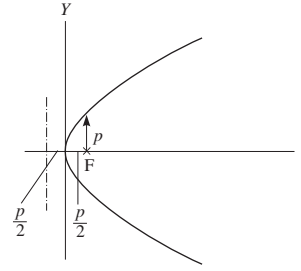
Toegevoegde richting (bij vergelijking op de symmetrie-assen):

$$m \cdot m' = \frac{b^2}{a^2}$$ (m' is toegevoegde richtingscoëff.)

Parabool

Topvergelijking, top in oorsprong, symmetrie-as langs X-as:

$$y^2 = 2px$$



Vergelijking bij top in (x_0, y_0);

$$(y - y_0)^2 = 2p(x - x_0)$$

Brandpunt: $(x_0 + \frac{1}{2}p,\ y_0)$

Richtlijn: $x = x_0 - \frac{1}{2}p$

Raaklijn in (x_1, y_1):

$$(y_1 - y_0)(y - y_0) = p(x + x_1 - 2x_0)$$

Normaal in (x_1, y_1):

$$p(y - y_1) + (y_1 - y_0)(x - x_1) = 0$$

Subnormaal: p

6 Differentiaal- en integraalrekening

6.1 Differentiaalrekening

De *differentiaalrekening* bestudeert de verandering van de afhankelijk variabele y in verhouding tot de verandering van de onafhankelijke variabele x, waarbij deze laatste veranderingen naar nul naderen.

Met Δx (*differentie*) wordt een, meestal kleine, meetbare verandering van de variabele x aangegeven, zo is bij $y = f(x)$ de verandering van y : $\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x)$.

Toepassing differentiaalrekening : o.a. bij bepaling extremen (zie ook hierna).

Differentiequotiënt: $\dfrac{\Delta y}{\Delta x} = \dfrac{f(x_1 + \Delta x) - f(x_1)}{\Delta x}$

Meetkundig is dit de gemiddelde toename van A naar B en gelijk aan de *richtingscoëfficiënt* (r.c.) tan β van de *koorde AB* (zie figuur 6.1).

Differentiaalquotiënt: $\dfrac{dy}{dx} = \lim\limits_{\Delta x \to 0} \dfrac{\Delta y}{\Delta x}$

Dit wordt ook genoteerd als : $f'(x)$ of y' of $\mathrm{D}\, f(x)$ of $\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x} f(x)$.

Meetkundig is dit de *helling van de grafiek* (= helling van de *raaklijn* ter plaatse) en gelijk aan de richtingscoëfficiënt (tan α) van de raaklijn in A.

Afgeleide functies

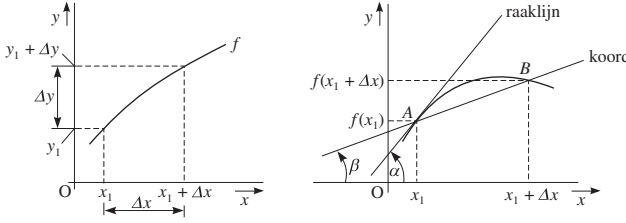
(Eerste) afgeleide functie van $f(x)$: wordt genoteerd door $f'(x)$ en bepaalt voor elke x uit het domein van f het differentiaalquotiënt.

$f'(x_1) > 0$: de grafiek stijgt bij x_1.
$f'(x_1) = 0$: de grafiek heeft bij x_1 een horizontale raaklijn.
$f'(x_1) < 0$: de grafiek daalt bij x_1.

Tweede afgeleide functie van $f(x)$: wordt genoteerd door $f''(x)$ of y'' of $\dfrac{d^2y}{dx^2}$ en is de afgeleide functie van $f'(x)$.

Dit voortzettend krijgt men de hogere afgeleiden $f^{(n)}(x)$.

Opmerking: de afgeleiden behoeven niet te bestaan. Om de eerste afgeleide te kunnen bepalen moet de functie in ieder geval continu zijn, de continuïteit alleen is echter niet voldoende.



Figuur 6.1 Differentiequotiënt en differentiaalquotiënt (toelichting: zie tekst)

Tabel 6.1 Basisregels voor bepalen differentiaalquotiënt

$f(x)$	$f'(x)$	$f(x)$	$f'(x)$
C (constant)	0	x^p	$p{\cdot}x^{p-1}$ (mits $p \neq 0$)
e^x	e^x	$\ln \lvert x \rvert$	$1/x$
a^x	$a^x \ln a$ (mits $a > 0$)	$\log_a \lvert x \rvert$	$1/(x \ln a)$(mits $a > 0$ $(=(\log_a e)/x)$
$\sin x$	$\cos x$	$\arcsin x$	$1/\sqrt{1-x^2}$
$\cos x$	$-\sin x$	$\arccos x$	$-1/\sqrt{1-x^2}$
$\tan x$	$1/\cos^2 x$	$\arctan x$	$1/(1+x^2)$
$\cot x$	$-1/\sin^2 x$	$\operatorname{arccot} x$	$-1/(1+x^2)$
$\sinh x$	$\cosh x$	$\operatorname{arsinh} x$	$1/\sqrt{x^2+1}$
$\cosh x$	$\sinh x$	$\operatorname{arcosh} x$	$1/\sqrt{x^2-1}$
$\tanh x$	$1/\cosh^2 x$	$\operatorname{artanh} x$	$1/(1-x^2)$

Rekenregels

Als $F(x) = cf(x)$, dan is $F'(x) = cf'(x)$ (mits $f'(x)$ bestaat).

Som/verschil

$F(x) = f(x) \pm g(x)$, dan is:

$F'(x) = f'(x) \pm g'(x)$

Product

$F(x) = f(x)g(x)$, dan is:

$F'(x) = f'(x)g(x) + f(x)g'(x)$

Quotiënt

$F(x) = f(x)/g(x)$, dan is:

$$F'(x) = \frac{g(x)f'(x) - g'(x)f(x)}{g^2(x)} \quad (\text{mits } g(x) \neq 0)$$

Kettingregel

De meeste functies zijn samengesteld uit een aantal eenvoudige functies. Als $F(x) = f\{g(x)\}$ en van $f(y)$ en $g(x)$ bestaan de afgeleiden, dan is $F'(x) = f'\{g(x)\}\, g'(x)$, of anders genoteerd:

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}g} \cdot \frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}x}$$

Voorbeelden:

(1) $F(x) = \sin^3 x$, dan $F'(x) = 3 \sin^2 x \cdot \cos x$

(2) $F(x) = \mathrm{e}^{x^2}$, dan $F'(x) = 2x\mathrm{e}^{x^2}$

Inverse regel

Stel $y = f(x)$ en $x = g(y)$ de inverse functie (als deze bestaat), dan is $g'(y) = 1/f'(x)$; waarin: $x = g(y)$ (mits $f'(x) \neq 0$).

Voorbeeld: $y = f(x) = \mathrm{e}^x$, dan $x = g(y) = \ln y$, dus:

$$g'(y) = \frac{1}{\mathrm{e}^x} = \frac{1}{y}$$

Partiële afgeleide

Als f een functie van meer variabelen is, dan is de *partiële afgeleide* van f naar x:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x+\Delta x, y) - f(x,y)}{\Delta x}$$

en de *partiële afgeleide* van f naar y:

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{\Delta y \to 0} \frac{f(x, y+\Delta y) - f(x,y)}{\Delta y},$$

Voorbeeld: $f(x, y) = x^2 y$; $\dfrac{\partial f}{\partial x} = 2xy$ en $\dfrac{\partial f}{\partial y} = x^2$.

Totale differentiaal

$$\mathrm{d}f = \frac{\partial f}{\partial x}\mathrm{d}x + \frac{\partial f}{\partial y}\mathrm{d}y(+\ldots)$$

Extremen bij functies van één onafhankelijke variabele

Met behulp van de differentiaalrekening bepaalt men de extremen van de functie $y = f(x)$. Als $f'(x_0)$ bestaat dan geldt:

- *maximum* $= f(x_0)$ als $f'(x_0) = 0$ èn $f''(x_0) < 0$
- *minimum* $= f(x_0)$ als $f'(x_0) = 0$ èn $f''(x_0) > 0$

Als $f''(x_0)$ bestaat dan geldt:
- *buigpunt* bij x_0 als $f''(x_0) = 0$ en $f^{(3)}(x_0) \neq 0$

Extremen bij functies van meer onafhankelijke variabelen

Stel $z = f(x, y)$ met afgeleiden: $\dfrac{\partial z}{\partial x}, \dfrac{\partial z}{\partial y}, \dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \dfrac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ en $\dfrac{\partial^2 z}{\partial y^2}$

Als de relevante afgeleiden bestaan dan geldt het volgende:

noodzakelijk voor inwendig extreem: $\dfrac{\partial z}{\partial x} = 0$ èn $\dfrac{\partial z}{\partial y} = 0$

Stelt men $\Delta = \dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2}\dfrac{\partial^2 z}{\partial y^2} - \left(\dfrac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right)^2 \neq 0$, dan heeft men in het betrokken punt (x_0, y_0):

– *maximum* $= f(x_0, y_0)$ als $\Delta(x_0, y_0) > 0$ èn $\dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2} < 0$

– *minimum* $= f(x_0, y_0)$ als $\Delta(x_0, y_0) > 0$ èn $\dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2} > 0$

– *zadelpunt* bij (x_0, y_0) als $\Delta(x_0, y_0) < 0$

Is $\Delta(x_0, y_0) = 0$ dan moet men meestal ook de hogere afgeleiden in het probleem betrekken.

6.2 Integraalrekening

Integreren kan worden opgevat als de inverse bewerking van *differentiëren*.

Primitieve functie, onbepaalde integraal

Een *primitieve functie* $F(x)$ van $f(x)$, heeft de eigenschap: $F'(x) = f(x)$. Bij $F(x)$ is een willekeurige constante (de zogenaamde integratieconstante) op te tellen; steeds geldt $F'(x) = f(x)$.

De verzameling van alle zo te verkrijgen primitieven heet de *onbepaalde integraal*. Notatie: $F(x) = \int f(x)\,\mathrm{d}x$.

Voorbeeld: $f(x) = x$.

$$F(x) = \int x\,\mathrm{d}x = \tfrac{1}{2}x^2 + C, \quad \text{want } (\tfrac{1}{2}x^2 + C)' = x.$$

Basisregels voor onbepaald integreren (zonder integratieconstante)

$$\int a\,\mathrm{d}x = ax; \qquad \int \frac{1}{x}\mathrm{d}x = \ln|x| \ \ (x \neq 0)$$

$$\int x^p \mathrm{d}x = \frac{1}{p+1} x^{p+1} \quad p \in \mathbb{R}\backslash\{-1\})$$

$$\int \mathrm{e}^x \ \mathrm{d}x = \mathrm{e}^x; \quad \int a^x \ \mathrm{d}x = \frac{a^x}{\ln a} (a \in \mathbb{R}^+\backslash\{1\})$$

$$\int \sin x \ \mathrm{d}x = -\cos x; \quad \int \tan x \ \mathrm{d}x = -\ln|\cos x|$$

$$\int \cos x \ \mathrm{d}x = \sin x; \quad \int \cot x \ \mathrm{d}x = \ln|\sin x|$$

$$\int \frac{1}{\sin x} \mathrm{d}x = \ln|\tan \tfrac{1}{2} x|; \quad \int \frac{1}{\sin^2 x} \mathrm{d}x = -\cot x$$

$$\int \frac{1}{\cos x} \mathrm{d}x = \ln\left|\frac{1}{\cos x} + \tan x\right|; \quad \int \frac{1}{\cos^2 x} \mathrm{d}x = \tan x$$

$$\int \frac{1}{a^2 + x^2} \mathrm{d}x = \frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a}; \quad \int \frac{1}{x^2 - a^2} \mathrm{d}x = \frac{1}{2a} \ln\left|\frac{x-a}{x+1}\right|$$

$$\int \frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2}} \mathrm{d}x = \arcsin \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{1}{\sqrt{x^2 \pm a^2}} \mathrm{d}x = \ln|x + \sqrt{x^2 \pm a^2}|$$

$$\int \mathrm{e}^{ax} \cos bx \, \mathrm{d}x = \frac{\mathrm{e}^{ax}(a \cos bx + b \sin bx)}{a^2 + b^2}$$

$$\int \mathrm{e}^{ax} \sin bx \, \mathrm{d}x = \frac{\mathrm{e}^{ax}(a \sin bx - b \cos bx)}{a^2 + b^2}$$

Reductieformules

Voor $n,\ m \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$:

$$\int \cos^n x \,\mathrm{d}x = \frac{\cos^{n-1} x \cdot \sin x}{n} + \frac{n-1}{n} \int \cos^{n-2} x \,\mathrm{d}x$$

$$\int \sin^n x \,\mathrm{d}x = -\frac{\sin^{n-1} x \cdot \cos x}{n} + \frac{n-1}{n} \int \sin^{n-2} x \,\mathrm{d}x$$

$$\int \sin^{m-1} x \cos^n x \,\mathrm{d}x =$$

$$= \frac{\sin^{m-1} x \cdot \cos^{n+1} x}{m+n} + \frac{m-1}{m+n} \int \sin^{m-2} x \cos^n x \,\mathrm{d}x$$

$$= \frac{\sin^{m+1} x \cdot \cos^{n-1} x}{m+n} + \frac{n-1}{m+n} \int \sin^m x \cos^{n-2} x \,\mathrm{d}x$$

Lineariteit

$$\int \{f(x) \pm g(x)\} \,\mathrm{d}x = \int f(x) \,\mathrm{d}x \pm \int g(x) \,\mathrm{d}x$$

$$\int cf(x) \,\mathrm{d}x = c \int f(x) \,\mathrm{d}x$$

Diverse integratiemethoden

Substitutiemethode. Door $f(x) = t$ te stellen krijgt men :

$$\int F\{f(x)\} f'(x) \,\mathrm{d}x = \int F(t) \,\mathrm{d}t$$

In het bijzonder geldt :

$$\int \frac{f'(x)}{f(x)} \mathrm{d}x = \ln |f(x)| + C \quad (\text{mits } f(x) \neq 0)$$

Voor bepaalde integralen: $\displaystyle\int_a^b F\{f(x)\} f'(x) \,\mathrm{d}x = \int_{f(a)}^{f(b)} F(t) \,\mathrm{d}t$

Partieel integreren. Zijn $F(x)$ en $G(x)$ primitieven van $f(x)$ resp. $g(x)$ dan is:

$$\int f(x)G(x)\,\mathrm{d}x = F(x)G(x) - \int F(x)g(x)\,\mathrm{d}x$$

Voorbeelden:
(1) $\int xe^x\,\mathrm{d}x = xe^x - \int e^x\,\mathrm{d}x = xe^x - e^x + C$
(2) $\int (x^2+3x)^2\,(2x+3)\,\mathrm{d}x = \int t^2\,\mathrm{d}t = \frac{1}{3}t^3 + C =$
$= \frac{1}{3}(x^2+3x)^3 + C$
(3) Zie bij reductieformules hiervoor.

Partieel-breuksplitsing. Elke rationale functie van de vorm $\dfrac{f(x)}{g(x)}$ (graad $f <$ graad g, anders is dit door uitdelen te bereiken) kan in partieel-breuken worden gesplitst.

Daartoe is $g(x)$ te ontbinden in factoren van de vorm $(ax+b)^k$ en/of $(px^2+qx+r)^l$.

$\dfrac{f(x)}{g(x)}$ is nu een som van partieel-breuken met de gedaante:

$$\sum_{j=1}^{k} \frac{A_j}{(ax+b)^j} \text{ en } \sum_{m=1}^{l} \frac{B_m x + C_m}{(px^2+qx+r)^m}$$

Men kan nu elk van deze breuken afzonderlijk integreren.

Bepaalde integraal

Het berekenen van de *bepaalde integraal* geschiedt volgens:

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = F(b) - F(a)$$

Waarin $F(x)$ een *primitieve functie* van $f(x)$ is; $F'(x) = f(x)$. (*Hoofdstelling*.)

Eigenschappen :

$$\int_a^a f(x)\,\mathrm{d}x = 0; \quad \int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = -\int_b^a f(x)\,\mathrm{d}x$$

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x + \int_b^c f(x)\,\mathrm{d}x = \int_a^c f(x)\,\mathrm{d}x$$

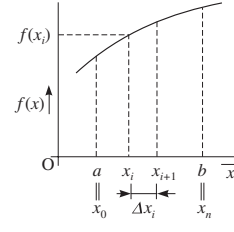
Is $f(x)$ continu, dan bestaat $\int_a^x f(t)\,\mathrm{d}t = F(x) - F(a)$ en geldt :

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\int_a^x f(t)\,\mathrm{d}t = f(x)$$

D.w.z differentiëren van een bepaalde integraal met variabele bovengrens levert de integrand *in* die bovengrens op.
$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x$ is op te vatten als de oppervlakte onder $f(x)$ als $f(x) > 0$.

Meetkundig (zie figuur 6.2) :

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = \lim_{\Delta x_i \to 0} \sum_{i=0}^{n-1} f(x_i)\Delta x_i$$



Figuur 6.2 Integreren

Middelwaardestelling : $\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = (b-a)f(\xi)$ met $a \leqslant \xi \leqslant b$

Oneigenlijke integralen

Bij oneigenlijke integralen wordt òf de integrand òf het integratie-interval *oneindi groot* (eventueel beide) :

– *Oneigenlijke integraal van de eerste soort* (zie figuur 6.3a): één of beide integratie-grenzen is oneindig en de integrand is verder continu.

$$\int_a^{\infty} f(x)\,\mathrm{d}x := \lim_{b\to\infty}\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x$$

Voorbeeld:

$$\int_0^{\infty} xe^{-x}\,\mathrm{d}x = \lim_{b\to+\infty}\int_0^b xe^{-x}\,\mathrm{d}x =$$

$$= \lim_{b\to+\infty}\left[-xe^{-x} - e^{-x}\right]_0^b = 1$$

– *Oneigenlijke integraal van de tweede soort* (zie figuur 6.3b): het integratie-interval is eindig, maar de integrand heeft een discontinuïteit in een punt van het interval:

$$\int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = \lim_{\varepsilon\uparrow 0}\int_a^{c-\varepsilon} f(x)\,\mathrm{d}x + \lim_{\delta\downarrow 0}\int_{c+\delta}^b f(x)\,\mathrm{d}x,$$

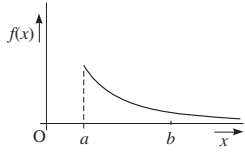
als de discontinuïteit in $x = \mathrm{c}$ optreedt. Vaak valt c in één der eindpunten.
Voorbeeld:

$$\int_0^4 \frac{1}{\sqrt{x}}\,\mathrm{d}x = \lim_{\varepsilon\downarrow 0}\int_\varepsilon^4 \frac{1}{\sqrt{x}}\,\mathrm{d}x =$$

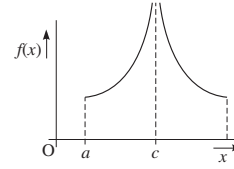
$$= \lim_{\varepsilon\downarrow 0}\left[2\sqrt{x}\right]_\varepsilon^4 = \lim_{\varepsilon\downarrow 0}\left[4 - 2\sqrt{\varepsilon}\right] = 4$$

– Treden er een aantal 'moeilijkheden' bij dezelfde integraal op dan splitst men het integratie-interval in een aantal delen zodat per deel één oneigenlijkheid optreedt.

Bestaat de limiet in bovenstaande gevallen dan heet de oneigenlijke integraal *convergent*, anders *divergent*.



*Figuur 6.3a Oneigenlijke integraal van de **eerste** soort*

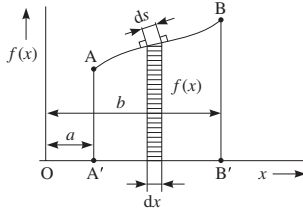


*Figuur 6.3b Oneigenlijke integraal van de **tweede** soort*

6.3 Toepassingen integraalrekening

Lengte van een vlakke kromme

$$\text{Lengte AB:} s = \int \mathrm{d}s = \int_a^b \sqrt{1 + \{f'(x)\}^2}\,\mathrm{d}x$$



Oppervlakte van een vlakke figuur

$$\text{Oppervlakte ABB'A':A} = \int_a^b f(x)\,\mathrm{d}x = F(b) - F(a)$$

Inhoud omwentelingslichaam[1)]

Bij wenteling van AA′B′B om de X-as: $V = \pi \int_a^b \{f(x)\}^2 \, \mathrm{d}x$

Manteloppervlakte omwentelingslichaam[1)]

Bij wenteling van AA′B′B om de X-as, is de door AB beschreven oppervlakte:

$$A_1 = 2\pi \int_a^b f(x)\sqrt{1 + \{f'(x)\}^2} \cdot \mathrm{d}x$$

Coördinaten oppervlakte-middelpunt (zwaartepunt)

Het *oppervlakte-middelpunt* van AA′B′B heeft de coördinaten:

$$x_M = \frac{1}{A} \int_a^b x\{f(x)\} \, \mathrm{d}x$$

$$y_M = \frac{1}{A} \int_a^b \frac{1}{2}\{f(x)\}^2 \, \mathrm{d}x$$

waarin: $A =$ opp. AA′B′B

6.4 *Gewone differentiaalvergelijkingen*

Begrippen

Gewone differentiaalvergelijking (DV): een vergelijking waarin behalve de onafhankelijke variabele x en de daarvan afhankelijke variabele y, ook nog afgeleiden van y naar x voorkomen.

Algemene vorm: $F(x, y, y', y'' \ldots y^{(n)}) = 0$ (1)

[1)] Regels van Guldin, zie pag. A2/38.

Orde: de DV is van de n^e orde wanneer de hoogst afgeleide die er in voorkomt, de n^e afgeleide is.
Graad: de graad van de DV wordt aangegeven door de hoogste macht waartoe de afhankelijke variabele of enige afgeleide daarvan, voorkomt.
Lineaire differentiaalvergelijking: een DV van de eerste graad.
Oplossing of integraal van een DV: een functie $y(x)$ die bij substitutie in (1) een identiteit in x doet ontstaan.
Algemene oplossing (AO) van de DV: een functie $y = f\ (x,\ C_1,\ \ldots,\ C_n)$ waarin het aantal integratie-constanten overeenkomt met de orde van de DV.
Particuliere oplossing (PO) van de DV: verkrijgt men door aan de integratie-constanten waarden toe te kennen. Vaak worden deze toegekend op basis van gegeven *beginvoorwaarden*.
Singuliere oplossing (SO) van de DV: dit is een oplossing die niet bevat is in de algemene oplossing, maar bijv. als *omhullende* van de AO wordt verkregen.

Hieronder worden een aantal *oplossingsmethoden* voor DV's nader toegelicht.

Scheiding van variabelen

Als y' expliciet is uit te drukken in x en y: $y' = F\ (x,\ y)$, kan geschreven worden:

$$P(x, y)\,\mathrm{d}x + Q(x, y)\,\mathrm{d}y = 0 \tag{2}$$

In het bijzondere geval dat
$P\ (x,\ y) = R_1\ (x) \cdot S_2\ (y)$ en $Q\ (x,\ y) = R_2\ (x) \cdot S_1\ (y)$
is (2) te herschrijven als:

$$\frac{R_1(x)}{R_2(x)}\mathrm{d}x + \frac{S_1(y)}{S_2(y)}\mathrm{d}y = 0$$

waarin de variabelen gescheiden zijn.
Deze vergelijking is nu door integratie op te lossen.

Homogene vergelijking

Wanneer P en Q in (2) homogene functies van x en y zijn van dezelfde graad n, heeft de DV de vorm $\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x} + f(y/x) = 0$. Door

substitutie van $y = x \cdot u$ kunnen de variabelen worden gescheiden en de DV geïntegreerd:

$$x = C \cdot \exp\left\{ - \int \frac{\mathrm{d}u}{f(u) + u} \right\}$$

Exacte differentiaalvergelijking

$P\ (x,\ y)\mathrm{d}x + Q\ (x,\ y)\mathrm{d}y = 0$ is exact wanneer het linkerlid een exacte differentiaal is (een totale differentiaal van de functie van x en y voorstelt): $\dfrac{\partial P}{\partial y} = \dfrac{\partial Q}{\partial x} (= F)$

Oplossing: $\int P \cdot \mathrm{d}x + \int \left\{ Q - \int F \cdot \mathrm{d}x \right\} \mathrm{d}y = C$

Differentiaalvergelijking van Bernoulli

$y' + P\ (x) \cdot y + Q\ (x) \cdot y^n = 0 \quad (n \in \mathbb{N}^+ \mid n > 1)$

Met de substitutie $y^{1-n} = z$, dus $(1 - n) \cdot y^{-n} \cdot y' = z'$ ontstaat de lineaire vergelijking:

$$\left(\frac{1}{1-n} \right) \cdot z' + P(x) \cdot z + Q(x) = 0$$

Is de vergelijking lineair ($n = 1$), zie hierna.

Lineaire differentiaalvergelijking (eerste orde)

$y' + P\ (x) \cdot y + Q\ (x) = 0$

Substitueer $y = u(x) \cdot v(x)$, met $v\ (x)$ een *willekeurige* functie van x.

Dit geeft $u\ \{v' + v \cdot P\ (x)\} + v \cdot u' + Q\ (x) = 0$.

Kies v zodanig dat de coëfficiënt van u nul wordt:

$v' + v \cdot P\ (x) = 0$.

De oplossing hiervan is $v_0 = C_1 \cdot \exp\{ - \int P\ (x)\ \mathrm{d}x\}$

Dan resteert $u' = -\dfrac{Q(x)}{v_0} = \dfrac{Q(x)}{C_1} \exp\{+ \int P(x)\, \mathrm{d}x\}$

met oplossing $u = -\dfrac{1}{C_1} \int Q(x) \exp\{+ \int P(x)\, \mathrm{d}x\}\, \mathrm{d}x + C_2$

en ten slotte: $y = u \cdot v_0$

Lineaire differentiaalvergelijkingen (hogere orde)

Algemene vorm:

$P_n(x)y^{(n)} + P_{n-1}(x)y^{(n-1)} + \ldots + P_0(x) \cdot y = r(x)$

of in verkorte notatie: $L_n\ (y) = r\ (x)$

Gereduceerde vergelijking: $L_n\ (y) = 0$. Deze is *homogeen* in $y, y' \ldots y^{(n)}$ en heeft in het algemeen een stelsel van n onafhankelijke oplossingen $y_1, y_2 \ldots y_n$, een stelsel *hoofdoplossingen* of een *fundamenteel stelsel* of een *basis* genaamd. De oplossingen $y_1, y_2 \ldots y^{(n)}$ heten elk een *particuliere* of een *bijzondere oplossing* (PO).

Iedere oplossing van de gedaante $y = C_1 \cdot y_1 + C_2 \cdot y_2 + \ldots C_n \cdot y_n$ heet de *algemene oplossing* (AO). $C_1, C_2 \ldots C_n$ zijn de integratieconstanten, die in concrete gevallen met behulp van de begin-of randvoorwaarden kunnen worden bepaald.

Homogene vergelijking met constante coëfficiënten

$$a_n \cdot y^{(n)} + \ldots a_1 \cdot y' + a_0 \cdot y = 0$$

Methode van Euler: substitueer $y = e^{\lambda \cdot x}$ (λ is constant), dan $y^{(k)} = \lambda^k \cdot e^{\lambda \cdot x}$, dus moet λ na substitutie voldoen aan:

$$a_n \cdot y^n + a_{n-1} \cdot \lambda^{n-1} + \ldots + a_0 = 0$$

Deze zg. *karakteristieke vergelijking* heeft n oplossingen $\lambda_1 \ldots \lambda_n$; deze kunnen enkel- of meervoudig en reëel of complex zijn. Zijn alle wortels verschillend (dus reëel) dan is de algemene oplossing van de harmonische vergelijking:

$$y = \sum_{i=1}^{n} C_i \cdot e^{\lambda_1 \cdot x}$$

Bij een complex oplossingspaar (α_i, α_i^*) van de karakteristieke vergelijking behoort een deeloplossing:

$$C_i \cdot e^{\alpha_i \cdot x} + C_i^* \cdot e^{\alpha_i^* \cdot x}$$

Bij een k-voudige oplossing β van de karakteristieke vergelijking behoort de deeloplossing:

$$\{C_0 + C_1 \cdot x + \ldots C_{k-1} \cdot x^{k-1}\} e^{\beta \cdot x}$$

Niet-homogene lineaire differentiaalvergelijkingen
Algemene vorm: $L_n(y) = r(x) \quad (r(x) \not\equiv 0)$
Als $y_0(x)$ één enkele *particuliere oplossing* van de volledige DV is $[L_n(y_0) = r(x)]$ en $u(x)$ de *algemene* oplossing is van de gereduceerde vergelijking $L_n(y) = 0$ (dus $L_n(u) = 0$) en $y_0(x)$ geen oplossing is van de gereduceerde vergelijking, dan is de algemene oplossing van de volledige DV:

$$y(x) = y_0(x) + u(x)$$

In een aantal gevallen kan de PO door *proberen* worden gevonden. Een algemene methode is die van de *variatie der constanten* (Lagrange) maar deze is meestal zeer bewerkelijk.

6.5 Partiële differentiaalvergelijkingen

Een *partiële differentiaalvergelijking* (PDV) heeft de gedaante:

$$F\left(x, y, z, \frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, \ldots\right) = 0$$

Men classificeert deze PDV's naar *orde*. De *orde* van de PDV is de orde van de hoogste partiële afgeleide die voorkomt.

Een *oplossing* van een PDV is een functie $z = f(x, y)$ die na substitutie de PDV in een identiteit doet overgaan.

$$\textit{Voorbeeld: } \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0 \Rightarrow z = f(x) + g(y)$$

Waarin f en g willekeurige differentieerbare functies zijn.

Bij het oplossen of integreren van PDV's krijgt men in plaats van willekeurige integratie-constanten willekeurige (differentieerbare) functies.

7 Transformaties (Fourier, Laplace)

7.1 Fourier-analyse

Een periodieke functie met periode T kan worden geschreven in een *Fourier-reeks*:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \{a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)\}$$

waarin: $\omega_0 = \dfrac{2\pi}{T}$ de grond-cirkelfrequentie

Verder is:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau)\mathrm{d}\tau$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau)\cos(n\omega_0\tau)\mathrm{d}\tau$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau)\sin(n\omega_0\tau)\mathrm{d}\tau \quad n = 1, 2, 3, \ldots$$

$f(t)$ in **complexe vorm**:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(\mathrm{j}n\omega_0 t)$$

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau)\exp(-\mathrm{j}n\omega_0\tau)\mathrm{d}\tau$$

met $c_n = |c_n|\exp(\mathrm{j}\phi_n)$ en $c_{-n} = c_n^* = |c_n|\exp(-\mathrm{j}\phi_n)$

Amplitude-spectrum: $|c_n|$ uitgezet naar cirkelfrequentie ω
Fase-spectrum: ϕ_n uitgezet naar ω

Tabel 7.1 Symmetrievormen

symmetrievormen	kenmerk $f(t) =$	leidt tot $f(t) =$
verschuivingssymmetrie	$-f\left(t+\frac{T}{2}\right)$	$a_1 \cos\omega t + a_3 \cos 3\ \omega t + \ldots +$ $+\ b_1 \sin \omega t + b_3 \sin 3\ \omega t + \ldots$
radiale symmetrie	$-f(-t)$	$b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\ \omega t +$ $+\ b_3 \sin 3\ \omega t + \ldots$
radiale-en verschuivingssymmetrie	$-f(-t) =$ $-f\left(t+\frac{T}{2}\right)$	$b_1 \sin \omega t + b_3 \sin 3\ \omega t +$ $+\ b_5 \sin 5\ \omega t + \ldots$
spiegelbeeldsymmetrie	$f(-t)$	$a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\ \omega t +$ $+\ a_3 \cos 3\ \omega t + \ldots$
spiegelbeeld-en verschuivingssymmetrie	$f(-\mathrm{t}) =$ $-f\left(t+\frac{T}{2}\right)$	$a_1 \cos \omega t + a_3 \cos 3\ \omega t +$ $+\ a_5 \cos 5\ \omega t + \ldots$

Opmerking : bij de Fourier-componenten kan weer per component de complexe rekenwijze worden toegepast.

7.2 Fourier-transformatie

Voor niet-periodieke functies die absoluut integreerbaar zijn is de *transformatie van Fourier* toepasbaar.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(\mathrm{j}\omega t)\mathrm{d}\omega$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \exp(-\mathrm{j}\omega\tau)\mathrm{d}\tau$$

$F(\omega)$ is de Fouriergetransformeerde:

$$F(\omega) = |F(\omega)| \exp\{\mathrm{j}\phi(\omega)\}$$

waarin:
$F(\omega)$ = complexe spectrum van $f(t)$
$|F(\omega)|$ = amplitude-spectrum van $f(t)$
$\phi(\omega)$ = fase-spectrum van $f(t)$

Eigenschappen

Lineariteit: $af_1(t) + bf_2(t) \leftrightarrow aF_1(\omega) + bF_2(\omega)$

Verschuiving in het t-gebied: $f(t - t_0) \leftrightarrow F(\omega)\exp(-\mathrm{j}\omega t_0)$

Verschuiving in het ω-gebied: $\exp(\mathrm{j}\omega_0 t) f(t) \leftrightarrow F(\omega - \omega_0)$

Wederkerigheid: $F(t) \leftrightarrow 2\pi f(-\omega)$
$F(-t) \leftrightarrow 2\pi f(\omega)$

Afgeleiden van functies van t: $\dfrac{\mathrm{d}^n f(t)}{\mathrm{d}t^n} \leftrightarrow (\mathrm{j}\omega)^n F(\omega)$

Afgeleiden van functies van ω: $(-\mathrm{j}t)^n f(t) \leftrightarrow \dfrac{\mathrm{d}^n F(\omega)}{\mathrm{d}\omega^n}$

Integratie van functies van t: $\displaystyle\int_{-\infty}^{t} f(\tau)\mathrm{d}\tau \leftrightarrow \left(\frac{1}{\mathrm{j}\omega}\right) F(\omega)$

7.3 *Laplace-transformaties*

Laplace-transformaties kunnen worden toegepast voor functies die niet absoluut integreerbaar hoeven te zijn.

Tweezijdige Laplace-transformatie

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)\exp(-s\tau)\mathrm{d}\tau$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi \mathrm{j}} \int_{\sigma-\mathrm{j}\infty}^{\sigma+\mathrm{j}\infty} F(s) \exp(st) \mathrm{d}s$$

$$s = \mathrm{j}\omega + \sigma$$

Enkelzijdige Laplace-transformatie $f(t) = 0$ voor $t < 0$:

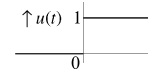
$$F(s) = \int_0^{\infty} f(\tau) \exp(-s\tau) \mathrm{d}\tau$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi \mathrm{j}} \int_{\sigma-\mathrm{j}\infty}^{\sigma+\mathrm{j}\infty} F(s) \exp(st) \mathrm{d}s$$

Notaties: $F(s) = \mathscr{L}\{f(t)\}; f(t) = \mathscr{L}^{-1}\{F(s)\}$

Eigenschappen

$$f(t)u(t) \leftrightarrow F(s) = \int_0^{\infty} f(\tau) \exp(-s\tau) \mathrm{d}\tau$$



$u(t) := 1$ voor $t \geqq 0$
$:= 0$ voor $t < 0$

Lineariteit:

$$\{af_1(t) + bf_2(t)\}u(t) \leftrightarrow aF_1(s) + bF_2(s)$$

Gelijkvormigheid:

$$f(at)u(t) \leftrightarrow (1/|a|)F(s/a)$$

Verschuiving in t-gebied:
$f(t - t_0)u(t - t_0) \leftrightarrow F(s) \exp(-st_0)$
$u(t - t_0) = 1$ voor $t \geqq t_0$
$= 0$ voor $t < t_0$

Verschuiving in s-gebied (dempingsstelling):

$$f(t)\exp(-at)u(t) \leftrightarrow F(s+a)$$

Afgeleiden van functies van t:

$$\{\mathrm{d}f(t)/\mathrm{d}t\}u(t) \leftrightarrow sF(s) - f(0)$$
$$\mathrm{d}\{f(t)u(t)\}/\mathrm{d}t \leftrightarrow sF(s)$$
$$\{\mathrm{d}^2f(t)/\mathrm{d}t^2\}u(t) \leftrightarrow s^2F(s) - sf(0) - f'(0)$$

Integralen van functies van t:

$$\int_0^t f(\tau)\mathrm{d}\tau \leftrightarrow \frac{1}{s}F(s)$$

Theorema's van Abel (begin- en eindwaarde-theorema's):

$$\lim_{s\to\infty} sF(s) = f(0); \quad \lim_{s\to 0} sF(s) = f(\infty)$$

Periodieke functies:

$$f(t+T) = f(t) \leftrightarrow \{1 - \exp(-sT)\}^{-1} \int_0^T f(\tau)\exp(-s\tau)\mathrm{d}\tau$$

Standaardgetransformeerden
Zie tabel 7.2.

7.4 z-transformaties

De *z-transformatie* wordt gebruikt bij het beschrijven van tijdsdirecte verschijnselen en intermitterende systemen, zoals *bemonsterde regelsystemen* (*sampled data control systems*) en *digitale signaalbewerking*. Kenmerkend daarvan is dat alleen de waarden op de equidistante bemonsteringstijdstippen (niet de tussenliggende waarden) worden beschouwd: $f(nT)$, meestal genoteerd als f_n of $f[n]$.

De z-transformatie, die kan worden beschouwd als de discrete vorm van de Laplace-transformatie, is gedefinieerd als:

$$F(z) = \mathscr{Z}\{f(t)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(nT)z^{-n}$$

De factor z^{-1} is niet meer dan een andere schrijfwijze voor e^{-sT} en betekent een vertraging van één bemonsterinterval T.

Beginwaarde-theorema: $\lim_{n\to 0}\{f(nT)\} = \lim_{z\to\infty}\{F(z)\}$

Eindwaarde-theorema: $\lim_{n\to\infty}\{f(nT)\} = \lim_{z\to 1}\{(1-z^{-1})F(z)\}$

Tijdverschuiving: $\mathscr{Z}\{f(nT-kT) = z^{-k}F(z)$

Differentiatie: $\mathscr{Z}\{n\cdot f(nT)\} = -z\dfrac{\mathrm{d}F(z)}{\mathrm{d}z}$

Schaling: $\mathscr{Z}\{a^n f(nT)\} = F(z/a)$
(exponentieel wegen, resulteert in schaling in het z-domein)

Opmerking. *Schaling* komt neer op *frequentieverschuiving*:

$$\frac{z}{a} = \frac{e^{sT}}{a} = \frac{e^{sT}}{e^{\ln a}} = e^{(sT-\ln a)} = \exp\left[\left(s - \frac{1}{T}\ln a\right)T\right]$$

Tabel 7.2 Laplace- en z-getransformeerden

functie in het tijddomein $f(t)$	Laplace-getransformeerde $F(s)$	z-getransformeerde $F(z)$
$\delta(t)$ [1]	1	–
$\delta_n(nT)$ [2]	0	1
$u(t)$ [3]	$\dfrac{1}{s}$	$\dfrac{1}{1-z^{-1}}$
$at\cdot u(t)$	$\dfrac{a}{s^2}$	$\dfrac{aTz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}$
$t^2\cdot u(t)$	$\dfrac{2}{s^3}$	$\dfrac{T^2(1+z^{-1})z^{-1}}{(1-z^{-1})^3}$
$t^m\cdot u(t)$	$\dfrac{m!}{s^{m+1}}\,(m\in\mathbb{N})$	
$\mathrm{e}^{-\alpha t}\cdot u(t)$	$\dfrac{1}{s+\alpha}$	$\dfrac{1}{1-\mathrm{e}^{-aT}z^{-1}}$
$t\cdot\mathrm{e}^{-\alpha t}\cdot u(t)$	$\dfrac{1}{(s+\alpha)^2}$	$\dfrac{T\mathrm{e}^{-\alpha T}z^{-1}}{(1-e^{-\alpha T}z^{-1})^2}$
$\cos(\omega t)\cdot u(t)$	$\dfrac{s}{s^2+\omega^2}$	$\dfrac{1-z^{-1}\cos(\omega T)}{1-2z^{-1}\cos(\omega T)+z^{-2}}$
$\sin(\omega t)\cdot u(t)$	$\dfrac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\dfrac{z^{-1}\sin(\omega T)}{1-2z^{-1}\cos(\omega T)+z^{-2}}$
$\mathrm{e}^{-\alpha t}\cdot\cos(\omega t)\cdot u(t)$	$\dfrac{s+\alpha}{(s+\alpha)+\omega^2}$	$\dfrac{1-z^{-1}\mathrm{e}^{-\alpha T}\cos(\omega T)}{1-2z^{-1}\mathrm{e}^{-\alpha T}\cos(\omega T)+\mathrm{e}^{-2\alpha T}z^{-2}}$
$\mathrm{e}^{-\alpha t}\cdot\sin(\omega t)\cdot u(t)$	$\dfrac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$	$\dfrac{z^{-1}\mathrm{e}^{-\alpha T}\sin(\omega T)}{1-2z^{-1}\mathrm{e}^{-\alpha T}\cos(\omega T)+\mathrm{e}^{-2\alpha T}z^{-2}}$
$\cosh(\beta t)\cdot u(t)$	$\dfrac{s}{s^2-\beta^2}$	$\dfrac{1-z^{-1}\cosh(\beta T)}{1-2z^{-1}\cosh(\beta T)+z^{-2}}$
$\sinh(\beta t)\cdot u(t)$	$\dfrac{\beta}{s^2-\beta^2}$	$\dfrac{z^{-1}\sinh(\beta T)}{1-2z^{-1}\cosh(\beta T)+z^{-2}}$

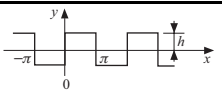
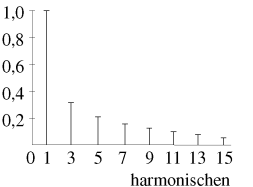
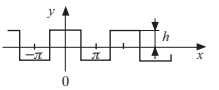
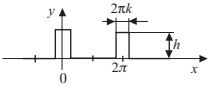
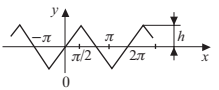
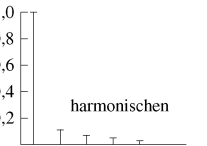
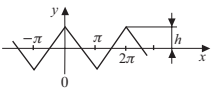
[1] Eenheidsimpuls: $\delta(t)=0$ voor $t\neq 0$ en $\int_{-\infty}^{+\infty}\delta(t)\mathrm{d}t=1$.

[2] Discrete eenheidspuls: $\delta_n(nT)=1$ voor $n=0$; $\delta_n(nT)=0$ voor $n\neq 0$.

[3] Eenheidsstap: $u(t)=1$ voor $t\geqq 0$; $u(t)=0$ voor $t<0$.

7.5 Analyse van enkele golfvormen

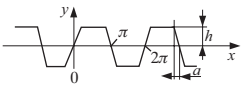
Tabel 7.3 Golfvorm-vergelijkingen

golfvorm	vergelijking	spectrum[1)]
1 	$y = \frac{4h}{\pi}\left(\sin x + \frac{\sin 3x}{3} + \frac{\sin 5x}{5} + \frac{\sin 7x}{7} + \right.$ $\left. + \frac{\sin 9x}{9} + \ldots\right)$	
2 	$y = \frac{4h}{\pi}\left(\cos x + \frac{\cos 3x}{3} + \frac{\cos 5x}{5} + \frac{\cos 7x}{7} + \right.$ $\left. + \frac{\cos 9x}{9} + \ldots\right)$	
3 	$y = h\left\{k + \frac{2}{\pi}(\sin k\pi \cos x + \frac{1}{2}\sin 2k\pi \cdot \cos 2x + \right.$ $\left. + \frac{1}{3}\sin 3k\pi \cos 3x + \ldots\right\}$	
4 	$y = \frac{8h}{\pi^2}\left(\sin x - \frac{\sin 3x}{3^2} + \frac{\sin 5x}{5^2} - .. + ..\right)$	
5 	$y = \frac{8h}{\pi^2}\left(\cos x - \frac{\cos 3x}{3^2} + \frac{\cos 5x}{5^2} - + \ldots\right)$	

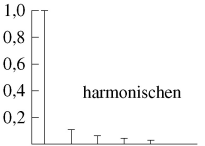
Golfvorm 1 en 2

Golfvorm 4 en 5

6

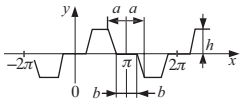


$$y = \frac{4h}{a \cdot \pi}\left(\sin a \cdot \sin x + \frac{\sin 3a}{3^2} \cdot \sin 3x + \right.$$
$$\left. + \frac{\sin 5a}{5^2} \cdot \sin 5x + \ldots\right)$$



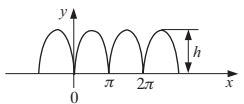
Golfvorm 6 met $a = \frac{\pi}{4}$

7

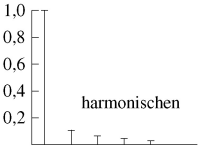


$$y = \frac{4h}{\pi(a-b)}\left((\sin a - \sin b)\sin x + \frac{\sin 3a - \sin 3b}{3^2} \cdot \right.$$
$$\left. \cdot \sin 3x + \frac{\sin 5a - \sin 5b}{5^2} \cdot \sin 5x + \ldots\right)$$

8

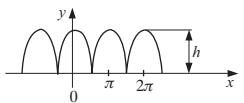


$$y = \frac{2h}{\pi} - \frac{4h}{\pi}\left(\frac{\cos 2x}{3} + \frac{\cos 4x}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6x}{5 \cdot 7} + \ldots\right)$$



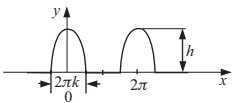
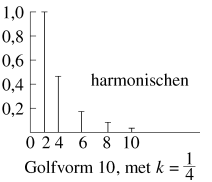
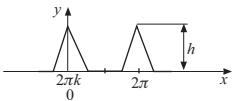
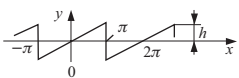
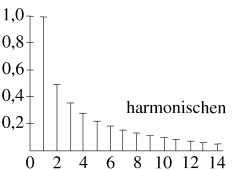
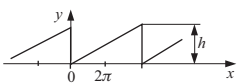
Golfvorm 8 en 9

9

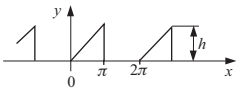


$$y = \frac{2h}{\pi} - \frac{4h}{\pi}\left(\frac{\cos 2x}{3} + \frac{\cos 4x}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6x}{5 \cdot 7} + \ldots\right)$$

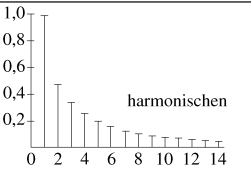
Tabel 7.3 (vervolg)

golfvorm	vergelijking	spectrum[1)]
10 	$y = \frac{2kh}{\pi} + \frac{4kh}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos n\pi k}{1-4k^2n^2}\cdot\cos nx$	 Golfvorm 10, met $k = \frac{1}{4}$
11 	$y = \frac{hk}{2} + \frac{2h}{\pi^2 k}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-\cos n\pi k}{n^2}\cdot\cos nx$	
12 	$y = \frac{2h}{x}\left(\sin x - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} - \frac{\sin 4x}{4} + ..-..\right)$	 Golfvorm 12 en 13
13 	$y = \frac{h}{2} - \frac{h}{\pi}\left(\sin x + \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} + ..\right)$	

14

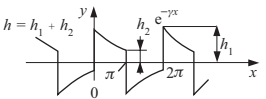


$$y = \frac{h}{4} - \frac{2h}{\pi^2}\left(\cos x + \frac{\cos 3x}{3^2} + \frac{\cos 5x}{5^2} + \dots\right) + \\ + \frac{h}{\pi}\left(\sin x - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} - \dots + \dots\right)$$



Golfvorm 14

15



$$y = \frac{2hy}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{\cos(2n+1)x}{y^2 + (2n+1)^2} + \\ + \frac{2h}{\pi}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(2n+1)\sin(2n+1)x}{y^2 + (2n+1)^2}$$

[1] Exclusief een eventuele ‘gelijkstroom’-component.

8 Lineaire algebra

8.1 Matrices

Matrix

Een $m \times n$-*matrix* A is een rechthoekig getallenschema met elementen a_{ij}, i is de rij- en j de kolom-index:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix}$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad D = \begin{bmatrix} \frac{3}{5} & 0 & -\frac{4}{5} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{4}{5} & 0 & \frac{3}{5} \end{bmatrix}$$

A is een 2×3-matrix.
B een *diagonaalmatrix* (de elementen buiten de hoofddiagonaal zijn 0)
I_3 is 3×3-*eenheidsmatrix*.

D is *orthogonaal*: $\sum_{k=1}^{3} d_{ik} d_{jk} = 0$ als $i \neq j$ en $= 1$ als $i = j$.

Matrix A^{T} met elementen $(a^{\mathrm{T}})_{ij} = a_{ji}$ is de *getransponeerde* van A. Als $A^{\mathrm{T}} = A$ dan is A *symmetrisch*.

Standaard-rij(kolom)vorm

Een matrix is in *standaard-rij(kolom)vorm* als elke volgende rij (kolom) met meer nullen begint als de voorgaande, zo die niet al een nulrij is.

Elementaire operaties

Een matrix kan in standaard-rijvorm worden gebracht door *elementaire operaties*:

- twee rijen verwisselen;
- een rij met een scalair $\lambda \neq 0$ vermenigvuldigen;
- bij een rij een λ-voud van een andere bijtellen.

Rang

De *rang* van A is het aantal niet-nul rijen, dat overblijft als A in standaard-rijvorm is gebracht.

8.2 Matrixrekening

Som en product

De *som* van twee $m \times n$-matrices: $C = A + B$ met $c_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$.
Het *matrixproduct* van een $m \times n$-matrix A en een $n \times p$-matrix B is een $m \times p$-matrix $C = AB$ met $c_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik} b_{kj}$

Het *product* van een matrix A *met een scalair* $\lambda \in \mathbb{R}$:
$C = \lambda A$ met $c_{ij} = \lambda a_{ij}$.

Eigenschappen

$A + B = B + A$ $\qquad$ $A(B + C) = AB + AC$
$A + (B + C) = (A + B) + C$ $\qquad$ $A(BC) = (AB)C$
$\lambda(A + B) = \lambda A + \lambda B$ $\qquad$ $(AB)^T = B^T A^T$
$(\lambda + \mu)A = \lambda A + \mu A$ $\qquad$ $(A + B)^T = A^T + B^T$

In het algemeen geldt: $AB \neq BA$; uit $AB = 0$ (*nulmatrix*) volgt niet $A = 0$ óf $B = 0$; uit $AB = AC$ volgt niet $B = C$.

Inverse

De *inverse* van een vierkante matrix A is A^{-1} als
$A^{-1} A = AA^{-1} = I_n$
Als A en B inverteerbaar zijn, dan ook AB en er geldt $(AB)^{-1} = B^{-1} A^{-1}$. Voor een orthogonale matrix A is $A^{-1} = A^{\mathrm{T}}$.
In par. 8.3 komt een methode aan de orde om A^{-1} te berekenen.

8.3 Determinanten

In deze paragraaf gaat het steeds om determinanten van een $n \times n$-matrix A.

Definitie

De *determinant* van A, notatie $|\ A\ |$, is een getal:
- als $n = 1$ dan $|A| = a_{11}$
- als $n \geqslant 1$ dan $|A| = \sum_{k=1}^{n} (-1)^{i+k} a_{ik} M_{ik}$

De *onderdeterminant* M_{ik} is de determinant van de matrix die overblijft als in A de i^e rij en de k^e kolom worden weggelaten.

Voor $n = 2$: $|A| = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$

Voor $n = 3$: $|A| = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} + - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32}$

Eigenschappen

Opmerking: waar *rij* staat, kan ook *kolom* worden gelezen.

- $|\ A\ |$ verandert van teken als twee rijen worden verwisseld.
- $|\ A\ | = 0$ als rang $A < n$ (dit is bijvoorbeeld het geval wanneer een rij het λ-voud is van een andere rij).
- $|\ A\ |$ verandert niet, als bij een rij het λ-voud van een andere rij wordt opgeteld.
- $|A| = \sum_{k=1}^{n}(-1)^{i+k}a_{ik}M_{ik}$ *en* $|A| = \sum_{k=1}^{n}(-1)^{j+k}a_{kj}M_{kj}$ (alle i,j)
- $|AB| = |A|\ |B| = |B|\ |A|$; $|\lambda A| = \lambda^n |A|$; $|A^{\mathrm{T}}| = |\mathrm{A}|$
- Als A orthogonaal is, dan: $|\ A\ | = \pm\ 1$. A heet *direct* orthogonaal als $|\ A\ | = +\ 1$ en *gespiegeld* orthogonaal als $|\ A\ | = -\ 1$.
- Een matrix A is alleen dan inverteerbaar als $|\ A\ | \neq 0$.
- De elementen van de inverse $B = A^{-1}$ zijn dan:

$$b_{ij} = \frac{(-1)^{i+j}M_{ji}}{|A|}$$

8.4 Lineaire (deel)ruimten, lineaire transformaties

Lineaire (deel)ruimte

In R_n, d.i. de verzameling n-tallen $\boldsymbol{x} = [x_1, \ldots, x_n]$, wordt gedefinieerd:

$$x + y = [x_1 + y_1, \ldots, x_n + y_n] \text{ en } \lambda x = [\lambda x_1, \ldots \lambda x_n]$$

R_n is dan een *lineaire ruimte*, met $\boldsymbol{x}$ de *vectoren*, omdat:

(1) $x + y = y + x$
(2) $x + (y + z) = (x + y) + z$
(3) $x + 0 = x(0 = [0, \ldots, 0])$
(4) $x + (-x) = 0(-x = [-x_1, \ldots, -x_n])$
(5) $1x = x$
(6) $\lambda(x + y) = \lambda x + \lambda y$
(7) $(\lambda + u)x = \lambda x + \mu x$
(8) $\lambda(\mu x) = (\lambda\mu)x$

$D \subset \mathrm{R}_n$ is een *lineaire deelruimte* van R_n, als met $\boldsymbol{x}$ en $\boldsymbol{y}$ ook $\lambda\boldsymbol{x} + \mu\boldsymbol{y}$ in D ligt. De verzameling $\mathbf{a} + D = \{\boldsymbol{a} + \boldsymbol{x} \mid \boldsymbol{x} \in D\}$ heet dan een *lineaire variëteit*.

Afhankelijkheid/onafhankelijkheid

Als $\boldsymbol{x} = \lambda\boldsymbol{a} + \mu\boldsymbol{b} + \ldots$ dan is $\boldsymbol{x}$ lineair *afhankelijk* van $\{\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \ldots\}$. Het stelsel $\{\boldsymbol{a}, \boldsymbol{b}, \ldots\}$ is lineair *onafhankelijk* als geen enkele vector uit het stelsel van de overige afhankelijk is.

Lineaire transformatie

Een *lineaire transformatie* is een functie $T \in \mathrm{R}_n \to \mathrm{R}_m$ zó dat $T(\lambda\boldsymbol{x} + \mu\boldsymbol{y}) = \lambda T(\boldsymbol{x}) + \mu T(\boldsymbol{y})$.

De lineaire transformaties hebben de vorm $T(\boldsymbol{x}) = A\boldsymbol{x}$, waarbij in het rechterlid A een $m \times n$- en $\boldsymbol{x}$ een $n \times 1$-matrix is.

Voorbeelden:

(1) $T \in \mathrm{R}_3 \to \mathrm{R}_2$ met $T[x_1, x_2, x_3] = [x_1 + 3x_2 + 4x_3,\ x_1 - 7x_3]$

$$\text{en } A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1 & 0 & -7 \end{bmatrix}$$

(2) Een *draaiing* in R_2 over een hoek φ is een lineaire transformatie.
$T \in R_2 \to R_2$
met $T[x_1, x_2] = [x_1 \cos\varphi - x_2 \sin\varphi, x_1 \sin\varphi + x_2 \cos\varphi]$

$$\text{en } A = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

Kern lineaire transformatie

De *kern* van een lineaire transformatie is $K = \{\boldsymbol{x} \in \mathrm{R}_n \mid T(\boldsymbol{x}) = \mathbf{0}\}$. K is een lineaire deelruimte van R_n.

De vergelijking $T(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{b}$ heeft als oplossingsverzameling de variëteit $\boldsymbol{p} + K$, waarin $\boldsymbol{p}$ een particuliere oplossing is.

Het bepalen van de kern K en van de oplossingen van $T(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{b}$ komt neer op het oplossen van een stelsel homogene, resp. inhomogene vergelijkingen (zie par. 8.6).

In voorbeeld 1 (zie hierboven) is de kern, resp. de oplossingsverzameling van $T(\boldsymbol{x}) = [5, 2]$ te vinden uit:

$$\begin{cases} x_1 + 3x_2 + 4x_3 = 0 \\ x_1 \qquad - 7x_3 = 0 \end{cases} \quad \text{resp.} \quad \begin{cases} x_1 + 3x_2 + 4x_3 = 5 \\ x_1 \qquad - 7x_3 = 2 \end{cases}$$

8.5 *Eigenwaarden, eigenvectoren*

Stel A is een $n \times n$-matrix. De vergelijking $| A - \lambda I_n | = 0$ heet de *karakteristieke vergelijking* van A.
De n oplossingen voor λ zijn de *eigenwaarden* van A.
De bij een eigenwaarde λ behorende vectoren $\boldsymbol{x} \neq \boldsymbol{0}$ met $A\boldsymbol{x} = \lambda\boldsymbol{x}$ heten *eigenvectoren* bij λ.

Voorbeeld:

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 12 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}$$

karakteristieke vergelijking:

$$\begin{vmatrix} 5 - \lambda & 12 \\ -1 & -2 - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 - 3\lambda + 2 = 0$$

De eigenwaarden: $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 2$. De bijbehorende eigenvectoren zijn veelvouden van $\boldsymbol{x} = [-3, 1]$ resp. $\boldsymbol{x} = [-4, 1]$.

Eigenschappen

- $\lambda_1 + \ldots + \lambda_n = a_{11} + \ldots + a_{nn}$
- $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \ldots \lambda_n = | A |$
- Een orthogonale $n \times n$-matrix, met n *oneven*, heeft minstens één reële eigenwaarde.
- De reële eigenwaarden van een orthogonale matrix zijn ± 1.
- Een symmetrische matrix heeft alléén reële eigenwaarden.
- Bij een symmetrische matrix S is een orthogonale matrix P met $| P | = +1$ te vinden, die in de kolommen eigenvectoren bij $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ heeft, zodanig dat $P^{-1} SP$ een diagonaal-matrix is met in de diagonaal $\lambda_1, \ldots \lambda_n$.

8.6 *Lineaire vergelijkingen*

(I) Een **homogeen** stelsel:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + \ldots + a_{1n}x_n &= 0 \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \quad &\vdots \\ a_{m1}x_1 + \ldots + a_{mn}x_n &= 0 \end{aligned}$$

(II) Een **inhomogeen** stelsel:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + \ldots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \quad &\vdots \qquad\qquad (\text{niet alle } b_i = 0) \\ a_{m1}x_1 + \ldots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned}$$

De matrix A is de *coëfficiëntenmatrix* en de matrix A^a die uit A ontstaat door de kolom $\boldsymbol{b}$ toe te voegen heet de *aangevulde matrix*. De oplossingen $\boldsymbol{x}$ van (I) vormen een lineaire deelruimte $K \subset \mathrm{R}_n$. De oplossingsverzameling van (II) is dan de variëteit $\mathbf{y} + K$, waarbij $\boldsymbol{y}$ een particuliere oplossing van (II) is.

Oplosbaarheidscriterium. (II) is alléén oplosbaar als rang $A =$ rang A^a.

Oplossingsmethode. De oplossingsmethode van (I) en (II): de *eliminatie-methode van Gauss*.

Hierbij wordt de matrix A resp. A^a via elementaire rij-operaties in de standaard-rijvorm gebracht. Daarna wordt het zo ontstane vereenvoudigde stelsel 'terugwaarts' opgelost.

Het aantal oplossingen ($r =$ rang A)

(I) heeft alléén de nuloplossing als $r = n$.
(I) heeft oneindig veel oplossingen als $r < n$. Daaronder is een onafhankelijk stelsel van $n - r$ oplossingen, waar alle andere oplossingen lineaire combinaties van zijn.
(II) heeft precies één oplossing als rang $A =$ rang $A^a = n$.
(II) heeft oneindig veel oplossingen als rang $A =$ rang $A^a < n$.

In het **bijzondere geval** $m = n$ geldt bovendien: er is precies één oplossing (in (I) de nul-oplossing) alleéén als $|A| \neq 0$. Deze oplossing $\boldsymbol{x} = [x_1, \ldots, x_n]$ kan worden gevonden met de *regel van*

Cramer: $x_k = \dfrac{|A_k|}{|A|}$ waarin A_k de matrix is, die uit A ontstaat door de k^{e} kolom te vervangen door de $\boldsymbol{b}$-kolom.

8.7 Kwadratische vormen, kwadratische oppervlakken

Kwadratische vorm in $\mathbf{R}_n$

$$\sum_{i,j=1}^{n} a_{ij} x_i x_j$$

Deze vorm is als matrixproduct $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\, S\boldsymbol{x}$ te schrijven met $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}$ een $1 \times n$- $\boldsymbol{x}$ een $n \times 1$-matrix en S de symmetrische matrix met $S_{ij} = \frac{1}{2}(a_{ij} + a_{ji})$.

Voorbeeld: $6{x_1}^2 + 7{x_2}^2 + 4x_1x_2 = [\,x_1 \quad x_2\,]\begin{bmatrix} 6 & 2 \\ 2 & 7 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$

Laat P de direct orthogonale matrix zijn, met in de kolommen eigenvectoren van S bij de eigenwaarden $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ (zie par. 8.5), dan gaat door een coördinaten-transformatie $\boldsymbol{y} = P^{\mathrm{T}}\,\boldsymbol{x}$ dit is substitutie $\boldsymbol{x} = P\boldsymbol{y}$ de vorm $\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\, S\,\boldsymbol{x}$ over in de **hoofdassengedaante**:

$$\lambda_1{y_1}^2 + \lambda_2{y_2}^2 + \ldots + \lambda_n{y_n}^2$$

Kwadratisch oppervlak in $\mathbf{R}_3$

De algemene vergelijking van een *kwadratisch oppervlak* is:

$a_{11}{x_1}^2 + a_{22}{x_2}^2 + a_{33}x_3^2 + 2a_{12}x_1x_2 + 2a_{13}x_1x_3 + 2a_{23}x_2x_3$
$+b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + c = 0$

Door een *rotatie* van het assenstelsel, $y = P^{\mathrm{T}}\,\boldsymbol{x}$ (zie hierboven), wordt de vergelijking.

$$\lambda_1{y_1}^2 + \lambda_2{y_2}^2 + \lambda_3{y_3}^2 + b'_1y_1 + b'_2y_2 + b'_3y_3 + c = 0$$

Door een *translatie* van het assenstelsel, $\boldsymbol{z} = \boldsymbol{y} + \boldsymbol{p}$, kunnen de lineaire termen y_i met $\lambda_i \neq 0$, verdwijnen.

Afhankelijk van de waarden van de coëfficiënten,worden verschillende oppervlakken verkregen;enkele *voorbeelden*:

$2x_1^2 + x_2^2 + 3x_3^2 - 5 = 0$ ellipsoïde
$2x_1^2 + x_2^2 + 3x_3^2 - 5 = 0$ eenbladige hyperboloïde
$2x_1^2 + x_2^2 + 3x_3^2 - 5 = 0$ tweebladige hyperboloïde
$2x_2^2 + x_2^2 + 3x_3^2 = 0$ elliptische kegel
$2x_1^2 + x_2^2 + -x_3 = 0$ elliptische paraboloïde
$2x_2^2 + x_2^2 + +x_3 = 0$ hyperbolishce paraboloïde

9 Vectoralgebra en -analyse

9.1 Vectoren

Op vectoren in R_2 (platte vlak) en in R_3 (ruimte) worden twee bewerkingen toegepast:
- Optelling: $\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}$
- Vermenigvuldiging met (scalair getal): $\lambda \boldsymbol{a}$

Speciale betekenis hebben:
- *eenheidsvector* e (**E** heeft lengte 1);
- *nulvector* **0** (**0** heeft lengte 0).

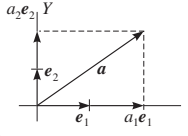
Eigenschappen

$\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b} = \boldsymbol{x}$ (slechts één vector toegevoegd)
$\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b} = \boldsymbol{b} + \boldsymbol{a}$ (commutatieve eigenschap)
$\boldsymbol{a} + (\boldsymbol{b} + \boldsymbol{c}) = (\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}) + \boldsymbol{c}$ (associatieve eigenschap)
$\boldsymbol{a} + \boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}$ (omkering van de optelling)
of $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} - \boldsymbol{a}$ ($\boldsymbol{x}$ is het verschil van $\boldsymbol{b}$ en $\boldsymbol{a}$)
$(\lambda\mu)\boldsymbol{a} = \lambda(\mu\boldsymbol{a})$
$(\lambda + \mu)\boldsymbol{a} = \lambda\boldsymbol{a} + \mu\boldsymbol{a}$
$\lambda(\boldsymbol{a} + \boldsymbol{b}) = \lambda\boldsymbol{a} + \lambda\boldsymbol{b}$

Lengte van een vector

In R_2 is $\boldsymbol{a} = (a_1, a_2) = a_1\,\boldsymbol{e}_1 + a_2\,\boldsymbol{e}_2$

$$|\boldsymbol{a}| = \sqrt{|a_1|^2 + |a_2|^2} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$$



In R_3 is $\boldsymbol{a} = (a_1, a_2, a_3) = a_1\,\boldsymbol{e}_1 + a_2\,\boldsymbol{e}_2 + a_3\,\boldsymbol{e}_3$

$$|\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}$$

In meer algemene zin (R_n) heet

$\|\boldsymbol{a}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} a_i^2}$ de *norm* van de vector.

Hoek tussen twee vectoren

In R_2: $\cos\varphi = \dfrac{a_1b_1 + a_2b_2}{|\boldsymbol{a}| \cdot |\boldsymbol{b}|}$ In R_3: $\cos\varphi = \dfrac{a_1b_1 + a_2b_2 + a_3b_3}{|\boldsymbol{a}| \cdot |\boldsymbol{b}|}$

Scalair of inwendig product

In R_2 : $\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b} = a_1b_1 + a_2b_2$
In R_3 : $\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b} = a_1b_1 + a_2b_2 + a_2b_3$

In R_2 en in R_3 geldt: $\cos\varphi = \dfrac{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}}{|\boldsymbol{a}| \cdot |\boldsymbol{b}|}$

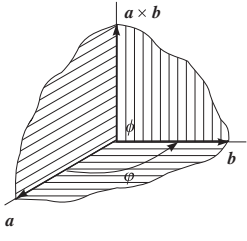
Als $\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b} = 0$: vectoren loodrecht op elkaar.

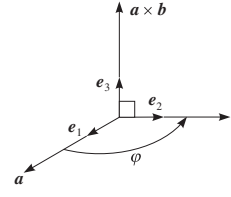
$$\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b} = \boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{a} \qquad \lambda(\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b}) = \lambda\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b} = \boldsymbol{a}\cdot\lambda\boldsymbol{b}$$
$$(\boldsymbol{a}+\boldsymbol{b})\cdot\boldsymbol{c} = \boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c} + \boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{c} \qquad \boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a} = |\boldsymbol{a}|^2, \text{ dus } |\boldsymbol{a}| = \sqrt{\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{a}}$$

Vectorieel of uitwendig product in R_3

$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = (a_2b_3 - a_3b_2, a_3b_1 - a_1b_3, a_1b_2 - a_2b_1)$

Er geldt:
- $|\boldsymbol{p}| = |\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}|$ is oppervlakte parallellogram opgespannen door $\boldsymbol{a}$ en $\boldsymbol{b}$;
- $\boldsymbol{p}$ staat loodrecht op vlak door $\boldsymbol{a}$ en $\boldsymbol{b}$;
- oriëntatie van $\boldsymbol{a}$ naar $\boldsymbol{b}$ naar $\boldsymbol{p}$ is dezelfde als van $\boldsymbol{e}_1$ naar $\boldsymbol{e}_2$ naar $\boldsymbol{e}_3$ (of $\boldsymbol{i}$, $\boldsymbol{j}$ en $\boldsymbol{k}$, zie par. 9.2) (*Kurkentrekkerregel*).

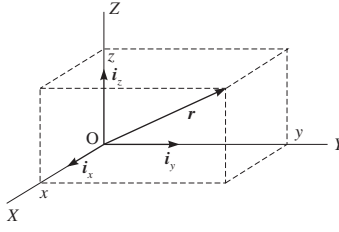




9.2 Vectoralgebra

De *vectoralgebra* betreft bewerkingen met en op vectoren in de drie-dimensionele ruimte. Deze zijn gedefinieerd reële of complexe kentallen,die worden vastgelegd t.o.v. een vaste orthonormale basis $\boldsymbol{i}_x$, $\boldsymbol{i}_y$, $\boldsymbol{i}_z$ (ook wel $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$).

Rechtscyclisch Cartesiaans stelsel



Vectoren: $\boldsymbol{a} = a_x\boldsymbol{i}_x + a_y\boldsymbol{i}_y + a_z\boldsymbol{i}_z$ en $\boldsymbol{b} = b_x\boldsymbol{i}_x + b_y\boldsymbol{i}_y + b_z\boldsymbol{i}_z$
λ en μ: reële of complexe getallen

Lineaire combinatie:

$$\lambda\boldsymbol{a} + \mu\boldsymbol{b} := (\lambda a_x + \mu b_x)\boldsymbol{i}_x + (\lambda a_y + \mu b_y)\boldsymbol{i}_y + (\lambda a_z + \mu b_z)\boldsymbol{i}_z$$

Scalair of inwendig product

$$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} := a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

Vectorieel of uitwendig product

$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} := \begin{vmatrix} \boldsymbol{i}_x & \boldsymbol{i}_y & \boldsymbol{i}_z \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

Eigenschappen

$$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} = \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{a}$$
$$\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b} = -\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{a}$$
$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{a} \cdot (\boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{c}) &= \boldsymbol{b} \cdot (\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{a}) = \boldsymbol{c} \cdot (\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}) \\ &= -\boldsymbol{c} \cdot (\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{a}) = -\boldsymbol{b} \cdot (\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{c}) \\ &= -\boldsymbol{a} \cdot (\boldsymbol{c} \times \boldsymbol{b}) \end{aligned}\right\} \text{ scalaire tripelproduct}$$

$$\left.\begin{array}{l} \boldsymbol{a}\times(\boldsymbol{b}\times\boldsymbol{c}) = (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c})\boldsymbol{b} - (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{b})\boldsymbol{c} \\ (\boldsymbol{a}\times\boldsymbol{b})\times\boldsymbol{c} = (\boldsymbol{a}\cdot\boldsymbol{c})\boldsymbol{b} - (\boldsymbol{b}\cdot\boldsymbol{c})a \end{array}\right\} \begin{array}{l}\text{vectoriële}\\ \text{tripelproduct}\end{array}$$

9.3 *Vectoranalyse*

Differentiëren naar de plaatscoördinaten

Plaatsvector $\boldsymbol{r}$ in het rechtscyclisch cartesiaans stelsel:

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i}_x + y\boldsymbol{i}_y + z\boldsymbol{i}_z \quad \text{(zie figuur pag. A2/89)}$$

Voor de scalairfunctie $\varphi = \varphi(x, y, z)$ is de *gradiënt* van φ:

$$\text{grad } \varphi: = (\partial_x\varphi)\boldsymbol{i}_x + (\partial_y\varphi)\boldsymbol{i}_y + (\partial_z\varphi)\boldsymbol{i}_z \quad (\partial_x = \partial/\partial x)$$

Voor de vectorfunctie $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}\ (x, y, z)$ is de *divergentie van* $\boldsymbol{v}$:

$$div\ \boldsymbol{v}: = \partial_x v_x + \partial_y v_y + \partial_z v_z$$

De *rotatie* van een vectorfunctie $\boldsymbol{v}$:

$$rot\ \boldsymbol{v}: = \begin{vmatrix} \boldsymbol{i}_x & \boldsymbol{i}_y & \boldsymbol{i}_z \\ \partial_x & \partial_y & \partial_z \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix}$$

Met de *nabla-operator*: $\nabla: = \partial_x\boldsymbol{i}_x + \partial_y\boldsymbol{i}_y + \partial_z\mathrm{i}_z$
kan men schrijven:

$$\text{grad } \varphi = \nabla\varphi;\ \text{div } v = \nabla\cdot v;\ \text{rot } v = \nabla\times v$$

Verder geldt (φ tweemaal differentieerbaar) div. grad $\varphi = \nabla^2\varphi$
$\nabla^2 = \nabla\cdot\nabla = \partial_x^2 + \partial_x^2 + \partial_z^2$, de operator van laplace

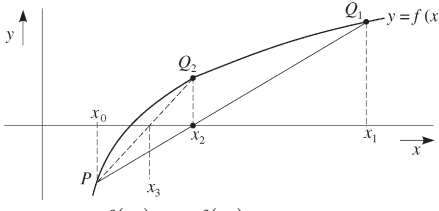
10 Numerieke wiskunde

Zie par. 2.7 voor *nauwkeurigheid* en *significante cijfers*.

10.1 Schatting nulpunten

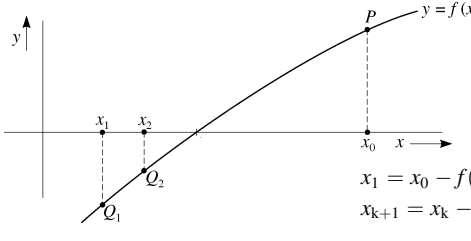
Twee methoden voor verbetering van de nauwkeurigheid van geschatte nulpunten.

Lineaire interpolatie (regula falsi)



$$x_2 = \frac{x_0 f(x_1) - x_1 f(x_0)}{f(x_1) - f(x_0)} \quad \text{(recurrent gebruiken)}$$

Methode van Newton-Raphson



$$x_1 = x_0 - f(x_0)/f'(x_0)$$
$$x_{k+1} = x_k - f(x_k)/f'(x_k)$$

10.2 Interpolatie, differentiatie en integratie

Lineaire interpolatie

$$y(x) \approx f(x_0) + (x - x_0) \cdot \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

Procesfout: $|E(x)| \leqq \frac{1}{8} h^2 |f''(\xi)|$
waarin: $h = x_1 - x_0; \xi \in \langle x_0, x_1 \rangle$

Interpolatiepolynoom van Lagrange

$$f(x) \approx y(x) = \sum_{i=0}^{n} f_i L_i(x); \quad L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n} \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)}$$

Procesfout: $E(x) < \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^{n} (x - x_i)$

N.B. Er zijn (n + 1) steunwaarden $(x_0, f_0), \ldots, (x_n, f_n)$.

Numerieke differentiatie

Hierbij wordt uitgegaan van een interpolerend polynoom dat gedifferentieerd wordt.
De procesfout wordt verkregen door de afbreekfout $E(x)$ naar x te differentieren.

Numerieke integratie

$f(x)$ in $\int_a^b f(x)\mathrm{d}x$ benaderen met polynoom van Lagrange.

Integratieformules $(h = x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = x_3 - x_2)$:

– Twee-puntsformule van Euler $(n = 1)$:

$$\int_{x_\circ}^{x_1} f(x)\mathrm{d}x = \frac{h}{2}(f_0 + f_1) - \frac{h^3}{12} f^{(2)}(\xi)$$

– Drie-puntsformule van Simpson ($n = 2$):

$$\int_{x_\circ}^{x_2} f(x)\mathrm{d}x = \frac{h}{3}(f_0 + 4f_1 + f_2) - \frac{h^5}{90}f^{(4)}(\xi)$$

– Drie-achtste regel ($n = 3$):

$$\int_{x_\circ}^{x_3} f(x)\mathrm{d}x = \frac{3h}{8}(f_0 + 3f_1 + 3f_2 + f_3) - \frac{3h^5}{80}f^{(4)}(\xi)$$

Integraal over groot interval: interval (a, b) verdelen in n gelijke deelintervallen:

– Formule van Euler (trapeziumregel):

$$\int_a^b f(x)\mathrm{d}x = h(\tfrac{1}{2}f_0 + f_1 + f_2 + \ldots + f_{n-1} + \tfrac{1}{2}f_n) + E_\mathrm{T}$$

met: $E_\mathrm{T} = -\dfrac{(b-a)^3}{12n^2}f^{(2)}(\xi); a < \xi < b$

– Formule van Simpson:

$$\int_a^b f(x)\mathrm{d}x = \frac{h}{3}(f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + 2f_4 + \ldots + 4f_{n-1} + f_n) + E_S$$

met: $E_\mathrm{S} = -\dfrac{(b-a)^5}{180n^4}f^{(4)}(\xi); a < \xi < b$

Het aantal intervallen moet *even* zijn.

10.3 Differentiaalvergelijkingen

Numerieke integratie van DV van de eerste orde.

Methode van Euler en Heun

Uitgangspunten: $y' = f(x, y)$; $y(x_0) = y_0$ (beginvoorwaarde); $y^1(x_0) = f(x_0, y_0)$.

$$y_1 = y_0 + \int_{x_\circ}^{x_1} f(x, y)\mathrm{d}x$$

Praktische uitvoering:

$$y_1 = y_0 + \frac{h}{2}[f(x_0, y_0) + f(x_1, y_1^*)] = y_0 + \frac{h}{2}[f_0 + f_1^*]$$

waarin: $y_1^* = y_0 + hy_0'$ (*predictor*)

$y_0 + \frac{h}{2}[f_0 + f_1^*]$ is de *corrector*

Alleen predictor gebruikt: methode van Euler.
Predictor en corrector gebruikt: methode van Heun.
Na de eerste integratiestap wordt de tweede uitgevoerd, enz:

$$y_{n+1}^* = y_n + hf_n \text{ (predictor)}$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2}[f_n + f_{n+1}^*] \text{ (corrector)}$$

Methode van Runge-Kutta

Standaard: vierde-orde methode

$k_1 = hf(x_0, y_0)$
$k_2 = hf(x_0 + \frac{1}{2}h, y_0 + \frac{1}{2}k_1)$
$k_3 = hf(x_0 + \frac{1}{2}h, y_0 + \frac{1}{2}k_2)$
$k_4 = hf(x_0 + h, y_0 + k_3)$
$y_1 = y_0 + \frac{1}{6}[k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4]$: eerste stap
$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}[k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4]$, daarbij in k_1, k_2, k_3 en k_4 x_0 vervangen door x_n en y_0 door y_n

Opmerking: er bestaan interactieve simulatieprogramma's waarmee DV's numeriek zijn op te lossen.

10.4 Lineaire vergelijkingen

Indirecte methoden voor het oplossen van een stelsel lineaire vergelijkingen.

Methode van Jacobi

$$\sum_{k=1}^{n} a_{ik}x_k = b_1 \quad (i = 1, 2, \ldots, n; a_{ii} \neq 0)$$

wordt geschreven als:

$$x_i^* = x_i + \left(b_i - \sum_{k=1}^{n} a_{ik}x_k \right) \Big/ a_{ii} \quad (i = 1, 2, \ldots, n)$$

Na substitutie van de beginschatting ontstaat een iteratief proces.

Methode van Gauss-Seidel

Hier wordt na de beginschatting een nieuwe waarde x_1 berekend, die weer in de tweede vergelijking wordt gebruikt:

$$x_i^* = \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^* - \sum_{j=i+1}^{n} a_{ij}x_j \right) \Big/ a_{ii} \quad \text{of}$$

$$x_i^* = x_i + \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^* - \sum_{j=i}^{n} a_{ij}x_j \right) \Big/ a_{ii}$$

De $*$ heeft betrekking op de nieuwe waarde.
Beide methoden convergeren wanneer de matrix A diagonaaldominant is:

$$|a_{ij}| > \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{n} |a_{ij}|$$

Literatuur

- Abramowitz, M., I.A. Stegun
  Handbook of Mathematical Functions
  Dover, Publication New York.
- Asselt, R. van
  Wiskunde voor het hoger beroepsonderwijs
  Culemborg, Educaboek.
- Blankespoor, J.H., e.a.
  Serie : *Toegepaste Wiskunde voor het hoger beroepsonderwijs*
  Baarn, HB Uitgevers
- Kuipers, L., R. Timman
  Handboek der Wiskunde
  Amsterdam, Scheltema & Holkema
- *ICT-Zakboekje*
  Arnhem, Elsevier bedrijfsinformatie bv.
- Zaat, J.A.
  Numerieke analyse
  Delft, DUM

Statistiek A3

1 Algemeen
- 1.1 Soorten statistiek
- 1.2 Populatie en variabelen

2 Beschrijvende statistiek
- 2.1 Technieken voor beschrijvende statistiek
- 2.2 De verdeling van een kwantitatieve variabele
- 2.3 De verdeling van een kwalitatieve variabele
- 2.4 Samenhang tussen kwantitatieve variabelen
- 2.5 Samenhang tussen kwalitatieve variabelen
- 2.6 Samenhang tussen gemengde variabelen

3 Kansrekening
- 3.1 Kansen
- 3.2 Combinatoriek
- 3.3 Stochastische variabelen

4 Steekproeven uit eindige populaties
- 4.1 Doelpopulatie
- 4.2 Steekproef

5 Schatten
- 5.1 Uitgangspunten
- 5.2 Schatting voor de normale verdeling
- 5.3 Schatting voor de binomiale verdeling

6 Toetsen
- 6.1 Uitgangspunten
- 6.2 Toetsen voor het populatiegemiddelde

6.3 Toetsen voor fracties
6.4 Toetsen voor de standaardafwijking

7 Regressie-analyse
7.1 Uitgangspunten
7.2 Meervoudig lineair regressiemodel

8 Variantie-analyse
8.1 Uitgangspunten
8.2 Enkelvoudige variantie-analysemodel
8.3 Meervoudig variantie-analysemodel

9 Tabellen

10 Statistische software

1 Algemeen

1.1 Soorten statistiek

Statistiek

Statistiek houdt zich bezig met het verzamelen, analyseren en interpreteren van gegevens die zijn verkregen door het verrichten van metingen aan objecten of verschijnselen.

Die objecten kunnen mensen zijn, maar ook planten, dieren, levenloze objecten of verschijnselen. Metingen kunnen zijn verkregen met allerlei meetinstrumenten. Het kan echter ook gaan om tellingen of het verzamelen van informatie met vragenlijsten.

Beschrijvende statistiek

Bij beschrijvende statistiek gaat het om verkrijgen van inzicht in een (vaak grote) verzameling meetgegevens. Het gedrag van de onderzochte objecten wordt samengevat in een beperkt aantal kengetallen of grafieken. Er worden alleen uitspraken gedaan over de onderzochte objecten. Er wordt geen poging gedaan om conclusies te trekken over een groter geheel of toekomstige situaties.

Verklarende statistiek

Verklarende statistiek gaat verder dan beschrijvende statistiek. Er worden ook uitspraken gedaan over het niet onderzochte deel van de objecten, of toekomstige situaties. Meestal gaat het om het onderzoeken van een steekproef uit een populatie. Omdat niet de gegevens van alle objecten beschikbaar zijn, is er altijd een element van onzekerheid in de uitspraken. Door gebruik te maken van de kansrekening kunnen die uitspraken worden gekwantificeerd.

1.2 Populatie en variabelen

Doelpopulatie

De doelpopulatie bestaat uit het geheel van alle objecten waarover men tracht uitspraken te doen in het onderzoek. De omvang van de doelpopulatie wordt aangegeven met N.

Variabelen

Variabelen zijn de kenmerken die aan de objecten worden gemeten. Een willekeurige variabele wordt aangeduid met *Y*. De waarden van *Y* voor alle *N* objecten worden aangeduid met $Y_1, Y_2, \ldots, Y_N$.

Kwalitatieve variabelen

Kwalitatieve variabelen verdelen de objecten slechts in groepen. De waarden van dit type variabele kunnen alleen worden gebruikt als labels voor de groepen. Er kan niet met de waarden worden gerekend.

Nominale variabelen zijn kwalitatieve variabelen waarbij er geen natuurlijke ordening van de groepen is. Voorbeelden: burgerlijke staat van een persoon, kleur van een auto, soort materiaal.

Ordinale variabelen zijn kwalitatieve variabelen waarbij er sprake is van een natuurlijke ordening van de groepen. Voorbeelden zijn opleidingsniveau van een werknemer en tevredenheid over een product.

Kwantitatieve variabelen

Kwantitatieve variabelen meten een omvang, grootte, waarde of hoeveelheid. Met de waarden van deze variabelen kunnen rekenkundige bewerkingen worden uitgevoerd, zoals het bepalen van som en gemiddelde.

Intervalvariabelen zijn kwantitatieve variabelen waarbij er sprake is van een meeteenheid. De waarden kunnen worden uitgezet op een schaalverdeling waarbij niet alleen de plaats van het punt betekenis heeft, maar ook de afstand tussen punten. Intervalvariabelen hebben geen natuurlijk nulpunt. Voorbeelden zijn geboortejaar en temperatuur in graden Celsius.

Ratio-variabelen zijn kwantitatieve variabelen met dezelfde eigenschappen als intervalvariabelen, maar ook nog een natuurlijk nulpunt. Verhoudingen tussen waarden hebben nu ook betekenis.

Kenmerken

Kenmerken zijn variabelen die de aan-of afwezigheid van een eigenschap meten. Heeft een object de betreffende eigenschap dan is de waarde 1. Zo niet, dan is de waarde 0. Voorbeelden van

zijn het al of niet stemmen op een partij en het al of niet stuk zijn van een lamp.

Populatieparameters
Populatieparameters (ook wel: populatiegrootheden) zijn kengetallen waarin het gedrag van de verzameling objecten wordt samengevat. Deze parameters zijn functies van de waarden van de variabelen voor de objecten. Voorbeelden van populatieparameters voor een kwantitatieve variabele Y:

Populatiegemiddelde: $$\overline{Y} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} Y_{\mathrm{k}}$$

Populatievariantie: $$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} (Y_{\mathrm{k}} - \overline{Y})^2$$

Aangepaste populatievariantie: $$S^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N} (Y_{\mathrm{k}} - \overline{Y})^2$$

Voorbeelden van populatieparameters voor kenmerken:

Populatietotaal: $$Y_{\mathrm{T}} = \sum_{k=1}^{N} Y_{\mathrm{k}}$$

Populatiepercentage: $$P = \frac{100}{N}\sum_{k=1}^{N} Y_{\mathrm{k}}$$

2 Beschrijvende statistiek

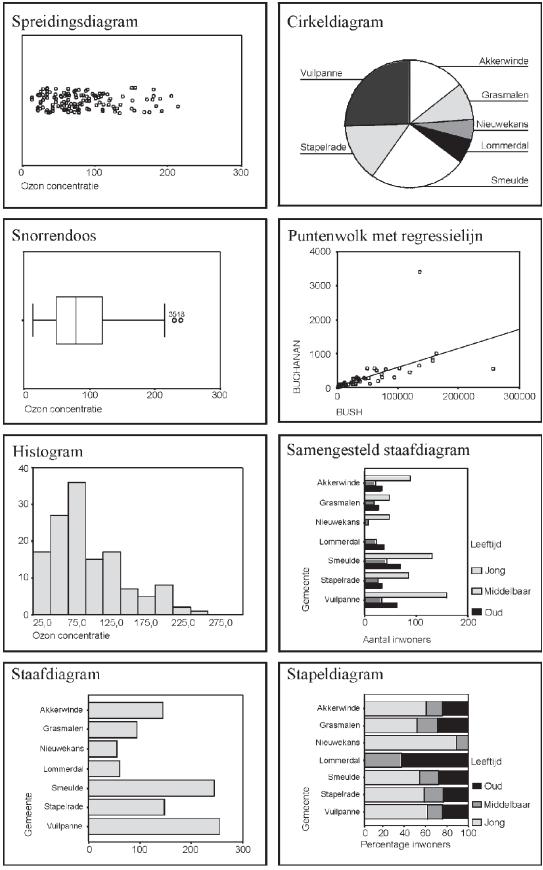
2.1 Technieken voor beschrijvende statistiek

Technieken voor beschrijvende statistiek kunnen worden ingedeeld in *grafische technieken* en *numerieke technieken*. Het verdient aanbeveling om altijd eerst een grafiek te maken. Als de getoonde patronen voldoende regelmaat vertonen, kunnen ze met numerieke technieken worden samengevat in kengetallen.

Technieken voor beschrijvende statistiek kunnen ook worden ingedeeld in technieken die de *verdeling* van een variabele beschrijven en technieken die de *samenhang* tussen variabelen beschrijven.

Tabel 2.1 Technieken voor beschrijvende statistiek

	verdeling	samenhang
kwantitatieve variabelen	spreidingsdiagram, snorrendoos histogram frequentiepolygoon gemiddelde standaardafwijking mediaan kwartielen	puntenwolk correlatiecoëfficiënt regressielijn
kwalitatieve variabelen	staafdiagram cirkeldiagram frequentieverdeling modus	samengesteld staafdiagram stapeldiagram kruistabel samenhangsmaten
gemengde variabelen		spreidingsdiagrammen snorrendozen gemiddelden standaardafwijkingen medianen kwartielen



Figuur 2.1 Grafische technieken voor beschrijvende statistiek

2.2 *De verdeling van een kwantitatieve variabele*

Het *spreidingsdiagram* geeft de verdeling van de waarden in zijn meest pure vorm. Er kan worden gezocht naar gebieden met hoge of lage concentratie en uitschieters. Op de horizontale as wordt de waarde uitgezet. De y-coördinaat is voor elke waarde in principe hetzelfde, maar er kan een zeker hoeveelheid toevallige ruis worden aangebracht (zoals in het voorbeeld) om overlappende punten uit elkaar te trekken.

De *snorrendoos* is een wat meer schematische weergave van de verdeling van de waarden. De waarden worden afgezet op de x-as afgezet. De doos geeft de middelste helft van de waarden aan. De snorharen lopen tot de waarden die nog net hooguit op een afstand van 1,5 maal de lengte van de doos van de doos liggen. *Uitschieters* liggen nog verder weg en worden apart getekend. Dit zijn afwijkende waarden. Met de snorrendoos kan de symmetrie van de verdeling worden onderzocht en uitschieters worden ontdekt.

Voor het *histogram* worden de waarden eerst in klassen verdeeld. Meestal worden de klassen even breed genomen. Als vuistregel voor het aantal klassen kan de wortel uit het aantal waarnemingen worden genomen, met een minimum van 5 en een maximum van 20.

Het *frequentiepolygoon* verbindt de toppen van de staven van het histogram. Hiermee kan een eerste indruk worden verkregen van de globale vorm van de verdeling.

Als Y de te onderzoeken variabele is, en $y_1, y_2, \ldots, y_n$ zijn de n beschikbare waarnemingen, dan is het (*rekenkundig*) *gemiddelde* hiervan gelijk aan $\bar{y} = (y_1 + y_2 + \ldots + y_n)/n$. Het gemiddelde is een maat voor de *locatie* van de verdeling.

De *standaardafwijking* s van de waarden is gedefinieerd als de wortel uit de aangepaste variantie:

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2$$

De standaardafwijking is een maat voor de variatie in de mogelijke waarden.

De *mediaan* is ook een maat voor de *locatie* van de verdeling. De waarde van deze maat wordt minder beïnvloed door uitschieters. De mediaan is gelijk aan:
- de middelste waarde, als er een oneven aantal waarden is en deze waarden eerst in oplopende grootte zijn gerangschikt;
- het gemiddelde van de twee middelste waarden, als er een even aantal waarden is en deze waarden eerst in oplopende grootte zijn gerangschikt.

De drie *kwartielen* verdelen de waarden in vier even grote groepen:
- Het eerste kwartiel is de mediaan van de kleinste helft van de geordende waarden, waarbij ingeval van een oneven aantal waarden de middelste wordt meegenomen;
- Het tweede kwartiel is de mediaan.
- Het derde kwartiel is mediaan van de grootste helft van de geordende waarden, waarbij ingeval van een oneven aantal waarden de middelste waarde is meegenomen.

Het eerste en derde kwartiel bepalen de zijkanten van de snorrendoos. De streep in de doos is de mediaan.

De *decielen* verdelen de waarden in tien even grote groepen. Het tweede deciel kan bijvoorbeeld worden geïnterpreteerd als: 20% van de waarnemingen heeft een waarde kleiner dan of gelijk aan deze waarde.

De *percentielen* verdelen de waarden in honderd even grote groepen. Voor het 14-de percentiel geldt bijvoorbeeld dat 14% van de waarnemingen een waarde heeft die kleiner is dan of gelijk aan deze waarde.

2.3 De verdeling van een kwalitatieve variabele

Het *staafdiagram* geeft de aantallen waarden per categorie van de kwalitatieve variabele weer in de vorm van staven. Bij voorkeur

worden de staven horizontaal getekend en met tussenruimte. Dit om verwarring met een histogram te voorkomen.

Het *cirkeldiagram* geeft de omvang van de categorieën weer als sectoren in een cirkel. Omdat onderlinge vergelijking van de sectoren vaak lastig verdient het gebruik van het staafdiagram de voorkeur.

De *frequentieverdeling* is een numeriek overzicht van de aantallen per categorie. Er kunnen zowel absolute aantallen als percentages worden opgenomen.

De *modus* of *modale categorie* is de categorie met de meeste waarden.

2.4 Samenhang tussen kwantitatieve variabelen

De *puntenwolk* geeft de samenhang tussen twee kwantitatieve variabelen X en Y grafisch weer. De paren waarden (x_i, y_i) (voor $i = 1,2,\ldots,n$) worden als punten in een rechthoekig assenstelsel getekend.

Als de puntenwolk duidt op een lineaire samenhang, kan de sterkte van de samenhang worden gemeten met de *correlatiecoëfficiënt*:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}}$$

Een waarde dicht bij -1 of $+1$ duidt op een sterk negatieve (dalende lijn) of positieve (stijgende lijn) samenhang. Een waarde dicht bij 0 duidt op het ontbreken van samenhang.
De regressielijn is de lijn die zo goed mogelijk door de puntenwolk heen gaat. De formule is $y = a + bx$, waarbij

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}, \quad a = \overline{y} - b\overline{x}.$$

2.5 Samenhang tussen kwalitatieve variabelen

Bij een *samengesteld staafdiagram* wordt er voor elk categorie van de ene kwalitatieve variabele een staafdiagram voor de andere kwalitatieve variabele getekend.

Bij een *stapeldiagram* worden de staven van het samengesteld staafdiagram op elkaar gestapeld. Er kan worden gekozen voor het weergeven van absolute aantallen of percentages.

Een kruistabel is de gezamenlijke frequentieverdeling van twee kwalitatieve variabelen. De sterkte van de samenhang kan worden gemeten met Cramérs *V*:

$$V = \sqrt{\frac{G/n}{min(r,k) - 1}}$$

Hierin is *min* (*r*, *k*) het minimum van het aantal rijen *r* en kolommen *k*. *G* is de *Chi-kwadraat-grootheid*:

$$G = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{k} \frac{\left(n_{ij} - \frac{n_{i+}n_{+j}}{n}\right)^2}{\frac{n_{i+}n_{+j}}{n}}$$

Hierin is n_{ij} het aantal waarden in de *i*-de rij en *j*-de kolom, n_{i+} is het totaal van de *i*-de rij en n_{+j} is het totaal van de *j*-de kolom. Een waarde van *V* dicht in de buurt van de 1 duidt op een sterke samenhang. Een waarde dicht in de buurt van 0 duidt op het ontbreken van samenhang.

2.6 Samenhang tussen gemengde variabelen

Technieken voor het onderzoek van de gemengde variabelen passen technieken voor de verdeling van een kwantitatieve variabele toe binnen elke categorie van de kwalitatieve variabele. Zijn de verdelingen binnen elke categorie hetzelfde, dan is er geen samenhang. Is er sprake van duidelijke verschillen, dan is er wel samenhang.

3 Kansrekening

3.1 Kansen

Experiment
Een experiment is het laten plaatsvinden van een verschijnsel waarvan de uitkomst wordt bepaald door het toeval.

Uitkomstenruimte
De uitkomstenruimte U is de verzameling van alle mogelijke uitkomsten van het toevalsverschijnsel.

Elementaire gebeurtenis
Elke mogelijke uitkomst van het experiment wordt een elementaire gebeurtenis genoemd.

Gebeurtenis
Elke willekeurige deelverzameling E van de uitkomstenruimte U wordt een (samengestelde) gebeurtenis genoemd.

Kansdefinitie van Laplace
Wanneer bij een experiment sprake is van gelijkwaardige uitkomsten, wordt de kans op een zekere uitkomst E gedefinieerd als

$$P(E) = \frac{N(E)}{N}$$

waarin $N(E)$ het aantal gunstige uitkomsten voor gebeurtenis E is en N het totaal aantal mogelijke gebeurtenissen.

Voorbeeld: Bij een worp met een dobbelsteen is de kans op de uitkomst "het getal is even" gelijk aan $3/6 = 0{,}5$.

Frequentiedefinitie van kans

Als er bij een experiment geen sprake is van gelijkwaardige uitkomsten, wordt de kans op een gebeurtenis gedefinieerd als de limietwaarde van de relatieve frequentie van het optreden van E wanneer het aantal experimenten oneindig groot wordt.

Axioma's voor kansen

1) $P(E) \geq 0$ voor elke gebeurtenis E in U.
2) $P(U) = 1$
3) $P(E_1 \cup E_2) = P(E_1) + P(E_2)$ voor elkaar uitsluitende gebeurtenissen E_1 en E_2 ($E_1 \cap E_2 = \varnothing$).

Consequenties:
- $0 \leq P(E) \leq 1$, voor elke gebeurtenis E in U.
- Als $E_1 \subset E_2$ (E_1 impliceert E_2) dan $P(E_1) \leq P(E_2)$.

Complement van een gebeurtenis

Het complement $\overline{E}$ van gebeurtenis E treedt op als gebeurtenis E *niet* optreedt. Er geldt: $P(\overline{E}) = 1 - P(E)$.

Voorwaardelijke kansen

De voorwaardelijke kans $P(E\,|\,F)$ is de kans dat de gebeurtenis E optreedt, gegeven dat de gebeurtenis F is opgetreden:

$$P(E\,|\,F) = \frac{P(E \cap F)}{P(F)} \quad \text{(met } P(F) > 0\text{)}$$

Voorbeeld: Het experiment is een worp met een dobbelsteen. De kans op de uitkomst E = "De uitkomst is even" gegeven de uitkomst F = "De uitkomst is kleiner dan 4" is gelijk aan $P(E\,|\,F) = (1/6)/(1/2) = 1/3$.

Stellingen:
- $0 \leq P(E\,|\,F) \leq 1$
- $P(E\,|\,F) = 0$ als $E \cap F = \varnothing$
- $P(E\,|\,F) = 1$ als $E \supset F$
- $P(E_1 \cup E_2\,|\,F) = P(E_1\,|\,F) + P(E_2\,|\,F)$ als $E_1 \cap E_2 = \varnothing$

Onafhankelijkheid
Twee gebeurtenissen E_1 en E_2 heten *onafhankelijk* als de kennis dat E_2 is opgetreden de kans op het optreden van E_1 niet wijzigt:

$$P(E_1 \mid E_2) = P(E_1)$$

Is aan deze relatie niet voldaan, dan zijn de gebeurtenissen E_1 en E_2 *afhankelijk*. In geval van onafhankelijkheid geldt de *productregel*:

$$P(E_1 \cap E_2) = P(E_1)P(E_2)$$

3.2 Combinatoriek

Regel 1: Productregel
Als het aantal mogelijk uitkomsten van experiment X gelijk is aan n, en bij elke mogelijke uitkomst zijn er m mogelijke uitkomsten voor het experiment Y, dan is het totaal mogelijke uitkomsten van het gecombineerde experiment XY gelijk aan $n \times m$.

Regel 2: Permutaties
Het aantal rangschikkingen (permutaties) van n objecten is gelijk aan $n! = 1 \times 2 \times \cdots \times (n-1) \times n$. Hierin wordt $n!$ uitgesproken als n *faculteit*. Er geldt $1! = 1$, en per definitie $0! = 0$.

Voorbeeld: De letters A, B en C kunnen in $3! = 3 \times 2 \times 1 = 6$ verschillende volgordes worden gezet: *ABC*, *ACB, BAC, BCA, CAB en CBA*.

Regel 3: Combinaties
Het aantal manieren (*combinaties*) waarop een steekproef van n verschillende objecten kan worden getrokken uit een verzameling van N objecten is gelijk aan:

$$\binom{N}{n} = \frac{N!}{n!(N-n)!} = \frac{N \times (N-1) \times \cdots \times (N-n+1)}{n!}$$

Deze uitdrukking heet de *binomiaalcoëfficiënt*. De uitdrukking kan worden uitgesproken als N *boven* n.

Voorbeeld: Uit vijf boeken *A, B, C, D* en *E* worden er drie willekeurig gepakt. Dan kan op

$$\binom{5}{3} = \frac{5!}{3! \times 2!} = \frac{5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1}{(3 \times 2 \times 1) \times (2 \times 1)} = \frac{60}{6} = 10 \text{ manieren.}$$

Die manieren zijn *ABC, ABD, ABE, ACD, ACE, ADE, BCD, BCE, BDE* en *CDE*.

Regel 4: Rijtjes nullen en enen

Er zijn $\binom{N}{n}$ verschillende rijtjes bestaande uit n enen en $N-n$ nullen. Dit is een toepassing van regel 3.

3.3 Stochastische variabelen

Stochastische variabele of kansvariabele

Een stochastische variabele (kansvariabele) $\underline{x}$ is een functie die aan elke uitkomst van een experiment een reëel getal toekent.

Opmerking: De conventie wordt gehanteerd dat stochastische variabelen worden onderstreept.

Discrete stochastische variabele

De stochastische variabele $\underline{x}$ kan ten hoogste aftelbaar veel waarden $x_1, x_2, x_3, \ldots$ aannemen. Het aantal mogelijke waarden kan eindig of oneindig zijn.

Kansverdeling, van een discrete stochastische variabele

De kansverdeling van de discrete stochastische variabele $\underline{x}$ specificeert voor elke mogelijke waarde x_k de kans $P(\underline{x} = x_k)$ op realisatie van deze waarde.

Aangezien de gebeurtenissen $\underline{x} = x_k$ (voor $k = 1, 2, \ldots$) een disjunct stelsel vormen, geldt

$$\sum_{k=1}^{\infty} P(\underline{x} = x_k) = 1$$

Verwachting van een discrete stochastische variabele:

$$E(\underline{x}) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k P(\underline{x} = x_k)$$

Variantie van een discrete stochastische variabele:

$$V(\underline{x}) = E(\underline{x} - E(\underline{x}))^2 = \sum_{k=1}^{\infty} (x_k - E(\underline{x}))^2 P(\underline{x} = x_k)$$

Binomiale verdeling
Er worden n onafhankelijke experimenten uitgevoerd, elk met een kans p op succes. Dan heeft het aantal successen $\underline{x}$ een Binomiale verdeling:

$$P(\underline{x} = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$$

$$E(\underline{x}) = np, \quad V(\underline{x}) = np(1-p)$$

Voorbeeld: Een multiple choice-test bestaat uit 10 vragen. Bij elke vraag moet het goede antwoord worden gekozen uit vier mogelijkheden. Als bij elke vraag wordt gegokt, dan heeft het totaal aantal goede antwoorden een Binomiale verdelen met parameters n = 10 en p = 0,25. De verwachting van het aantal goede antwoorden is 10 × 0,25 = 2,5.

Poisson-verdeling
Er wordt een zeer groot aantal van n onafhankelijke experimenten uitgevoerd, elk met een zeer kleine kans p op succes. Dan heeft het aantal successen x een Poisson-verdeling:

$$P(\underline{x} = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad \text{met } \lambda = np$$

$$E(\underline{x}) = \lambda, \quad V(\underline{x}) = \lambda$$

Voorbeeld: De Poisson-verdeling is vaak van toepassing bij zeldzame verschijnselen, zoals het aantal verkeersongelukken op een dag in een bepaald gebied, het aantal doelpunten tijdens een voetbalwedstrijd en het aantal coli-bacteriën in een watermonster uit een put.

Opmerking: De Poisson-verdeling kan worden gebruikt als een benadering voor de Binomiale verdeling als n zeer groot en p zeer klein is.

Negatief binomiale verdeling

Een reeks onafhankelijke experimenten, elk met kans p op succes wordt voortgezet tot het k-de succes is bereikt. Dan heeft het aantal hiervoor benodigde experimenten $\underline{n}_{\mathrm{k}}$ een negatief binomiale verdeling:

$$P(\underline{n}_{\mathrm{k}} = n) = \binom{n-1}{k-1} p^{\mathrm{k}} (1-p)^{\mathrm{n-k}}$$

$$E(\underline{n}_{\mathrm{k}}) = \frac{k}{p}, V(\underline{x}) = \frac{k(1-p)}{p^2}$$

Voorbeeld: het aantal keer dat men met een dobbelsteen moet gooien totdat er drie keer zes is gevallen, heeft een Negatief binomiale verdeling met parameter $k = 3$ en $p = 1/6$. De verwachting van het aantal keren is $3/(1/6) = 18$.

Hypergeometrische verdeling

Uit een verzameling van N objecten, waarvan er R een bepaalde eigenschap wel hebben en $N - R$ niet, wordt een aselecte steekproef zonder teruglegging van n objecten getrokken. Dan heeft het aantal objecten $\underline{x}$ in de steekproef met de betreffende eigenschap een hypergeometrische verdeling:

$$P(\underline{x} = r) = \frac{\binom{R}{r}\binom{N-R}{n-r}}{\binom{N}{n}}$$

$$E(\underline{x}) = \frac{nR}{N}, V(\underline{x}) = \frac{n(N-n)R(N-R)}{N^2(N-1)}$$

Voorbeeld: In een doos zitten 10 lampen, waarvan er drie kapot zijn. Men neemt blindelings vier lampen uit de doos. Dan heeft het aantal kapotte lampen onder de vier getrokken lampen een Hypergeometrische verdeling met parameters $N = 10$, $R = 3$ en $n = 4$. De verwachting van het aantal aan te treffen kapotte lampen is $4 \times 3/10 = 1{,}2$.

Opmerking: Voor $n \ll N$ kan de hypergeometrische verdeling worden benaderd door de binomiale verdeling met parameters

n en $p = r/N$. Voor $n \ll N$ en $r \ll N$ kan de hypergeometrische verdeling worden benaderd door een Poisson-verdeling met $\lambda = nR/N$.

Continue stochastische variabele

De stochastische variabele $\underline{x}$ kan in een zeker interval elke reële waarde aannemen.

Kansdichtheid van een continue stochastische variabele

De kansdichtheid $f(x)$ verdeling van een continue stochastische variabele $\underline{x}$ is een niet-negatieve functie met

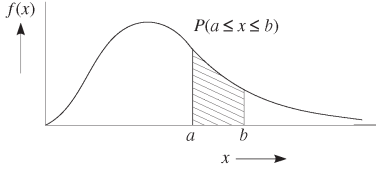
$$P(a < \underline{x} \leq b) = \int_a^b f(x)\,dx$$

Verdelingsfunctie van een continue stochastische variabele

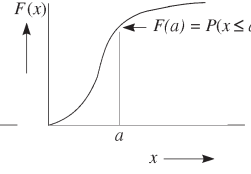
De verdelingsfunctie $F(x)$ verdeling van een continue stochastische variabele $\underline{x}$ gelijk aan

$$F(x) = P(\underline{x} \leq x) = \int_{-\infty}^{x} f(y)dy$$

$F(x)$ is een monotoon niet dalende functie met $0 \leq F(x) \leq 1$, $\lim_{x \to -\infty} F(x) = 0$ en $\lim_{x \to \infty} F(x) = 1$.



Figuur 3.1 Kansdichtheid



Figuur 3.2 Verdelingsfunctie

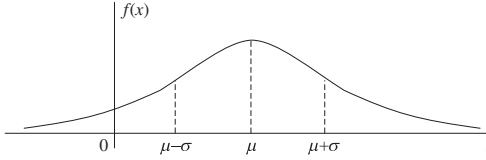
Normale verdeling

De kansdichtheid van een stochastische variabele $\underline{z}$ met een normale verdeling is gelijk aan:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Verder geldt:

$$E(\underline{z}) = \mu, V(\underline{z}) = \sigma$$



Figuur 3.3 Normale verdeling

Opmerking: Voor $\mu = 0$ en $\sigma = 1$ gaat de normale verdeling over in de *standaardnormale* verdeling.

Chi-kwadraat-verdeling

De som van de kwadraten van k onderling onafhankelijke standaardnormaal verdeelde stochastische variabelen heeft een chi-kwadraat-verdeling met k vrijheidsgraden.

Als $\underline{y}_1, \underline{y}_2 \ldots, \underline{y}_n$ onderling onafhankelijke standaardnormaal verdeelde stochastische variabelen zijn met gemiddelde $\overline{\underline{y}}$, dan heeft

$$\sum_{i=1}^{n} (\underline{y}_i - \overline{\underline{y}})^2$$

een chi-kwadraat-verdeling met $n - 1$ vrijheidsgraden.

Als $\underline{x}$ een chi-kwadraat-verdeling heeft met k vrijheidsgraden, dan geldt:

$$E(\underline{x}) = k, \; V(\underline{x}) = 2k$$

t-verdeling/Student-verdeling
Als $\underline{z}$ een standaardnormale verdeling heeft en $\underline{x}$ een chi-kwadraat-verdeling met k vrijheidsgraden, en beide stochastische variabelen zijn onafhankelijk, dan heeft

$$\underline{t} = \frac{z}{\sqrt{\underline{x}/k}}$$

een t-verdeling (of Student-verdeling) met k vrijheidsgraden, met

$$E(\underline{t}) = 0, V(\underline{t}) = \frac{k}{k-2}$$

F-verdeling
Als $\underline{x}_{\mathrm{m}}$ een chi-kwadraat-verdeling heeft met m vrijheidsgraden en $\underline{x}_{\mathrm{n}}$ een chi-kwadraat-verdeling heeft met n vrijheidsgraden, en beide stochastische variabelen zijn onafhankelijk, dan heeft

$$\underline{F} = \frac{\underline{x}_m/m}{\underline{x}_{\mathrm{n}}/n}$$

een F-verdeling met m en n vrijheidsgraden, met

$$E(\underline{F}) = \frac{n}{n-2}, V(\underline{F}) = \frac{2n^2(m+n-2)}{m(n-2)^2(n-4)}$$

4 Steekproeven uit eindige populaties

4.1 Doelpopulatie

Doelpopulatie: De eindige verzameling U van N objecten waarop de conclusies van het onderzoek betrekking hebben.
Doelvariabele: Variabele Y die wordt gemeten ter beantwoording van de onderzoeksvraag. De waarden voor de N objecten zijn $Y_1, Y_2, \ldots, Y_{\mathrm{N}}$.
Hulpvariabele: Variabele X die achtergrondkenmerken van de objecten meet en kan worden gebruikt ter nadere differentiatie

van de uitkomsten of voor de verbetering van schattingen. De waarden voor de N objecten zijn $X_1, X_2, \ldots, X_N$.

Populatieparameter: Functie van de waarden van de doelvariabele. Het is een grootheid waarvan de waarde in een steekproefonderzoek moet worden geschat. Voorbeelden van populatieparameters zijn het populatietotaal Y_T van Y, het populatiegemiddelde $\overline{Y}$ van Y, en het populatiepercentage P (indien Y aan- of afwezigheid van een kenmerk meet).

4.2 Steekproef

Kanssteekproef

Steekproef van omvang n uit de doelpopulatie waarbij de selectie van objecten plaatsvindt met een lotingsprocedure. Selectie van objecten wordt bepaald door het toeval. Als de werking van het kansmechanisme bekend is, kan de nauwkeurigheid van schattingen op basis van de steekproef worden gekwantificeerd.

Bij een *selecte steekproef* wordt doelbewust een selectie gemaakt uit de doelpopulatie, dus zonder gebruik te maken van een kansmechanisme. Er kan niets worden gezegd over de betrouwbaarheid van de schattingen. Selecte steekproeven worden verder niet beschouwd in dit hoofdstuk.

Steekproef met teruglegging: Een geselecteerd object wordt weer teruggezet in de populatie alvorens het volgende object wordt getrokken. Daardoor kan een object meer dan eens worden geselecteerd.

Steekproef zonder teruglegging: Een getrokken object wordt niet teruggezet. Daardoor kan een object hoogstens één maal voorkomen in de steekproef.

Aselector

Instrument om aselecte getallen (toevalsgetallen) te genereren. Voorbeelden: dobbelsteen, roulette, bingomachine. Computer en rekenmachines hebben vaak een aselector die willekeurige waarden $\underline{u}$ genereert uit het interval [0, 1). Voor aselecte trekken van objecten uit een populatie van omvang N kan dan het volgende algoritme worden gebruikt:

$$r = 1 + [\underline{u} \times N]$$

De vierkante haken duiden de entier-functie aan (afronden naar beneden).

Soorten steekproeven

Enkelvoudige aselecte steekproef: een steekproef zonder teruglegging, waarbij elk object dezelfde kans op selectie heeft.

Gestratificeerde steekproef: de doelpopulatie wordt in groepen (strata) verdeeld. Uit elk stratum apart wordt een steekproef getrokken. De nauwkeurigste schattingen worden verkregen door de totale steekproefom vang over de strata te verdelen volgens de Neyman-allocatie.

Steekproef met ongelijke kansen: de objecten (hier vaak bedrijven) worden geselecteerd met kansen evenredig aan hun omvang (bijvoorbeeld personeelsomvang).

Clustersteekproef: De doelpopulatie is opgedeeld in een groot aantal groepen (clusters). Er wordt een steekproef van clusters getrokken. Vervolgens worden alle objecten in de geselecteerde clusters. Voorbeeld: in een bevolking zijn de clusters gezinnen.

Tweetraps-steekproef: De doelpopulatie is opgebouwd uit een groot aantal groepen. Eerst wordt een steekproef van groepen getrokken. Vervolgens wordt uit elke groep een steekproef van objecten getrokken. Voorbeeld: een steekproef uit de bevolking waarbij eerst gemeenten worden geloot en vervolgens uit de geselecteerde gemeenten personen.

Schatter

Een recept om op grond van de waarnemingen in de steekproef een uitspraak te doen over de waarde van een populatieparameter. Toepassing van dit recept leidt tot een *schatting*. Dat is de berekende waarde van de schatter.

Een schatter $\underline{z}$ voor een populatieparameters Z moet bij voorkeur de volgende eigenschappen hebben:

- De schatter moet *zuiver* zijn: De verwachting $E(\underline{z})$ moet gelijk zijn aan de te schatten waarde Z.
- De schatter moet nauwkeurig zijn: De variantie $V(\underline{z})$ moet klein zijn. $S(\underline{z}) = \sqrt{V(\underline{z})}$ wordt de *standaardfout* van de schatter genoemd.

Schatters voor een enkelvoudige aselecte steekproef

Laten $\underline{y}_1, \underline{y}_2 \ldots, \underline{y}_n$ de waarden zijn die in de steekproef beschikbaar komen. Dan is

- het steekproefgemiddelde $\overline{\underline{y}}$ een zuivere schatter voor het *populatiegemiddelde* $\overline{Y}$, met variantie

$$V(\overline{\underline{y}}) = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N}\right) S^2 \text{ met } S^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{k=1}^{N}(Y_k - \overline{Y})^2$$

Deze variantie kan zuiver worden geschat met

$$\underline{v}(\overline{\underline{y}}) = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N}\right)\underline{s}^2, \text{ waarbij } \underline{s}^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\underline{y}_i - \overline{\underline{y}})^2$$

- $N\,\overline{\underline{y}}$ een zuivere schatter voor het *populatietotaal* Y_T, met variantie $V(N\overline{\underline{y}}) = N^2 V(\overline{\underline{y}})$. Deze variantie kan zuiver worden geschat met $\underline{v}(N\overline{\underline{y}}) = N^2\underline{v}(\overline{\underline{y}})$.
- het steekproefpercentage $\underline{p}$ een zuivere schatter voor het *populatiepercentage* P, met variantie

$$V(\underline{p}) = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N}\right)\frac{N}{N-1}P(100 - P).$$

Deze variantie kan zuiver worden geschat met

$$\underline{v}(\underline{p}) = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{N}\right)\frac{n}{n-1}\underline{p}(100 - \underline{p}).$$

Betrouwbaarheidsinterval

Interval waarvan de grenzen zijn bepaald op grond van de steekproefgegevens, en wel zo dat de kans dit het interval de (onbekende) populatieparameter bevat minstens gelijk is aan een van te voren vastgestelde (grote) kans $1 - \alpha$. De grootheid $1 - \alpha$ wordt de *betrouwbaarheid* genoemd.

95%-*betrouwbaarheidsinterval*: Betrouwbaarheidsinterval met een betrouwbaarheid van 0,95 ($\alpha = 0{,}05$). Interpretatie: als steekproeftrekking en de berekening van de schatter een groot aantal malen zou worden herhaald, dan zou gemiddeld in 95 van de 100 gevallen het betrouwbaarheidsinterval inderdaad de waarde van de populatieparameter bevatten.

95%-*betrouwbaarheidsinterval voor populatiegemiddelde* $\overline{Y}$:

$$(\overline{\underline{y}} - 1{,}96 \times S(\overline{\underline{y}}), \overline{\underline{y}} + 1{,}96 \times S(\overline{\underline{y}}))$$

In de praktijk wordt dit interval geschat door voor $S(\overline{y})$ de schatting $\underline{s}(\overline{y}) = \sqrt{v(\overline{y})}$ te substitueren

95%-*betrouwbaarheidsinterval voor populatiepercentage P*:

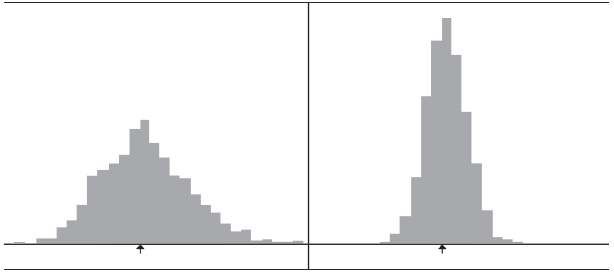
$(\underline{p} - 1{,}96 \times S(\underline{p}), \underline{p} + 1{,}96 \times S(\underline{p}))$

In de praktijk wordt dit interval geschat door voor de $S(\underline{p})$ de schatting $\underline{s}(\underline{p}) = \sqrt{v(\underline{p})}$ te substitueren

99%-*betrouwbaarheidsinterval*: wordt verkregen door in bovenstaande formules de waarde 1,96 te vervangen door 2,58.

Nauwkeurigheid en betrouwbaarheid

Bij het maken van schattingen is er altijd sprake van een uitruil tussen nauwkeurigheid en betrouwbaarheid. Uitspraken met een zeer hoge betrouwbaarheid zijn alleen mogelijk indien concessies worden gedaan aan de nauwkeurigheid ervan. Omgekeerd kunnen zeer nauwkeurige schattingen alleen worden gemaakt als consessies worden gedaan aan de betrouwbaarheid.



Figuur 4.1 De verdeling van de schatter voor steekproeven van omvang 20 (links) en omvang 80 (rechts)

Bij een gegeven betrouwbaarheid kan de nauwkeurigheid wel worden verhoogd door een grotere steekproef te trekken. In figuur 4.1 is de verdeling van de mogelijke uitkomsten van de schatter in beeld gebracht op basis van een groot aantal simulaties van steekproeven. Links zijn steekproeven van omvang 20 getrokken

en rechts steekproeven van omvang 80. Beide schatter zijn zuiver, aangezien hun verdeling keurig gespreid ligt om de theoretische waarde (aangegeven door het pijltje). Links is de variatie in de mogelijke waarden veel groter dan rechts, hetgeen betekent dat de schatter op basis van een steekproef van omvang 80 veel nauwkeuriger is.

Bepalen van de steekproefomvang

De nauwkeurigheid van een schatter neemt toe naarmate de omvang van de steekproef groter wordt. Uitgaande van een gewenste nauwkeurigheid, kan de steekproefomvang worden berekend. Die nauwkeurigheid wordt aangegeven met de *marge M*. Dit is de afstand van de schatting tot de onder-/bovengrens van het betrouwbaarheidsinterval. Onderstaande formules gelden voor een 95%-betrouwbaarheidsinterval. Voor een 99%-betrouwbaarheidsinterval dient de waarde 1, 96 te worden vervangen door 2, 58.

Steekproefomvang voor het schatten van een percentage

$$n \geq \frac{1}{\frac{N-1}{N}\left(\frac{M}{1{,}96}\right)^2 \frac{1}{P(100-P)} + \frac{1}{N}} \approx \left(\frac{1{,}96}{M}\right)^2 P(100-P)$$

Voor de onbekende waarde P kan een schatting uit vorige/ander onderzoek worden ingevuld. Is niets bekend over de orde van grootte van P, dan wordt een conservatieve waarde van n verkregen door voor P de waarde 50 in te vullen

Voorbeeld: Populatie $N = 600\,000$, marge $M \leq 3$ en $P = 50$. Dan $n \geq 1066$. Benaderingsformule: $n \geq 1068$.

Steekproefomvang voor het schatten van een gemiddelde

$$n \geq \frac{1}{\left(\frac{1{,}96\,S}{M}\right)^2 + \frac{1}{N}} \approx \left(\frac{1{,}96\,S}{M}\right)^2$$

Hierin is S de wortel uit de aangepaste populatievariantie S^2. Voor S kan een schatting uit vorige/ander onderzoek worden ingevuld. Andere mogelijkheden:

- Als Y ongeveer normaal verdeeld is over een interval van lengte L, substitueer dan $L/6$ voor S.

- Als Y gelijkmatig is verdeeld is over een interval van lengte L, substitueer dan 0, 29 L voor S.
- Als Y ongeveer exponentieel verdeeld is (met veel kleine waarden en weinig grote waarden) over een interval van lengte L, substitueer dan 0, 17 L voor S.
- Als Y verdeeld is over een interval van lengte L, en er is helemaal niets bekend over de verdeling, dan kan als 'worst case' voor S de waarde 0, 5 L worden gesubstitueerd.

5 Schatten

5.1 Uitgangspunten

Dikwijls is wel de vorm van de verdeling van een variabele in de populatie bekend (bijv. een normale verdeling), maar moeten één of meer parameters daarvan (bijvoorbeeld μ) nog worden bepaald. Een *schatter* is een recept om op grond van steekproef gegevens een uitspraak te doen over de waarde van die parameters. Toepassing van dit recept leidt tot een *schatting*. Dat is de berekende waarde van de schatter.

Veronderstelling: de waarnemingen zijn verkregen met een aselecte steekproef met *gelijke kansen en met teruglegging*. Dat betekent dat de waarnemingen opgevat kunnen worden als onderling onafhankelijke variabelen uit dezelfde verdeling.

Laat $\underline{t}$ een schatter zijn voor een parameter θ. Dan voldoet de beste schatter $\underline{t}$ aan de volgende voorwaarden:
- *Voldoende*: de waarde van $\underline{t}$ bevat alle relevante informatie.
- *Zuiver*: de verwachting van $\underline{t}$ is gelijk aan θ, $E(\underline{t}) = \theta$.
- *Efficiënt*: de variantie $V(\underline{t})$ van $\underline{t}$ is klein, en dus levert $\underline{t}$ een nauwkeurige schatting op.
- *Consistent*: De schatting wordt steeds nauwkeuriger naarmate de steekproefomvang groter wordt.

5.2 Schatting voor de normale verdeling

Schatten van de verwachting met bekende variantie

Als $\underline{y}_1, \underline{y}_2, \ldots, \underline{y}_n$ een steekproef is uit een normale verdeling met verwachting μ en variantie σ^2, dan is het steekproefgemiddelde $\underline{\overline{y}}$ ook normaal verdeeld, met verwachting μ en variantie σ^2/n. Het steekproefgemiddelde is dus een zuivere schatter voor μ. Als σ bekend is, kan gebruik worden gemaakt van het feit dat

$$\underline{z} = \frac{\underline{\overline{y}} - \mu}{\sigma}$$

een standaardnormale verdeling heeft (met verwachting 0 en variantie 1). Het $100(1-\alpha)\%$-betrouwbaarheidsinterval voor de schatter is gelijk aan

$$\left(\underline{\overline{y}} - z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \underline{\overline{y}} + z_{\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

Hierbij kan de waarde van $z_{\alpha/2}$ worden gehaald uit tabel: 5.1

Tabel 5.1 Waarde van z_α voor verschillende waarden van α

α	100 (1 − α)%	z_α	$z_{\alpha/2}$
0,10	90%	1,280	1,645
0,05	95%	1,645	1,960
0,01	99%	2,330	2,580

Schatten van de verwachting met onbekende variantie

Als σ niet bekend is, kan gebruik worden gemaakt van het feit dat

$$\underline{t} = \frac{\underline{\overline{y}} - \mu}{s/\sqrt{n}}$$

een t-verdeling heeft met $n-1$ vrijheidsgraden. Het $100(1-\alpha)\%$ -betrouwbaarheidsinterval voor de schatter is gelijk aan

$$\left(\overline{y} - t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}, \overline{y} + t_{\alpha/2}\frac{S}{\sqrt{n}}\right)$$

De waarde van $t_{\alpha/2}$ hangt af van de waarde van n. *Voor grote waarden van* n (zeg $n > 200$) kan $t_{\alpha/2}$ worden benaderd door $z_{\alpha/2}$.

Schatten van de variantie
Voor het schatten van de variantie σ^2 kan gebruik worden gemaakt van het feit dat de grootheid

$$\chi^2 = \frac{(n-1)\underline{s}^2}{\sigma^2}$$

een chi-kwadraat verdeling heeft met $n - 1$ vrijheidsgraden. De steekproefvariantie $\underline{s}^2$ is een zuivere schatter voor de variantie σ^2, en het 95%-betrouwbaarheidsinterval is gelijk aan

$$\left(\frac{(n-1)\underline{s}^2}{\chi^2_{\alpha/2}}, \frac{(n-1)\underline{s}^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}}\right),$$

waarin $\chi^2_{\alpha/2}$ de waarde is waarvoor $P(\underline{\chi}^2 \leq \chi^2_{\alpha/2}) = \alpha/2$, en waarde $\chi^2_{1-\alpha/2}$ waarde waarvoor $P(\underline{\chi}^2 \leq \chi^2_{1-\alpha/2}) = 1 - \alpha/2$.

5.3 Schatting voor de binomiale verdeling

De fractie $\underline{f}$ van successen in n onafhankelijke experimenten is een zuivere schatter voor succeskans p van de binomiale verdeling. Voor de bepaling van het betrouwbaarheidsinterval wordt gebruik gemaakt van het feit dat $\underline{f}$ bij benadering normaal verdeeld is met verwachting p en variantie $p(1-p)/n$. Deze benadering mag worden toegepast voor $np > 5$ en $n(1-p) > 5$. Het 95%- betrouwbaarheidsinterval voor p is:

$$\left(\underline{f} - z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\underline{f}(1-\underline{f})}{n}},\ f + z_{\alpha/2}\sqrt{\frac{\underline{f}(1-\underline{f})}{n}}\right)$$

6 Toetsen

6.1 Uitgangspunten

Door het uitvoeren van een toets kan een bewerking over een populatieverdeling worden gecontroleerd. Hierbij worden een nulhypothese en alternatieve hypothese opgesteld:

- *Nulhypothese* H_0: De bewering die voor waar wordt aangenomen.
- *Alternatieve hypothese* H_1: De ontkenning van deze bewering.

Toetsing geschiedt onder de veronderstelling dat H_0 waar is. Op basis van verzamelde gegevens wordt een toetsings-grootheid berekend. De waarde van deze toetsingsgrootheid is een indicatie voor de plausibiliteit van de bewering in de nulhypothese. Tabel 6.1 geeft aan welke situaties zich kunnen voordoen.

Tabel 6.1 Beslissingsschema

beslissing	werkelijkheid		risico
	H_0 is waar	H_1 is waar	
H_0 aannemen	goed	fout van 2^e soort (β)	H_0 ten onrechte aannemen
H_0 verwerpen	fout van 1^e soort (α)	goed	H_0 ten onrechte verwerpen

Gang van zaken

a. Verzamel gegevens op basis van een steekproef.
b. Kies een toetsingsgrootheid. Deze moet kunnen worden berekend met behulp van de steekproefgegevens. De verdeling van de toetsingsgrootheid moet bekend zijn, gegeven de nulhypothese. Meestal kunnen hiervoor schatters worden gebruikt.
c. Kies een onbetrouwbaarheidsdrempel α Hiermee wordt de fout van de 1^e soort onder controle gehouden. Meestal wordt een waarde van 0,05 of 0,01 genomen.

d. Stel het kritieke gebied vast. Dat zijn de onwaarschijnlijke waarden van de toetsingsgrootheid, gegeven de nulhypothese. Het kritieke gebied wordt zo gekozen dat de kans op een waarde in dit gebied, gegeven de nulhypothese, kleiner of gelijk is aan α.
e. Bereken de waarde van de toetsingsgrootheid. Ligt de waarde in het kritieke gebied, dan wordt de nulhypothese H_0 verworpen. Ligt de waarde niet in het kritieke gebied, dan wordt H_0 niet verworpen.

6.2 Toetsen voor het populatiegemiddelde

Een toets op het populatiegemiddelde toetst of het populatiegemiddelde μ gelijk is aan een zeker waarde μ_0. Deze toets kan worden gebruikt in de volgende situaties:

a) H_0: $\mu = \mu_0$ tegen H_1: $\mu \neq \mu_0$ (tweezijdig toetsen)
b) H_0: $\mu \leq \mu_0$ (of $\mu = \mu_0$) tegen H_1: $\mu > \mu_0$ (rechtszijdig toetsen)
c) H_0: $\mu \geq \mu_0$ (of $\mu = \mu_0$) tegen H_1: $\mu < \mu_0$ (linkszijdig toetsen)

Normale verdeling met bekende variatie

Toetsingsgrootheid: $\underline{z} = \dfrac{\overline{\underline{y}} - \mu_0}{\sigma}$

Kritiek gebied (zie tabel 5.1 voor waarden van S_α):
a) $(-\infty, -z_{\alpha/2}] \cup [z_{\alpha/2}, \infty)$
b) $[z_\alpha, \infty)$
c) $(-\infty, -z_\alpha]$

De waarden van z_α en $z_{\alpha/2}$ staan in tabel 6.2.

Tabel 6.2 Waarde van z_α voor verschillende waarden van α

α	100 $(1 - \alpha)$%	z_α	$z_{\alpha/2}$
0,10	90%	1,280	1,645
0,05	95%	1,645	1,960
0,01	99%	2,330	2,580

Normale verdeling met onbekende variatie

Toetsingsgrootheid: $\underline{t} = \dfrac{\overline{\underline{y}} - \mu_0}{\underline{s}}\sqrt{n}$

Kritiek gebied:
a) $(-\infty, -t_{\alpha/2}] \cup [t_{\alpha/2}, \infty)$
b) $[t_\alpha, \infty)$
c) $(-\infty, -t_\alpha]$

De waarde van $t_{\alpha/2}$ hangt af van de waarde van n. Voor grote waarden van N (zeg $N > 200$) kan $t_{\alpha/2}$ worden benaderd door $z_{\alpha/2}$.

6.3 *Toetsen voor fracties*

Binomiale verdeling

De toets op een fractie toetst of de fractie elementen p in de populatie met een bepaalde eigenschap gelijk is aan een zeker waarde p_0. Deze toets kan worden gebruikt in de volgende situaties:

a) H_0: $p = p_0$ tegen H_1: $p \neq p_0$ (tweezijdig toetsen)
b) H_0: $p \leq p_0$ (of $p = p_0$) tegen H_1: $p > p_0$ (rechtszijdig toetsen)
c) H_0: $p \geq p_0$ (of $p = p_0$) tegen H_1: $p < p_0$ (linkszijdig toetsen)

Toetsingsgrootheid: $z = \dfrac{\underline{f} - p_0}{\sqrt{p_0(1-p_0)/n}}$,

waarin $\underline{f}$ de fractie elementen met die eigenschap in een steekproef van omvang n. Voor $np_0 > 5$ en $n(1-p_0) > 5$ is $\underline{z}$ bij benadering normaal verdeeld. Kritiek gebied:

a) $(-\infty, -z_{\alpha/2}] \cup [z_{\alpha/2}, \infty)$
b) $[z_\alpha, \infty)$
c) $(-\infty, -z_\alpha]$

Multinomiale verdeling

Als een populatie is verdeeld in een aantal (zeg k) klassen, kan met de chi-kwadraat-toets worden nagegaan of de fracties elementen in de klassen gelijk zijn aan zekere waarden. Er wordt een steekproef

van omvang n zonder teruglegging getrokken. De aangetroffen aantallen in de klassen zijn $n_1, n_2, \ldots, n_k$. De verwachtte aantallen in de klassen onder de nulhypothese zijn $e_1, e_2, \ldots, e_k$. De alternatieve hypothese zegt dat een of meer van de verwachte aantallen niet gelijk is aan de opgegeven waarde.

Toetsingsgrootheid: $X^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - e_i)^2}{n_i}$

De toetsingsgrootheid heeft een chi-kwadraat-verdeling met $k - 1$ vrijheidsgraden.

Kritiek gebied: $[\chi^2_\alpha, \infty)$. Hierin is χ^2_α de waarde van de chi-kwadraat-verdeling met $k - 1$ vrijheidsgraden waarvoor $P(\underline{\chi}^2 > \chi^2_\alpha) = \alpha$

6.4 Toetsen voor de standaardafwijking

De toets voor de variantie van een normale verdeling toets of de populatievariantie σ^2 gelijk is aan een zekere waarde σ_0^2.

Toetsingsgrootheid: $\underline{X}^2 = \frac{(n-1)\underline{s}^2}{\sigma_0^2}$

De toetsingsgrootheid heeft een chi-kwadraat-verdeling met $n - 1$ vrijheidsgraden. Deze toets kan worden gebruikt in de volgende situaties:

a) H_0: $\sigma^2 = \sigma_0^2$ tegen H_1: $\sigma^2 \neq \sigma_0^2$ (tweezijdig toetsen)
b) H_0: $\sigma^2 \leq \sigma_0^2$ (of $\sigma^2 = \sigma_0^2$) tegen H_1: $\sigma^2 > \sigma_0^2$ (rechtszijdig toetsen)
c) H_0: $\sigma^2 \geq \sigma_0^2$ (of $\sigma^2 = \sigma_0^2$) tegen H_1: $\sigma^2 < \sigma_0^2$ (linkszijdig toetsen)

Kritiek gebied:
a) $(0, -\chi^2_{\alpha/2}] \cup [\chi^2_{1-\alpha/2}, \infty)$
b) $[\chi^2_{1-\alpha}, \infty)$
c) $(0, \chi^2_\alpha]$

Hierin is χ^2_α de waarde is waarvoor $P(\underline{\chi}^2 \leq \chi^2_\alpha) = \alpha$, en $\chi^2_{1-\alpha}$ waarde waarvoor $P(\underline{\chi}^2 \leq \chi) = 1 - \alpha$.

7 Regressie-analyse

7.1 Uitgangspunten

Bij regressie-analyse wordt het verband onderzocht tussen twee kwantitatieve variabelen X en Y. De variabele Y wordt gezien als *afhankelijke* variabele waarvan het gedrag kan worden verklaard uit een onafhankelijke variabele X. De waarden van X worden gezien als instelling van het systeem, en zijn daarom niet stochastisch. De waarden van Y zijn metingen aan het systeem, waarin eventueel ruis kan zitten, en worden daarom als stochastisch opgevat.

Lineair regressiemodel

Als uit de puntenwolk van X tegen Y blijkt dat er sprake is van een rechtlijnig verband, dan kan een lineair regressiemodel worden geschat. De waarde y_i van kan volgens dit model worden geschreven als:

$$\underline{y}_\mathrm{i} = \alpha + \beta x_\mathrm{i} + \underline{\varepsilon}_\mathrm{i} \quad \text{voor } i = 1, 2, \ldots, n.$$

Hierin zijn α en β de *regressiecoëfficiënten*. Voor de *storingstermen* $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_\mathrm{n}$ geldt dat ze onderling onafhankelijk zijn en alle dezelfde normale verdeling hebben (met verwachting 0 en variantie σ_ε^2).

Schatten van het model

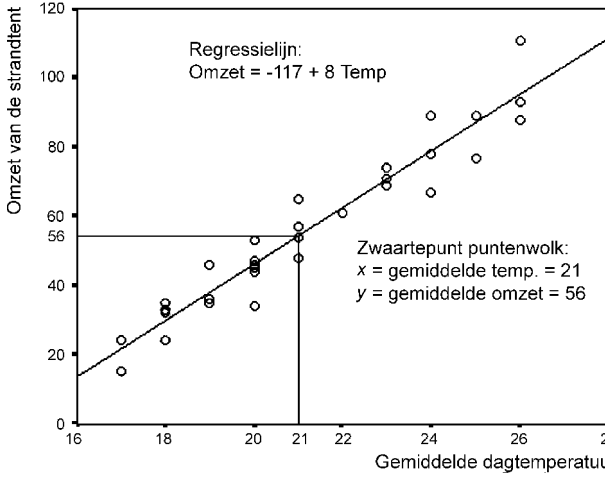
De regressiecoëfficiënten α en β worden geschat op grond van n waarnemingen $(x_1, \underline{y}_1), \ldots, (x_2, \underline{y}_2), \ldots, (x_\mathrm{n}, \underline{y}_\mathrm{n})$. Schatters $\underline{a}$ voor α en $\underline{b}$ voor β worden verkregen door minimaliseren van *het kleinste kwadratencriterium*

$$\sum_{i=1}^{n} (\underline{y}_\mathrm{i} - \underline{a} - \underline{b} x_\mathrm{i})^2$$

Dit leidt tot

$$\underline{b} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_\mathrm{i} - \overline{x})(\underline{y}_\mathrm{i} - \overline{\underline{y}})}{\sum_{i=1}^{n} (x_\mathrm{i} - \overline{x})^2}, \quad \underline{a} = \overline{\underline{y}} - \underline{b}\overline{x}$$

Voorbeeld: Met een regressiemodel wordt de omzet van een strandtent voorspeld op basis van de dagtemperatuur. De coëfficiënt a is gelijk aan -117 en de coëfficiënt b heeft de waarde 8, zodat het model gelijk is aan $Omzet = -117 + 8\ Temp$. Voor iedere graad stijging in temperatuur gaat de omzet 8 omhoog. In figuur 7.1 is de puntenwolk met daarin de regressielijn getekend. Merk op dat de regressielijn altijd door het zwaartepunt van de puntenwolk gaat. Dat is het punt als coördinaten het gemiddelde van de x-variabele en gemiddelde van de y-variabele.



Figuur 7.1 Puntenwolk met regressielijn

Kwadratensommen

Gegeven schattingen $\underline{a}$ voor α en $\underline{b}$ voor β kan, gegeven de waarde x_i de waarde y_i worden voorspeld met

$$\hat{\underline{y}}_i = \underline{a} + \underline{b}x_i$$

Het regressiemodel probeert de variatie in de waarden van Y te verklaren uit de waarden van X. Dit kan worden opgeschreven in termen van kwadratensommen:

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$SST \quad = \quad SSM \quad + \quad SSE$$

De totale kwadratensom SST wordt gesplitst in een kwadratensom SSM (het door het model verklaarde deel) en een kwadratensom SSE (het onverklaarde deel).

Determinatiecoëfficiënt

De determinatiecoëfficiënt R^2 is gedefinieerd als

$$R^2 = \frac{SSM}{SST}$$

De waarde ligt in het interval [0, 1]. Een waarde dicht bij 1 geeft aan dat het model een grote verklarende kracht heeft. Een waarde dicht bij 0 duidt op een geringe verklarende kracht.

Variantie-analysetabel

Er kan een toets worden uitgevoerd om vast te stellen of het regressiemodel een bijdrage levert tot het verklaren van de variatie in de waarden van Y. Hiertoe wordt eerst een variantieanalysetabel opgesteld:

bron	kwadratensom	vrijheidsgraden	gemiddelde kwadratensom	F	Sig.
model	SSM	1	$MSM = SSM/1$	MSM/MSE	p
rest	SSE	$n-2$	$MSE = SSE/n-2$		
totaal	SST	$n-1$			

Onder de nulhypothese (het model past niet, m.a.w. de coëfficiënt $\beta = 0$ heeft de grootheid F een F-verdeling met 1 en $n-2$ vrijheidsgraden. De kolom 'Sig' bevat de kans op een nog extremere waarde van F. Is deze kans kleiner dan de vooraf gekozen waarde

α van de onbetrouwbaarheidsdrempel, dan wordt de nulhypothese verworpen, en levert het model wel degelijk een bijdrage aan de verklaring.

Residuenanalyse

Analyse van de residuen $\underline{r}_i = \underline{y}_i - \underline{\hat{y}}_i$ kan nog nader inzicht verschaffen in hoeverre het geschatte model adequaat is.

- Door de residuen op normaal waarschijnlijkheidspapier te tekenen, kan worden vastgesteld in hoeverre de storingstermen normaal zijn verdeeld.
- Een grafiek van de residuen (op de y-as) tegen de waarden van X (op de x-as) zou een horizontale band zonder structuur op moeten leveren. Is dit niet het geval, dan zijn er andere modellen denkbaar die beter passen.

7.2 *Meervoudig lineair regressiemodel*

Het hiervoor besproken regressiemodel bevat slechts één onafhankelijke variabele X. Daarom is dit een *enkelvoudig* regressiemodel. Heel vaak zullen meer onafhankelijke variabelen X_1, X_2, ..., X_p worden gebruikt ter verklaring van de variabele Y. Dit is een meervoudig regressiemodel:

$$\underline{y}_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \cdots + \beta_p x_{pi} + \underline{\varepsilon}_i$$

voor $i = 1, 2, \ldots, n$.

8 Variantie-analyse

8.1 *Uitgangspunten*

Bij variantie-analyse wordt het verband onderzocht tussen een kwalitatieve variabele X en een kwantitatieve variabele Y. De variabele Y wordt gezien als *afhankelijke* variabele waarvan het gedrag kan worden verklaard uit een onafhankelijke variabele X. De waarden van X worden gezien als instelling van het systeem, en zijn

daarom niet stochastisch. De waarden van Y zijn metingen aan het systeem, waarin eventueel ruis kan zitten, en worden daarom als stochastisch opgevat.

Er is sprake van samenhang tussen X en Y als het gemiddelde van Y niet binnen elke categorie van X hetzelfde is en de variatie van Y binnen de categorieën van X klein is.

8.2 Enkelvoudige variantie-analysemodel

Het enkelvoudige variantie-analyse is van toepassing als voldaan is aan de volgende twee voorwaarden:
- De verdeling van Y binnen elke categorie van X moet ongeveer normaal zijn.
- De variantie van Y binnen elke categorie van X moet ongeveer even groot zijn.

Deze voorwaarden kunnen worden gecontroleerd met de grafische technieken uit paragraaf 2 (spreidingsdiagrammen en snorrendozen).

Stel de variabele X heeft p categorieën en in groep i worden n_i waarnemingen aan variabele Y verricht. Dan kan de j-de waarde y_{ij} van Y in categorie i van X volgens dit model worden geschreven als:

$$\underline{y}_{ij} = \alpha + \beta_i + \underline{\varepsilon}_{ij}$$

voor $i = 1, 2, \ldots, p$ en $j = 1, 2, \ldots, n_i$.

Hierin zijn α, β_1, β_2, $\ldots$, β_p, nader te bepalen *coëfficiënten*. Voor de *storingstermen* ε_{ij} geldt dat ze onderling onafhankelijk zijn en alle dezelfde normale verdeling hebben (met verwachting 0 en variantie σ^2_ε).
Als alle β's gelijk zijn aan 0, dan is er geen sprake van samenhang. Verschillen deze coëfficiënten, dan is er wel sprake van samenhang.

Schatten van het model

De coëfficiënten α en β_i worden geschat op grond van de waarnemingen $\underline{y}_{ij}$, voor $i = 1, 2, \ldots, p$ en $j = 1, 2, \ldots, n_i$. Schatters

$\underline{a}, \underline{b}_1, \underline{b}_2, \ldots, \underline{b}_p$ voor $\alpha, \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_p$ worden verkregen door minimaliseren van *het kleinste kwadratencriterium*

$$\sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{n_i} (\underline{y}_{ij} - \underline{a} - \underline{b}_i)^2$$

Dit leidt tot

$$\underline{a} = \overline{\underline{y}}, \quad \underline{b}_i = \overline{\underline{y}} - \overline{\underline{y}_i} \quad \text{voor } i = 1, 2, \ldots, n_i$$

Kwadratensommen

Gegeven schattingen $\underline{a}, \underline{b}_1, \underline{b}_2, \ldots, \underline{b}_p$ voor α, β_1, $\beta_2, \ldots,$ β_p kan, gegeven de waarde X de waarde Y worden voorspeld. Die voorspelling is voor categorie i van X gelijk aan

$$\hat{\underline{y}}_{ij} = \underline{a} + \underline{b}_i$$

Het variantie-analysemodel probeert de variatie in de waarden van Y te verklaren uit de waarden van X. Dit kan worden opgeschreven in termen van kwadratensommen:

$$\sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{n_i} (\underline{y}_{ij} - \overline{\underline{y}})^2 = \sum_{i=1}^{p} n_i (\overline{\underline{y}_i} - \overline{\underline{y}})^2 + \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{n_i} (\underline{y}_{ij} - \overline{\underline{y}_i})^2$$

$$SST \quad = \quad SSM \quad + \quad SSE$$

De totale kwadratensom *SST* wordt gesplitst in een kwadratensom *SSM* (het door het model verklaarde deel) en een kwadratensom *SSE* (het onverklaarde deel).

Variantie-analysetabel

Er kan een toets worden uitgevoerd om vast te stellen of het regressiemodel een bijdrage levert tot het verklaren van de variatie in de waarden van *Y*. Hiertoe wordt eerst een variantieanalysetabel opgesteld:

bron	kwadratensom	vrijheidsgraden	gemiddelde kwadratensom	F	Sig.
model	SSM	$p - 1$	$MSM = SSM/(p-1)$	MSM/MSE	p
rest	SSE	$n - p$	$MSE = SSE/(n-p)$		
totaal	SST	$n - 1$			

Onder de nulhypothese (het model past niet, m.a.w. de coëfficiënt β_i zijn 0) heeft de grootheid F een F-verdeling met $p - 1$ en $n - p$ vrijheidsgraden. De kolom 'Sig' bevat de kans op een nog extremere waarde van F. Is deze kans kleiner dan de vooraf gekozen waarde α van de onbetrouwbaarheidsdrempel, dan wordt de nulhypothese verworpen, en levert het model wel degelijk een bijdrage aan de verklaring.

8.3 *Meervoudig variantie-analysemodel*

Het hiervoor besproken variantie-analysemodel bevat slechts één onafhankelijke variabele X. Daarom is dit een *enkelvoudig* regressiemodel. Heel vaak zullen meer onafhankelijke variabelen worden gebruikt ter verklaring van de variabele Y. Een voorbeeld is een tweevoudig variantie-analysemodel:

$$\underline{y}_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \underline{\varepsilon}_{ijk}.$$

De α_i beschrijven de bijdragen van de eerste onafhankelijke variabele X_i en de β_j de bijdragen van de tweede onafhankelijke variabele X_2. De γ_{ij} zijn de bijdragen van de interactie tussen X_1 en X_2.

9 Tabellen

Binomiale verdeling
Poisson-verdeling
Normale verdeling
Chi-kwadraat verdeling
t-verdeling
F-verdeling
Aselecte getallen

Tabel 9.1 Binomiale verdeling, getabelleerd is:

$$P\{\underline{k} \leqq k\} = \sum_{i=0}^{k} \binom{n}{i} p^{i}(1-p)^{n-i}$$

		p											
n	k	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	1/6	1/3
2	0	0,9025	0,8100	0,7225	0,6400	0,5625	0,4900	0,4225	0,3600	0,3025	0,2500	0,6944	0,4444
	1	0,9975	0,9900	0,9775	0,9600	0,9375	0,9100	0,8775	0,8400	0,7975	0,7500	0,9722	0,8889
	2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
3	0	0,8574	0,7290	0,6141	0,5120	0,4219	0,3430	0,2746	0,2160	0,1664	0,1250	0,5787	0,2963
	1	0,9928	0,9720	0,9392	0,8960	0,8438	0,7840	0,7182	0,6480	0,5748	0,5000	0,9259	0,7407
	2	0,9999	0,9990	0,9966	0,9920	0,9844	0,9730	0,9571	0,9360	0,9089	0,8750	0,9954	0,9630
	3	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
4	0	0,8145	0,6561	0,5220	0,4096	0,3164	0,2401	0,1785	0,1296	0,0915	0,0625	0,4823	0,1975
	1	0,9860	0,9477	0,8905	0,8192	0,7383	0,6517	0,5630	0,4752	0,3910	0,3125	0,8681	0,5926
	2	0,9995	0,9963	0,9880	0,9728	0,9492	0,9163	0,8735	0,8208	0,7585	0,6875	0,9838	0,8889
	3	1,0000	0,9999	0,9995	0,9984	0,9961	0,9919	0,9850	0,9744	0,9590	0,9375	0,9992	0,9877
	4		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
5	0	0,7738	0,5905	0,4437	0,3277	0,2373	0,1681	0,1160	0,0778	0,0503	0,0312	0,4019	0,1317
	1	0,9774	0,9185	0,8352	0,7373	0,6328	0,5282	0,4284	0,3370	0,2562	0,1875	0,8038	0,4609
	2	0,9988	0,9914	0,9734	0,9421	0,8965	0,8369	0,7648	0,6826	0,5931	0,5000	0,9645	0,7901
	3	1,0000	0,9995	0,9978	0,9933	0,9844	0,9692	0,9460	0,9130	0,8688	0,8125	0,9967	0,9547
	4		1,0000	0,9999	0,9997	0,9990	0,9976	0,9947	0,9898	0,9815	0,9688	0,9999	0,9959
	5			1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
6	0	0,7351	0,5314	0,3771	0,2621	0,1780	0,1176	0,0754	0,0467	0,0277	0,0156	0,3349	0,0878
	1	0,9672	0,8857	0,7765	0,6554	0,5339	0,4202	0,3191	0,2333	0,1636	0,1094	0,7368	0,3512
	2	0,9978	0,9842	0,9527	0,9011	0,8306	0,7443	0,6471	0,5443	0,4415	0,3438	0,9377	0,6804
	3	0,9999	0,9987	0,9941	0,9830	0,9624	0,9295	0,8826	0,8208	0,7447	0,6562	0,9913	0,8999
	4	1,0000	0,9999	0,9996	0,9984	0,9954	0,9891	0,9777	0,9590	0,9308	0,8906	0,9993	0,9822
	5		1,0000	1,0000	0,9999	0,9998	0,9993	0,9982	0,9959	0,9917	0,9844	1,0000	0,9986
	6				1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		1,0000
7	0	0,6983	0,4783	0,3206	0,2097	0,1335	0,0824	0,0490	0,0280	0,0152	0,0078	0,2791	0,0585
	1	0,9556	0,8503	0,7166	0,5767	0,4449	0,3294	0,2338	0,1586	0,1024	0,0625	0,6698	0,2634
	2	0,9962	0,9743	0,9262	0,8520	0,7564	0,6471	0,5323	0,4199	0,3164	0,2266	0,9042	0,5706
	3	0,9998	0,9973	0,9879	0,9667	0,9294	0,8740	0,8002	0,7102	0,6083	0,5000	0,9824	0,8267
	4	1,0000	0,9998	0,9988	0,9953	0,9871	0,9712	0,9444	0,9037	0,8471	0,7734	0,9980	0,9547
	5		1,0000	0,9999	0,9996	0,9987	0,9962	0,9910	0,9812	0,9643	0,9375	0,9999	0,9931
	6			1,0000	1,0000	0,9999	0,9998	0,9994	0,9984	0,9963	0,9922	1,0000	0,9995
	7					1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		1,0000
8	0	0,6634	0,4305	0,2725	0,1678	0,1001	0,0576	0,0319	0,0168	0,0084	0,0039	0,2326	0,0391
	1	0,9428	0,8131	0,6572	0,5033	0,3671	0,2553	0,1691	0,1064	0,0632	0,0352	0,6047	0,1951
	2	0,9942	0,9619	0,8948	0,7969	0,6785	0,5518	0,4278	0,3154	0,2201	0,1445	0,8652	0,4682
	3	0,9996	0,9950	0,9786	0,9437	0,8862	0,8059	0,7064	0,5941	0,4770	0,3633	0,9693	0,7414
	4	1,0000	0,9996	0,9971	0,9896	0,9727	0,9420	0,8939	0,8263	0,7396	0,6367	0,9954	0,9121
	5		1,0000	0,9998	0,9988	0,9958	0,9887	0,9747	0,9502	0,9115	0,8555	0,9996	0,9803
	6			1,0000	0,9999	0,9996	0,9987	0,9964	0,9915	0,9819	0,9648	1,0000	0,9974
	7				1,0000	1,0000	0,9999	0,9998	0,9993	0,9983	0,9961		0,9998
	8						1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		1,0000
9	0	0,6302	0,3874	0,2316	0,1342	0,0751	0,0404	0,0207	0,0101	0,0046	0,0020	0,1938	0,0260
	1	0,9288	0,7748	0,5995	0,4362	0,3003	0,1960	0,1211	0,0705	0,0385	0,0195	0,5427	0,1431
	2	0,9916	0,9470	0,8591	0,7382	0,6007	0,4628	0,3373	0,2318	0,1495	0,0898	0,8217	0,3772
	3	0,9994	0,9917	0,9661	0,9144	0,8343	0,7297	0,6089	0,4826	0,3614	0,2539	0,9520	0,6503
	4	1,0000	0,9991	0,9944	0,9804	0,9511	0,9012	0,8283	0,7334	0,6214	0,5000	0,9910	0,8552
	5		0,9999	0,9994	0,9969	0,9900	0,9747	0,9464	0,9006	0,8342	0,7461	0,9989	0,9576
	6		1,0000	1,0000	0,9997	0,9987	0,9957	0,9888	0,9750	0,9502	0,9102	0,9999	0,9917
	7				1,0000	0,9999	0,9996	0,9986	0,9962	0,9909	0,9805	1,0000	0,9990
	8					1,0000	1,0000	0,9999	0,9997	0,9992	0,9980		1,0000
	9							1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		

Tabel 9.1 (vervolg)

		p											
n	*k*	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	1/6	1/3
10	0	0,5987	0,3487	0,1969	0,1074	0,0563	0,0282	0,0135	0,0060	0,0025	0,0010	0,1615	0,0173
	1	0,9139	0,7361	0,5443	0,3758	0,2440	0,1493	0,0860	0,0464	0,0233	0,0107	0,4845	0,1040
	2	0,9885	0,9298	0,8202	0,6778	0,5256	0,3828	0,2616	0,1673	0,0996	0,0547	0,7752	0,2991
	3	0,9990	0,9872	0,9500	0,8791	0,7759	0,6496	0,5138	0,3823	0,2660	0,1719	0,9303	0,5593
	4	0,9999	0,9984	0,9901	0,9672	0,9219	0,8497	0,7515	0,6331	0,5044	0,3770	0,9845	0,7869
	5	1,0000	0,9999	0,9986	0,9936	0,9803	0,9527	0,9051	0,8338	0,7384	0,6230	0,9976	0,9234
	6		1,0000	0,9999	0,9991	0,9965	0,9894	0,9740	0,9452	0,8980	0,8281	0,9997	0,9803
	7			1,0000	0,9999	0,9996	0,9984	0,9952	0,9877	0,9726	0,9453	1,0000	0,9966
	8				1,0000	1,0000	0,9999	0,9995	0,9983	0,9955	0,9893		0,9996
	9						1,0000	1,0000	0,9999	0,9997	0,9990		1,0000
	10								1,0000	1,0000	1,0000		
15	0	0,4633	0,2059	0,0874	0,0352	0,0134	0,0047	0,0016	0,0005	0,0001	0,0000	0,0649	0,0023
	1	0,8290	0,5490	0,3186	0,1671	0,0802	0,0353	0,0142	0,0052	0,0017	0,0005	0,2596	0,0194
	2	0,9638	0,8159	0,6042	0,3980	0,2361	0,1268	0,0617	0,0271	0,0107	0,0037	0,5322	0,0794
	3	0,9945	0,9444	0,8227	0,6482	0,4613	0,2969	0,1727	0,0905	0,0424	0,0176	0,7685	0,2092
	4	0,9994	0,9873	0,9383	0,8358	0,6865	0,5155	0,3519	0,2173	0,1204	0,0592	0,9102	0,4041
	5	0,9999	0,9978	0,9832	0,9389	0,8516	0,7216	0,5643	0,4032	0,2608	0,1509	0,9726	0,6184
	6	1,0000	0,9997	0,9964	0,9819	0,9434	0,8689	0,7548	0,6098	0,4522	0,3036	0,9934	0,7970
	7		1,0000	0,9994	0,9958	0,9827	0,9500	0,8868	0,7869	0,6535	0,5000	0,9987	0,9118
	8			0,9999	0,9992	0,9958	0,9848	0,9578	0,9050	0,8182	0,6964	0,9998	0,9692
	9			1,0000	0,9999	0,9992	0,9963	0,9876	0,9662	0,9231	0,8491	1,0000	0,9915
	10				1,0000	0,9999	0,9993	0,9972	0,9907	0,9745	0,9408		0,9982
	11					1,0000	0,9999	0,9995	0,9981	0,9937	0,9824		0,9997
	12						1,0000	0,9999	0,9997	0,9989	0,9963		1,0000
	13							1,0000	1,0000	0,9999	0,9995		
	14									1,0000	1,0000		
20	0	0,3585	0,1216	0,0388	0,0115	0,0032	0,0008	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0261	0,0003
	1	0,7358	0,3917	0,1756	0,0692	0,0243	0,0076	0,0021	0,0005	0,0001	0,0000	0,1304	0,0033
	2	0,9245	0,6769	0,4049	0,2061	0,0913	0,0355	0,0121	0,0036	0,0009	0,0002	0,3287	0,0176
	3	0,9841	0,8670	0,6477	0,4114	0,2252	0,1971	0,0444	0,0160	0,0049	0,0013	0,5665	0,0604
	4	0,9974	0,9568	0,8298	0,6296	0,4148	0,2375	0,1182	0,0510	0,0189	0,0059	0,7687	0,1515
	5	0,9997	0,9887	0,9327	0,8042	0,6172	0,4164	0,2454	0,1256	0,0553	0,0207	0,8982	0,2972
	6	1,0000	0,9976	0,9781	0,9133	0,7858	0,6080	0,4166	0,2500	0,1299	0,0577	0,9629	0,4793
	7		0,9996	0,9941	0,9679	0,8982	0,7723	0,6010	0,4159	0,2520	0,1316	0,9887	0,6615
	8		0,9999	0,9987	0,9900	0,9591	0,8867	0,7624	0,5956	0,4143	0,2517	0,9972	0,8095
	9		1,0000	0,9998	0,9974	0,9861	0,9520	0,8782	0,7553	0,5914	0,4119	0,9994	0,9081
	10			1,0000	0,9994	0,9961	0,9829	0,9468	0,8725	0,7507	0,5881	0,9999	0,9624
	11				0,9999	0,9991	0,9949	0,9804	0,9435	0,8692	0,7483	1,0000	0,9870
	12				1,0000	0,9998	0,9987	0,9940	0,9790	0,9420	0,8684		0,9963
	13					1,0000	0,9997	0,9985	0,9935	0,9786	0,9423		0,9991
	14						1,0000	0,9997	0,9984	0,9936	0,9793		0,9998
	15							1,0000	0,9997	0,9985	0,9941		1,0000
	16								1,0000	0,9997	0,9987		
	17									1,0000	0,9998		
	18										1,0000		

Tabel 9.2 Poisson-verdeling, getabelleerd is:

$$P\{\underline{k} \leqq k\} = \sum_{i=0}^{k} \frac{\lambda^i e^{-\lambda}}{i!}$$

	λ									
k	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408	0,7047	0,6703	0,6376	0,6065
1	0,9988	0,9953	0,9898	0,9825	0,9735	0,9631	0,9513	0,9384	0,9246	0,9098
2	1,0000	0,9998	0,9995	0,9989	0,9978	0,9964	0,9945	0,9921	0,9891	0,9856
3		1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9997	0,9995	0,9992	0,9988	0,9982
4				1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998
5								1,0000	1,0000	1,0000
	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
0	0,5769	0,5488	0,5220	0,4966	0,4724	0,4493	0,4274	0,4066	0,3867	0,3679
1	0,8943	0,8781	0,8614	0,8442	0,8266	0,8088	0,7907	0,7725	0,7541	0,7358
2	0,9815	0,9769	0,9717	0,9659	0,9595	0,9526	0,9451	0,9371	0,9287	0,9197
3	0,9975	0,9966	0,9956	0,9942	0,9927	0,9909	0,9889	0,9865	0,9839	0,9810
4	0,9997	0,9996	0,9994	0,9992	0,9989	0,9986	0,9982	0,9977	0,9971	0,9963
5	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998	0,9997	0,9997	0,9995	0,9994
6			1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999
7									1,0000	1,0000
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
0	0,3329	0,3012	0,2725	0,2466	0,2231	0,2019	0,1827	0,1653	0,1496	0,1353
1	0,6990	0,6626	0,6268	0,5918	0,5578	0,5249	0,4932	0,4628	0,4337	0,4060
2	0,9004	0,8795	0,8571	0,8335	0,8088	0,7834	0,7572	0,7306	0,7037	0,6767
3	0,9743	0,9662	0,9569	0,9463	0,9344	0,9212	0,9068	0,8913	0,8747	0,8571
4	0,9946	0,9923	0,9893	0,9857	0,9814	0,9763	0,9704	0,9636	0,9559	0,9473
5	0,9990	0,9985	0,9978	0,9968	0,9955	0,9940	0,9920	0,9896	0,9868	0,9834
6	0,9999	0,9997	0,9996	0,9994	0,9991	0,9987	0,9981	0,9974	0,9966	0,9955
7	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998	0,9997	0,9996	0,9994	0,9992	0,9989
8			1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998
9							1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
0	0,1225	0,1108	0,1003	0,0907	0,0821	0,0743	0,0672	0,0608	0,0550	0,0498
1	0,3796	0,3546	0,3309	0,3084	0,2873	0,2674	0,2487	0,2311	0,2146	0,1991
2	0,6496	0,6227	0,5960	0,5697	0,5438	0,5184	0,4936	0,4695	0,4460	0,4232
3	0,8386	0,8194	0,7993	0,7787	0,7576	0,7360	0,7141	0,6919	0,6696	0,6472
4	0,9379	0,9275	0,9162	0,9041	0,8912	0,8774	0,8629	0,8477	0,8318	0,8153
5	0,9796	0,9751	0,9700	0,9643	0,9580	0,9510	0,9433	0,9349	0,9258	0,9161
6	0,9941	0,9925	0,9906	0,9884	0,9858	0,9828	0,9794	0,9756	0,9713	0,9665
7	0,9985	0,9980	0,9974	0,9967	0,9958	0,9947	0,9934	0,9919	0,9901	0,9881
8	0,9997	0,9995	0,9994	0,9991	0,9989	0,9985	0,9981	0,9976	0,9969	0,9962
9	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998	0,9997	0,9996	0,9995	0,9993	0,9991	0,9989
10	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998	0,9997
11					1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999
12									1,0000	1,0000
	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
0	0,0408	0,0334	0,0273	0,0224	0,0183	0,0150	0,0123	0,0101	0,0082	0,0067
1	0,1712	0,1468	0,1257	0,1074	0,0916	0,0780	0,0663	0,0563	0,0477	0,0404
2	0,3799	0,3397	0,3027	0,2689	0,2381	0,2102	0,1851	0,1626	0,1425	0,1247
3	0,6025	0,5584	0,5152	0,4735	0,4335	0,3954	0,3594	0,3257	0,2942	0,2650
4	0,7806	0,7442	0,7064	0,6678	0,6288	0,5898	0,5512	0,5132	0,4763	0,4405
5	0,8946	0,8705	0,8441	0,8156	0,7851	0,7531	0,7199	0,6858	0,6510	0,6160
6	0,9554	0,9421	0,9267	0,9091	0,8893	0,8675	0,8436	0,8180	0,7908	0,7622
7	0,9832	0,9769	0,9692	0,9599	0,9489	0,9361	0,9214	0,9049	0,8867	0,8666
8	0,9943	0,9917	0,9883	0,9840	0,9786	0,9721	0,9642	0,9549	0,9442	0,9319
9	0,9982	0,9973	0,9960	0,9942	0,9919	0,9889	0,9851	0,9805	0,9749	0,9682
10	0,9995	0,9992	0,9987	0,9981	0,9972	0,9959	0,9943	0,9922	0,9896	0,9863
11	0,9999	0,9998	0,9996	0,9994	0,9991	0,9986	0,9980	0,9971	0,9960	0,9945
12	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998	0,9997	0,9996	0,9993	0,9990	0,9986	0,9980
13		1,0000	1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9998	0,9997	0,9995	0,9993
14					1,0000	1,0000	0,9999	0,9999	0,9999	0,9998
15							1,0000	1,0000	1,0000	0,9999
16										1,0000

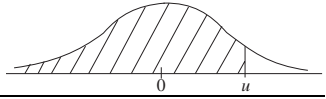
Tabel 9.2 (vervolg)

	λ									
k	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
0	0,0041	0,0025	0,0015	0,0009	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000
1	0,0266	0,0174	0,0113	0,0073	0,0047	0,0030	0,0019	0,0012	0,0008	0,0005
2	0,0884	0,0620	0,0430	0,0296	0,0203	0,0138	0,0093	0,0062	0,0042	0,0028
3	0,2017	0,1512	0,1118	0,0818	0,0591	0,0424	0,0301	0,0212	0,0149	0,0103
4	0,3575	0,2851	0,2237	0,1730	0,1321	0,0996	0,0744	0,0550	0,0403	0,0293
5	0,5289	0,4457	0,3690	0,3007	0,2414	0,1912	0,1496	0,1157	0,0885	0,0671
6	0,6860	0,6063	0,5265	0,4497	0,3782	0,3134	0,2562	0,2068	0,1649	0,1301
7	0,8095	0,7440	0,6728	0,5987	0,5246	0,4530	0,3856	0,3239	0,2687	0,2202
8	0,8944	0,8472	0,7916	0,7291	0,6620	0,5925	0,5231	0,4557	0,3918	0,3328
9	0,9462	0,9161	0,8774	0,8305	0,7764	0,7166	0,6530	0,5874	0,5218	0,4579
10	0,9747	0,9574	0,9332	0,9015	0,8622	0,8159	0,7634	0,7060	0,6453	0,5830
11	0,9890	0,9799	0,9661	0,9467	0,9208	0,8881	0,8487	0,8030	0,7520	0,6968
12	0,9955	0,9912	0,9840	0,9730	0,9573	0,9362	0,9091	0,8758	0,8364	0,7916
13	0,9983	0,9964	0,9929	0,9872	0,9784	0,9658	0,9486	0,9261	0,8981	0,8645
14	0,9994	0,9986	0,9970	0,9943	0,9897	0,9827	0,9726	0,9585	0,9400	0,9165
15	0,9998	0,9995	0,9988	0,9976	0,9954	0,9918	0,9862	0,9780	0,9665	0,9513
16	0,9999	0,9998	0,9996	0,9990	0,9980	0,9963	0,9934	0,9889	0,9823	0,9730
17	1,0000	0,9999	0,9998	0,9996	0,9992	0,9984	0,9970	0,9947	0,9911	0,9857
18		1,0000	0,9999	0,9999	0,9997	0,9993	0,9987	0,9976	0,9957	0,9928
19			1,0000	1,0000	0,9999	0,9997	0,9995	0,9989	0,9980	0,9965
20					1,0000	0,9999	0,9998	0,9996	0,9991	0,9984
21						1,0000	0,9999	0,9998	0,9996	0,9993
22							1,0000	0,9999	0,9999	0,9997
23								1,0000	0,9999	0,9999
24									1,0000	1,0000

Tabel 9.3 Normale verdeling, getabelleerd is $P\{\underline{u} \leqq u\}$ met $\underline{u} \sim N(0,1)$ verdeeld; alleen de decimalen zijn vermeld

Voorbeeld:

$P\{\underline{u} \leqq 1{,}96\} = 0{,}9750$



u	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319	5359
0,1	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714	5753
0,2	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103	6141
0,3	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480	6517
0,4	6554	6591	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844	6879
0,5	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190	7224
0,6	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517	7549
0,7	7580	7611	7642	7673	7704	7734	7764	7794	7823	7852
0,8	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106	8133
0,9	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365	8389
1,0	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599	8621
1,1	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810	8830
1,2	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997	9015
1,3	9032	9049	9066	9082	9099	9115	9131	9147	9162	9177
1,4	9192	9207	9222	9236	9251	9265	9279	9292	9306	9319
1,5	9332	9345	9357	9370	9382	9394	9406	9418	9429	9441
1,6	9452	9463	9474	9484	9495	9505	9515	9525	9535	9545
1,7	9554	9564	9573	9582	9591	9599	9608	9616	9625	9633
1,8	9641	9649	9656	9664	9671	9678	9686	9693	9699	9706
1,9	9713	9719	9726	9732	9738	9744	9750	9756	9761	9767
2,0	9772	9778	9783	9788	9793	9798	9803	9808	9812	9817
2,1	9821	9826	9830	9834	9838	9842	9846	9850	9854	9857
2,2	9861	9864	9868	9871	9875	9878	9881	9884	9887	9890
2,3	9893	9896	9898	9901	9904	9906	9909	9911	9913	9916
2,4	9918	9920	9922	9925	9927	9929	9931	9932	9934	9936
2,5	9938	9940	9941	9943	9945	9946	9948	9949	9951	9952
2,6	9953	9955	9956	9957	9959	9960	9961	9962	9963	9964
2,7	9965	9966	9967	9968	9969	9970	9971	9972	9973	9974
2,8	9974	9975	9976	9977	9977	9978	9979	9979	9980	9981
2,9	9981	9982	9982	9983	9984	9984	9985	9985	9986	9986
3,0	9987	9987	9987	9988	9988	9989	9989	9989	9990	9990
3,1	9990	9991	9991	9991	9992	9992	9992	9992	9993	9993
3,2	9993	9993	9994	9994	9994	9994	9994	9995	9995	9995
3,3	9995	9995	9995	9996	9996	9996	9996	9996	9996	9997
3,4	9997	9997	9997	9997	9997	9997	9997	9997	9997	9998

Tabel 9.4 χ^2-verdeling; $P\{\chi^2_n > \text{getabelleerde waarde}\} = \alpha$, *waarin* χ^2_n *een* χ^2-*verdeling volgt met n vrijheidsgraden*

vrijheids-graden n	α						
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
1	1,323	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879	10,828
2	2,773	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597	13,816
3	4,108	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838	16,267
4	5,385	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860	18,467
5	6,626	9,263	11,071	12,833	15,086	16,750	20,515
6	7,841	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548	22,458
7	9,037	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278	24,322
8	10,219	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955	26,124
9	11,389	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589	27,877
10	12,549	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188	29,588
11	13,701	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757	31,264
12	14,845	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300	32,909
13	15,984	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819	34,528
14	17,117	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319	36,123
15	18,245	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801	37,697
16	19,369	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267	39,252
17	20,489	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718	40,790
18	21,605	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156	42,312
19	22,718	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582	43,820
20	23,828	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997	45,315
21	24,935	29,615	32,671	35,479	38,932	41,401	46,797
22	26,039	30,813	33,924	36,781	40,289	42,796	48,268
23	27,141	32,007	35,172	38,076	41,638	44,181	49,728
24	28,241	33,196	36,415	39,364	42,980	45,559	51,179
25	29,339	34,382	37,652	40,646	44,314	46,928	52,620
26	30,435	35,563	38,885	41,923	45,642	48,290	54,052
27	31,528	36,741	40,113	43,195	46,963	49,645	55,476
28	32,620	37,916	41,337	44,461	48,278	50,993	56,892
29	33,711	39,087	42,557	45,722	49,588	52,336	58,301
30	34,800	40,256	43,773	46,979	50,892	53,672	59,703
31	35,887	41,422	44,985	48,232	52,191	55,003	61,098
32	36,973	42,585	46,194	49,480	53,486	56,328	62,487
33	38,058	43,745	47,400	50,725	54,776	57,648	63,870
34	39,141	44,903	48,602	51,966	56,061	58,964	65,247
35	40,223	46,059	49,802	53,203	57,342	60,275	66,619
36	41,304	47,212	50,998	54,437	58,619	61,581	67,985
37	42,383	48,363	52,192	55,668	59,893	62,883	69,346
38	43,462	49,513	53,384	56,896	61,162	64,181	70,703
39	44,539	50,660	54,572	58,120	62,428	65,476	72,055
40	45,616	51,805	55,758	59,342	63,691	66,766	73,402
60	66,981	74,397	79,082	83,298	88,379	91,952	99,607
100	109,141	118,498	124,342	129,561	135,807	140,169	149,449
1000	1029,790	1057,724	1074,679	1089,531	1106,969	1118,940	1143,917

Tabel 9.5 t-verdeling; $P\{\underline{t}_n > \text{getabelleerde waarde}\} = \alpha$, waarin $\underline{t}_n$ een t-verdeling volgt met n vrijheidsgraden

	α						
n	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001
1	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	318,309
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,327
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,215
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	2,686
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385
31	0,682	1,309	1,696	2,040	2,453	2,744	3,375
32	0,682	1,309	1,694	2,037	2,449	2,738	3,365
33	0,682	1,308	1,692	2,035	2,445	2,733	3,356
34	0,682	1,307	1,691	2,032	2,441	2,728	3,348
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	3,340
36	0,681	1,306	1,688	2,028	2,434	2,719	3,333
37	0,681	1,305	1,687	2,926	2,431	2,715	3,326
38	0,681	1,304	1,686	2,024	2,429	2,712	3,319
39	0,681	1,304	1,685	2,023	2,426	2,708	3,313
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307
60	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232
100	0,677	1,290	1,660	1,984	2,364	2,626	3,174
1000	0,675	1,282	1,646	1,962	2,330	2,581	3,098

*Tabel 9.6a F-verdeling; $P\{\underline{F}_{n,m} > \text{getabelleerde waarde}\} =$ **0,05**, waarin $\underline{F}_{n,m}$ een F-verdeling volgt met n en m vrijheidsgraden*

	n															
m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30	60	∞
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	243,9	245,9	248,0	250,1	252,2	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,43	19,45	19,46	19,48	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,70	8,66	8,62	8,57	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,75	5,69	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,50	4,43	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,81	3,74	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,38	3,30	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,08	3,01	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,86	2,79	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,32	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,70	2,62	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,57	2,49	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,62	2,54	2,47	2,38	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,38	2,30	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,31	2,22	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,25	2,16	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,19	2,11	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,15	2,06	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,11	2,02	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,07	1,98	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,04	1,95	1,84
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,94	1,84	1,73
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,84	1,74	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,74	1,64	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,65	1,53	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,55	1,43	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,46	1,32	1,00

*Tabel 9.6b F-verdeling; $P\{\underline{F}_{n,m} > \text{getabelleerde waarde}\} =$ **0,01**, waarin $\underline{F}_{n,m}$ een F-verdeling volgt met n en m vrijheidsgraden*

	n															
m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30	60	∞
1	4052	5000	5403	5625	5764	5859	5928	5981	6022	6056	6106	6157	6209	6261	6313	6366
2	98,50	99,00	99,17	99,25	99,30	99,33	99,36	99,37	99,39	99,40	99,42	99,43	99,45	99,47	99,48	99,50
3	34,12	30,82	29,46	28,71	28,24	27,91	27,67	27,49	27,35	27,23	27,05	26,87	26,69	26,50	26,32	26,13
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,98	14,80	14,66	14,55	14,37	14,20	14,02	13,84	13,65	13,46
5	16,26	13,27	12,06	11,39	10,97	10,67	10,46	10,29	10,16	10,05	9,89	9,72	9,55	9,38	9,20	9,02
6	13,75	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,26	8,10	7,98	7,87	7,72	7,56	7,40	7,23	7,06	6,88
7	12,25	9,55	8,45	7,85	7,46	7,19	6,99	6,84	6,72	6,62	6,47	6,31	6,16	5,99	5,82	5,65
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,18	6,03	5,91	5,81	5,67	5,52	5,36	5,20	5,03	4,86
9	10,56	8,02	6,99	6,42	6,06	5,80	5,61	5,47	5,35	5,26	5,11	4,96	4,81	4,65	4,48	4,31
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06	4,94	4,85	4,71	4,56	4,41	4,25	4,08	3,91
11	9,65	7,21	6,22	5,67	5,32	5,07	4,89	4,74	4,63	4,54	4,40	4,25	4,10	3,94	3,78	3,60
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,64	4,50	4,39	4,30	4,16	4,01	3,86	3,70	3,54	3,36
13	9,07	6,70	5,74	5,21	4,86	4,62	4,44	4,30	4,19	4,10	3,96	3,82	3,66	3,51	3,34	3,17
14	8,86	6,51	5,56	5,04	4,69	4,46	4,28	4,14	4,03	3,94	3,80	3,66	3,51	3,35	3,18	3,00
15	8,68	6,36	5,42	4,89	4,56	4,32	4,14	4,00	3,89	3,80	3,67	3,52	3,37	3,21	3,05	2,87
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	4,03	3,89	3,78	3,69	3,55	3,41	3,26	3,10	2,93	2,75
17	8,40	6,11	5,18	4,67	4,34	4,10	3,93	3,79	3,68	3,59	3,46	3,31	3,16	3,00	2,83	2,65
18	8,29	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,84	3,71	3,60	3,51	3,37	3,23	3,08	2,92	2,75	2,57
19	8,18	5,93	5,01	4,50	4,17	3,94	3,77	3,63	3,52	3,43	3,30	3,15	3,00	2,84	2,67	2,49
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56	3,46	3,37	3,23	3,09	2,94	2,78	2,61	2,42
24	7,82	5,61	4,72	4,22	3,90	3,67	3,50	3,36	3,26	3,17	3,03	2,89	2,74	2,58	2,40	2,21
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,30	3,17	3,07	2,98	2,84	2,70	2,55	2,39	2,21	2.01
40	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	3,12	2,99	2,89	2,80	2,66	2,52	2,37	2,20	2,02	1,80
60	7,08	4,98	4,13	3,65	3,34	3,12	2,95	2,82	2,72	2,63	2,50	2,35	2,20	2,03	1,84	1,60
120	6,85	4,79	3,95	3,48	3,17	2,96	2,79	2,66	2,56	2,47	2,34	2,19	2,03	1,86	1,66	1,38
∞	6,63	4,61	3,78	3,32	3,02	2,80	2,64	2,51	2,41	2,32	2,18	2,04	1,88	1,70	1,47	1,00

Tabel 9.7 Aselecte getallen: een aselect getal tussen 0 en 9 kan men verkrijgen door een willekeurige kolom of rij te kiezen; een aselect getal tussen 0 en 99 door een willekeurig tweetal te nemen, enz.

94620	27963	96478	21559	19246	88077	44926
60947	60775	73181	43264	56859	04232	59604
27499	53523	63110	57106	20865	91683	80688
01603	23156	89223	43429	95353	44662	59433
00815	01552	06392	31437	70385	45863	75971
83884	90942	74857	52419	68723	47830	63010
00626	10042	93626	37609	57215	08409	81906
56760	63348	24949	11859	29793	37457	59377
64416	29934	00755	09418	14230	62887	92683
63569	17906	38076	32135	19096	96970	75917
22693	35089	72994	04252	23791	60249	83010
43413	59744	01275	71326	91382	45114	20245
09224	78530	50566	49965	04851	18280	14039
67625	34683	03142	74733	63558	09665	22610
86874	12549	98699	54952	91579	26023	81076
54548	49505	62515	63903	13193	33905	66936
73236	66167	49728	03581	40699	10396	81827
15220	66319	13543	14701	59148	95154	72852
16151	08029	36954	03891	38313	34016	18671
43635	84249	88984	80993	55431	90793	62603
30193	42776	85661	57635	51362	79909	77364
37430	45246	11400	20986	43996	73122	88474
88312	93047	12088	86937	70794	01041	74867
98995	58159	04700	90443	13168	31553	67891
51734	20849	70198	67906	00880	82899	66065
88698	41755	56216	66852	17748	04963	54859
51865	09836	73966	65711	41699	11732	17173
40300	08852	27528	84648	79589	95295	72895
02760	28625	70476	76410	32988	10194	94917
78450	26245	91763	73117	33047	03577	62599
50252	56911	62693	73817	98693	18728	94741
07929	06628	47761	81472	44806	15592	71357
09030	39605	87507	85446	51257	89555	75520
56670	88445	85799	76200	21795	38894	58070
48140	13583	94911	13318	64741	64336	95103

Tabel 9.7 (vervolg)

36764	86132	12463	28385	94242	32063	45233
14351	71381	28133	68269	65145	28152	39087
81276	00835	63835	87174	42446	08882	27067
55524	86088	00069	59254	24654	77371	26409
78852	65889	32719	13758	23937	90740	16866
11861	69032	51915	23510	32050	52052	24004
67699	01009	07050	73324	06732	27510	33761
50064	39500	17450	18030	63124	48061	59412
93126	17700	94400	76075	08317	27324	72723
01657	92602	41043	05686	15650	29970	95877
13800	76690	75133	60456	28491	03845	11507
98135	42870	48578	29036	69876	86563	61729
08313	99293	00990	13595	77457	79969	11339
90974	83965	62732	85161	54330	22406	86253
33273	61993	88407	69399	17301	70975	99129

10 Statistische software

Onderstaande lijst bevat een aantal softwarepakketten. Het zijn algemene statistische pakketten die een groot scala aan statistische technieken bevatten.

Genstat
Cosinus Computing bv, Eindhoven, 040-233 3599
www.cosinus.nl

Minitab
Minitab Ltd, Coventry, UK, 00-44-24-7643 7500
www.minitab.com

SAS
SAS Nederland, Huizen, 035-699 6900
www.sas.com

S-plus
CAN diensten, Amsterdam, 020-560 8400
www.candiensten.nl

SPSS
SPSS Benelux, Gorinchem, 0183-651 777
www.spss.com

Stata
Smit Consult, Drunen, 0416-378 125
www.smitconsult.nl

Statistica
StatSoft Benelux, Groningen, 050-526-7310
www.statsoft.nl

Statgraphics
Smit Consult, Drunen, 0416-378 125
www.smitconsult.nl

Systat
SPSS Benelux, Gorinchem, 0183-651 777
www.spss.com

Literatuur

- Bethlehem, J.G. en De Gooijer, J.G. (2000): *Syllabus Data-analyse.* Universiteit van Amsterdam, Faculteit FEE, Afdeling Kwantitatieve Economie.
- Bethlehem, J.G. (1985): *Theorie en Praktijk van het Steekproefonderzoek*. Centraal Bureau voor de Statistiek Sector Methoden en Ontwikkeling, Voorburg.
- Buhrman, J.M. (1996): *Basisboek Statistiek*. Wolters Nordhoff, Groningen
- Draper N. en H. Smith (1966): *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- John, P.W.M. (1971): *Statistical Design and Analysis of Experiments*. Macmillan, New York.

Natuurkunde A4

1 Natuurconstanten

2 Decibel en neper

3 Vloeistoffen en gassen
3.1 Eigenschappen van vloeistoffen
3.2 Vloeistoffen in rust (hydrostatica)
3.3 Eigenschappen van gassen en dampen

4 Warmte
4.1 Temperatuur en temperatuurschalen
4.2 Uitzetting
4.3 Soortelijke warmte
4.4 Verandering van aggregatietoestand
4.5 Thermodynamica

5 Transport
5.1 Kengrootheden
5.2 Stroming van onsamendrukbare vloeistoffen
5.3 Formules van Bernoulli voor ideale gassen
5.4 Toepassingen wet van Bernoulli
5.5 Stroming door cilindrische buizen
5.6 Wrijving in cilindrische buizen
5.7 Stroming door niet-cilindrische buizen
5.8 Verliezen in openingen en appendages
5.9 Omstroming van vaste lichamen
5.10 Stroming door kanalen en goten
5.11 Modelregels
5.12 Stationair warmtetransport door geleiding
5.13 Stationair warmtetransport door convectie
5.14 Stationair warmtetransport door geleiding en convectie
5.15 Stationair warmtetransport door straling
5.16 Niet-stationaire warmtegeleiding

5.17 Stoftransport

6 Trillingen en geluid
6.1 Harmonische trilling
6.2 Lopende golven
6.3 Staande golven
6.4 Trilling van snaren en luchtkolommen (orgelpijpen)
6.5 Doppler-effect
6.6 Geluidsleer (akoestiek)

7 Licht en optica
7.1 Lichtsnelheid
7.2 Terugkaatsing (reflectie)
7.3 Breking (refractie)
7.4 Lenzen
7.5 Vergroting, optische instrumenten
7.6 Interferentie en buiging
7.7 Glasvezelkabel
7.8 Straling en licht
7.9 Kleuren en kleurmeetkunde
7.10 Fotometrie

8 Elektriciteitsleer
8.1 Elektrostatica
8.2 Elektrodynamica, stroomgeleiding
8.3 Wisselstromen
8.4 Magnetostatica (uitwendige stromen $= 0$)
8.5 Elektromagnetisch veld
8.6 Vergelijkingen van Maxwell

9 Magnetisme
9.1 Typen magnetisme
9.2 Hysteresislus
9.3 Permanente magneten

10 Contactpotentiaal, thermo-elektriciteit
10.1 Contactpotentiaal en volta-spanning
10.2 Thermo-elektriciteit

1 Natuurconstanten

Tabel 1.1 Meest voorkomende natuurconstanten (in technische notatie, zie pag. A1/3)

constante	symbool	waarde	* = exact	eenheid
Lichtsnelheid in vacuüm	$c (c_0)$	$299{,}792458 \times 10^{6}$	*	m/s
Permeabiliteit van vacuüm	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	*	
		$\approx 1{,}256637 \times 10^{-6}$		H/m = N/A^2
Permittiviteit van vacüm	ε_0	$= 1/(\mu_0 \cdot c^2)$	*	
		$\approx 8{,}854188 \times 10^{-12}$		F/m
Standaardversnelling v.d. vrije val[1)]	g_n	9,80665	*	m/s^2
Gravitatieconstante	G	$6{,}673 \times 10^{-11}$		m^3/(kg · s^2)
Elementaire lading	e	$1{,}602189 \times 10^{-19}$		C
Constante van Planck	h	$6{,}626068 \times 10^{-34}$		J · s
Constante van Dirac h/2π	$\hbar$	$1{,}054572 \times 10^{-34}$		J · s
Constante van Avogadro	N_A, L	$6{,}022142 \times 10^{-26}$		kmol^{-1}
Constante van Faraday $N_A \cdot e$	F	$9{,}648534 \times 10^{7}$		C/kmol
Molaire gasconstante	R	$8{,}31447 \times 10^{3}$		J/(kmol · K)
Molair volume $R \cdot T_n/p_n$ [1)]	V_m	22,4141		m^3/kmol
Constante van Boltzmann R/N_A	k	$1{,}38065 \times 10^{-23}$		J/K
Constante van Stefan-Boltzmannp	σ	$5{,}6704 \times 10^{-8}$		W/(m^2 · K^4)
Eerste stralingsconstante $2\pi hc^2$	c_1	$0{,}374177 \times 10^{-15}$		W · m^2
Tweede stralingsconstante hc/k	c_2	$14{,}3877 \times 10^{-3}$		m · K
Rustmassa elektron	m_e	$9{,}109382 \times 10^{-3}$		kg
Rustmassa proton	m_p	$1{,}672622 \times 10^{-27}$		kg
Proton-elektron massaverhouding	m_p/m_e	$1{,}8361527 \times 10^{3}$		
Rustmassa neutron	m_n	$1{,}67493 \times 10^{-27}$		kg
Rustmassa deuteron	m_d	$3{,}34359 \times 10^{-27}$		kg
(Geünificeerde) atoommassa-constante	m_u	$1{,}66054 \times 10^{-27}$		kg
Von Klitzing-constante h/e^2	R_k	$25{,}8128 \times 10^{3}$		Ω

[1)] geldig voor Amsterdam
[2)] $p_n = 101\,325$ Pa, $T_n = 273{,}15$ K

Bron: *CODAT A recommended values of Fundamental* Physical Constants, 1998. Peter J. Mohr & Barry N. Taylor.

2 Decibel en neper

Van de verhouding van twee gelijkwaardige grootheden wordt vaak de logaritme gegeven. Hiermee verkrijgt men de grootheid L, uitgedrukt in de dimensieloze eenheden *decibel* (dB) of *neper* (Np):

- L in dB in geval van grondtal 10.
- L in Np in geval van grondtal e.

Algemeen:

$$L = 10\ \log\frac{P_2}{P_1} = 20\log\frac{X_2}{X_1}\ \text{dB} \qquad 1\ \text{dB} \approx 0,115129\ \text{Np}$$

of:

$$L = \tfrac{1}{2}\ln\frac{P_2}{P_1} = \ln\frac{X_2}{X_1}\quad \text{Np} \qquad 1\ \text{Np} \approx 8,68589\ \text{dB}$$

waarin:
P = vermogen
X = grootheid waarvan het kwadraat evenredig is met P (bijv. spanning, stroom, druk)

X_1 en X_2 moeten onder gelijke omstandigheden worden gemeten, bijv. over gelijke weerstanden.

Aan L wordt een absolute waarde toegekend wanneer de logaritme wordt genomen van de verhouding P_2/P_0, resp. X_2/X_0. Hierin zijn P_0 en X_0 *referentie- of nulniveaus*. Gebruikelijk zijn:
– Elektrisch: $P_0 = 1$ mW (L in dBm)
$U_0 \approx 0{,}774597$ V (600Ω, 1 mW, L in dBV)
$I_0 \approx 1{,}29099$ mA (600Ω, 1 mW, L in dBmA)
– Akoestisch: $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 (geluidsintensiteit)
$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa (geluidsdruk)

L in dBr: aantal dB t.o.v. bepaald niveau (bijv. ingangsspanning van een circuit).
L in dB(A): zie par. 6.6 *Geluidsleer*.

In het bijzonder onderscheidt men:

– *Amplitudeniveauverschil:* $L_A = 20\ \log\frac{A_2}{A_1}\text{dB} = \ln\frac{A_2}{A_1}\text{Np}$

– *Vermogensniveauverschil:* $L_P = 10\ \log\frac{P_2}{P_1}\text{dB} = \frac{1}{2}\ln\frac{P_2}{P_1}\text{Np}$

L_A wordt gewoonlijk uitgedrukt in Np, L_p in dB.

3 Vloeistoffen en gassen

Symbolen

A = oppervlakte [m^2]
a = absolute vochtigheid [kg/m^3]
van der Waalsconstante [$J \cdot m^3/kmol^2$]
b = van der Waalsconstante [$m^3/kmol$]
d = relatieve dichtheid ($= \rho_v$) [–]
e = relatieve vochtigheid [–]
F = kracht [N]; F_h = hydrostatische kracht [N]
G = gewicht [N]
g = zwaarteveldsterkte [m/s^2]
h = (opstijg)hoogte [m]
K = compressiemodulus [Pa]
l = lengte [m]
M = molaire massa [kg/kmol]; M_r = relatieve molecuul-massa (M en M_r zijn van dezelfde stof gelijk in getal-waarde), zie ook hoofdstuk A1 *Eenheden en Symbolen*, par. 1.1
m = massa [kg]
P = maximale dampspanning [Pa]
p = druk [Pa]; p_h hydrostatische druk [Pa]
p_n = normaaldruk = 101 325 Pa
R = molaire gasconstante [$J/(kmol \cdot K)$]
R_s = specifieke gasconstante [$J/(kg \cdot K)$]
r = straal [m]
T = thermodynamische temperatuur [K]
T_n = normaaltemperatuur = 0 °C
v = snelheid [m/s]

η = dynamische viscositeit [$Pa \cdot s$]
ϑ = relatieve volumeverandering [–]
κ = compressibiliteit [$Pa^{-1} = m^2/N$]
ν = kinematische viscositeit [m^2/s]
ρ = soortelijke massa vloeistof of gas [kg/m^3]
ρ_n = soortelijke massa bij p_n, T_n
$\sigma(\gamma)$ = oppervlaktespanning [N/m]
τ = schuifspanning [N]

3.1 Eigenschappen van vloeistoffen

Compressibiliteit (samendrukbaarheid)

De *compressibiliteit* κ is gedefinieerd als:

$$\kappa = -\frac{\Delta V}{V} \Big/ \Delta p = -\frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{\Delta p} \quad \text{(bij } T = \text{constant)}$$

waarin:
$\Delta V/V$ = relatieve volumeverandering ($= \vartheta$)
Δp = alzijdig aangebrachte drukverhoging

Compressiemodulus: $K = \dfrac{1}{\kappa} = -\Delta p/\vartheta$

Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.2

Viscositeit

De *dynamische viscositeit* η wordt gedefinieerd voor een laminair stromende vloeistof:

$$\tau = \eta \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}$$

waarin: $\mathrm{d}v/\mathrm{d}y$ = snelheidsverval loodrecht op stroomsnelheid gemeten

Newton-vloeistof : η = constant.
Pseudo-plastische vloeistof: η neemt af bij toenemende $\mathrm{d}v/\mathrm{d}y$.
Dilatante vloeistof: η neemt toe bij toenemende $\mathrm{d}v/\mathrm{d}y$.
Visco-elastische stof : gedrag beneden τ_f als vaste stof, boven τ_f als vloeistof.
(Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.3).
De *kinematische viscositeit* ν wordt in de stromingsleer ook toegepast: $\nu = \eta/\rho$.

Oppervlaktespanning (grensvlakspanning)

In ieder vloeistofoppervlak heerst een tangentiële kracht F, die gelijk is aan de *oppervlaktespanning* σ maal de lengte l van de lijn waarop die kracht werkt:

$$F = \sigma \cdot l$$

Overdruk in zeepbel met straal r:

$$\Delta p = \frac{4\sigma}{r}$$

Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.4 (2).

Capillaire werking
Cohesie = aantrekkende werking tussen gelijksoortige moleculen.
Adhesie = aantrekkende werking tussen ongelijksoortige moleculen (bijv. van vloeistof en glas).

Vloeistof tegen glaswand:
- holle meniscus: adhesie > cohesie;
- bolle meniscus: adhesie < cohesie.

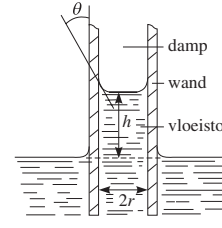
Volledige bevochtiging mogelijk bij grote adhesie.

Capillair in vloeistof gestoken:
- vloeistof stijgt op: adhesie > cohesie;
- vloeistof in capillair wordt neergedrukt: adhesie < cohesie.

Opstijghoogte in capillair (straal r)

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}\cos\theta$$

waarin: θ = contacthoek



Figuur 3.1 Opstijghoogte h in capillair

3.2 Vloeistoffen in rust (hydrostatica)

Hydrostatische kracht F_h op een vlak in een vloeistof is de kracht op dat vlak ten gevolge van het gewicht van de vloeistof:

$$F_h = \rho g h_z A$$

waarin:
A = oppervlakte waarop de kracht werkt
h_z = loodrecht gemeten afstand van het massamiddelpunt van het vlak tot de vloeistofspiegel

Hydrostatische druk p_h = hydrostatische kracht per eenheid van oppervlakte:

$$p_h = \rho g h_z$$

In een horizontaal vlak in eenzelfde vloeistof in rust is de hydrostatische druk overal even groot.

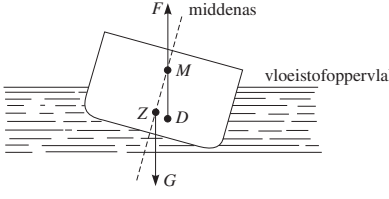
Wet van Pascal: een druk, op een vloeistof uitgeoefend, plant zich in alle richtingen met dezelfde grootte voort.

Vast lichaam op/in een vloeistof

Wet van Archimedes: een lichaam,geheel of gedeeltelijk in een vloeistof ondergedompeld, ondervindt een opwaartse kracht, die gelijk is aan het gewicht van de verplaatste vloeistof.
Een lichaam zinkt, zweeft, resp. drijft als:

$$\rho_{\text{lich.}} \text{ is groter dan, gelijk aan, resp. kleiner dan } \rho_{\text{vloeistof}}$$

Evenwicht van drijvend lichaam (schip):
- *stabiel:* als lichaam na verstoring in de oorspronkelijke stand terugkomt;
- *labiel:* als lichaam na verstoring omslaat.



Figuur 3.2 Evenwicht drijvend lichaam (N.B. $|F| = |G|$ = gewicht van het lichaam)

Voorwaarde voor stabiel evenwicht: metacentrum M moet boven het massamiddelpunt Z liggen.
Metacentrum M = snijpunt van de lijn van opwaartse kracht F met de middenas van het lichaam.
Drukkingspunt D = aangrijpingspunt van de opwaartse kracht.
= massamiddelpunt van de verplaatste vloeistof.

Toepassingen van de hydrostatica: peilglas, flesjeswaterpas, vloeistofmanometer, hydraulische pers, olievijzel, enz.

3.3 Eigenschappen van gassen en dampen

Damp = gasvormige toestand van een stof zoals die zich voordoet beneden de kritische temperatuur (zie 4.4) (in wezen is er geen verschil tussen damp en gas).
Dampspanning = dampdruk (eenheid: Pa).

Molaire massa: M = massa van het gas per kmol.
Van ieder gas bevat 1 kmol evenveel moleculen of atomen:

$$N_A \approx 6,022 \times 10^{26} \qquad (constante\ of\ getal\ van\ Avogadro)$$

Wet van Avogadro: gelijke volumes van ideale gassen bevatten bij gelijke druk en temperatuur een gelijk aantal moleculen.

Molair volume: V_m = volume van 1 kmol ideaal gas, gemeten bij een druk van p_n = 101,325 Pa (1 atm) en een temperatuur van T_n = 273,15 K (= 0 °C).

$$V_m \approx 22,4\ m^3$$

Soortelijke massa ρ_n: gegeven voor p_n en T_n (zie hierboven) = soortelijke of specifieke massa. Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.5 (1).

De **relatieve dichtheid** d of ρ_v wordt gegeven ten opzichte van een standaardgas:

$$d = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{standaardgas}}$$

Gebruikelijke standaardgassen zijn lucht en waterstof (H_2).

$$d_{\text{gas t.o.v. } H_2} = \frac{M_r}{2,016}$$

Ideaal gas: gas of damp met puntvormige moleculen, geen cohesiekrachten tussen de moleculen (hieraan voldoen bijv. H_2, He, onverzadigde dampen), en limiet van zeer lage druk.

Algemene gaswet (Boyle-Gay Lussac):
$pV = \text{const.} \cdot T$, voor $m = \text{constant}$

Voor n kmol van een ideaal gas is:
$pV = nRT$

waarin: R = *molaire of universele gasconstante*
$\approx 8{,}31447 \times 10^3 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$

Voor een willekeurige massa m van een ideaal gas geldt:

$$pV = \frac{m}{M}RT = mR_sT$$

waarin: R_s = *specifieke gasconstante* $= \dfrac{R}{M}$

Normaal volume = volume van een zekere massa van een gas of damp bij p_n = 101 325 Pa en T_n = 273,15 K (0 °C)

$$V_n = \frac{p}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T} \cdot V$$

waarin: V = volume van dezelfde massa van het gas bij druk p en temperatuur T

Massaformule

Massa gas of damp met volume V, druk p en temperatuur T:

$$m = \rho_n V_n = \rho_n V \frac{p}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T}$$

Tabel 3.1 Vanderwaalsconstanten

stof	a [J · m^3/kmol^2]	b [m^3/kmol]
Helium	$3{,}5 \cdot 10^3$	$22 \cdot 10^{-3}$
Waterstof	$25 \cdot 10^3$	$26 \cdot 10^{-3}$
Zuurstof	$140 \cdot 10^3$	$31 \cdot 10^{-3}$
Stikstof	$140 \cdot 10^3$	$39 \cdot 10^{-3}$
Koolstofdioxide	$360 \cdot 10^3$	$44 \cdot 10^{-3}$
Water	$550 \cdot 10^3$	$30{,}5 \cdot 10^{-3}$

Niet-ideale (reële) gassen

Voor *niet-ideale gassen* geldt de algemene gaswet van *Boyle-Gay Lussac niet*. Er moeten correctietermen aangebracht worden. *Toestandsvergelijking van Van der Waals* voor n kmol gas:

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

a en b zijn de *Vanderwaalsconstanten* (zie tabel 3.1); b corrigeert voor niet verwaarloosbare grootte van moleculen, $\frac{an^2}{V^2}$ voor attractieve krachten tussen moleculen;

$$a = 3p_k(V_{mk})^2 \qquad b = \tfrac{1}{3}V_{mk}$$

waarin: p_k = kritische druk
V_{mk} = kritisch molvolume

Mengsels van gassen en dampen

Wet van Dalton: de spanning van een *mengsel* van ideale gassen en/of dampen is gelijk aan de som van de spanningen die ieder gas (damp) afzonderlijk in de betreffende ruimte zou hebben.
Voorwaarde is dat de temperatuur van de gassen en dampen gelijk is en blijft.

Waterdamp in lucht:

- *Verzadigingsdruk:* maximale dampspanning (P) bij bepaalde temperatuur.
- *Relatieve vochtigheid e*: verhouding van de spanning (p), die de waterdamp in de lucht heeft, en de verzadigingsdruk bij de heersende temperatuur:

$$r = \frac{p}{P} = 100\frac{p}{P}(\%)$$

- *Dauwpunt van vochtige lucht* = temperatuur van een lichaam in die lucht, waarop bij afkoeling van dat lichaam de waterdamp begint te condenseren.
- *Absolute vochtigheid a* = massa in kg van aanwezige waterdamp per m^3 lucht.

Voor de verzadigingsdruk van waterdamp zie hoofdstuk F4 *Bouwfysica*, tabel 3.1; andere stoffen hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.9.

4 Warmte

Symbolen

c = soortelijke warmte [J/(kg · K)]
C = molaire soortelijke warmte [J/(kmol · K)], warmtecapaciteit [J/K]
F = vrije energie [J]
G = vrije enthalpie [J]
H = enthalpie [J]
K_k = molaire kookpuntsverhoging [kg · K/kmol]
K_v = molaire vriespuntsverlaging [kg · K/kmol]
l = lengte [m], soortelijke overgangsenergie [J/kg]
m = massa [kg]
M = molaire massa [kg/kmol]
n = hoeveelheid stof [kmol]
p = druk [Pa]; p_n 101 325 Pa (= 1 atm)
Q = hoeveelheid warmte [J];
ΔQ = hoeveelheid toegevoerde warmte [J]
R = molaire gasconstante [J/(kmol · K)]
R_s = specifieke gasconstante [J/(kg · K)]
S = entropie [J/K]
T = thermodynamische temperatuur [K]
t = Celsius-temperatuur [°C]
U = inwendige energie [J]
V = volume [m^3]
W = arbeid, energie [J]

α = lineaire uitzettingscoëfficiënt [K^{-1}]
γ = kubieke uitzettingscoëfficiënt [K^{-1}]
γ (κ) = soortelijke warmteverhouding c_p/c_v [–]
ε = compressieverhouding [–]
η = rendement [–]
θ = Celsius-temperatuur [°C]
φ = verbrandingsverhouding [–]

4.1 Temperatuur en temperatuurschalen

Thermodynamische (= absolute) temperatuur: symbool T, eenheid kelvin (K). Voor definitie: zie hoofdstuk A1 *Eenheden en symbolen*, pag. A1/2.

Celsius-temperatuur: symbool t of θ, eenheid °C.

Fahrenheit-temperatuur: symbool t of θ, eenheid °F.

Omrekeningen voor temperatuurniveaus:
$x\text{K} = (x - 273{,}15)^\circ\text{C} = (9/5x - 459{,}67)^\circ\text{F}$
$x^\circ\text{C} = (x + 273{,}15)\text{K} = (9/5x + 32)^\circ\text{F}$
$x^\circ\text{F} = 5/9(x - 32)^\circ\text{C} = 5/9(x - 459{,}67)\text{K}$

Voor temperatuurverschillen: 1 K = 1 °C = 1,8 °F.

Opmerking. Exact is: T(K) = t (°C) + 273,15, *niet* 273,16 omdat het tripelpunt van water bij + 0,01 °C ligt.

4.2 Uitzetting

Uitzetting van vaste stoffen en vloeistoffen
Lineaire uitzetting, alleen voor vaste stoffen:

$$\Delta l = \alpha l \Delta t \quad \text{of} \quad l_2 = l_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$$

Kubieke uitzetting van vaste lichamen en vloeistoffen:

$$\Delta V = \gamma V \Delta t \quad \text{of} \quad V_2 = V_1[1 + \gamma(t_2 - t_1)]$$
$$\gamma \approx 3\alpha$$

waarin:
l_1, V_1 = lengte resp. volume bij temperatuur t_1
l_2, V_2 = lengte resp. volume bij temperatuur t_2

Waarden van α resp. γ zie hoofdstuk El Materialen, tabel 1.4 (4), resp. 1.6 t/m 1.8 (3).

Uitzetting van gassen

Voor alle ideale gassen geldt: $\gamma = \dfrac{1}{273,16} \approx 3,660\,86 \times 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$

(Zie ook: *toestandsveranderingen*, par. 4.5).

4.3 Soortelijke warmte

Zie ook hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.4 (5) en 1.6 t/m 1.8 (4).

Warmte is een vorm van energie. Een hoeveelheid warmte (Q) wordt uitgedrukt in een aantal joules (J) en hangt bijv. samen met de temperatuur van een lichaam: $\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$.

Soortelijke warmte (c): de hoeveelheid warmte nodig om 1 kg van de stof 1 K in temperatuur te doen stijgen.
Voor m kg geldt: $\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$.

Warmtecapaciteit (C) van een lichaam of systeem: de hoeveelheid warmte om m kg van de stof 1 K in temperatuur te doen stijgen:

$$C = m \cdot c = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

Gassen
Bij *gassen* onderscheidt men:
- c_p = soortelijke warmte bij constante *druk*, zie ook hoofdstuk El materialen, tabel 1.5 (3);
- c_V = soortelijke warmte bij constant *volume*.

Voor 1 kmol gas worden gebruikt: C_p resp. C_V

$$C_p - C_V = R \text{ en } c_p - c_V = \frac{R}{M} = R_s$$

$$C_p = Mc_p \text{ en } C_V = Mc_V$$

Soortelijke-warmteverhouding $\gamma = c_p/c_V$ (Zie ook hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.5 (4)):

- $\gamma = \frac{5}{3} = 1{,}67$ voor één-atomige gassen;
- $\gamma = \frac{7}{5} = 1{,}40$ voor twee-atomige gassen;
- $\gamma = \frac{4}{3} = 1{,}33$ voor drie-atomige gassen.

Mengsels en oplossingen

Als m_1 kg van een stof met temperatuur T_1 en soortelijke warmte c_1 wordt gemengd met m_2 kg van een tweede stof (T_2, c_2) dan is de soortelijke warmte van het *mengsel*:

$$c_m = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2}{m_1 + m_2}$$

en de temperatuur van het mengsel:

$$T_m = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$$

mits geen chemische reactie, warmteontwikkeling of warmte-absorptie plaatsvindt.

Voor *oplossingen* van zouten in water geldt:

$$c_{opl} \approx \left(1 - \frac{p_m}{100}\right) c_{H_2O}$$

waarin: p_m = gewichtspercentage zout in water. Bijvoorbeeld: als 20 gram zout wordt opgelost in 80 gram water, dan is $p_m = 20$.

4.4 Verandering van aggregatietoestand

Normale smelttemperatuur (ook *smeltpunt*) van een stof : de temperatuur, waarbij onder een druk p_n de vaste en vloeibare fase tegelijk kunnen bestaan.
De temperatuur van het smeltpunt is gelijk aan die van het *stolpunt* (ook *vriespunt* genoemd).

Zie ook hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.4 (7), 1.5 t/m 1.7 (6).
Kookpunt van een vloeistof: die temperatuur, waarbij de verzadigingsdruk gelijk is aan de druk op de vloeistof. Zie ook hoofdstuk El *Materialen* tabel 1.4 (9), 1.5 (7) en 1.10.
Het *normale* kookpunt wordt gedefinieerd bij een druk p_n.

Soortelijke smeltingswarmte = soortelijke stollingswarmte (l_{32}): hoeveelheid warmte die nodig is (resp. vrijkomt) om 1 kg van een stof te doen smelten (stollen) bij zijn smeltpunt. Zie ook hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.4 (8), 1.6 (7) en 1.8 (7).

Een kleine concentratie van een stof in een oplosmiddel geeft een *vriespuntsverlaging* van het zuivere oplosmiddel volgens:

$$\Delta T = K_v \frac{n}{m_L} \qquad (\textit{wet van Van't Hoff})$$

waarin: K_v = molaire vriespuntsverlaging v.h. oplosmiddel (zie ook hoofdstuk A5 *Scheikunde*, tabel 2.14)
n = aantal kmol opgeloste stof
m_L = massa oplosmiddel

Bij *koken* vindt verdamping plaats. De overgang van dampfase naar vloeistoffase heet *condenseren*.

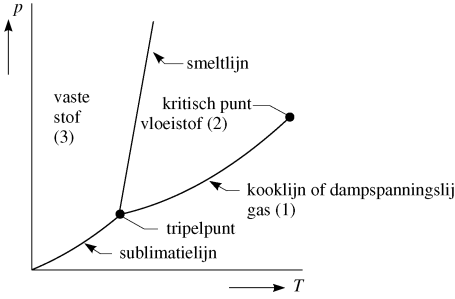
Soortelijke verdampingswarmte = soortelijke condensatiewarmte (l_{21}): hoeveelheid warmte die toegevoerd moet worden (vrijkomt) om 1 kg van een vloeistof bij zijn kookpunt geheel te verdampen (condenseren). Zie ook hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.4 (10) en 1.5 (8).

Kookpuntsverhoging vindt plaats t.g.v. kleine concentraties van een stof in een oplosmiddel volgens:

$$\Delta T = K_k \frac{n}{m_L}$$

waarin: K_k = molaire kookpuntsverhoging v.h. oplosmiddel (zie ook hoofdstuk A5 *Scheikunde*, tabel 2.14)

Sublimeren: het proces waarbij een stof direct van de vaste fase in



Figuur 4.1 pT-fasediagram

de dampfase overgaat zonder in de vloeistoffase te verkeren. Bij stoffen die deze eigenschap vertonen spreekt men van het *sublimatiepunt* i.p.v. kookpunt. Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.11.

Rijpen:het proces waarbij een stof direct van de dampfase in de vaste fase overgaat.

Vloeibaar maken van gassen:
- *Kritische temperatuur:* boven deze temperatuur kan een gas niet vloeibaar worden gemaakt, hoe hoog de druk ook opgevoerd wordt. Zie ook hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.4 (11) en 1.5 (9).
- *Kritische druk:* de minimum druk, die nodig is om een gas bij de kritische temperatuur vloeibaar te maken. Zie ook hoofd-stuk El *Materialen*, tabel 1.4 (12) en 1.5 (10).
- *Kritisch volume:* het volume van een bepaalde hoeveelheid gas bij de kritische temperatuur en kritische druk.

4.5 Thermodynamica

Eerste hoofdwet (Wet van behoud van energie)
In een afgesloten systeem is de algebraïsche som van alle energie-

veranderingen gelijk aan nul. (Warmte en arbeid zijn beide vormen van energie.)

De *inwendige energie* van een systeem (U) is een toestandsgrootheid en voldoet aan:

$$\mathrm{d}U = \Delta Q - \Delta W$$

waarin:
$\mathrm{d}U$ = kleine toename van U
ΔQ = kleine hoeveelheid toegevoerde warmte
ΔW = kleine hoeveelheid verrichte arbeid

Voor een gas is $\Delta W = p\mathrm{d}V$.
Voor een kringproces van een gesloten systeem is

$$U_2 = U_1 \text{ en } \oint \Delta Q = \oint \Delta W$$

Toestandsveranderingen van een ideaal gas
Algemene formules voor 1 kmol:

$$pV = RT \quad R = C_p - C_V$$
$$\mathrm{d}U = C_V \mathrm{d}T$$
$$\Delta Q = \frac{C_v}{R} V \mathrm{d}\,p + \frac{C_p}{R} p\mathrm{d}V$$

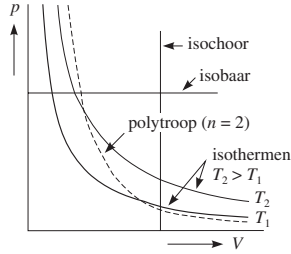
Tweede hoofdwet (Wet van de ontaarding van energie)
Quasistatisch proces = proces, waarbij het systeem op elk moment in evenwicht is (= *omkeerbaar* (*reversibel*) proces).
Niet-quasistatisch proces = *niet-omkeerbaar* (*irreversibel*) proces = *vanzelf verlopend* proces; hieraan voldoen de meeste reële processen.

Vormen van de tweede hoofdwet:
- Het is onmogelijk een kringproces te beschrijven waarbij met behulp van slechts één warmtebron warmte in arbeid omgezet kan worden (beginsel van *Kelvin*).
- Het is onmogelijk een kringproces to beschrijven waarbij zonder arbeid te verrichten, warmte van lagere naar hogere temperatuur wordt overgebracht (beginsel van *Clausius*).

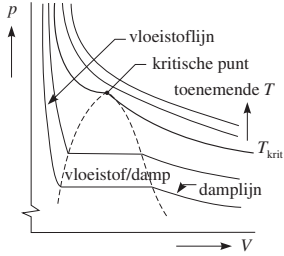
Tabel 4.1 Overzicht toestandsverandering ideaal gas

toestands-verandering	constant	$\mathrm{d}U$	ΔQ	ΔW	opmerking
Isobaar	p	$C_V\,\mathrm{d}T$	$C_p\,\mathrm{d}T$	$p\int_1^2 \mathrm{d}V$	
Isochoor	V	$C_V\,\mathrm{d}T$	$C_V\,\mathrm{d}T$	0	
Isotherm	T	0	$RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ $RT\ln\frac{p_1}{p_2}$	ΔQ	
Adiabatisch (Isnetropisch)	Poisson: pV^γ $TV^{\gamma-1}$ $T^\gamma p^{1-\gamma}$ H	$C_V\,\mathrm{d}T$	0	$p\,\mathrm{d}V$ $=-C_V\,\mathrm{d}T$ $=-\frac{R}{\gamma-1}\mathrm{d}T$	$\gamma=\frac{C_p}{C_V}$ Enthalpie: $H=U+pV$
Polytropisch	pV^n TV^{n-1} $T^n p^{1-n}$	$C_V\,\mathrm{d}T$	$C\,\mathrm{d}T$	$-\frac{R}{n-1}\mathrm{d}T$ $=(C-C_V)\,\mathrm{d}T$	$C=\frac{nC_V-C_p}{n-1}$ $n=\frac{C-C_p}{C-C_V}$

$n=0$: $C=C_p$ (isobaar) $\quad n=\gamma$: $\quad C=0$ (adiabaat = isentroop)
$n=1$: $C=\infty$ (isotherm) $\quad n=\infty$: $C=C_V$ (isochoor)



Figuur 4.2 pV-diagram



Figuur 4.3 pV-isothermen

Entropie

Als aan een lichaam bij temperatuur T een hoeveelheid warmte ΔQ wordt toegevoerd, waardoor dat lichaam een toestandsverandering ondergaat, dan verandert de *entropie* S:

– *omkeerbaar* proces: $\dfrac{\Delta Q}{T} = \mathrm{d}S$ of $\displaystyle\int_1^2 \frac{\Delta Q}{T} = S_2 - S_1$

– *niet-omkeerbaar* proces: $\dfrac{\Delta Q}{T} \leqslant \mathrm{d}S$ of $\displaystyle\int_1^2 \frac{\Delta Q}{T} \leqslant S_2 - S_1$

(S_1 hoort bij toestand 1, S_2 hoort bij toestand 2).

Kringproces →	*omkeerbaar*	*niet-omkeerbaar*
algemeen	$\oint \dfrac{\Delta Q}{T} = 0$	$\oint \dfrac{\Delta Q}{T} \leqslant 0$
adiabatisch	$S_2 = S_1$	$S_2 > S_1$

Voor een ideaal gas geldt per kmol:

$$T\mathrm{d}S = \mathrm{d}U + p\mathrm{d}V$$

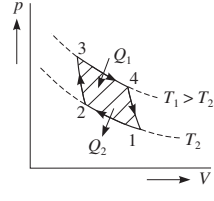
$$\mathrm{d}S = C_V \frac{\mathrm{d}T}{T} + R\frac{\mathrm{d}V}{V} \qquad S_2 - S_1 = C_V \ln\frac{T_2}{T_1} + R\ln\frac{V_2}{V_1}$$

Voor de entropie in een bepaalde toestand (p, V, T) van het gas geldt:

$$S = C_p \ln V + C_V \ln p$$
$$S = C_V \ln T + R \ln V$$
$$S = C_p \ln T - R \ln p$$

Kringprocessen

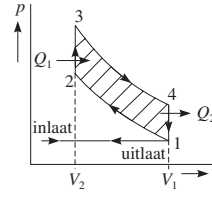
Carnot (*warmtemotor*)
1–2, 3–4 isothermen
2–3, 4–1 adiabaten (isentropen)



Figuur 4.4 Carnot-proces

Rendement: $\eta = \dfrac{W}{Q_1} = 1 - \dfrac{T_2}{T_1}$

Otto (*viertaktmotor*)
2–3, 4–1 isochoren
1–2, 3–4 adiabaten (isentropen)

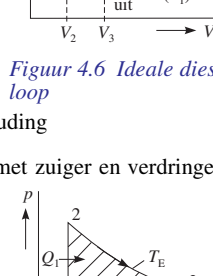


Figuur 4.5 Otto-proces

Rendement: $\eta = 1 - \dfrac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$

waarin: $\varepsilon = \dfrac{V_1}{V_2}$ = compressieverhouding en $\gamma = C_p/C_V$

Diesel (*dieselmotor*)
1–2, 3–4 adiabaten (isentropen)
2–3 isobaar
4–1 isochoor



Figuur 4.6 Ideale dieselkringloop

Rendement: $\eta = 1 - \dfrac{1}{\gamma} \cdot \dfrac{\varphi^{\gamma} - 1}{\varphi - 1} \cdot \dfrac{T_1}{T_2}$

waarin: $\varphi = \dfrac{V_3}{V_2}$ verbrandingsverhouding

Stirling (*heteluchtmotor*, uitgerust met zuiger en verdringer)
1–2, 3–4 isochoren
2–3, 4–1 isothermen

Figuur 4.7 Stirling-proces

Rendement: $\eta = \dfrac{T_E}{T_E + T_C}$

Algemeen is de door het proces (= motor) verrichte arbeid W evenredig met het gearceerde oppervlak.

Rendement van technisch kringproces:

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

Algemene formules

Voor de verandering van U met V bij T = constant:

$$\textit{Helmholtz:}\ \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = -p + T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$$

Voor het geval $\Delta Q = \mathrm{d}U = 0$ (*Joule-effect*):

$$C_V\left(\frac{\partial T}{\partial T}\right)_U = p - T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$$

Voor de adiabatische *smoorproef*, waarbij H = constant (*Joule-Kelvin-effect*):

$$C_p\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = -V + T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

Karakteristieke functies (toestandsfuncties)

Inwendige energie	$U = f(S,V)$	$\mathrm{d}U = T\mathrm{d}S - p\mathrm{d}V$
Enthalpie	$H = U + pV$	$\mathrm{d}H = T\mathrm{d}S + V\mathrm{d}p$
Vrije energie (Helmholtz-functie)	$F = U - TS$	$\mathrm{d}F = -S\mathrm{d}T - p\mathrm{d}V$
Vrije enthalpie (Gibbs-functie)	$G = H - TS$	$\mathrm{d}G = -S\mathrm{d}T + V\mathrm{d}p$

Betrekkingen van Maxwell

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V \qquad \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p$$
$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V \qquad \left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

Soortelijke warmte

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V$$

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p$$

Wet van Clapeyron (betrekking van *Clausius-Clapeyron*) geldt voor (zie *pT*-diagram, fig. 4.1):
- soortelijke verdampingswarmte l_{21} langs de dampspanningslijn;
- soortelijke smeltwarmte l_{32} langs de smeltlijn;
- soortelijke sublimatiewarmte l_{31} langs de sublimatielijn.

Gaande van fase a naar fase b is algemeen:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T} = \frac{l_{\mathrm{ab}}}{T(V_{\mathrm{b}} - V_{\mathrm{a}})}$$

5 Transport

Symbolen (algemeen en stromingsleer)

A = doorsnede, oppervlakte [m^2]
b = breedte [m]
c = geluidssnelheid [m/s]
c_{f} = wrijvingsweerstandscoëfficiënt [–] } voor
c_{L} = draagkracht (lift) coëfficiënt [–] } omstroomde
c_p = drukweerstandscoëfficiënt [–] } lichamen
c_{w} = weerstandscoëfficiënt [–] }
D, d = diameter [m]

F_{f} = wrijvingskracht [N]
F_{L} = draagkracht [N]
F_{w} = weerstandskracht [N]
G = gewicht [N]
g = zwaarteveldsterkte [N/kg]
H = enthalpie [J]
h = hoogte [m];
h_{v} = verlieshoogte [m]
I = verhang [–]
l = lengte; diameter [m]
M = molaire massa [kg/kmol]

P = vermogen [W]; omtrek [m]
p = druk [Pa]
q_V = volumedebiet [m^3/s]
R = molaire gasconstante [$J/(kmol \cdot K)$]
R_h = hydraulische straal [m]
r = straal [m]
s_v = vleugelslankheid [–]
v = snelheid; $\langle v \rangle$ gemiddelde snelheid [m/s]
W = energie [J]
x = plaats
α = doorstroomcoëfficiënt [–]
ε = absolute wandruwheid [m]
ζ = weerstandscoëfficiënt (voor pijpen) [–]
η = dynamische viscositeit [$Pa \cdot s$]
λ = weerstandsfactor voor pijpen [–]
μ = contractiecoëfficiënt; afvoercoëfficiënt [–]
ν = kinematische viscositeit [m^2/s]
ϱ (ρ) = dichtheid [kg/m^3]
Φ = massastroomdichtheid [$kg/(m^2 \cdot s)$]

Symbolen warmtetransport

a = $\lambda/(\rho \cdot c_p)$ = temperatuurvereffeningscoëfficiënt [m^2/s]
C = stralingsconstante [$K^4 \cdot m^2/W$]
c_p = soortelijke warmte bij constante druk [$J/(kg \cdot K)$]
G = warmtegeleiding [W/K]
g = specifieke warmtegeleiding [$W/(m^2 \cdot K)$]
g = versnelling van de vrije val [m/s^2]
K = warmtedoorgangscoëfficiënt [$W/(m^2 \cdot K)$]
L = karakteristieke lengte, diameter [m]
M = stralingsemittantie [W/m^2]
warmte-isolatiecoëfficiënt [$m^2 \cdot K/W$]
M_λ = spectrale stralingsemittantie [W/m^3, $W/(m^2 \cdot \mu m)$]
$\dot{Q}$ = warmtestroom [W]
q = warmtestroomdichtheid [W/m^2]
R = warmteweerstand [K/W], ook R_t, θ
ΔT = karakteristiek temperatuurverschil [K]
v = karakteristieke snelheid [m/s]
$\alpha(\lambda)$ = (spectrale) absorptiefactor [–]
α = warmteoverdrachtscoëfficiënt [$W/(m^2 \cdot K)$]
γ = kubieke uitzettingscoëfficiënt [K^{-1}]

$\varepsilon(\lambda)$ = (spectrale) emissiefactor [–]
λ = golflengte [m]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m·K)]
$\varrho(\rho)$ = dichtheid (in warme toestand) [kg/m^3]
σ = constante van Stefan-Boltzmann [W/(K^4·m^2)]
Φ = stralingsflux [W]

Symbolen stoftransport
c = molaire concentratie [kmol/m^3]
D = diffusiecoëfficiënt [m^2/s]
K = stofdoorgangscoëfficiënt [m/s]
k = stofoverdrachtscoëfficiënt [m/s]
q_s = stofstroomdichtheid [kmol/(m^2·s)]
Φ_s = stofstroom [kmol/s]

5.1 Kengrootheden

Tabel 5.1 Kengrootheden of ken(ge)tallen bij transportverschijnselen

naam	definitie	fysische betekenis
Fourier	$Fo = \frac{at}{L^2} = \frac{\lambda t}{\rho c_p L^2}$	$\frac{\text{verstreken tijd}}{\text{indringtijd}}$
Froude	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ of $\frac{v^2}{gL}$	$\frac{\text{traagheidskracht}}{\text{zwaartekracht}}$
Grashof[1)]	$Gr = \frac{L^3 g \gamma \Delta T}{v^2}$	$\frac{\text{kracht t.g.v. dichtheidsversch.}}{\text{visceuze kracht}}$
	$= \frac{L^3 g(\rho - \rho_w)}{v^2 \rho_w}$ [2)]	
Mach[3)]	$Ma = \frac{v}{c}$	$\frac{\text{snelheid t.o.v. fluïdum}}{\text{geluidssnelheid in fluïdum}}$
Nusselt	$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$	$\frac{\text{totaal warmtetransport}}{\text{geleidingstransport}}$

Tabel 5.1 (vervolg)

naam	definitie	fysische betekenis
Prandtl[4)]	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$	$\frac{\text{impulsdiffusie}}{\text{warmtediffusie}}$
Reynolds[5)]	$Re = \frac{\rho v L}{\eta} = \frac{vL}{\nu}$	$\frac{\text{traagheidskracht}}{\text{visceuze kracht}}$
Sherwood	$Sh = \frac{\Phi d}{\rho D}$	$\frac{\text{totaal stoftransport}}{\text{diffusietransport}}$

[1)] Voor lucht van 20°C is $Gr \approx 78 \cdot 10^9 L^3\ \Delta T$.
[2)] Index w voor warme toestand
[3)] Voor lucht van 20°C is $c \approx 20{,}1\ \sqrt{T}$ m/s
$Ma < 1$: *subsoon*; $Ma > 1$: *supersoon*.
[4)] Voor lucht van 20°C is $Pr \approx 0{,}71$.
[5)] Voor $Re \approx 2300$ slaat stroming om van *laminair* naar *turbulent*.

In de formules voor de kengrootheden zijn in het bijzonder:
L = karakteristieke afmeting, zoals lengte, diameter [m]
v = karakteristieke snelheid, zoals relatieve gemiddelde snelheid [m/s]
t = karakteristiek tijdsinterval [s]
ΔT = karakteristiek temperatuursverschil [K]

5.2 *Stroming van onsamendrukbare vloeistoffen*

Continuïteitsbetrekking
In een *gesloten* systeem geldt:

– algemeen: *massastroom* $q_m = \int_A \varrho v \, \mathrm{d}A = \text{constant}$

– voor ϱ = constant: *volumestroom* $q_V = \int_A v \, \mathrm{d}A = \text{constant}$

of: $q_V = \langle v \rangle \cdot A = \text{constant}$

waarin:
$\langle v \rangle$ = gemiddelde stromingssnelheid over doorsnede A

Druk en energie

Een stromende onsamendrukbare vloeistof ondervindt de volgende *drukken*:

- *statische druk p*, uitwendig aangebracht;
- *hydrostatische druk* ϱgh, in vloeistofelement op hoogte h ten gevolge van het zwaartekrachtveld;
- *stuwdruk* $\frac{1}{2}\varrho v^2$ (ook: *snelheidsdruk, dynamische druk*) ten gevolge van de stroomsnelheid.

Men noemt $p_c = p + \varrho gh$: *voor hoogte gecorrigeerde druk*;
$p_0 = p_c + \frac{1}{2}\varrho v^2$: *totale druk*.

Druk is equivalent met *energiedichtheid* w [Pa $\widehat{=}$ J/m^3].

- p_c = maat voor de *potentiële energie*;
- $\frac{1}{2}\varrho v^2$ = maat voor de *kinetische energie*.

Wet van Bernoulli

Uitgaande van de *massabalans* en de *energiebalans* geldt voor een stationair stromende wrijvingsloze vloeistof:

> Langs een stroomlijn (in de richting van de snelheidsvector) is de totale energiedichtheid constant.

of: Totale druk + totaal uitgewisselde energiedichtheid = constant

of: $p + \varrho gh + \frac{1}{2}\varrho v^2 + \Sigma w = \text{constant}$

Formule van Bernoulli in termen van *hoogte*:

$$\frac{p}{\varrho g} + h + \frac{v^2}{2g} + h_v = H = \text{constant}$$

In Σw, resp. h_v kan men verliezen in buizen en appendages verrekenen.

Algemeen is $h_v = \sum \zeta \frac{v^2}{2g}$; waarin ζ = weerstandscoëfficiënt.

Voor verliezen: zie par. 5.6 en 5.8.

5.3 Formules van Bernoulli voor ideale gassen

Bij *isotherme* toestandsverandering (p/ϱ = constant) geldt:

$$\frac{p}{\varrho}\ln\varrho + gh + \tfrac{1}{2}v^2 = \text{constant}$$

Bij *isentropische* toestandsverandering (p/ϱ^γ = constant) geldt:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1}\cdot\frac{p}{\varrho} + gh + \tfrac{1}{2}v^2 = \text{constant}$$

of: $C_p \cdot T + gh + \tfrac{1}{2}v^2 = \text{constant}$

5.4 Toepassingen wet van Bernoulli

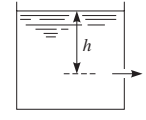
Uitstroomwet van Torricelli

De snelheid waarmee een vloeistof uit een opening in de wand van een vat stroomt is:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Bij een overdruk Δp op de vloeistof is:

$$v = \sqrt{2\left(gh + \frac{\Delta p}{\varrho}\right)}$$



Figuur 5.1
Vat met opening

Het volumedebiet q_V is dan:

$$q_V = \mu \cdot A \cdot v = \mu A\sqrt{2\left(gh + \frac{\Delta p}{\varrho}\right)}$$

μ = *contractiecoëfficiënt*, wordt bepaald door de vorm van de opening en de dikte van de wand:
- cirkelvormige opening: $\mu \approx 0{,}66$
- vierkante opening : $\mu \approx 0{,}58$

Uitstroming van een gas door een opening.
Bij een drukverschil Δp is de snelheid:

$$v = \sqrt{2\Delta p/\varrho}$$

Pitotbuis (stuwbuis van Prandtl)

Stroomsnelheid wordt gemeten d.m.v. een drukverschil ($p_2 - p_1$)

$$p_2 - p_1 = \tfrac{1}{2}\varrho v^2 \qquad v = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\varrho}}$$

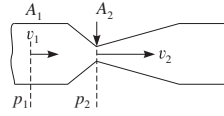
Venturimeter

Gebruikt voor meting van de snelheid van een vloeistof in een pijpleiding of als volumedebietmeter.

Gemeten wordt: $\Delta p = p_1 - p_2$
Dan is:

$$q_V = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\varrho}}$$

waaruit $v_1 = q_V/A_1$.

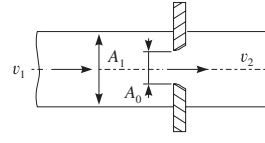


Figuur 5.2 Venturi

Meetflens

Gebruikt als debietmeter, ook voor gassen. Door meting van Δp t.g.v. een vernauwing wordt het debiet berekend volgens:

$$q_V = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\varrho}}$$



Figuur 5.3 Meetflens

waarin:

$$\alpha = \frac{k\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 (A_0/A_1)^2}} = \text{doorstroomcoëfficiënt} \quad (0{,}6 < \alpha < 0{,}8)$$

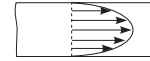
μ = contractiecoëfficiënt ($\mu < 1$)
k = correctiefactor

Voor gassen geldt algemeen: $\alpha_{\text{gas}} \simeq 0{,}9\ \alpha_{\text{vloeistof}}$

Smoren
Smoren is adiabatische ontspanning tussen twee drukken bij constante enthalpie H. Dit geldt voor ieder fluïdum.
Kritische stroming: stroomsnelheid van een gas, die optreedt als het gas uit een reservoir op overdruk ontsnapt.
Het *debiet* is afhankelijk van Δp, maar neemt niet meer toe voor $\Delta p \geqslant \Delta p_{\text{krit}}$. De uitstroomsnelheid is dan $v_0 = c$ (geluidssnelheid). Voor lucht geldt voor de kritische toestand: $p_2/p_1 = 0{,}53$.

5.5 Stroming door cilindrische buizen

Laminaire stroming
De snelheidsverdeling in de buis is paraboolvormig.



Figuur 5.4 Laminaire stroming

Voor een laminaire vloeistofstroming in een cilindrische buis met straal r (diameter d) geldt, wanneer over de lengte l een drukverschil Δp bestaat, de *wet van Hagen-Poiseuille*:

$$q_V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta l} = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128\eta l}$$

Hieruit volgt voor de gemiddelde snelheid in de buis:

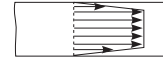
$$\langle v \rangle = \frac{q_V}{\pi r^2} = \frac{r^2 \Delta p}{8\eta l} = \frac{d^2 \Delta p}{32\eta l} = \frac{1}{2} v_{\max}$$

Laminaire stroming kan slechts optreden voor

$$Re < Re_{\text{krit}} \approx 2300.$$

$$Re = \frac{2\rho r \langle v \rangle}{\eta}$$

Turbulente stroming
De verdeling van de gemiddelde snelheid in de buis is bijna rechthoekig, zie figuur 5.5. Vlak langs de wand is de stroming meestal laminair, mits de wand glad is.



Figuur 5.5 Turbulente stroming

In een gladde buis is de stroming volledig turbulent als $Re > 10\ 000$ à $12\ 000$. Tussen Re_{krit} en $Re_{turb.}$ treden overgangsverschijnselen op.

Wervel(stroming)
Een *wervel* is een roterende stroming met concentrische cirkels als stroomlijnen, waarbij voor iedere stroomlijn de stroomsnelheid v met de afstand r tot het middelpunt voldoet aan:

$$\Gamma = 2\pi r \cdot v = \textit{wervelsterkte of circulatie}$$

Algemeen geldt voor een gesloten kromme:

$$\Gamma = \oint v_s \cdot \mathrm{d}s$$

waarin: v_s = component van de snelheid in de richting van de raaklijn ter plaatse van een punt van de kromme

Rotatiestroming
Bij *rotatiestroming* beweegt de vloeistofmassa zich als een vaste cilinder die om zijn as draait.

Moleculaire of knudsenstroming
Komt voor bij gassen: de wisselwerking tussen de gasmoleculen onderling is verwaarloosbaar.
Voor lucht bij kamertemperatuur treedt *moleculaire stroming* op in een buis met diameter d als $pd < 10^{-6}\ \mathrm{Pa \cdot m}$.
Wanneer $pd > 10^{-4}\ \mathrm{Pa \cdot m}$ spreekt men van *visceuze stroming*.

5.6 Wrijving in cilindrische buizen

Bij vloeistofstroming in *buizen* treedt t.g.v. wrijving een drukverschil over een lengte l op:

$$\Delta p = \zeta \cdot \tfrac{1}{2}\varrho\langle v\rangle^2 = \lambda \frac{l}{d} \cdot \tfrac{1}{2}\varrho\langle v\rangle^2 \qquad (\textit{Darcy-Weisbach})$$

Hierbij hoort een wrijvingskracht:

$$F_w = \frac{\pi}{4} d^2 \Delta p = \frac{\pi}{4} d \cdot l \cdot \lambda \cdot \tfrac{1}{2}\varrho\langle v\rangle^2$$

waarin: $\zeta = \textit{weerstandscoëfficiënt}$, $\lambda = \dfrac{d}{l}\zeta = \textit{weerstandsfactor}$ } (voor cilindrische buizen met diameter d)

λ is een functie van *Re* (getal van Reynolds) en de relatieve ruwheid ε/d van de wand.
Zie ook hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.16.

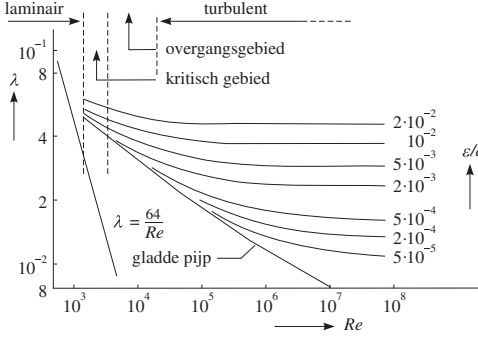
Laminaire stroming ($Re < 2300$): $\lambda = \dfrac{64}{Re}$

Turbulente stroming:
– gladde wand ($Re < 65d/\varepsilon$)

$$4000 < Re < 10^5\text{: } \lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \qquad (\textit{Blasius})$$

$$10^5 < Re < 10^8\text{: } \lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \qquad (\textit{Nikuradse})$$

– ruwe wand ($Re > 1300d/\varepsilon$): zie figuur 5.6.



Figuur 5.6 Weerstandsfactor λ voor cilindrische buizen (Moody-diagram of diagram van Colebrook en Nikuradse)

Het drukverlies Δp kan ook in een hoogteverschil worden uitgedrukt:

$$h_v = \lambda \frac{l}{d} \frac{\langle v \rangle^2}{2g}$$

Verhang: $I = \dfrac{h_v}{l} = \dfrac{\lambda}{d} \dfrac{\langle v \rangle^2}{2g}$

5.7 Stroming door niet-cilindrische buizen

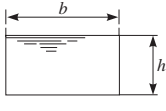
Voor *stroming door niet-cilindrische buizen* is de volgende rekengrootheid ingevoerd:

Hydraulische straal: $R_h = \dfrac{A_v}{P_v}$

waarin: A_v = door vloeistof ingenomen doorsnede
P_v = door vloeistof bevochtigde buisomtrek

Bijzondere gevallen:

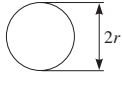
a)



$$R_h = \frac{b \cdot h}{b + 2h}$$

Hydraulisch gunstigste profiel als $b = 2h$; dan is $R_h = \frac{1}{2}h$.

b)

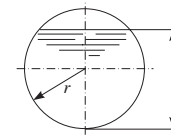


Geheel gevuld met vloeistof: $R_h = \frac{1}{2}r$.
Half gevuld met vloeistof: $R_h = \frac{1}{2}r$.

c) Gedeeltelijk gevulde *cirkelvormige* profielen: zie tabel 5.2a.
Hydraulisch gunstigste vulling als $h = 1{,}60r$.

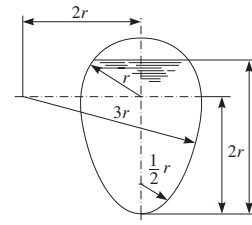
d) Gedeeltelijk gevulde *eivormige* profielen: zie tabel 5.2b.
Hydraulisch gunstigste vulling als $h = 2{,}60r$.

Tabel 5.2a Gedeeltelijk gevulde ***cirkelvormige*** *profielen*



vulhoogte h	natte omtrek P_v	natte doorsnede A_v	hydraulische straal R_h
2,00 r	6,283 r	3,142 r^2	0,500 r
1,95 r	5,648 r	3,121 r^2	0,553 r
1,90 r	5,381 r	3,083 r^2	0,573 r
1,85 r	5,174 r	3,035 r^2	0,587 r
1,80 r	4,996 r	2,978 r^2	0,596 r
1,75 r	4,838 r	2,915 r^2	0,603 r
1,70 r	4.692 r	2,846 r^2	0,607 r
1,60 r	4,429 r	2,694 r^2	0,608 r
1,50 r	4,189 r	2,527 r^2	0,603 r
1,40 r	3,965 r	2,349 r^2	0,592 r
1,30 r	3,751 r	2,162 r^2	0,576 r
1,20 r	3,544 r	1,968 r^2	0,555 r
1,10 r	3,342 r	1,770 r^2	0,530 r
1,00 r	3,142 r	1,571 r^2	0,500 r
0,90 r	2,941 r	1,371 r^2	0,466 r
0,80 r	2,739 r	1,173 r^2	0,428 r
0,70 r	2,532 r	0,980 r^2	0,387 r
0,60 r	2,319 r	0,793 r^2	0,342 r
0,50 r	2,094 r	0,614 r^2	0,293 r
0,40 r	1,855 r	0,447 r^2	0,241 r
0,30 r	1,591 r	0,295 r^2	0,1857 r
0,25 r	1,445 r	0,227 r^2	0,1568 r
0,20 r	1,287 r	0,1635 r^2	0,1270 r
0,15 r	1,110 r	0,1070 r^2	0,0965 r
0,10 r	0,902 r	0,0587 r^2	0,0651 r
0,05 r	0,635 r	0,0209 r^2	0,0329 r

Tabel 5.2b Gedeeltelijk gevulde ***eivormige*** *profielen*



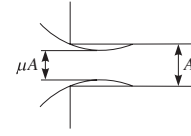
vulhoogte h	natte omtrek P_v	natte doorsnede A_v	hydraulische straal R_h
3,00 r	7,930 r	4,594 r^2	0,579 r
2,95 r	7,295 r	4,573 r^2	0,627 r
2,90 r	7,028 r	4,535 r^2	0,645 r
2,85 r	6,820 r	4,487 r^2	0,658 r
2,80 r	6,643 r	4,431 r^2	0,667 r
2,75 r	6,484 r	4,367 r^2	0,674 r
2,70 r	6,639 r	4,299 r^2	0,678 r
2,60 r	6,075 r	4,147 r^2	0,683 r
2,50 r	5,835 r	3,980 r^2	0,682 r
2,40 r	5,611 r	3,801 r^2	0,677 r
2,30 r	5,398 r	3,614 r^2	0,670 r
2,20 r	5,191 r	3,421 r^2	0,659 r
2,10 r	4,989 r	3,223 r^2	0,646 r
2,00 r	4,788 r	3,023 r^2	0,631 r
1,70 r	4,187 r	2,426 r^2	0,579 r
1,40 r	3,580 r	1,847 r^2	0,516 r
1,10 r	2,960 r	1,305 r^2	0,441 r
0,80 r	2,319 r	0,820 r^2	0,354 r
0,50 r	1,647 r	0,4138 r^2	0,251 r
0,35 r	1,294 r	0,2479 r^2	0,1916 r
0,20 r	0,927 r	0,118 r^2	0,1206 r
0,15 r	0,795 r	0,0739 r^2	0,0929 r
0,10 r	0,644 r	0,04088 r^2	0,0635 r
0,05 r	0,451 r	0,01468 r^2	0,0326 r
0,025 r	0,318 r	0,00523 r^2	0,01647 r

5.8 Verliezen in openingen en appendages

Verliezen worden d.m.v. de *weerstandscoëfficiënt* of *verliesfactor* ζ berekend, zie ook par. 5.2.

Intreeverliezen (ζ_i)

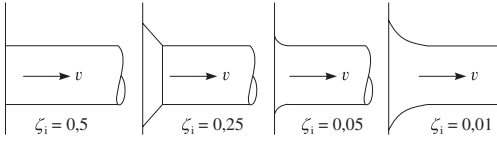
ζ_i wordt bepaald door de afronding. Er treedt bij binnenstromen *contractie* op (zie figuur 5.7).



Figuur 5.7 Contractie

De *contractie-coëfficiënt* is $\mu = \dfrac{1}{1+\sqrt{\zeta_i}}$,

dus $\zeta_i = \left(\dfrac{1}{\mu} - 1\right)^2$

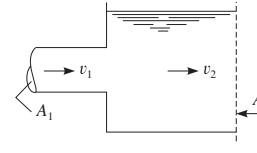


Figuur 5.8 Intreeverliezen

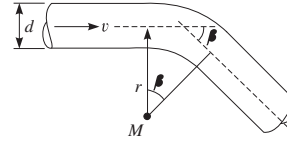
Uittreeverliezen (ζ_u)

$\zeta_u = \left(1 - \dfrac{A_1}{A_2}\right)^2$ betrokken op v_1

$h_v = \zeta_u \dfrac{v_1^2}{2g}$



Figuur 5.9 Uittreeverliezen



Figuur 5.10 Bochtverliezen

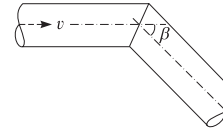
Bochtverliezen (ζ_b)

ζ_b is een functie van de bochthoek β en de waarde *r*/*d*, zie tabel 5.3 (volgens *Hütte*).

Tabel 5.3 ζ_b-waarden voor bochten bij verschillende β-waarden

r \ β	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
d	0,03	0,045	0,085	0,14	0,19	0,21
$2d$	0,03	0,045	0,060	0,09	0,12	0,14
$4d$	0,03	0,045	0,055	0,08	0,10	0,11
$6d$	0,03	0,045	0,050	0,075	0,09	0,09
$10d$	0,03	0,045	0,045	0,07	0,07	0,11

Knikverliezen (ζ_k)
Tabel 5.4 geeft waarden van ζ_k afhankelijk van de waarde van β (volgens *Hütte*).

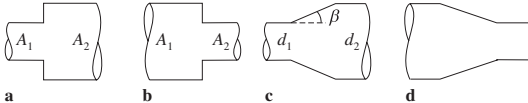


Figuur 5.11 Knikverliezen

Tabel 5.4 ζ_k-waarden voor knikken bij verschillende β-waarden

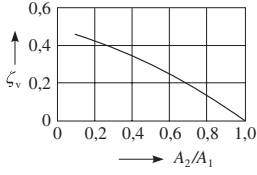
	10°	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
glad	0,034	0,042	0,066	0,130	0,236	0,471	1,129
ruw	0,044	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	1,265

Verliezen t.g.v. vernauwing en verwijding (ζ_v)
De verliezen worden gegeven voor de uitgangssnelheid v_2.

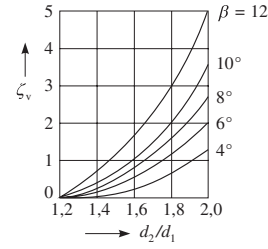


$\zeta_v = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2$ (zie figuur 5.13)(zie figuur 5.24) $\zeta_v = 0{,}05$ voor niet te grote hoeken

Figuur 5.12 ζ_v-waarden (volgens Dubbel)



Figuur 5.13 ζ_v-waarden voor geval **b** *van figuur 5.12*



Figuur 5.14 ζ_v-waarden voor geval **c** *van figuur 5.12*

5.9 Omstroming van vaste lichamen

Bevindt een vast lichaam met een effectief oppervlak A zich in een stromende vloeistof, dan ondervindt dit lichaam een *drukweerstandskracht*:

$$F_p = c_p \cdot A \cdot \tfrac{1}{2}\varrho\langle v\rangle^2 \qquad \textit{(wet van Newton)}$$

waarin: c_p = drukweerstandscoëffciënt

T.g.v. de vloeistofviscositeit is er een *wrijvingskracht*:

$$F_\mathrm{f} = c_\mathrm{f} \cdot A \cdot \tfrac{1}{2}\varrho\langle v\rangle^2$$

waarin: c_f = wrijvingsweerstandscoëfficiënt

De totale *weerstandskracht* F_w wordt nu:

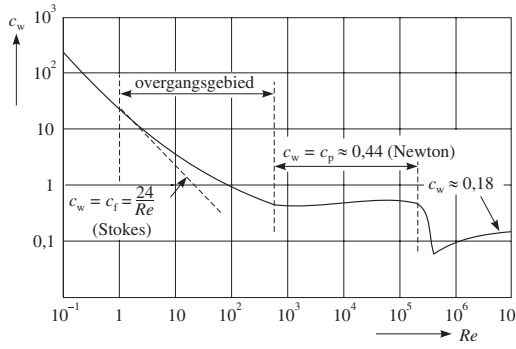
$$F_\mathrm{w} = c_\mathrm{w} \cdot A \cdot \tfrac{1}{2}\varrho\langle v\rangle^2$$

waarin: c_w = weerstandscoëfficiënt

Bij een *kruipende beweging* is er alleen de wrijvingskracht. Voor een bol geldt dan:

$$F_\mathrm{f} = 6\pi\eta r v \qquad \textit{(wet van Stokes)}$$

waarin: r = straal van de bol;
v = valsnelheid



Figuur 5.15 c_w als functie van Re voor een bol (zie ook hoofdstuk J Procestechniek, par. 3, figuur 3.1)

De **weerstandscoëfficiënt** c_w is een functie van het getal van Reynolds en de vorm van het lichaam (zie figuur 5.15).

Weerstandskracht en draagkracht bij vliegtuigen

Weerstandskracht : $F_w = c_w \cdot \frac{1}{2}\varrho v^2 \cdot A_v$

Draagkracht : $F_L = c_L \cdot \frac{1}{2}\varrho v^2 \cdot A_v$

Voor evenwicht geldt: $G_v = F_L$ (= vliegtuiggewicht)
De coëfficiënten c_w en c_L hangen af van de hoek die het vleugelprofiel maakt met de vliegrichting.

Bij benadering geldt ook: $c_w = \dfrac{c_L^2}{\pi S_v}$

waarin: s_v = vleugelslankheid

5.10 Stroming door kanalen en goten

Weerstandsfactor in open leidingen

Laminaire stroming:

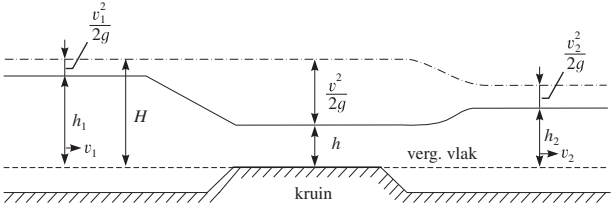
$b/h = 1 : \lambda = 57/Re$

$b/h = 4 : \lambda = 74/Re$
$b/h > 10 : \lambda = 96/Re$

waarin: $Re = \dfrac{4vR_h}{\nu}$ (R_h = hydraulische straal)

Turbulente stroming
Hydraulisch glad: $\lambda_g^{-1/2} = 2\log(Re\sqrt{\lambda_g}) - 1$
Hydraulisch ruw $\lambda_r^{-1/2} = c_r - 2\log(\varepsilon/d)$
Waarin (volgens *Reinius* en *Keulegan*):
– voor rechthoekige leiding $b/h = 4$: $C_r = 1{,}02$
$b/h = 2$: $C_r = 1{,}04$
– voor trapeziumvormige leiding : $C_r = 1{,}00$

Overlaten



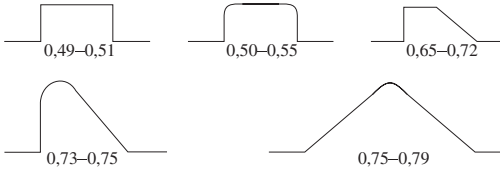
b = kruinbreedte (loodrecht op vlak van tekening)
h_1 = waterdiepte vóór de kruin
h_2 = waterdiepte na de kruin } gemeten vanaf de kruin
h = waterdiepte boven de kruin
H = totale hoogte

Figuur 5.16 Overlaat (met definities)

Lange overlaat: stroomlijnen lopen boven de kruin horizontaal.
Korte overlaat: verticale versnelling boven de kruin.

Volkomen werkende overlaat: debiet is onafhankelijk van de benedenwaterstand.

$$h < \tfrac{2}{3}H \quad q_{V\,\text{volk}} = \tfrac{2}{3}\mu b\left(h + \frac{v_1^2}{2g}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$$



Figuur 5.17 Afvoercoëfficiënt $\mu = f$ (kruinvorm)

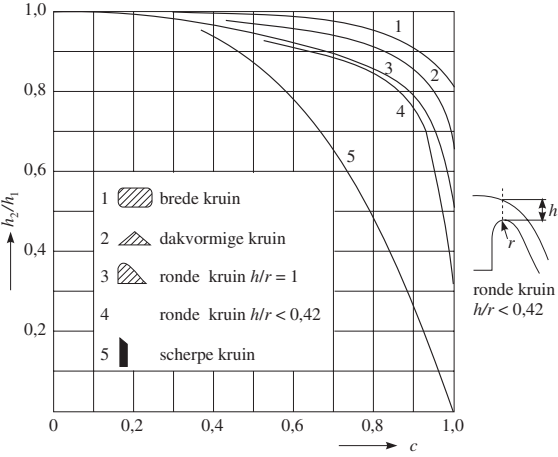
Onvolkomen werkende overlaat: debiet is afhankelijk van de benedenwaterstand.

$h \geq \frac{2}{3}H \quad q_{Vonv} = cq_{Vvolk}$

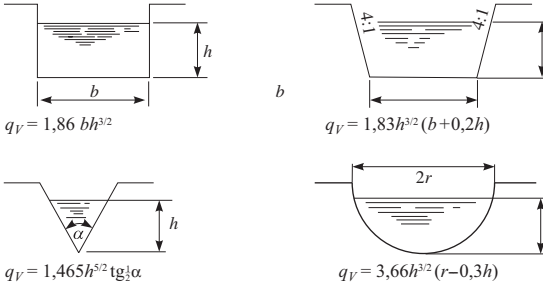
waarin:

μ = afvoercoëfficiënt = functie van de kruinvorm (zie figuur 5.17)

c = evenredigheidsconstante = functie van de verhouding h_2/h_1 (zie figuur 5.18)



Figuur 5.18 Grafiek van Schmidt: $c = f(h_2/h_1)$



$q_V = 1{,}86\ bh^{3/2}$ $\quad$ $q_V = 1{,}83h^{3/2}(b+0{,}2h)$

$q_V = 1{,}465h^{5/2}\,\mathrm{tg}\frac{1}{2}\alpha$ $\quad$ $q_V = 3{,}66h^{3/2}(r-0{,}3h)$

Figuur 5.19 Meetoverlaten

Meetoverlaten (met scherpe kruin)

Meetoverlaten worden gebruikt bij debietmetingen in kanalen. Figuur 5.19 geeft voor vier verschillende vormen de formule voor q_v. Hierin is:

b = kruinbreedte (loodrecht op vlak van tekening)

h = ongestoorde waterhoogte boven de kruin

5.11 Modelregels

Modelregels maken het mogelijk conclusies te trekken uit op schaal gebouwde modellen. In de stromingsleer moeten prototype en model dynamisch gelijkvormig zijn. De toepassing bepaalt de te hanteren modelregel:

- *Modelregel van Reynolds*: Re = constant voor alle stromingsvelden, die beheerst worden door traagheids- en wrijvingskrachten. Toepassing: stromingsweerstand in buizen.
- *Modelregel van Froude*: Fr = constant voor alle stromingsvelden, die beheerst worden door traagheidskrachten en zwaartekracht. Toepassing: scheepsbouw, stroming door open leidingen.
- *Modelregel van Mach*: Ma = constant als er sprake is van beweging door een samendrukbaar medium. Toepassing: vliegtuigbouw.

5.12 Stationair warmtetransport door geleiding

Algemeen:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \mathrm{d}T/\mathrm{d}x$$

$$q = -\lambda \cdot \mathrm{d}T/\mathrm{d}x$$

Afhankelijk van het vakgebied wordt de volgende formule gebruikt:

$$\dot{Q} = g \cdot A \cdot \Delta T = G \cdot \Delta T = \frac{1}{R} \cdot \Delta T$$

$$\text{of : } \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \text{ met } R = \frac{1}{g \cdot A}$$

waarin o.a.:

λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m·K)]
Voor λ-waarden zie hoofdstuk E1, *Materialen*, tabel 1.4(6), 1.5 t/m 1.8(5).
G = warmtegeleiding [W/K]
g = specifieke warmtegeleiding [W/(m^2·K)]
$R = 1/G$ = warmteweerstand [K/W]

} van geleidend materiaal, bijv. glas, steen

Vlakke wand met dikte d [m]:

$$g = \lambda/d$$

$$R = d/(\lambda \cdot A)$$

Samengestelde vlakke wand

$$\frac{1}{g} = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \qquad R = \frac{1}{A} \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i}$$

Cilindrische wand (buis):

$$g = \frac{2\lambda}{D_\mathrm{u} \ln(D_\mathrm{u}/D_\mathrm{i})} \quad R = \frac{\ln(D_\mathrm{u}/D_\mathrm{i})}{2\pi\lambda l}$$

$$A = \pi D_\mathrm{u} \cdot l$$

waarin: D_u = buitendiameter [m]
D_i = binnendiameter [m]
l = lengte [m]

Sferische wand (holle kogel):

$$G = \frac{2\pi\lambda}{\frac{1}{D_i} - \frac{1}{D_u}}$$

5.13 Stationair warmtetransport door convectie

Algemeen:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \qquad (\textit{afkoelingswet van Newton})$$
$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{L}$$
$$\Delta T = T_w - T_m$$

waarin:
A = aanrakingsoppervlak tussen vast lichaam en langsstromend medium [m^2]
T_m = gemiddelde temperatuur stromend medium [K]
T_w = oppervlak(wand-)temperatuur vast lichaam [K]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt stromend medium [W/(m · K)]

Enige richtwaarden voor α (zie ook hoofdstuk E1, *Materialen*, tabel 1.14):

α	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
medium	⟵ gas ⟶			⟵	vloeistof		⟶	⟵	condensatie	⟶

Opmerking. Onderstaande formules voor de gemiddelde waarden van Nu en α ($\langle Nu \rangle$ resp. $\langle \alpha \rangle$), zijn veelal gebaseerd op experimenten en kunnen afwijken van elders gegeven formules. Voor zover mogelijk wordt daarom de bron vermeld.

Vrije convectie langs (korte) *verticale plaat*
(éénzijdig, hoogte H)

Laminaire stroming $(10^4 < Gr \cdot Pr < 10^8)$[1]:

$$\langle Nu \rangle = 0{,}55(Gr \cdot Pr)^{1/4} \qquad (McAdams)$$

(voor gassen en vloeistoffen)

waarin: $Gr = \dfrac{H^3 g \cdot (\varrho - \varrho_w)}{\nu^2 \varrho_w}$

Opmerking. De formule geldt ook voor een horizontale cilindervormige buis, stroming langs buitenzijde, H vervangen door D_u.

Voor $\langle \alpha \rangle$ volgt hieruit:

$$\langle \alpha \rangle = 0,55\,\lambda \left(\frac{g \cdot \gamma}{a \cdot \nu}\right)^{1/4} \cdot \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{1/4}$$

λ, γ, a en ν gelden voor langsstromend medium bij de omgevingstemperatuur.

Voor lucht van 20 °C, atmosferische druk is:

$$\langle \alpha \rangle = 1,35 \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{1/4}$$

Turbulente stroming $(Gr \cdot Pr > 10^8)$:

$$\langle Nu \rangle = 0,13(Gr \cdot Pr)^{1/3} \qquad (McAdams)$$

α is onafhankelijk van H

Voor $10^9 < Gr \cdot Pr < 10^{10}$ is:

$$\langle Nu \rangle = 0,02(Gr \cdot Pr)^{0,4} \qquad (Mcadams)$$

[1] Voor $Gr \cdot Pr$ wordt ook wel Ra = kengrootheid van Rayleigh genoteerd. Voor enige Prandtl-getallen zie El *Materialen*, tabel 1.15.

Vrije convectie langs *horizontale plaat*
(Warmte-uitwisseling aan boven- of onderzijde; kleinste waarden volgens McAdams)

Laminaire stroming ($10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$):
- aan bovenzijde: $\langle Nu \rangle = A(Gr \cdot Pr)^{1/4}$: $A = 0{,}54 \ldots 0{,}71$
- aan onderzijde: $\langle Nu \rangle = B(Gr \cdot Pr)^{1/4}$: $B = 0{,}27 \ldots 0{,}35$

Turbulente stroming ($Gr \cdot Pr > 10^8$):
- aan bovenzijde: $\langle Nu \rangle = C(Gr \cdot Pr)^{1/3}$: $C = 0{,}14 \ldots 0{,}17$
- aan onderzijde: $\langle Nu \rangle = D(Gr \cdot Pr)^{1/3}$: $D \approx 0{,}08$

Voor de karakteristieke lengte L in Gr neme men het gemiddelde van lengte en breedte van de plaat.

Vrije convectie langs twee *vlakke parallelle horizontale platen*
(onderste plaat warm, bovenste koud met gas of vloeistof ertussen; karakteristieke lengte L = afstand tussen de platen)

$$\left.\begin{array}{ll} Gr \cdot Pr < 10^3 & : \; Nu = 1 \\ 10^4 < Gr \cdot Pr < 10^7 & : \langle Nu \rangle = 0{,}15(Gr \cdot Pr)^{1/4} \\ 10^7 < Gr \cdot Pr & : \langle Nu \rangle = 0{,}17(Gr \cdot Pr)^{1/3} \end{array}\right\} \begin{array}{l} (\textit{zie publ.} \\ \textit{Smith e.a.} \\ \textit{pag. A4/103}) \end{array}$$

Vrije convectie langs *verticale cilinder*
(warmteoverdracht aan buitenzijde)

Laminaire stroming ($1600 < Re < 4600$):

$$\langle Nu \rangle = 0{,}255 \; Gr^{0{,}25} \cdot Re^{0{,}07} \cdot Pr^{0{,}37} \quad (\textit{Wayzinger en Johnson})$$

Gedwongen convectie langs *vlak glad oppervlak*

Laminaire stroming ($Re < 3 \cdot 10^5$):

$$\langle Nu \rangle = 0{,}664 \; Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \qquad (\textit{Eckert})$$

Voor lucht van 20 °C, atmosferische druk is:

$$\langle Nu \rangle = 0{,}593 \; Re^{1/2}$$

Turbulente stroming ($Re > 3 \cdot 10^5$):

$$\langle Nu \rangle = 0{,}027 \; Re^{0{,}8} \cdot Pr^{1/3} \qquad (\textit{Hütte})$$

Voor lucht van 20 °C, atmosferische druk is:

$$\langle Nu \rangle = 0{,}024 \; Re^{0{,}8}$$

Afhankelijkheid van α van luchtsnelheid v langs oppervlak volgens *Jürgess*:

$$v \leqslant 5\,\mathrm{m/s} \qquad \alpha = 5{,}6 + 4{,}0\ v$$
$$v > 5\,\mathrm{m/s} \qquad \alpha = 7{,}12 \cdot v^{0{,}78}$$

Gedwongen convectie in *gladde, rechte, cilindervormige buis*
Laminaire stroming (nog niet ingesteld), geldig voor vloeistoffen en gassen:

$$\langle Nu \rangle = F \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\eta_\mathrm{i}}{\eta_\mathrm{w}} \right)^{0{,}14}$$

waarin:
d = diameter buis
l = lengte buis
index i : voor niet verwarmde vloeistof
index w: voor vloeistof aan buiswand
$F = 1{,}62$ voor $T_\mathrm{wand} = \text{constant}$
$= 1{,}93$ voor $\dot{Q} = \text{constant}$.
} over gehele buislengte

Ingestelde Poiseuille-stroom:
$\langle Nu \rangle = 3{,}66$ voor $T_\mathrm{wand} = \text{constant}$
$\langle Nu \rangle = 4{,}36$ voor $\dot{Q} = \text{constant}$

Voor propstroming geldt:
$\langle Nu \rangle = 5{,}78$

Turbulente stroming ($Re > 10^4$), zie publ. Ringnalda pag. A4/103:
$\langle Nu \rangle = 0{,}039\ Re^{0{,}75} \cdot Pr^{0{,}56}$ voor: $0{,}6 < Pr < 1{,}7$
$\langle Nu \rangle = 0{,}024\ Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}39}$ voor: $1{,}7 < Pr < 14$
$\langle Nu \rangle = 0{,}022\ Re^{0{,}86} \cdot Pr^{0{,}23}$ voor: $14 < Pr < 300$

Voor lucht van 20 °C, atmosferische druk is:
$\langle \alpha \rangle = 3{,}66 \cdot v^{0{,}8} \cdot d^{-0{,}2}$

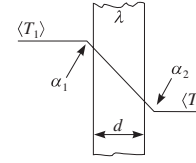
Voor water in buis met $15 < d < 100$ mm:
$\langle \alpha \rangle = 3373\ v^{0{,}85}[1 + 0{,}014(T - 273)]$

5.14 Stationair warmtetransport door geleiding en convectie

Wanneer een scheidingswand aan beide zijden wordt begrensd door een fluïdum, waar warmtetransport plaatsvindt door convectie, spreekt men van *warmtedoorgang*. Algemeen geldt:

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot \Delta T = \frac{1}{M} \cdot A \cdot \Delta T$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{g} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}$$



Figuur 5.20 Warmtedoorgang

waarin:

K = warmtedoorgangs-coëfficiënt [W/(m^2·K)]

$M = \dfrac{1}{K}$ = warmte-isolatiecoëfficiënt [K·m^2/W]

$g = \lambda/d$ = specifieke warmte-geleiding [W/(m^2·K)]

$$\Delta T = \langle T_1 \rangle - \langle T_2 \rangle \quad [\mathrm{K}]$$

Zie ook par. 5.12 en 5.13.

Vlakke wand met dikte d (figuur 5.20):

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Cilindrische buis:

$$\frac{1}{K} = \frac{D_\mathrm{u}}{D_\mathrm{i}} \cdot \frac{1}{\alpha_\mathrm{i}} + \frac{D_\mathrm{u} \ln(D_u/D_\mathrm{i})}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_\mathrm{u}} \qquad A = \pi \cdot D_\mathrm{u} \cdot l$$

5.15 Stationair warmtetransport door straling

Het uitgestraald vermogen per m^2 oppervlak (flux) van een *zwart lichaam* met temperatuur T over de halve ruimte ($\Omega = 2\pi$sr) in het golflengtegebied tussen λ en $d\lambda$ is:

$$M_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \qquad (\textit{Wet van Planck})$$

Voor c_1 en c_2 zie tabel 1.1 (pag. A4/3).
Voor kleine λT: $M_\lambda = c_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$ (*Wien*)
Voor grote λT: $M_\lambda = c_0 k \lambda^{-4} \cdot T$ (*Rayleigh – Jeans*)
waarin: c_0 = lichtsnelheid; k = constante van *Boltzmann*
Verschuivingswet van Wien:
$\lambda T \approx 3000\ \text{K} \cdot \mu\text{m}$, waarbij $M_{\lambda\max} \approx 4\pi \cdot 10^{-6}\ T^5$

Stralingswet van Stefan-Boltzmann (voor zwarte straler):

$$M = \int_0^\infty M_\lambda \cdot d\lambda = \sigma T^4$$

waarin: $\sigma \approx 56{,}7 \times 10^{-9}\ \text{W}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2)$
(const. van Stefan-Boltzmann)

Wet van Kirchhoff voor niet-zwart lichaam:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{M_\lambda}{M_{\lambda\text{zwart}}} = \alpha(\lambda)$$

Voor een *grijs lichaam* is: $\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) =$ constant (< 1).
Een grijs lichaam met oppervlak A_1, emissiefactor ε_1, temperatuur T_1 straalt een vermogen uit gelijk aan:

$$\Phi = \dot{Q} = A_1 \varepsilon_1 \sigma T_1^4$$

Wordt dit lichaam geheel omsloten door een oppervlak (A_2, ε_2, T_2), waarbij A_1 en A_2 elkaar geheel zien, dan is:

$$\Phi_1 = \dot{Q}_1 = C A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

waarin: $\frac{1}{C} = \frac{1}{\varepsilon_1 \sigma} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2 \sigma} - \frac{1}{\sigma}\right)$

Voor $A_2 \to \infty$ (oneindige ruimte) wordt $C = \varepsilon_1 \sigma$:

$\Phi_1 = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \approx 4\varepsilon_1 \sigma A_1 T_m^3 (T_1 - T_2)$

of $q_1 \approx 4\varepsilon_1 \sigma T_m^3 \Delta T$

als $T_1 - T_2 = \Delta T \ll T_1$ en $T_m = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$

5.16 Niet-stationaire warmtegeleiding

Warmtepenetratie in eenzijdig oneindig uitgestrekt medium

Aanvankelijke temperatuur T_0. Op tijd $t = 0$ wordt aan de wand $T = T_1$ opgedrongen.

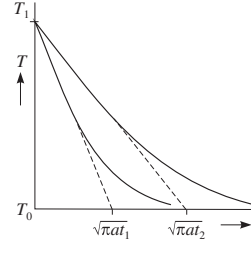
De warmtebalans volgt dan uit de één-dimensionale vorm van de differentiaalvergelijking van *Fourier*:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

De warmtestroomdichtheid door de wand is op tijd t:

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_0}{\sqrt{\pi a t}}$$

$$= (T_1 - T_0)\sqrt{\frac{\lambda \varrho c_p}{\pi t}}$$



Figuur 5.21
Warmtepenetratie

waarin: $x = \sqrt{\pi a t}$ = *indringdiepte*

Hierbij wordt het *kengetal van Fourier* gebruikt: $F_o = \frac{at}{D^2}$

waarin:

D = karakteristieke afmeting, bijv. afstand tot de wand, of diameter van een bol

Fo = verhouding van de procestijd t en de tijd D^2/a, die de warmtegeleiding nodig heeft om effectief werkzaam te zijn

Doorwarming vast lichaam

Indringdiepte > afmetingen van het lichaam.
De temperatuur in het lichaam zal verlopen als in figuur 5.22.
De gemiddelde temperatuur $\langle T \rangle$ en de middentemperatuur T_m kunnen grafisch worden bepaald met figuur 5.23 en 5.24 (pag. A4/52).

$$\frac{T_1 - \langle T \rangle}{T_1 - T_0} = \exp\left(-\frac{\alpha A t}{\varrho c_p V}\right) = f_1(Fo)$$

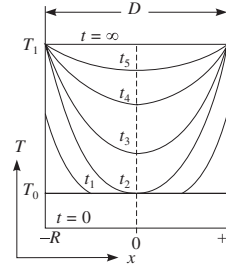
en:

$$\frac{T_1 - T_m}{T_1 - T_0} = f_2(Fo)$$

waarin:
A = oppervlakte lichaam
V = volume lichaam

Er geldt:

$$\langle T \rangle = \frac{1}{R}\int_0^R T \mathrm{d}x$$

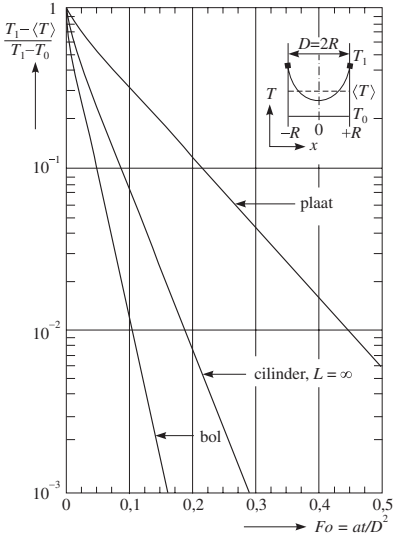


Figuur 5.22 Opwarming van een lichaam door niet-stationaire geleiding:
$0 < t < t_2$ 'penetratietheorie';
$t_3 < t < \infty$ 'constante h'

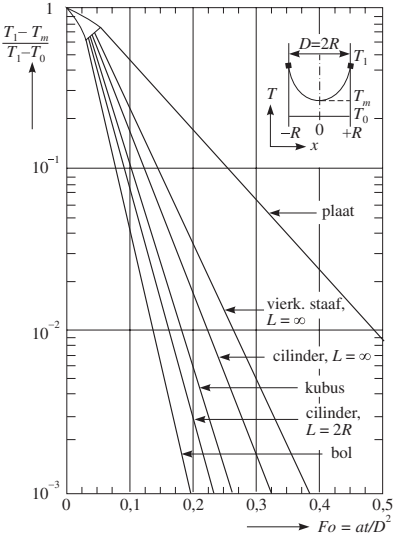
Als λ (lichaam) $\gg$ (omgeving) zal T (lichaam) overal even groot zijn en de opwarm- of afkoelsnelheid onafhankelijk van λ zijn. Als λ niet verwaarloosd mag worden, moet in de vergelijking voor $\langle T \rangle$ α' i.p.v. α genomen worden:

$$\frac{1}{\alpha'} = \frac{1}{\alpha_{\text{uitw}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{inw}}}$$

α_{uitw} behoort bij de omgeving



Figuur 5.23 Verwarming of afkoeling van een lichaam door warmtegeleiding; gemiddelde temperatuur $\langle T\rangle$ als functie van de tijd



Figuur 5.24 Verwarming of afkoeling van een lichaam door warmtegeleiding; temperatuur in het midden T_m als functie van de tijd

$\alpha_{inw} = \dfrac{\lambda C}{D}$ behoort bij het lichaam

C hangt af van de vorm van het lichaam:
- vlakke plaat : $C = 4{,}93$
- bol : $C = 6{,}6$
- slanke cilinder : $C = 5{,}8$

5.17 Stoftransport

Tabel 5.5 Analogie stoftransport/warmtetransport

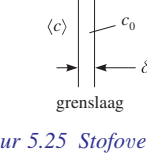
stoftransport	warmtetransport
stofstroom Φ_s [kmol/s]	warmtestroom $\dot{Q}$ [W]
stofstroomdichtheid q_s [kmol/(m^2·s)]	warmtestroomdichtheid q [W/m^2]
molaire concentratie c [kmol/m^3]	temperatuur T [K]
diffusiecoëfficiënt D [m^2/s]	warmtegeleidingscoëff. λ [W/(m·K)]
stofoverdrachtscoëff. k [m/s]	warmte-overdrachtscoëff. α [W/(m^2·K)]
stofdoorgangsscoëff. K [m/s]	warmte-doorgangscoëff. K [W/(m^2·K)]
$q_s = -D\dfrac{dc}{dx}$	$q = -\lambda\dfrac{dT}{dx}$
$q_s = k(c_0 - \langle c\rangle)$ (figuur 5.25)	$q = \alpha\Delta T$

Stofdiffusie treedt op als er een concentratiegradiënt in de stof aanwezig is.

Stofoverdracht treedt op als er sprake is van stoftransport tussen twee fasen, zie figuur 5.25.
Bij stofoverdracht speelt de *kengrootheid van Sherwood* een rol:

$$Sh = \frac{k\delta}{D} = \frac{\Phi\delta}{\rho D}$$

waarin: Φ = massastroomdichtheid
δ = grenslaagdikte



Figuur 5.25 Stofoverdracht

Sh is analoog aan *Nu*.

6 Trillingen en geluid

Symbolen

A = oppervlakte [m^2]
A_s = absorberend vermogen [S = sabine $\triangleq$ 1 m^2 open raam]
a = versnelling [m/s^2], absorptiecoëfficiënt [–]
B = lawaaibelasting [Ke]
c = voortplantingssnelheid van een golfbeweging = geluidssnelheid [m/s]; compliantie [m/N]
c_g = groepssnelheid [m/s]
c_p,c_V = soortelijke warmte bij constante druk, resp. volume [J/(kg·K)]
E = elasticiteitsmodulus [N/m^2] = [Pa]; geluidsenergiedichtheid [J/m^3]
F = kracht; veerkracht [N]
f = frequentie [s^{-1}]
g = versnelling van de vrije val [m/s^2]
I = geluidsintensiteit [W/m^2]
i = geluidsisolatie [dB]
K = compressiemodulus [Pa]
k = cirkelrepetentie [m^{-1}]; veerstijfheid [N/m]
L_I = (geluids)intensiteitsniveau [dB]
L_N = luidheidniveau [foon]
L_p = (geluids)drukniveau [dB]
l = lengte [m]
m = massa [kg]
P = (akoestisch) vermogen [W]
p = momentele geluidsdruk [Pa]
p_s = statische druk [Pa]
R_a = akoestische golfweerstand [$N·s/m^3$]
S = luidheid [soon]
T = periodetijk; trillingstijd [s]
t = tijd [s]
u = uitwijking van trillend punt [m]
U = amplitude van de uitwijking [m]
v = snelheid; momentele deeltjessneheid [m/s]
x = afstand van trillend punt tot de bron [m]
Z_a = akoestische impedantie [$Pa·s/m^3$]
Z_s = specifieke akoestische impedantie [Pa·s/m]

γ = verhouding c_p/c_V
δ = dempingscoëfficiënt; decrescentie [s^{-1}]
λ = golflengte [m]
ϱ = dichtheid [kg/m^3]
σ = normaalspanning [Pa]
τ = nagalmtijd [s]
φ = fasehoek [rad]
ω = cirkelfrequentie [rad/s]

6.1 Harmonische trilling

Momentele uitwijking $: u = U \sin \varphi = U \sin \omega t$

Frequentie $: f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{\omega}{2\pi}$

Cirkelfrequentie $: \omega = 2\pi f = \dfrac{2\pi}{T} = \dfrac{\varphi}{t}$

Momentele snelheid $: v = \dfrac{d \cdot u}{d \cdot t} = \omega U \cos \omega t$

Momentele versnelling $: a = -\omega^2 U \sin \omega t = -\omega^2 u$

$$a = \frac{d \cdot v}{d \cdot t}$$

Kracht op een systeem met massa m en stijfheid k:
$F = -k \cdot u = -\omega^2 \cdot m \cdot u$

Stijfheid van het systeem:

$$k = \frac{\text{veerkracht}}{\text{optredende verplaastsing}} = \left|\frac{F}{u}\right| = m\omega^2$$

Reciproke waarde van k: *slapheid, meegaandheid, compliantie* (c).

Eigen frequentie van dit systeem: $f_e = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{k}{m}} = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{mc}}$

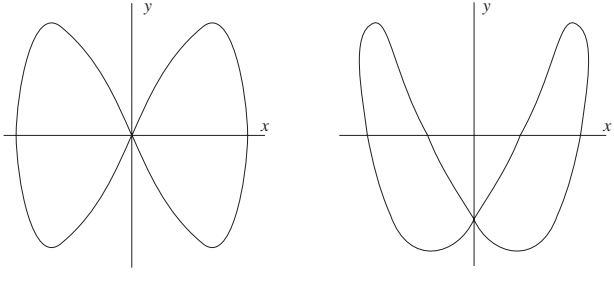
en de *trillingstijd*: $T_e = 2\pi\sqrt{\kappa k} = 2\pi\sqrt{mc}$

Tabel 6.1 Superpositie van harmonische trillingen

toestand	resulterende trilling
trillingsrichting en f gelijk; amplitude en fase verschillend $u_1 = U_1 \sin \omega t$ $u_2 = U_2 \sin (\omega t + \varphi)$	$u = u_1 + u_2 = U \sin (\omega t + \Psi)$ $\omega = \omega_1 = \omega_2$ $U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos \varphi$ $\Psi = \arctan \dfrac{U_2 \sin \varphi}{U_1 + U_2 \cos \varphi}$
trillingsrichting en amplitude gelijk; frequenties verschillend	optreden van zwevings frequentie $f_s = f_2 - f_1$
trillingsrichtingen loodrecht op elkaar; amplitude, frequentie en fase verschillend	$x = U_1 \sin \omega_1 t$ $y = U_2 \sin (\omega_2 t + \varrho)$ zie figuur 6.1

Periodetijd mathematische slinger: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

Gedempte trilling: $u = Ue^{-\delta t} \sin \omega t$



$x = U \sin \omega_1 t$
$y = U \sin 2\omega_1 t$

$x = U \sin \omega_1 t$
$x = U \sin\left(2\omega_1 t + \frac{\pi}{4}\right)$

Figuur 6.1 Lissajous-figuren (amplitude U in x-en y-richting gelijk)

6.2 Lopende golven

Longitudinale voortplanting: voortplantingsrichting van de golf valt samen met de trillingsrichting.

Transversale voortplanting: voortplantingsrichting van de golf staat loodrecht op de trillingsrichting.

Voortplantingssnelheid = snelheid waarmee de trillende beweging zich in de voortplantingsrichting voortplant:

$$c = f \cdot \lambda = \frac{\lambda}{T}$$

Voor de lopende golf in positieve x-richting is:

$$u = U \ \sin\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) = U \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

Voor een lopende golf in negatieve x-richting is:

$$u = U \ \sin\omega\left(t + \frac{x}{c}\right) = U \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)$$

Voortplantingssnelheid in:

- gas : $c = \sqrt{\frac{\gamma p_s}{\varrho}}$ (longitudinaal, adiabatisch proces)
- lucht : $f < 200\,\text{Hz}$: $c \approx 278\sqrt{\frac{T}{273}} \approx 16{,}8\sqrt{T}$

  $f > 200\,\text{Hz}$: $c \approx 331\sqrt{\frac{T}{273}} \approx 20{,}0\sqrt{T}$

  waarin: T = absolute temperatuur

– vloeistof $: c = \sqrt{\dfrac{K}{\varrho}}$ (longitudinaal)

– vaste stof $: c = \sqrt{\dfrac{E}{\varrho}}$ (longitudinaal in dunne staaf)

$$c = \sqrt{\frac{E}{\varrho} \cdot \frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}}$$ (longitudinaal in bulkmateriaal)

waarin: v = dwarscontractiecoëff. (zie hoofdstuk C2, par. 3.1)

– koord $: c = \sqrt{\dfrac{\sigma}{\varrho}}$ (transversaal)

Groepssnelheid, fasesnelheid

Bij het samenstellen van twee lopende golven in dezelfde richting:

$$u_1 = U \sin\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) \text{ en } u_2 = U \sin\omega'\left(t - \frac{x}{c'}\right)$$

ontstaat een lopende golf waarvan de amplitude langzaam fluctueert:

$$u = 2U \cos\tfrac{1}{2}(\Delta\omega \cdot t - \Delta k \cdot x) \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x)$$

waarin: $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$

$\Delta\omega = \omega' - \omega$ en $\Delta k = k' - k$

Er zijn groepjes golven met amplitude tot $2U$, die zich voortplanten met de *groepssnelheid*:

$$c_g = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}k} = c - \lambda\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}\lambda}$$

waarin: c = fasesnelheid

6.3 Staande golven

Een *staande golf* kan opgewekt worden door twee lopende golven met gelijke frequentie en amplitude, die zich in tegengestelde richting voortplanten:

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= U\sin 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)\\ u_2 &= U\sin 2\pi\left(\frac{t}{T}+\frac{x}{\lambda}\right)\end{aligned}\right\} \quad \rightarrow u = 2U\cos 2\pi\frac{x}{\lambda}\sin 2\pi\frac{t}{T}$$

alles betrokken op hetzelfde punt x.

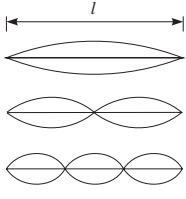
Amplitude van u: $U' = 2U\cos 2\pi\dfrac{x}{\lambda}$

- maxima (buiken) voor: $x = 0 \pm k\cdot\frac{1}{2}\lambda$
- minima (knopen) voor: $x = (1\pm 2k)\frac{1}{4}\lambda$

$\Big\}\quad k = 0, 1, 2, 3, \ldots$

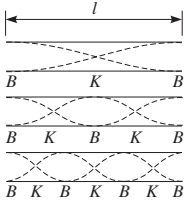
6.4 Trilling van snaren en luchtkolommen (orgelpijpen)

Gespannen snaar: eigen trillingen zijn transversale golven.



grondtoon	$l = \dfrac{\lambda_0}{2}$	$f_0 = \dfrac{c}{2l}$
1e boventoon	$l = 2\dfrac{\lambda_1}{2}$	$f_1 = \dfrac{2c}{2l}$
2e boventoon	$l = 3\dfrac{\lambda_2}{2}$	$f_2 = \dfrac{3c}{2l}$
ke boventoon	$l = (k+1)\dfrac{\lambda_k}{2}$	$f_k = (k+1)\dfrac{c}{2l}$

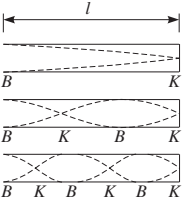
Luchtkolommen: eigen trillingen zijn longitudinale golven.
Open orgelpijpen



B = buik
K = knoop

grondtoon	$l = \frac{\lambda_0}{2}$	$f_0 = \frac{c}{2l}$
1e boventoon	$l = 2\frac{\lambda_1}{2}$	$f_1 = \frac{2c}{2l}$
2e boventoon	$l = 3\frac{\lambda_2}{2}$	$f_2 = \frac{3c}{2l}$
ke boventoon	$l = (k+1)\frac{\lambda_k}{2}$	$f_k = (k+1)\frac{c}{2l}$

Gesloten (gedekte) orgelpijpen (aan één zijde open)



grondtoon	$l = \frac{\lambda_0}{4}$	$f_0 = \frac{c}{4l}$
1e boventoon	$l = 3\frac{\lambda_1}{4}$	$f_1 = \frac{3c}{4l}$
2e boventoon	$l = 5\frac{\lambda_2}{4}$	$f_2 = \frac{5c}{4l}$
ke boventoon	$l = (2k+1)\frac{\lambda_k}{4}$	

6.5 Doppler-effect

Als geluidsbron B en punt van waarneming W zich ten opzichte van elkaar bewegen, zal de door W waargenomen frequentie f_w verschillen van de door B uitgezonden frequentie f. Bij passeren is Δf de waargenomen toonhoogte-verandering.

Tabel 6.2 Overzicht Doppler-effect

B → f			f_W → W
bewegingsrichting	$\xrightarrow{v_B}$	$\xleftarrow{v_W}$	$f_W = f\dfrac{c + v_W}{c - v_B}$
	$\xleftarrow{v_B}$	$\xrightarrow{v_W}$	$f_W = f\dfrac{c - v_W}{c + v_B}$
	$\xrightarrow{v_B}$	$\xrightarrow{v_W}$	$f_W = f\dfrac{c - v_W}{c - v_B}$
	$\xleftarrow{v_B}$	$\xleftarrow{v_W}$	$f_W = f\dfrac{c + v_W}{c + v_B}$
passeren	$\xrightarrow{v_B}$	0	$\Delta f = f\dfrac{2c \cdot v_B}{c^2 + v_B^2} \approx f\dfrac{2v_B}{c}$
EM-golven (radar)			$f' = f\sqrt{\dfrac{c - v}{c + v}}$

6.6 Geluidsleer (akoestiek)

Geluidssnelheid: zie par. 6.2 *Lopende golven* (voortplantingssnelheid) en hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.17.
Momentele *geluidsdruk* (p) = wisselende druk, gesuperponeerd op de statische (barometrische) druk (p_s).
De luchtdeeltjes voeren een longitudinale trilling uit.
Momentele deeltjessnelheid = v.

Specifieke *akoestische impedantie*: $Z_s = \dfrac{p}{v} = \varrho c \cdot \cos\varphi$

waarin: φ = fasehoek tussen p en v

Voor vlakke golf is $\varphi = 0$, dan geldt:

$$Z_s = R_a = \varrho c = \textit{karakteristieke impedantie of golfweerstand}$$

Voor lucht van 20 °C, $p = p_n$: $Z_s = 413\,\text{Pa}\cdot\text{s/m}$

Akoestische impedantie: $Z_a = \dfrac{Z_s}{A}$

Geluidsintensiteit: $I = \dfrac{\text{akoestisch vermogen } P}{\text{oppervlakte } A} =$

$$= \tfrac{1}{2}\varrho c\hat{v}^2 = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\varrho c}$$

waarin: $\hat{v}$ = snelheidsamplitude

Energiedichtheid: $E = \dfrac{I}{c}$ (voor vlakke golf)

Voor een zaal geldt:

$$P_0 \approx 13{,}8\frac{V_z \cdot E_0}{\tau}\,[\text{W}]$$

waarin:
P_0 = benodigde vermogen van geluidsbron voor gemiddelde energiedichtheid E_0
V_z = zaalvolume [m^3]
τ = nagalmtijd [s]

Intensiteitsniveau: $L_I = 10\log\dfrac{I}{I_0}\,[\text{dB}]$

waarin: $I_0 = 10^{-12}\,\text{W/m}^2$ = standaardintensiteit

Geluidsdrukniveau: $L_p = 20\log\dfrac{p}{p_0}\,[\text{dB}_{\text{SPL}}]$ (*zie tabel 6.3*)

waarin: $p_0 = 20\,\mu\text{Pa}$ = standaarddruk, bij 1000 Hz nog net waarneembaar.

Tabel 6.3 Geluidsdrukniveau van diverse geluidsbronnen

L_p (dB t.o.v. 20 µPa)	geluidsbron
0	gehoordrempel
20	bladgeritsel
40	rustige kamer
60	normaal gesprek
80	straatlawaai
100	symfonie-orkest
120	pijngrens

Luidheid: S = gewaarwording van geluidsgolven door het oor [soon]

$$S = 2^{0,1(L_I - 40)} \text{ of: } \log S = 0{,}03\ L_I - 1{,}2$$

Luidheidsniveau L_N [foon]. Alleen bij 1000 Hz valt de schaal van L_N (in foons) en de schaal van L_I (in dB) samen. Figuur 6.2 laat verschillende *isofonen* zien.
Wanneer bij geluiden beneden ong. 55 dB wordt gemeten met een correctie voor de gehoor-frequentiegevoeligheid, dan worden de meetresultaten gewoonlijk in dB(A) opgegeven. De 40-foon curve wordt dan als referentie gebruikt (vastgelegd door de *International Organization for Standardization, ISO*).

Geluidsabsorptie

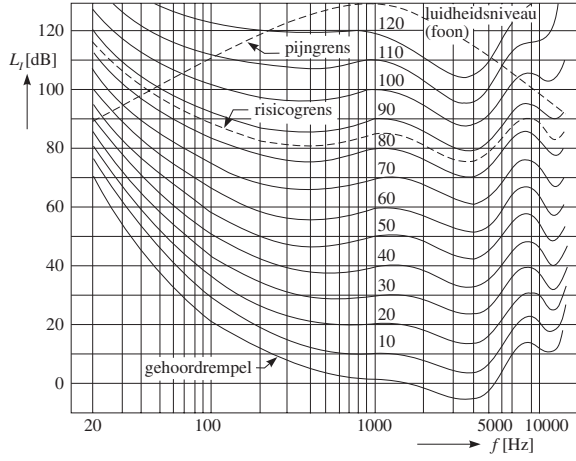
Absorberend vermogen van een oppervlak in een gesloten ruimte, uitgedrukt in m^2 'open raam' (sabine):

$$A_s = a \cdot A$$

a = absorptiecoëfficiënt (materiaalconstante)

$$= \frac{\text{niet teruggekaatste geluidsenergie}}{\text{opvallende energie}}$$

Gemiddelde geluidsintensiteit in een ruimte: $I_{gem} = \dfrac{P}{A_s}$



Figuur 6.2 Isofonen volgens Robinson en Dadson (Opmerking: de risicogrens is afhankelijk van de duur van de blootstelling aan het geluid en wordt door de wetgever voor de industrie vastgelegd)

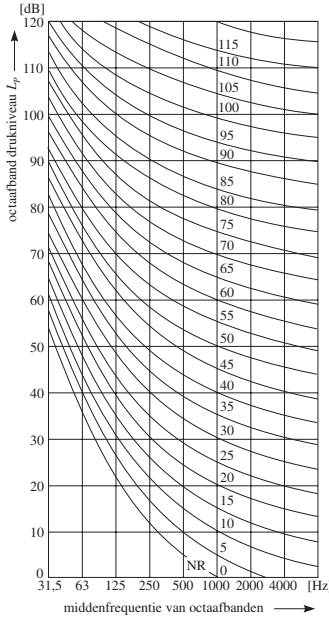
Geluidsisolatie

Voor een wand geldt: $i = 10 \log \frac{I_\mathrm{i}}{I_\mathrm{d}}$ [dB]

waarin:
I_i = intensiteit invallende geluid
I_d = intensiteit doorgelaten geluid

Massawet van Rayleigh: $i = 20 \log \frac{\omega \cdot m}{2\varrho \cdot c}$

waarin: m = massa van de wand



Figuur 6.3 Noise Rating (NR) krommen

Nagalmtijd van een ruimte (volume V en absorberend vermogen A_s):

$$\tau = -\frac{55}{c}\frac{V}{A\ln(1-\langle a\rangle)} \approx \frac{1}{6}\frac{V}{A_s} \qquad (\textit{Wet van Sabine})$$

waarin:
A = totale wandoppervlakte
$\langle a\rangle$ = gem. absorptiecoëff. van de wandmaterialen

Geluidshinder

Meetsystemen:
- geluidsdrukniveau in dB(A), zie Luidheidsniveau;
- volgens octaafband-meting en gebruik van *Noise Rating* (*NR*) *krommen* (numeriek gelijk aan octaafband-niveau in 1 kHz band), zie figuur 6.3.

Voor lawaaibelasting (*B*) t.g.v. vliegtuigbewegingen in de buurt van woongebieden wordt de *kosteneenheid* (*Ke*) als eenheid gebruikt.

$$B = 20 \log \Sigma(n \cdot 10^{L/15}) - 157 \quad [\text{Ke}]$$

waarin:

Σ = sommering over alle vliegtuigbewegingen in een jaar met $L > 75$ dB(A)
n = nachtstra actor(1 overdag, 1 tot 10 op andere tijden van het etmaal)
L = maximale geluidsdrukniveau buiten [dB(A)]

7 Licht en optica

Symbolen

A = oppervlakte [m^2], numerieke apertuur [–]
b = beeldpuntsafstand [m]
c = lichtsnelheid in een medium [m/s]
c_0 = lichtsnelheid in vacuüm [m/s]
d = dikte [m]
d_n = nabijheidspunt [m]
E = verlichtingssterkte [lx]
f = frequentie [Hz]; brandpuntsafstand [m]
g = grenshoek [rad]
H = belichting [lx·s]
I = lichtsterkte [cd]
i = invalshoek [rad]
K = lichtefficieëntie [–]
L = luminantie [cd/m^2] = [nit]
n = brekingsindex (voor glas: n_g)[–]
Q = hoeveelheid licht [lm·s]

R = straal [m]
r = straal, afstand [m]; brekingshoek [rad]
t = terugkaatsingshoek [rad]
V_{lin} = lineaire vergroting [–]
V_{ang} = angulaire (hoek)-vergroting [–]
$V(\lambda)$ = spectrale ooggevoeligheidsfactor [–]
v = voorwerpsafstand, verschuiving [m]

α = gezichtshoek; openingshoek [rad]
β = gezichtshoek [rad]; tophoek prisma [rad]
δ = deviatie; afwijking [rad]
ε = $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{r}}$ = permittiviteit [F/m]
λ = golflengte [m]
μ = $\mu_0 \cdot \mu_{\text{r}}$ = permeabiliteit [H/m]
Φ_{e} = stralingsenergiestroom [W]
Φ_{v} = lichtstroom [lm]
Ω = ruimtehoek [sr]

7.1 Lichtsnelheid

In vacuüm: $c_0 = 299{,}792\,458 \times 10^6 \approx 3 \times 10^8$ m/s.
In lucht mag deze snelheid ook gehanteerd worden.
Doorzichtig medium: lichtsnelheid altijd kleiner dan die in vacuüm ($c < c_0$).

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\text{e}_0 \cdot \mu_0}} \quad \frac{c}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\text{r}} \cdot \mu_{\text{r}}}}$$

Algemeen geldt voor het verband tussen snelheid, frequentie en golflengte:

$$c = f \cdot \lambda$$

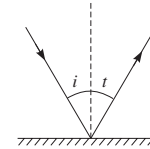
Een door een bron uitgezondenlichtstroom behoudt zijn frequentie bij overgang naar een ander medium:

$$\frac{c}{\lambda} = \text{constant}$$

De kleur wordt door de frequentie bepaald.

7.2 *Terugkaatsing (reflectie)*

Algemene wet van terugkaatsing:
hoek van inval = hoek van terugkaatsing, waarbij de hoeken gemeten worden t.o.v. de normaal op het oppervlak in het punt van terugkaatsing.



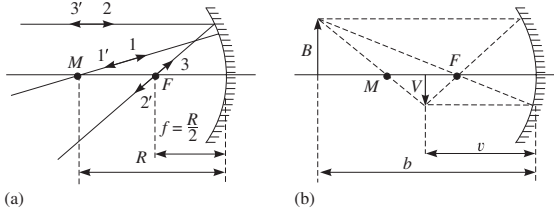
Figuur 7.1 $i = t$

Vlakke spiegel
- Voorwerp en beeld liggen symmetrisch t.o.v. het spiegelvlak.
- Het spiegelbeeld is virtueel.

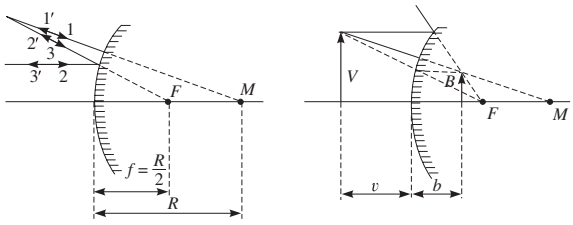
Gebogen spiegel
- Algemeen *sferisch* (deel van een bol) met middelpunt *M*. Op de *hoofd*as ligt het *hoofdbrandpunt F* op afstand $\frac{1}{2}R = f$ van de spiegel. f = *brandpuntsafstand*.
- *Holle spiegel:* een evenwijdige stralenbundel convergeert naar *F*.
- *Bolle spiegel:* een evenwijdig invallende stralenbundel divergeert schijnbaar vanuit *F*.

Figuren 7.2 en 7.3 laten zien:
a de stralengang van een paar karakteristieke stralen;
b de constructie van beeld *B* uit voorwerp *V*.

Afbeeldingsformule voor gebogen (sferische) spiegels: $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$



Figuur 7.2 Holle spiegel



Figuur 7.3 Bolle spiegel

Reëel voorwerp, beeld: $v, b > 0$; virtueel: $v, b < 0$
Holle spiegel: $f > 0$; bolle spiegel: $f < 0$

Reëel beeldpunt: gevormd door snijpunt van teruggekaatste lichtstralen (men kan het op een scherm opvangen).

Virtueel beeldpunt: gevormd door de verlengden van de teruggekaatste lichtstralen.

Lineaire vergroting: $V_{\text{lin}} = \left|\frac{b}{v}\right|$

Opmerking: bij gebogen spiegels geldt het bovenstaande alleen voor kleine invalshoeken; bij grote invalshoeken treedt *sferische abberatie* op.

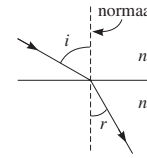
7.3 Breking (refractie)

Als een lichtstraal een grensvlak van twee doorzichtige sto en passeert, vindt *breking* van die lichtstraal plaats volgens figuur 7.4:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \qquad (\textit{wet van Snellius})$$

De verhouding van de *brekingsindices* is:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{c_2}{c_1}$$



Figuur 7.4 Breking

Algemeen is: $n = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r} = \frac{c_0}{c}$

Voor vacuüm (lucht) is $n = 1$.
Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.18.

Is stof 2 glas dan is: $\sin i = n_g \sin r = \frac{c_0}{c_g} \sin r$

Meestal opgegeven: *absolute brekingsindex* t.o.v. vacuüm.
De brekingsindex is afhankelijk van de golflengte van het gebruikte licht (*dispersie*) en van de temperatuur.
Dispersie is oorzaak van de kleurschifting in prisma's.

Grenshoek

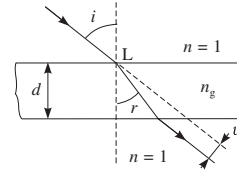
De *grenshoek* is de invalshoek bij een overgang van optisch dichter naar optisch minder dichte stof ($n_1 > n_2$), waarbij $r = 90°$:

$$\sin g = \frac{1}{n_g} \quad \text{(voor glas} \rightarrow \text{lucht)}$$

Totale terugkaatsing als $i > g$ (voor glas $\rightarrow$ lucht $g \approx 42°$)

Breking in planparallelle plaat (figuur 7.5)

Verschuiving: $v = \frac{d}{\cos r} \sin(i - r)$



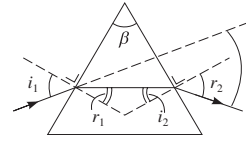
Figuur 7.5 Planparallelle plaat

Breking in prisma in lucht (fig. 7.6)

Er treedt *afwijking* of *deviatie* δ op t.g.v. dubbele breking.
Minimale deviatie als:
$i_1 = r_2$ en $r_1 = i_2$
δ_{min} te bepalen uit:

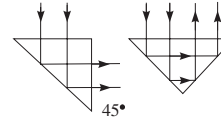
$$n = \frac{\sin\frac{1}{2}(\delta_{\min} + \beta)}{\sin\frac{1}{2}\beta}$$

waarin: β = tophoek van het prisma



Figuur 7.6 Prisma

Totale terugkaatsing in een prisma
Gebruikmakend van de terugkaatsing voor $i > g$ zijn er twee toepassingen (zie figuur 7.7):
a spiegelprisma;
b omkeerprisma (hier spreekt men van *retroreflectie*).



Figuur 7.7
Totale terugkaatsing

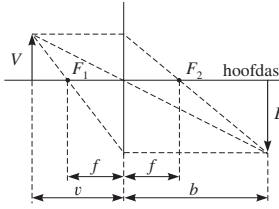
Van beide prisma's zijn de hoeken: 45°, 45° en 90°.

7.4 Lenzen

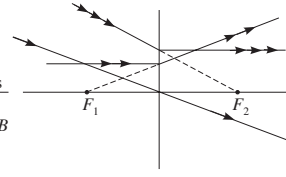
*Sferische lenzen*doorzichtige lichamen begrensd door gedeelten van boloppervlakken.
Bolle lens: in het midden het dikst, positief, convergerend, $f > 0$.
Holle lens: in het midden het dunst, negatief, divergerend, $f < 0$.
Hoofdas: as door de middelpunten van de samenstellende boloppervlakken.
Hoofdbrandpunten F_1 en F_2: liggen op afstanden f_1 resp. f_2 van het midden van de lens.
'*Dunne*' *lens*: lens waarvoor gesteld mag worden $|f_1| = |f_2| = f$.
Paraxiale lichtstralenlichtstralen die een kleine hoek (<10°) met de hoofdas maken.
De Wet van Snellius wordt dan: $n_1 i = n_2 r$.

Voor de *brandpuntsafstand* van een dunne lens geldt:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$



Figuur 7.8a Bolle lens



Figuur 7.8b Holle lens

waarin:

$n = \dfrac{n(\text{lens})}{n(\text{omgeving})}$ (lens in lucht: $n = n_{\text{glas}}$)

R_1 en R_2 = stralen van samenstellende bollen ($R>0$: bol naar buiten; $R<0$: hol naar buiten)

Sterkte van de lens $= \dfrac{1}{f}$, uitgedrukt in *dioptrie* (m^{-1}).

Algemene lensformule: $\dfrac{1}{v}+\dfrac{1}{b}=\dfrac{1}{f}$

Reëel voorwerp, beeld : v, $b>0$
Virtueel voorwerp, beeld: v, $b<0$

Opmerking. Zie voor definities *reëel* en *virtueel* par. 7.2; lees voor *teruggekaatst: gebroken.*

Systeem van tegen elkaar geplaatste lenzen: $\dfrac{1}{f_s}=\dfrac{1}{f_1}+\dfrac{1}{f_2}$

Voor twee lenzen op afstand d: $\dfrac{1}{f_s}=\dfrac{1}{f_1}+\dfrac{1}{f_2}-\dfrac{d}{f_1 f_2}$

7.5 Vergroting, optische instrumenten

Lineaire vergroting = verhouding van de lijn-lengte van het beeld tot de lijn-lengte van het voorwerp:

$$V_{\text{lin}} = \left|\frac{b}{v}\right| = \left|\frac{\text{beeldafstand}}{\text{voorwerpafstand}}\right|$$

$$\textit{Hoekvergroting} = \frac{\text{gezichtshoek } \beta \text{ met instrument}}{\text{gezichtshoek } \alpha \text{ zonder instrument}}$$

$$V_{\text{ang}} = \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{\tan\beta}{\tan\alpha}$$

Loep: $V_{\text{ang}} = \dfrac{d_{\text{n}}}{f}$

waarin: d_{n} = *nabijheidspunt*, wordt voor een normaal oog op 0,25 m gesteld

Microscoop: $V_{\text{ang}} = V_{\text{lin. obj.}} \cdot V_{\text{ang. oc.}} = V_{\text{lin. obj.}} \cdot \dfrac{0{,}25}{f_{\text{oc.}}}$

index: obj. = objectief = lens bij het voorwerp
oc. = oculair = lens bij het oog = loep

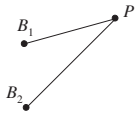
Scheidend vermogen bij ronde opening:

$$y = \frac{1{,}22\lambda}{2A} = \frac{0{,}61\lambda}{n\sin\frac{1}{2}\alpha} \,(Abbe)$$

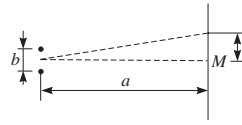
waarin: $n\sin\frac{1}{2}\alpha = A$ = *numerieke apertuur*
α = openingshoek aan voorwerpszijde

7.6 Interferentie en buiging

Twee *trillingsbronnen* B_1 en B_2 trillen in fase (figuur 7.9).
Voor punt P geldt $B_1P - B_2P = \Delta s$:



Figuur 7.9 Trillingsbronnen



Figuur 7.10 Trillingsbronnen (dicht bij elkaar)

– maximale amplitude voor $\Delta s = 2k\dfrac{\lambda}{2}$

– minimale amplitude voor $\Delta s = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}$

De maxima en minima liggen op hyperbolen. In beide gevallen is $k = 0, 1, 2, \ldots$

In figuur 7.10 is afstand tussen de trillingsbronnen $b \ll a$. De maxima en minima bevinden zich dan bij:

$$x = \frac{a}{b}\Delta s$$

Bepaling van golflengte met behulp van afstand d tussen eerste minima ter weerszijden van M:

$$\lambda = \frac{db}{a}$$

Buiging door een spleet (spleetbreedte b)

– minima bij $\sin\alpha = \dfrac{k\lambda}{b}$

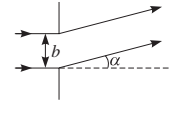
– minima bij $\sin\alpha = \dfrac{2k+1}{2b}\lambda$

$\Bigg\}\quad k = 1, 2, 3, \ldots$

en $\quad \alpha = 0$

Voor kleine α: $\quad \alpha(\text{1e min.}) = \dfrac{\lambda}{b}$

Voor cirkelvormige opening met diameter D: $\alpha(\text{1e min.}) = 1{,}22\dfrac{\lambda}{D}$



Figuur 7.11 Buiging door spleet

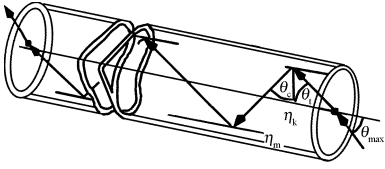
Buiging door tralie (tralieconstante p)

Hoofdmaxima voor $\sin\alpha = \dfrac{k\lambda}{p} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \ldots)$

Wanneer er n spleten zijn liggen er $n-1$ minima tussen twee hoofdmaxima.

7.7 Glasvezelkabel

Stap-indexvezel: fiber waarvan de kern relatief groot is ten opzichte van de mantel en waarbij de brekingsindex van kern en mantel constant zijn (zie figuur 7.12).



Figuur 7.12 Stap-indexvezel met kern (brekingsindex η_k) en mantel (η_m)

Grenshoek θ_c of *kritische hoek*: de hoek van het licht intern de fiber wanneer het onder hoek θ_{max} binnenvalt. Ofwel: de kleinste hoek waarbij volledige interne reflectie plaatsvindt. Voor de grenshoek geldt:

$$\cos\theta_c = \frac{\eta_m}{\eta_k}\,(\pm 1\text{ cm})\ \sin\theta_c = \cos\theta_t$$

Acceptatiehoek θ_{max}: maximale invalshoek waarbij de interne straal met de grenshoek reflecteert. Voor de acceptatiehoek geldt:

$$\theta_{max} = 2\ \arcsin\ \eta_k\sqrt{1-\cos^2\theta_c} = 2\ \arcsin(\eta_k \cdot \sin\theta_c)$$

Wanneer $\dfrac{\eta_m}{\eta_k} = 0{,}99$ is: $\theta_c \approx 8^\circ$ en $\theta_{max} \approx 24^\circ$

7.8 Straling en licht

Licht is een vorm van *elektromagnetische straling* in het frequentie-interval van 385 THz ($\lambda = 780$ nm) tot 790 THz ($\lambda = 380$ nm). In dit interval is de straling zichtbaar voor het menselijk oog.

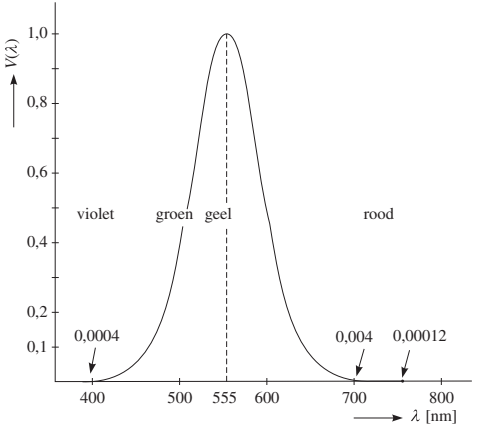
Monochromatisch licht is licht van één golflengte.

Het oog is niet even gevoelig voor alle golflengten (kleuren). Figuur 7.12 geeft de *spectrale ooggevoeligheidsfactor* $V(\lambda)$ voor een standaardoog als functie van λ. Bij 555 nm (geelgroen) treedt de grootste gevoeligheid op.
De lichtstroom Φ_v is de stralingsenergiestroom gewaardeerd volgens de fotopische ooggevoeligheidskromme (opgenomen bij grote luminantie).

$$\Phi_v = K \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} V(\lambda)\Phi_{e\lambda}\,d\lambda$$

waarin:
$\Phi_{e\lambda}$ = spectraal stralingsvermogen [W/m]
$\Phi_{e\lambda}\,d\lambda$ = stralingsvermogen over golflengtegebiedje $d\lambda$ [W]
K = fotometrisch lichtequivalent 682 lm/W

Bij een andere golflengte is:
$\Phi_v(\lambda) = K \cdot V(\lambda)\Phi_{e\lambda}$
N.B. de indices e (bij elektromagnetische straling) en v (bij licht) alleen gebruiken bij *gelijktijdig* optreden van straling en licht.



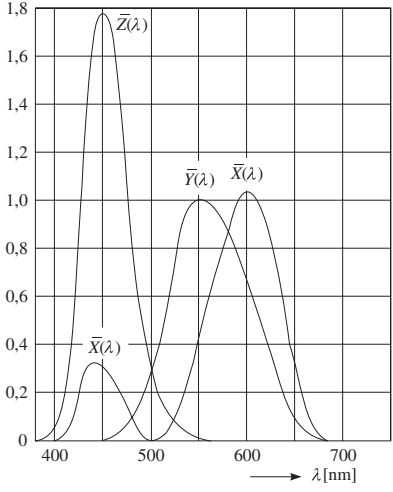
Figuur 7.13 Fotopische ooggevoeligheidskromme

7.9 Kleuren en kleurmeetkunde

Tabel 7.1 Enige kleuren (kleurstimuli) met bijbehorende golflengtegebieden (voor overgangskleuren, zie kleurendriehoek, figuur 7.14)

kleur	golflengte [nm]	kleur	golflengte [nm]
violet	380–420	geel	560–590
blauw	420–490	oranje	590–610
groen	490–560	rood	610–780

Kleurdefinitie CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*):
- *Spectrale tristimuluswaarden of distributiegetallen* $\overline{X}(\lambda)$, $\overline{Y}(\lambda)$ en $\overline{Z}(\lambda)$, in figuur 7.13 gegeven als functie van λ voor het *equi-energiespectrum*.



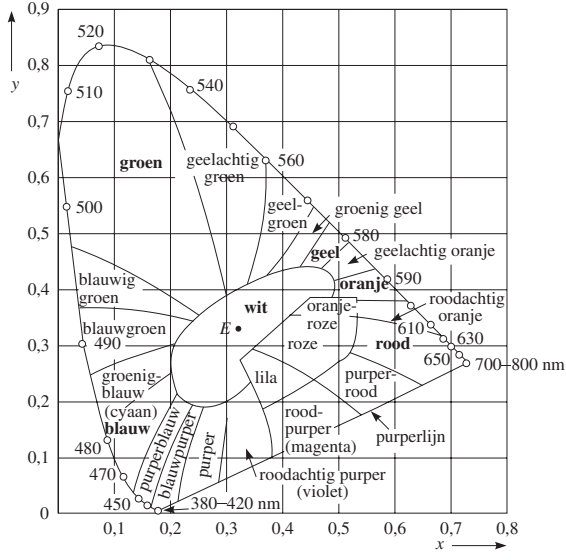
Figuur 7.14 Spectrale distributiekrommen $\overline{X}, \overline{Y}$ *en* $\overline{Z}$

– *Trichromatische kleurcoëfficiënten*, gedefinieerd volgens:
$X = K\int \overline{X}(\lambda)\Phi_{e\lambda}\,\mathrm{d}\lambda$
$Y = K\int \overline{Y}(\lambda)\Phi_{e\lambda}\,\mathrm{d}\lambda$
$Z = K\int \overline{Z}(\lambda)\Phi_{e\lambda}\,\mathrm{d}\lambda$

– *Kleurcoördinaten* x, y en z, af te leiden uit X, Y en Z:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$x + y + z = 1$
x en y zijn de coördinaten in de *kleurendriehoek*, (figuur 7.14).
E = *witpunt* (*equal energy white*), waarvoor $x = y = 0{,}333$.



Figuur 7.15 Kleurendriehoek met kleurgebieden volgens L.K. Kelly

7.10 Fotometrie

Door een *lichtbron* wordt uitgezonden:

a *Lichtsterkte* Φ [lumen], te vergelijken met de stralingsenergiestroom Φ [W].

b *Hoeveelheid licht* $Q = \int \Phi dt$ [1m·s], komt overeen met de stralingsenergie Q [J].

Aan de lichtbron kent men nu toe:

c *Lichtsterkte* $I = \dfrac{\Phi}{\Omega}$ [lm/sr = cd]

(de candéla is een grondeenheid, zie pag. A1/3)

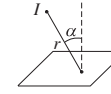
Op een verlicht vlak heerst een:

d *Verlichtingssterkte* $E = \dfrac{\Phi}{A}$ [lm/m^2 = lux = lx]

Uitgaande van de lichtsterkte I is de verlichtingssterkte in een punt van een vlak op afstand r:

$E = \dfrac{I\cos\alpha}{r^2}$

waarin: α = invalshoek



Figuur 7.16

Een objectieve maat voor de *helderheid* van een lichtbron:

e *Luminantie* $L = \dfrac{I}{A}$ [cd/m^2 = nit]

Voor een diffuus stralend oppervlak geldt voor de lichtsterkte in de richting α met de normaal:

$I_\alpha = I\cos\alpha$ (*cosinuswet van Lambert*)

Bij de fotografie speelt een rol:

f *Belichting* $H = \int E\ dt$ [lx · s]

8 Elektriciteitsleer

A = oppervlakte; doorsnede [m^2]
B = magnetische inductie [T]; susceptantie [S]
B_i = magnetische polarisatie [T]
B_n = component van $B \perp$ betreffende vlak [T]
C = capaciteit [F]
D = diëlektrische verplaatsing = fluxdichtheid [C/m^2]
D_n = component van $D \perp$ betreffende vlak [C/m^2]
D = diameter [m]
a = afstand [m]
E = elektrische veldsterkte [V/m]; spanning [V]
E_i = geïnduceerde spanning [V]
F = kracht [N]; vormfactor [–]
G = geleiding of conductantie [S]
H = magnetische veldsterkte [A/m]
H_s = component van H langs een kromme [A/m]
I = stroom [A]
J = stroomdichtheid [A/m^2]; (magnetische polarisatie [T])
j = magnetisch dipoolmoment [$N.m^2/A$]
k = koppelfactor [–]
L = zelfinductie [H]
M = mutuele inductie [H]; magnetisatie [A/m]
m = magnetisch moment [$A \cdot m$]
N = aantal windingen [–]
P = polarisatie [C/m^2]; vermogen [W]
p = elektrisch dipoolmoment [$C \cdot m$]
Q, q = lading [C]; blindvermogen [W]
R = weerstand [Ω]; straal v. cirkel, cilinder, bol [m]
R_m = reluctantie [H^{-1}]
r = afstand [m]
S = poynting vector [W/m^2]; schijnvermogen [W]
s = weglengte [m]
T = periode [s]
t = tijd [s]
U = spannings(potentiaal) verschil [V]
U = magnetische bronspanning [A]
V = potentiaal [V]
v = snelheid [m/s]
W = energie [J]

w = energie-dichtheid [J/m^3]
X = reactantie [Ω]
Y = admittantie [S]
Z = impedantie [Ω]
α = temperatuurscoëfficiënt [K^{-1}]
$\gamma(\sigma)$ = soortelijke geleiding, conductiviteit [S/m]
ε = permittiviteit [F/m]
$\kappa(\chi_m)$ = magnetische susceptibiliteit [–]
μ = permeabiliteit [H/m]; beweeglijkheid [m^2/(V · s)]
ϱ = soortelijke weerstand, resistiviteit [Ω · m]
Φ = magnetische flux [Wb]
$\chi(\chi_e)$ = elektrische susceptibiliteit = polariseerbaarheid [–]
Ψ = elektrische flux [C]
ω = cirkelfrequentie [s^{-1}]

8.1 Elektrostatica

Lading

Voor de kracht F [N] tussen twee *puntladingen* Q_1 en Q_2 [C] op een afstand r [m] van elkaar geldt:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \qquad (\textit{wet van Coulomb})$$

waarin: $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ = *diëlektrische constante* (*permittiviteit*)

ε_r = *relatieve permittiviteit*; de waarde hiervan wordt door het medium bepaald (zie hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.19). In vacuüm: $\varepsilon_r = 1$.

Kracht op een lading Q in een homogeen elektrisch veld E:

$$F = E \cdot Q \text{ [N]}$$

Veldsterkte

Rondom een puntlading Q is de *veldsterkte* op afstand r:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\cdot\frac{Q}{r^2} \text{ [V/m]}$$

Eerste hoofdstelling: langs een gesloten kromme geldt:

$$\oint E \cdot \mathrm{d}s = 0$$

Potentiaal: tussen punten A en B heerst in een veld E een *potentiaalverschil* (of *spanning*):

$$V_A - V_B = \int_A^B E \cdot \mathrm{d}s = U_{AB} \ [\mathrm{V}]$$

Potentiaal op afstand r van lading Q: $V = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \dfrac{Q}{r}$

Tweede hoofdstelling: de oppervlakte-integraal van de normaalcomponent D_n van de diëlektrische verplaatsing is gelijk aan de totaal ingesloten lading:

$$\oiint D_\mathrm{n} \ \mathrm{d}A = \Sigma Q = \Psi \qquad (\textit{stelling van Gauss})$$

Ψ = *elektrische flux* [C]
$D = \Psi/A = \varepsilon E =$ *diëlektrische verplaatsing* = fluxdichtheid [C/m^2]
$D = \varepsilon_0 E + P$

waarin:
P = *polarisatie* $= \varepsilon_0(\varepsilon_\mathrm{r}-1)E = \varepsilon_0 \chi E$
$\chi = \varepsilon_\mathrm{r} - 1 =$ *elektrische susceptibiliteit* (= *polariseerbaarheid*)

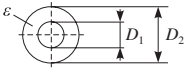
Capaciteit: $C = \dfrac{Q}{U} = \displaystyle\int \frac{I\mathrm{d}t}{U}$

Vlakke condensator : $C = \dfrac{\varepsilon A}{d}$ plaatopp.: A[m^2], plaatafstand: d[m]

Vlakke condensator met 2 media : $C = \dfrac{A}{d_1/\varepsilon_1 + d_2/\varepsilon_2}$

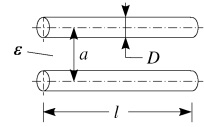
Bol-condensator : $C = 2\pi\varepsilon D$

Concentrische bollen : $C = 2\pi\varepsilon \dfrac{D_1 D_2}{D_2 - D_1}$



Evenwijdige cilindrische geleiders:

$$C = \frac{\pi\varepsilon l}{\ln[a/D + \sqrt{(a/D)^2 - 1}]}$$

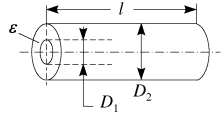


Figuur 8.1 Evenw. cilindrische geleiders

Voor $a/D \gg 1$ geldt:

$$C \approx \frac{\pi\varepsilon l}{\ln(a/D)}$$

Coaxiale cilinder: $C = \dfrac{2\pi\varepsilon l}{\ln D_2/D_1}$



Figuur 8.2 Coaxiale cilinder

Energie-inhoud van condensator:

$$W = \tfrac{1}{2}CU^2 = \tfrac{1}{2}QU \quad [\mathrm{J}]$$

Energiedichtheid in homogeen elektrisch veld:

$$w = \tfrac{1}{2}E \cdot D = \tfrac{1}{2}\varepsilon E^2 \qquad [\mathrm{J/m^3}]$$

Kracht tussen de platen van een vlakke condensator:

$$F = \tfrac{1}{2}E \cdot D \cdot A = \tfrac{1}{2}Q \cdot E \qquad [\mathrm{N}]$$

Parallelschakeling van condensatoren: $C_\mathrm{p} = C_1 + C_2 + \ldots$

Serieschakeling van condensatoren: $1/C_\mathrm{s} = 1/C_1 + 1/C_2 + \ldots$

Elektrische dipool: twee tegengestelde ladingen $+Q$ en $-Q$ op onderlinge afstand l.

Elektrisch *dipoolmoment:* $p = |Q| \cdot l$ $[C \cdot \mathrm{m}]$

8.2 *Elektrodynamica, stroomgeleiding*

Stroom: $I = \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$ [A]

Stroomdichtheid: $J = \dfrac{I}{A}$ [A/m^2]

Wet van Ohm:
- specifiek: $J = \gamma \cdot E$
- in U, I en R: $U = I \cdot R$, $I = \dfrac{U}{R}$, $R = \dfrac{U}{I}$
- in U, I en G: $I = G \cdot U$

waarin:
R = weerstand van de geleider = $\varrho \dfrac{l}{A}$ [Ω]

ϱ = soortelijke (specifieke) weerstand [$\Omega \cdot$ m]
G = geleiding = $1/R$ [S]
γ = soortelijke (specifieke) geleiding = $1/\varrho$[S/m]
$\gamma = |n_- \cdot \mu_- \cdot q_-| + n_+ \cdot \mu_+ \cdot q_+$
n = aantal deeltjes per m^3
q = deeltjeslading [C]
μ = beweeglijkheid deeltjes [m^2/(V $\cdot$ s)]
index $-$: negatief geladen deeltjes
index $+$: positief geladen deeltjes

In metalen alleen elektronen met lading $-e$.

Temperatuurscoëfficiënt α van soortelijke weerstand:

$$\alpha = \frac{1}{\varrho}\frac{\mathrm{d}\varrho}{\mathrm{d}T}$$

Temperatuursafhankelijkheid van weerstand:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha \Delta T)$$

Serieschakeling n weerstanden $: R_s = \sum_{i=1}^{n} R_i$

Parallelschakeling n weerstanden: $G_p = \sum_{i=1}^{n} G_i$ of $\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}$

Warmte-ontwikkeling in geleider met weerstand R:

Energie $W = \int U \cdot I \cdot \mathrm{d}t = \int P \cdot \mathrm{d}t$

Energie $P = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}$

Ster/driehoek-transformatie
Zie hoofdstuk G4, par. 2, *Elektrische leidingen*.

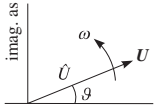
Wetten van Kirchhoff
Zie hoofdstuk I, *Elektronica*, par. 3.2.

Théorema's van Thévenin en Norton
Zie hoofdstuk I, *Elektronica*, par. 3.2.

8.3 Wisselstromen

Tabel 8.1 geeft een overzicht van begrippen.

Tabel 8.1 Wisselstromen: schrijfwijzen

'sinusvormige' schrijfwijze	'complexe' schrijfwijze
$u = \hat{U}\sin(\omega t + \vartheta)$ $i = \hat{I}\sin(\omega t + \psi)$	$\boldsymbol{u} = \hat{\boldsymbol{U}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\vartheta)} = \boldsymbol{U}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}$ $\boldsymbol{i} = \hat{\boldsymbol{I}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\psi)} = \boldsymbol{I}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}$ $\boldsymbol{U} = \hat{\boldsymbol{U}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\vartheta};\ \boldsymbol{I} = \hat{\boldsymbol{I}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi}$
$\hat{U}, \hat{I}$: amplitude u, i : momentele waarde ϑ, ψ: fasehoek	
	$\boldsymbol{U}, \boldsymbol{I}$: wijzer of fasor $\hat{U}, \hat{I}$: modulus ϑ, ψ: argument

impedantie (Z)

impedantie: $Z = \dfrac{U}{I}$	$\boldsymbol{Z} = \dfrac{\boldsymbol{U}}{\boldsymbol{I}} = \dfrac{\hat{U}}{\hat{I}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\vartheta-\psi)} = \lvert\boldsymbol{Z}\rvert\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}$
U, I: effective waarde (zie ook tabel 8.2)	
modulus : $\lvert Z\rvert = \dfrac{\hat{U}}{\hat{I}}$	$\boldsymbol{Z} = R + \mathrm{j}X;\ \lvert\boldsymbol{Z}\rvert = \sqrt{\boldsymbol{R}^2 + \boldsymbol{X}^2}$
argument : $\varphi = \vartheta - \psi$	$R = \lvert\boldsymbol{Z}\rvert\cos\varphi;\ X = \lvert\boldsymbol{Z}\rvert\sin\varphi$

admittantie (Y)

admittantie: $Y = \dfrac{1}{U}$	$\boldsymbol{Y} = \dfrac{\boldsymbol{I}}{\boldsymbol{U}} = \lvert\boldsymbol{Y}\rvert\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi}$
modulus : $\lvert Y\rvert = \dfrac{\hat{I}}{\hat{U}}$	$\boldsymbol{Y} = G + \mathrm{j}B$
argument : $-\varphi = \psi - \vartheta$	$\lvert\boldsymbol{Y}\rvert = \sqrt{G^2 + B^2}$

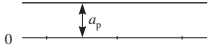
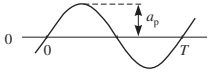
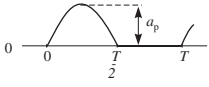
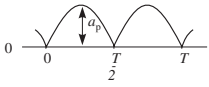
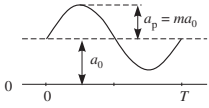
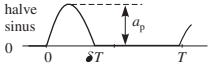
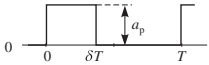
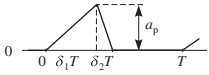
differentiëren van sinusvormige grootheid (spanning)

$\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \omega\hat{U}\cos(\omega t + \vartheta)$ $= \omega\hat{U}\sin\left(\omega t + \vartheta + \dfrac{\pi}{2}\right)$	$\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}}{\mathrm{d}t} = \mathrm{j}\omega\hat{U}\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\vartheta)}$ $= \mathrm{j}\omega\boldsymbol{u} = \omega\boldsymbol{u}\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}\pi/2}$

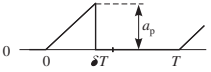
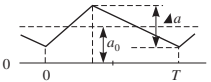
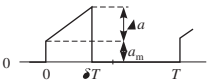
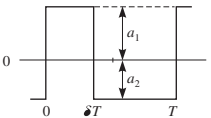
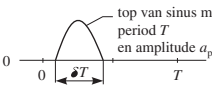
integreren van sinusvormige grootheid (spanning)

$\int u\mathrm{d}t = \dfrac{\hat{U}}{\omega}\sin\left(\omega t + \vartheta - \dfrac{\pi}{2}\right)$	$\int \boldsymbol{u}\mathrm{d}t = \dfrac{\hat{U}}{\mathrm{j}\omega}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\vartheta)} = \dfrac{\boldsymbol{u}}{\mathrm{j}\omega} = \dfrac{\boldsymbol{u}}{\omega}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi/2}$

Tabel 8.2 Effectieve en gemiddelde waarden

golfvorm $a(t)$	$A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a(t)^2 \, \mathrm{d}t}$	$A_{\text{gem}} = \frac{1}{T}\int_0^T a(t)\mathrm{d}t$
	a_p	a_p
	$\frac{a_p}{\sqrt{2}}$	0
	$\frac{a_p}{2}$	$\frac{a_p}{\pi}$
	$\frac{a_p}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\pi}a_p$
	$\sqrt{a_0^2 + \frac{1}{2}a_p^2}$ $= a_0\sqrt{1 + \frac{1}{2}m^2}$	a_0
	$a_p\sqrt{\frac{\delta}{2}}$ $(\delta < 1)$	$\frac{2}{\pi}\delta a_p$
	$a_p\sqrt{\delta}$ $(\delta < 1)$	δa_p
	$a_p\sqrt{\frac{\delta_1 + \delta_2}{3}}$	$\frac{\delta_1 + \delta_2}{2}a_p$

Tabel 8.2 (vervolg)

golfvorm $a(t)$	$A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a(t)^2\,\mathrm{d}t}$	$A_{\text{gem}} = \frac{1}{T}\int_0^T a(t)\mathrm{d}t$
	$a_p\sqrt{\frac{\delta}{3}}$	$\frac{\delta}{2}a_p$
	$a_p\sqrt{\frac{2\delta_1+3\delta_2}{3}}$	$(\delta_1+\delta_2)a_p$
	$a_0\sqrt{1+\frac{1}{12}\left(\frac{\Delta a}{a_0}\right)^2}$	a_0
	$\sqrt{\delta\left(a_m^2 + a_m\Delta a + \frac{(\Delta a)^2}{3}\right)}$	$\delta\left(a_m + \frac{\Delta a}{2}\right)$
	$\sqrt{\delta a_1^2 + (1-\delta)a_2^2}$	$\delta a_1 - (1-\delta)a_2$
	$a_p\sqrt{\frac{\delta}{2} + \frac{\sin 2\pi\delta}{4\pi}}$	$\frac{a_p}{\pi}\sin\pi\delta$

Effectieve waarde van periodieke grootheid $a(t)$

Definitie: $A(=A_{\text{eff}}) = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a(t)^2 \mathrm{d}t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{} a(t)^2 \mathrm{d}(wt)}$

Gemiddelde waarde van periodieke grootheid $a(t)$

Definitie: $A_{\text{gem}} = \frac{1}{T}\int_0^T a(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} a(t)\mathrm{d}(\omega t)$

Vormfactor

Definitie: $F = \dfrac{\text{effectieve waarde}}{\text{gemiddelde waarde}}$

Voor sinusvormige spanning of stroom:

$$F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1{,}11$$

Vermogen (voor sinusvormig verloop van spanning en stroom)

Werkzaam vermogen $P = U \cdot I \cdot \cos\,\varphi$ ($\cos\,\varphi$ = arbeidsfactor)
Schijnvermogen $S = U \cdot I$
Blindvermogen $Q = U \cdot I \cdot \sin\,\varphi$

Draaistroom

Sterschakeling $U_l = U_f\sqrt{3}$ $I_l = I_f$
Driehoekschakeling $U_l = U_f$ $I_l = I_f\sqrt{3}$
Vermogen $P = 3U_f \cdot I_f \cdot \cos\varphi = \sqrt{3}U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi$
waarin: U_l = lijnspanning, U_f = fasespanning
I_l = lijnstroom, I = fasestroom

8.4 Magnetostatica (uitwendige stromen = 0)

1e Hoofdstelling: voor de magnetische veldsterkte, geïntegreerd langs een gesloten kromme s geldt:

$$\oint H_s \cdot \mathrm{d}s = 0$$

2e Hoofdstelling: voor de magnetische inductie, geïntegreerd over een gesloten oppervlak A geldt:

$$\oiint B_n \cdot \mathrm{d}A = 0$$

Magnetische flux door het oppervlak A:

$$\Phi_A = \int_A B_n \cdot \mathrm{d}A \quad [\mathrm{wb}]$$

Voor homogeen veld: $\Phi = B \cdot A$ als $B \perp A$

Magnetische inductie $B = \mu H$ [T]
$\mu = \mu_0 \mu_r$ = permeabiliteit
μ_r = relatieve permeabiliteit, zie par. 9 *Magnetisme*

Ook: $B = \mu_0 H_u + J$ [T]

waarin:
H_u = uitwendig aangelegde veldsterkte [A/m]
$J = B_i$ = *magnetische polarisatie*
$J = B - \mu_0 H_u = \mu_0 \kappa H_u = \mu_0 M$
$M = \kappa H_u$ = *magnetisatie*
$\kappa = \mu_r - 1$ = *magnetische susceptibiliteit* (ook χ_m)

Magnetisch moment (*elektromagnetisch stroommoment*)
Een magneet heeft een *magnetisch moment* m als het koppel op die magneet in een veld met inductie B, even groot is als het koppel dat een winding met stroom I en oppervlak A in dat veld ondervindt:

$$m = A \cdot I \quad [\mathrm{A \cdot m^2}] \qquad (\textit{regel van Weber})$$

Magnetisch dipoolmoment:

$$j = \mu_0 \cdot m \quad [\mathrm{N \cdot m^2/A}]$$

Kracht tussen twee magneetpolen:

$$F = \frac{\Phi_1 \Phi_2}{4\pi\mu r^2} \quad [\mathrm{N}] \qquad (\textit{wet van Coulomb voor magneetpolen})$$

waarin: Φ_1, Φ_2 = fluxen door polen 1 en 2 uitgezonden
r = afstand tussen de puntvormige polen
μ = permeabiliteit van tussenliggende medium

Magnetostatische energie:

$$W_\mathrm{m} = \frac{1}{2}\int_V H \cdot B \mathrm{d}V \quad [\mathrm{J}]$$

waarin: V = volume waar homogeen magnetisch veld heerst

8.5 Elektromagnetisch veld

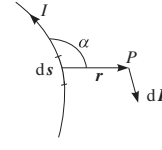
1e Hoofdstelling wordt nu (zie par. 8.4):

$$\oint H_\mathrm{s} \cdot \mathrm{d}s = \int_A J \cdot \mathrm{d}A = \sum I \qquad (\textit{wet van Ampère})$$

Magnetisch veld ten gevolge van een stroom door een geleider:

$$\mathrm{d}H = \frac{I \mathrm{d}s}{4\pi r^2} \sin\alpha$$

(*Formule van Laplace*)



Figuur 8.3 Stroomgeleider

$\mathrm{d}H \perp$ door ds en P in richting volgens *kurketrekkerregel* draaiend van I naar r (positief van ds naar P). In vectorvorm:

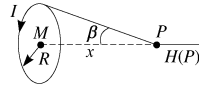
$$\mathrm{d}\boldsymbol{H} = \frac{I\,\mathrm{d}s \times \boldsymbol{r}}{4\pi r^3} \qquad (\textit{wet van Biot en Savart})$$

Voor oneindig *lange rechte geleider* geldt:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [\mathrm{A/m}]$$

Veldsterkte in het middelpunt van een *cirkelvormige geleider* (straal R):

$$H(M) = \frac{I}{2R}$$



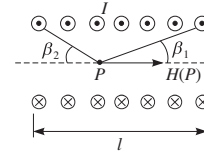
Figuur 8.4 Cirkelvormige geleider

Veldsterkte buiten cirkelvormige geleider op as van de cirkel (fig. 8.4):

$$H(P) = \frac{IR^2}{2x^3}$$

Veldsterkte in een *korte spoel* met N windingen en lengte l (fig. 8.5):

$$H(P) = \frac{NI}{2l}(\cos\beta_1 + \cos\beta_2)$$



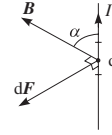
Figuur 8.5 Korte spoel

Kracht op een stroomgeleider in een magnetisch veld met inductie B (figuur 8.6):

$$\mathrm{d}F = (I\ \mathrm{d}s) \cdot B \cdot \sin\alpha$$

of $\mathrm{d}\boldsymbol{F} = I\ \mathrm{d}s \times \boldsymbol{B}$

$\mathrm{d}\boldsymbol{F} \perp I\,\mathrm{d}s$ en $\boldsymbol{B}$ (rechtscyclisch systeem)



Figuur 8.6 Kracht op stroomgeleider

Voor een *rechte* stroomdraad met lengte $l\perp$ magnetisch veld B geldt de '*motorformule*':

$$F = I \cdot l \cdot B \text{ of } \boldsymbol{F} = (\boldsymbol{I} \times \boldsymbol{B}) \cdot l$$

Kracht tussen twee evenwijdige rechte stroomgeleiders met lengte l op afstand r:

$$F = \mu \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi r} \cdot l \quad [\mathrm{N}]$$

Lorentzkracht = kracht op een bewegende lading q (snelheid v) in een homogeen veld B:

$$F = B \cdot v \cdot q \cdot \sin\alpha \text{ of } \boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \quad [\mathrm{N}]$$

Inductiewet van Faraday

Indien N windingen dezelfde flux Φ omvatten is:

$$E_i = -N \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \quad [\mathrm{V}]$$

(minteken volgens *wet van Lenz*)

Zelfinductie L

De *zelfinductie* van een spoel is de gekoppelde flux per eenheid van stroom:

$$L = \frac{\Sigma(N\Phi)}{I} = -\frac{1}{I}\int E \, \mathrm{d}t \quad [\mathrm{H}]$$

$$E_L = -L \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

Voor een zeer lange dunne *solenoïde* en een dunne *toroïde* (ringkern) is:

$$L = \mu \frac{N^2 A}{l}$$

Ringkern met luchtspleet (ijzer-weglengte l, luchtspleet d):

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l/\mu_r + d} \approx \mu_0 \frac{N^2 A}{d}$$

Algemeen geldt: $L = \dfrac{N^2}{R_m}$ waarin: $R_m = \sum \dfrac{l}{\mu A}$

Wet van Hopkinson:

$R_m = \dfrac{U_m}{\Phi}$ = *magnetische weerstand* (= *reluctantie*) $[H^{-1}]$

$U_m = NI$ = *magnetische spanning* [A]

Energie in een spoel met zelfinductie L:

Algemeen: $W_m = \frac{1}{2}\Phi(N \cdot I) = \frac{1}{2}\Phi \cdot U_m$ [J]

$w_m = \frac{1}{2} B \cdot H$ [J/m^3]

Constante μ: $W_m = \frac{1}{2} L \cdot I^2$ [J]

$w_m = \frac{1}{2}\mu H^2$ [J/m^3]

Mutuele inductie M

Tengevolge van een stroomverandering in een gekoppelde spoel wordt een spanning opgewekt:

$$E_2 = M \frac{dI_1}{dt} = \frac{d\Phi_{21}}{dt}$$

$M = \Phi_{21}/I$ = gekoppelde flux per eenheid van stroom

$M = k\sqrt{L_1 L_2}$ waarin: k = *koppelfactor* ($k \leqslant 1$)

8.6 Vergelijkingen van Maxwell

De vergelijkingen in integraal- en vectorvorm:

1 $\oint H_s \cdot ds = I + \dfrac{d\Psi}{dt}$ (integratie langs gesloten kromme s)

$$\text{rot}\ \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \qquad (\textit{wet van Maxwell})$$

waarin: H_s = component van H langs kromme s
I = door kromme omvatte stroom
Ψ = door kromme omvatte elektrische flux

2 $$\oint E_{\mathrm{s}} \cdot \mathrm{d}s = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{D}t} \qquad (\text{integratie langs gesloten kromme } s)$$

$$\text{rot}\ \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \qquad (\textit{wet van Faraday})$$

waarin: E_s = component van E langs kromme s
Φ = door kromme omvatte magnetische flux

3 $$\oiint D_{\mathrm{n}} \cdot \mathrm{d}A = Q = \int_V \varrho \cdot \mathrm{d}\,V \qquad (\text{integratie over gesloten oppervlak } A)$$

$$\text{div}\ \boldsymbol{D} = \varrho_{\text{vrij}} \qquad (\textit{wet van Gauss voor elektrisch veld})$$

waarin: D_n = component $D \perp$ oppervlak A
Q = elektrische lading binnen A
V = volume binnen A
ϱ_{vrij} = dichtheid van de vrije ladingen binnen A

4 $$\oiint B_{\mathrm{n}} \cdot \mathrm{d}A = 0 \qquad (\text{integratie over gesloten oppervlak } A)$$

$$\text{div}\ \boldsymbol{B} = 0 \qquad (\textit{wet van Gauss voor magnetisch veld})$$

waarin: B_{n} = component van $B \perp$ oppervlak A

Poyntingvector ($\boldsymbol{S}$) wordt gedefinieerd volgens:

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = \oiint S_n \cdot \mathrm{d}A$$

$\boldsymbol{S}$ is het vectorproduct van $\boldsymbol{E}$ en $\boldsymbol{H}$: $\boldsymbol{S} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}$

9 Magnetisme

Zie ook par. 8.4 *Magnetostatica*

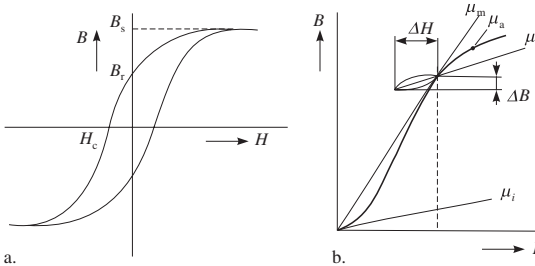
9.1 Typen magnetisme

Diamagnetisme: μ_r iets kleiner dan 1, dus $\kappa(\chi_m) < 0$
de meeste sto en zijn zwak diamagnetisch
Paramagnetisme: μ_r iets groter dan 1, dus $\kappa(\chi_m) > 0$, maar $\ll 1$
paramagnetisch zijn o.a. oplossingen van ijzerzouten
Ferromagnetisme: $\mu_r \gg 1$, tot 10^5
ferromagnetisch zijn ijzer, nikkel en cobalt en legeringen daarvan
Ferrimagnetisme: $\mu_r \gg 1$, tot 2 à $3 \cdot 10^3$
ferrimagnetisch zijn de ferrieten, gebruikt in m.f. en h.f. techniek.

Zacht-ferromagnetische materialen, Mn-Zn en Ni-Zn ferrieten worden toegepast in transformatoren en smoorspoel-kernen.
Hard-ferromagnetische materialen en *borium-ferriet* (*ferroxdur*) worden gebruikt in permanente magneten.
Voor magnetische eigenschappen, zie hoofdstuk El *Materialen*, tabel 1.22.

De *curie-temperatuur* (T_c) is belangrijk bij ferro- en ferrimagnetische materialen. Bij overschrijding van T_c gedragen deze materialen zich paramagnetisch.

9.2 Hysteresislus



Figuur 9.1 (a) Hysteresislus of B-H-kromme, (b) maagdelijke kromme (aanloopkromme) van ferromagnetisch materiaal

Symbolen in figuur 9.1:
B_r = remanentie [T]
B_s = verzadigingsinductie [T]
H_c = coërcitiefkracht [A/m]

μ_a = amplitude-permeabiliteit $\quad \mu_a = \dfrac{B}{H}$

μ_i = initiële (aanvangs) permeabiliteit $\quad \mu_i = \lim\limits_{H \to 0} \dfrac{B}{H}$

μ_m = maximale permeabiliteit

μ_Δ = incrementale permeabiliteit $\quad \mu_\Delta = \dfrac{\Delta B}{\Delta H}$

μ_{rev} = reversibele permeabiliteit $\quad \mu_{rev} = \dfrac{dB}{dH} = \lim\limits_{\Delta H \to 0} \mu_\Delta$

Meestal heeft μ betrekking op een binnenlus.

Hysteresisverliezen (P_h)
Bij het doorlopen van de lus treden *verliezen* op, evenredig met de oppervlakte binnen de doorlopen kromme.
P_h neemt toe met de frequentie en het kwadraat van de inductie.

Bij hoge frequenties moet rekening gehouden worden met een niet-lineair verband tussen B en H; μ moet dan complex genomen worden.

9.3 Permanente magneten

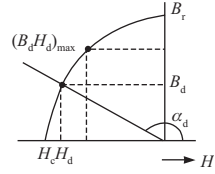
Een 'sterke' magneet moet een groot product $(B_d H_d)_{max}$ vertonen; hierin hebben B_d en H_d betrekking op de demagnetiseringskromme, zie figuur 9.2. Dit komt neer op grote waarden van B_r en H_c.

Staafmagneet

De zgn. *poolsterkte* van een staafmagneet wordt gekarakteriseerd door de flux die door beide polen wordt uitgezonden:

$$\Phi = \frac{j}{l_s} = \frac{\mu_0 m}{l_s} \quad [\mathrm{Wb}]$$

waarin: l_s = lengte magneet [m]
j = magnetisch dipoolmoment [Wb · m]
m = magnetisch moment [A · m^2]



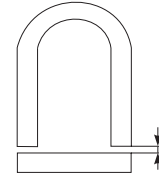
Figuur 9.2 Demagnetiseringskromme

Zie ook par. 8.4 *Magnetostatica*.

Hoefmagneet met sluitstuk (figuur 9.3)

$$\frac{H_y}{H_l} = -\frac{2d}{l_y} \text{ en } B_y = B_l$$

waarin: d = luchtspleetlengte
l_y = totale ijzerlengte



Figuur 9.3 Hoefmagneet

Voor de getekende situatie komt de magneet in de toestand (zie figuur 9.2):

$$\frac{B_d}{H_d} = -\mu_0 \frac{l}{2d} \sim tan\ \alpha_d$$

Veldenergie in luchtspleet:

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} B^2 V_1 \quad [J]$$

waarin: V_1 = volume luchtspleet [m^3]

Draagkracht van een magneet:

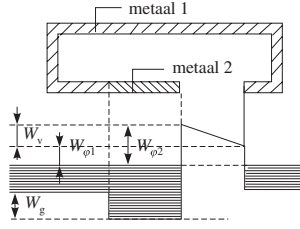
$$F = \frac{A}{2\mu_0} B^2 \quad [N]$$

waarin: A = doorsnede van de kern [m^2]

10 Contactpotentiaal, thermo-elektriciteit

10.1 Contactpotentiaal en volta-spanning

W_φ = uittree – energie
$W_v = W_{\varphi 2} - W_{\varphi 1}$
W_g = galvani – energie



Figuur 10.1 Elektronenenergie bij contact tussen twee verschillende metalen

Contactpotentiaalverschil of galvani-spanning:

$$V_c = \frac{W_g}{e} \quad [\text{V}] \quad (\text{indien } W_g \text{ in joule})$$

$$V_c = W_g \quad [\text{V}] \quad (\text{indien } W_g \text{ in eV; } 1\,\text{eV} \approx 0{,}16 \times 10^{-18}\,\text{J})$$

Volta-spanning:

$$V_v = W_v = W_{\varphi 2} - W_{\varphi 1} \quad [\text{V}]$$

Tabel 10.1 Waarden van de uittree-energie W_φ voor diverse metalen en halfgeleiders

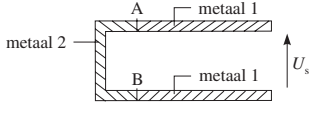
	W_φ[eV]		W_φ[eV]		W_φ[eV]		W_φ[eV]
Ag	4,70	Cd	4,04	Hg	4,53	Pt	5,42
Al	4,20	Ce	2,88	K	2,25	Sb	4,56
Au	4,71	Co	4,25	Li	2,46	Sc	4,87
B	4,60	Cs	1,94	Mg	3,70	Si	3,59
Ba	2,52	Cu	4,48	Mn	3,95	Sr	2,74
Be	3,92	Fe	4,63	Na	2,28	Ti	4,65
C	4,36	Ga	4,16	Ni	4,91	W	4,53
Ca	3,20	Ge	4,62	Pb	4,04	Zn	4,27

10.2 Thermo-elektriciteit

Seebeck-effect

De contactpotentiaal is afhankelijk van de temperatuur. In het circuit van figuur 10.2 ontstaat een *thermo-elektrische spanning* U_s als er een temperatuurverschil tussen de plaatsen A en B bestaat. Bij benadering is:

$$U_s = V_{cA} - V_{cB}$$



Figuur 10.2 Seebeck-effect ($T_A \neq T_B$)

Tabel 10.2 geeft de *thermo-elektrische spanningsreeks* waarin metalen gerangschikt kunnen worden. In het circuit van figuur 10.2 geldt dan:

$$U_s = V_{T1} - V_{T2} \quad \text{voor} \quad T_A - T_B = 1\,^{\circ}\text{C}$$

Bij de warme contactplaats wordt dàt metaal positief dat het hoogst in de reeks staat.

Tabel 10.2 Thermo-elektrische spanningsreeks

metaal	$V_T[\mu V]$	metaal	$V_T[\mu V]$	metaal	$V_T[\mu V]$
Te	570	Ag	77	Mg	74
Si	520	Zn	77	Al	74
Sb	120	Rh	76,5	Hg	70
Fe	88	Ir	76	Pt	70
W	78	manganine	76	Ni	55
Cu	77,5	Sn	74,5	Co	54
Au	77	Pb	74,5	constantaan	36
				Bi	0

Thermokoppel = thermo-element berust op Seebeck-effect. De meest gebruikte combinaties staan in tabel 10.3.

Tabel 10.3 Meest gebruikte thermokoppels

thermokoppel	spanning [mV bij 100° K temp. verschil]
Pt-PtRh	0,645
NiCr-Ni	4,095
Cu-Constantaan	4,28
Cu-CuNi	4,25
Fe-Constantaan	5,40
Fe-CuNi	5,37

De hierboven genoemde thermokoppels zijn genormaliseerd volgens DIN 43710.

Peltier-effect

Een stroom door een contactplaats van twee verschillende metalen of halfgeleiders veroorzaakt warmte-ontwikkeling of warmte-opname op die contactplaats:

$$W = \pi_{1,2} \cdot I \cdot t \quad [\mathrm{J}]$$

waarin: $\pi_{1,2} =$ *peltier-coëfficiënt* [J/C]

De peltier-coëfficiënt $\pi_{1,2}$ is positief als de stroom van 1 naar 2 warmte-absorptie veroorzaakt; hij is negatief als bij die stroom warmte vrijkomt.

Peltier-elementen en *peltier-batterijen* worden het meest uitgevoerd met *N*- en *P*-versies van de halfgeleiders:

- bismut-telluride (Bi_2Te_3).
- bismut-selenide (Bi_2Se_3).
- antimoon-telluride (Sb_2Te_3).
- loodtelluride (PbTe).

Literatuur

- Alonso, M., E.J. Finn (bewerkt en vertaald door J. Rekveld)
  Fundamentele natuurkunde ten dienste van het wetenschappelijk onderwijs
  Overberg, Delta Press.
- Buuren, B. van
  Elektronen en kernen
  Culemborg, Educa Boek.
- Buuren, B. van, en J.A. de Jong
  Natuurkunde voor het Technisch Hoger Onderwijs
  Culemborg, Educa Boek.
- *Dubbel—Taschenbuch für den Maschinenbau*
  Berlin, Springer-Verlag.
- Fraanje, M.J.
  Vloeistofmechanica
  Amsterdam, Agon Elsevier.
- Hammer, A. en K. Hammer
  Vademecum van de Natuurkunde
  Prisma 1147.
- Kip, A.F.
  Elektriciteit en magnetisme
  Prisma-Technica nr. 6.
- Putte, L.A. van de
  Stromingsleer
  Amsterdam, Agon Elsevier.
- Ringnalda, J.
  Technische stromingsleer
  Culemborg, Educa Boek.
- Smith, J.M., E. Stammers, L.P.D.M. Janssen
  Fysische transportverschijnselen
  Delftse Uitgevers Maatschappij.
- *Winkler Prins Technische Encyclopedie*
  Amsterdam/Brussel, Elsevier.
- Young, Hugh D.
  Mechanica en Thermodynamica
  Prisma-Technica nr. 42.

Scheikunde A5

1 Algemeen
1.1 Basisbegrippen
1.2 Chemische reacties
1.3 Diverse begrippen
1.4 Elementen en hun ionen

2 Tabellen
2.1 Overzicht
2.2 Thermodynamische gegevens
2.3 Analytische gegevens
2.4 Diversen

Materiaalgegevens zijn te vinden in hoofdstuk El *Materialen*:
- par. 1.1 *Fysische gegevens*;
- par. 1.2 *Praktische gegevens voor de scheikunde* (in deze paragraaf is o.a. van veel stoffen de chemische formule te vinden wanneer men alleen de triviale-of handelsnaam kent).

Voor gegevens m.b.t. constanten, zie hoofdstuk A4 *Natuurkunde*:
- par. 1 *Natuurconstanten*;
- par. 3, tabel 3.1 *Van der Waals constanten*.

1 Algemeen

1.1 Basisbegrippen

Element en atoom

Een *element* is een stof bestaande uit *atomen* waarvan de kernen dezelfde positieve elektrische lading hebben. Die lading krijgt de kern door de aanwezigheid van een heel aantal *protonen*. Het aantal protonen komt overeen met het *atoomnummer*. In de kern bevinden zich bovendien een bepaald aantal *neutronen* (uitgezonderd waterstof) die de kern stabiliseren door de afstotende elektrische ladingen te 'verdunnen'. Om het atoom elektrisch neutraal te maken is er om de kern een 'wolk' van *elektronen* met gelijke maar tegengestelde (negatieve) lading als de kern.

Isotopen

Een element kan uit verscheidene soorten bestaan, de zogenaamde *isotopen*, die zich enkel onderscheiden door een verschillend aantal neutronen. Bij elkaar hebben alle elementen enkele honderden isotopen, al dan niet stabiel.

Molecuul

Een *molecuul* is samengesteld uit atomen van (één,) twee of meer verschillende elementen, die in een bekende/gedefinieerde verhouding aanwezig zijn.

Mol, atoommassa en molecuulmassa

De eenheid *mol* (niet te verwarren met 'molair') is een maat voor het aantal deeltjes. Dit getal noemt men de *constante van Avogadro* $N_A = 6.02214\ 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$. Zie ook hoofdstuk A1 *Eenheden en symbolen*, par. 1.1 en A4 *Natuurkunde*, par. 3.3.

De *atoommassa* (zie ook tabel 1.2, pag. A5/12) van een element geeft aan hoeveel gram de massa van één mol atomen van dat element bedraagt. Het is gebruikelijk dat hierbij rekening wordt gehouden met het in de natuur voorkomen van isotopen. Zo is de atoommassa van Cl^{35} (Cl = chloor, 35 geeft de atoommassa aan) anders dan die van Cl^{37}. De waarde van de atoommassa van chloor is een gewogen gemiddelde van de atoommassa's van de isotopen die in de natuur voorkomen.

De *molecuulmassa* van een stof geeft aan hoeveel gram de massa van één mol moleculen van die stof bedraagt. Daartoe worden de atoommassa's van alle in het molecuul voorkomende elementen, naar voorkomen, opgeteld. Dus de molecuulmassa van H_2O is:

$$(2 \cdot H) + (1 \cdot O) = (2 \cdot 1{,}0079) + (1 \cdot 15{,}999)$$
$$= 18{,}0148 \ (\mathrm{gr/mol})$$

Zie ook tabel 2.2, pag. A5/15 en tabel 2.3, pag. A5/17.

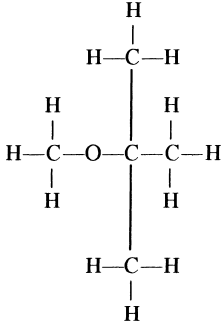
Chemische formule

Een stof kan gekarakteriseerd worden door een *formule*. Hierin worden de elementen en hun verhouding tot elkaar genoemd.

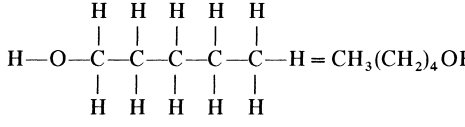
Voorbeeld. Methyltertiairbutylether heeft als *brutoformule*:

$C_5H_{12}O$

en als *structuurformule*: $CH_3OC(CH_3)_3$



Aan de brutoformule is in dit geval niet te zien om welke stof het gaat. $C_5H_{12}O$ kan bijvoorbeeld ook 1-pentanol zijn:



Elektronenconfiguratie

De elektronen in de *elektronenwolk* rond de kern bevinden zich in 'voorgeschreven' *energieniveaus*. Deze niveaus worden onderverdeeld in zogenaamde *schillen*: K, L, M, N, P, O en Q (ook aangeduid als: 1, 2, 3, 4, 5, 6, en 7). De schillen zijn verdeeld in eenoplopend aantal 'sub' niveaus: s, p, d en f.

Er is een grens aan het aantal elektronen in een schil. K heeft maximaal 2 elektronen, L maximaal 8, M maximaal 18 en N maximaal 32. Het zwaarste natuurlijke element is uranium. Daardoor zal de O-schil in de praktijk niet meer dan 22 elektronen herbergen. De elektronen in de schillen zijn opgeborgen in de 'sub' niveaus: s, p, d en f. In het s-'sub' niveau kunnen maximal 2 elektronen zitten,in het p-'sub' niveau 6,in het d-'sub'niveau 10 en in het f-'sub' niveau 14.

Het *periodiek systeem* (zie tabel 1.2, pag. A5/12) is gebaseerd op het opvullen van de niveaus met elektronen. Hierdoor zijn er steeds elementen die dezelfde opvulling van de buitenste niveaus hebben en daardoor ook overeenkomsten in chemische eigenschappen. De elektronenconfiguratie van Calcium (Ca) wordt als volgt weergegeven:

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$$

De superscripts geven het aantal elektronen aan in de energieniveaus 1s, 2s, 2p enz. In het periodiek systeem is alleen het laatste gedeelte van deze notatie weergegeven, omdat de opvulling van de eerste niveaus steeds gelijk is. Uit de elektronenconfiguratie van een element is meestal ook de elektronenconfiguratie van het *ion* af te leiden. Bijvoorbeeld Ca kan de 2 elektronen van het 4s-niveau verliezen en vormt dan een Ca^{2+} -ion.

Ionisatie-energie en elektronenaffniteit

Ionisatie-energie of *ionisatiepotentiaal* is de hoeveelheid energie nodig om een elektron af te splitsen. Bij het voorbeeld van Ca naar Ca^{2+} hierboven is de ionisatieenergie van het eerste elektron 6,11 eV (1 eV $=$ $0{,}1602177.10^{-18}$ J) en van het tweede elektron 11,87 eV. Het verwijderen van het derde elektron kost veel meer

energie (ca. 51,2 eV) en zal daarom ook niet gauw gebeuren. Deionisatie-energieën van het eerste elektron van de elementen zijn in tabel 1.1, pag A5/10 opgenomen.
De *elektronenaffiniteit* is de hoeveelheid energie die vrijkomt als een neutraal atoom één elektron opneemt. De elektronenaffiniteiten van een aantal bekende elementen zijn: Fluor (F) 3,45 eV, Chloor (Cl) 3,63 eV, Broom (Br) 3,45 eV en Jood (I) 3,11 eV. Verschillende bronnen vermelden verschillende elektronenaffiniteiten.

Elektronegativiteit

De *elektronegativiteit* is een maat voor de neiging van een element om in een *covalente binding* (*elektronenpaarbinding*) de elektronen naar zich toe te trekken (Pauling). Hoewel de term in de literatuur vaak wordt toegepast bestaat er geen ondubbelzinnige manier om de elektronegativiteit te meten. De elektronegativiteit is voor kwalitatieve en in mindere mate voor kwantitatieve beschouwingen een nuttig gegeven. In tabel 1.1 pag. A5/10 zijn de elektronegativiteiten van Pauling opgenomen.
Als twee atomen A en B in een molecuul in elektronegativiteit x_A en x_B verschillen, zal een covalente binding tussen de atomen een *polair* of *ionogeen* karakter krijgen:

- $|x_A - x_B| = 0$: 0% ionogeen karakter.
- $|x_A - x_B| = 1$: ca. 22% ionogeen karakter.
- $|x_A - x_B| = 2$: ca. 63% ionogeen karakter.
- $|x_A - x_B| = 3$: ca. 89% ionogeen karakter.

De elektronen zijn verschoven naar het meest elektronegatieve element. Een molecuul met een polair of ionogeen karakter kan dan ook een *dipoolmoment* (tabel 2.18 pag. A5/36) hebben.

1.2 Chemische reacties

Reactievergelijking

Een *chemische reactie* is een proces waarbij stoffen in andere stoffen veranderen. De notatie waarin dat aangegeven wordt is een *reac-*

tievergelijking. Bijvoorbeeld de volledige verbranding van ethanol (C_2H_5OH) met zuurstof (O_2).

$$3O_{2g} + C_2H_5OH_g \rightarrow 2CO_{2g} + 3H_2O_g$$

Het subscript *g* duidt erop dat de stof zich in gasfase bevindt. In de reactievergelijking moeten van elk element links en rechts van de pijl evenveel atomen staan. In geval er ionen in de reactie meedoen, moet de totale lading links en de totale lading rechts gelijk zijn.

Vormingsenthalpie

Over het algemeen zal het verlopen van de reactie met energie-effecten (warmte) gepaard gaan. Om deze (warmte-) effecten (= *reactieenthalpieën*) te berekenen maakt men gebruik van de thermodynamische grootheid *vormingsenthalpie*. Omdatde *enthalpie* H van een stof afhankelijk is van de temperatuur en de druk, definieert men een zogenaamde *standaard toestand*. Dit is 298,15 K (= 25°C) en 0,1 MPa (= 1 bar). Absolute enthalpieën zijn niet te meten (en voor thermodynamische berekeningen ook niet nodig), zodat men de vormingsenthalpieën van de elementen gelijk 0 (nul) stelt. Voor ionen in waterige oplossing geldt dat de standaardvormingsenthalpie van H^+ 0 (nul) is, de overige ionen in waterige oplossing zijn daaraan aangepast.
De standaardvormingsenthalpieën van enkele anorganische en organische stoffen zijn in tabel 2.2 en 2.3, pag. A5/15 en verder, opgenomen.

Reactie-enthalpie

De *reactie-enthalpie* bij de verbranding van 1 mol ethanol (46,068 gram) is te berekenen. Dit gebeurt door van de vormingsenthalpie van de gevormde soffen (producten CO_2 en H_2O) de vormingsenthalpie van de reactanten (O_2 en C_2H_5OH) af te trekken:

$$\Delta H_{\text{reactie}} = (2\cdot\Delta H_f^0 CO_2 + 3\cdot\Delta H_f^0 H_2O) - (1\cdot\Delta H_f^0 C_2H_5OH + 3\cdot\Delta H_f^0 O_2)$$

$$\Delta H_{\text{reactie}} = (2\cdot -393{,}509 + 3\cdot -241{,}818) - (1\cdot -234{,}81 + 3\cdot 0{,}0)$$

$$\Delta H_{\text{reactie}} = -1277,662\,\text{kJ per mol ethanol (bij } 298,15\,\text{K)}$$

Indien de $\Delta H_{\text{reactie}}$ een negatieve waarde heeft betekent dit dat er energie vrijkomt en spreekt men van een *exotherme reactie*. Indien er energie toegevoegd moet worden spreekt men van een *endotherme reactie*.

Reactie-evenwicht in een (af) gesloten systeem

Het endotherm of exotherm zijn van een reactie geeft geen uitsluitsel of een reactie wel of niet verloopt, en zegt ook niets over de snelheid van een eventueel verloop. Als een reactie verloopt zal op een gegeven moment *evenwicht* bereikt zijn. Dat wil zeggen dat er per tijdseenheid evenveel van de reactanten in producten omgevormd worden als er producten weer terug in reactanten worden omgezet. Het evenwicht wordt weergegeven met de *evenwichtsconstante K*. Bijvoorbeeld:

$$\text{A} + 2\text{B} \leftrightarrow \text{C} + \text{D} \qquad\qquad \text{K} = [\text{C}][\text{D}]/([\text{A}][\text{B}]^2)$$

waarin:
[A],[B],... = concentraties van A, B, ... in het reactiemengsel

Er bestaat een verband tussen de evenwichtsconstante en de thermodynamische grootheid *Gibbs vrije energie G*, ook wel *vrije energie* genoemd. Het verband tussen Gibbs vrije energie en enthalpie is (zie ook hoofdstuk A4, par. 4.5 *Thermodynamica*):

$$\Delta G = \Delta H - T{\cdot}\Delta S$$

waarin:
G = Gibbs vrije energie [J/kmol]
H = enthalpie [J/kmol]
T = temperatuur [K]
S = entropie [J/(kmol·K)]

De relatie tussen de evenwichtsconstante K en ΔG is:

$$\Delta G = -R{\cdot}T{\cdot}\ln \text{K}$$

waarin:
R = molaire gasconstante $\approx 8{,}31451 \times 10^3$ J/(kmol·K)
T = temperatuur [K]

In het voorbeeld van de verbranding van ethanol is $\Delta G_{\text{reactie}}$ ($\Delta G =$ waarden zijn in tabel 2.2 en 2.3, pag. A5/15 opgenomen, let op de afwijkende dimensie):

$$\Delta G_{\text{reactie}} = (2\cdot\Delta G_f^0 CO_2 + 3\cdot\Delta G_f^0 H_2O) - (1\cdot\Delta G_f^0 C_2H_5OH + 3\cdot\Delta G_f^0 O_2)$$

$$\Delta G_{\text{reactie}} = (2\cdot -394{,}359 + 3\cdot -228{,}572) - (1\cdot -168{,}28 + 3\cdot 0{,}0)$$

$$\Delta G_{\text{reactie}} = -1306{,}15\,\text{kJ (bij } 298{,}15\,\text{K)}$$

De evenwichtsconstante bij 298,15 K is:

$$K = [CO_2]^2\cdot[H_2O]^3/([O_2]^3\cdot[C_2H_5OH]) > 10^{99}$$

Dat wil zeggen bij het bereiken van (chemisch) evenwicht is de concentratie van de (gevormde) producten zeer veel groter dan de concentratie van de (overgebleven) reactanten.

De *zuur*- en *baseconstanten*, resp. K_z en K_b zijn anders gedefinieerd, omdat zonder bijzondere mededeling waterige oplossingen bedoeld worden (zie tabel 2.8, pag. A5/24). Bijvoorbeeld zwavelzuur H_2SO_4:

$$H_2SO_4 + H_2O \leftrightarrow HSO_4^- + H_3O^+ \qquad K_{z1} = [HSO_4^-]\cdot[H_3O^+]/[H_2SO_4]$$

$$HSO_4^- + H_2O \leftrightarrow SO_4^{2-} + H_3O^+ \qquad K_{z2} = [SO_4^{2-}]\cdot[H_3O^+]/[HSO_4^-]$$

$$SO_4^{2-} + H_2O \leftrightarrow HSO_4^- + HO^- \qquad K_{b1} = [HSO_4^-]\cdot[OH^-]/[SO_4^{2-}]$$

De concentratie is in de dimensie mol/dm^3. De concentratie water doet vanwege de definitie hier niet mee. Verder geldt:

$$pK_a = -\log K_a, \text{ en}$$

$$pK_b = -\log K_b$$

Reactiesnelheid

De *reactiesnelheid* is het aantal mol van de bij de reactie betrokken stoffen dat per volume-eenheid en per tijdseenheid wordt omgezet of gevormd. Zie ook hoofdstuk J *Procestechniek* par 5. De reactiesnelheid is een functie van de reactiesnelheidsconstante, de orde van de reactie en de concentratie van de betrokken stoffen. De *reactiesnelheidsconstante* is een functie van de *activeringsenergie* van de reactie en de temperatuur. De activeringsenergie kan door bijvoorbeeld *katalysatoren* worden beïnvloed.

De *orde* van een reactie kan een functie zijn van het mechanisme dat de reactie regelt. Reacties kunnen zeer snel verlopen (bijvoorbeeld *explosies*), maar verhoudingsgewijs ook langzaam (bijvoorbeeld *roesten* van ijzer aan (omgevings) lucht). Zie ook hoofdstuk J *Procestechniek*, par 5.

1.3 Diverse begrippen

Oplosbaarheidsproduct

Het *oplosbaarheidsproduct* (OP) van een stof is het ionenproduct van een verzadigde oplossing van die stof in water. Zie ook tabel 2.6, pag. A5/21. Bijvoorbeeld:

$$\mathrm{OP(AgCl)} = 1{,}56\cdot10^{-10} \qquad [\mathrm{Ag^+}][\mathrm{Cl^-}] = 1{,}56\cdot10^{-10}\,\mathrm{mol^2/dm^6}$$

$$\mathrm{OP(HgI_2)} = 1{,}2\cdot10^{-28} \qquad [\mathrm{Hg^{2+}}][\mathrm{I^-}]^2 = 1{,}2\cdot10^{-28}\,\mathrm{mol^3/dm^9}$$

Let op! De dimensie van het OP hangt af van het aantal ionen dat vrijkomt bij het oplossen.

pH-waarde

Met de *pH-waarde* wordt de zuurgraad van een (waterige) oplossing aangegeven. De pH is de getalswaarde die wordt verkregen door de ^{10}log van de waterstofionen concentratie te vermenigvuldigen met -1. Zuiver water heeft bij 25 °C een pH = 7. Waterige oplossingen zijn bij:

$0 < \mathrm{pH} < 3$: sterk zuur;
$3 < \mathrm{pH} < 7$: zwak zuur;
$7 < \mathrm{pH} < 11$: zwak basisch;
$11 < \mathrm{pH} < 14$: sterk basisch.

Zie ook tabel 2.9, pag. A5/26.

Iso-elektrisch punt

De moleculen van aminozuren hebben zure en basische functionele groepen. Om die reden kunnen aminozuren zowel zuur als basisch reageren, afhankelijk van de pH van de oplossing. Het *iso-elektrisch punt* is die pH-waarde waarbij het aminozuur ogenschijnlijk neutraal is. Zie ook tabel 2.17, pag. A5/34.

1.4 Elementen en hun ionen

Tabel 1.1 Namen, symbolen en eigenschappen van de elementen en hun ionen (zie ook par. 1.1)

atoom-nummer	naam	symbool	[eV][1)]	Pauling[2)]	oxidatie-toestanden[3)]
1	waterstof	H	13,59	2,1	+1, −1
2	helium	He	24,48	–	0
3	lithium	Li	5,39	1,0	+1
4	beryllium	Be	9,32	1,5	+2
5	boor	B	8,30	2,0	+3
6	koolstof	C	11,26	2,5	+2, +4, −4
7	stikstof	N	14,53	3,0	+1, +2, +3, +4 +5, −1, −2, −3
8	zuurstof	O	13,61	3,5	−2
9	fluor	F	17,42	4,0	−1
10	neon	Ne	21,56	–	0
11	natrium	Na	5,14	0,9	+1
12	magnesium	Mg	7,64	1,2	+2
13	aluminium	Al	5,98	1,5	+3
14	silicium	Si	8,15	1,8	+2, +4, −4
15	fosfor	P	10,48	2,1	+3, +5, −3
16	zwavel	S	10,36	2,5	+4, +6, −2
17	chloor	Cl	13,01	3,0	+1, +5, +7, −1
18	argon	Ar	15,76	–	0
19	kalium	K	4,34	0,8	+1
20	calcium	Ca	6,11	1,0	+2
21	scandium	Sc	6,54	1,3	+3
22	titaan	Ti	6,82	1,5	+2, +3, +4
23	vanadium	V	6,74	1,6	+2, +3, +4, +5
24	chroom	Cr	6,76	1,6	+2, +3, +6
25	mangaan	Mn	7,43	1,5	+2, +3, +4, +7
26	ijzer	Fe	7,87	1,8	+2, +3
27	kobalt	Co	7,86	1,9	+2, +3
28	nikkel	Ni	7,63	1,9	+2, +3
29	koper	Cu	7,72	1,9	+1, +2
30	zink	Zn	9,39	1,6	+2
31	gallium	Ga	6,00	1,6	+3
32	germanium	Ge	7,88	1,8	+2, +4
33	arseen	As	9,81	2,0	+3, +5, −3
34	seleen	Se	9,75	2,4	+4, +6, −2
35	broom	Br	11,85	2,8	+1, +5, −1
36	krypton	Kr	14,00	–	0
37	rubidium	Rb	4,18	0,8	+1
38	strontium	Sr	5,69	1,0	+2
39	yttrium	Y	6,38	1,2	+3
40	zirkonium	Zr	6,84	1,4	+4
41	niobium	Nb	6,88	1,6	+3, +5
42	molybdeen	Mo	7,10	1,8	+6
43	technetium	Tc	7,28	1,9	+4, +6, +7
44	ruthenium	Ru	7,36	2,2	+3
45	rhodium	Rh	7,46	2,2	+3
46	palladium	Pd	8,33	2,2	+2, +4
47	zilver	Ag	7,57	1,9	+1
48	cadmium	Cd	8,99	1,7	+2
49	indium	In	5,79	1,7	+3
50	tin	Sn	7,34	1,8	+2, +4
51	antimoon	Sb	8,64	1,9	+3, +5, −3
52	telluur	Te	9,01	2,1	+4, +6, −2
53	jodium (jood)	I	10,45	2,5	+1, +5, +7, −1
54	xenon	Xe	12,13	–	0
55	cesium	Cs	3,89	0,7	+1
56	barium	Ba	5,21	0,9	+2

Tabel 1.1 (vervolg)

atoom-nummer	naam	symbool	[eV][1]	Pauling[2]	oxidatie-toestanden[3]
57	lanthaan	La	5,61	1,0	+3
58	cerium	Ce	5,60	[4]	+3, +4
59	praseodymium	Pr	5,46	[4]	+3
60	neodymium	Nd	5,51	[4]	+3
61	promethium	Pm	5,55	[4]	+3
62	samarium	Sm	5,60	[4]	+2, +3
63	europium	Eu	5,67	[4]	+2, +3
64	gadolinium	Gd	6,16	[4]	+3
65	terbium	Tb	5,98	[4]	+3
66	dysprosium	Dy	6,80	[4]	+3
67	holmium	Ho	6,02	[4]	+3
68	erbium	Er	6,08	[4]	+3
69	thulium	Tm	5,81	[4]	+3
70	ytterbium	Yb	6,20	[4]	+2, +3
71	lutetium	Lu	5,42	1,2	+3
72	hafnium	Hf	7,00	1,3	+4
73	tantaal	Ta	7,88	1,5	+5
74	wolfraam	W	7,98	1,7	+6
75	renium	Re	7,87	1,9	+4, +6, +7
76	osmium	Os	8,50	2,2	+3, +4
77	iridium	Ir	9,00	2,2	+3, +4
78	platina	Pt	9,00	2,2	+2, +4
79	goud	Au	9,22	2,4	+1, +3
80	kwik	Hg	10,43	1,9	+1, +2
81	thallium	Tl	6,11	1,8	+1, +3
82	lood	Pb	7,42	1,9	+2, +4
83	bismut	Bi	7,29	1,9	+3, +5
84	polonium	Po	7,43	2,0	+2, +5
85	astaat	At	9,5	2,2	–
86	radon	Rn	10,75	–	0
87	francium	Fr	4,00	0,7	+1
88	radium	Ra	5,28	0,9	+2
89	actinium	Ac	6,90	1,1	+3
90	thorium	Th	6,95	1,3	+4
91	protactinium	Pa	–	1,4	+5, +4
92	uranium	U	6,08	1,4	+3, +4, +5, +6
93	neptunium	Np	–	1,4	+3, +4, +5, +6
94	plutonium	Pu	5,1	[5]	+3, +4, +5, +6
95	americium	Am	6,00	[5]	+3, +4, +5, +6
96	curium	Cm	–	[5]	+3
97	berkelium	Bk	–	[5]	+3, +4
98	californium	Cf	–	[5]	+3
99	einsteinium	Es	–	[5]	+3
100	fermium	Fm	–	[5]	+3
101	mendelevium	Md	–	[5]	+2, +3
102	nobelium	No	–	1,3	+2, +3
103	lawrencium	Lr	–	–	+3
104	dubnium	Db	–	–	+4
105	joliotium	Jl	–	–	–
106	rutherfordium	Rf	–	–	–
107	bohrium	Bh	–	–	–
108	hahnium	Hn	–	–	–
109	meitnerium	Mt	–	–	–

[1] Het ionisatiepotentiaal van het eerste elektron [eV].
[2] Pauling-elektronegativiteiten.
[3] Stabiele oxidatietoestanden die het element kan aannemen.
[4] Elementen 58 t/m 70 hebben een elektronegativiteit tussen 1,0 en 1,2.
[5] Elementen 94 t/m 101 hebben een elektronegativiteit tussen 1,3 en 1,4.

Tabel 1.2 Periodiek systeem der elementen (h = hoofdgroep; n = nevengroep) (zie ook par. 1.1)

groep h/n / periode	1h	2h	3n	4n	5n	6n	7n	8n
1	1 **H** 1,0079 0,29 1s		atoomnummer → 24 **Cr** 51,996 atoomstraal · 10^{-10} m → 1,25 (hang af van wijze van bepaling) 4s 3d^5 elektronenconfiguratie					
2	3 **Li** 6,941 1,52 2s	4 **Be** 9,0122 1,07 2s^2						
3	11 **Na** 22,990 1,86 3s	12 **Mg** 24,305 1,55 3s^2	*lanthanide-reeks **actinide-reeks	overgangselementen				
4	19 **K** 39,098 2,31 4s	20 **Ca** 40,078 1,91 4s^2	21 **Sc** 44,956 1,68 4s^2 3d	22 **Ti** 47,867 1,45 4s^2 3d^2	23 **V** 50,942 1,31 4s^2 3d^3	24 **Cr** 51,996 1,25 4s 3d^5	25 **Mn** 54,938 1,12 4s^2 3d^5	26 **Fe** 55,845 1,24 4s^2 3d^6
5	37 **Rb** 85,468 2,43 5s	38 **Sr** 87,62 2,07 5s^2	**39 Y** 88,906 1,78 5s^2 4d	**40 Zr** 91,224 1,59 5s^2 4d^2	**41 Nb** 92,906 1,43 5s 4d^4	**42 Mo** 95,94 1,36 5s 4d^5	43 **Tc** [98,906] 1,36 5s 4d^6	44 **Ru** 101,07 1,33 5s 4d^7
6	55 **Cs** 132,91 2,62 6s	56 **Ba** 137,33 2,17 6s^2	57–71 *	72 **Hf** 178,49 1,57 6s^2 5d^2	73 **Ta** 180,95 1,43 6s^2 5d^3	74 **W** 183,84 1,37 6s^2 5d^4	75 **Re** 186,21 1,37 6s^2 5d^5	76 **Os** 190,23 1,34 6s^2 5d^6
7	87 **Fr** [223,02] 7s	88 **Ra** [226,03] 7s^2	89–103 **	104 **Db** – 6d^2 5f^{14}	105 **J1** –	106 **Rf** –	107 **Bh** –	108 **Hn** –
			*	57 **La** 138,91 1,87 6s^2 5d	58 **Ce** 140,12 1,82 – 4f^2	59 **Pr** 140,91 1,82 – 4f^3	60 **Nd** 144,24 1,83 – 4f^4	61 **Pm** [146,92] – 4f^5
			**	89 **Ac** 227,03 1,88 7s^2 6d	90 **Th** 232,04 1,80 6d^2 –	91 **Pa** [231,04] 1,60 6d 5f^2	92 **U** 238,03 1,38 6d 5f^3	93 **Np** [237,05] 1,31 6d 5f^5

De waarde van de *atoomstraal* hangt af van de wijze waarop deze bepaald is.
Atoommassa's op 5 significante cijfers afgerond.
Atoommassa's tussen [ ] betekent het element heeft geen stabiel isotoop.

8n	1n	2n	3h	4h	5h	6h	7h	o
symbool (zie tabel 1.1) atoommassa in kg·kmol^{-1} [ ] = atoommssa van meest stabiele isotoop								2 **He** 4,0026 0,29 $1s^2$
			40 **B** 10,811 0,88 $2s^2$ 2p	60 **C** 12,011 0,77 $2s^2$ $2p^2$	7 **N** 14,007 0,70 $2s^2$ $2p^3$	8 **O** 15,999 0,66 $2s^2$ $2p^4$	9 **F** 18,998 0,64 $2s^2$ $2p^5$	10 **Ne** 20,180 0,160 $2s^2$ $2p^6$
			13 **Al** 26,982 1,39 $3s^2$ 3p	14 **Si** 28,086 1,17 $3s^2$ $3p^2$	15 **P** 30,974 1,10 $3s^2$ $3p^3$	16 **S** 32,066 1,04 $3s^2$ $3p^4$	17 **Cl** 35,453 0,99 $3s^2$ $3p^5$	18 **Ar** 39,948 0,92 $3s^2$ $3p^6$
27 **Co** 58,933 1,25 $4s^2$ $3d^7$	28 **Ni** 58,693 1,25 $4s^2$ $3d^8$	29 **Cu** 63,546 1,35 4s $3d^{10}$	30 **Zn** 65,39 1,31 $4s^2$ $3d^{10}$	31 **Ga** 69,723 1,48 $4s^2$ ^v4p	32 **Ge** 72,61 1,22 $4s^2$ $4p^2$	33 **As** 74,922 1,21 $4s^2$ $4p^3$	34 **Se** 78,96 1,17 $4s^2$ $4p^4$	35 **Br** 79,904 1,14 $4s^2$ $4p^5$	36 **Kr** 83,80 1,98 $4s^2$ $4p^6$
45 **Rh** 102,91 1,35 5s $4d^8$	46 **Pd** 106,42 1,38 – $4d^{10}$	47 **Ag** 107,87 1,52 5s $4d^{10}$	49 **Cd** 112,41 1,48 $5s^2$ $4d^{10}$	49 **In** 114,82 1,62 $5s^2$ 5p	50 **Sn** 118,71 1,40 $5s^2$ $5p^2$	51 **Sb** 121,76 1,41 $5s^2$ $5p^3$	52 **Te** 127,600 1,37 $5s^2$ $5p^4$	53 **I** 126,90 1,33 $5s^2$ $5p^5$	54 **Xe** 131,29 2,18 $5s^2$ $5p^6$
77 **Ir** 192,22 1,36 – $5d^7$	78 **Pt** 195,08 1,38 6s $5d^9$	79 **Au** 196,97 1,44 6s $5d^{10}$	80 **Hg** 200,59 1,48 $6s^2$ $5d^{10}$	81 **Ti** 204,38 1,66 $6s^2$ 6p	82 **Pb** 207,02 1,54 $6s^2$ $6p^2$	83 **Bi** 208,98 1,46 $6s^2$ $6p^3$	84 **Po** [209,98] $6s^2$ $6p^4$	85 **At** [209,99] $6s^2$ $6p^5$	86 **Rn** [222,02] $6s^2$ $6p^6$
109 **Mt** –									
62 **Sm** 150,36 1,80 – $4f^6$	63 **Eu** 151,96 1,98 – $4f^7$	64 **Gd** 157,25 1,79 5d $4f^7$	65 **Tb** 158,93 1,76 – $4f^9$	66 **Dy** 162,50 1,76 – $4f^{10}$	67 **Ho** 164,93 1,75 – $4f^{11}$	68 **Er** 167,26 1,74 – $4f^{12}$	69 **Tm** 168,93 1,77 – $4f^{13}$	70 **Yb** 173,04 1,94 – $4f^{14}$	71 **Lu** 174,97 1,72 5d $4f^{14}$
94 **Pu** [239,05] 1,6 – $5f^6$	95 **Am** 241,06 1,8 – $5f^7$	96 **Cm** [244,06] 6d $5f^7$	97 **Bk** [249,08] – $5f^9$	98 **Cf** [252,08] – $5f^{10}$	99 **Es** [252,08] – $5f^{11}$	100 **Fm** [257,10] – $5f^{12}$	101 **Md** [258,10] – $5f^{13}$	102 **No** [258,10] – $5f^{14}$	103 **Lr** [262,11] 6d $5f^{14}$

2 Tabellen

2.1 Overzicht

Tabel 2.1 Overzicht tabellen

onderwerp	pag.
thermodynamische gegevens (par. 2.2)	
thermodynamische gegevens anorganische stoffen	A5/15
thermodynamische gegevens organische stoffen	A5/17
analytische gegevens (par. 2.3)	
oplosbaarheid zouten in water	A5/20
oplosbaarheid gassen in water	A5/20
oplosbaarheidsproducten	A5/21
dissociatie-constanten organische zuren	A5/23
zuur- en base-constanten	A5/24
zuur- en base-indicatoren	A5/26
gehalte en dichtheid van oplossingen bij 293K	A5/27
concentraties van in de handel zijnde zuren	A5/28
normaal redoxpotentialen	A5/29
redox-indicatoren	A5/31
molaire vriespuntsdaling en kookpuntsverhoging	A5/32
calorische boven- en onderwaarden van gassoorten	A5/32
equivalent geleidingsvermogen van ionen in water	A5/33
diversen (par. 2.4)	
aminozuren	A5/34
dipoolmomenten	A5/36

2.2 Thermodynamische gegevens

Tabel 2.2 Thermodynamische gegevens anorganische stoffen (zie ook par. 1.2)

stof[1)]		molecuul-massa [kg/kmol]	ΔH_f^0 [kJ/mol]	ΔG_f^0 [kJ/mol]	S^0 [J/(mol·K)]
Ag		107,87	0	0	42,55
Ag^+	aq/wo	107,87	105,579	77,107	72,68
$AgNO_3$	cr	169,87	– 124,39	– 33,41	140,92
Al		26,982	0	0	28,33
Al^{3+}	ao	26,982	– 531,0	– 485,0	– 321,7
Al_2O_3	corundum	101,96	– 1675,7	– 1582,3	50,92
Br_2	g	159,81	30,907	3,11	245,463
Br_2	l	159,81	0	0	152,231
HBr	g	80,912	– 36,40	– 53,45	198,695
C	grafiet	12,011	0	0	5,74
C	diamant	12,011	1,895	2,900	2,377
CO	g	28,010	– 110,525	– 137,168	– 197,674
CO_2	g	44,009	– 393,509	– 394,359	– 213,74
CO_3^{2-}	ao	60,008	– 677,14	– 527,81	– 56,9
H_3^-	ao	61,016	– 691,99	– 586,77	91,2
Ca		40,078	0	0	41,42
Ca^{2+}	ao	40,078	– 542,83	– 553,58	– 53,1
CaO	cr	56,077	– 635,09	– 604,03	– 39,75
$Ca(OH)_2$	cr	74,092	– 986,09	– 898,49	– 83,39
$CaSO_4$	anhydriet	136,14	– 1434,11	– 1321,79	106,7
$CaCO_3$	calciet	100,09	– 1206,92	– 1128,79	92,9
Cl_2	g	70,906	0	0	223,066
Cl	oa	35,453	– 167,159	– 131,299	56,5
HCl	g	36,461	– 92,307	– 97,299	186,908
Cr		51,996	0	0	23,77
Cr_2O_3	cr	151,99	– 1139,7	– 1058,1	81,2
Cu		63,546	0	0	33,15
Cu^{2+}	ao	63,546	64,77	65,49	– 99,6
Cu_2O	cr	143,09	– 168,6	– 146,0	93,14
CuO	cr	79,545	– 157,3	– 129,7	42,63
$CuSO_4$	cr	159,61	– 771,36	– 661,8	109,0
F_2	g	37,996	0	0	202,78
F^-	ao	18,998	– 332,63	– 278,79	– 13,8
HF	g	20,006	– 271,1	– 273,2	173,779
Fe		55,845	0	0	27,28

Tabel 2.2 (vervolg)

stof[1)]		molecuulmassa [kg/kmol]	ΔH_f^0 [kJ/mol]	ΔG_f^0 [kJ/mol]	S^0 [J/(mol·K)]
Fe^{2+}	ao	55,845	− 89,1	− 78,90	− 137,7
Fe^{3+}	ao	55,845	− 48,5	− 4,7	− 315,9
Fe_3O_4	magnetiet	231,53	− 1118,4	− 1015,4	146,4
Fe_2O_3	hematiet	159,69	− 824,2	− 742,2	87,4
H_2	g	2,0158	0	0	130,684
H^+	ao	1,0079	0	0	0
H_2O	g	18,015	− 241,818	− 228,572	188,825
H_2O	l	18,015	− 285,830	− 237,129	69,91
K		39,098	0	0	64,18
K^+	ao	39,098	− 252,38	− 283,27	102,5
KNO_3	rhombisch	101,10	− 369,82	− 306,55	152,09
Mg		24,305	0	0	32,68
Mg^{2+}	ao	24,305	− 466,85	− 454,8	− 138,1
MgO	periclase	40,304	− 601,70	− 569,43	26,94
MnO_4^-	ao	118,93	− 653,0	− 500,7	59,0
N_2	g	28,014	0	0	191,61
NH_3	g	17,031	− 46,11	− 16,45	192,45
NO_2^-	ao	46,005	− 104,6	− 32,2	123,0
NO_3^-	ao	62,004	− 205,0	− 108,74	− 146,4
NH_4^+	ao	18,037	− 132,51	− 79,31	113,4
NH_4Cl	cr	53,492	314,43	− 202,87	94,6
Na		22,990	0	0	51,21
Na^+	ao	22,990	− 240,12	− 261,905	59,0
NaOH	cr	39,997	− 425,609	− 379,494	10,489
NaCl	cr	58,443	− 411,153	− 384,138	72,13
O_2	g	31,998	0	0	205,138
OH^-	ao	17,007	− 229,994	− 157,244	− 10,75
H_2S	g	34,082	− 20,63	− 33,56	205,79
SO_2	g	64,064	− 296,830	− 300,194	248,22
SO_4^{2-}	ao	96,062	− 909,27	− 744,53	20,1
H_2SO_4	l	98,078	− 813,989	− 690,003	156,904
Zn		65,39	0	0	41,63
Zn^{2+}	ao	65,39	− 153,89	− 147,06	− 112,1
$ZnSO_4$	cr	161,35	− 982,8	− 871,5	110,5

[1)] ao = waterige oplossing, standaard toestand, m = 1 mol/kg.
cr = kristallijn.
l = vloeistof.
g = gas.

Tabel 2.3 Thermodynamische gegevens organische stoffen (zie ook par. 1.2)

stof	naam	[1]	molecuul-massa [kg/kmol]	ΔH_f^0 [kJ/mol]	ΔG_f^0 [kJ/mol]	S^0 [J/(mol·K)]
CCl_4	tetrachloorkoolstof	l	153,82	– 132,84	– 62,63	216,19
		g		– 100,42	– 58,24	310,12
$CHCl_3$	chloroform	l	119,38	– 132,21	– 71,84	202,92
		g		– 101,25	– 68,53	295,64
H_2CO	formaldehyde	g	30,026	– 115,90	– 109,91	218,78
HCOOH	mierenzuur	l	46,025	– 424,76	– 361,46	128,95
		g		– 378,61	– 351,00	248,74
$HCONH_2$	formamide	g	45,041	– 186,19	– 141,04	248,45
CH_4	methaan	g	16,043	– 74,85	– 50,84	186,27
NH_2CONH_2	ureum	s	60,056	– 333,17	– 197,15	104,60
		g		– 245,60	– 152,72	249,37
CH_3OH	methanol	l	32,042	– 238,57	– 166,23	126,78
		g		– 201,17	– 162,51	239,70
CHCH	acetyleen	g	26,038	226,73	209,20	200,83
HOOC-COOH	oxaalzuur	s	90,034	– 829,94	– 701,15	120,08
CH_2CHCl	vinylchloride	g	52,488	35,15	51,51	263,93
CH_3CN	acetonitril	l	41,053	53,14	98,87	149,62
		g		87,86	105,60	243,47
CH_2CH_2	ethyleen	g	28,054	52,30	68,12	219,45
CH_3CHO	acetaldehyde	l	44,053	– 192,05		
		g		– 166,36	– 133,30	264,22
CH_3COOH	azijnzuur	l	60,052	– 484,09	– 389,36	159,83
		g		– 434,84	– 376,69	282,50
CH_3CONH_2	acetamide	l	59,068	– 317,57		
CH_3CH_3	ethaan	g	30,069	– 84,68	– 32,93	229,49
CH_3CH_2OH	ethylalcohol	l	46,068	– 276,98	– 174,14	160,67
		g		– 234,81	– 168,28	282,59
$CH_3CH_2NH_2$	ethylamine	l	45,084	– 74,10		
		g		– 46,02	37,28	284,85
CH_2CHCN	actylonitril	l	53,064	150,21		
		g		184,93	195,31	273,93
$CH_2CHCOOH$	acrylzuur	l	72,063	– 384,09		
		g		– 336,23	– 286,06	315,01
CH_3CHCH_2	propyleen	g	42,080	20,42	62,72	266,94
CH_3COCH_3	aceton	l	58,079	– 248,11	– 155,39	200,41
		g		– 217,57	– 153,05	294,93
CH_3CH_2COOH	propionzuur	l	74,078	– 510,87		
$CH_3CH_2CH_3$	propaan	g	44,096	– 103,85	– 23,47	269,91

Tabel 2.3 (vervolg)

stof	naam	[1)]	molecuul-massa [kg/kmol]	ΔH_f^0 [kJ/mol]	ΔG_f^0 [kJ/mol]	S^0 [J/(mol·K)]
$CH_3CHOHCH_3$	isopropylalcohol	l	60,095	– 317,98	– 180,41	180,58
		g		– 272,59	– 173,59	309,91
$CH_3CH_2CH_2OH$	propylalcohol	l	60,095	– 304,55	– 170,67	192,88
		g		– 257,53	– 162,97	324,80
$CH_2OHCHOH\ CH_2OH$	glycerol	l	92,093	– 668,60	– 477,06	204,47
$CH_3CH_2CH_3NH_2$	propylamine	l	59,111	– 103,76		
		g		– 72,38	39,79	324,18
HOOC-CHCH-COOH (trans)	fumaarzuur	s	116,07	– 811,07	– 653,67	166,10
HOOC-CHCH-COOH (cis)	maleïnezuur	s		– 790,61	– 631,20	159,41
$(CH_3CO)_2O$	azijnzuuranhydride	l	102,09	– 624,00	– 488,82	268,61
		g		– 575,72	– 476,68	389,95
$CH_3CH_2CHCH_2$	1-buteen	g	56,107	– 0,13	71,30	305,60
$CH_3CO_2CH_2CH_3$	ethylacetaat	l	88,105	– 479,03	– 332,71	259,41
		g		– 442,92	– 327,40	362,75
$(CH_2)_4NH$	pyrrolidine	l	71,122	– 41,17	108,53	204,01
		g		– 3,60	114,68	309,49
$CH_3(CH_2)_2CH_3$	butaan	l	58,123	– 147,65	– 15,06	230,96
		g		– 126,15	– 17,15	310,12
$CH_3(CH_2)_2CH_2OH$	butanol	l	74,122	– 325,81	– 161,08	225,73
		g		– 274,43	– 150,67	363,17
C_5H_5N	pyridine	l	79,102	100,00	181,33	177,90
		g		140,16	190,20	282,80
$HOOC(CH_2)_3COOH$	glutaarzuur	s	132,11	– 960,06		
$CH_2CHCH_2CH_2CH_3$	1-penteen	l	70,134	– 46,69	78,20	262,55
		g		– 20,92	79,12	345,81
$(CH_2)_5NH$	piperidine	l	85,149	– 88,28		
		g		– 48,99		
$CH_3(CH_2)_3CH_3$	pentaan	l	72,150	– 173,22	– 9,46	262,67
		g		– 146,44	– 8,37	348,95
$CH_3(CH_2)_3CH_2OH$	pentanol	l	88,149	– 357,94	– 161,25	254,81
		g		– 302,38	– 149,75	402,54
C_6H_6	benzeen	l	78,113	49,04	124,35	173,26
		g		82,93	129,66	269,20
C_6H_5OH	fenol	s	94,112	– 165,02	– 50,42	144,01
		g		– 96,36	– 32,89	315,60
$C_6H_5NH_2$	aniline	l	93,128	31,43	149,08	191,29
		g		86,86	166,69	319,16
C_6H_{12}	cyclohexaan	l	84,161	– 156,23	26,65	204,35
		g		– 123,14	31,76	298,24

Tabel 2.3 (vervolg)

stof	naam	[1)]	molecuul-massa [kg/kmol]	ΔH_f^0 [kJ/mol]	ΔG_f^0 [kJ/mol]	S^0 [J/(mol·K)]
$C_6H_{11}OH$	cyclohexanol	l	100,16	− 348,19	− 133,34	199,58
		g		− 294, 55	− 117, 91	327,69
$CH_3(CH_2)$	hexaan	l	86,177	− 198.82	− 4,35	296,06
		g		− 167,19	− 0,25	388,40
$CH_3(CH_2)_4CH_2OH$	hexanol	l	102,18	− 379,36	− 151,63	287,02
		g		− 319,62	− 137,95	441,50
C_6H_5COOH	benzoëzuur	s	122,12	− 385,14	− 245,27	167,57
		g		− 290,20	− 210,41	368,99
$C_6C_5CH_3$	tolueen	l	92,140	12,01	113,76	220,96
		g		50,00	122,01	320,66

[1)] l = vloeistof.
g = gas.
s = vast.

2.3 Analytische gegevens

Tabel 2.4 Oplosbaarheid zouten in water (298 **K**)

positieve ionen	negatieve ionen										
	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	SO_3^{2-}	NO_3^-	CO_3^{2-}	CH_3COO^-	OH^-	O^{2-}	S^{2-}	I^-	Cl^-	Br^-
Na^+	g	g	g	g	g	g	g	o	g	g	g	g
K^+	g	g	g	g	g	g	g	o	g	g	g	g
NH_4^+	o	g	g	g	o	g			o	g	g	g
Ca^{2+}	s	m	s	g	s	g	m	o	m	g	g	g
Ba^{2+}	s	s	s	g	s	g	g	o	m	g	g	g
Ag^+	s	m	s	g	s	m		s	s	s	s	s
Pb^{2+}	s	s	s	g	s	g	s	s	s	s	m	m
Hg_2^{2+}	s	s	s	g	s	m		s	s	s	s	s
Hg^{2+}	s	o		g	s	g		s	s	s	g	m
Cu^{2+}	s	g	s	g	s	g	s	s	s		m	g
Al^{3+}	s	g		g	o	g	s	s	o	g	g	g
Fe^{2+}	s	g	s	g	s	g	s	s	s	g	g	g
Fe^{2+}	s	g		g	o	g	s	s	s		g	g
Mg^{2+}	s	g	s	g	s	g	s	s	m	g	g	g
Zn^{2+}	s	g	s	g	s	g	s	s	s	g	g	g

g : goed oplosbaar in water (meer dan ca. 0,1 mol/dm^3).
m: matig oplosbaar in water (minder dan ca. 0,1 mol/dm^3 en meer dan ca. 0,01 mol/dm^3).
s : slecht oplosbaar in water (minder dan ca. 0,01 mol/dm^3).
o : ontleedt in water of reageert met water.

Tabel 2.5 Oplosbaarheid gassen in water ($p = p_0$) [mol/dm^3]

temperatuur [K]	HCl	Cl_2	H_2	O_2	N_2	NH_3	H_2S	SO_2	CO_2	CO
		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$		$\times 10^{-2}$		$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-4}$
273	22,6	20,6	9,60	21,8	10,5	52,5	20,8	3,56	7,63	15,8
283		14,1	8,79	17,0	8,30	40,0	15,2	2,53	5,31	12,6
293	19,7	10,3	8,17	13,8	6,88	31,3	11,5	1,76	3,88	10,4
298	19,0	9,02	7,90	12,6	6,38	27,8	10,2	1,46	3,35	9,55
303		8,04	7,59	11,6	5,98	25,1	9,11	1,21	2,95	8,93
313	17,2	6,43	7,32	10,3	5,27		7,41	0,84	2,32	7,90
323		5,45	7,19	9,33	4,87		6,21		1,92	7,19
333	15,1	4,55	7,14	8,71	4,55		5,31		1,56	6,65
343		3,84		8,17	4,38		4,55			6,43
353		304		7,86	4,29		4,11			6,38
363		1,74		7,68	4,24		3,75			6,34
373		0,00		7,59	4,24		3,62			6,29

$p_0 = 10^5$ Pa.

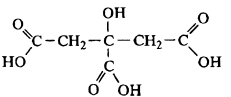
Tabel 2.6 Oplosbaarheidsproducten (zie ook par. 1.2)

groep	verbinding	oplosbaarheids-product	temperatuur [K]
hydroxiden	$Ag(OH)$	$1{,}52 \cdot 10^{-8}$	293
	$Al(OH)_3$	$3{,}7 \cdot 10^{-15}$	298
	$Fe(OH)_2$	$1{,}64 \cdot 10^{-14}$	291
	$Fe(OH)_3$	$1{,}1 \cdot 10^{-36}$	291
	$Cu(OH)_2$	$1{,}6 \cdot 10^{-20}$	293
	$Mg(OH)_2$	$1{,}2 \cdot 10^{-11}$	291
	$Mn(OH)_2$	$7 \cdot 10^{-15}$	293
	$Pb(OH)_2$	$1 \cdot 10^{-15}$	298
	$Zn(OH)_2$	$1{,}8 \cdot 10^{-14}$	292
carbonaten	Ag_2CO_3	$6{,}15 \cdot 10^{-12}$	298
	$BaCO_3$	$8{,}1 \cdot 10^{-9}$	298
	$CaCO_3$	$0{,}87 \cdot 10^{-8}$	298
	$MgCO_3$	$2{,}6 \cdot 10^{-5}$	285
	$PbCO_3$	$3{,}3 \cdot 10^{-14}$	291
	$ZnCO_3$	$9 \cdot 10^{-11}$	293
halogeniden	$AgBr$	$7{,}7 \cdot 10^{-13}$	298
	$AgCl$	$1{,}56 \cdot 10^{-10}$	298
	AgI	$1{,}5 \cdot 10^{-16}$	298
	BaF_2	$1{,}73 \cdot 10^{-6}$	299
	CaF_2	$3{,}95 \cdot 10^{-11}$	299
	$CuBr$	$4{,}15 \cdot 10^{-8}$	292
	$CuCl$	$1{,}02 \cdot 10^{-6}$	292
	CuI	$5{,}06 \cdot 10^{-12}$	292
	$HgBr_2$	$1{,}3 \cdot 10^{-21}$	298
	$HgCl_2$	$2 \cdot 10^{-18}$	298
	HgI_2	$1{,}2 \cdot 10^{-28}$	298
	MgF_2	$7{,}1 \cdot 10^{-9}$	291
	$PbCl_2$	$2{,}4 \cdot 10^{-4}$	293
	PbF_2	$3{,}7 \cdot 10^{-8}$	299
	PbI_2	$1{,}39 \cdot 10^{-8}$	298
oxalaten	BaC_2O_4	$2{,}2 \cdot 10^{-7}$	291
	CaC_2O_4	$2{,}57 \cdot 10^{-9}$	298
	FeC_2O_4	$2{,}1 \cdot 10^{-7}$	298
	MgC_2O_4	$8{,}57 \cdot 10^{-5}$	291
	PbC_2O_4	$2{,}74 \cdot 10^{-11}$	291
	ZnC_2O_4	$1{,}35 \cdot 10^{-9}$	291

Tabel 2.6 (vervolg)

groep	verbinding	oplosbaarheids-product	temperatuur [K]
sulfiden	Ag_2S	$1{,}6 \cdot 10^{-49}$	291
	Ag_2S_3	$1 \cdot 10^{-44}$	293
	CdS	$3{,}6 \cdot 10^{-29}$	291
	CoS	$3 \cdot 10^{-26}$	291
	CuS	$2 \cdot 10^{-47}$	290
	Cu_2S	$8{,}5 \cdot 10^{-45}$	291
	FeS	$3{,}7 \cdot 10^{-19}$	291
	HgS	$4 \cdot 10^{-53}$	293
	MnS	$1{,}4 \cdot 10^{-15}$	291
	NiS	$1{,}4 \cdot 10^{-21}$	291
	PbS	$3{,}4 \cdot 10^{-28}$	291
	Sb_2S_3	$1 \cdot 10^{-40}$	293
	SnS	$1 \cdot 10^{-28}$	293
	ZnS	$1{,}2 \cdot 10^{-23}$	291
sulfaten	$BaSO_4$	$1{,}1 \cdot 10^{-10}$	298
	$CaSO_4$	$2{,}45 \cdot 10^{-5}$	298
	$PbSO_4$	$1{,}06 \cdot 10^{-8}$	291
fosfaten	Ag_3PO_4	$2 \cdot 10^{-18}$	298
	$MgNH_4PO_4$	$2{,}5 \cdot 10^{-13}$	298
chromaten	Ag_2CrO_4	$9 \cdot 10^{-12}$	298
	$BaCrO_4$	$1{,}6 \cdot 10^{-10}$	298
	$PbCrO_4$	$1{,}77 \cdot 10^{-14}$	291

Tabel 2.7 Dissociatie-constanten van organische zuren

naam	formule		zuurconstante [mol/dm^3]	temperatuur [K]
mierenzuur	$HCOOH$		$1{,}77 \cdot 10^{-4}$	293
azijnzuur	CH_3COOH		$1{,}76 \cdot 10^{-5}$	298
propionzuur	CH_3CH_2COOH		$1{,}34 \cdot 10^{-5}$	298
boterzuur	$CH_3(CH_2)_2COOH$		$1{,}54 \cdot 10^{-5}$	293
caprylzuur	$CH_3(CH_2)_6COOH$		$1{,}28 \cdot 10^{-5}$	298
benzoëzuur	C_6H_5COOH		$6{,}46 \cdot 10^{-5}$	298
oxaalzuur	$(COOH)_2$	K_1	$5{,}90 \cdot 10^{-2}$	298
		K_2	$6{,}40 \cdot 10^{-5}$	298
malonzuur	$CH_2(COOH)_2$	K_1	$1{,}49 \cdot 10^{-3}$	298
		K_2	$2{,}03 \cdot 10^{-6}$	298
barnsteenzuur	$(CH_2)_2(COOH)_2$	K_1	$6{,}89 \cdot 10^{-5}$	298
		K_2	$2{,}47 \cdot 10^{-6}$	298
glutaarzuur	$(CH_2)_3(COOH)_2$	K_1	$4{,}58 \cdot 10^{-5}$	298
		K_2	$3{,}89 \cdot 10^{-6}$	298
maleïnezuur	HOOC —C=C —COOH (cis)	K_1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	298
		K_2	$8{,}57 \cdot 10^{-7}$	298
fumaarzuur	HOOC —C=C —COOH (trans)	K_1	$9{,}30 \cdot 10^{-4}$	291
		K_2	$3{,}62 \cdot 10^{-5}$	291
citroenzuur		K_1	$7{,}10 \cdot 10^{-4}$	291
		K_2	$1{,}68 \cdot 10^{-5}$	291
		K_3	$6{,}4 \cdot 10^{-6}$	291
caprylzuur	$CH_3(CH_2)_6COOH$		$1{,}28 \cdot 10^{-5}$	298

K_1, K_2, K_3 = dissociatie-constante 1e, 2e resp. 3e stap.

Tabel 2.8 Zuur- en geconjugeerde baseconstanten K_a *en* K_b [Kmol/m^3] *van enige bekende zuren en basen; alsmede de hieruit berkende* pK_a- *en* pK_b *waarden (298* K; *water als oplosmiddel). Zie ook par. 1.2 op pag. A5/8*

zuur	K_a	pK_a	base	K_b	pK_b
$HClO_4$	1.0E + 00	0.00	ClO_4^-	1.0E – 14	14.00
HI	1.0E + 00	0.00	I^-	1.0E – 14	14.00
HCl	1.0E + 00	0.00	Cl^-	1.0E – 14	14.00
H_2SO_4	1.0E + 00	0.00	HSO_4^-	1.0E – 14	14.00
HNO_3	1.0E + 00	0.00	NO_3^-	1.0E – 14	14.00
$HClO_3$	1.0E + 00	0.00	ClO_3^-	1.0E – 14	14.00
CCl_3COOH	2.3E – 01	0.64	CCl_3COO^-	4.4E – 14	13.36
HIO_3	1.7E – 01	0.77	IO_3^-	5.9E – 14	13.23
$H_2(CO_2)_2$	6.5E – 02	1.19	$H(CO_2)_2^-$	1.6E – 13	12.80
$CHCl_2COOH$	5.0E – 02	1.30	$CHCl_2COO^-$	2.0E – 13	12.70
H_2SO_3	1.7E – 02	1.77	HSO_3^-	5.9E – 13	12.23
H_3PO_4	1.6E – 02	1.80	$H_2PO_4^-$	6.3E – 13	12.20
HSO_4	1.2E – 02	1.92	SO_4^{2-}	8.3E – 13	12.08
$HClO_2$	1.1E – 02	1.96	ClO_2^-	9.1E – 13	12.04
H_3PO_3	7.1E – 03	2.15	$H_2PO_3^-$	1.4E – 12	11.85
$Fe(H_2O)_6^{3+}$	5.9E – 03	2.23	$Fe(OH)(H_2O)_5^{2+}$	1.7E – 12	11.77
H_3AsO_4	5.0E – 03	2.30	$H_2AsO_4^-$	2.0E – 12	11.70
$NH^+{}_3CH_2COOH$	4.0E – 03	2.40	NH_2CH_2COOH	2.5E – 12	11.60
H_2Te	2.3E – 03	2.64	HTe^-	4.4E – 12	11.36
$CH_3CHClCOOH$	1.5E – 03	2.82	$CH_3CHClCOO^-$	6.6E – 12	11.18
$CH_2ClCOOH$	1.3E – 03	2.89	CH_2ClCOO^-	7.8E – 12	11.11
CH_2ClCH_2COOH	1.1E – 03	2.96	$CH_2ClCH_2COO^-$	9.1E – 12	11.04
HF	7.2E – 04	3.14	F^-	1.4E – 11	10.85
HNO_2	4.7E – 04	3.33	NO_2^-	2.1E – 11	10.68
H_2Se	1.7E – 04	3.77	HSe^-	5.9E – 11	10.23
HCOOH	1.6E – 04	3.80	$HCOO^-$	6.3E – 11	10.20
$Cr(H_2O)_6^{3+}$	1.5E – 04	3.82	$CrOH(H_2O)_5^{2+}$	6.6E – 11	10.18
C_6H_5COOH	6.3E – 0.5	4.20	$C_6H_5COO^-$	1.6E – 10	9.80
$H(CO_2)_2^-$	6.2E – 05	4.21	$(CO_2)_2^{2-}$	1.6E – 10	9.80
$C_6H_5NH_3^+$	2.0E – 05	4.70	$C_6H_5NH_2$	5.0E – 10	9.30
CH_3COOH	1.7E – 05	4.77	CH_3COO^-	5.9E – 10	9.23
$Al(H_2O)_6^{3+}$	1.4E – 05	4.85	$AlOH(H_2O)_5^{2+}$	7.1E – 10	9.15
CH_3CH_2COOH	1.3E – 05	4.89	$CH_3CH_2COO^-$	7.8E – 10	9.11
H_2CO_3	4.4E – 07	6.36	HCO_3^-	2.3E – 08	7.64
H_2S	3.0E – 07	6.52	HS^-	3.3E – 08	7.48
$H_2PO_4^-$	6.2E – 08	7.21	HPO_4^{2-}	1.6E – 07	6.80
HSO_3^-	6.2E – 08	7.21	SO_3^{2-}	1.6E – 07	6.80
HClO	3.2E – 08	7.49	ClO^-	3.1E – 07	6.51
$Pb(H_2O)_n^{2+}$	1.6E – 08	7.80	$Pb(OH)(H_2O)_n^+$	6.3E – 07	6.20

Tabel 2.8 (vervolg)

zuur	K_a	pK_a	base	K_b	pK_b
$Cu(H_2O)_4^{2+}$	1.0E – 08	8.00	$Cu(OH)(H_2O)_3^+$	1.0E – 06	6.00
HBrO	2.1E – 09	8.68	BrO^-	4.8E – 06	5.32
H_3AsO_3	6.0E – 10	9.22	$H_2AsO_3^-$	1.7E – 05	4.77
NH_4^+	5.8E – 10	9.24	NH_3	1.8E – 05	4.74
HCN	4.9E – 10	9.31	CN^-	2.1E – 05	4.68
$Zn(H_2O)_4^{2+}$	2.2E – 10	9.66	$Zn(OH)(H_2O)_3^+$	4.6E – 05	4.34
$NH_3^+CH_2COO^-$	1.6E – 10	9.80	$NH_2CH_2COO^-$	6.3E – 05	4.20
C_6H_5OH	1.3E – 10	9.89	$C_6H_5O^-$	7.8E – 05	4.11
HCO_3^+	5.6E – 11	10.25	CO_3^{2-}	1.8E – 04	3.74
$CH_3NH_3^+$	2.3E – 11	10.64	CH_3NH_2	4.4E – 04	3.36
HIO	1.8E – 11	10.74	lO^-	5.5E – 04	3.26
H_2O_2	2.4E – 12	11.62	HO_2^-	4.9E – 03	2.31
HPO_4^{2-}	4.8E – 13	12.32	PO_4^{2-}	2.1E – 02	1.68
HS^-	1.2E – 13	12.92	S^{2-}	8.3E – 02	1.08
CH_3CH_2OH	1.0E – 14	14.00	$CH_3CH_2O^-$	1.0E + 00	0.00
NH_3	1.0E – 14	14.00	NH_2	1.0E + 00	0.00
OH^-	1.0E – 14	14.00	O^{2-}	1.0E + 00	0.00
H_2	1.0E – 14	14.00	H^-	1.0E + 00	0.00

N.B. Het begrip geconjugeerde base betekent: de base die verkregen wordt door van het oorspronkelijke zuur een proton weg te nemen. Zuur en geconjugeerde base horen bij elkaar. Base en geconjugeerd zuur op analogemanier. Daarom is de som van pK_a en pK_b onder de vermelde condities 14!

Tabel 2.9 Zuur- en base-indicatoren

indicator	omslagtrajecten [pH]	kleuromslag (lage pH → hoge pH)
kresolrood[1)]	0,2–1,8	rood-geel
thymolblauw[1)]	1,2–2,8	rood-geel
m-kresolpurper[1)]	0,5–2,5	rood-geel
dimethylgeel	2,9–4,0	rood-geel
broomfenolblauw	3,0–4,6	geel-blauw
kongorood	3,0–5,2	blauwviolet-rood
methyloranje	3,1–4,4	rood-geel
broomkresolgroen	3,8–5,4	geel-blauw
broomkresolblauw	4,0–5,6	geel-blauw
methylrood	4,2–6,3	rood-geel
lakmoes	5,0–8,0	rood-blauw
broomkresolpurper	5,2–6,8	geel-purperrood
broomthymolblauw	6,0–7,6	geel-blauw
fenolrood	6,8–8,4	geel-rood
kresolrood[1)]	7,2–8,8	geel-purperrood
kresolroodnaftolftaleïne (α naftolftaleïne)	7,3–8,7	geelrose-blauw
m-kresolpurper[1)]	7,6–9,6	geel-purper
thymolblauw[1)]	8,0–9,6	geel-blauw
fenolftaleïne	8,2–10,0	kleurloos-rood
thymolftaleïne	9,3–10,5	kleurloos-blauw
alizariengeel-R	10,0–12,1	geel-lila
nitramine	11,0–13,0	kleurloos-oranjebruin

[1)] Twee omslagtrajecten.

Tabel 2.10 Gehalte en dichtheid van oplossingen bij 293 K

gehalte	dichtheid [kg/m^3]								
[massa – %]	HCl	HNO_3	H_3SO_4	CH_3COOH	H_3PO_4	NH_3	NaOH	KOH	C_2H_5OH
1	1003,2	1003,6	1005,1	999,6	1003,6	994	1009,5	1008,3	996,3
5	1023,0	1025,6	1031,7	1005,5	1025,4	977	1053,8	1045,2	989,3
10	1047,4	1054,3	1066,1	1012,5	1053,2	957	1108,9	1098,3	981,9
15	1072,5	1084,2	1102,0	1019,5	1082,5	940	1164,0	1139,9	975,2
20	1098,0	1115,0	1139,4	1026,3	1113,4	923	1219,1	1188,4	968,7
25	1123,9	1146,9	1178,3	1032,6	1146,1	907	1273,8	1238,7	961,7
30	1149,3	1180,0	1218,5	1038,4	1180,5	892	1327,9	1290,4	953,9
35	1174,0	1214,0	1259,9	1043,8	1216		1379,9	1344,0	944,9
40	1198,0	1246,3	1308,2	1048,8	1254		1430,0	1399,1	935,2
45		1278,3	1347,6	1053,4	1293		1478,0	1455,8	924,8
50		1310,0	1395,1	1057,5	1335		1525,3	1514,3	913,9
55		1339,3	1445,3	1061,1	1379				902,7
60		1366,7	1498,3	1064,2	1426				891,1
65		1391,3	1553,3	1066,6	1475				879,5
70		1413,4	1610,5	1068,5	1526				876,6
75		1433,7	1669,2	1069,6	1579				855,7
80		1452,1	1727,2	1070,0	1633				843,6
85		1468,6	1778,6	1068,9	1689				831,0
90		1482,6	1814,4	1066,1	1746				818,0
95		1493,2	1833,7	1060,5	1806				804,2
100		1512,9	1830,5	1049,8	1870				789,3

Tabel 2.11 Concentraties van in de handel zijnde zuren

zuur	gehalte [massa-%]	dichtheid bij 293 K [kg/m^3]	molariteit [M]
mierenzuur	98–100	1220	26
azijnzuur (ijsazijn)	99–100	1060	17
azijnzuur verd.	30	1040	5
fosforzuur	89	1750	16
fosforzuur	85	1690	15
zoutzuur	36	1180	12
zoutzuur	32	1160	10
salpeterzuur	65	1400	14
salpeterzuur, rokend	86	1500	20
salpeterzuur, verdund	25	1150	5
zwavelzuur conc.	95–97	1840	18
zwavelzuur, verd.	16	1110	2
zwavelzuur, rokend ca. 65% SO_3		1990	–

Tabel 2.12 Normaal redoxpotentialen [V]

oxidator		reductor	normaal-potentiaal
$Li^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Li(s)$	− 3,05
$K^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$K(s)$	− 2,92
$Ba^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Ba(s)$	− 2,90
$Ca^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Ca(s)$	− 2,76
$Na^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Na(s)$	− 2,71
$Al(OH)_4^- + 3\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Al(s) + 4\ OH^-$	− 2,35
$Mg^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Mg(s)$	− 2,38
$Al^{3+} + 3\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Al(s)$	− 1,67
$Zn(OH)_4^{2-} + 2e^-$	$\rightleftharpoons$	$Zn(s) + 4\ OH^-$	− 1,22
$HSO_4^- + H^+ + 2e^-$	$\rightleftharpoons$	$SO_3^{2-} + H_2O$	− 0,90
$2\ H_2O + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$H_2(g) + 2\ OH^-$	− 0,83
$Zn^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Zn(s)$	− 0,76
$Cr^{3+} 3\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cr(s)$	− 0,74
$2\ CO_2(g) + 2\ H^+ + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$H_2C_2O_4$	− 0,49
$S(s) + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	S^{2-}	− 0,51
$Fe^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Fe(s)$	− 0,41
$Co^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Co(s)$	− 0,28
$Ni^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Ni(s)$	− 0,23
$Sn^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Sn(s)$	− 0,14
$Pb^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Pb(s)$	− 0,13
$2\ H^+ + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$H_2(g)$	0,00
$HCOOH + 2\ H^+ + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$H_2CO + H_2O$	+ 0,06
$S_4O_6^{2-} + 2e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ S_2O_3^{2-}$	+ 0,10
$S(s) + 2\ H^+ + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	H_2S	+ 0,14
$Sn^{4+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	Sn^{2+}	+ 0,15
$Cu^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	Cu^+	+ 0,16
$HSO_4^- + 3H^+ + 2e^-$	$\rightleftharpoons$	$SO_2 + 2\ H_2O$	+ 0,20
$AgCl(s) + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Ag(s) + Cl^-$	+ 0,22
$Hg_2Cl_2(s) + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ Hg(l) + 2\ Cl^-$	+ 0,27
$Cu^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cu(s)$	+ 0,34
$Fe(CN)_6^{3-} + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Fe(CN)_6^{4-}$	+ 0,36
$O_2(g) + 2\ H_2O + 4\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$4\ OH^-$	+ 0,40
$Cu^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cu(s)$	+ 0,52
$I_2 + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$2I^-$	+ 0,53
$MnO_4^- + e^-$	$\rightleftharpoons$	MnO_4^{2-}	+ 0,56

Tabel 2.12 (vervolg)

oxidator		reductor	normaal-potentiaal
$MnO_4^- + 2H_2O + 3e^-$	$\rightleftharpoons$	$MnO_2(s) + 4\ OH^-$	+ 0,58
$O_2(g) + 2\ H^+ + 2e$	$\rightleftharpoons$	H_2O_2	+ 0,68
$Fe^{3+} + e^-$	$\rightleftharpoons$	Fe^{2+}	+ 0,77
$Hg_2^{2+} + 2e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ Hg(l)$	+ 0,80
$Ag^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$Ag(s)$	+ 0,80
$NO_3^- + 2H^+ + e^-$	$\rightleftharpoons$	$NO_2(g) + H_2O$	+ 0,81
$Hg^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Hg(l)$	+ 0,85
$2\ Hg^{2+} + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	Hg_2^{2+}	+ 0,91
$H_2O_2 + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ OH^-$	+ 0,94
$NO_3^- 4H^+ + 3e^-$	$\rightleftharpoons$	$NO(g) + 2\ H_2O$	+ 0,96
$AuCl_4^- + 3e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ Br^-$	+ 1,07
$O_2(g) + 4\ H^+ + 4\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ H_2O$	+ 1,23
$MnO_2(s) + 4\ H^+ 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Mn^{2+} + 2\ H_2O$	+ 1,21
$O_3(g) + H_2O + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$O_2(g) + 2\ OH^-$	+ 1,24
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ Cr^{3+} + 7\ H_2O$	+ 1,33
$Cl_2 + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ Cl^-$	+ 1,36
$ClO_3 + 6\ H^+ + 6\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cl^- + 3\ H_2O$	+ 1,45
$Au^{3+} + 3\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Au(s)$	+ 1,50
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^-$	$\rightleftharpoons$	$Mn^{2+} + 4\ H_2O$	+ 1,52
$2\ HClO + 2\ H^+ + 5\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$Cl_2 + 2\ H_2O$	+ 1,63
$PbO_2(S) + HSO_4^- + 3H^+ + 2e^-$	$\rightleftharpoons$	$PbSO_4(s) + 2\ H_2O$	+ 1,69
$H_2O_2 + 2\ H^+ + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ H_2O$	+ 1,77
$O_3(g) + 2\ H^+ + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$O_2(g) + H_2O$	+ 2,07
$F_2(g) + 2\ e^-$	$\rightleftharpoons$	$2\ F^-$	+ 2,87

De reacties vinden plaats in oplossing; alle ionen zijn gehydrateerd. De concentraties van de opgeloste deeltjes zijn steeds 1,00 mol/dm^{-3}; $T = 298$ K.

Tabel 2.13 Redoxindicatoren

indicator	omslagpotentiaal [E° volt] (pH 7; 293 K)	kleuromslag
neutraalrood 'Merck' (toluyleenrood) amidodimethylaminotoluaminozine-HCl	− 0,32	rood-kleurloos
methyleenblauw 'Merck' methylthioninchloride	0,01	blauw-kleurloos
thionine 3,7-diaminophenothiazoniumchloride	0,06	violet-kleurloos
variamineblauw 'Merck' 4-amino-4 methoxydiphenylamine	0,60	blauw-kleurloos
diphenylamine $C_{12}H_{11}N$	0,76	blauw-kleurloos
diphenylaminsulfonzuur	0,83	violet-kleurloos
ferroin 'Merck' O-phenanthroline	1,06	rood-bleekblauw

Bron: Merck, Hilfstabellen für das chem. Laboratorium.

Tabel 2.14 Constanten voor molaire vriespuntsdaling en kookpuntsverhoging van enkele oplosmiddelen

oplosmiddel	smeltpunt [K]	molaire vriespuntsdaling [10^3 kg·K/kmol]	kookpunt [K]	molaire kookpuntsverhoging [10^3 kg·K/kmol]
aceton			329,35	1,71
azijnzuur	289,78	3,90	391,05	3,07
benzeen	278,68	4,90	353,25	2,64
chloroform			334,85	3,63
cyclohexaan			353,89	2,79
ethanol			351,65	1,04
ether	157,0	1,8	307,70	1,83
fenol	314,05	7,40	454,98	3,56
n-hexaan			342,10	2,75
kamfer	452,7	40,0	481	6,0
methanol			338,11	0,83
naftaleen	353,60	6,87	491,15	5,80
tetra			349,69	4,88
tolueen			383,75	3,35
water	273,15	1,86	373,15	0,51

Tabel 2.15 Calorische boven- en onderwaarden van enkele gassoorten (bij 1,0135 bar, 298,15 K)

gassoort	calorische waarde [MJ/m^3]	
	bovenwaarde	onderwaarde
aardgas (Slochteren)	35,103	31,678
methaan	39,816	35,882
ethaan	70,305	64,353
propaan	101,234	93,207
butaan	133,691	123,466

Bron: *Basisgegevens Aardgassen*, 1980, N.V. Nederlandse Gasunie

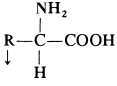
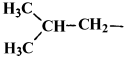
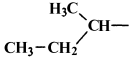
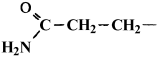
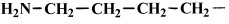
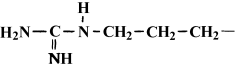
Tabel 2.16 Equivalent geleidingsvermogen van ionen in water ($T = 298$ K)

positief ion	equivalent geleidingsvermogen $[10^{-5}\cdot m^2/(\Omega\cdot mol)]$	*negatief* ion	equivalent geleidingsvermogen $[10^{-5}\cdot m^2/(\Omega\cdot mol)]$
H^+	3498	OH^-	1983
Li^+	387	F^-	554
Na^+	501	Cl^-	764
K^+	735	Br^-	781
$\frac{1}{2}Mg^{2+}$	531	I^-	768
$\frac{1}{2}Ca^{2+}$	595	NO_3^-	714
$\frac{1}{2}Ni^{2+}$	530	$\frac{1}{2}SO_4^{2-}$	798
$\frac{1}{2}Cu^{2+}$	536	$\frac{1}{3}PO_4^{3-}$	800
$\frac{1}{2}Zn^{2+}$	528	$\frac{1}{2}CO_3^{2-}$	593
$\frac{1}{2}Fe^{2+}$	540	HCO_3^-	445
Ag^+	635	HSO_4	520
$\frac{1}{3}Al^{3+}$	630	$HCOO^-$	546
$\frac{1}{3}Fe^{3+}$	684	CN^-	820
$\frac{1}{2}Pb^{2+}$	594	$\frac{1}{4}Fe(CN)_6^{4-}$	1105
NH_4^+	734	$\frac{1}{3}Fe(CN)_6^{3-}$	1010
$\frac{1}{2}Ba^{2+}$	636	MnO_4^-	610
		$CH_2CO_2^-$	410

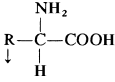
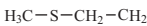
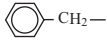
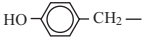
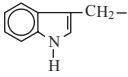
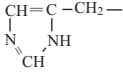
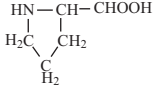
Het *equivalent geleidingsvermogen* Λ_0 is de limietwaarde van het equivalent geleidingsvermogen Λ bij oneindige verdunning.
Het equivalent geleidingsvermogen Λ is gedefinieerd als het quotiënt van het *specifieke geleidingsvermogen* κ [1/(Ω·m)] en de *concentratie* van het opgeloste elektrolyt [mol/m^3].

2.4 Diversen

Tabel 2.17 Aminozuren

	naam	afkorting	iso-elektrisch punt [pH]
	glycine	Gly	6,0
	analine	Ala	6,0
	valine	Val	6,0
	leucine	Leu	6,0
	isoleucine	Ile	6,0
	serine	Ser	5,7
	threonine	Thr	5,6
	asparaginezuur	Asp	2,8
	glutaminezuur	Glu	3,2
	asparagine	Asn	5,4
	glutamine	Gln	5,7
	lysine	Lys	9,6
	arginine	Arg	11,2

Tabel 2.17 (vervolg)

	naam	afkorting	iso-elektrisch punt [pH]
	cysteine	Cys	5,1
	methionine	Met	5,7
	phenylalanine	Phe	5,5
	tyrosine	Tyr	5,7
	tryptofaan	Trp	5,9
	histidine	His	7,5
	proline	Pro	6,3

Tabel 2.18 Dipoolmomenten van moleculen in de gasfase (zie ook par. 1.1)

molecuul	naam	dipool-moment [10^{-30} Cm]	molecuul	naam	dipool-moment [10^{-30} Cm]
AgCl	zilverchloride	19,1	CH_2O_2	mierezuur	4,70
BF_3	boortrifluoride	0	CH_3Cl	chloromethaan	6,24
HBr	waterstofbromide	2,74	CH_4O	methanol	5,67
HCl	waterstofchloride	3,60	C_2H_2	acetyleen	0
KCl	kaliumchloride	34,3	C_2H_4	ethyleen	0
NaCl	natriumchloride	30,0	C_2H_2O	acetaldehyde	8,97
$SiCl_4$	siliciumtetrachloride	0	$C_2H_4O_2$	azijnzuur	5,80
HF	waterstoffluoride	6,07	C_2H_5Cl	chloroethaan	8,34
SF_6	zwavelhexafluoride	0	C_2H_6	ethaan	0
HI	waterstofiodide	1,47	C_2H_6O	ethanol	5,64
H_2O	water	6,17	$C_2H_6O_2$	ethyleenglycol	7,61
H_2O_2	waterstofperoxide	7,34	C_3H_6	propeen	1,22
H_2S	waterstofsulfide	3,24	C_3H_6O	aceton	9,61
NH_3	ammonia	4,90	C_3H_8	propaan	0,28
NO	stikstofmonoxide	0,51	C_3H_8O	propanol-1	5,60
NO_2	stikstofdioxide	1,05	C_3H_8O	propanol-2	5,54
N_2O	distikstofoxide	0,56	C_4H_4O	furaan	2,20
SO_2	zwaveldioxide	5,44	C_4H_6	butadieen-1,3	0
SO_3	zwaveltrioxide	0	C_4H_8	buteen-1	1,13
CCl_4	tetrachloorkoolstof	0	C_4H_{10}	butaan	$<0,17$
CO	koolmonoxide	0,37	$C_4H_{10}O$	butanol	5,54
CO_2	kooldioxide	0	$C_4H_{10}O$	diethylether	3,84
CS	zwavelkoolstof	6,60	C_6H_5Cl	chlorobenzeen	5,64
$CHClF_2$	chlorodifluoromethaan	4,74	C_6H_6	benzeen	0
$CHCl_3$	chloroform	3,37	C_6H_6O	fenol	4,84
HCN	waterstofcyanide	9,94	C_7H_8	tolueen	1,20
CH_2Cl_2	dichloromethaan	5,34			

Literatuur

- *BINAS, informatieboek VWO/HAVO voor het onderwijs in de natuurwetenschappen*
  Groningen, Wolters.
- Lide, D.R., e.a. (eds.)
  Handbook of Chemistry and Physics
  Cleveland, CRC Press
- Pauling, L.
  General Chemistry
  San Francisco, Freeman.
- Perry, J.H., e.a. (eds.)
  Chemical Engineers' Handbook
  New York, McGraw Hill.
- Stull, D.R., E.F. Westrum, G.C. Sinke
  The Chemical Thermodynamics of Organic Compounds
  New York, John Wiley & Sons.
- Wagman, D.D., e.a.
  'The NBS tables of chemical thermodynamic properties, Selected values for inorganic and C_1 and C_2 organic substances in SI units'
  In: *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 11, 1982, Supplement no. 2

Informatica-techniek B1

1 Digitale schakelingen
- 1.1 Voorstellingswijzen
- 1.2 Propositie-logica
- 1.3 Theorema van De Morgan
- 1.4 Minterm-vorm en maxterm-vorm
- 1.5 Combinatorische schakelingen
- 1.6 Sequentiële schakelingen (flip-flops)

2 Coderingen
- 2.1 Binaire rekencodes
- 2.2 Binaire datacodes
- 2.3 ASCII-code en EBCDIC-code
- 2.4 PC beeldschermcodes
- 2.5 Codes voor instrumentatie toepassingen
- 2.6 Formaten grafische bestanden
- 2.7 Foutendetectie en -correctie

3 Elektrische interfaces
- 3.1 Seriële interface (V24/RS232)
- 3.2 Testplug
- 3.3 Parallel interface (Centronics)
- 3.4 Video-interfaces (PC)
- 3.5 Toetsenbord-interface (PC)
- 3.6 Joystick-interface
- 3.7 De USB interface
- 3.8 De IEEE1394 interface
- 3.9 Draadloze interfaces
- 3.10 Interfaces voor meetinstrumenten en procesbesturing

4 Datacommunicatie
- 4.1 Computernetwerken
- 4.2 Ethernet Netwerken
- 4.3 Netwerkprotocollen

4.4 Internetverbindingen
4.5 ISDN en analoge telefonie
4.6 Modem-codes
4.7 OSI Referentie model

5 Microcomputers
5.1 Architectuur
5.2 PC-systemen
5.3 PC-componenten
5.4 Disk drive connectors

1 Digitale schakelingen

1.1 Voorstellingswijzen

Tabel 1.1 Overzicht voorstellingswijzen

verzamelingen-leer	relais-techniek	poort-schakeling	Karnaugh-diagram en schakelfunctie F	waarheids-tabel	toelichting
0: lege verzameling	onderbreking	laag	$F = 0$	F: 0	*Geen verbinding*
1: niet lege verzameling	verbinding	hoog	$F = 1$	F: 1	*Verbinding*
X: verzame-ling X	maakcontact X	X — 1 — F eenheidsfunctie	$F = X$	X | F: 0 | 0; 1 | 1	De schakelfunctie volgt het gedrag van schakelvariabele X
$\bar{X}$: ontkenning van verzameling X	verbreekcontact X	X — 1 — F INVERTOR	$F = \bar{X}$	X | F: 0 | 1; 1 | 0	De schakelfunctie volgt het inverse (= omgekeerde) gedrag van schakelvariabele X
$X \cdot Y$ ($X \cap Y$) doorsnede, logisch product	serieschakeling	X, Y — & — F AND (EN-poort)	$F = X \cdot Y$	X Y | F: 0 0 | 0; 0 1 | 0; 1 0 | 0; 1 1 | 1	De schakelfunctie is alleen 1 wanneer tegelijkertijd zowel de schakel-variabele $X = 1$ EN $Y = 1$, anders 0
$X+Y$ ($X \cup Y$) vereniging, logische som	parallelschakeling	X, Y — ≧1 — F OR (OF-poort)	$F = X + Y$	X Y | F: 0 0 | 0; 0 1 | 1; 1 0 | 1; 1 1 | 1	De schakelfunctie is 1 wanneer er minstens één van de schakelvariabelen gelijk is aan 1. Alleen wanneer beide schakelvariabelen 0 zijn, levert de schakelfunctie een 0.

Bij digitale schakelingen kennen we twee begrippen:
- de *logische interne toestanden* gebruikelijk aangeduid met de waarden 1 en 0, soms ook met resp. True (Waar) en False (Onwaar);
- de *externe fysische grootheden* veelal aangeduid met H (High) en L (Low), waarbij H altijd de meest positieve waarde aangeeft.

Het verband tussen deze twee begrippen verschilt naar gelang *positieve logica* of *negatieve logica* gebruikt is. Bij positieve logica komt de logische 1-toestand overeenkomt met de H-waarde van de fysische grootheid (spanning, stroomsterkte, vloeistofniveau, druk, etc) en de logische 0 met een fysische L-waarde. Bij negatieve logica komt de logische 1 en 0 overeen met respectievelijk de L en H.

Tabel 1.2 Symboolvergelijkingsschema met oudere nog voorkomende voorstellingswijzen

	ook nog gebruikte notatie		oude notatie	huidige notatie
NOT (INVERSIE)				
AND (EN)				
OR (OF)				
EXCL. OR (EXCL. OF)				
NAND (NIET EN)				
NOR (NIET OR)				
EXL. NOR (NIET EXCL. OF)				

De huidige norm is beschreven in NEN 5155-*Schemasymbolen Binaire Logica-elementen*, geldt sinds 1994 en is volledig equivalent aan de internationale IEC 617 part 12 norm van 1991. De oude norm gold sinds 1984.

Gangbaar is het om bij de beschrijving van werkingsprincipes steeds uit te gaan van positieve logica (verreweg de meest gebruikte vorm van logica IC's), zodat louter 0 en 1-aanduidingen volstaan. Voor het maken van aansluitingen of het uitvoeren van metingen dient men erop bedacht te zijn dat incidenteel nog negatieve logica voorkomt.

De huidige functie-aanduiding binnen de symbolen laat veel meer varianten toe dan mogelijk was met de oude. De eventueel op de uitgang aangeduide inversie buiten beschouwing gelaten, geeft de functie-aanduiding in de formule aan hoe de uitgang 1 wordt (zie tabel 1.3).

Tabel 1.3 Enkele functie-aanduidingen binnen symbolen

functie	uitgang is 1 als:
=	alle ingangen in dezelfde logische toestand zijn
= 1	als exact 1 ingang 1 is
= m	als exact *m* ingangen 1 zijn
2K	als een even aantal ingangen 1 is
2K + 1	als een oneven aantal ingangen 1 is
> n/2	als de meerderheid van de ingangen 1 is

Behalve de algemene functie-aanduiding van het symbool kan de functie van individuele ingangen en uitgangen aangegeven worden. Dit wordt gedaan door een aanduiding uit tabel 1.4

Tabel 1.4 Functie-aanduidingen bij in- en uitgangen

symbool	toestandsniveau
In- en uitgangen	
>	Bij een overgang van 0 naar 1 links, wordt (kortstondig) rechts een 1 afgegeven
▷	Voorzien van speciale versterking (bij ingangen voor gevoeligheid, bij uitgangen voor de belastbaarheid).
E	Extension input/output voor aansluiting uitbreidingsschakelingen.
A	Adres input/output.

Tabel 1.4 (vervolg)

symbool	toestandsniveau
Uitgangen	
⌝	Uitgang met uitstel-effect.
▽	Tri-state uitgang, kent naast 0 en 1 nog een 'niet-aangesloten' toestand.
Ingangen	
	Ingang met hysteresis.
EN	Enable ingang (vrijgeef-ingang). De functie is vrijgegeven als deze ingang 1 is. Als deze ingang 0 is, is de werking geblokkeerd en zijn alle uitgangen 0.
D	D-ingang. De toestand van de D-ingang wordt intern opgeslagen. De opgeslagen toestand volgt altijd de ingang.
J **K**	J-ingang/K-ingang. Wanneer de J-ingang op 1 komt, wordt er een 1 opgeslagen. Wanneer de K-ingang op 1 komt, wordt er een 0 opgeslagen. Wanneer de J- en K-ingangen beide op 1 komen, wordt de opgeslagen inhoud gecomplementeerd. Is een J- of K-ingang 0 dan heeft hij geen invloed.
R **S**	R-ingang/S-ingang. Wanneer een R-ingang op 1 komt, wordt er een reset uitgevoerd. Wanneer een S-ingang op 1 komt, wordt er een set uitgevoerd. De actie als R- en S-ingangen beide op 1 komen is ongedefinieerd. Is een R- of S-ingang 0 dan heeft hij geen invloed.
→**m** ←**m**	Schuifingang. Telkens als deze ingang 1 wordt, schuift de inhoud *m* plaatsen in de pijlrichting. Als *m* weggelaten is, wordt er 1 plaats opgeschoven.
+**m** −**m**	Optel/Aftelingang. Wordt deze ingang 1, dan wordt de teller met *m* eenheden verhoogd resp. verminderd.

te plaatsen bij de in- of uitgang, binnen de rechthoek van het symbool.

Daarnaast duidt men middels *afhankelijkheden* de relatie tussen in- en uitgangen aan. Bij de beïnvloedende ingang staat het type afhankelijkheid gevolgd door een uniek nummer. De beïnvloedende in- en uitgangen worden aangeduid met hetzelfde unieke nummer. Tabel 1.5 toont de belangrijkste afhankelijkheden met hun afkorting.

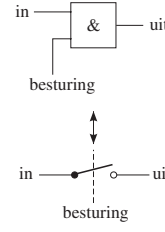
Tabel 1.5 Belangrijkste afhankelijkheden en hun afkortingen

symbool	betekenis
A	adres
C	commando
EN	enable
G	toestemming (AND)
M	modus selectie
N	negatie (complement)
R	reset
S	set
V	override (OR)

Voor het besturen van signalen worden vaak de volgende twee basisschakelingen gebruikt: de *aan/uit schakelfunctie* en de *doorgever/invertor functie*.

Met een AND-poort wordt een logische (spanningsgestuurde) *aan/uit schakelfunctie* gemaakt:

- Besturingssignaal 0: schakelaar 'open', oftewel de uitgang is 0.
- Besturingssignaal 1: schakelaar 'gesloten', oftewel de uitgang volgt het ingangssignaal.



besturing \ in	0	1	
0	0	0	deze rij: besturing is nul, uitgang is nul
1	0	1	deze rij: besturing is één, uitgang volgt ingang

Een tweede veel gebruikte basisschakeling is dezelfde schakeling waarbij de AND-poort vervangen is door een Exclusieve OR-poort. Zo ontstaat een bestuurde *doorgever/invertor*. Is het besturingssignaal 0 dan volgt het uitgangssignaal de ingang, is het besturingssignaal 1 dan is op de uitgang het geïnverteerde ingangssignaal beschikbaar.

1.2 Propositie-logica

Axioma's:

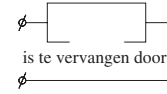
$0+0=0$	$0\cdot 0=0$
$0+1=1$	$0\cdot 1=0$
$1+0=1$	$1\cdot 0=0$
$1+1=1$	$1\cdot 1=1$

Wetten:

$x+0=x$	$x\cdot 0=0$	
$x+1=1$	$x\cdot 1=x$	
$x+\overline{x}=1$	$x\cdot\overline{x}=0$	
$\overline{\overline{x}}=x$		
$x+x=x$	$x\cdot x=x$	idempotentiewet
$x+y=y+x$	$x\cdot y=y\cdot x$	commutatieve wet
$(x+y)+z=x+(y+z)$	$(x\cdot y)\cdot z=x\cdot(y\cdot z)$	associatieve wet
$x\cdot(y+z)=x\cdot y+x\cdot z$	$x+y\cdot z=(x+y)\cdot(x+z)$	distributieve wet
$x\cdot(x+y)=x$	$x+x\cdot y=x$	absorptie-wet
$x\cdot(\overline{x}+y)=x\cdot y$	$x+\overline{x}\cdot y=x+y$	absorptie-wet
$x\cdot z+\overline{x}\cdot y+y\cdot z=x\cdot z+\overline{x}\cdot y$	$(x+z)\cdot(\overline{x}+y)\cdot(y+z)=(x+z)\cdot(\overline{x}+y)$	absorptie-wet

Toelichting

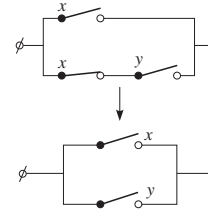
Derde axioma: $1 + 0 = 1$
De 1 is een verbinding.
De 0 is een onderbreking.
De $+$ duidt op parallelschakeling.
Het linker lid is voor alle denkbare omstandigheden te vervangen door het rechterlid.



Absorptie-wet: $x+\overline{x}\cdot y=x+y$
Bewijs d.m.v. waarheidstabel:

x	y	$\overline{x}$	$\overline{x}\cdot y$	$x+\overline{x}\cdot y$	$x+y$
0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1
1	1	0	0	1	1

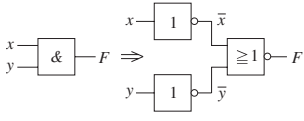
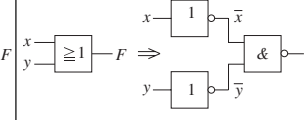
De identiek werkende schakelingen:



1.3 Theorema van De Morgan

In ons denken wordt vooral gewerkt met de AND- de OR en de NOT. De logica regels uit paragraaf 1.2 dienen dan ook om deze logische ontwerpen te maken en te ordenen. Echter op het moment dat een logisch ontwerp gebouwd moet worden, blijken daartoe vaak vooral NAND- en NOR-bouwstenen voorhanden te zijn. Vooral het *theorema van De Morgan* helpt bij het omzetten van het logisch ontwerp naar deze andere bouwstenen. De reden dat vooral NAND- en NOR-bouwstenen gebruikt worden, komt voort uit hun hogere 'fan-out' getal. Dit getal geeft aan met hoeveel ingangen één uitgang belast mag worden.
Een tweede toepassing is het omkeren van een te realiseren schakelfunctie. Een AND -en een OR-functie kunnen worden verwisseld wanneer de inverse schakelvariabelen beschikbaar zijn. Meestal zijn binnen één IC meerdere NAND- of meerdere NOR-circuits te vinden. Wanneer binnen één IC nog NAND-poorten 'over' zijn, kunnen deze aan de hand van dit theorema worden toegepast voor AND -en voor OR-functies.

Tabel 1.6 Theorema van De Morgan

twee variabelen: overgang AND → NOR	twee variabelen: overgang OR → NAND
$x \cdot y = \overline{\overline{x} + \overline{y}}$	$x + y = \overline{\overline{x} \cdot \overline{y}}$
	
$p \cdot q \cdot r \cdot \ldots = \overline{\overline{p} + \overline{q} + \overline{r} + \ldots + \overline{z}}$	$p + q + r + \ldots + z = \overline{\overline{p} \cdot \overline{q} \cdot \overline{r} \cdot \ldots \cdot \overline{z}}$

Voor wie de formules lastig vindt om te onthouden of voor als men twijfelt of men een formule juist heeft gereproduceerd, is er altijd nog de mogelijkheid tot verificatie via de waarheidstabel.

Tabel 1.7 Voorbeeld van een verificatie via een waarheidstabel, toegepast op het theorema van De Morgan voor de overgang van OR naar NAND

x	y	$\overline{x}$	$\overline{y}$	$\overline{x} \cdot \overline{y}$	$\overline{\overline{x} \cdot \overline{y}}$	$x + y$
0	0	1	1	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1
1	0	0	1	0	1	1
1	1	0	0	0	1	1

1.4 Minterm-vorm en maxterm-vorm

Vooral bij uitgebreidere logische ontwerpen leidt het theorema van De Morgan niet altijd tot de meest simpele opbouw. Dan is het vaak nodig om het logisch ontwerp eerst te ontbinden in hapklare brokjes (de *mintermen* of de *maxtermen*), die onderling louter gekoppeld zijn door hetzij een som (de minterm-vorm) dan wel door een product-functie (de maxterm-vorm).
Deze paragraaf laat zien hoe deze methoden werken. Tabel 1.9 toont de basisschakeling die hoort bij de gevonden mintermen en maxtermen. De minterm-vorm en de maxterm-vorm zijn in principe twee gelijkwaardige manieren om een *schakel-functie F* uit te drukken afhankelijk van v *schakelvariabelen*.

Minterm-vorm

De schakelfunctie wordt geschreven als de som van een aantal producttermen (de '*mintermen*'):

$$F = a_0 \cdot m_0 + a_1 \cdot m_1 + a_2 \cdot m_2 + \ldots + a_n \cdot m_n$$

m_0, m_1, m_2, …, m_n zijn de *producttermen* (zie tabel 1.8).
a_0, a_1, a_2, …, a_n geven aan of de overeenkomstige productterm aanwezig ($a_i = 1$) of afwezig is ($a_i = 0$).

Bij de bovenstaande schakelformule voor F geldt dus de volgende afbakening:

$n = 2^v - 1$; voor $i = 0, \ldots, n$ geldt:
$a_i = 0 \rightarrow$ minterm m_i is afwezig
$a_i = 1 \rightarrow$ minterm m_i is aanwezig

Tabel 1.8 Min- en maxtermen bij drie variabelen (x, y, z)

	x	y	z	mintermen	maxtermen
0	0	0	0	$m_0 = \overline{x} \cdot \overline{y} \cdot \overline{z}$	$M_0 = \overline{m_7} = x + y + z$
1	0	0	1	$m_1 = \overline{x} \cdot \overline{y} \cdot z$	$M_1 = \overline{m_6} = x + y + \overline{z}$
2	0	1	0	$m_2 = \overline{x} \cdot y \cdot \overline{z}$	$M_2 = \overline{m_5} = x + \overline{y} + z$
3	0	1	1	$m_3 = \overline{x} \cdot y \cdot z$	$M_3 = \overline{m_4} = x + \overline{y} + \overline{z}$
4	1	0	0	$m_4 = x \cdot \overline{y} \cdot \overline{z}$	$M_4 = \overline{m_3} = \overline{x} + y + z$
5	1	0	1	$m_5 = x \cdot \overline{y} \cdot z$	$M_5 = \overline{m_2} = \overline{x} + y + \overline{z}$
6	1	1	0	$m_6 = x \cdot y \cdot \overline{z}$	$M_6 = \overline{m_1} = \overline{x} + \overline{y} + z$
7	1	1	1	$m_7 = x \cdot y \cdot z$	$M_7 = \overline{m_0} = \overline{x} + \overline{y} + \overline{z}$

Zie ook figuur 1.1 en 1.2.

Maxterm-vorm

De schakelfunctie wordt geschreven als het product van een aantal somtermen (de '*maxtermen*'):

$$F = (A_0 + M_0) \cdot (A_1 + M_1) \cdot (A_2 + M_2) \cdot \ldots \cdot (A_n + M_n)$$

M_0, M_1, $M_2, \ldots, M_n$ zijn de *somtermen* (zie tabel 1.8).
A_0, A_1, $A_2, \ldots, A_n$ geven aan of de overeenkomstige somterm aanwezig ($A_i = 0$) of afwezig is ($A_i = 1$).

Bij de bovenstaande schakelformule voor F geldt dus de volgende afbakening:

$n = 2^v - 1$; voor $i = 0, \ldots, n$ geldt:
$A_i = 0 \rightarrow$ maxterm M_i is aanwezig
$A_i = 1 \rightarrow$ maxterm M_i is afwezig

Voorbeeld: $F = \overline{x} \cdot \overline{y} \cdot z + \overline{x} \cdot y \cdot z + x \cdot \overline{y} \cdot \overline{z}$
kan worden geschreven als:

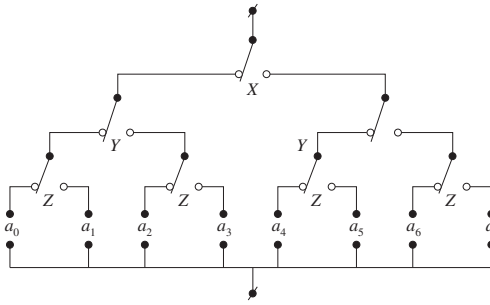
$$F = m_1 + m_3 + m_4 = \Sigma(1, 3, 4) =$$
$$= \overline{\overline{m_1} \cdot \overline{m_3} \cdot \overline{m_4}} = \overline{M_6 \cdot M_4 \cdot M_3} =$$
$$= M_0 \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot M_5 \cdot M_7 = \Pi(0, 1, 2, 5, 7) =$$
$$= (\overline{x} + \overline{y} + \overline{z})(\overline{x} + \overline{y} + z)(\overline{x} + y + \overline{z})(x + \overline{y} + z)(x + y + z)$$

1.5 Combinatorische schakelingen

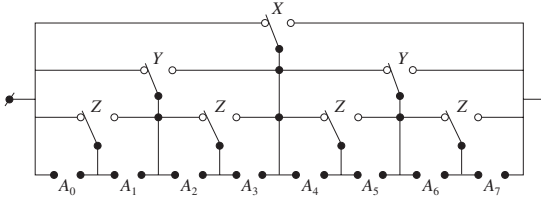
$$
\begin{aligned}
F &= a_0 \cdot m_0 + a_1 m_1 + a_2 m_2 + a_3 m_3 \\
&= a_0 \cdot \overline{x} \cdot \overline{y} + a_1 \cdot \overline{x} \cdot y + a_2 \cdot x \cdot \overline{y} + a_3 \cdot x \cdot y \\
&= (A_0 + M_0)(A_1 + M_1)(A_2 + M_2)(A_3 + M_3) \\
&= (A_0 + \overline{x} + \overline{y})(A_1 + \overline{x} + y)(A_2 + x + \overline{y})(A_3 + x + y)
\end{aligned}
$$

Tabel 1.9 Schakelfuncties met twee variabelen x, y

nr.	a_0 a_1 a_2 a_3	minitermen	maxitermen	schakelfunctie	naam	Karnaugh	symbolen
0	0 0 0 0		$M_0\,M_1\,M_2\,M_3$	$F = 0$	constante 0	0 | 0 0 | 0	
1	0 0 0 1	m_3	$M_1\,M_2\,M_3$	$F = x \cdot y$	AND (EN), doorsnede	0 | 0 0 | 1	
2	0 0 1 0	m_2	$M_0\quad M_2\,M_3$	$F = x \cdot \overline{y} = \overline{\overline{x} + y}$	inhibitie	0 | 1 1 | 0	
3	0 0 1 1	$m_2\ m_3$	$M_2\,M_3$	$F = x$	identiteit	0 | 0 1 | 1	
4	0 1 0 0	m_1	$M_0\,M_1\quad M_3$	$F = \overline{x} \cdot y = \overline{x + \overline{y}}$	inhibitie	0 | 1 0 | 0	
5	0 1 0 1	$m_1\quad m_3$	$M_1\quad M_3$	$F = y$	identiteit	0 | 1 0 | 1	
6	0 1 1 0	$m_1\ m_2$	$M_0\qquad M_2$	$F = x \cdot y + x \cdot y = x \oplus y$	XOR (eXclusief OR) (1) modulo twee (2)	0 | 1 1 | 0	
7	0 1 1 1	$m_1\ m_2\ m_3$	M_3	$F = x + y$	OR (OF), verenging	0 | 1 1 | 1	
8	1 0 0 0	m_0	$M_0\,M_1\,M_2$	$F = \overline{x}\,\overline{y} = \overline{x + y}$	NOR (NOF)	1 | 0 0 | 0	
9	1 0 0 1	$m_0\qquad m_3$	$M_1\,M_2$	$F = \overline{x} \cdot \overline{y} + x \cdot y = x \equiv y$	equivalentie	1 | 0 0 | 1	
10	1 0 1 0	$m_0\quad m_2$	$M_0\quad M_2$	$F = \overline{y}$	negatie, inverse	1 | 0 1 | 0	
11	1 0 1 1	$m_0\quad m_2\ m_3$	M_2	$F = x + \overline{y} = \overline{\overline{x} \cdot y}$	implicatie	1 | 0 1 | 1	
12	1 1 0 0	$m_0\ m_1$	$M_0\,M_1$	$F = \overline{x}$	negatie, inverse	1 | 1 0 | 0	
13	1 1 0 1	$m_0\ m_1\quad m_3$	M_1	$F = \overline{x} + y = \overline{x \cdot \overline{y}}$	implicatie	1 | 1 0 | 1	
14	1 1 1 0	$m_0\ m_1\ m_2$	M_0	$F = x + y = \overline{x \cdot y}$	NAND (NEN),	1 | 1 1 | 0	
15	1 1 1 1	$m_0\ m_1\ m_2\ m_3$		$F = 1$	constante 1	1 | 1 1 | 1	



Figuur 1.1 Minterm-vorm in relaistechniek (drie schakelvariabelen x, y, z); wanneer bijvoorbeeld m_3 en m_6 gemaakt moeten worden, dan wordt bij a_3 en a_6 een doorverbinding gemaakt (zie ook tabel 1.8)



Figuur 1.2 Maxterm-vorm in relaistechniek (drie schakelvariabelen x, y, z); wanneer bijvoorbeeld M_3 en M_6 gemaakt moeten worden, dan worden alle $A_0 \ldots A_7$ doorverbonden, behalve A_3 en A_6 (zie ook tabel 1.8)

1.6 Sequentiële schakelingen(flip-flops)

Voorstellingswijzen van Sequentiële schakelingen

Elke volgende toestand Q^{N+1} van de schakeling is een functie van de huidige toestand Q^N en van de ingangssignalen. Ook de uitgangssignalen Z zijn functies van Q^N en de ingangssignalen. Zie onderstaande sequentietabel.

huidige toestand Q^N	combinaties van ingangssignalen 000----------111
0 1 2	Q^{N+1}, Z Q^{N+1}, Z geeft voor elke huidige toestand en voor elke combinatie van ingangssignalen de volgende toestand Q^{N+1} en de uitgangssignalen.

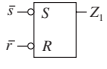
Karnaugh-diagram: geeft Q^{N+1} als functie van Q^N en de ingangssignalen.

Logische definitie-tabel: geeft Q^{N+1} als functie van Q^N en de ingangssignalen.
$Q^{N+1} = 0, 1, Q^N, \overline{Q}^N$ zijn gewoonlijk de enige mogelijkheden

Excitatietabel: geeft voor elke overgang $Q^N \rightarrow Q^{N+1}$ aan, welke ingangscombinatie die overgang kan bewerkstelligen.

Set/reset flip-flop

s = set, hoog actief
r = reset, hoog actief
Z_0 = flip-flop uitgang, reset prevaleert



$\overline{s}$ = set ingang, laag actief
$\overline{r}$ = reset ingang, laag actief
Z_1 = flip-flop uitgang, set prevaleert

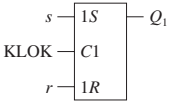
z_0 \ sr	00	01	11	10
0	0	0	0	1
1	1	0	0	1

$Z_0 = \overline{r}(s + z_0)$

z_1 \ sr	00	01	11	10
0	0	0	0	1
1	1	0	0	1

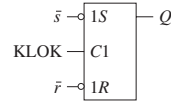
$Z_1 = s + \overline{r}z_1$

Gesynchroniseerde set/reset flip-flop



$Q_1^{N+1} = s^N + \bar{r}^N \cdot Q_1^N$

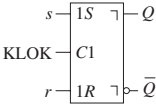
(*set* prevaleert)



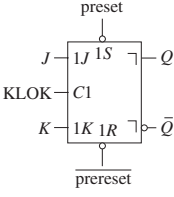
$Q_0^{N+1} = (s^N + Q_0^N) \cdot \bar{r}^N$

(*reset* prevaleert)

Meester en slaaf set-reset flip-flop



Meester en slaaf JK-flip-flop



$\overline{s}, \overline{r}$: laag-actieve asynchrone preset resp. prereset ingangen.
J, K: hoog-actieve synchrone stuuringangen.

Q^N \ J^N, K^N	00	01	11	10
0	0	0	1	1
1	1	0	0	1

$Q^{N+1} = J^N \cdot \bar{Q}^N + \bar{K}^N \cdot Q^N$

logische definitie-tabel

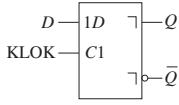
J^N	K^N	Q^{N+1}
0	0	Q^N
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{Q}^N$

excitatie-tabel

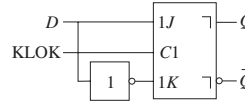
Q^N	Q^{N+1}	J^N	K^N
0	0	0	∗
0	1	1	∗
1	0	∗	1
1	1	∗	0

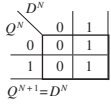
∗ = don't care

Meester en slaaf D-flip-flop



D-flip-flop gerealiseerd met *JK*-flip-flop:





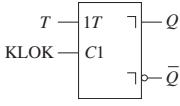
logische definitie-tabel

D^N	Q^{N+1}
0	0
1	1

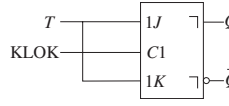
excitatie-tabel

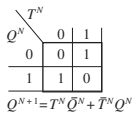
Q^N	Q^{N+1}	D^N
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

Meester en slaaf trigger-flip-flop



T-flip-flop gerealiseerd met *JK*-flip-flop:





logische definitie-tabel

T^N	Q^{N+1}
0	Q^N
1	$\overline{Q}^N$

excitatie-tabel

Q^N	Q^{N+1}	T^N
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

2 Coderingen

2.1 Binaire rekencodes

a Geheel en positief of nul

Bereik bij N bits: $0 \leqq g \leqq 2^N - 1$
Binair → *decimaal* (voorbeeld bij 8 bits)

2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	← gewicht
0	1	1	1	0	1	0	1	← binaire code voor g

$$g = 0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 =$$
$$0 \quad +64 \quad +32 \quad +16 \quad +0 \quad +4 \quad +0 \quad +1 \quad = 117$$

Decimaal → *binair:* herhaald delen door 2, resten van rechts naar links opschrijven

	2/117\	2/58\	2/29\	2/14\	2/7\	2/3\	2/1\	0
$58 \cdot 2 \rightarrow$	$\frac{116}{1}$	$\frac{58}{0}$	$\frac{28}{1}$	$\frac{14}{0}$	$\frac{6}{1}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{0}{1}$	

$$117 = 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1$$

Door ook negatieve machten van 2 toe te laten in deze reeks van gewichtsfactoren (g) kunnen ook breuken gerepresenteerd worden.

b Geheel, positief en negatief

Bereik bij N bits: $-2^{N-1} \leqq g \leqq 2^{N-1} - 1$

Het meest significante bit wordt gebruikt als tekenbit:
- tekenbit = 0: positief getal
- tekenbit = 1; negatief getal

Overige bits:
- bij tekenbit = 0 (positief) : zoals binaire code voor positieve getal
- bij tekenbit = 1 (negatief): geïnverteerde binaire code voor positieve getal + 1.

Deze representatie van negatieve getallen staat bekend als het *two's complement*. Ondanks de extra handeling van 1 er bij op te moeten tellen en het niet-symmetrische getalbereik heeft deze representatie het gewonnen van het zgn. *one's complement*, waarbij het negatieve getal louter de inversie was van het positieve getal. Het grote nadeel van het one's complement was dat daarbij naast het gewone getal nul ook een negatief getal nul ontstond, dat via extra schakelingen of programma's weer gecorrigeerd moest worden.

Binair → decimaal, two's complement:

-2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	← gewicht
1	0	1	0	1	1	1	0	← binaire code voor g

$$g = 1\cdot(-2^7) + 0\cdot 2^6 + 1\cdot 2^5 + 0\cdot 2^4 + 1\cdot 2^3 + 1\cdot 2^2 + 1\cdot 2^1 + 0\cdot 2^0 =$$
$$-128 \quad +0 \quad +32 \quad +0 \quad +8 \quad +4 \quad +2 \quad +0 \quad = -82$$

c Optellen van binaire getallen met positief of negatief teken

$$\begin{array}{rcccccccccc} & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & = & -\ 37 \\ & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & = & +144 \\ + & \boxed{1} & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & = & +\ 77 \end{array}$$

carry
vervalt

Overflow-detectie: wanneer beide getallen hetzelfde teken dragen, en het resultaat een ander teken heeft, is er overflow.

d Floating point (drijvende komma, reals)

Het getal G wordt weergegeven als $G = m{\cdot}g^w$

waarin: m = mantisse
g = grondtal
(gewoonlijk vast; gebruikelijke waarden: 2 en 16)
w = exponent, wijzer

m en w kunnen elk worden voorgesteld op één van de hiervoor beschreven manieren.

Gebruikelijk is dat:
– w (wijzer) een *signed interger* is; en
– m (mantisse) een *signed fraction* is.

Toepassingen floating point notatie:
– zeer grote getallen ($w \gg 0$);
– zeer kleine getallen ($w \ll 0$);
– bij beperkte nauwkeurigheid (beperkt aantal bits in m);
– voor wetenschappelijk rekenwerk.

Underflow is het verschijnsel dat optreedt als bij een bewerking de absolute waarde van het resultaat dermate klein wordt dat het niet meer is weer te geven in defloating point notatie.

e Notaties

In het voorgaande is steeds met de logische notatie gewerkt waarbij het meest significante bit altijd links stond. Men dient er rekening mee te houden dat ze in sommige apparatuur in de omgekeerde volgorde geïmplementeerd zijn. Bij koppeling van de verschillende soorten apparatuur is daardoor bij gegevensoverdracht een conversie nodig van de zgn. *byte-sex*. Plaatsgebonden aanduidingen zoals bijv. het meest linkse bit, bit 0 of het voorste bit moeten daarom met de nodige voorzichtigheid gehanteerd worden.

Ook zijn alle voorbeelden hierboven eenvoudigheidshalve gegeven op basis van 8 bits getallen. In de praktijk gebruikt men nauwelijks nog getallen van 8 bits (*byte*), maar meestal 16, 32 of 64 bits (resp. *half-word, word* en *double word*). Voor de grootheid *bytes* gebruikt men de eenheidsaanduiding "B", terwijl voor grootheid *bits* de "b" gebruikt wordt.

Was hierboven de *byte-sex* van belang voor de volgorde van de bits binnen een byte, zo ook bestaan er verschillen in volgorde van de bytes binnen een half-word, word of double word. Bij de zgn. *big-endian* vorm bevat het laatste byte het meest significante deel van het getal. De vorm waarbij men begint met het meest significante deel, wordt *little-endian* (soms: *low-endian*) genoemd.

Om binaire data weer te geven wordt veelal de *hexadecimalenotatie* gebruikt, omdat bij lange reeksen van 0-en en 1-en gemakkelijk

fouten gemaakt kunnen worden. Bij de hexadecimale notatie worden de bits gegroepeerd in groepjes van vier bits, waarvan de waarde wordt weergegeven (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F; de letters geven de waarden 10 t/m 15 aan). De groepjes van vier worden meestal in schrijfvolgorde samengenomen, behalve wanneer het op voorhand al bekend is dat het aantal bits geen viervoud is. In dat geval worden voor het eerste groepje minder bits genomen en wel zodanig dat het laatste groepje wel uit vier bits gaat bestaan. Analoog aan de hexadecimale notatie werkt de *octale notatie*. Deze laatste werkt met door een groepering per drie bits en wordt in de praktijk slechts nog in beperkte mate gebruikt.

Binaire voorvoegsels van ordegrootte

In de informatica volgen de voorvoegsels van ordegrootte voor de eenheid bytes niet de regels van de Decimale Voorvoegsels volgens S.I. (zie A1, tabel 1.15), omdat het hier om *Binaire Voorvoegsels* gaat. De binaire voorvoegsels worden voorts nog gebruikt bij het aantal kleuren in het kleurenpallet.

Let op dat transmissiesnelheden niet worden uitgedrukt in bytes per seconde maar in bits per seconde; ze gebruiken dus de decimale voorvoegsels.

Tabel 2.1 Binaire voorvoegsels

	symbool	waarde in aantal bytes	in decimale vorm
1 kilobyte	kB	2^{10} bytes	1024 bytes
1 megabyte	MB	2^{20} bytes	1.048.576 bytes
1 gigabyte	GB	2^{30} bytes	1.073.741.824 bytes
1 terabyte	TB	2^{40} bytes	1.099.511.627.776 bytes
1 petabyte	PB	2^{50} bytes	1.125.899.906.842.624 bytes

Men moet erop bedacht zijn dat dit niet altijd consequent wordt toegepast. Uit commerciële overweging gebruiken onder andere schijffabrikanten veelal de decimale voorvoegsels, zodat de capaciteit van de schijf dan net iets groter schijnt.

2.2 Binaire datacodes

Binair coderen van data

De methoden voor het binair coderen van *data* (gegevens) zijn afhankelijk van het karakter van de data en de bewerkingen die er op moeten worden uitgevoerd. Data kan bestaan uit getallen (*numeriek*), uit tekst (*karakters*) of uit codes voor bewerkingsalgoritmen (*programma's*). De *machinecode* is voor iedere soort microprocessor verschillend.

Toepassingen van codes

Iedere codering is ontworpen voor een bepaald doel. We onderscheiden codes voor:

- interne opslag en verwerking en datatransmissie
- weergave naar de gebruiker
- opmaak voor het beeldscherm
- opmaak van af te drukken teksten
- overige codes

Uiteraard zijn bij de keuze van een codering de eigenschappen van de codering zelf van belang, echter niet alleen. Veelal wordt de keuze geleid door de systeemcomponenten die verkrijgbaar zijn of indien het om datatransmissie toepassingen gaat, door welke coderingen aan de ontvangende zijde al in gebruik zijn.

Codes voor interne opslag en verwerking en voor datatransmissie

In de informatica wordt hoofdzakelijk de *ASCII code* of *ISO 7-bits code* (zie tabel 2.2) gebruikt, voor de verwerking van de data binnen de systemen en voor de datatransmissie naar andere systemen. De IBM mainframes vormen hier de belangrijkste uitzondering op; ze gebruiken *de acht-bits EBCDIC-code* (zie tabel 2.3).
Uitsluitend voor het uitvoeren van rekenkundige bewerkingen wordt intern in de computer tijdelijk overgaan op de *normale binaire code* (zie par. 2.1).

Codes voor weergave naar de gebruiker

De ASCII standaard laat slechts een beperkt aantal nationale karakterset varianten toe en beperkte zich tot het westerse schrift. Door de internationale toegangsmogelijkheden, onder meer door de

opkomst van internet, is de behoefte ontstaan om ook andere schriften te kunnen weergeven. Daarom wordt *Unicode* (zie: www.unicode.org) gebruikt voor de weergave naar de gebruiker. Unicode is een superset van de ASCII code en gebruikt twee bytes per teken in plaats van één byte per teken. Hierdoor is Unicode in staat de meeste schriften af te beelden. Daarnaast heeft ISO nog een vier bytes per teken codering ontwikkeld; deze wordt weinig gebruikt en kent Unicode als een subset.

Codes voor opmaak van het scherm

Met de introductie van de PC ontstond behoefte aan meer tekens dan de basistekens uit de ASCII en EBCDIC-codes. Nu wordt voor de tekens die op het PC scherm moeten verschijnen de *OEM-code* (zie tabel 2.5) gebruikt en de vooral voor PC printers gebruikte *ANSI-code* (zie tabel 2.6).
Echter ook de OEM-code bood vaak niet voldoende mogelijkheden en is uitgebreid door de zgn. *ANSI escape sequences* (zie tabel 2.7). De ANSI escape sequences worden vooral nog gebruikt voor de schermopmaak.

Codes voor opmaak van de afdruk

De ANSI escape sequences worden nog aangetroffen bij de oudere matrix naaldprinters. Voor het afdrukken op inktjet en laserjet printers wordt hoofdzakelijk de door Hewlett Packard ontwikkelde *PCL code* (*Printer Control Language*) gebruikt als de-facto standaard. Voor geavanceerde toepassingen wordt de *Postscript* opmaaktaal gebruikt voor het maken van de afdruk.
Voor de uitwisseling van documenten is het door Adobe ontwikkelde *PDF code* (*Portable Document Format*) de belangrijkste standaard als men zijn afdruk identiek wil laten verschijnen op een printer van een ander merk of op een ander papierformaat, bijv. een opmaak voor een Europees A4 formaat (zie D1 tabel 1.1) correct laten verschijnen bij afdrukken op een Amerikaans Letter of Legal formaat blad (zie D1 tabel 1.4).

Overige codes

Daarnaast wordt in telex toepassingen nog gebruik gemaakt van de vijf-bits *telex-code.* In de koppeling met meetinstrumenten en procesapparatuur wordt nog wel gebruik gemaakt van specifieke

codes, waarvan de *Gray-code* (zie tabel 2.8) en de *BCD-code* (zie tabel 2.9) de bekendste zijn.

De *Gray-code* heeft als eigenschap dat elke volgende waarde t.o.v. de één lagere of hogere waarde slechts in één bit verschillend is. Hierdoor kan worden vermeden dat het systeem zich 'vertelt', doordat de tellerstand al wordt uitgelezen vóórdat de ophoging in alle cijferposities tot stand is gekomen. Zo duurt bijvoorbeeld het ophogen van 0111111111111111 met 1 in de *normale binaire code* extreem lang doordat de carry van het meest rechtse cijfer door alle cijferposities heen moet 'rimpelen' naar het meest linkse cijfer.

De *BCD-code* wordt gebruikt voor de in- en uitvoer van decimale getallen, waarbij elk cijfer uit een decimaal getal afzonderlijk wordt gecodeerd. De BCD-code is een vier-bits code en gebruikt slechts 10 van de 16 mogelijke bitcombinaties. De meeste computers kennen aparte instructies voor het bewerken van BCD-gecodeerde gegevens. Ook bestaan er diverse IC's die op basis van de BCD-code werken.

2.3 ASCII-code en EBCDIC-code

Tabel 2.2 ISO zeven-bits-code (ASCII-code; zie ook noot[1)2)] op pag. B1/27

b_7 b_6 b_5	b_4	b_3	b_2	b_1		0	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	0	0	NUL	DLE	SP	0	@	P	'	p
	0	0	0	1	1	SOH	DC1	!	1	A	Q	a	q
	0	0	1	0	2	STX	DC2	"	2	B	R	b	r
	0	0	1	1	3	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
	0	1	0	0	4	EOT	DC4	$	4	D	T	d	t
	0	1	0	1	5	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
	0	1	1	0	6	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
	0	1	1	1	7	BEL	ETB	'	7	G	W	g	w
	1	0	0	0	8	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
	1	0	0	1	9	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
	1	0	1	0	A	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
	1	0	1	1	B	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
	1	1	0	0	C	FF	FS	,	<	L	\	l	|
	1	1	0	1	D	CR	GS	-	=	M	]	m	}
	1	1	1	0	E	SO	RS	.	>	N	^	n	~
	1	1	1	1	F	SI	US	/	?	O	—	o	DEL

gearceerde codes hebben een implementatie afhankelijk van het land (nationale varianten, zie tabel 2.3); hier is de Amerikaanse ASCII-code ingevuld

NUL = null character
SOH = start of heading
STX = start of text
ETX = end of text
EOT = end of transmission
ENQ = enquiry
ACK = positive acknowledge
BEL = signal horn (bell)
BS = backspace
HT = horizontal tabulation
LF = line feed
VT = vertical tabulation
FF = form feed
CR = carriage return
SO = shift out } near/van over-
SI = shift in } lappende code

DLE = data link escape
DC1-DC4: geen voorgeschreven gebruik
NAK = negative acknowledge
SYN = synchronisation character
ETB = end of transmission block
CAN = cancel
EM = end of medium
SUB = substitute character
ESC = escape
FS = file separator
GS = group separator
RS = record separator
US = unit separator
SP = space forward (spatie)
DEL = delete (rub out)

Tabel 2.3 Nationale varianten bij tabel 2.2 (ASCII); deze tabel kan per implementatie verschillen

code	Nederland Engeland	Canda USA	Duits-land	Frank-rijk	Spanje	Italië	Denem, Noorw.	Finl. Zweden	Zwitser-land
23	£	#	#	£	£	£	£	#	#
40	@	@	§	à	@	§	@	É	§
5B	[	[	Ä	°	[	°	Æ	Ä	à
5C	\	\	Ö	Ç	Ñ	ç	Ø	Ö	è
5D	]	]	Ü	§	]	é	Å	Å	é
60	`	`	`	`	`	ù	`	é	ù
7B	{	}	ä	é	{	á	æ	ä	ä
7C	|	|	ö	ù	ñ	ò′	ø	ö	ö
7D	}	}	ü	è	}	è	å	å	ü
7E	~	~	*β*	¨	~	ì	~	~	ç

---

1) ASCII staat voor *American Standard Code for Information Interchange*. Deze code is ontwikkeld door het Amerikaanse standaardisatie-instituut ANSI. EBCDIC staat voor *Extended Binary-Coded Decimal Interchange Code* en is naast ASCII de meest gebruikte code voor alfanumerieke informatie. ASCII wordt vooral ook voor communicatie tussen systemen gebruikt.

2) Voor verbindingen waarbij via de ASCII-tekens ook de synchronisatie tussen zendende en ontvangende kant wordt geregeld, wordt vaak het X-*on*/X-*off protocol* gevoerd. Er geldt dan:
11 = X-on (DCI): ga door met zenden 13 = X-off (DC3): stop met zenden

Tabel 2.4 EBCDIC-code (zie voor toelichting afkortingen tabel 2.2)

b_8	b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
				0	0	0	0	0	NUL	DLE			SP	&	–						{	}	\	0
				0	0	0	1	1	SOH	DC1					/		a	j	~		A	J		1
				0	0	1	0	2	STX	DC2		SYN					b	k	s		B	K	S	2
				0	0	1	1	3	ETX	DC3							c	l	t		C	L	T	3
				0	1	0	0	4									d	m	u		D	M	U	4
				0	1	0	1	5	HT		LF						e	n	v		E	N	V	5
				0	1	1	0	6		BS	ETB						f	o	w		F	O	W	6
				0	1	1	1	7	DEL		ESC	EOT					g	p	x		G	P	X	7
				1	0	0	0	8		CAN							h	q	y		H	Q	Y	8
				1	0	0	1	9		EM							i	r	z		I	R	Z	9
				1	0	1	0	A					¢	!	¦	:								
				1	0	1	1	B	VT				.	$	,	#								
				1	1	0	0	C	FF	FS		DC4	<	*	%	@								
				1	1	0	1	D	CR	GS	ENQ	NAK	(	)	_	'								
				1	1	1	0	E	SO	RS	ACK		+	;	>	=								
				1	1	1	1	F	SI	US	BEL	SUB	¦	¬	?	"								

2.4 PC beeldschermcodes

Tabel 2.5 IBM (compatible) PC: OEM character set

b_8	b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	0	0	0	0		►	SP	0	@	P	`	p	Ç	É	á	▒	└	╨	α	≡
0	0	0	0	1	0	0	1	☺	◄	!	1	A	Q	a	q	ü	æ	í	▒	┴	╤	β	±
0	0	0	1	0	0	1	0	☻	↕	"	2	B	R	b	r	é	Æ	ó	▓	┬	╥	Γ	≥
0	0	0	1	1	0	1	1	♥	!!	#	3	C	S	c	s	â	ô	ú	│	├	╙	π	≤
0	0	1	0	0	1	0	0	♦	¶	$	4	D	T	d	t	ä	ö	ñ	┤	─	╘	∑	⌠
0	0	1	0	1	1	0	1	♣	§	%	5	E	U	e	u	à	ò	Ñ	╡	┼	╒	σ	⌡
0	0	1	1	0	1	1	0	♠	—	&	6	F	V	f	v	å	û	ª	╢	╞	╓	µ	÷
0	0	1	1	1	1	1	1	•	↨	'	7	G	W	g	w	ç	ù	º	╖	╟	╫	τ	≈
0	1	0	0	0	1	0	0	◘	↑	(	8	H	X	h	x	ê	ÿ	¿	╕	╚	╪	Φ	°
0	1	0	0	1	1	0	1	○	↓	)	9	I	Y	i	y	ë	Ö	⌐	╣	╔	┘	Θ	•
0	1	0	1	0	1	1	0	◙	→	*	:	J	Z	j	z	è	Ü	¬	║	╩	┌	Ω	·
0	1	0	1	1	1	1	1	♂	←	+	;	K	[	k	{	ï	¢	½	╗	╦	█	δ	√
0	1	1	0	0	1	1	0	♀	∟	,	<	L	\	l	¦	î	£	¼	╝	╠	▄	∞	ⁿ
0	1	1	0	1	1	1	1	♪	↔	-	=	M	]	m	}	ì	¥	¡	╜	═	▌	φ	²
0	1	1	1	0	1	1	1	♫	▲	·	>	N	^	n	~	Ä	Pt	«	╛	╬	▐	ε	■
0	1	1	1	1	1	1	1	☼	▼	/	?	O	_	o	⌂	Å	ƒ	»	┐	╧	▀	∩	

Tabel 2.6 IBM (compatible) PC: ANSI character set

b_8	b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	0	0	0	0	0	■	■	SP	0	@	P	`	p	■	■	SP	°	À	Ð	à	ǒ
0	0	0	1	1	0	0	0	1	■	■	!	1	A	Q	a	q	■	‘	¡	±	Á	Ñ	á	ñ
0	0	1	0	2	0	0	1	0	■	■	"	2	B	R	b	r	■	’	ç	²	Â	Ò	â	ò
0	0	1	1	3	0	0	1	1	■	■	#	3	C	S	c	s	■	■	£	³	Ã	Ó	ã	ó
0	1	0	0	4	0	1	0	0	■	■	$	4	D	T	d	t	■	■	¤	´	Ä	Ô	ä	ô
0	1	0	1	5	0	1	0	1	■	■	%	5	E	U	e	u	■	■	¥	μ	Å	Õ	å	õ
0	1	1	0	6	0	1	1	0	■	■	&	6	F	V	f	v	■	■	¦	¶	Æ	Ö	æ	ö
0	1	1	1	7	0	1	1	1	■	■	'	7	G	W	g	w	■	■	§	•	Ç	×	ç	÷
1	0	0	0	8	1	0	0	0	■	■	(	8	H	X	h	x	■	■	¨	¸	È	Ø	è	ø
1	0	0	1	9	1	0	0	1	■	■	)	9	I	Y	i	y	■	■	©	¹	É	Ù	é	ù
1	0	1	0	A	1	0	1	0	■	■	*	:	J	Z	j	z	■	■	ª	º	Ê	Ú	ê	ú
1	0	1	1	B	1	0	1	1	■	■	+	;	K	[	k	{	■	■	«	»	Ë	Û	ë	û
1	1	0	0	C	1	1	0	0	■	■	,	<	L	\	l	|	■	■	¬	¼	Ì	Ü	ì	ü
1	1	0	1	D	1	1	0	1	■	■	-	=	M	]	m	}	■	■		½	Í	Ý	í	ý
1	1	1	0	E	1	1	1	0	■	■	.	>	N	^	n	~	■	■	®	¾	Î	Þ	î	þ
1	1	1	1	F	1	1	1	1	■	■	/	?	O	_	o	■	■	■	¯	¿	Ï	*ß*	ï	ij

Tabel 2.7 ANSI escape sequences voor de beeldscherm opmaak[1)]

escape sequence[2)]	betekenis
cursor-bewegingen	
ESC[P_nA	$\langle P_n \rangle$ plaatsen omhoog
ESC[P_nB	$\langle P_n \rangle$ plaatsen omlaag
ESC[P_nC	$\langle P_n \rangle$ plaatsen naar rechts
ESC[P_nD	$\langle P_n \rangle$ plaatsen naar links
ESC[P_l; P_c H ESC[P_l; P_c f	plaatsen op regel $\langle P_l \rangle$ en kolom $\langle P_c \rangle$
ESC[s	save cursor en attributen
ESE[u	restore cursor en attributen
attributen voor karakters (afbeeldingswijze karakters vanaf nu)	
ESC[P_s; P_s; . . . ; P_sm	definieer karakter attributen via $\langle P_s \rangle$: 0 normale tekst 1 bold (vet) 4 underscore (onderstrepen) 5 blink (knipperen) 7 reverse (zwart op wit) 8 verborgen tekst 3*x* letter kleur en 4*x* achtergrond kleur, waarbij $x = 0..7$ (0 = zwart, 1 = rood, 2 = groen, 3 = geel, 4 = blauw, 5 = mangenta, 6 = cyaan, 7 = wit)
verwijderen van tekst ('wissen')	
ESC[K ESC[0 K	verwijder alles vanaf cursor-positie tot het einde van de regel
ESC [0 J	verwijder alles vanaf cursor-positie tot het einde van het scherm
ESC[1J	verwijder alles vanaf het begin van het scherm tot aan de cursorpositie
ESC[2J	verwijder alles van het scherm
	NB: de verwijder-opdrachten zijn inclusief de cursor-positie zelf

overige functies

Mogelijkheden om de beeldscherm mode en grafische mode in te stellen,[3] herdefiniëring en het opslaan van commando's onder alle toetsen van het toetsenbord, behalve de ALT, ESC en CAPS Lock toetsen.

[1] In deze table is P_n, P_1, P_c, P_s een serie decimale karakters (0 t/m 9); het aantal karakters in deze serie is nul, één of meer dan één.
Voorbeeld. Set cursor op home position (links boven regel 0, kolom 0) kan worden opgeven met bijv.:
ESC [H (1B, 5B, 48), of
ESC [0;0H (1B, 5B, 30, 3B, 30, 48).

[2] In deze table zijn alleen de Escape sequences opgenomen die op alle gangbare beeldschermen werken. Daarnaast bestaat er nog een set die alleen op regel-georiënteerde beeldschermen werkt en zijn er een aantal die model-afhankelijk zijn (bijv. voor het herdefiniëern van toesten).

[3] Voorwaarde voor het gebruik van de ANSI Escape sequences (volgens de ANSI 3.64-1979 standaard) is dat men een ANSI driver heeft geladen.

2.5 *Codes voor instrumentatie toepassingen*

Tabel 2.8 Normaal en gespiegeld binair[1]

normaal binair						gespiegeld binair (gray-code)					
2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	gewicht	2^5-1	2^4-1	2^3-1	2^2-1	2^1-1	gewicht[2]
0	0	0	0	0	= 0	0	0	0	0	0	= 0
0	0	0	0	1	= 1	0	0	0	0	1	= 1
0	0	0	1	0	= 2	0	0	0	1	1	= 2
0	0	0	1	1	= 3	0	0	0	1	0	= 3
0	0	1	0	0	= 4	0	0	1	1	0	= 4
0	0	1	0	1	= 5	0	0	1	1	1	= 5
0	0	1	1	0	= 6	0	0	1	0	1	= 6
0	0	1	1	1	= 7	0	0	1	0	0	= 7
0	1	0	0	0	= 8	0	1	1	0	0	= 8
0	1	0	0	1	= 9	0	1	1	0	1	= 9
0	1	0	1	0	= 10	0	1	1	1	1	= 10
0	1	0	1	1	= 11	0	1	1	1	0	= 11
0	1	1	0	0	= 12	0	1	0	1	0	= 12
0	1	1	0	1	= 13	0	1	0	1	1	= 13
0	1	1	1	0	= 14	0	1	0	0	1	= 14
0	1	1	1	1	= 15	0	1	0	0	0	= 15
1	0	0	0	0	= 16	1	1	0	0	0	= 16

[1] Gespiegeld binair: slechts 1 bit verschilt tussen twee opeenvolgende standen.

[2] Naast het gewicht bij de gespiegelde binaire code is ook het steeds wisselende teken (+ −) bij een 1 significant (zie tekst na tabel 2.9).

Tabel 2.9 Binaire codes voor decimale getallen (BCD) (per decimaal)

decimaal	normaal binair 8 4 2 1	Excess 3	2 4 2 1	5 4 2 1	'2 uit 5' 7 4 2 1 0	biquinair 5 0 4 3 2 1 0
0	0 0 0 0	0 0 1 1	0 0 0 0	0 0 0 0	1 1 0 0 0	0 1 0 0 0 0 1
1	0 0 0 1	0 1 0 0	0 0 0 1	0 0 0 1	0 0 0 1 1	0 1 0 0 0 1 0
2	0 0 1 0	0 1 0 1	0 0 1 0	0 0 1 0	0 0 1 0 1	0 1 0 0 1 0 0
3	0 0 1 1	0 1 1 0	0 0 1 1	0 0 1 1	0 0 1 1 0	0 1 0 1 0 0 0
4	0 1 0 0	0 1 1 1	0 1 0 0	0 1 0 0	0 1 0 0 1	0 1 1 0 0 0 0
5	0 1 0 1	1 0 0 0	1 0 1 1	1 0 0 0	0 1 0 1 0	1 0 0 0 0 0 1
6	0 1 1 0	1 0 0 1	1 1 0 0	1 0 0 1	0 1 1 0 0	1 0 0 0 0 1 0
7	0 1 1 1	1 0 1 0	1 1 0 1	1 0 1 0	1 0 0 0 1	1 0 0 0 1 0 0
8	1 0 0 0	1 0 1 1	1 1 1 0	1 0 1 1	1 0 0 1 0	1 0 0 1 0 0 0
9	1 0 0 1	1 1 0 0	1 1 1 1	1 1 0 0	1 0 1 0 0	1 0 1 0 0 0 0

Omrekenen *normaal binair:*

$$0\ 1\ 1\ 0\ 1 = 0\cdot 2^4 + 1\cdot 2^3 + 1\cdot 2^2 + 0\cdot 2^1 + 1\cdot 2^0 =$$
$$= 0 \quad +8 \quad +4 \quad +0 \quad +1 \quad = 13$$

Omrekenen *gespiegeld binair.* Bij een 1 afwisselend optellen en aftrekken:

$$0\ 1\ 1\ 0\ 1 = +(2^4-1) - (2^3-1) + (2^1-1) = 15 - 7 + 1 = 9$$
$$0\ 1\ 0\ 0\ 1 = +(2^4-1) - (2^1-1) = 15 - 1 = 14$$

Bij de Gray- en BCD-code wordt vaak een foutendetectie en -correctie toegepast (zie par. 2.7).

2.6 Formaten grafische bestanden

Verreweg de meeste bestanden die tussen computers uitgewisseld worden zijn aangemaakt met een tekstverwerker of met grafische applicatie pakketten, die elk vaak hun eigen opmaak instructies en formaten hebben, maar ook het bestand kunnen afleveren in andere formaten. Bij tekstverwerker bestanden is het aantal in omloop zijnde formaten inmiddels sterk beperkt. Bovendien beschikken moderne tekstverwerkers over filters voor het

automatisch importeren van de andere tekstverwerker bestandsformaten.
Bij grafische bestanden is het aantal opties nog steeds groot (raster of vector beelden, resolutie, aantal kleurengradaties, single/multipage, compressievorm) en is vaak nog kennis van het gebruikte formaat noodzakelijk. Het is de ontvanger lang niet altijd bekend welk formaat het betreft en dan is het een puzzel om de bestanden zonder kwaliteitsverlies weer zichtbaar te maken. Voor DOS en Windows-bestanden is het gebruikelijk om de drie-letterige extensie te laten aanduiden om welk formaat het gaat. Voor Unix, MacIntosh en andere hardware platformen gelden andere conventies. Tabel 2.10 geeft een overzicht van extensies en hun formaten, hoofdzakelijk refererend aan Microsoft gebaseerde hardware platforms. Tabel 2.13 toont voor de gangbare aantallen kleurenbits de beschikbare omvang van het kleurenpallet. Tabel 2.11 geeft de gangbare (bitmap) compressie formaten weer en Tabel 2.12 de basis kleurenschema's.

Bitmap of Vectorformaat

Grafische bestanden kennen twee hoofdcategorieën: *Bitmap*-en *Vector*-formaat.
Bij het bitmap (of ook wel Raster) formaat is het beeld opgebouwd uit een rooster van vierkante beeldpunten, de zgn. *pixels*, en vormen in feite een mozaïek beeld.
Bij een vectorformaat is het beeld opgebouwd uit lijnen, curven en andere mathematische objecten. Vectorformaten hebben als voordeel dat ze scherp blijven wanneer men ze uitvergroot en geschikt zijn voor tekeningen die een exacte maatvoering of plaatsbepaling vereisen (bijv. bouwtekeningen). Vectorformaten zijn in het algemeen factoren compacter dan bitmap formaten.
De bitmapformaten bieden veelal meer mogelijke kleurgradaties en worden dus typisch gebruikt voor het weergeven van foto's en schilderijen. Het scherpteverlies bij uitvergroting van de bitmap formaten uit zich in het zichtbaar worden van het mozaïek beeld en van vloeiende lijnen die gekarteld worden.

Compressiemethoden

De grootteverschillen tussen de (ongecomprimeerde) bitmap en het vector formaat worden steeds kleiner omdat verreweg de meeste bitmapformaten een *compressietechniek* gebruiken. In de

Tabel 2.10 Bestandnaam extensie voor grafische bestanden en hun eigenschappen

Extensie	Naam of Origineel Programma	Gebruik	Bitmap (B) Vector (V)	Bits per pixel	Compressie	Codering Opslagmethode
BMP, DIB	Bitmap (Windows en OS/2)	beide	B	1,4,8,24	Nee	RGB
RLE	Device independent bitmap	Win	B	4,8	RLE	RGB
CLP	CLipBoard	Win		1,4,8,24		
DXF	AutoDesk Drawing Interchange (Drawing eXchange Format)	Win Unix	V V	8	Nee	
EPS	Encapsulated PostScript	Div	B	1,4,8,24	Nee	
GIF	Graphics Interface File	Div	B	1,4,8	LZW	interlaced en non-interlaced
IFF	Electronics Art (Deluxe Paint) (LBM of CE formaat op Win)	Amiga	B	1,4,8	Packbit	RGB
IGES	Initial Graphics Exchange Std.	Div	V	Gebruik in CAD/CAM toepassingen		
IMG	Image GEM Paint (en Ventura)	Win	B	1,4,8 (en 24)		
J(F)IF	JPEG file interchange formaat	Div	B	8,24	JPEG	RGB, CMYK of grijswaarden
JPG JPE	Joint Photographics Expert Group (JPEG)		B			
LBM	Deluxe Paint	Win	B	1,4,8	RLE	RLL
MAC	MacPaint (Macintosh)	Mac	B	1	RLE	RLL geen header
PCD	Kodak PhotoCD (ook HPCD) Bevat 4 resoluties v. zelfde beeld	Div	B	8,24	Ja	$YC_b\ C_r$
PCX	ZSoft Paintbrush v5	Div	B	1,4,8,24	RLE	RGB
PIC	Pictor/PC Paint	Div Div	B B	2,4,8 16,32		Grijswaarden RGB

Tabel 2.10 (vervolg)

Extensie	Naam of Origineel Programma	Gebruik	Bitmap (B) Vector (V)	Bits per pixel	Compressie	Codering Opslagmethode
PNG	Portable Network Graphics	Div	B + V	8,24	LZ77	RGB
PSD, PDD	Photoshop	Div	B	1,8,16	Optie Packbit	RGB, CYMK, CIE
PSP	PaintShop Pro (ook JAS)	Div	B	8,24	Optie	RLE, LZ77; Grijswaarden RGB
RAS	Raster file formaat type 2	Sun	B	1,8,24,32	Nee	
TGA	Targa	Win	B	8,16,24,32	Optie RLE	RGB
TIF	Tagged image file format	Div	B	1,4,8,24	Nee	RGB + CYMK
TIFF		Div	B	1	Huffman	
		Div	B	1,4,8,24	LZW	RGB + CYMK
		Div	B	1,4,8,24	packbits	RGB + CYMK
	Fax groep 3 en 4 formaat	Fax	B	1	Nee	
WMF	Windows Meta File	Win	V	1,4,8,24		
WPG	WordPerfect Graphics	Win	B + V	1,4,8		

compressietechnieken onderscheidt men *verliesvrije* (*lossless*) en *verliesarme* (*lossy*).
De verliesvrije technieken verwijderen geen details, de verliesarme technieken doen dit wel. Door in te spelen op de typische zintuiglijke eigenschappen van het menselijk oog en oor, slaagt men er bij de verliesarme compressie in om een groot deel van de bytes weg te nemen zonder dat de mens dit opmerkt, of als een noemenswaardig kwaliteitsverlies ervaart. Belangrijkste voorbeelden van verliesarme compressie zijn het JPEG grafische formaat, het MP3 muziek formaat en de DivX film formaten.
Tabel 2.11 geeft de compressietechnieken weer die gebruikt worden voor grafische beeldformaten.

Kleurenschema's

Er bestaan verschillende manieren om een kleur samen te stellen uit een beperkt aantal grondkleuren en/of intensiteiten. Naast de kleurdiepte (het aantal gradaties van een bepaalde kleur), die hoofdzakelijk bepaald wordt door het aantal bits uit tabel 2.10 is het kleurenschema evenzeer van belang. De twee hoofdvarianten zijn additieve en subtractieve schema's van kleuren opbouw (zie tabel 2.11). In de grafische wereld bestaan er vele specialistische kleurenschema's. Veelal specifiek voor het merk machine of voor de

Tabel 2.11 Compressietechnieken voor grafische beeldformaten

Compressie soort	Verlies	Gebruikt in
RLE – Run Length Encoding	vrij	Photoshop, TIFF en sommige Windows formaten
LZW – Lemple-Zif-Welch	vrij	TIFF, PDF, GIF en Postscript. Vooral geschikt voor beelden met groot gebied in één kleur
JPEG – Joint Photographic Experts Group	arm	JPEG, PDF en Postscript. Vooral geschikt voor foto's en afbeeldingen met overvloeiende kleuren gamma's.
CCITT – Consultative Committee for International Telephony and Telegraphy	vrij	Vooral facsimile en zwart-wit beelden in PDF en Postscript
ZIP	vrij	In PDF, net als LZW geschikt voor afbeeldingen met grote vlakken in één kleur.

gebruikte opmaak software. Het Pantone kleurenschema vormt een uitwisseling formaat binnen deze sector. Hierbij wordt gewerkt met een beperkt palet van veel gebruikte kleuren, elk aangeduid door een kleurnummer en vaak door een eigen naam (bijv. "Process Blue" voor een bepaalde kleur licht- tot middel blauw). Het Pantone kleurenschema sluit het nauwste aan bij het CMYK schema.

Tabel 2.12 Kleurenschemas

Basis kleurenschema	Kleur ontstaat door
RGB – Red Green Blue	Menging van basiskleuren Rood, Groen en Blauw. Komt overeen met de lichtbronnen van monitor (televisie, e.d.)
CMYK – Cyan Magenta Yellow en Black	Filtering met een filter in de kleuren Cyaan, Magenta en Geel. Het K-kanaal (zwarting) geeft de lichtsterkte weer. Sluit aan bij (foto) grafische wereld

Tabel 2.13 Aantal bits kleurinformatie met bijbehorende palet omvang

Aantal bits	Aantal kleuren per pixel
1	2 (dus zwart/wit)
4	16 of grijswaarden
8	256 of grijswaarden
16	65.536 of grijswaarden (soms 32.768)
24	16.777.216 (vaak RGB)
32	16.777.216 (vaak CMYK)

Overige faciliteiten

Naast bovengenoemde basisbegrippen zijn drie faciliteiten vaak nog bepalend voor de keuze van het formaat: *geïnterlinieerde (interlaced) formaten, transparante kleuren* en *animatie*.

– Bij *geïnterlinieerde formaten* worden de beeldlijnen niet in sequentieel geschreven. Ze verschijnen eerst met een bepaalde tussenruimte en later worden de tussenliggende beeldlijnen

ingevuld. Dit wordt vooral gedaan om snel een ruw beeld van de hele afbeelding te geven dat geleidelijk scherper wordt, in plaats van een scherp beeld wat tergend langzaam het scherm vult. De interliniering maakt het GIF formaat zo populair voor Internet gebruik.

– *Transparante kleuren* heeft men vaak nodig wanneer een beeld uit verschillende lagen wordt opgebouwd en men de ondergrond wil laten doorschijnen. Transparante kleuren worden slechts in een beperkt aantal formaten ondersteund (o.a. GIF, JPEG en PSP).
– *Animatie* wordt bereikt middels een voorgeprogrammeerde volgorde en tijdsduur van individuele beelden (de frames). Weinig formaten bieden deze faciliteit, het meest bekende voorbeeld is het GIF-formaat.

2.7 Foutendetectie en -correctie

Hamming-distance via Karnaugh map

Tot afstand 4

	0 0	0 1	1 1	1 0
0 0	A	a	2	a
0 1	a	2	b	2
1 1	2	b	B	b
1 0	a	2	b	2

$A-a:1$
$A-2:2$
$A-b:3$
$A-B:4$

$a-2:1$
$a-b:2$
$a-B:3$
$2-b:1$
$2-B:2$
$b-B:1$

Tot afstand 5

	0 0 0	0 0 1	0 1 1	0 1 0	1 1 0	1 1 1	1 0 1	1 0 0
0 0	A	a_1	a_2	a_1	a_2	b_2	a_2	a_1
0 1	a_1	a_2	b_2	a_2	b_2	b_1	b_2	a_2
1 1	a_2	b_2	b_1	b_2	b_1	B	b_1	b_2
1 0	a_1	a_2	b_2	a_2	b_2	b_1	b_2	a_2

$A-a_1:1$
$A-a_2:2$
$A-b_2:3$
$A-b_1:4$
$A-B:5$

$a_1-a_2:1$
$a_1-b_2:2$
$a_1-b_1:3$
$a_1-B:4$

$a_2-b_2:1$
$a_2-b_1:2$
$a_2-B:3$

$b_2-b_1:1$
$b_2-B:2$

$b_1-B:1$

Tabel 2.14 Maximaal aantal te detecteren en te corrigeren fouten

kleinste afstand	max. aantal te detecteren fouten	max. aantal te corrigeren fouten
1	0	0
2	1	0
3	2	1
4	2	1
5	2	2
6	3	2
7	3	3

Hamming-codes voor pariteits-controle

Tabel 2.15

i			p
1			2
2	t/m	4	3
5	t/m	11	4
12	t/m	26	5
27	t/m	57	6
58	t/m	120	7
121	t/m	247	8

i = aantal informatiebits (oorspronkelijk)
p = aantal toe te voegen pariteitsbits

De pariteitsbits worden toegevoegd op de posities 2^N (1, 2, 4, 8, 16 . . .). Het pariteitsbit op de positie 1 zorgt voor even pariteit over de bits op de posities $N{\cdot}2^1 + 1$ (oneven posities).

Het pariteitsbit op de positie 2 zorgt voor even pariteit over de bits op de posities $N{\cdot}2^2 + 2$; $N{\cdot}2^2 + 3$ (2, 3; 6, 7; 10, 11; 14, 15 . . .). Het pariteitsbit op positie 4 zorgt voor even pariteit over de bits op de posities $N{\cdot}2^3 + 4$; $N{\cdot}2^3 + 5$; $N{\cdot}2^3 + 6$; $N{\cdot}2^3 + 7$ (4, 5, 6, 7; 12, 13, 14, 15 . . .) enz.

3 Elektrische interfaces

3.1 Seriële interface (V24/RS232)

Bij het aansluiten van terminals en printers op (micro-) computersystemen moet onderscheid gemaakt worden tussen:
– de elektrische eigenschappen van de verbinding;
– de logische eigenschappen van de verbinding.

Elektrische eigenschappen van de verbinding

De terminologie van de elektrische aansluiting gaat uit van twee computers (*DTE-Date Terminal Equipment*), of een computer en een terminal, die via 2 modems (*DCE-Data Circuit Equipment*) over een telefoonlijn communiceren en betreffen de interface tussen computer en modem. Hiervoor wordt een 9- of 25-polige *sub-D connector* toegepast, zie figuur 3.2. Tussen computer en modem worden alle 9 of 25 signalen 1–1 doorverbonden.
Voor de rechtstreekse koppeling van twee computers, zonder tussenkomst van een modem wordt de zgn. *null-modem* of *cross cable* uit figuur 3.4 benut.
Indien het aantal aders een probleem vormt, wordt nog wel eens de schakeling van figuur 3.3 benut. De interface-signalering RTS/CTS wordt dan onbenut gelaten en er kan alleen met XON/XOFF flow control gewerkt worden.
Bij gemengd gebruik van de 9- en 25-pens connectors dient de received data ingang verbonden te worden met de transmitted data uitgang. Voor elektrische eigenschappen en communicatie snelheden, zie tabel 3.1 t/m 3.3.

Logische eigenschappen van de verbinding (terminal set up)

De communicatie tussen (micro-) computer en terminal of printer moet aan beide zijden op de zelfde wijze staan ingesteld. Van belang daarbij zijn veelal (zie ook hierna):
– de communicatiesnelheid (bits per seconde);
– het aantal bits per karakter;
– de pariteit (zie pag. B1/41);
– synchronisatie (startbit en stopbit(s)).

Communicatiesnelheid

Voor communicatiesnelheden tot 56.000 bits per seconde wordt veelal gebruik gemaakt van een gekozen verbinding via het openbare telefoonnet met een *modem* (modulator/demodulator). Daarboven is men vaak aangewezen op een huurlijn, d.w.z. een permanente analoge verbinding naar één vast benoemd ander punt van het telefoonnet. Beschikt men over een ISDN-aansluiting dan kan men gekozen verbindingen van 128.000 bits per seconde opbouwen wanneer men de twee kanalen van zijn ISDN aansluiting benut.

Door de compressie- en modulatietechnieken van de moderne modems zijn communicatiesnelheden (uitgedrukt in bits per seconde) mogelijk geworden, die hoger liggen dan het aantal signaalwisselingen per seconde op de telefoonlijn, de zgn. *baudrate*. Vroeger waren deze twee aan elkaar gelijk. Tegenwoordig kan *baudrate* alleen nog gebruikt worden als het gaat over de elektrische signalen op de telefoonlijn zelf. Slaat het op de modem eigenschappen of de communicatiesnelheid tussen computers dan is *bits per seconde* (*bps*) de juiste eenheid.

De communicatiesnelheid die men effectief weet te bereiken ligt vaak (beduidend) lager. Verliezen treden op doordat:

- De computers ook elkaar foutsignaleringen en ontvangstbevestigingsinformatie zenden langs dezelfde weg (de zgn. *protocol efficiency* varieert tussen 60 en 95%).
- De snelheid van de UART (de chip die de seriële interface aanstuurt). Er kan een ouder model chip gebruikt zijn, die beperkt is tot 9600 bps of 38.400 bps. (Gangbare moderne chips kunnen tot 115.200 bps verwerken).
- Het operating systeem (DOS of Windows) de UART een lagere snelheid kan opleggen.
- De elektrische signalering tussen computer en modem gebrekkig verloopt, bijv. doordat de beperkte interface kabel uit figuur 3.3 gebruikt werd of doordat de modeminstellingen (zie paragraaf 4.6) niet optimaal zijn.
- Er wachttijden en snelheidsbeperkingen in de programma's zitten.
- Het soms ook nog kan voorkomen dat de telefoonverbinding storingen bevat, waardoor de modems onderling besluiten op een

lage (zgn. *fallback*) snelheid over te gaan. Bovendien handhaven veel modems voor alle zekerheid na het verdwijnen van de storing nog eens de lage snelheid totdat de verbinding verbroken wordt.

Aantal bits per karakter

Dit is meestal instelbaar op 7 of 8. De telling van het aantal data-bits is exclusief een eventueel pariteitsbit.

Pariteit

Pariteit: een vorm van redundantie (= overtolligheid) die aan de data wordt toegevoegd om een controle te kunnen uitvoeren op de meest voorkomende fouten tijdens data-overdracht. De eenvoudigste vorm is toevoeging van een extra bit, het *pariteitsbit*. Dit bit zorgt ervoor dat de som van de 1-en altijd even (*even pariteit* of altijd oneven (*oneven pariteit*) is.
Het pariteitsbit helpt alleen om fouten te ontdekken, een herstel is alleen maar mogelijk met hulp van de afzender. Voor situaties waar dit laatste lastig is, biedt het toevoegen van een zgn. *CRC* (*cyclic redundancy checksum*) herstelmogelijkheden voor een beperkt aantal verminkte bits. Bij asynchrone verbindingen moet vaak de CRC zelf toegevoegd worden aan de datastroom, bij synchrone verbindingen is dit in de transmissieprocedures (de zgn. *protocollen*) al standaard ingebouwd.

Voorbeeld (oneven pariteit). De code voor karakter 'A' is 100 0001 (zie tabel 2.1, pag. B1/22). De som van het aantal 1-en is 2, dus even. Een extra 1 als pariteitsbit levert 3 1-en, dus oneven. De code wordt daarmee (met het pariteitsbit voorop): 1100 0001.
Instelling pariteit bij de set up is bijvoorbeeld:

- *No parity*: pariteitsbit afwezig, dus alleen data-bits.
- *Odd parity*: wel een pariteitsbit en de som van de 1-en is oneven.
- *Even parity*: idem, maar nu is de som even.
- *Odd & even parity* of *parity, no check*: pariteitsbit aanwezig, maar de terminal of printer controleert de stand van dit bit niet.
- *Parity is mark* voor zendende zijde: er wordt een pariteits-
- *Parity is space* bit meegezonden, maar dit is altijd een 1 (parity is mark) of een 0 (parity is space).

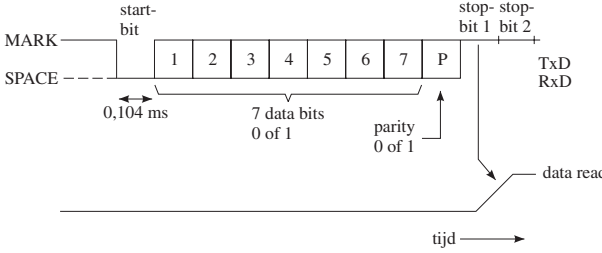
Synchronisatie
Om de zendende en de ontvangende zijde met elkaar in de pas te laten lopen is synchronisatie nodig. Bij asynchrone transmissie kunnen zender en ontvanger onbepaalde tijd doorgaan met hun activiteiten. Er is alleen in de flow-control vastgelegd hoe beiden elkaar kunnen interrumperen. Asynchrone communicatie is verloopt karakter-georiënteerd en ieder karakter wordt afgebakend door een startbit (nul) en stopbit(s) (enen).
Bij synchrone transmissie zijn er afspraken die bepalen na hoeveel karakters de zender moet wachten op een bevestiging van de ontvanger en wordt bloksgewijs (blok van een aantal karakters) gewerkt. De start- en stopbits op karakterniveau zijn vervangen door synchronisatiepatronen op blokniveau.

Stopbits (1-en) worden gezonden na de data- en pariteitsbits van ieder karakter. Het aantal stopbits kan 1, 1½ of 2 bedragen.

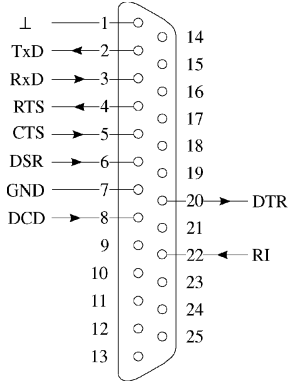
3.2 Testplug

Bij communicatieproblemen wil men zich er vaak van vergewissen dat de (seriële of parallelle) poort van de PC zelf vlekkeloos werkt. Veel diagnose- en testprogramma's hebben daartoe een zgn. *loop-backplug* nodig om een poort volledig te kunnen onderzoeken. Zonder de testplug blijft men in de probleemdeterminatie vaak met twijfels zitten.
Zo'n testplug is niets meer dan een gewone plug waarin bepaalde pennen onderling doorverbonden zijn. Voor de 25-pens DB25 seriële poort dient men 3 groepjes verbindingen aan te brengen: 2 + 3, 4 + 5 en 6 + 8 + 20 + 22. Voor de 25-pens parallelle poort zijn het 5 groepjes: 2 + 5, 3 + 13, 4 + 12, 5 + 10 en 6 + 11. Deze testpluggen werken met de meeste diagnostische software, behalve met IBM Advanced Diagnostics. De IBM seriële DB25 testplug vraagt 6 groepjes verbindingen: 1 + 7, 2 + 3, 4 + 5 + 8, 6 + 11 + 20 + 22, 15 + 17 + 23 en 18 + 25; de IBM parallelle testplug 5 groepjes: 1 + 13, 2 + 15, 10 + 16, 11 + 17 en 12 + 14.

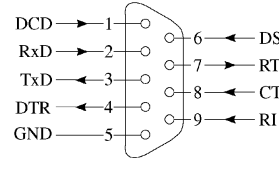
N.B. Voor de inmiddels ingeburgerde 9–pens DB9 seriële aansluiting geeft figuur 3.2 de corresponderende pennummering.



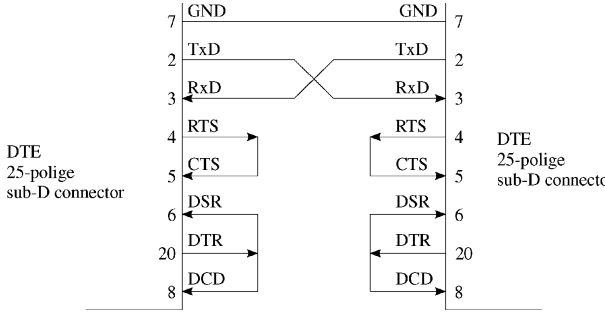
Figuur 3.1 Transmissie als functie van de tijd (9600 baud, 7 bits data, oneven pariteit, 2 stopbits)



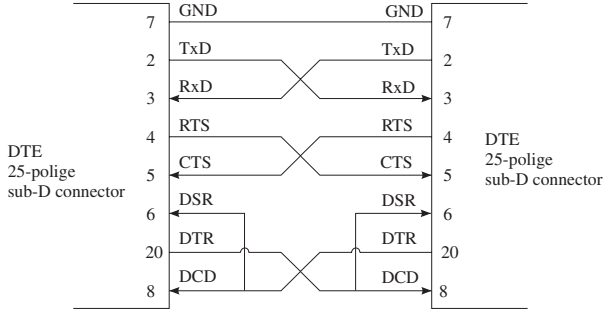
GND	102	Signal Ground
TxD	103	Transmitted Data
RxD	104	Received Data
RTS	105	Request To Send
CTS	106	Clear To Send
DSR	107	Data Set Ready
DTR	108	Data Terminal Ready
DCD	109	Data Carrier Detected
RI	125	Ring Indicator
⊥		Protective ground



Figuur 3.2 Signalen V24-interface voor 9- en 25-polige sub-D connector (Signalen gezien vanuit DTE)



Figuur 3.3 Drie-draads verbinding DTE (25-polig) - - - DTE (25-polig)



Figuur 3.4 Volledige verbinding DTE (25-polig)- - - DTE (25-polig)

Tabel 3.1 Elektrische eigenschappen V24-interface

zender (transmitter)	ontvanger (receiver)
'0':: = 5 . . . 15 V '1':: = −5 . . . −15 V Max. spanning: 25 V	'0':: = 3 . . . 25 V '1':: = −3 . . . −25 V

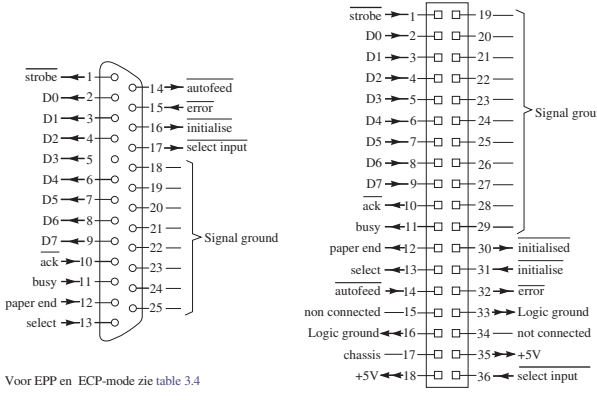
Tabel 3.2 De V-serie normen en de Amerikaanse tegenhangers

norm	inhoud	compatibel
V.21	300 bps	RS-232, Bell 103
V.22	1200 bps	Bell 212 A
V.22bis	2400 bps	Bell 212 A
V.24	DTE-DCE signalering	RS-232C (logisch 25pens) RS-574 (logisch 9 pens) RS-423 (elektrisch)
V.25	Auto-answering/dialing voor parallel interface	
V.25bis	Auto-answering/dialing voor seriële interface	
V.32	4800 en 9600 bps	
V.32bis	V.32 + 7200, 12.000 en 14.400 bps	
V.32ter	V.32bis + 19.200 bps	
V.34	2400-28.800 bps (33.600 optioneel)	
V.35	modem naar multiplexor verbinding	RS-422/RS-449
V.42	foutcorrectie MPN 1 t/m 4	
V.42bis	V.42 plus MPN 5 (4:1 LZW compressie)	
V.FC of V.Fast	28.800, voorloper van V.34	
V.90	56.000 download/33.600 upload	

Tabel 3.3 Maximale verbindingslengte voor directe seriële verbindingen op basis van V.21 t/m V.32

snelheid	maximale lengte [m]
56 k	25
33.600	42
9600	150
4800	300
2400	750
1200	1000

3.3 Parallel interface (Centronics)



Voor EPP en ECP-mode zie tabel 3.4

Figuur 3.5 Parallel interface-signaal op 25-polige sub D-connector (PC-zijde) en op 36-polige Centronicsconnector (apparaatzijde) voor 'buitenaanzicht female'

Signaallijnen met een dubbele pijl (figuur 3.5) geven signalen tussen de printer en zijn accessoires aan. De verbindingskabel tussen PC en printer verbindt de gelijknamige signaallijnen, met uitzondering van die een dubbele pijl dragen.
Met de IEEE1284 standaard zijn aan de parallelle interface verschillende modi toegevoegd. De belangrijkste drie modi zijn vermeld in tabel 3.4.

Tabel 3.4 Belangrijkste drie modi volgens IEEE1284 standaard

Mode	Gebruik	Max. snelheid	Max. kabellengte
SPP, Standard Parallel Port	De oudste, meest simpele vorm (uni-directioneel)	150 kbyte/s	2 meter
EPP, Enhanced Parallel Port	Voor andere apparaten dan printers (bi-directioneel)	3 Mbyte/s	10 meter
ECP, Extended Capability Port	Aansluiting voor modernere printers (bi-directioneel)	3 Mbyte/s	10 meter

Tabel 3.5 Overzicht signaalnamen

Pen	In/Uit	SPP	EPP	ECP
1	Uitgang	$\overline{\text{Strobe}}$	$\overline{\text{Write}}$	HostClk
14	Uitgang	$\overline{\text{AutoFeed}}$	$\overline{\text{Data Strobe}}$	HostAck
17	Uitgang	$\overline{\text{Select Input}}$	$\overline{\text{Address Strobe}}$	1284Active
16	Uitgang	$\overline{\text{Initialise}}$	$\overline{\text{Reset}}$	$\overline{\text{ReverseRequest}}$
10	Ingang	$\overline{\text{Ack}}$	$\overline{\text{Intr}}$	PeriphClk
11	Ingang	Busy	$\overline{\text{Wait}}$	$\overline{\text{PeriphAck}}$
12	Ingang	Paper End	UserDefined	$\overline{\text{AckReverse}}$
13	Ingang	Select	UserDefined	Xflag
15	Ingang	$\overline{\text{Error}}$	UserDefined	$\overline{\text{PeriphRequest}}$
2-9		Data0 - Data7	AD0 - AD7	Data0 - Data7

Werking van deze parallelle printer interface is gegarandeerd tot maximaal 4 meter kabellengte.

De parallelle interface wordt vaak gebruikt voor de directe gegevensoverdracht tussen twee computers door middel van een speciale parallelle kabel, een zgn. *Laplink of Interlink kabel*. LapLink, Interlink (MSDOS v6). Windows95 *Direct Cable Connection* en Norton Commander (v4 en v5) kennen elk een eigen kabelvariant. Een universeel bruikbare kabel voor deze vier pakketten, bestaat uit de verbindingen tussen de volgende pennen van de ene parallelle plug met die aan de andere zijde: 2-15, 3-13, 4-12, 5-10 en 6-11 (allen uiteraard ook vice versa) plus 16-16, 17-17 en 25-25.

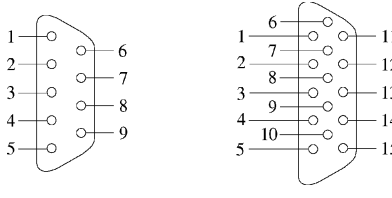
3.4 Video-interfaces (PC)

Zie ook paragraaf 5.3, tabel 5.2 PC video-controllers.

Tabel 3.6 Connectoraansluitingen

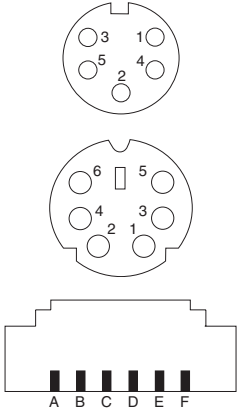
pen[1)]	MDA (of Hercules)	CGA	EGA	(S) VGA XGA
1	signal ground	signal ground	signal ground	red video
2	signal ground	signal ground	red'	green video
3	not connected	red	red	blue video
4	not connected	green	green	monitor id. bit 2
5	not connected	blue	blue	signal ground
6	intensity	intensity	green'	red-ground
7	video	not connected/ composite video	blue'	green-ground
8	hor. sync	hor. sync.	hor. sync.	blue-ground
9	vert. sync.	vert. sync.	vert. sync.	key (not connected)
10	–	–	–	sync.- ground
11	–	–	–	monitor id. bit 0
12	–	–	–	monitor id. bit 1
13	–	–	–	horizontal sync.
14	–	–	–	vertical sync.
15	–	–	–	not connected

[1)] Zie pennummers in figuur 3.6.



Figuur 3.6 Pennummering 9- en 15-polige connector (buitenaanzicht female)

3.5 Toetsenbord-interface (PC)



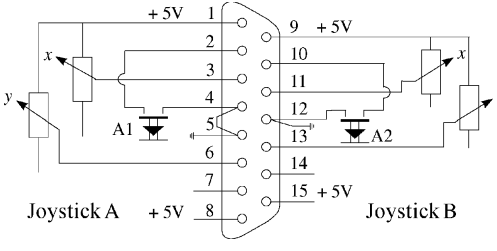
DIN-plug
1 Toetsenbordklok
2 Toetsenbord data
3 Niet gebruikt of $\overline{\text{reset}}$
4 Aarde
5 +5V DC

PS/2 plug tevens *muisaansluiting*
1 Toetsenbord data
2 Niet gebruikt of $\overline{\text{reset}}$
3 Aarde
4 +5V DC
5 Toetsenbord klok
6 Gereserveerd

Amerikaanse RJ14 telefoonplug
A Niet gebruikt
B Toetsenbord data
C Aarde
D Toetsenbordklok
E +5V
F Gereserveerd

Figuur 3.7 Toetsenbord aansluiting met DIN-plug, PS/2 plug en Amerikaanse RJ14 telefoonplug (allen: buitenaanzicht female)

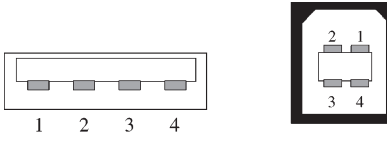
3.6 Joystick-interface



Figuur 3.8 Joystick-aansluiting (buitenaanzicht female)

3.7 De USB interface

De *USB Universal Serial Bus* kent twee vormen van connectors, type A (rechthoekig) en type B (vierkant). Momenteel bestaan er twee vormen binnen deze standaard. De huidige USB 1.0 en USB 1.1 standaarden werken met resp. 1,5 Mb/s en 12 Mb/s, terwijl de nieuwe USB 2.0 (veelal aangeduid met USB2) met 480 Mb/s zal gaan werken. Men kan beperkt met verschillende snelheden werken, de snelheid kan niet meer naar USB2 verhoogd worden na een USB1 segment.
Bij het ontwerp van deze standaard is men uitgegaan van één vast type kabel, d.w.z. er komen geen zgn. gekruiste kabels of andere varianten voor. Dit heeft men kunnen bereiken door beperking van het aantal mogelijke connectors. De kabels zijn altijd 1-op-1 bedraad en de penbezetting is altijd dezelfde (zie fig 3.9)



Pen 1: +5 V
Pen 2: Data-
Pen 3: Data+
Pen 4: Signaal Aarde
Afscherming: Chassis Aarde

Figuur 3.9 USB Type A en B connector (buitenaanzicht female)

De kabels kunnen verlengd worden met een verlengkabel tot een maximum van 5 meter (USB 1.1).
Een hub kan gebruikt worden om verschillende stations samen te voegen op één kabel, voor aanpassing van de bussnelheid of om nogmaals 5 meter extra kabel afstand toe te voegen. Er kunnen maximaal 127 stations op één USB bus gelijktijdig aangesloten zijn.

De stations kunnen gevoed worden via de kabel, mits dit bij de instellingen van de voedende computer is ingesteld. De voedingspennen (pen 1 en 4) zijn langer dan de data pennen, zodat de voeding tot stand is gekomen voordat de dataverbinding tot stand komt. Bij de meeste operating systemen kan daardoor een USB apparaat toegevoegd of verwijderd worden zonder dat de computer opnieuw opgestart moet worden.
Verdere informatie over deze standaard vindt men op: http:\\www.usb.org

3.8 De IEEE1394 interface

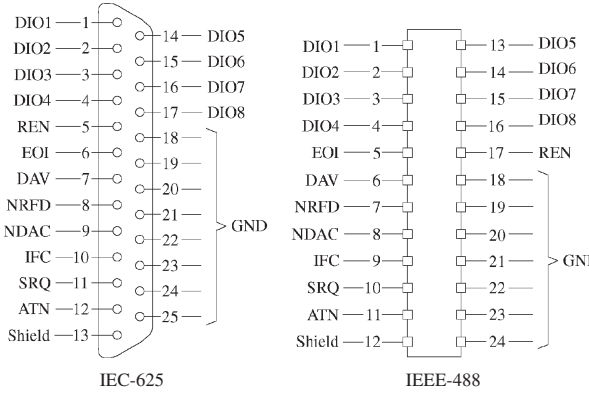
De *IEEE1394 interface* staat ook bekend als de FireWire interface (Apple) of de i.Link interface (Sony). Ze werkt met een 6-pens connector wanneer ook voedingsspanning overgedragen wordt en met een 4-pens connector wanneer enkel data overgedragen wordt. De data overdrachtssnelheid op deze pakket-georiënteerde bus is 100, 200, 400 Mbits per seconde. De snelheden van de aansluiting worden resp. aangeduid met S100, S200 en S400 als achtervoegsel achter IEEE1394-1995. Met de IEEE1394B zijn een 800 Mbits en een 1,6 Gbits versie beschikbaar gekomen. Een 3,2 Gbits versie wordt ontwikkeld. In principe kan men met verschillende snelheden werken op dezelfde bus, en kan de snelheid weer verhoogd worden na een traag segment.
Op één bus kunnen maximaal 63 stations aangesloten worden. Via bridges kunnen tot 1023 bussen tot één netwerk samengevoegd worden. De bekabeling bestaat uit afgeschermde twisted-pair. Geen kabel mag langer dan 4,5 meter zijn. Via repeaters (max. 15 stuks) kunnen langere afstanden tussen 2 stations gerealiseerd worden.
Deze bus schrijft altijd de data rechtstreeks in het geheugen van de ontvangende computer en wordt vooral gebruikt voor multimedia (in het bijzonder video bewerking) en voor het aansluiten van externe harde schijven.
De IEEE1394 kent verschillende connectorvormen. De pennummering is echter wel steeds dezelfde (zie tabel 3.7).

Tabel 3.7 Pentoewijzing IEEE1394

Pen	Naam	Functie
1	+ Voeding (12 V)	Niet aanwezig op de 4-pens uitvoeringen
2	Aarde	
3	TPB−	Aderpaar B
4	TPB+	
5	TPA+	Aderpaar A
6	TPA−	
7 + 8	Kabel afscherming	De aansluitingen 7 en 8 zijn geen echte pennen, het zijn alleen aansluitnummers van de chassis delen.

3.9 Draadloze interfaces

Naast de kabel gebonden interfaces wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van Infrarood transmissie, vooral van draagbare computers naar printers en van palmcomputers met andere apparaten. Voor de toekomst belooft de *Bluetooth* 2,4 GHz transmissie standaard (zie www.bluetooth.com) op termijn de bekabeling rond de traditionele PC te kunnen gaan vervangen.



Figuur 3.10 IEC-625 en IEEE-488 interface

RS-485 bus

Deze lokale bus (ook wel *P-net* genoemd) werkt met maximaal 32 ontvangers, kan max. 1200 meter lang zijn en werkt met een communicatiesnelheid van 10 Mbps (max. 30 Mbps bij symmetrische bekabeling). Het gaat hierbij om een *differentiële* bus, waarbij elk signaal en zijn retourader altijd op de bus in tegenfase zijn. Eventueel opgepikte storingen vallen daardoor grotendeels weg.

CAN-bus

De *CAN* (*Controller Area Network*)*-bus* (ISO 11898) wordt veelal gebruikt in de auto industrie, in fabrieksvloer- en procesbesturingsnetwerken. Over de in principe 2-aderige twisted pair data verbinding kunnen transmissiesnelheden van 5kbps tot 1 Mbps bereikt worden. Bij de maximale transmissie snelheid van 1 Mbps kan de bus maximaal 40 meter lang zijn, om via 500 kbps (100 meter) en 100 kbps (500 meter) een transmissiesnelheid van 50 kbps te kunnen bieden bij een buslengte van één kilometer.
In totaal kunnen 32 stations aangesloten worden op de 2 draadsbus, die afgesloten dient te worden met afsluitweerstanden aan de beide uiteinden van de bus.

De aansluiting op de bus gebeurt met standaard 9-polige DB9 connectoren (zie fig. 3.2), maar met een aansluiting (zie tabel 3.8) die afwijkt van de standaard seriële connector.

Tabel 3.8 Pentoewijzing voor de CAN-bus op de DB9 connector

Pen		Pen	
1	Gereserveerd	6	Voeding Aarde
2	CAN L – Datalijn Low	7	CAN H – Datalijn High
3	CAN Aarde	8	Gereserveerd
4	Gereserveerd	9	Voeding + optie externe voeding)
5	CAN Afscherming kabel (optioneel)		

3.10 Interfaces voor meetinstrumenten en procesbesturing

IEEE-488 en IEC-625

De IEEE-488 en de IEC-625 interfaces (zie figuur 3.9) worden vooral gebruikt voor het aansluiten van meetinstrumenten en procesbesturing. Deze interface staat ook wel bekend als de *GPIB* (*General Purpose Interface Bus*). In tegenstelling tot de gewone parallelle interface (zie par. 3.3) is deze wel bruikbaar voor de meer aansluitingen dan een apparaat. Op deze 8-bits bussen kunnen max. 20 apparaten aangesloten worden en is een max. snelheid van 1 Mbps mogelijk. Doordat de maximum kabellengte beperkt is tot in totaal 20 meter (en max. 2 meter per aangesloten apparaat) is deze standaard beperkt inzetbaar in andere toepassingen.

DIO1	Data Input/Output 1	IFC	InterFace Clear
DIO2	Data Input/Output 2	SRQ	Service ReQuest
DIO3	Data Input/Output 3	ATN	ATtentioN
DIO4	Data Input/Output 4	shield	Shield
REN	Remote ENable	DIO5	Data Input/Output 5
EOI	End Or Identify	DIO6	Data Input/Output 6
DAV	Data AVailable	DIO7	Data Input/Output 7
NRFD	No Ready for Data	DIO8	Data Input/Output 8
NDAC	No Data ACcepted	GND	Ground

4 Datacommunicatie

4.1 Computernetwerken

Computernetwerken laten zich onderscheiden in twee hoofdcategorieën:

- LANs – Local Area Networks.
  Dit zijn netwerken die zich meestal tot een gebouw beperken en een maximale afstand van enkele kilometers (langs de kabel gemeten) tussen de twee verst van elkaar verwijderde stations. Veelal zijn ze gebaseerd op Ethernet (zie par 4.2).
- WANs – Wide Area Networks
  Deze netwerken kennen geen beperking in de maximale afstand tussen twee netwerkstations. Hun transmissie snelheid is veelal één tot enkele grootte ordes kleiner dan bij LANs. Zij zijn veelal gebaseerd op telefoon-, ISDN- (zie par 4.5) of Internet (zie par 4.4) verbindingen.

Op het moment van drukken van deze uitgave lijken de tussenvormen van Campus Area Networks (bedrijfscomplex begrensd netwerk) en Metropolitan Area Networks (stedelijk begrensde netwerk) te ontstaan. Voor hun positionering tussen LAN en WAN dient men te beseffen dat altijd geldt dat hoe groter de maximale afstand tussen netwerkstations is, hoe langer het duurt voordat het signaal het andere station bereikt, dus des te lager de maximaal haalbare transmissiesnelheid kan zijn.

4.2 Ethernet netwerken

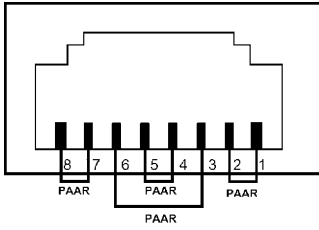
Ethernet kent typische overdrachtsnelheden van 10 Mbits (IEEE 802.3 10Base-T standaard) of 100 Mbits (‘‘Fast Ethernet’’ IEEE 802.3 100Base-T standaard) per seconde en worden altijd aangesloten middels een RJ45 aansluiting (zie figuur 4.1). Hun bekabeling bestaat uit zgn. UTP-bekabeling. De UTP (Unshielded Twisted Pair)-kabel is een onafgeschermde kabel met 4 afzonderlijk getwiste aderparen. UTP bestaat in een aantal snelheidsklassen (zie tabel 4.1). Oudere 10Base2 Ethernet netwerken gebruikten coaxiale bekabeling (officieel is 50Ω voorgeschreven, in praktijk werd veelal 75Ω of 93Ω gebruikt in bus vorm, die aan weerszijden met weerstanden afgesloten moet zijn.

Hubs, switches, routers

Een UTP Ethernet verbinding gebruikt altijd slechts twee aderparen, één paar om te zenden en één paar om te ontvangen. Dat betekent dat er iets (een *hub*, *switch* of *router*) nodig is om het op het ene aderpaar verzonden signaal bij de ontvangende stations op het andere paar binnen te laten komen.
Bij een *hub* wordt het signaal verzonden naar alle aangesloten stations in diens subnetwerk. Een *switch* verzendt alleen selectief de data naar bepaalde ontvangende stations, op basis van het in de datastroom opgegeven hardwareadres en wordt vooral ingezet om de netwerk belasting in te perken. Een *router* zendt alleen selectief naar bepaalde stations door op basis van IP-adressen (niet noodzakelijk in hetzelfde subnetwerk) en wordt vooral om beveiligingsredenen ingezet (maar kan ook helpen de netwerk-belasting in tomen).
De enige situatie waarbij men via UTP kan werken zonder zoiets als een hub, switch of router, is wanneer men slechts 2 stations wil aansluiten. Dan moet men in de kabel de beide basis aderparen kruisen. Voor het koppelen van 2 PC's bestaan speciale *Ethernet cross kabels*, waarin deze twee aderparen gekruist zijn, d.w.z. met verbindingen van de RJ45 aansluitingen 1-3, 2-6, 3-1, 6-2.

Kleurcodes/aansluitingen

Ethernet computer netwerken zijn bedraad volgens de *EIA-T 568B kleurcode* (tabel 4.1) en gebruiken de groene en oranje als basis aderparen. De bruine en blauwe aderparen kunnen gebruikt worden voor een tweede Ethernet verbinding of een telefoon verbinding. Sommige telefoonmaatschappijen wijken hiervan af en volgen de *EIA-T568A standaard* voor de bedrading. Hierbij zijn de oranje en groene aderparen omgewisseld (zie tabel 4.1) om een meer compatibele aansluiting met de (analoge) RJ11 aansluiting te krijgen.



Figuur 4.1 Aansluiting Ethernet aderparen en pennummering op RJ45 entree (buitenaanzicht female)

Tabel 4.1 Ethernet 100Base-T4 voor RJ45 aansluiting op UTP-bekabeling

Pen	Ader Paar	Voetnoot	Signaal	Functie (EIA-T568B)	Kleur	Gebruik
1			TX^+	Transceive Data +	Wit/Oranje	10/100 Base-T
2	2	1) 2)	TX^-	Transceive Data −	Oranje	10/100 Base-T
3	3	2)	RX^+	Receive Data +	Wit/Groen	10/100 Base-T, ISDN B1
4			BI	Bi-direct. Data+	Blauw	ISDN B2
5	1	1)	BI	Bi-direct. Data −	Wit/Blauw	ISDN B2
6	3	2)	RX^-	Receive Data −	Groen	10/100 Base-T, ISDN B1
7			BI	Bi-direct. Data +	Wit/Bruin	
8	4		BI	Bi-direct. Data +	Bruin	

1) Bij de EIA-T568A zijn aderparen 2 (oranje) en 3 (groen) verwisseld van plaats, d.w.z. in T568A zit het oranje aderpaar komt op pen 4 en 5 en heet nog steeds aderpaar 2.
2) In de officiële Ethernet 10/100Base-T worden de aderparen 2 en 3 resp. 1 en 2 genoemd. (De aderparen 3 en 4 komen niet voor in de Ethernet standaard)
3) De oneven pennen zijn altijd wit (gestreept). In de telecommunicatie worden ze met + polariteit of als T (Tip) aangeduid.

De Tip polariteit aanduiding stamt nog uit de tijd van de ouderwetse telefonie centrale patch pluggen (in de vorm van de huidige koptelefoon stekers), waarbij de punt met T (Tip) en de mantel met R (Ring) wordt aangeduid.
Let op: dat men de aanduidingen T en R niet verward met Transmit en Receive; de laatsten worden altijd met Tx resp. Rx aangeduid.

Tabel 4.2 UTP bekabeling snelheidsklassen

Type	Bandbreedte	Gebruik
Cat 3	tot 16 MHz	10Base-T
Cat 4	tot 20 MHz	10Base-T
Cat 5	tot 100 MHz	10/100Base-T
Cat 5+	tot 300 MHz	10/100Base-T
Cat 6	tot 600 MHz	10/100Base-T

In nieuwbouw wordt alleen nog Cat. 5 of beter gënstalleerd om toekomstvast te zijn.

4.3 Netwerkprotocollen

Netwerkprotocollen zijn de talen die gebruikt worden om computers onderling met elkaar te laten praten. *TCP/IP* is het meest verspreide netwerkprotocol. Het gehele Internet is hierop gebaseerd, evenals de meeste LAN, MAN en WAN netwerken. *IPX/SPX* en *NetBEUI (NetBios)* zijn de oudere protocollen, die vooral voor LAN en peer-to-peer netwerken gebruikt worden. Een *peer-to-peer netwerk* is een netwerk dat werkt zonder centrale domeinbesturing.

NetBEUI is een zeer eenvoudig protocol dat geen configuratie instellingen nodig heeft. Het biedt de mogelijkheid van het gezamenlijk gebruik (delen of sharen) van mappen, disk-stations en printers en werkt zowel op MSDOS als Windows machines. *IPX/SPX* is een protocol uit de Novell-wereld en biedt additionele mogelijkheden voor het sharen van spelletjes. Een éénduidige framegrootte is de enige vereiste instelling.

TCP/IP biedt het breedste aanbod van mogelijkheden en vereist ook de meeste instellingen. Belangrijkste instellingen zijn het *IP-adres* en het *subnet masker*. Het IP-adres is opgebouwd uit 4 groepjes van 3 cijfers (waarde 0-255) en vormt het unieke adres van de computer. Via het subnet masker wordt dit IP-adres onderverdeeld in netwerkadres deel en computeradres deel. Bijvoorbeeld werkt men een subnet masker 255.255.255.0 dan geeft dat aan dat de eerste 3 groepen het netwerk adres aanduiden en dat er max. 255 computers binnen in dit netwerk kunnen zitten.

Tabel 4.3 Poortnummers van de meest gebruikte diensten

Poort	Service	Omschrijving (toepassing)
19	NNTP	Network News Transfer Protocol (nieuwsgroepen)
21	FTP	File Transfer Protocol (bestandsuitwisseling)
23	Telnet	Telnet (terminal emulatie)
25	SMTP	Simple Mail Transfer Protocol (e-mail)
80	HTTP	HyperText Transfer Protocol (web browser)
139	NetBios	NetBios (sessie setup voor NetBEUI)
339	LDAP	Lightweight Directory Access Protocol (adresboeken)

Onder TCP/IP wordt gecommuniceerd via poorten. Iedere dienst gebruikt een specifiek *poortnummer.* De belangrijkste zijn weergegeven in tabel 4.3. De volledige lijst is te vinden op www.iana.org/assignments/port-numbers.

Voor de opmaak van de pagina's die gepresenteerd worden in de webbrowser wordt het HTML (HyperText Markup Language) gebruikt als formaat voor gegevensuitwisseling. Daarnaast wordt ook steeds meer gebruik gemaakt van XML (eXtensible Markup Language), onder andere voor e-Commerce en online publishing Dit is net als HTML een subset van het SGML (Standaard Generalised Markup Language) formaat en is exibeler dan HTML.

4.4 Internetverbindingen

Voor de normale snelheden wordt gebruik gemaakt van een gekozen telefoonlijn en een modem (zie par 4.6). Dit kan via een analoge telefoonlijn zijn waarbij men veelal beperkt is tot 33Kbps of 56 Kbps of via een digitale telefoonlijn (ISDN, zie par 4.5) waarbij men standaard met 56 Kbps werkt en men 128 Kbps kan bereiken door het gebruik van de beide basiskanalen van ISDN.

Voor snellere toegang zijn zogenaamde breedbandige internet aansluitingen mogelijk met de karakteristieken uit tabel 4.4. Bij het drukken van deze uitgave zijn alleen de ADSL- en kabeltechniek wijd verspreid. Satelliet transmissie is al wel mogelijk, maar komt nog weinig voor. De WLL verschijnt slechts aan de horizon.

Tabel 4.4 Internet aansluitmethoden en karakteristieken

	ADSL	Kabel	Satelliet	WLL
	Asymmetric Digital Subscriber Line			Wireless Local Loop
Technologie	ISDN Telefonie met speciale router voorzieningen in telefoon centrale	Distributie via de kabel TV netwerken	Verzending via een satelliet in de ruimte. Medium minder compatibel met TCP/IP pakket grootte.	Draadloos, met zendmasten op gemeente of wijk niveau. Vergelijkbaar met GSM. Radiogolven in 2,4 GHz band
Typische aansluiting op PC	Modem via traditionele COM-poort	LAN aansluiting, veelal Ethernet	Via USB-poort naar satelliet ontvanger	LAN aansluiting veelal Ethernet
Toepassings-beperkingen/ voordelen	Max. afstand van enkele km tot geschikt gemaakte telefooncentrale	Voordeel: permanent beschikbare verbinding	Voordeel: Toepasbaar in gebieden zonder infrastructuur	Nog duur in aanschaf voor gebruiker
Bandreedte	niet gedeeld, verdelen over verschillende eigen Pc's niet simpel	gedeeld met andere gebruikers	beperking in interactief gebruik door satelliet vertraging	niet gedeeld, verdelen over verschillende eigen Pc's simpel
Theoretisch maximum	8 Mbps	10 Mbps	1 Mbps	8Mbps
Upstream (verzenden naar Internet, versturen vragen/op-drachten)	64–640 kbps	100–640 kbps	50–900 kbps	60–500 kbps
Downstream (ontvangen van Internet, zgn. downloaden)	144 kbps tot 2,2 Mbps	200 kbps–10 Mbps	300–900 kbps	300 kbps–1 Mbps

4.5 ISDN en analoge telefonie

ISDN staat voor Integrated Services Digital Network en vormt de tegenhanger van het analoge telefoonnetwerk, aangeduid door *PSTN* (Public Switched Telephone Network).

Een normale aansluiting van ISDN heeft 4-draads aansluiting, de hoofdaansluiting is 6-draads. Altijd wordt een RJ45 connector gebruikt. Vanaf de hoofdaansluiting dient de inpandige bedrading in bus topologie aangelegd te worden. De bus kan maximaal 150 meter lang zijn en dient met een afsluitweerstand afgesloten te worden. Op de bus kunnen maximaal 8 stations aangesloten worden.

Een standaard ISDN aansluiting (een zgn. Basic Rate Interface) heeft twee B-kanalen van 64 kbps, die eventueel parallel geschakeld kunnen worden tot één kanaal van 128 kbps, en een derde kanaal het D-kanaal van 16 kbps wordt gebruikt voor de signalering.

Tabel 4.5 Inpandige ISDN RJ45 aanslutiplug (wordt tevens gebruikt voor ADSL aansluitingen)

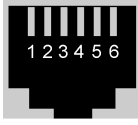
Pen[1)]	Functie	Standaard Flexibele ISDN kabel EIA-T568A[2)]	Nederlandse KPN Universele kabel
pen3	ISDN B1	oranje	oranje
pen4	ISDN B2	blauw	rood
pen5	ISDN B2	wit/blauw	blauw
pen6	ISDN B1	wit/oranje	wit

1) pennen 1,2,7 en 8 worden niet aangesloten
2) Let op: Deze kleuren verschillen van de Ethernet kleurcodering (zie par. 4.2)

Tabel 4.6 PTSN analoge aansluiting volgens RJ11 (2 draads), RJ14 (4-draads) of RJ25 (6 draads)[1)]

Pen	RJ11	RJ14	RJ25	Polariteit	Functie	Kleur
1			×	+ T	3e aderpaar	wit
2		×	×	+ T	signalering	zwart
3	×	×	×	− R	gesprek	rood
4	×	×	×	+ T	gesprek	groen
5		×	×	− R	signalering	geel
6			×	− R	3e aderpaar	blaw

[1)] Voor notatie polariteit zie tabel 4.1



Figuur 4.2 Modulaire RJ11, RJ14 en RJ25 (de afmetingen zijn identiek; het aantal aansluitpennen is resp. 2, 4 of 6)

4.6 Modem-codes

Voor de verbinding van de computer met de buitenwereld wordt vaak gebruik gemaakt van modems. Slechte modeminstellingen leiden vaak tot nodeloze onderbrekingen van de datatransmissie bij storingen op de telefoonlijn.

De meeste modems worden momenteel aangestuurd met *Hayes commando's* (tabel 4.7) en bewaren hun instellingen intern in een aantal zgn. *S-registers* (tabel 4.8) In de tabellen zijn niet alle mogelijkheden opgenomen, wel de belangrijkste voor een goede verbindingsopbouw.

De commando's worden op de PC ingegeven en bereiken het modem langs hetzelfde pad (meestal de seriële poort) als de te verzenden of te ontvangen data.

Om te waarborgen dat het modem altijd commando's van gewone data kan onderscheiden gelden drie harde afspraken:

1 Er is een *escape code* gedefinieerd (default: + + +) om het modem van 'On-line state' (data verzending) naar 'Command state' te brengen.
2 Iedere commandoregel mag verschillende commando's bevatten, maar moet altijd beginnen met het *Attention Command* (AT).
3 Door wachttijden vóór en na de echte escape code en tijdseisen tussen de + -tekens van de escape code wordt gezorgd dat deze niet verward kan worden met drie opeenvolgende + -tekens ergens in de datastroom.

Tabel 4.7 De belangrijkste Hayes commando's

commando[1)]	naam	omschrijving[2)]
AT	Attention	hiermee begint iedere commando regel, behalve bij A/en +++
A/	Repeat	herhaal het voorgaande commando
A	Auto Answer	laat modem binnenkomende gesprekken aannemen
Bn	Bell tone	0 = CCITT, 1 = Bell (Am./Can. signalering)
C*n*	Carrier	carrier-status (0 = aan, 1 = uit)
D! D'' D*m* DP*m* DS*m* DT*m*	Dial Dial Dial	!Kies het hierna volgende nummer ''Kies het hierna volgende letternummer kies telefoonnummer *m* P Zet telefoonnummers op de telefoonlijn als pulsen S Draai opgeslagen nummer T Zet telefoonnummers op de telefoonlijn als tonen Het telefoonnummer bestaat uit cijfers, pauze- en wachttekens , Pauze W Wacht op tweede poging of toegangstoon
E*n*	Echo	1 = modem echoot de ontvangen commando's, bijv. ter verificatie of om ze op het scherm te tonen; 0 = geen echo.
H*n*	Hang up	1 = neem hoorn van de haak; 0 = leg de hoorn neer

Tabel 4.7 (vervolg)

commando[1)]	naam	omschrijving[2)]
I*n*	Identify	0 = modem geeft zijn driecijferige productcode op 1 = modem geeft de zijn checksum ROM op 2 = modem test zijn ROM checksum (OK of ERROR) 3 = modem geeft revisiecode op 4 = modem geeft OEM tekst op 5 = modem geeft landennummer op
L*n*	Loudness	stelt sterkte meeluisteren in (0 = laag t/m 4 = hoog)
Mn	Monitoring	de luidspreker staat: 0 = altijd af 2 = altijd aan 1 = luister mee totdat Carrier Detect ontvangen wordt 3 = luister mee totdat Carrier Detect ontvangen wordt, alleen vanaf het nummer kiezen
Nn	Negotiate	0 = alleen op de in S37 ingestelde snelheid 1 = onderhandel en pas snelheid aan
O*n*	On-line	0 = verlaat command state; keer terug tot data verzending; 1 = idem en modem opnieuw instellen (compressie en error-correctie) op kwaliteit van de verbinding
Q*n*	Quiet	0 = modem geeft resultaatcodes af voor de commando's die het ontvangt; 1 = geen resultaatcodes
S*r*?	Display register	modem geeft de inhoud register *r* (0 t/m 99) terug
S*r* = *x*	Set register	plaats de waarde *x* (0–255) in het register *r*
V*n*	Verbose	0 = geef resultaatcode op commando's als getal 1 = geef resultaatcode op commando's als tekst
Wn	Extended Result codes	1 = rapporteer voortgang verbindingsopbouw
Z*n*	Zero	laad profiel *n* (0 of 1) uit niet-vluchtig geheugen
$	help	modem geeft lijst van beschikbare commando's terug

Tabel 4.7 (vervolg)

commando[1)]	naam	omschrijving[2)]
+++	Escape code	onderbreek data verzending, zet modem in command state
&C*n*	DCD options	0 = modem zet DCD altijd aan, 1 = DCD volgt ontvangen carrier signaal van remote modem
&D*n*	DTR options	0 = modem reageert niet op wegvallen DTR 1-4 = diverse reacties op wegvallen DTR Signaal
&F	Factory Config.	herlaad de fabrieksinstellingen
&K*n*	DTE/ Modem flow control	0 = geen flow control tussen DTE/DCE 3 = flow control via RTS/CTS signalen 4 = XON/XOFF flow control 5 = transparante XON/XOFF flow control 6 = flow control via RTS/CTS en XON/XOFF
&L*n*	Line Selection	0 = gekozen verbinding 1 = vaste verbinding
&Mn (tevens &Qn)	Communications Mode Selection	0 = Asynchroon, directe modus 5 = Fout corrigerende modus 6 = Asynchroon, normale modus 8 = MNP modus 9 = V42 en V42bis modi
&R*n*	RTS/CTS option	0 = CTS volgt RTS 1 = CTS reageert niet op RTS; volgt flow control
&S*n*	DSR options	0 = DSR signaal altijd aan 1 = DSR gaat uit als carrier wegvalt
&V	View profile	display de actieve instellingen
&W*n*	Store profile	sla de actieve instellingen op als profiel *n* (0 of 1)
&Y*n*	Default profile	laad profiel *n* (0 of 1) bij aanzetten modem
&Z*n*=*m*	Store number	sla telefoonnummer *m* op in lokatie n (0-3 of meer)
%Cn	Data Compression	0 = Geen data compressie, 1 = MPN5, 2 = V42bis, 3 = MPN5 en V42bis

1) De Hayes commando's zijn *case-sensitive*, d.w.z. er bestaat verschil tussen hoofdletters en kleine letters.

2) De meeste modems kiezen voor *n* een bepaalde waarde indien men niets opgeeft. Omdat niet alle modems dezelfde aannames doen, is het raadzaam altijd de *n* waarde te vermelden.

Tabel 4.8 De belangrijkste S-registers

register[1) 2)]	functie	waarde	eenheid
*S0	Hoe vaak laten rinkelen voor auto-answer	0–255	keer rinkelen
S1	Hoe vaak bel laten overgaan	0–255	keer rinkelen
*S2	Escape teken	0–255	ASCII, 43H default
S3	Carriage return teken	0–127	ASCII, 13H default
S4	Line feed teken	0–127	ASCII, 10H default
S5	Backspace teken	0–255	ASCII, 08H default
*S6	Wachttijd voor kiestoon	2–255	seconden
*S7	Wachttijd voor carrier	1–255	seconden
S8	Tijdsduur van "," pauze teken	0–255	seconde
*S9	Carrier Detect responsetijd	1–255	0,1 seconde
*S10	Bij verlies carrier verbreek verbinding na	1–255	0,1 seconde
*S11	Lengte toonkies signalen	50–255	milliseconde
*S12	Dode tijd ingevoegd rond escape	0–255	0,02 seconde
*S14, S23	Algemene modem instellingen	bitmap	
*S21	Instellingen V24 interface	bitmap	
*S22	Instellingen luidspreker en resultaatcodes	bitmap	
S25	Beschouw DTR signaal als geldig na	0–255	0,01 seconde
S26	CTS volgt RTS pas na	0–255	0,01 seconde
S32, S33	XON resp. XOFF teken	0–255	ASCII
*S37	Gevraagde lijnsnelheid	bitmap	
*S39	Instellingen flow control	bitmap	
*S46	Instellingen data compressie control	bitmap	
S91, S92 S99	Zendsterkte voor kieslijn resp fax-of huurlijn	0–15	dBm

1) * = wordt opgeslagen als onderdeel van profielen
2) Eenvoudige modems kennen vaak alleen de lagere registers (< S28).

4.7 OSI Referentie model

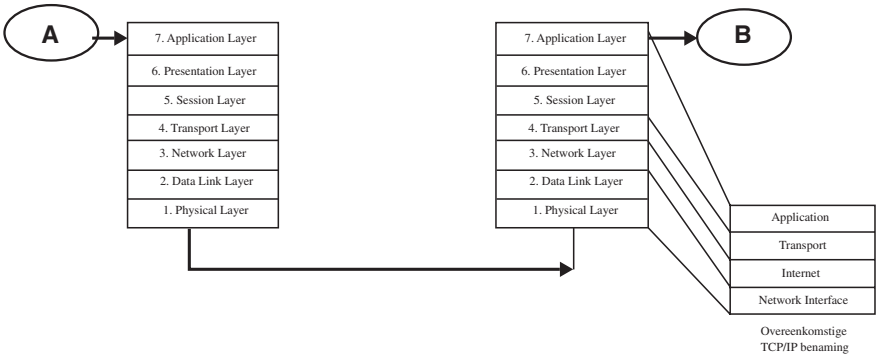
ISO's *Open Systems Interconnection (OSI) referentie model* is een wijdverspreid model waarin de communicatie tussen twee partijen (processen of personen) opgedeeld worden in 7 lagen, waarbij de partijen zich in laag 7 bevinden. In het model kent iedere laag alleen de diensten die de laag eronder aanbiedt, niet van de implementatie van die diensten. Van de dieper liggende lagen zijn diensten noch hun implementaties bekend.

Laag 7: Application Layer
Hierin bevinden zich de applicaties, processen en/of personen, die met elkaar communiceren via de onderliggende zes lagen. Binnen de applicatielaag onderscheidt men veelal 3 onderdelen:

1. Common applications services: gemeenschappelijke diensten die beschikbaar zijn voor alle applicaties om type en structuur van de conversatie te regelen (concurrency, commitment en recovery)
2. Specific application services: bieden specifieke diensten aan, zoals bijv e-mail, file transfer, etc. Men kan hier protocollen aan treffen, die beperkt zijn tot een organisatie, dan wel wereldwijde erkende protocollen (bijv. het X.400 message protocol, X.500 directory protocol, etc)
3. User elements: dit zijn eenvoudig de eindpunten van de informatie overdracht.

Laag 6: Presentation Layer
Zorgt voor formaatomzettingen; ontkoppelt de applicatieformaten van de transmissieformaten. Hoofdtaken zijn:

1. Omzetting data representatie (bijv. ASCII naar EBCDIC, bytesex, big-endian naar little-endian)
2. Compressie/Decompressie
3. Encryptie/Decryptie



Figuur 4.3 Het 7 lagen OSI referentie model voor datacommunicatie en overeenkomstige benamingen van de 4 lagen in TCP/IP

Laag 5: Session Layer

Voegt het begrip van sessies aan de communicatie toe en zorgt voor het bewaren van toestandsinformatie over verschillende sessies heen. Het opzetten, beheer en bewaken van sessies omvat o.a.:

1. Sessie initiëren en activeren
2. Sessie beëindigen en vrijgeven
3. Synchronisatie
4. Dialoogbeheer
5. Normale en voorrang in gegevensoverdracht

De lagen 5 tot en met 7 worden de ‘‘hogere’’ lagen genoemd

Laag 4: Transport Layer

Zorgt voor betrouwbare datatransmissie over het netwerk en voegt end-to-end bewaking toe aan de netwerklaag. Dit omvat taken zoals:

1. Omzetting van bericht in packets van verzendbare grootte
2. Packet volgnummering en samenvoeging packet ontvangende zijde
3. Toevoegen van het juiste bestemmingsadres en internetwerk routering
4. Aanbieden van de pakketten aan de network layer voor verzending.

Laag 3: Network Layer

Zorgt voor het routeren van de te zenden informatie over verschillende data links heen. Wanneer de bestemming niet aangrenzend is, zal een route bepaald moeten worden over de verschillende knooppunten en tussenliggende data links heen. De netwerklaag bepaalt dan het pad in hoofdlijnen, de route details worden bepaald door de transportlaag. CCITT X.25 is een voorbeeld van een network layer protocol. We hebben nu de boodschap en diens route is bepaald. De onderste twee lagen hebben het nu alleen nog uit te voeren.

Laag 2: Data Link Layer
Bevat de faciliteiten van verzenden van pakkets van informatie over een link. Een link is begrensd door de eindpunten van één fysieke verbinding (draad, glasvezel, etc) De data link laag verzorgt de volgende diensten:
1. data transport van de ene kant van de lijn naar de andere
2. data link activatie en deactivatie
3. data link fouten detectie en recovery
4. data link sharing
5. transparente data flow

Protocollen gebruikt in deze laag zijn bijv: IEEE's 802.2, ISO's High-Level Data Link Control (HDLC), SNA's Data Link Control (SDLC)

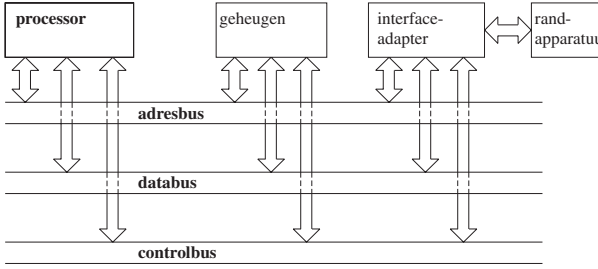
Laag 1: Physical Layer
Zet de bitstroom op het fysieke medium van de data link en haalt ze er weer vanaf en is meestal gëmplementeerd in hardware. In deze laag worden zaken geregeld zoals omzetting naar analoge signalen, modulatiemethode, signaalniveaus, etc. Voorbeelden van standaarden in deze laag zijn de CCITT's X.21 voor digitale transmissie en de V.35/V.24 voor analoge transmissie.

5 Microcomputers

5.1 Architectuur

Microcomputersystemen zijn opgebouwd uit:
– *Hardware:* alle tastbare componenten zoals bekabeling, printen en behuizing.
– *Software:* de *programmatuur,* die de hardware een zinvolle functie laat uitvoeren.

Hardware
De *mechanische* hardware bevat alle montage, zoals frame en printen, kast en bedieningsconsole.
De *elektronische* hardware is opgebouwd rondomhet *bussysteem*.



Figuur 5.1 Principe van een microcomputersysteem

Het bussysteem bestaat uit een hoeveelheid gegroepeerde parallelle verbindingen tussen alle bouwblokken van het systeem (zie figuur 5.1). Men kan onderscheiden.

- *Adresbus*: voor de uitwisseling van adressen. Bij a adreslijnen is de *adresseringscapaciteit* 2^a.
- *Databus:* uitwisselen van data oftewel de programmacodes en gegevens. Bij d datalijnen is de *verwerkingsbreedte* d bits.
- *Controlbus:* voor besturing en synchronisatie.
- *Voedingsbus:* voor de stroomvoorziening (deze bus wordt meestal niet getekend).

Naast de algemene bussen ontstaan in de huidige architectuur meer en meer specialistische bussen, die enkel tussen bepaalde systeemcomponenten verbindingen verzorgen. Een voorbeeld hiervan is de AGP (Accelerated Graphics Port)–bus die enkel dient als snelle verbinding tussen videokaart en het RAM geheugen om de algemene PCI–bus te ontlasten.

Soms zijn bussen gecombineerd m.b.v. multiplexing: één stel lijnen dient zowel voor transport van adressen als data. Via een besturingslijn in de controlbus wordt aangegeven of er een geldig adres dan wel geldige data op de *multiplexed bus* aanwezig is.

Het "richtingsverkeer" over de bussen is:
- òf *Uni-directioneel:* er is één component die de elektrische toestand op de lijn(en) bepaalt. De busversterkers zijn enkelvoudig uitgevoerd.
- òf *Bi-directioneel:* meerdere componenten bepalen de elektrische toestand op de lijnen; via de controlbus wordt er dusdanig gesynchroniseerd dat er maar één component per tijdseenheid actief is (vermijden van *buscontentie* = door elkaar spreken). De busversterkers zijn tweevoudig uitgevoerd.

Het geheugen bestaat uit één of meerdere soorten IC's:
- *RAM (Random Access Memory):* voor opslag van gegevens en eventueel programmacode.
- *ROM, EPROM* (al dan niet '*Erasable Programmable' Read Only Memory*): Voor opslag van vaste programmacode.

Op deze basistypen komen steeds nieuwe varianten in omloop.
De verschillen daartussen zijn praktisch uitsluitend belangrijk voor de elektronici. Alleen de *Flash ROM* is belangrijk voor de architectuur.
De *Flash ROM* is een elektrisch wijzigbare EPROM (EEPROM), dat gewijzigd kan worden in een werkend systeem zonder externe hulpmiddelen. Wijzigingen kunnen verstuurd worden over een netwerk en meteen aangebracht worden.
De functionaliteit van een computer kan daardoor veel dynamischer aangepast worden; functies kunnen nu tijdelijk toegevoegd worden (bijv. voor een test of voor één specifieke sessie) of permanent toegevoegd worden wanneer recentere versies beschikbaar komen.

De *interface-adapter* bestaat uit meerdere typen IC's afhankelijk van het soort *randapparatuur* dat moet worden bediend. Zo zijn er interface-adapters voor: beeldscherm, toetsenbord, printer, disk (schijf), cassette, datacommunicatie.

Software (programmatuur)

Bij de software maakt men onderscheid tussen:

- *systeemprogrammatuur:* vervult de basisfuncties voor het computersysteem.
- *toepassingsprogrammatuur (applicatieprogrammatuur*): vervult direct functies ten behoeve van de gebruiker.

Tot de systeemprogrammatuur rekent men veelal:

- *BIOS (Basic I/O System):* de in ROM geplaatste routines, die het voor het Operating System mogelijk maken de randapparaten als logische apparaten te benaderen bijv. bij disks zorgt de BIOS voor omzetting naar fysieke disk-indeling en aantal koppen.
- *operating system (besturingssysteem):* voor de besturing van de hardware en de interne huishouding (Windows, UNIX, MSDOS).
- *graphical user interface (GUI):* onderdeel van het besturingssystemen dat zorgt dat men met behulp van een muis de opdrachten en bewerkingen kan uitvoeren door op het beeldscherm bepaalde symbolen 'aan te klikken' (zoals bij Apple-computers of Windows bij IBM-PC's en compatibles).

Operating systemen onderscheiden zich vooral in *multitasking* mogelijkheden, d.w.z. in de mogelijkheid om verschillende applicatieprogramma's gelijktijdig uit te voeren (MSDOS kent geen multi tasking, Windows en UNIX wel). Een verdere gradatie is de zgn. *preemptive multitasking*, waarbij aan een applicatieprogramma gegarandeerd kan worden dat hij aan de beurt komt (zelfs als een andere applicatie zich misdraagt). Deze robuustere vorm kennen alleen Windows NT, Windows 2000, IBM's OS/2 en sommige UNIX-systemen. Bij Windows 95 en Windows 98 kan één ongediciplineerd programma de uitvoering van alle andere programma's in het systeem blokkeren.

Binnen de applicatieprogrammatuur onderscheidt men vaak de volgende soorten:

- *compilers* en *interpreters*: voor de programmering in *hogere programmeertalen* (C^{++}, Visual Basic, Pascal, COBOL, Fortran).
- *database handlers*: voor de gestructureerde opslag van gegevens, meestal op schijf (MS Access, Oracle, SQL).
- *editors* en *tekstverwerkers*: voor een gebruikersvriendelijke invoer en wijzigingen van teksten, tabellen, grafieken (MS Word, WordPerfect).
- *spreadsheets*: voor het dynamisch doorrekenen van gegevens en grafische representatie (MS Excel).
- *desktop publishing (DTP) pakketten*: voor het opmaken van teksten (Ventura publisher, Adobe PageMaker, Adobe Acrobat).
- *presentation software*: voor het maken van presentaties en voor audiovisuele ondersteuning bij het geven van voordrachten, lezingen en product presentaties (MS PowerPoint, Freelance Graphics).
- *webbrowsers* voor het navigeren en zoeken nop Internet (MS Internet Explorer, Netscape).
- *webpublishing*: voor het opmaken van webpagina's (MS Publisher, MS Frontpage).
- *e-mail*: voor het verzenden en ontvangen van elektronische post en het beheer van bijbehorende adressen (MS Outlook, Eudora, Lotus Notes).

Applicatieprogramma's worden steeds meer gebundeld aangeboden in zgn. *suites*. Zo'n reeks van één fabrikant (bijv. Microsoft, Lotus) is vaak aantrekkelijk (naast een prijsvoordeel) vanwege de aansluiting en uitwisseling tussen de delen onderling. In de zomer van 2001 zijn alle applicatieprogramma's 32-bit versies. Applicatieprogramma's, die de 64-bit datapaden van modernste Pentium processoren benutten, zijn nog niet op de markt. Oudere 16-bit software (georiënteerd op de 286 en 386 processoren) komt men nog incidenteel tegen op machines die nog werken met Windows 3.1 en Windows 95.

Interrupts

De PC-architectuur kent twee soorten interrupts: hardware- en software-interrupts.

Hardware interrupts
De hardware interrupts worden aangeduid met IRQ0 tot IRQ15 en hebben ieder een eigen signaalader op de hardware bus. Via deze signaaladers kunnen de onderdelen van de PC en de interface-adapters om aandacht van de CPU verzoeken. Tabel 4.1 geeft de standaard toewijzing van de hardware interrupts en de prioriteitsvolgorde (1 is hoogste) waarin de CPU de verzoeken afhandelt. Worden insteekkaarten bijgeplaatst of wanneer een onderdeel niet snel genoeg bediend wordt dan kan het noodzakelijk zijn de toewijzing aan te passen. Raadzaam is om dit zo min mogelijk te doen.

Software interrupts
De software interrupts zijn veel groter in aantal, en worden aangeduid met INTxx (xx is een hexadecimaal getal 00 tot FE). Ze worden vooral gebruikt om uitbreidingen in de standaard-functies aan te brengen. De interrupts zijn niet terug te vinden in de hardware; hun werking berust erop dat de CPU de machinetaal instructie INTxx aantreft in het programma. Daarop gaat de CPU een subroutine uitvoeren waarvan het begin adres (4 bytes elk) te vinden is in de eerste 1024 bytes van het PC-geheugen. Louter door de begin adressen te wijzigen kunnen dan de functies van de subroutines veranderd worden.

5.2 PC-systemen

De meeste *Personal Computers (PC's)* zijn opgebouwd volgens de IBM-PC architectuur en werken met processoren uit de Intel x86 familie. Beduidend minder in aantal zijn de Apple (MacIntosh) systemen die werken met de *PowerPC*-processor. De IBM (-compatible) PC wordt hieronder toegelicht, kortweg aangeduid als 'PC'.

Tabel 5.1 Toewijzing van de hardware interrupts vanaf de PC-AT en prioriteit van afhandeling (1 hoogste, 16 laagste)

Prioriteit		Gebruik
1	IRQ0	systeemtimer
2	IRQ1	toetsenbord
3	IRQ2	niet beschikbaar (intern gebruikt voor cascadering IRQ9-15)
12	IRQ3	COM2, COM4
13	IRQ4	COM1, COM3
14	IRQ5	LPT2
15	IRQ6	diskette controller, hard disk drive, diskette drive
16	IRQ7	LPT1, geluidskaart
4	IRQ8	realtime clock
5	IRQ9	netwerk
6	IRQ10	
7	IRQ11	FPU coprocessor, SCSI disk controller
8	IRQ12	primaire hard disk controller, PS/2 muis
9	IRQ13	
10	IRQ14	
11	IRQ15	secondaire IDE hard disk controller

Moederbord

De PC is opgebouwd rondom een *moederbord*, met daarop busconnectoren die één of meer extensie-borden mogelijk maken. Het moederbord bevat:

- De processor. In de oudere systemen werd de processor veelal *CPU (central processing unit)* genoemd en de aparte chip voor floating point bewerking met *FPU co-processor* aangeduid.
- Busbesturingslogica.
- Houders voor het RAM-geheugen, waarin één of meer *SIMM's (Single Inline Memory Module) of DIMM's (Dual Inline Memory Module)* geplaatst kunnen worden. Gangbaar zijn de 168-pens DIMM's, die in diverse geheugengroottes bestaan. De 30- en 72-pens SIMM's zijn inmiddels verouderd.

- Interfaces voor o.a. toetsenbord (keyboard), soms ook apart voor een muis (mouse). Zie ook par. 3.5. In het algemeen is er geen video-interface op het moerderbord geïntegreerd, om een vrije keuze te laten in het type video-adapter via een insteekkaart.
- Meestal een aantal seriële en/of parallelle poorten (zie ook par. 3.1 en 3.3).
- Een dubbele USB-poort (zie par. 3.7) en soms een IEEE 1394 aansluiting (zie par. 3.8).
- 1 to 8 slots voor extensie-borden.

Van de ‘‘slots’’ bestaan verschillende gangbare typen:
- *PCI (Peripheral Component Interconnect)* slots, een zelf-configurerende bus van 33 Mhz of sneller.
- *(E)* ISA *(Enhanced Industry Standard Architecture)* slots. Soms hebben moederborden nog enkele (E)ISA-slots om oudere insteekkaarten uit XT, AT en 386 machines te kunnen blijven gebruiken.
- *PCMCIA (PC Memory Card International Association)* slots zie par. 4.3). Vooral gebruikt in kleine draagbare systemen (de zgn. *notebooks*) voor het insteken van een modem of een externe hard disk.

Processor

De huidige Pentium processor kent als voorgangers binnen de Intel x86 familie van *processoren*: de oorspronkelijke 8088/8086 (*XT*), 80286 (*AT*), 80386 (*386*), 80486 (*486*), 80586 (*Pentium*) en de P6 (*PentiumPro*). Voor de programmatuur bestonden de belangrijkste verschillen tussen XT, AT en 386 uit:

- verbreding van het datapad van 8, via 16 naar 32-bits;
- toename van het aantal adreslijnen en van het adresbereik (1 M, via 16 M naar 4 G);
- de introductie van protected mode vanaf de 286.

Een aantal van deze architectuur beperkingen hebben hun invloed gehad op de huidige programmatuur, vooral waar het de geheugentoegang betreft.

De huidige Intel Pentiums en Celerons, evenals de AMD en Cyrix processoren verschillen hoofdzakelijk in snelheid. Er zijn geen

verschillen in hun extern waarneembare architectuur: alle programmatuur is goed uitwisselbaar. De overschakeling naar 64-bits brede datapaden in de nabije toekomst kan mogelijk weer een golf van incompatibiliteiten tot gevolg hebben.
Intern zijn de verschillen wel groot onder andere door gebruik van *pipelining*, *cache* en *RISC* technologie.

Een *pipeline* is een interne voorziening waarbij gelijktijdig aan verschillende opeenvolgende machine-instructies gewerkt kan worden, om wachttijden op trage bussen of geheugens te overbruggen.

Een *cache* is een zeer snel toegankelijk werkgeheugen voor de processor, waarin de processor kopieën van gedeelten van het normale RAM-geheugen bewaart om zodoende sneller te kunnen werken.

RISC (Reduced Instruction Set Computers) processoren werken met een veel kleiner repertoire van machine-instructies, waardoor ze hun instructies aanmerkelijk sneller kunnen uitvoeren dan een gewone (of *CISC-Complex Instruction Set Computer*) processor. Het intern gebruik van RISC in de Pentium blijft echter voor de gebruiker verborgen doordat de decodering van de CISC-instructies in RISC-instructies ook in de chip zelf is ondergebracht.

5.3 PC-componenten

Grafische kaarten/video-controllers
Voor PC bestaan vele typen video-controllers en monitoren (zie tabel 4.2 en voor interfaces par. 3.4):
- MDA : Monochrome Display Adapter.
- MGA : Monochrome Graphics Adapter (ook wel *Hercules kaart*).
- CGA : Color Graphics Adapter.
- EGA : Enhanced Graphics Adapter.
- VGA : Video Graphics Array.
- SVGA : Super Video Graphics Array (ook wel *VESA* genoemd naar de voorschrijvende instantie, de *Video Electronics Standard Association*).
- XGA : eXtended Graphics Array

Tabel 5.2 PC video-controllers

		grafisch pixels	gelijktijdige kleuren	Max. kleuren in pallet	karakter matrix	frequentie	
						lijnen [kHz]	beelden [Hz]
MDA	1981	720 × 348	1	1	9 × 14	18,2	49,4
CGA	1981	320 × 200	16	16	8 × 8	15,7	60
		640 × 200	2				
MGA	1982	720 × 350	1	1	9 × 14	18,2	49,4
EGA	1984	320 × 350	16	64	9 × 14	21,8	60
		640 × 350	16				
		720 × 350	4				
VGA	1987	320 × 200	256	262.144	9 × 16	31,5	70
		640 × 400	16			31,5	70
		640 × 480	16			31,5	60
		720 × 400	16			31,5	70
8514A	1990	1024 × 768	16	256	9 × 16	35,5	2 × 43,5
XGA	1990	640 × 480	65536		9 × 16	35,5	2 × 43,5
		1024 × 768	256		9 × 16	35,5	2 × 43,5
		1056 × 400	16		8 × 16		
VESA		640 × 480		16M	9 × 16	37,8	75
SVGA	1991	800 × 600		16M		46,9	75
		1024 × 768				60	75
		1280 × 1024				80	75
		1600 × 1200				99	75
(Apple) MacIntosh		1152 × 870	16M	16M	9 × 16		

In tabel 5.2 zijn alleen de meest gebruikte (grafische en tekst) formaten opgenomen. Er zijn meer formaten mogelijk. De SVGA en XGA zijn de meest gebruikte. Alleen in meetopstellingen en fabrieks- en proces- besturingssystemen komt men de oudere formaten nog tegen. De (vooral oudere) formaten met een andere beeldverhouding dan 4:3 geven in de praktijk vaak problemen. Naast optredende beeldvertekening kan lang niet alle software goed met deze formaten overweg.

Kleuren

Bij alle formaten tot en met EGA werd de kleurinformatie doorgegeven via digitale signalen op de interface, vanaf VGA gebeurt dit analoog.

Bij XGA en SVGA zijn in principe kleurpaletten met 16 miljoen gradaties mogelijk. Hoeveel er op het scherm getoond kunnen worden is afhankelijk van de gebruikte videokaart en vooral hoeveel geheugen deze bezit (512 K, 1 M, 2 M, 4 M of 8 M).

- De gearceerde frequenties geven de door de standaard vastgelegde waarde aan. Daarnaast spreekt VGA de voorkeur uit voor 70 Hz en beveelt VESA voor SVGA minstens 75 Hz aan.
- Alle formaten behalve MDA en MGA, kennen naast de 80-koloms tekstmode ook nog een 40-koloms tekstmode.

Milieu-eisen

Monitoren met hogere resolutie en grotere beeldmaten werken intern met hogere frequenties en naversnelspanningen, waardoor in principe meer stoorstraling afgegeven wordt. Echter door de milieu-eisen geven de moderne monitoren vaak minder stoorstraling af. De Zweedse MPR-II norm en de nog strengere Europese TCO1991 norm reglementeren de elektrostatische spanning, het elektrisch veld en het magnetisch stoorveld (zie tabel 5.3).

Voor het energieverbruik zijn drie normen in omloop: het Amerikaanse EPA Energy Star Power Management programma, de NUTEK en de TCO 1992 standaard. Van de laatste twee is de TCO 1992 het stringenste; praktisch voldoet iedere TCO 1992 monitor automatisch aan de NUTEK eisen. Ze leggen vooral het verbruik vast voor de stand-by stand van het beeldscherm.

Tabel 5.3 Beeldschermnormen

	MPR-II	TCO 1991
Elektrostatische spanning	$<$ 500 V	$<$ 500 V
Wisselend elektrisch veld		
Band I : 5 Hz - 2 kHz	$\leq$ 25 V/m	$\leq$ 10 V/m
Band II: 2 kHz - 400 kHz	$\leq$ 2,5 V/m	$\leq$ 1,0 V/m
Magnetisch veld		
Band I : 5 Hz - 2 kHz	$\leq$ 250 nT (RMS)	$\leq$ 200 nT
Band II: 2 kHz - 400 kHz	$\leq$ 25 nT (RMS)	$\leq$ 25 nT

Disks

De meeste PC's hebben een ingebouwde *hard disk drive* hoofdzakelijk van het *(E)IDE* (Enhanced Integrated Device Electronics) of *SCSI*-type (Small Computer System Interface) (zie par. 5.4). Beide standaards kennen elk verschillende snelheidsklassen. De (E)IDE, of ATA (AT Attachment) zoals deze steeds vaker genoemd wordt in Amerikaanse teksten, ondersteunt max. 4 devices per controller, die allen direct met de controller verbonden moeten zijn via een kabel van max. 45 cm. Bij SCSI kunnen dat er maximaal zeven (31 bij wide-SCSI) zijn, is kettingschakeling (doorlussen) toegepast, mag de totale lengte 6 m bedragen.

De snelheid van een harde schijf wordt bepaald door drie parameters:

1. de seek time (de tijd nodig om de kop boven het juiste spoor te plaatsen,
2. de rotatie snelheid van de schijf (3600, 5400, 7200 toeren/min), die bepalend is hoe snel een compleet spoor gelezen kan worden en
3. de diskcontroller modus, die bepalend is voor de overdrachtssnelheid via de IDE-bus tussen schijf en computer;zie tabel 5.4.

Alle nieuwe hardware werkt met één van de UDMA snelheden. De PIO modi komen alleen nog voor in oudere apparatuur.

Tabel 5.4 Snelheid van verschillende modi

Modus	Snelheid Mbytes/s
PIO Mode 0	3,3
PIO Mode 1	5,2
PIO Mode 2	8,3
PIO Mode 3	11,1
PIO Mode 4	16,7
Ultra DMA (UDMA)	33, 66, 100 of 133

Diskettes

Voor het uitwisselen van gegevens zijn diskettestations of (*floppy*) *disk drives* aangebracht. Formaten zijn $5\frac{1}{4}$ inch (kartonnen hoes) en $3\frac{1}{2}$ inch (hard kunststof hoes). Zie tabel 5.5. In beperkte mate komt daarnaast een 2,88 MB floppy formaat voor

Tabel 5.5 Gegegevens verschillende soorten diskette (stations)

aan duiding	for-maat	diskettestation		aantal tracks	sectors/ track	aantal kanten	capaciteit [bytes]
		leest ook	schrijft ook				
360 kB	5¼″	–	–	40	9	2	362496
1,2 MB	5¼″	5¼″/360 kB	–[1)]	80	15	2	1213952
720 kB	3½″	–	–	80	9	2	730112
1,44 MB	3½″	3½″/720 kB	3½″/720 kB	80	18	2	1457664

[1)] 360 kB diskettes die beschreven zijn door een 1,2 MB drive zijn niet meer leesbaar op een 360 kB drive.

in IBM-georiënteerde omgevingen. In toenemende mate wordt voor uitwisseling de floppy verdrongen door de CD-ROM, en voor het maken van back-ups door tapestreamers en CD writers.

CD formaten

De CD-ROM biedt opslag capaciteit van 650–700 Mb. De DVD (Digital Versatile Disk) heeft een veelvoud van opslagcapaciteit (van 4,7 tot 17 GB) en is de CD-ROM aan het vervangen. Voor CD-ROM drives zijn (E) IDE en SCSI eveneens de hoofdtypen (zie par. 5.4). Drives onderscheiden zich vooral in hun transfersnelheden, die worden uitgedrukt in veelvouden van 150 kb/s. Voor het weergeven van beelden of geluiden (zgn. *multimedia toepassingen*) zonder onderbrekingen is vaak minimaal een 4-speed drive nodig. Voor het installeren van software is de snelheid niet kritisch. Naast vooraf beschreven CD-ROM zijn er de CDR (CD-ROM Recordable) en CDRW (CD-ROM ReWritable), die éénmalig resp. verschillende malen (tot ca. 1000 keer) kunnen beschreven worden. De CDR's bestaan in capaciteiten van 650 MBdata opslag (74 min. audio opslag) en 700 MB (80 min.).

Tape-formaten

Praktisch alle tapestreamers beschrijven tapes in het QIC/Travan formaat. De opslagcapaciteit wordt vaak door twee getallen weergegeven, nl. bij ongecomprimeerde opslag en een bij gecomprimeerde

opslag. Bij de gecomprimeerde opslag gaan de fabrikanten uit van een 2:1 compressieverhou-ding, wat in de praktijk lang niet bij alle soorten data gehaald kan worden.
Uitwisselbaarheid van tapes wordt hoofdzakelijk bepaald door het aantal sporen en de dichtheid van magnestische fluxwisselingen (de dichtheid waarmee data geschreven kan worden). De tape zelf is meestal van de QIC-breedte (Quarter Inch Cartridge tape). Voor het beschrijven wordt momenteel vaak de Travan TR-4 standaard gevolgd (zie tabel 5.6).

Tabel 5.6 Travan tape formaat standaarden

Travan Type	Sporen	Magnetische Flux wisselingen per inch	Max. opslag op standaard 750 feet tape
TR-1	36	14.700	400 MB
TR-2	50	22.125	800 MB
TR-3	50	44.250	1,6 GB
TR-4 of NS8	72	50.800	4 GB
TR-5 of NS20	108	50.800	10 GB

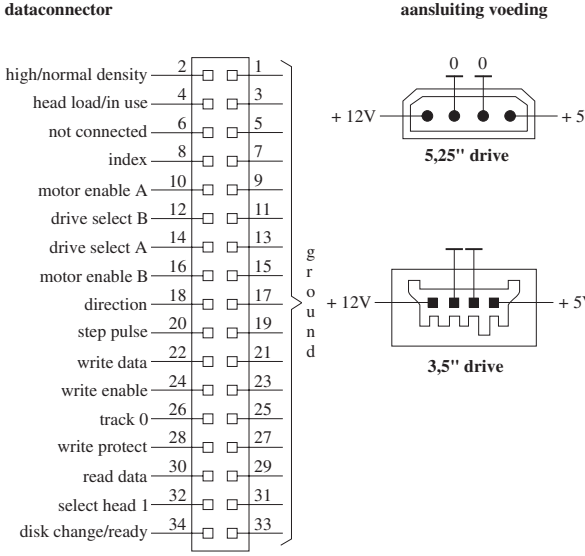
Notebook computer standaarden

Speciaal voor portable computers zijn twee aparte standaards ontstaan:

- de *PC Card* standaard voor insteekkaarten kent nog drie typen insteekkaarten (Type I t/m III) allen met dezelfde 68-polige connector, allen verschillend in hoogte (resp. 3,3 mm, 5 mm en 10,5 mm). De PC Card wordt ook nog aangeduid met de oudere naam, de *PCMCIA 2.0* (Amerikaans) of *JEIDA 4.1* (Japans) die overigens identiek zijn. De 16 mm hoge type IV kaart is immiddels uit de standaard verwijderd. Voor de types I en II heeft men ook een "extended" model toegevoegd dat 50 mm langer is en bedoeld is voor functies die buiten de notebook moeten uitsteken.
- de *IrDA* (Infrared Data Association; www.irda.org) infrarood koppeling met printers, docking-stations, draadloze muizen en toetsenborden.
  De oudere *IrDA* 1.0 voorziet in een seriële infrarood transmissie van 9600–115200 bps over een een afstanden van 1 meter met een openingshoek van 30° en is ontworpen om als toevoeging in een bestaande RS232 verbinding geplaatst te kunnen worden. De

huidige IrDA 2.0 biedt snelheden van 1,5 en 4 Mbps en evenals grotere afstanden, echter niet meer als toevoeging in een bestaande RS232.

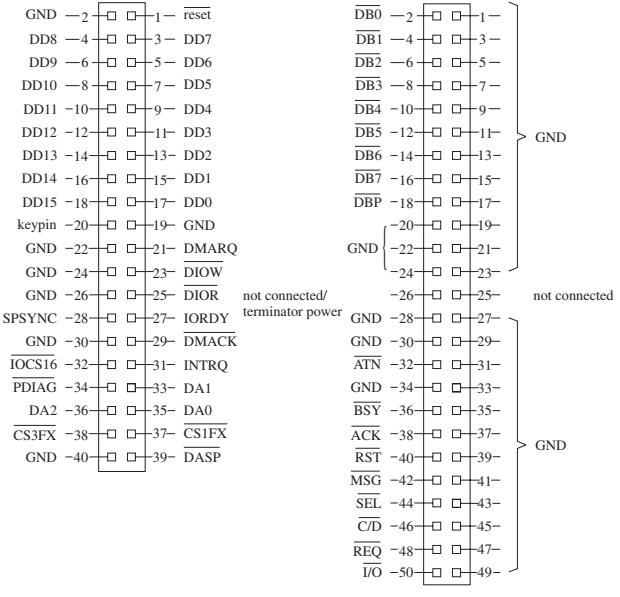
5.4 Disk drive connectors



Figuur 5.5 Aansluitingen diskettestations (buitenaanzicht female-plug)

Tabel 5.6 Kleurcodes voedingsdraden

kleur	omschrijving
oranje	"Voeding goed" signaal
rood	+5 Volt
geel	+12 Volt
blauw	−12 Volt
zwart	0 Volt
wit	−5 Vot (weinig gebruikt)



Figuur 5.6 Aansluitingen (E) IDE-en SCSI-disk (single-ended mode) connector (buitenaanzicht female)

Literatuur

- Thomas J. Glover en Millie M. Young
  TechRef
  3e druk 1999, Sequoia Publishing Inc, Littleton Co, USA,
  ISBN 1-885071-15-9
- Osborne, A.
  An introduction to microcomputers (Volume 1, basic concepts)
  Paris, Sybex (uitgave wordt regelmatig bijgewerkt).
  Distributeur: Kluwer, Deventer.
- *ICT-Zakboekje*
  Doetinchem, Reed Business Information
- Winn L. Rosch
  Het Personal Computer Hardware boek
  Deventer, Kluwer.
- Zuiderveen, E.A.
  Digitale technieken
  deel 1: Theoretische en praktische grondslagen
  deel 2: Het ontwerpen van logische schakelingen
  deel 3: Microprocessoren
  Deventer, Kluwer technische boeken

Regel- en besturingstechniek B2

1 Systeemdynamica en regeltheorie
- 1.1 Systeemdynamica
- 1.2 Elementaire dynamische systemen
- 1.3 Regelkring met proportionele, integrerende en differentiërende regelacties
- 1.4 Stabiliteit van geregelde systemen
- 1.5 Effecten van regelen
- 1.6 Volgsystemen (servosystemen)

2 Procesregeltechniek
- 2.1 Regelmethoden
- 2.2 Begrippen
- 2.3 Regelaars
- 2.4 Dynamisch componenten in een regelkring
- 2.5 Klepkarakteristieken
- 2.6 Regelaarinstellingen
- 2.7 Meet- en regelbaarheidsfactoren
- 2.8 Voornaamste symbolen en codes in regeltechnische schema's

3 Digitale regeltechniek
- 3.1 Monstername
- 3.2 Amplitude-discretisatie
- 3.3 Nulde-orde houdcircuit
- 3.4 Exponentieel filter (Exponential smoothing filter)
- 3.5 Discrete PID-regelaars
- 3.6 z-transformatie
- 3.7 Stabiliteit

4 Besturingstechniek
4.1 Algemeen
4.2 Symbolen
4.3 Schema's
4.4 Sequentiële schakelingen
4.5 Combinatorische schakelingen

5 PLC-techniek
5.1 Algemeen
5.2 Programmeren

6 Implementatie van besturingssystemen
6.1 Geïntegreerde productie-automatisering: CIM en CIP
6.2 Regelsysteem-instrumentatie
6.3 Netwerken
6.4 Open veldbussen
6.5 Communicatie in gedistribueerde systemen gebaseerd op Ethernet

1 Systeemdynamica en regeltheorie

1.1 Systeemdynamica

Dynamische systemen (paragraaf 1.2) vertonen:
- *Statisch gedrag:* invloed van een blijvende verandering van de ingang op de uitgang van het proces.
- *Dynamisch gedrag:* verandering van de uitgang in de tijd bij veranderingen op de ingang.
  M.b.v. regeling kan dit gedrag beïnvloed worden (par. 1.5)

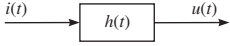
Onderscheiden worden:
- *Tijdsonafhankelijke* en *tijdsafhankelijke* systemen het (proces verandert zelf in de loop van de tijd, bijvoorbeeld door vervuilingen).
- *Single-input/single-output (SISO)* en *meer-input/meer-output (MIMO)* systemen.
- Lineaire en niet-lineaire systemen.

Voor *lineaire systemen* geldt het *superpositie-beginsel:* heeft een ingangssignaal $i_1(t)$ een uitgangssignaal $u_1(t)$ tot gevolg en evenzo $i_2(t)$ een $u_2(t)$, dan heeft een ingangssignaal $a_1 i_1(t) + a_2 i_2(t)$ een uitgangssignaal $a_1 u_1(t) + a_2 u_2(t)$ tot gevolg.

De behandeling wordt hier beperkt tot *tijdsonafhankelijke, lineaire, single-input/single-output systemen*, waarbij de variabelen zijn gereduceerd, d.w.z. dat alleen variaties rond een werkpunt worden beschouwd.

Stel $Y = F(X)$, dan geldt:
- variaties rond werkpunt: $Y + y = F(X + x)$
- lineariseren: $$Y + y = F(X) + \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}X}x$$
- reduceren: $$y = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}X}x$$

Systeemvergelijking



Het verband tussen ingang en uitgang van een systeem is te beschrijven door een lineaire *differentiaalvergelijking* met constante coëfficiënten (eventueel eerst lineariseren en reduceren):

$$a_n \frac{\mathrm{d}^n u}{\mathrm{d}t^n} + \ldots a_1 \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} + a_0 u = b_m \frac{\mathrm{d}^m i}{\mathrm{d}t^m} + \ldots b_1 \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + b_0 i$$

Voor normale fysische systemen is $n > m$.
De orde van het systeem is n.

Overdrachtsfunctie

Laplace-transformatie (zie ook hoofdstuk A2 *Wiskunde*, par. 7.3) van de differentiaalvergelijking (alle begincondities nul):

$$(a_n s^n + \ldots + a_1 s + a_0) U(s) = (b_m s^m + \ldots + b_1 s + b_0) I(s)$$

Overdrachtsfunctie (*transfer-function*):

$$H(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{b_m s^m + \ldots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \ldots + a_1 s + a_0}$$

$H(s)$ is de *Laplace-getransformeerde* van impulsresponsie $h(t)$:

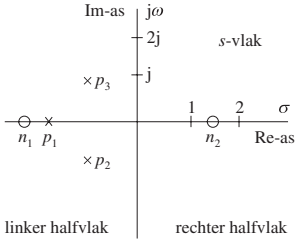
$$H(s) = \mathscr{L}\{h(t)\}$$

Karakteristieke vergelijking van het systeem:

$$a_n s^n + \ldots + a_1 s + a_0 = 0$$

Nulpunten: waarden van s waarvoor de *teller* nul is.
Polen: waarden van s waarvoor de *noemer* nul is.

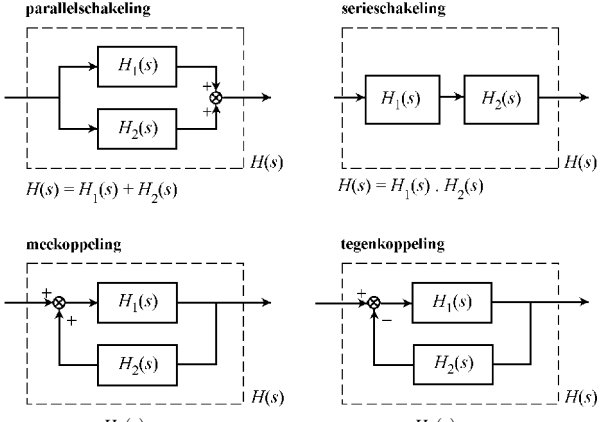
$$H(s) = \frac{b_m (s - n_m)(s - n_{m-1}) \ldots (s - n_1)}{a_n (s - p_n)(s - p_{n-1}) \ldots (s - p_1)}$$



Figuur 1.1 Polen (×) en nulpunten (○)

Polen en nulpunten die *reëel* (p_1) of *toegevoegd complex* (bijv. p_2 en p_3) kunnen zijn, worden in het complexe *s*-vlak aangegeven met '×', resp. '○' (zie ook hoofdstuk A2 *Wiskunde*, par. 2.6). De polen en nulpunten karakteriseren het autonome systeemgedrag volledig.

Blokschema's van overdrachtsfuncties



$$H(s) = \frac{H_1(s)}{1 - H_1(s)H_2(s)} \qquad H^{\circ}(s) = +H_1(s)H_2(s)$$

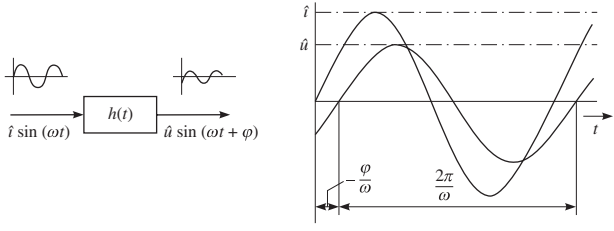
$$H(s) = \frac{H_1(s)}{1 + H_1(s)H_2(s)} \qquad H^{\circ}(s) = -H_1(s)H_2(s)$$

Algemeen in enkelvoudige kring: gesloten $= \dfrac{\text{rechtuit overdracht}}{\text{1-kringoverdracht}}$

Figuur 1.2 Blokschema's van overdrachtsfuncties

Frequentieresponsies

Substitutie van $j\omega$ voor s in de overdrachtsfunctie geeft de *sinusresponsies* van het systeem.



Figuur 1.3 Sinusresponsie

Amplitudeverhouding: $|H(j\omega)| = \sqrt{[\mathrm{Re}H(j\omega)]^2 + [\mathrm{Im}H(j\omega)]^2}$

Faseverschuiving: $\arg H(j\omega) = \arctan\dfrac{\mathrm{Im}\ H(j\omega)}{\mathrm{Re}\ H(j\omega)}$

Voorbeeld (zie figuur 1.2):

$$H(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{K}{1+s\tau}, \quad \text{dan: } \frac{\hat{u}}{\hat{i}} = \frac{K}{\sqrt{1+\omega^2\tau^2}}$$

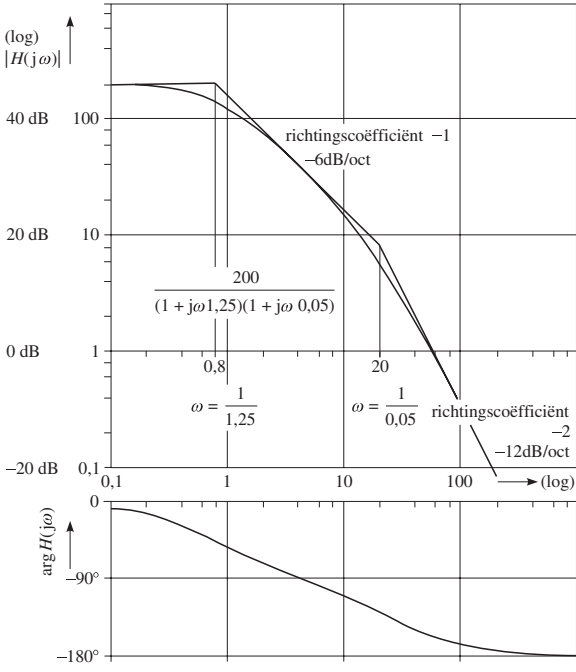
$$\varphi = -\arctan(\omega\tau)$$

Bodediagram

Het *Bodediagram* geeft grafisch het frequentiegedrag van $H(j\omega)$ weer en bestaat uit twee grafieken (zie figuur 1.3):

- *amplitudekarakteristiek* $|H(j\omega)|$ logaritmisch verticaal versus ω logaritmisch horizontaal;
- *fasekarakteristiek* $\arg H(j\omega)$ lineair verticaal versus ω logaritmisch horizontaal.

Amplitudeverhouding in decibel (dB): $20 \log |H(j\omega)|$
Helling van de amplitudekarakteristiek in dB/octaaf.



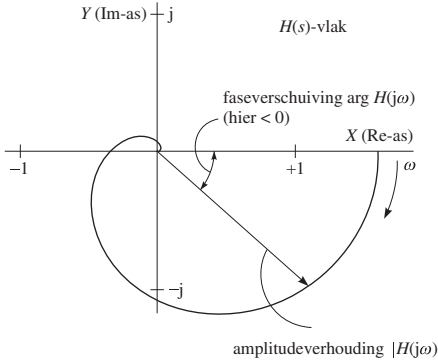
Figuur 1.4 Bodediagram: amplitude- en fasekarakteristiek

Voorbeeld: −6 dB/octaaf: het systeem verzwakt de amplitude van een sinus bij verdubbelen van de frequentie (octaaf) met een factor 2 (helling met richtingscoëfficiënt – 1).
−6 dB/oct = −20 dB/dec (decade: vertienvoudiging van de frequentie)

Vaak worden alleen de asymptoten getekend. Iedere pool (nulpunt) geeft een bijdrage van $-1(+1)$ aan de richtingscoëfficiënten van de asymptoot. De uiteindelijke fasebijdrage is -90° (resp. 90°) voor iedere pool in het linker (resp. rechter) halfvlak en ieder nulpunt in het rechter (resp. linker) halfvlak.

Polair diagram

De *polaire figuur* (*Nyquist-diagram* geeft grafisch het gedrag weer van $H(j\omega)$ in het $H(s)$-vlak (zie figuur 1.5):



Figuur 1.5 Polaire figuur

- in $x - y$ coördinaten:
  Re $H(j\omega)$ langs de X-as, versus Im $H(j\omega)$ langs de Y-as;
- in poolcoördinaten:
  $|H(j\omega)|$, versus arg $H(j\omega)$.

Minimum fasesystemen

Minimum fase-systemen: bij een gegeven amplitudekarakteristiek is de fasedraaiing over het hele frequentiegebied zo minimaal mogelijk.

Bij *niet-minimum fasesystemen* is de fasedraaiing groter; het systeem heeft nulpunten in het rechter halfvlak of bevat een looptijd. Het proces is niet volledig compenseerbaar. Karakteristiek gedrag van een dergelijk systeem: bijv. inverse tijdsresponsie of looptijd (zie par. 1.2, pag. B2/9).

1.2 Elementaire dynamische systemen

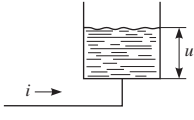
Orde van een systeem

De *orde* van een systeem (n in de differentiaalvergelijking van par. 1.1, pag. B2/4) is in het algemeen gelijk aan het aantal plaatsen waar verandering in opslag van energie of materie kan plaatsvinden, die uitgewisseld kan worden met de opslag op andere plaatsen.
Voorbeeld: een massa-veer systeem is een tweede-orde systeem, uitwisselbare energieopslag tussen veer en massa (zie pag. B2/12).

Integrator

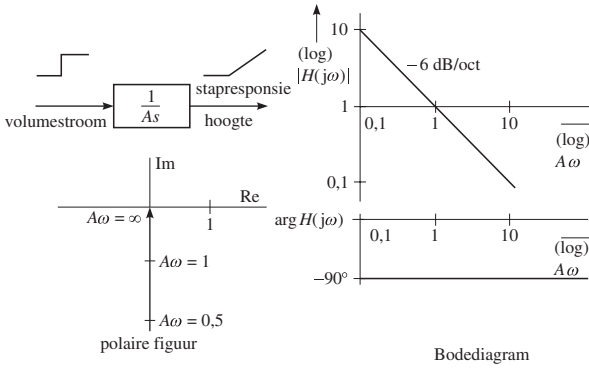
Vat waar vloeistof zowel kan instromen ($i(t)$ positief), als uitstromen ($i(t)$ negatief):

$$u(t) = \frac{1}{A}\int_{-\infty}^{t} i(t')\mathrm{d}t' \qquad H(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{1}{As}$$



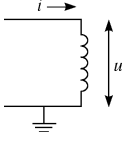
i = volumestroom [m^3/s]
u = hoogte [m]
A = oppervlakte [m^2]

Figuur 1.6 Vat als integrator



Figuur 1.7 Integrator

Differentiator

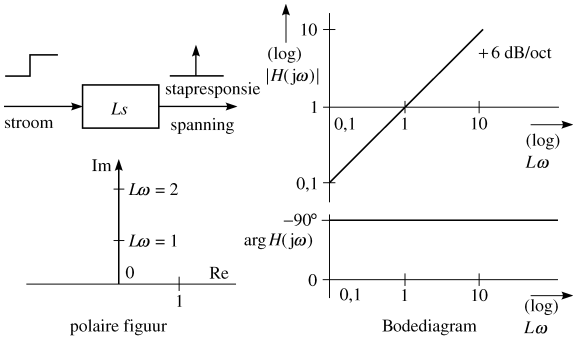


i = stroom [Cs^{-1}]
u = spanning [V]
L = zelfinductie [Vs^2C^{-1}]

Figuur 1.8 Spoel als differentiator

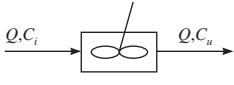
Voor de spanning u geldt:

$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \qquad H(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = Ls$$



Figuur 1.9 Differentiator

Eerste-orde systeem



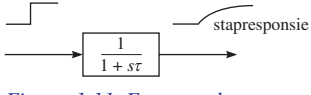
Figuur 1.10 Menger

Q = volumestroom [m^3/s]
C_i = concentratie aan de ingang
C_u = concentratie in het vat en aan de uitgang
M = inhoud vat [m^3]

Goed geroerde menger:

$$\tau\frac{dC_u}{dt} + C_u = C_i \quad \text{waarin: } \tau = \frac{M}{Q} (= \text{gemiddelde verblijftijd})$$

Zie verder figuren 1.21, 1.22 en 1.23, pag. B2/17 e.v. (voor $n = 1$).



$$H(s) = \frac{C_u(s)}{C_i(s)} = \frac{1}{1 + s\tau}$$

Figuur 1.11 Eerste-orde systeem

Algemeen geldt: $H(s) = \dfrac{K}{1 + s\tau}$

Stapresponsie: $u(t) = K(1 - \mathrm{e}^{-t/\tau})$

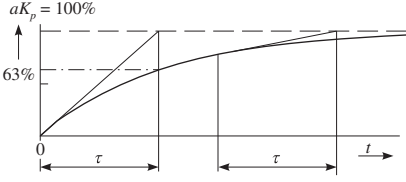
Responsie op stap ter grootte van a op $K_p/(1 + s\tau)$.
Bepaling tijdconstante:

- Trekken van raaklijn vanuit willekeurig punt.
- Metingen op drie equidistante tijdstippen;

  $f(t - \Delta t)$, $f(t)$, $f(t + \Delta t)$:

$$\tau = \Delta t \Big/ \ln \frac{f(t) - f(t - \Delta t)}{f(t + \Delta t) - f(t)}$$

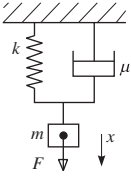
- $63\% = (1 - \mathrm{e}^{-1})$ methode (figuur 1.12)



$\frac{t}{\tau}$	responsie
0	0 %
1	63,2%
2	86,5%
3	95,0%
4	98,2%
5	99,3%

Figuur 1.12 Eerste-orde stapresponsie

Tweede-orde systeem



k = veerstijfheid [N/m]
μ = coëfficiënt van visceuze wrijving [N · s/m]
m = massa [kg]
x = uitwijking [m]
F = kracht [N]

Figuur 1.13 Massa-veer-demper systeem

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = F - \mu\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - kx \qquad \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \text{snelheid } [\mathrm{Ms}^{-1}]$$

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} = \text{versnelling } [\mathrm{Ms}^{-2}]$$

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{u}{k}s + 1} = \frac{K_p}{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta\frac{s}{\omega_n} + 1}$$

waarin:

$K_p = \frac{1}{k}$ = versterkingsfactor [m N^{-1}]

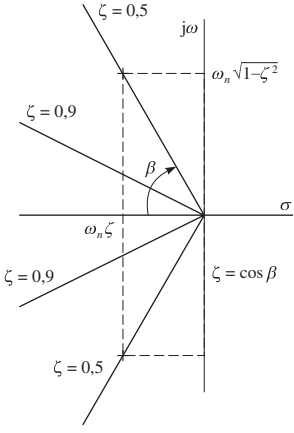
$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ = natuurlijke of ongedempte eigen frequentie [s^{-1}]

$\zeta = \frac{\mu}{2\sqrt{mk}}$ = dempingsfactor of relatieve demping [−]

Voor $\zeta \geqslant 1$ is het systeem te splitsen in twee eerste-orde systemen:

$$H(s) = \frac{K_p}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)}$$

waarin: $\tau_1 = \frac{1}{\omega_n}(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})$; $\zeta_2 = \frac{1}{\omega_n}(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})$



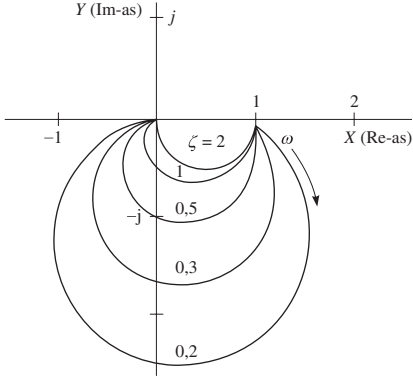
$0 \leqslant \zeta < 1$: *onderkritisch gedempt*
De polen zijn toegevoegd complex en liggen voor een zelfde demping op dezelfde dempingslijn (figuur 1.15).

$\zeta = 1$: *kritisch gedempt*
De twee reële polen vallen samen.

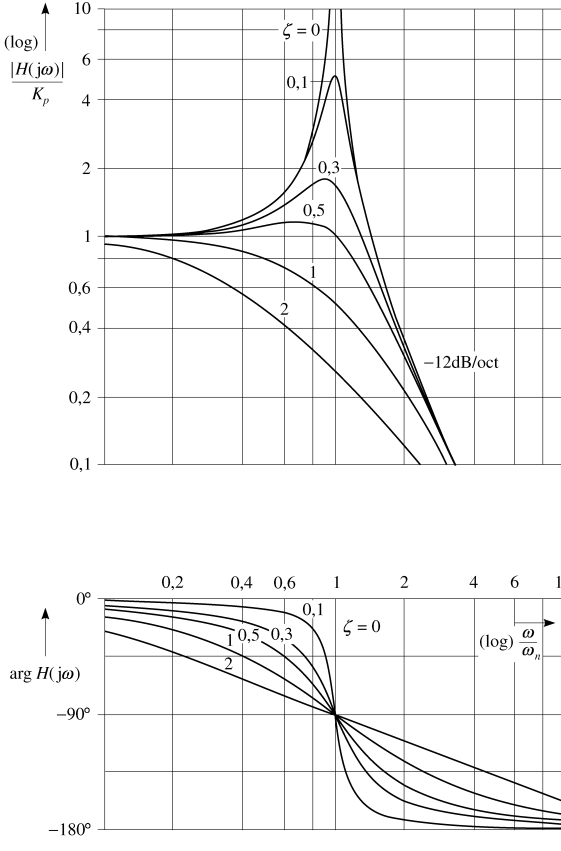
$\zeta > 1$: *overkritisch gedempt*
Twee verschillende reële polen.

$\zeta < 0$: systeem instabiel.

Figuur 1.14 Toegevoegd complexe polen (zie ook pag. B2/5)



Figuur 1.15 Polaire figuur tweede-orde systemen



Figuur 1.16 Bodediagram tweede-orde systeem

Stapresponsies voor stap $\widehat{F}$:

$\zeta < 1$: onderkritisch gedempt

$$x(t) = K_p\widehat{F}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}}\mathrm{e}^{-\zeta\omega_n t}\cos(\omega_d t - \varphi)\right)$$

$$\varphi = \arcsin(\zeta)$$

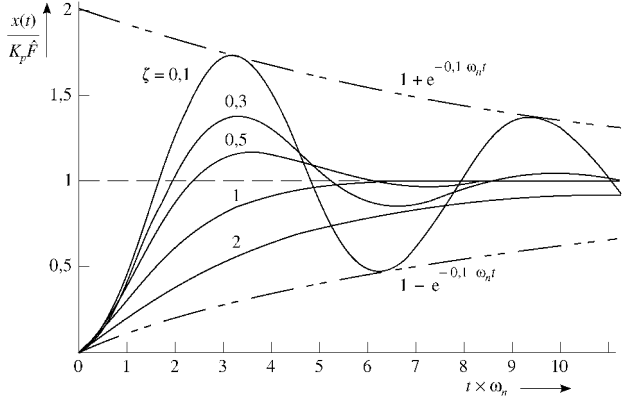
$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^2}\,\omega_n = \text{gedempte eigenfrequentie}$$

$\zeta = 1$: kritisch gedempt

$$x(t) = K_p\widehat{F}(1 - (1+\omega_n t)\mathrm{e}^{-\omega_n t})$$

$\zeta > 1$: overkritisch gedempt

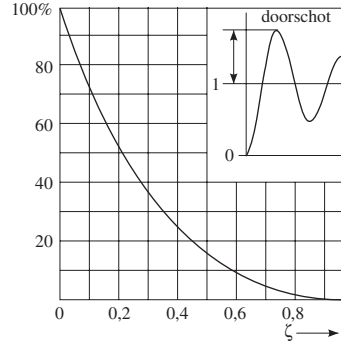
$$x(t) = K_p\widehat{F}\left(1 - \frac{\tau_1}{\tau_1-\tau_2}\mathrm{e}^{-t/\tau_1} + \frac{\tau_2}{\tau_1-\tau_2}\mathrm{e}^{-t/\tau_2}\right)$$



Figuur 1.17 Genormeerde stapresponsies voor een tweede-orde systeem. De toppen van de gedempte slingering liggen op de lijnen $1 \pm \exp(-\zeta\omega_n t)$

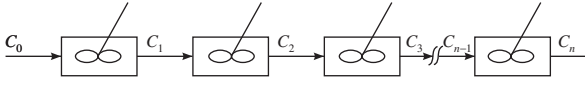
Doorschot (*overshoot*): relatieve hoogte van de eerste top boven de evenwichtswaarde. De doorschot is een functie van de demping ζ:

$$\exp\left(\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \times 100\%$$



Figuur 1.18 Percentage doorschot versus relatieve dempingsfactor ζ

Hogere-orde systemen zonder terugkoppeling

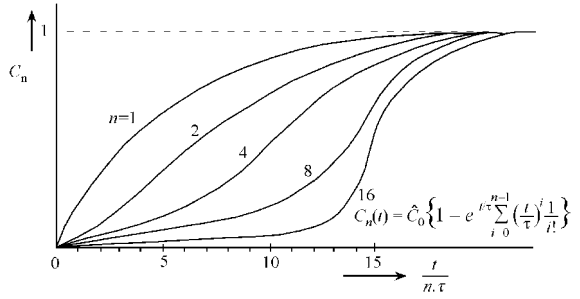


Figuur 1.18 n identieke mengers achter elkaar

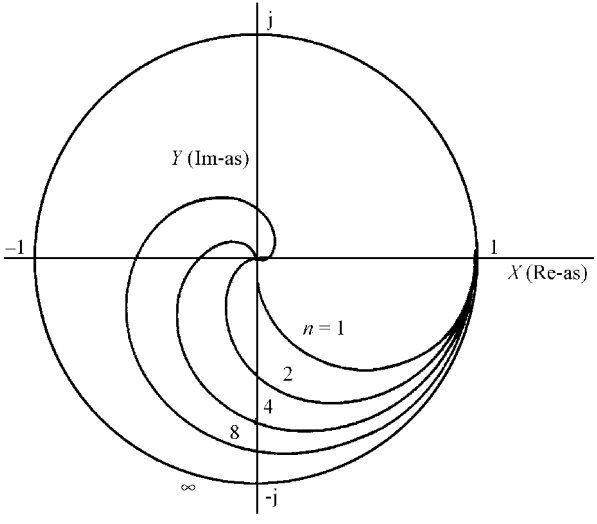
Voor de drijvende kracht van een enkele capaciteit geldt:

$$C_i - C_{i+1} = s\tau \cdot C_{i+1}$$

$$H(s) = \frac{C_n(s)}{C_0(s)} = \frac{C_1(s)}{C_0(s)}\frac{C_2(s)}{C_1(s)} \times \ldots \times \frac{C_n(s)}{C_{n-1}(s)} = \frac{1}{(1+s\tau)^n}$$

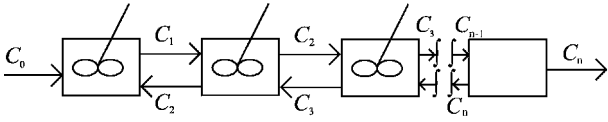


Figuur 1.19 Stapresponsie n-orde systeem



Figuur 1.20 Polaire figuur

Hogere-orde systemen met terugkoppeling



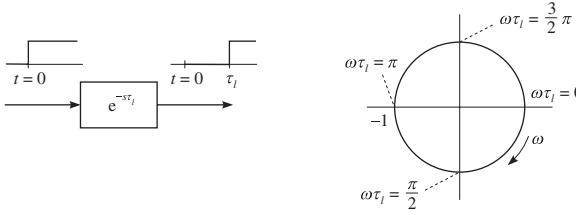
Voor de drijvende kracht van een enkele capaciteit geldt:

$$(C_i - C_{i+1}) - (C_{i+1} - C_{i+2}) = s\tau\ C_{i+1}$$

Teruggekoppelde systemen hebben altijd een grotere demping dan systemen zonder terugkoppeling.

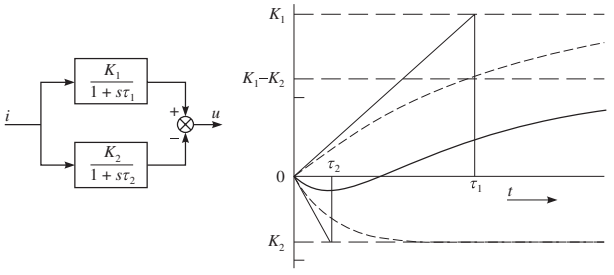
voor $n \to \infty$ $H(s) = \dfrac{1}{(Ts+1)}$ met $T \approx \tau n^2$

Looptijd (*dode tijd; dead time, delay time*)
Een *looptijd* is een pure tijdsvertraging en heeft geen effect op de amplitude van het signaal, wel op de fase. Voorbeelden: transportband, transportleiding, verwerkingstijd van metingen. Een looptijdproces is onomkeerbaar.



Figuur 1.21 Looptijd (stapresponsie en polaire figuur)

Inverse responsie
Deze kan ontstaan bij parallelle tegengestelde subprocessen.
De stapresponsie gaat eerst de 'verkeerde' kant uit, omdat de start van de responsie ($t \to 0$ is $s \to \infty$) van teken verschilt met het statisch gedrag ($t \to \infty$ is $s \to 0$). Als voorbeeld dient een parallelschakeling van twee eerste-orde processen:

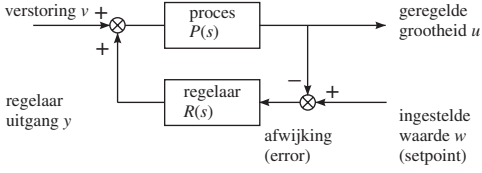


Figuur 1.22 Inverse responsie

$$\frac{U(s)}{I(S)} = \frac{(K_1 - K_2) - s(K_2\tau_1 - K_1\tau_2)}{(1 + s\tau_1)(1 + s\tau_2)}$$

invers als $K_1 > K_2$ en $K_2\tau_1 > K_1\tau_2$: Dit is een voorbeeld van een onomkeerbaar niet-minimum-fasesysteem en betreft regeltechnisch een moeilijke overdracht.

1.3 Regelkring met proportionele, integrerende en differentiërende regelacties



Regelgedrag

$$\frac{U(s)}{V(s)} = \frac{P(s)}{1 + P(s)R(s)}$$

Servogedrag

$$\frac{U(s)}{W(s)} = \frac{P(s)R(s)}{1 + P(s)R(s)}$$

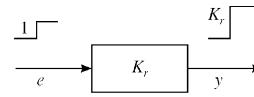
Figuur 1.23 Geregeld systeem

P-regelaar

$$y = K_r e$$

(K_r = versterkingsfactor)

$$R(s) = Ke(s)$$

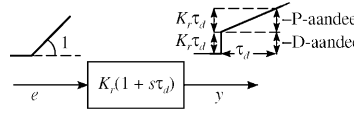


PD-regelaar

$$y = K_r\left(e + \tau_d \frac{de}{dt}\right)$$

(τ_d = differentiatietijd)

$$R(s) = K_r\,(1 + \tau_d s)\,e(s)$$

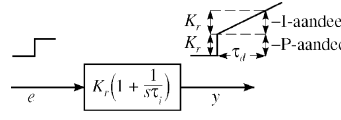


PI-regelaar

$$y = K_r\left(e + \frac{1}{\tau_i}\int e dt\right)$$

(τ_i = integratietijd)

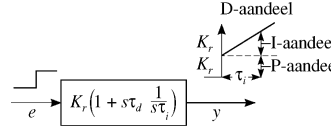
$$R(s) = K_r\left(1 + \frac{s}{\tau_i}\right)e(s)$$



PID-regelaar

$$y = K_r\left(e + \tau_d \frac{de}{dt} + \frac{1}{\tau_i}\int edt\right)$$

$$R(s) = K_{\mathrm{p}}\left(1 + \tau_{\mathrm{d}} s + \frac{s}{\tau_{\mathrm{i}}}\right)\varepsilon(s)$$



Vaak wordt een andere vorm toegepast (zie par. 2.2).

1.4 Stabiliteit van geregelde systemen

De meeste fysische systemen zijn stabiel. Een regelactie kan een stabiel systeem instabiel maken, omdat het systeem teruggekoppeld wordt. Als een signaal 180° in fase wordt verschoven en een versterking heeft van meer dan één, zal de negatieve terugkoppeling van de regelkring het signaal doen groeien.

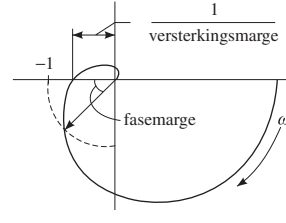
Een (geregeld) systeem is *stabiel* als het geen polen met positief reële delen heeft (alle polen in het linker halfvlak).
Nyquist-criterium: een teruggekoppeld systeem is stabiel als bij het doorlopen van de polaire figuur van de kringoverdrachtsfunctie H° vanaf $\omega = 0$ het punt $(-1{,}0)$ links blijft liggen.

Stabiliteitsmarge: 'afstand' van polaire figuur van H° tot het punt – 1, uitgedrukt in:
- *fasemarge*: $180^\circ - \arg(H^\circ)$ als $|H^\circ| = 1$
- *amplitudemarge*: $1/|H^\circ|$ als $\arg(H^\circ) = -180^\circ$

Omwille van de stabiliteit en demping (om te grote opslingeringen te voorkomen) kunnen regelaars zo worden ingesteld dat aan een bepaalde fasemarge en versterkingsmarge wordt voldaan:

Bij procesregelingen wordt vaak aangehouden:
- fasemarge 30–45°
- versterkingsmarge 2

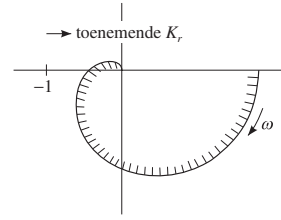
Bij servosystemen:
- fasemarge 45–60°
- versterkingsmarge 5



Figuur 1.24 Stabiliteitsmarge

Invloed P-actie

In plaats van $K_r P(\mathrm{j}\omega) = -1$ kan ook $P(\mathrm{j}\omega) = -1/K_r$ bekeken worden: bij toenemende K_r blijft de polaire figuur gelijk, het punt $(-1/K_r,0)$ verschuift naar de oorsprong.



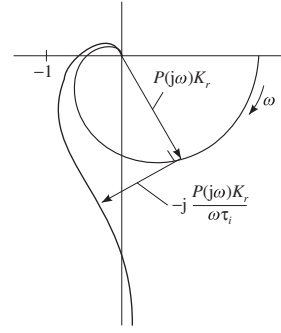
Invloed I-actie

$$P(\mathrm{j}\omega)K_r\left(1+\frac{1}{\mathrm{j}\omega\tau_i}\right) =$$

$$P(\mathrm{j}\omega)K_r - \mathrm{j}\frac{P(\mathrm{j}\omega)K_r}{\omega\tau_i}$$

I-actie verlaagt in het algemeen de stabiliteit; trekt de curve naar het punt $(-1,0)$.

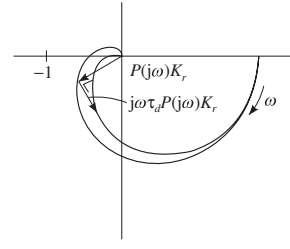
Bij lage ω gaat versterking naar ∞. Hierdoor verdwijnt de offset.



Invloed D-actie

$$P(\mathrm{j}\omega)K_r(1+\mathrm{j}\omega\tau_d) =$$
$$= P(\mathrm{j}\omega)K_r + j\omega\tau_d P(\mathrm{j}\omega)K_r$$

Matige D-actie verhoogt in het algemeen de stabiliteit en trekt de curve van het punt $(-1,0)$ vandaan.



1.5 *Effecten van regelen*

Offset

Bij een *P-regelaar* is een verschil (offset) tussen de gemeten waarde en de ingestelde waarde onvermijdelijk om de P-regelaar een uitgangswaarde te geven anders dan de nulpuntswaarde.
Een *I-regelaar* integreert net zolang door tot het verschil tussen meetwaarde en ingestelde waarde nul is, dus geen offset.

Snelheid

Meestal is een systeem in de geregelde situatie sneller. Voorbeeld (zie ook onder figuur 1.26, pag. B2/20):

$$P(s) = \frac{K_p}{1 + s\tau} \quad \text{en} \quad R(s) = K_r$$

Dan is:

$$\frac{U(s)}{V(s)} = \frac{\dfrac{K_p}{1 + s\tau}}{1 + \dfrac{K_r K_p}{1 + s\tau}} = \frac{K'_p}{1 + s\tau'} \quad \text{met} \quad K'_p = \frac{K_p}{1 + K_r K_p}$$

$$\tau' = \frac{\tau}{1 + K_r K_p}$$

De tijdsconstante is een factor $(1 + K_r K_p)$ kleiner (proces sneller). De invloed van verstoringen wordt gereduceerd met dezelfde factor.

Afwijkingsverhouding

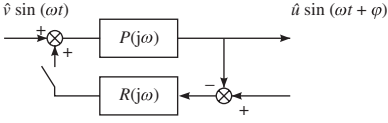
AV-diagram: maakt de effectiviteit van een regelaar zichtbaar voor sinusvormige signalen.

$$AV(\omega) = \frac{\text{amplitude van signaal met regeling}}{\text{amplitude van signaal zonder regeling}} =$$

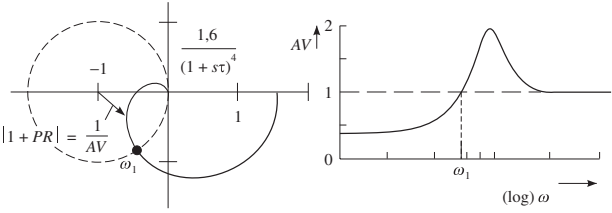
$$= \frac{1}{|1 + P(j\omega)R(j\omega)|}$$

Dit geldt wanneer een *sinusvormige verstoring* ergens in de kring wordt toegevoegd, en het effect daarvan op een andere wille-keurige

plaats in de kring wordt bekeken; het AV-diagram is onafhankelijk van deze plaats. De vorm van het AV-diagram is af te leiden uit de polaire figuur van de kringoverdrachtsfunctie.



Figuur 1.25 Sinusvormige verstoring



Figuur 1.26 Afwijkingsverhouding

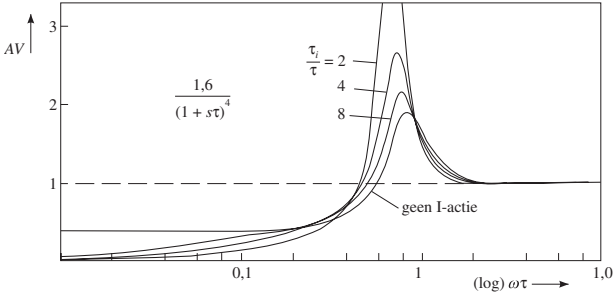
$AV < 1$: regeling is effectief; de invloed van sinusvormige verstoringen wordt verkleind.
$AV = 1$: regeling heeft geen effect.
$AV > 1$: regeling werkt nadelig; de invloed van sinusvormige verstoringen wordt vergroot.

Voor alle normale fysische systemen (P en R stabiel; en ook $\lim_{s \to \infty} |s| \cdot |P(s)R(s)| = 0$) geldt het *Theorema van Westcott*:

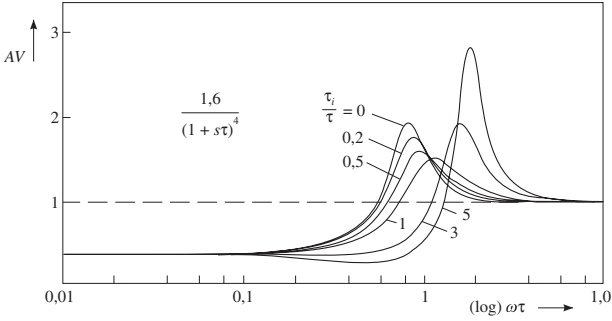
$$\int_0^\infty \log(AV) \mathrm{d}\omega = 0$$

Wordt de AV logaritmisch uitgezet op een lineaire frequentieschaal, dan zijn de oppervlakten van de curve boven $AV = 1$ en onder $AV = 1$

aan elkaar gelijk: wat door de regeling in het ene gebied wordt gewonnen, wordt in een ander gebied verloren. I-actie heeft weliswaar geen offset ($AV = 0$ voor $\omega = 0$), maar het effectieve regelgebied wordt kleiner.
D-actie vergroot het effectieve regelgebied, maar geeft bij hogere frequenties grotere afwijkingen.



Figuur 1.27 Invloed I-actie op de AV



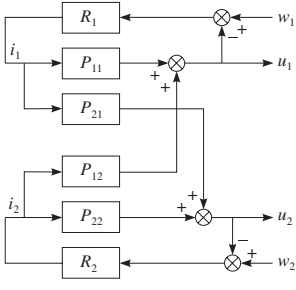
Figuur 1.28 Invloed D-actie op de AV

Interactie bij multivariabele systemen

Multivariabele systemen: één ingangsvariabele heeft invloed op meer dan één uitgangsvariabele. Er kunnen zich problemen voordoen wanneer met enkelvoudige regelkringen wordt geregeld. De interactiefactor (voor $\omega = 0$) van het systeem van figuur 1.29:

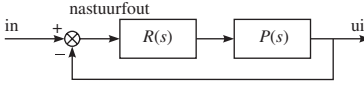
$$\kappa = \frac{P_{12}(0)P_{21}(0)}{P_{11}(0)P_{22}(0)}$$

$\kappa \ll 1$: interactie te verwaarlozen.
$\kappa \gg 1$: regelaars hebben meer invloed op de waarden die ze niet regelen, dan op de waarden die ze wel regelen. Verwisselen van de regelaars geeft een betere regeling: R_1 regelt met i_2 en R_2 regelt met i_1.
$\kappa = 1$: flinke interactie; een multivariabele regelaar c.q. ontkoppeling kan dan nodig zijn.



Figuur 1.29 Systeem met twee ingangen, twee uitgangen en twee enkelvoudige regelaars

1.6 Volgsystemen (servosystemen)



Figuur 1.30 Servosysteem

Anders dan bij procesregelingen waarbij de uitgang gestabiliseerd wordt, moet bij een servosysteem de uitgang veranderingen op de ingang zo goed mogelijk volgen.
Meestal zijn er meer directe terugkoppelingen van de uitgang naar de ingang voor positie, snelheid (tacho) en versnelling: bij terugkoppeling van zowel snelheid als positie wordt de cascaderegeling toegepast (zie pag. B2/30); de snelheidsregelaar is de *slaaf* en de positieregelaar de *meester*.
Servosystemen worden gekenmerkt door het aantal zuivere integraties in de kring.
Bandbreedte: frequentie waar beneden ingangssignalen zonder noemenswaardige vervorming (amplitude en fasedraaiing) worden doorgegeven. Bij servo-systemen wordt daarvoor vaak de frequentie genomen waarbij -45° fasedraaiing optreedt voor een gesloten systeem:

$$\frac{P(s)R(s)}{1+P(s)R(s)}$$

Tabel 1.2 Stationaire nastuurfout (offset) voor verschilende ingangssignalen

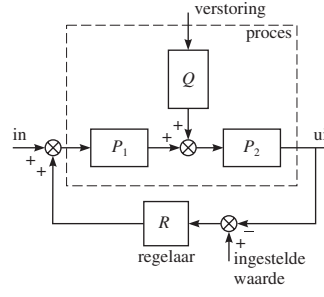
type	systeem	positie c	snelheid vt	versnelling $\frac{1}{2}at^2$
0	(P)	$c/(1+K)$	∞	∞
1	(PI)	0	$v\frac{\tau_i}{K}=\frac{v}{K_v}$	∞
2	$(PI)^2$	0	0	$a\frac{\tau_i^2}{K}=\frac{a}{K_a}$

$k_v = K/v;\ K_a = K/\tau_i^2$

2 Procesregeltechniek

2.1 Regelmethoden

Terugkoppeling (feedback)
Het effect van een verstoring op de uitgang wordt via een regelaar teruggekoppeld naar een ingang van het proces om het effect te compenseren (algemeen toegepast; vooral bij processen die te zwak zelfregelend of zelfs instabiel zijn).

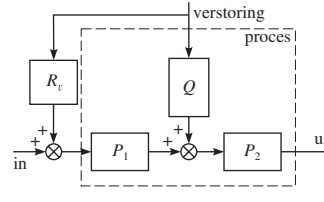


Figuur 2.1
Terugkoppeling

Voorwaartskoppeling (feedforward)
Wanneer de verstoring te meten is, kan er worden ingegrepen voordat het effect hiervan op de uitgang merkbaar is.

$$R_v(s) = -\frac{Q(s)}{P_1(s)}$$

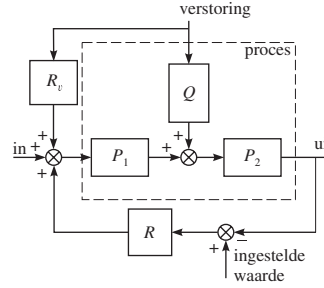
Omdat het effect van de ingreep niet wordt teruggekoppeld, kan geen *I*-actie worden gebruikt. Indien $P_1(s)$ een niet-minimum fase-overdracht is, is een volledige compensatie $[= -1/P_1(s)]$ niet mogelijk (zie pag. B2/8).



Figuur 2.2
Voorwaartskoppeling

Storingscorrectie-schakeling

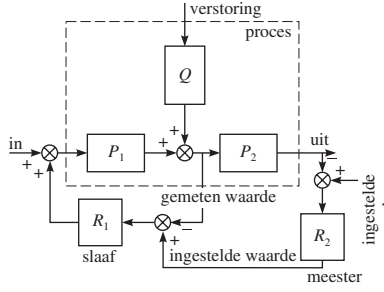
Combinatie van terugkoppeling en voorwaartskoppeling. Onvolmaaktheid van de voorwaartskoppeling en invloed van andere verstoringen worden via de terugkoppeling weggeregeld.
Snelle maar grove correctie door voorwaartskoppeling met daarna langzamere, maar fijnere, aftrimming door de terugkoppeling.



Figuur 2.3
Storingscorrectie

Meester-slaaf (master slave) of cascade-regeling

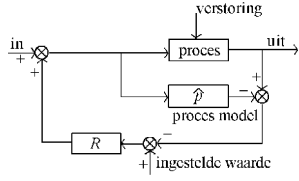
Twee terugkoppelende regelaars, waarbij de *slaafregelaar* $R_1(s)$ met snelle en grovere informatie alvast een groot deel van de verstoringen wegregelt, waarna de *meesterregelaar* $R_2(s)$ met nauwkeuriger informatie langzaam bijtrimt door het setpoint van de slaafregelaar aan te passen.



Figuur 2.4
Meester-slaaf regeling

Internal-Model-Control

In dit schema is de regelaar gelijk aan het realiseerbare deel van het inverse procesmodel $R = (\hat{p}^*)^{-1}$. Met $\hat{p}^* = \hat{p}$ zonder niet-minimumfasecomponenten. Op deze wijze kan een procesmodel (b.v.: stapresponsie-, fuzzy-logic-of neuraalnet-werkmodel) in de regelkring geïmplementeerd worden.

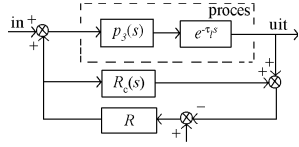


Figuur 2.5 IMC-Schema

Compensatie niet-minimumfasecomponenten

De looptijdcompensator $(R_c(s) = (1 - e^{-\hat{\tau}s})\hat{p}_3(s))$ voorspelt (Smith predictor) het vertraagde effect. Als $\hat{\tau}_d = \tau_d$ en $\hat{p}_3 = p_3$ dan wordt de looptijd geëlimineerd. Voor compensatie van een inverse responsie geldt:

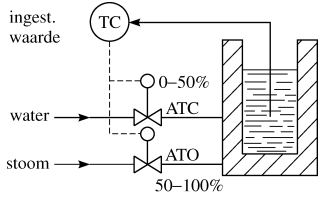
$$R_e(s) = k\left(\frac{1}{\tau_2 s + 1} - \frac{1}{\tau_1 s + 1}\right)$$



Figuur 2.6 Looptijdcompensatie

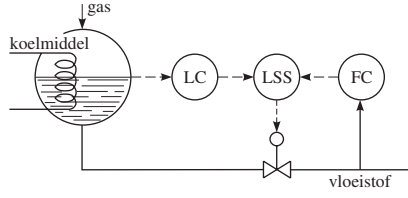
Eén gemeten grootheid – meer corrigerende organen (selectie-regeling; split-range)

Eén gemeten grootheid stuurt via één regelaar twee of meer corrigerende organen, waarvan (afhankelijk van de grootte van de regelaar) één effectief ingrijpt. Voorbeeld een temperatuurregeling: van 0–50% wordt de koelwaterklep dicht gestuurd, vervolgens van 50–100% wordt de stoomklep opengestuurd.



Figuur 2.7 Selectie-regeling

Meerdere gemeten grootheden – één corrigerend orgaan (overname-regeling; override-control)
Twee of meer gemeten grootheden sturen via evenveel regelaars één corrigerend orgaan, waarbij slechts één gemeten grootheid actief geregeld wordt (veel toegepast bij beveiligingen). Voorbeeld: flowregeling bij condensor met variabel oppervlak met beveiliging voor te laag niveau, om gasdoorslag te voorkomen.



Figuur 2.8
Overname-regeling

Normaal bepaalt *FC* de klepstand. Wordt echter meer flow gevraagd dan er gecondenseerd kan worden (waardoor het niveau te ver zou dalen), dan bepaalt *LC* via *LSS* (Low Selector Switch) de klepstand.

2.2 Begrippen

Zuivere drieterm en cascade PID-regelaar
Theoretisch wordt meestal de *zuivere drieterm-regelaar* (parallel) beschouwd:

$$Y(s) = K_r\left(1 + s\tau_d + \frac{1}{s\tau_i}\right)$$

De proportionele actie wordt ingesteld met de *proportionele band*, de integrerende actie met de *reset* en de differenciërende actie met de *rate*.

Proportionele band (proportionaliteitsgebied)

Deze drukt de versterkingsfactor uit als het aantal procenten dat de ingang van de regelaar van het totale ingangsbereik zou moeten variëren om 100% variatie aan de uitgang te krijgen:

$$PB = \frac{1}{K_r} \cdot 100\%$$

K_r moet negatief of positief worden gekozen, zodat de rond-gaande versterking negatief is (klep moet meer open of dicht bij een toenemende fout).

Nulpuntsinstelling P-regelaars (bias, soms: manual reset)

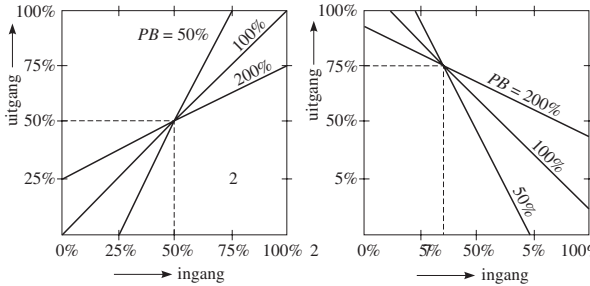
In tegenstelling tot *PI-regelaars* is er bij *P-regelaars* een vast verband tussen het foutsignaal $e = sp - mv$ en de uitgang u. Als $sp = mv$ dan heeft de regelaar de nulpuntswaarde als uitgang (bij pneumatische regelaars: de afregeldruk); deze is meestal 50%.

D-actie (rate)

Om heftig reageren op hoogfrequente (meet)ruis te voorkomen wordt meestal *tamme D-actie* gebruikt:

$$\text{tamme PD regelaar: } K_r\left(\frac{1 + s\tau_d}{1 + as\tau_d}\right)$$

voor:
$a = 0$, pure PD-regelaar
$a = 1$, pure P-regelaar



directe regelactie
nulpunt 50%
setpoint 50%

indirecte regelactie
nulpunt 75%
setpoint 35%

Figuur 2.9 Voorbeelden nulpuntswaarde en setpoint

Heeft een normale PD-regelaar voor hoge frequenties theoretisch een oneindige versterking, bij een tamme PD-regelaar is deze begrensd op K_r/a (asymptoot in de amplitude-karakteristiek vanaf $\omega\tau_d = 1/a$). Meestal ligt a tussen 0,1 en 0,2.
Om een te hevige reactie op verstellingen van de ingestelde waarde te voorkomen, werkt bij sommige regelaars de D-actie alleen op de gemeten waarde.

I-actie (reset)

Reset windup: wanneer er gedurende langere tijd een foutsignaal $\neq 0$ is, kan de I-actie zover door integreren dat de uitgang in verzadiging raakt. Doordat de regelaar pas weer gaat reageren als de gemeten waarde het setpoint passeert, treedt meestal flinke overshoot op. Reset windup komt voor bij regelingen waarbij de klep gedurende langere tijd volledig open of dicht moet zijn, zoals bij het opstarten van processen, bij batchprocessen en bij beveiligingen.

Bij sommige regelaars wordt de integratie-tijd uitgedrukt in:

$$\text{repeats/minute} = \frac{1}{\tau_i}(\tau_i \text{ in minuten})$$

Positioneel regelen

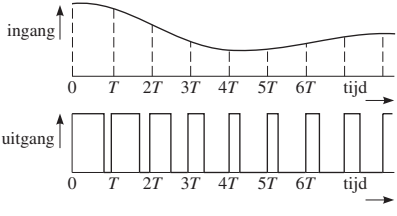
De regelaar stuurt rechtstreeks het corrigerende orgaan aan met de gewenste klepstand (*positie-algoritme*).

Incrementeel regelen

De regelaar stuurt alleen veranderingen in de gewenste klepstand naar het corrigerende orgaan (*snelheids-algoritme*). Dit wordt vooral toegepast bij computerregelaars; voordelen: valt de computer uit, dan blijft de klep in de laatste stand staan i.p.v. volledig open of dicht te gaan; geen extra voorzieningen nodig om 'stoot-loos' over te schakelen naar computerregeling.

Tijdsproportioneel regelen

Meestal is bij een aan/uit-regeling behalve het corrigerend orgaan ook de meting van het aan/uit-type (bijv. bimetaalcontact).
Met een continue meting en een twee-standen corrigerend orgaan kan tijdproportioneel worden geregeld. Daarbij bepaalt het foutsignaal de verhouding van de tijdsduur aan/uit binnen een vaste periode. Indien deze vaste periode klein is t.o.v. de tijdsconstante(n) van het proces, kan deze regeling als proportioneel worden beschouwd.



Figuur 2.10 Tijdsproportioneel regelen

2.3 Regelaars

Regelaars met variabele versterking (adaptive gain)

Bij processen waarvan de procesversterking (proces inclusief meet- en corrigerend orgaan) sterk afhangt van het werkpunt, varieert ook de kringversterking. Dit is regeltechnisch ongunstig. Er zijn regelaars waarvan de versterkingsfactor ingesteld kan worden als functie van de gemeten waarde. Meestal gebeurt dit door het meetgebied op te delen in een aantal stukken, waarbinnen de regelaarversterking lineair afhangt van de meetwaarde, zodanig dat over het hele gebied de kringversterking nagenoeg constant is.

Zelfinstellende regelaar (self tuning controller)

Dit is een bijzondere vorm van een adapterende regelaar (zie hierna). Het gaat hier om een regelaar die zich zelf kan regelen: de regelparameters K_r, τ_i en τ_d worden automatisch zo ingesteld dat een bepaald foutcriterium wordt geminimaliseerd; na het inregelen gedraagt deze regelaar zich als een normale regelaar. Voorbeeld van een foutcriterium: $\int e^2 \mathrm{d}t$

Adapterende regelaar (adaptive controller)

Dit is een regelaar die de regelparameters voortdurend blijft bijstellen. Dit is vooral belangrijk bij processen die sterk niet-lineair zijn, of waarvan de (dynamische) eigenschappen in de tijd variëren.
Een adapterende regelaar bevat dan ook een identificator, die voortdurend de veranderingen in de proces-parameters blijft volgen. Dit in tegenstelling tot de adaptive-gain-regelaar, waar vooraf informatie over het proces moet worden ingevoerd.

Voorspellende regelaar (predictive controller)

De sturing wordt berekend op basis van een procesmodel, waarbij een fout criterium wordt geminimaliseerd over een voorspelhorizon. In tegenstelling tot de hierboven genoemde enkelvoudige regelaars (één meting gekoppeld aan één sturing) wordt deze regelaar vooral toegepast voor multi-variabele regeling. De regelkring is van de IMC-structuur.

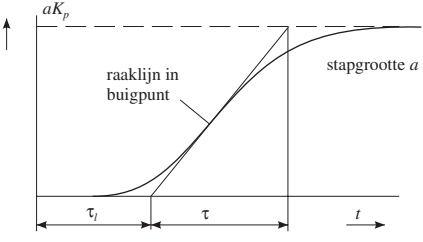
2.4 Dynamische componenten in een regelkring

Karakterisering van processen

Op grove wijze kan het proces vaak gekarakteriseerd worden uit een *stapresponsie* (zie ook par. 1.2):

$$H(s) \approx \frac{K_p e^{-s\tau l}}{1 + s\tau}$$

Met behulp van computers en testsignalen kan de procesoverdracht op een nauwkeuriger manier worden bepaald (identificatie, parameter-schatten).



Figuur 2.11 Stapresponsie

Meetomvormers en corrigerende organen

Als *meetomvormers* (*transmitters* en *corrigerende organen* een belangrijk dynamisch gedrag vertonen t.o.v. de procesdynamica, zijn deze van invloed op de procesregeling en moeten ze meegenomen worden in de beschouwingen. Ook van belang is of ze zich niet-lineair gedragen. Met name regelkleppen (veelal de corrigerende organen in de procesindustrie) vertonen een niet-lineair gedrag.

Monstername (sampling)

Bij kwaliteitsanalyse in de procesindustrie komt vaak *monster-name* voor met relatief lange monstername-tijden, zie pag. B2/48. Vaak

vindt puntbemonstering plaats, soms voortschrijdende middeling (mengen van een monsterstroom gedurende de monsternametijd). De verwerkingstijd is als looptijd te beschouwen. Bij computer-regelaars wordt in principe ook bemonsterd; deze monsternametijd is in vergelijking met de procestijdconstanten meestal zo klein dat computer-regelaars als continue regelaars mogen worden beschouwd.

2.5 Klepkarakteristieken

Bij een *klep* (of een andere restrictie) is de stroming afhankelijk van de dichtheid van het stromend medium en de drukval:

$$q_v(x) = k_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

waarin:
$q_v(x)$ = volumestroom [L^3/T]
$f(x)$ = klepkarakteristiek; x is de klepstand;
klep dicht: $x = 0$, klep open: $x = 1$
Δp = drukval over de klep [$M/(L \cdot T^2)$]
ρ = dichtheid [M/L^3]
k_v = klepcoëfficiënt [L^2]

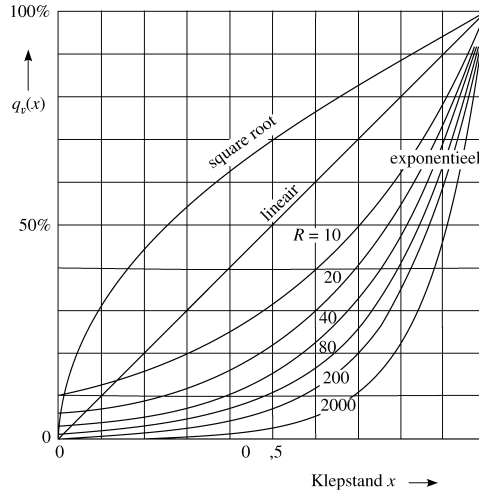
Zie ook hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par. 5

De door fabrikanten verstrekte waarden voor k_v geeft aan hoeveel m^3 water er per uur door de volledig geopende klep stroomt bij een drukval van 1 bar.

Voorbeelden van klepkarakteristieken $f(x)$ (zie figuur 2.13):

- x *Lineair*, de stroom neemt lineair toe met de klep-stand.
- R^{x-1} *Exponentieel* ook wel *equiprocentueel* genoemd, omdat een verstelling x de doorstroming steeds met eenzelfde percentage laat toenemen:

$$\frac{\Delta q_v}{q_v} = \Delta x \cdot \log(R);$$



Figuur 2.12 Verschillende klepkarakteristieken bij vaste drukval over de klep (inherente klepkarakteristiek)

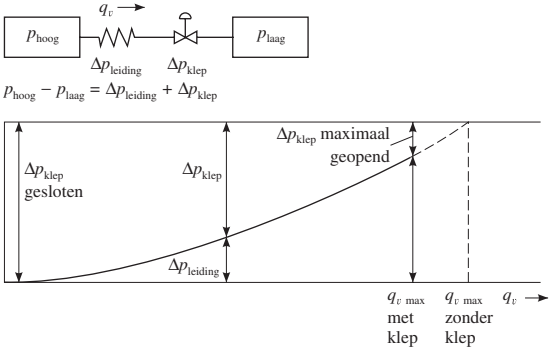
$$\textit{Rangeability: } R = \frac{q_{v\ \max}(\text{bij } x = 1)}{q_{v\ \max}(\text{bij } x = 0)}$$

Als $R = 40$ dan laat de klep in gesloten stand 2,5% van de maximale hoeveelheid door.

- $\sqrt{x}$ *Square root*

Algemeen geldt voor de klepkarakteristiek:

$$q_v(x) = f(x) \cdot q_{v_{\max}}$$



Figuur 2.13 Δp over een regelklep in een systeem met constant drukverschil

Inherente klepkarakteristiek: klepkarakteristiek bij een vaste drukval over de klep. Is de drukval over de klep niet constant (maar bijvoorbeeld wel over de klep met proces en leidingweer-stand), dan wijkt de *effectieve klepkarakteristiek* (*bedrijfskarakteristiek*) af van de inherente klepkarakteristiek.
De verandering van de klepkarakteristiek hangt af van de *klepautoriteit a*, die een maat is voor de bijdrage van de klep aan de totale drukval:

$$a = \frac{\Delta p_{klep} \text{ bij maximaal geopende klep } (q_v = q_{v\,max})}{\Delta p_{klep} \text{ bij gesloten klep } (q_v = 0)}$$

Soms wordt ook de *weerstandsverhouding* β gebruikt.

$$\beta = \frac{\Delta p_{klep}}{\Delta p_{leiding}} \text{ bij maximaal geopende kelp}$$

Er geldt: $\beta = \dfrac{a}{1-a}; a = \dfrac{\beta}{1+\beta}$

De waarde van a varieert van 0 (de rest van het proces is drukval-bepalend) tot 1 (vooral de klep is drukval-bepalend).

De *effectieve klepkarakteristiek* wordt (zie figuur 2.15):

$$f(x)_{\text{eff}} = \frac{f(x)}{\sqrt{f^2(x) + \dfrac{a}{1-a}}}$$

Hieruit volgt dat door toevoegen van een klep de maximale stroom vermindert:

$$q_{v\ \text{max (mat klep)}} = (\sqrt{1-a})\, q_{v\ \text{max (zonder klep)}}$$

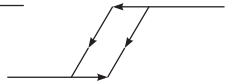
Ook de rangeability van een exponentiële klep is afhankelijk van de autoriteit:

$$R_{\text{eff}} = \sqrt{1 + a(R^2 - 1)} \approx R\sqrt{a}$$

Bij $a = 0{,}1$ en $R = 40$ wordt $R_{\text{eff}} = 12{,}7$.

uitgang niet recht-evenredig met ingang (o.a. pH-meters)

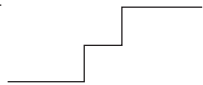
verzadiging



hysteresis (o.a. wrijving bij kleppen)

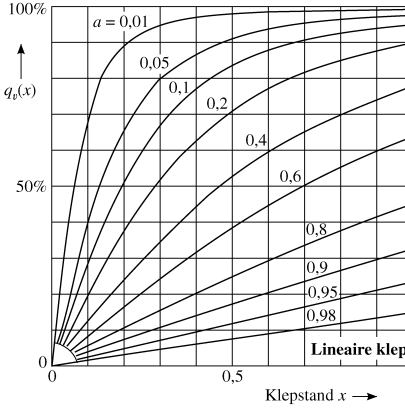
dode zone

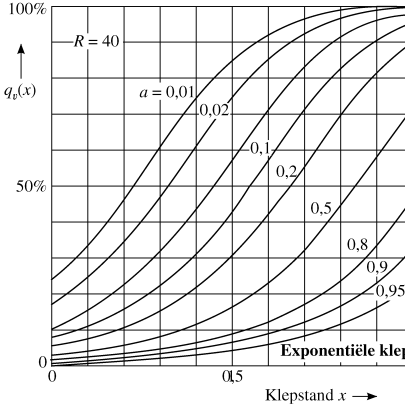
twee-standen-regelaar (aan/uit Voordeel:corrigerend orgaan goedkoop



drie-standen-regelaar (elektrische klepmotor linksom, stilstand, rechtsom)

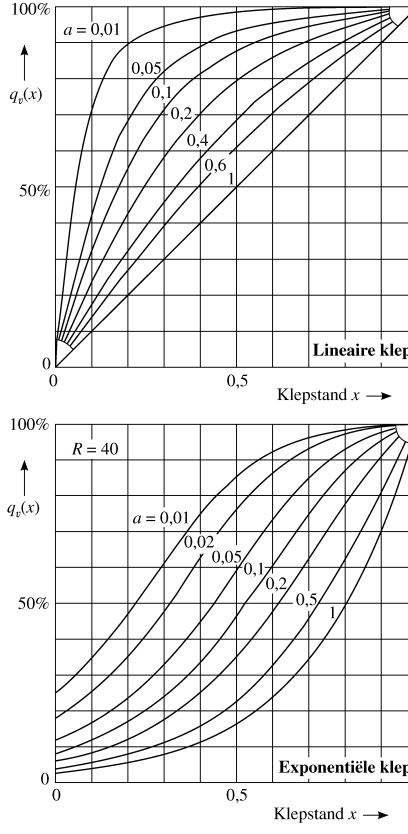
Figuur 2.14 Niet-lineariteiten





$$q_v(x) = \frac{f(x)}{\sqrt{f^2(x) + \dfrac{a}{1-a}}} q_{v\,\max} \quad \text{zonder klep}$$

*Figuur 2.15 Effectieve klepkarakteristieken van kleppen in een systeem met constante drukval, waarbij 100% de stroming is die door het systeem zou gaan als er **geen klep** aanwezig was*



$$q_v(x) = \frac{f(x)}{\sqrt{f^2(x)(1-a)+a}} \; q_{v\,\max} \text{ met klep}$$

Figuur 2.16 Effectieve klepkarakteristieken van kleppen in een systeem met constante drukval, waarbij 100% de stroming is die bij ***volledig geopende klep*** *door de klep gaat*

Bij een grote klepautoriteit lijkt de effectieve klepkarakteristiek het meeste op de inherente klepkarakteristiek. Een grote autoriteit betekent echter een grote drukval over de klep en is energetisch ongunstig.
De *klepversterkingsfactor* is afhankelijk van de autoriteit:

$$K_{\mathrm{k}} = \frac{\mathrm{d}q_{\mathrm{v}}(x)}{\mathrm{d}x} \text{ (raaklijn aan de karakteristiek)}$$

Een niet-lineaire meting (debietmeting met meetschijf) kan een niet-lineaire klepkarakteristiek compenseren bij een debietregeling. Voor niet-lineariteiten, zie figuur 2.14.

2.6 Regelaarinstellingen

Inregelen

Wanneer er *geen procesgegevens bekend* zijn kan het proces als volgt worden ingeregeld:

1 Proces-proportioneel regelen ($\tau_i \to \infty, \tau_d \to 0$).
2 Regelaarversterking vergroten tot juist een blijvende oscillatie optreedt. Uit deze versterkingsfactor K_u (*ultimate gain*) en de bijbehorende periode van slingering T_u (*ultimate period*) kunnen de regelaarinstellingen worden afgeleid volgens het recept van *Ziegler en Nichols* (tabel 2.1).

Tabel 2.1 Regelaarinstellingen volgens Ziegler en Nichols (geen procesgegevens bekend)

regelaar	K_{t}	τ_{i}	τ_{d}
P	0,5 K_u	–	–
PI	0,45 K_u	$T_u/1{,}2$	–
PID (serie)	0,6 K_u	$T_u/2$	$T_u/8$
PID (parallel)	0,75 K_u	$T_u/1{,}6$	$T_u/10$

Uitgaande van K_p, τ en τ_1 (zie figuur 2.11, pag. B2/36)
Zijn de *procesparameters bekend*, bijvoorbeeld uit een stapresponsie, dan verkrijgt men het recept van *Ziegler en Nichols* (voor een grove indicatie) als in tabel 2.1 met $K_u = 2\tau/\tau_1$ en $T_u = 4\tau_1$. Dit zijn de bovengrenzen voor $\tau \gg \tau_1$. Een verfijning hierop is de toevoeging van Cohen en Coon in tabel 2.2.

Tabel 2.2 Regelaarinstellingen volgens Cohen en Coon bij bekende procesparameters

regelaar	$K_r K_p$	τ_i	τ_d
P	$\frac{\tau}{\tau_1}\left(1+\frac{\tau_1}{3\tau}\right)$	–	–
PI	$0{,}9\frac{\tau}{\tau_1}\left(1+\frac{\tau_1}{11\tau}\right)$	$3{,}3\tau_1\left(\frac{1+0{,}1\tau_1/\tau}{1+0{,}2\tau_1/\tau}\right)$	–
PID (serie)	$1{,}3\frac{\tau}{\tau_1}\left(1+\frac{\tau_1}{5\tau}\right)$	$2{,}5\tau_1\frac{1+0{,}2\tau_1/\tau}{1+0{,}6\tau_1/\tau}$	$0{,}4\tau_1\left(\frac{1}{1+0{,}2\tau_1/\tau}\right)$

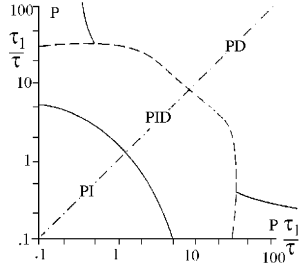
Bestaat het proces uit een serieschakeling van een aantal eersteorde elementen, waarbij $\tau_1 \gg \tau_2 \gg \tau_3$, dan is voor een P-regelaar een goede waarde:

$$K_r K_p = \frac{\tau_1}{\tau_2}$$

Het te regelen systeem kan meestal worden benaderd door:

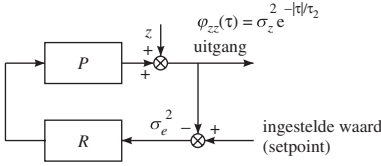
$$H(s) = \frac{e^{-st_l}}{(1+s\tau_1)(1+s\tau_2)}$$

Actie: bij:
P één overheersende tijdconstante
PI één overheersende tijdconstante en looptijd
P(I)D twee overheersende tijdconstantes en looptijd



Figuur 2.17 Keuzediagram regelaars

2.7 Meet- en regelbaarheidsfactoren



Figuur 2.18 Proces met op de uitgang (equivalente) ruis, gekarakteriseerd door een eerste-orde autocorrelatiefunctie met een correlatietijd τ_z en een variantie van σ_z^2

Bevat het proces alleen maar compenseerbare elementen, dan is het theoretisch mogelijk deze verstoringen exact weg te regelen (praktisch niet). Bevat het proces niet-minimum fase-elementen, dan is het ook theoretisch niet mogelijk de verstoringen 100% weg te regelen. Er blijft een fout met een σ_e.
De regelbaarheid van een proces is volgens *Van der Grinten* gedefinieerd als:

$$r^2 = 1 - \frac{\sigma_e^2}{\sigma_z^2} \text{ dus } \frac{\sigma_e^2}{\sigma_z^2} = 1 - r^2, \text{ zodat } \sigma_e = 0 \text{ als } r^2 = 1$$

De regelbaarheid hangt af van de verstoring z en van het niet-compenseerbare deel van het proces. De variantie van het foutsignaal bij de optimale regelaar volgt uit de regelbaarheidsfactor.

Meet- en regelbaarheidsfactoren:

- looptijd $r_l = e^{-\tau_l/\tau_z}$
- monstername $r_a \approx e^{-\tau_a/2\tau_z}$
- voortschrijdende middeling $r_m \approx e^{-\tau_m/\tau_z}$
- inversie $r_i = \left|\frac{\tau_z - \tau_i}{\tau_z + \tau_i}\right| \left(\frac{1}{\tau_i} = \text{positief nulpunt}\right)$

– meetfout $\qquad r_n \approx 1 - \dfrac{\sigma_v}{\sigma_z}\sqrt{\dfrac{\tau_v}{\tau_z}}$

$r_{\text{tot}} \approx r_l \cdot r_a \cdot r_m \cdot r_i \cdot r_n$

Toepassing o.a.: afwegen van snelle onnauwkeurige metingen versus nauwkeuriger metingen met een looptijd.

Voorbeelden:

– snelle meting

$\sigma_v = 0{,}1\ \sigma_z$
$\tau_v = 0{,}1\ \tau_z$ $\qquad r_n = 0{,}97 \rightarrow \sigma_e = 0{,}24\ \sigma_z$

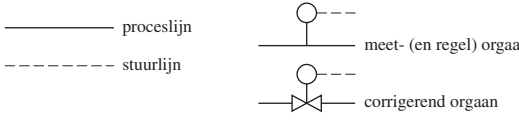
– langzame meting met monstername en looptijd

$\sigma_v = 0$
$\tau_a = 0{,}1\ \tau_z \qquad r_a \cdot r_l = 0{,}86 \rightarrow \sigma_e = 0{,}51\ \sigma_z$
$\tau_l = 0{,}1\ \tau_z$

De regeling met de snelle minder nauwkeurigere meting is beter (geeft een grotere variantiereductie).

2.8 Voornaamste symbolen en codes in regeltechnische schema's

Zie voor normen: NEN-3157 en IEC-1135.



ATO: Klep air to open; toenemend signaal → klep open
ATC: Klep air to close; toenemend signaal → klep dicht
sp: Setpoint, ingestelde waarde (gewenste waarde)
mv: Measured value, gemeten waarde
LSS: Low selector switch, laagste wint relais
HSS: High selector switch; hoogste wint relais

Meetfunctie

F (flow)	doorstroming
L (level)	niveau
P (pressure)	druk
Q (quality)	kwaliteit
S (speed)	snelheid
T (temperature)	temperatuur
d (difference)	verschil
r (ratio)	verhouding

Omzetfunctie

I (indicator)	aanwijzend
R (registrating)	registrerend
C (controlling)	regelend
S (switching)	schakelend
T (transmitting)	zendend
Q (summation)	tellend of sommerend
A (alarming)	alarmerend

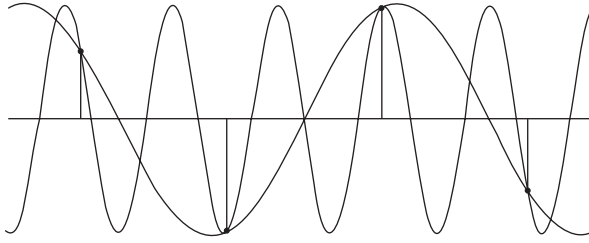
Zie ook hoofdstuk J *Procestechniek*, par. 6.

3 Digitale regeltechniek

Bij de op microprocessor gebaseerde regelaars is in principe sprake van *bemonstering*, zie ook pag. B2/39. Meestal is de *bemonstertijd* (*sample time*) van deze regelaars echter zo klein (<1 s) in vergelijking met de tijdconstanten (>30 s) van het te regelen proces, dat de regeling als continu mag worden beschouwd; ook wat betreft de beschouwingen (Laplace-transformatie, stabiliteit e.d.).

3.1 Monstername

Frequentiespiegeling (*aliasing, folding*: frequenties boven de halve bemonsterfrequentie worden weergegeven als lagere frequenties, zie figuur 3.1.



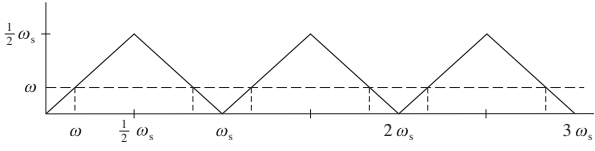
Figuur 3.1 Frequentiespiegeling

Alle sinussen met hoeksnelheden:

$$\omega_k = \omega_0 + k\omega_s \quad \text{met: } \omega_s = \frac{2\pi}{T_s}; \quad T_s \text{ is } \textit{bemonstertijd} \textit{ (sample time)}$$

hebben dezelfde waarde op de bemonstertijden $t = nT_s$, immers:

$$\sin\{(\omega + k\omega_s)nT_s\} = \sin\{\omega nT_s + k2\pi n\} = \sin\{\omega nT_s\}$$



Figuur 3.2 Frequentiespiegeling: afbeelding van de hogere frequenties $[n\omega_s \pm \omega]$ *op het gebied* $[0, -\frac{1}{2}\omega_s]$ *voor* $\omega \in [0, \frac{1}{2}\omega_s]$

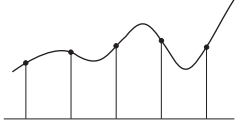
Ter voorkoming van frequentiespiegeling:

Bemonsteringstheorema van Shannon: als ω_c de hoogste frequentie is waarbij het te bemonsteren signaal nog juist energie bevat, dan is de laagste theoretische bemonsteringsfrequentie gelijk aan $2\omega_c$.

Vuistregels voor de praktijk:
- kies bemonsterfrequentie 10 maal de bandbreedte van het te bemonsteren signaal;
- kies bemonstertijd 10 maal zo snel als de dominante tijdconstante van het proces dat wordt bemonsterd.

Vuistregels voor bemonstertijden voor regelingen:
- debiet $\leqslant 1$ s
- druk 1–5 s
- temperatuur 10–30 s
- kwaliteit $\geqslant 3$ min

Gaschromatografische analyses: bemonstertijden tussen de 3 en 20 min, plus een looptijd (zie figuur 2.12, pag. B2/37).
Laboratorium-analyses: meestal niet sneller dan om de twee uur of enkele dagen; looptijd in de orde van uren.



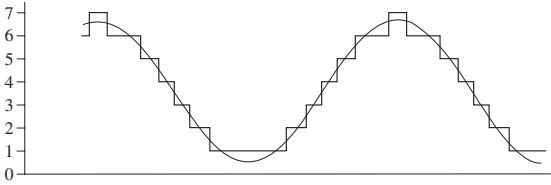
Figuur 3.3 Verborgen instabiliteit: door een verkeerd gekozen bemonstertijd kan een optredende instabiliteit niet als zodanig worden herkend

3.2 Amplitude-discretisatie

Amplitudes van meetsignalen kunnen bij digitale verwerking slechts een beperkt aantal waarden aannemen. Een *analoog/digitaal omzetter* (*A/D-omzetter*) met n bits kan 2^n waarden representeren. De nauwkeurigheid wordt weergegeven door de *resolutie*: de grootte (of: het percentage) dat één interval van het totale signaalbereik uitmaakt. Voor een n-bits omzetter geldt:

$$\text{resolutie} = \frac{1}{2^n - 1} \times \text{signaalbereik} \ (\text{of:} \ \times 100\%)$$

Voor een A/D omzetter van 8 bits is de resolutie dus 0,4%.



Figuur 3.4 Signaalkwantisering (of amplitude-discretisatie) voor een drie bits omzetter

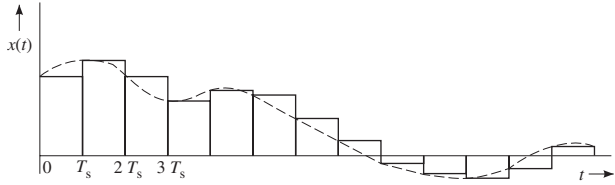
Figuur 3.5 Kwantiseringsruis

Het verschil tussen het echte signaal en het bemonsterde signaal wordt *kwantiseringsruis* genoemd. Deze wordt gekarakteriseerd door de standaardafwijking van het ruissignaal:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{12}} \times \text{schaaldeel in \%} \ (= \text{resolutie})$$

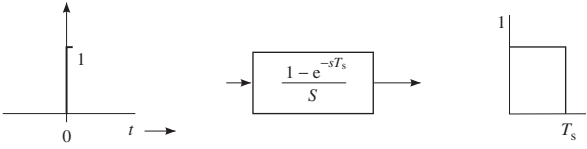
Voor een A/D-omzetter van 8 bits geldt dus: $\sigma = 0{,}29 \times 0{,}4\% = 0{,}1\%$ van de volle schaal.

3.3 Nulde-orde houdcircuit

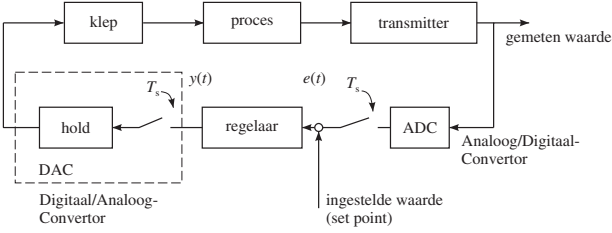


Figuur 3.6 Bemonstering gevolgd door een nulde-orde houdcircuit

Een *nulde-orde houdcircuit* (*zero order hold circuit*) houdt het signaal vast tot aan het volgende bemonstertijdstip. Daardoor zijn de corrigerende organen ook tussen de bemonstertijdstippen van een waarde voorzien. De overdrachtfunctie is:

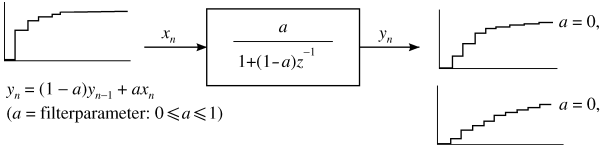


Figuur 3.7 Impulsresponsie nulde-orde houdcircuit



Figuur 3.8 Principeschema van een digitale regeling

3.4 Exponentieel filter (Exponential smoothing filter)



Figuur 3.9 Exponentieel filter

$$y_n = (1-a)y_{n-1} + ax_n$$
(a = filterparameter: $0 \leqslant a \leqslant 1$)

$$\frac{y(z)}{x(z)} = \frac{1}{1 + \frac{1-a}{a}(1-2^{-1})}$$

dit filter komt overeen met een analoog eerste-orde filter, waarbij voor de filter tijdconstante τ geldt:

$$\tau = \frac{T_s}{\ln\left(\frac{1}{1-a}\right)} \approx \left(\frac{1-a}{a} + \frac{1}{2}\right)T_s \quad (\text{voor } 0 < a < 0{,}4)$$

3.5 Discrete PID-regelaars

Positie-algoritme

$$y_n = K_r\left\{e_n + \text{som}_n + \frac{\tau_d}{T_s}(e_n - e_{n-1})\right\}$$

$$\text{som}_n = \text{som}_{n-1} + \frac{T_s}{\tau_i}e_n$$

$$y_n = k\left\{\left(1 + \frac{T_s}{\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s}\right)e_n - \frac{\tau_d}{T_s}e_{n-1} + \text{som}_{n-1}\right\}$$

Om *reset wind up* te voorkomen wordt de integrerende actie geëlimineerd door een andere schrijfwijze van de differentievergelijking:

$$y_n = y_{n-1} + K_r\left\{\left(1 + \frac{T_s}{\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s}\right)e_n - \left(1 + 2\frac{\tau_d}{T_s}\right)e_{n-1} + \frac{\tau_d}{T_s}e_{n-2}\right\}$$

Met de limitering in verband met reset wind up: $0\% \leqslant y_n \leqslant 100\%$.

Snelheidsalgoritme
Uit het positie-algoritme volgt:

$$\begin{aligned}\Delta y_n &= y_n - y_{n-1}\\ &= K_r\left\{\left(1 + \frac{T_s}{\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s}\right)e_n - \left(1 + 2\frac{\tau_d}{T_s}\right)e_{n-1} + \frac{\tau_d}{T_s}e_{n-2}\right\}\\ \frac{Y(z)}{E(z)} &= K_r\left\{\left(1 + \frac{T_s}{\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s}\right) - \left(1 + 2\frac{\tau_d}{T_s}\right)z^{-1} + \frac{\tau_d}{T_s}z^{-2}\right\}\end{aligned}$$

Om heftige sturingen op setpoint-veranderingen te voorkomen wordt D-actie vaak alleen betrokken op de gemeten waarden:

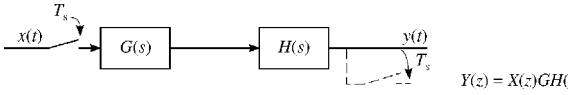
$$\frac{\tau_d}{T_s}(x_n - x_{n-1}) \quad \text{i.p.v.} \quad \frac{\tau_d}{T_s}(e_n - e_{n-1})$$

3.6 *z-transformatie*

Bij de *z-transformatie* worden alleen de waarden op de equidistante bemonstertijdstippen (niet de tussenliggende waarden) beschouwd $x(nT_s)$, meestal genoteerd als x_n.
De *z-transformatie* kan worden beschouwd als de discrete vorm van de *Laplace-transformatie* (zie hoofdstuk A2 *Wiskunde* par. 7.3):

$$X(z) = \mathscr{Z}[x(t)] = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_s)z^{-n}$$

De factor z^{-1} is te vergelijken met e^{-sT_s}, en betekent een vertraging van één bemonster-interval.

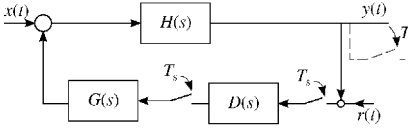


waarbij: $G \cdot H(z) = \mathscr{Z}\{G(s) \cdot H(s)\}$

$G(s)$ staat voor het houdcircuit

Pas op: $G(z)\ H(z) \neq GH(z)$

Figuur 3.10 Proces met houdcircuit



$$Y(z) = \frac{XH(z)}{1 + D(z)GH(z)} + \frac{D(z)GH(z)}{1 + D(z)GH(z)}R(z)$$

De overdracht $\dfrac{Y(z)}{X(z)}$ is *niet* te bepalen.

De overdracht $\dfrac{Y(z)}{X(z)}$ is *wel* te bepalen.

Figuur 3.11 Blokschema's voor bemonsterde systemen

3.7 Stabiliteit

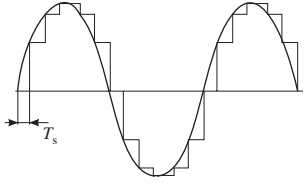
Gegeven een (geregeld) systeem met als discrete overdrachtsfunctie (vergelijk ook continue overdrachtsfunctie, par. 1.6):

$$H(z) = \frac{U(z)}{I(z)} = \frac{b_m z^{-m} + \ldots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_n Z^{-n} + \ldots + a_1 z^{-1} + a_0}$$

Dit systeem is *stabiel* als de wortels (polen) van de karakteristieke vergelijking binnen de eenheidscirkel in het complexe vlak liggen.

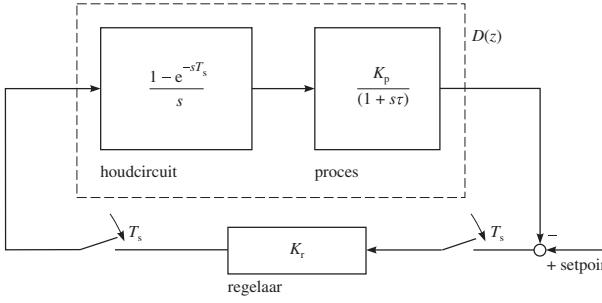
$$a_n z^{-n} + \ldots + a_1 z^{-1} + a_0 = (1 - z_n z^{-n}) \times \ldots \times (1 - z_1 z^{-1}) \times a_0$$

Stabiliteitseis: $|z_i| < 1$



Figuur 3.12 Faseverschuiving door bemonstering

Indien de tijdconstanten van het te regelen proces dezelfde orde van grootte hebben als de bemonstertijd, treedt door bemonstertijd, treedt door bemonstering eerder (o.a. voor lagere K_r-waarden) instabiliteit op dan in de niet-bemonsterde situatie. Dit wordt mede veroorzaakt doordat bij bemonstering tesamen met een houdcircuit een faseverschuiving optreedt, die soms ook beschouwd wordt als een looptijd van $\frac{1}{2} T_s$.



Figuur 3.13 Digitale regeling van eerste-orde proces met P-regelaar

Voorbeeld regeling van een eerste-orde systeem:

$$D(z) = K_p \frac{(1-\beta)z^{-1}}{(1-\beta z^{-1})} \qquad \beta = e^{-T_s/\tau}$$

De karakteristieke vergelijking is: $D(z)K_r + 1 = 0$ en heeft als wortel $z = -K_r K_p(1-\beta) + \beta$.

Met voorwaarde $|z| < 1$ geeft:

$$-1 \leqslant K_r K_p \leqslant \frac{1 + e^{-T_s/\tau}}{1 - e^{-T_s/\tau}}$$

T_s/τ	$K_r K_{p\ max}$
0,1	20,0
0,2	10,0
0,5	4,0
0,8	2,6
1,0	2,2
10,0	1,0

In de niet-bemonsterde situatie geldt: $-1 \leqslant K_r K_p \leqslant \infty$

4 Besturingstechniek

4.1 Algemeen

Besturingstechnieken
Besturingstechnieken worden toegepast in zelfwerkende en geautomatiseerde (productie-)processen en omvatten:
– logisch ordenen van schakelvoorwaarden;
– logisch verwerken van signalen uit het proces;
– geven van commando's naar het proces;
– aandrijving (pneumatisch, elektrisch, hydraulisch).

De *digitale besturing* van een proces verloopt volgens een logische schakeling of programma en werkt met behulp van digitale signalen. De besturing kan worden uitgevoerd met pneumatische, elektrische (relais) of elektronische componenten, of met een PLC.

Normen
De belangrijkste normen op dit gebied zijn:

NEN 3348	Hydraulische en pneumatische systemen en componenten.
NEN 5152	Elektrotechnische symbolen.
NPR 5160	Elektrotechnische tekeningen. Het tekenen van logicaschema's.
NEN 5848	Het opstellen van functiediagrammen voor automatische systemen.
IEC 848	Preparation of function charts for control systems.

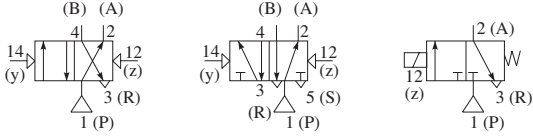
4.2 Symbolen

In de besturingstechniek zijn van belang:
– Pneumatische en hydraulische symbolen, zie hierna.
– Logische symbolen, zie hoofdstuk B1 *Informatica-techniek*, par. 1.
– Elektrotechnische symbolen, zie pag. B2/65 en hoofdstuk G4 *Elektro-installatietechniek*, par. 5.

Pneumatische en hydraulische symbolen

Tabel 4.1 Poortcoderingen van pneumatische ventielen

poort	lettercode	cijfercode (ISO)
voeding	P	1
uitgangen	A; B	2; 4
ontluchtingen	R; S	3; 5
stuurlucht	z; y	12; 14



14: 1→4 en 2→3	14: 1→4 en 2→5	12: 1→2
12: 1→2 en 4→3	12: 1→2 en 4→3	$\overline{12}$: 2→3

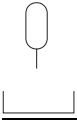
Figuur 4.1 Poortcoderingen, voorbeelden

Tabel 4.2 Pneumatische en hydraulische symbolen

leidingen			
	werkdrukleiding stuurdruktoevoerleiding retourleiding		smoring
	stuurleiding, commandoleiding lekleiding, ontluchtleiding		regelbare smoring
	snelkoppeling		
	leidingverbinding		pneumatische energiebron
	leidingkruising		hydraulische energiebron
	mechanische koppeling		
	drukvat/gesloten reservoir		geluiddemper

Tabel 4.2 (vervolg)

reservoirs

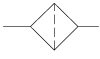


accumulator

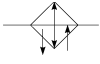
open reservoir

leiding boven, resp. onder vloeistofniveau

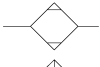
conditioneren



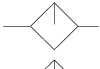
filter



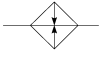
koeler



luchtdroger



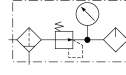
smeertoestel



verwarmings apparaat

waterafscheider handbediend

waterafscheider automatisch



lucht-conditioneringseenheid vereenvoudigd

motoren, compressoren, pompen, cilinders (energie-omvormers)

▽ (open): gas ▼ (dicht): vloeistof

motor met één draairichting

motor met één draairichting, regelbaar

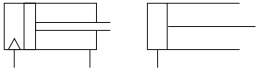
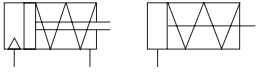
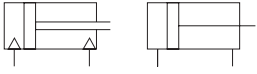
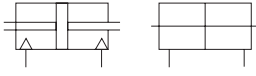
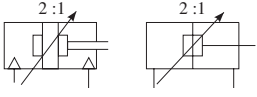
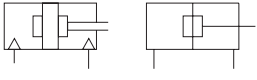
zwenkcilinder/ motor

motor met twee draairichtingen

motor met twee draairichtingen, regelbaar

compressor

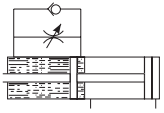
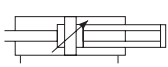
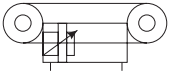
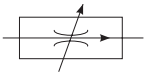
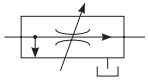
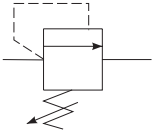
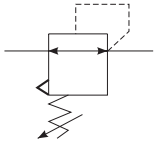
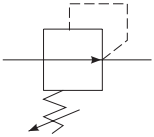
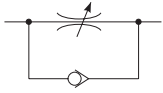
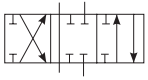
Tabel 4.2 (vervolg)

	enkelwerkende cilinder
	enkelwerkende clinder veerretour
	dubbelwerkende clinder zonder bufering
	dubbelwerkende cilinder met doorlopende zuigstang
	dubbelwerkende cilinder met instelbare buffering aan twee zijden (zuiger oppervlak verhouding 2:1)
	dubbelwerkende cilinder met vaste buffering aan twee zijden

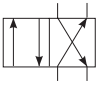
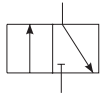
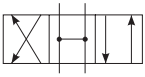
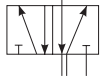
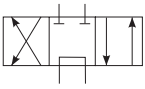
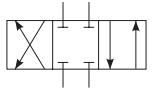
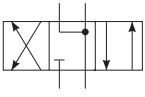
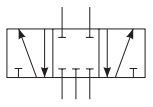
blokkeerventielen

	terugslagklep		wisselventiel (OR-functie)
	veerbelaste terugslagklep		terugslagklep besturing kan klep openen c.q. openhouden
	terugslagklep besturing kan klep sluiten c.q. gesloten houden		tweedrukventiel (AND-functie)

Tabel 4.2 (vervolg)

 olie-lucht-cilinder met regelbare ingaande slag	 cilinder met één-zijdige dubbele zuigerstang en dubele buffering
 kabelclinder met dubbele buffering	balgcilinder
regelkleppen	
 instelbare stroomregelklep (serie-uitvoering)	 instelbare stroomregel-klep met over-stort (parallel-uitvoering)
 drukregelklep volgordeklep overstroomklep	 reduceerklep met correctie uitlaat
 reduceerklep	 instelbare doorstroom-regelklep
stuurschuiven, stuurventielen	
2/2 schuif normaal geopend	 6/3 schuif
3/2 schuif normaal geopend (NOT-functie)	2/2 schuif normaal gesloten

Tabel 4.2 (vervolg)

	4/2 schuif		3/2 schuif normal gesloten (YES-functie)
	4/3 schuif		5/2 schuif
	4/3 schuif		4/3 schuif
	4/3 schuif		5/3 schuif

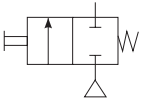
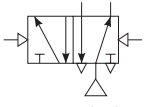
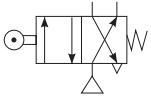
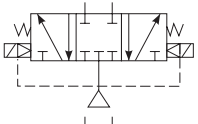
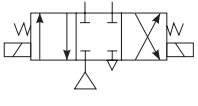
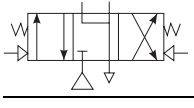
bedieningen

	drukknop		veer
	pedaal		sleutel
	hefboom		rol
	hefboom met arrettering		indirect elektrisch
	draaiknop		direct elektrisch
	lucht door druk-verhoging		taster

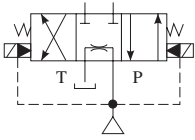
Tabel 4.2 (vervolg)

	hydraulisch door drukverhoging		lucht door drukverlaging
	indirect elektrisch		hydraulisch door drukverlaging

voorbeelden

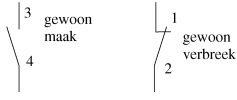
	2/2 stuurschuif normaal gesloten drukknop bediend veerretour
	5/2 stuurschuif dubbel lucht- bediend, bistabiel
	4/2 stuurschuif rolbediend veerretour, monostabiel
	5/3 stuurschuif, dubbel indirect elektrisch bediend met automatische middenstand
	4/3 stuurschuif, dubbel direct elektrisch bediend met automatische middenstand
	4/3 stuurschuif, dubbel lucht- bediend met automatische middenstand en ontluchte arbeidsleidingen in middenstand

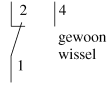
Tabel 4.2 (vervolg)



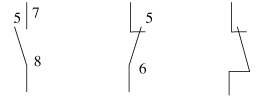
4/3 stuurschuif, dubbel
indirect elektrisch bediend

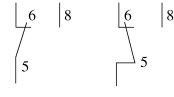
Cijfercodering voor elektrische contacten





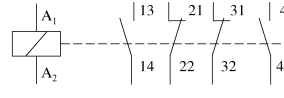
maak-, verbreek- en wisselcontacten
met bijzondere bediening, bijv. tijd-
relais





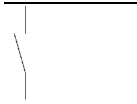
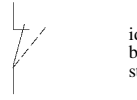
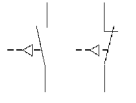
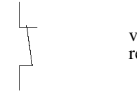
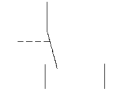
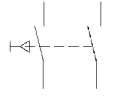
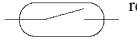
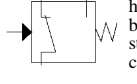
spoel

voorbeeld



1e cijfer: plaatsnummer
2e cijfer: functienummer

Tabel 4.3 Elektrotechnische symbolen (zie ook hfdst. G4, par. 5)

schakelcontacten	
 basissymbool maakcontact, onbediend	basissymbool verbreekcontact, onbediend
idem, bediend	 idem, mechanisch bediend in rust-stand van machine
bistabiele bediening	maakcontact, relaisbediend
 monostabiele bediening (veerretour)	 verbreekcontact, relaisbediend
 wisselcontact, bistabiel bediend	wisselcontact, relaisbediend
 dubbelpolige schakelaar, monostabiel bediend	 reedcontact
pneumatisch bediend, monostabiel wisselcontact	 hydraulisch bediend, mono-stabiel wissel-contact

Tabel 4.3 (vervolg)

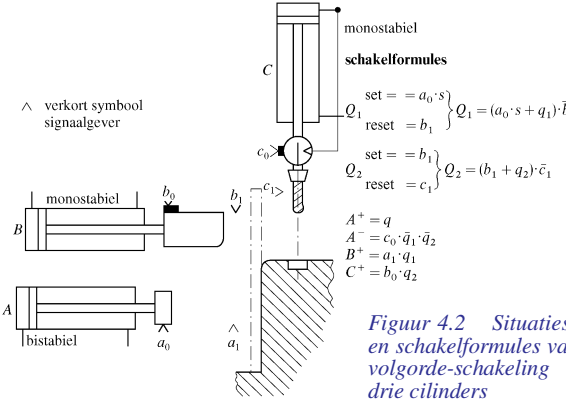
bedieningen		**diversen**	
	stift		elektromotor
	vertraagd opkomend		diode
	rol		signaallamp
	voet, pedaal		relaisspoel
	sleutel		spoel van relais met afvalvertraging
	vertraagd afvallend		spoel van relais met opkomvertraging
	hand		
	hefboom		

4.3 *Schema's*

Tekenregels

Pneumatische schema's:
- informatiestroom van beneden naar boven;
- tekenen in ruststand van machine of installatie;
- in ruststand mechanisch bediende signaalgevers worden bediend getekend;
- verdelen in drie overzichtelijke van elkaar gescheiden delen (signalen, logische besturing en aandrijving).

Elektrische stroomkringschema's:
- tekenen in rusttoestand van machine of installatie;
- contacten die in ruststand bediend zijn, worden ook bediend getekend met een streeplijn;
- tekenen in spanningsloze toestand, zodat contacten van relais altijd in onbediende toestand worden getekend;
- alleen elektrisch besturingsgedeelte weergeven (dus geen pneumatische ventielen e.d.);
- spoel en contacten van een relais los van elkaar tekenen;
- stroomkringen op vaste afstanden van elkaar tekenen tussen de fasen (+ en 0, of + en −, of L en N);

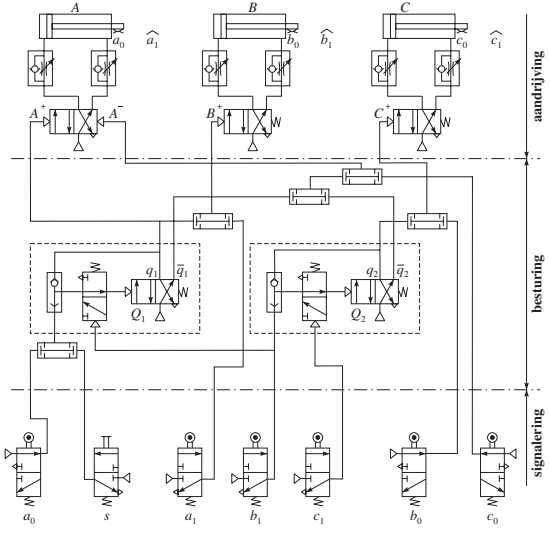


Figuur 4.2 Situatieschets en schakelformules van een volgorde-schakeling van drie cilinders

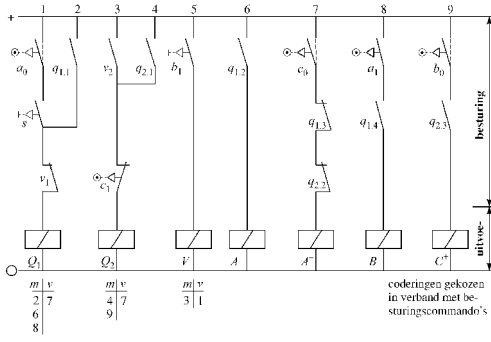
– alle uitvoeringsorganen zoals spoelen, lampen, e.d. onderin de stroomkringen tekenen.

Logische schema's:
– informatiestroom van links naar rechts of van boven naar beneden;
– alleen logische functies en hun relaties tekenen (dus geen spoelen, lampen e.d.);
– symboolblokken alleen indien noodzakelijk langer tekenen;
– het aantal ingangen bij een logische functie is onbeperkt.

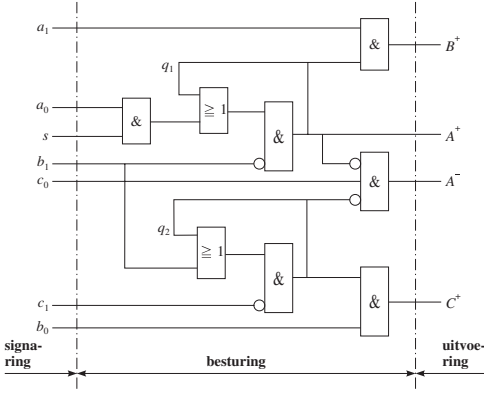
Voorbeeld
Uitgangspunt is figuur 4.2; figuur 4.3 t/m 4.5 geven de besturingsschema's. Voor het afleiden van de schakelformules, zie par. 4.3.



Figuur 4.3 Pneumatisch schema bij figuur 4.2



Figuur 4.4 Elektrisch stroomkringschema bij figuur 4.2



Figuur 4.5 Logisch schema bij figuur 4.2

4.4 *Sequentiële schakelingen*

Sequentiële schakelingen: de bewegingen van de uitvoerorganen verlopen volgens een vast patroon (bijv. verpakkingsmachines).

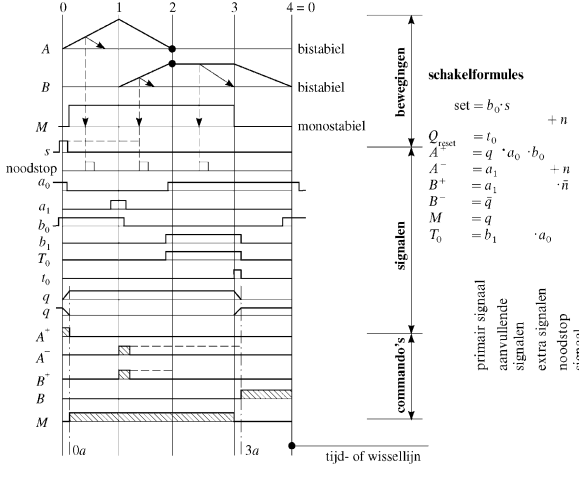
W-S-T diagram

Het *Weg-Signaal-Tijd diagram* is een grafische weergave van de bewegingen, signalen en commando's van een volgordeschakeling, gezien in de tijd. Zie bijv. figuur 4.6.

Bepalen schakelformules

Bij het bepalen van de *schakelformules* volgens de 'schakelformule-methode' gelden de volgende regels:

– noteer achter het commando eerst het primaire signaal (het signaal dat juist '1' is geworden);



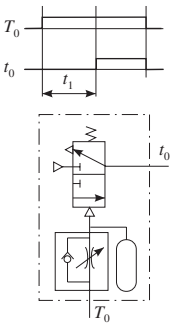
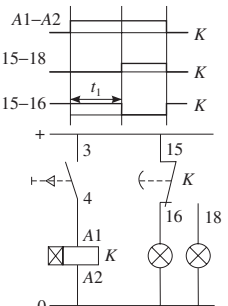
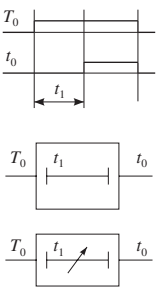
Figuur 4.6 Weg-Signaal-Tijd diagram voor de beweging van twee cilinders en een motor

- een primair signaal dat niet de goede lengte heeft om als commando te fungeren, kan resp. worden verkort door een aanvullend signaal met een EN-functie toe te voegen, of verlengd door een signaal met een OF-functie toe te voegen;
- extra signalen dienen om de volgordebeweging in gang te zetten (start s) en om extra voorwaarden aan de cyclus toe te voegen (bijv. de voorwaarde dat een nieuwe beweging pas mag beginnen als alle voorgaande bewegingen zijn uitgevoerd; zie in figuur 4.6 de stippen op tijdlijn 2 en de schakelformule voor T_0 waar het primaire signaal a_0 als extra signaal is toegevoegd);
- het startsignaal mag in het algemeen alleen invloed hebben op tijdlijn 0 (het signaal kan dan alleen maar voorkomen in commando's die op deze tijdlijn beginnen);
- elk commando wordt uitgevoerd met een minimum aantal signalen;
- bij bistabiele bedieningsorganen mogen het plus- en het min-commando elkaar niet overlappen;
- als op tijdlijn 0 een monostabiel uitvoerorgaan start, is een startgeheugen noodzakelijk;
- als bij het indrukken van de noodstop alle uitvoerorganen naar de ruststand moeten terugkeren, gelden deze regels:
  - maak monostabiel bediende uitvoerorganen afhankelijk van een geheugen en reset het geheugen met de noodstop (*reset dominant*);
  - als het plus-commando van een bistabiel commando niet afhankelijk is van een geheugen, het signaal EN $\overline{n}$ toevoegen;
  - als het min-commando van een bistabiel uitvoerorgaan niet afhankelijk is van een geïnverteerd geheugen-signaal, het signaal OF n toevoegen.

Tijdschakelingen

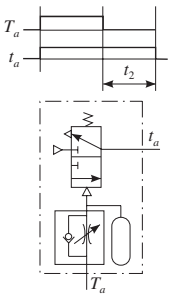
Zie tabel 4.4, pag. B2/73

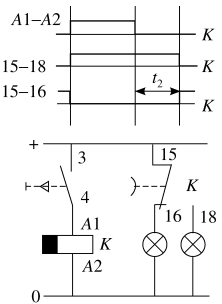
Tabel 4.4 Tijdschakelingen en symbolen

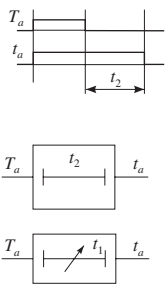
pneumatisch	elektrisch	logisch
opkomtijd-vertrager		
		

Tabel 4.4 (vervolg)

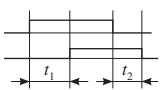
afvaltijd-vertrager

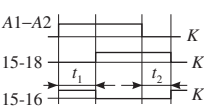


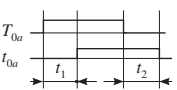




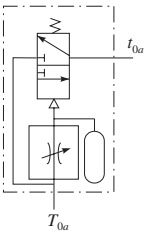
opkom/afval-vertrager

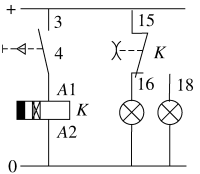


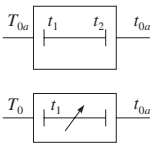




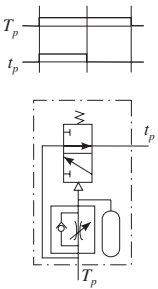
Tabel 4.4 (vervolg)

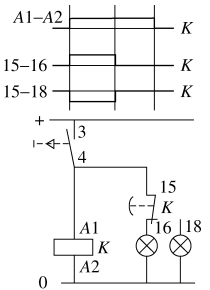


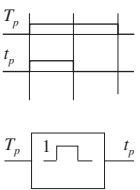




pulsgenerator (one shot)

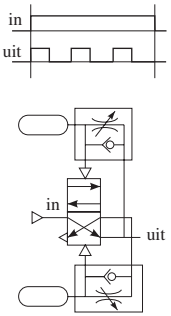


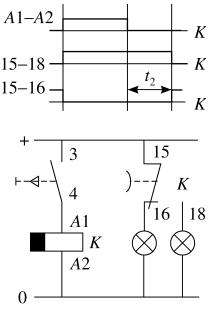


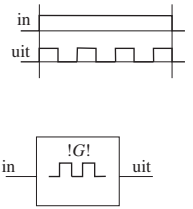


Tabel 4.4 (vervolg)

pulsgenerator



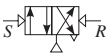
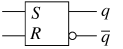
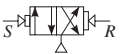
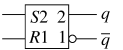
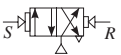
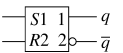
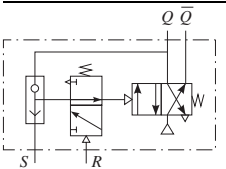
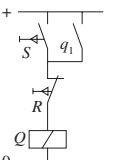
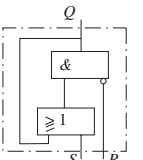
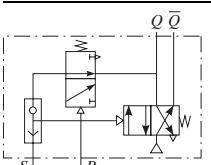
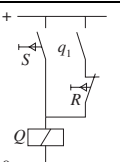
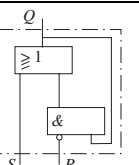




Geheugens

In de besturingstechniek wordt gebruik gemaakt van *geheugens* voor het onthouden van (te) korte signalen en het ongelijkmaken van gelijke signaalcombinaties. Tabel 4.5 geeft een overzicht van de belangrijkste geheugens en geheugenschakelingen. Zie ook hoofdstuk B1 *Informatica-techniek* par. 1.6.

Tabel 4.5 Geheugens in de besturingstechniek

pneumatisch	elektrisch	logisch	opmerking
			geheugenelement zonder dominantie
			geheugenelement reset dominant
			geheugenelement set dominant
			geheugenschakeling reset dominant $\overline{Q} = (\text{set} + q) \cdot \overline{\text{reset}}$
			geheugenschakeling set dominant $\overline{Q} = (\text{set} + q) \cdot \overline{\text{reset}}$

Sequential Function Chart (SFC)

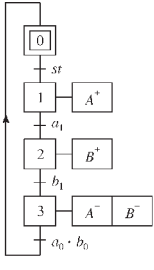
Het weergeven van een volgordeschakeling volgens het principe van de stappenbesturing kan worden weergegeven in een *Sequential Function Chart*. Zie figuur 4.7 t/m 4.12. SFC's zijn genormaliseerd in NEN 5848.

Regels

- fasen in het besturingsproces zijn onderverdeeld in elementaire stappen;
- stappen worden na elkaar geactiveerd met behulp van schuifvoorwaarden, of overgangen;
- stap wordt geactiveerd door de voorgaande stap EN en de schuifvoorwaarde(n);
- stap wordt gereset door z'n opvolger;
- commando wordt uitgevoerd zolang de desbetreffende stap actief is;
- in het diagram worden de stappen in een vierkant genoteerd, de paraatstap aan het begin of einde van de cyclus in een dubbel vierkant;
- naast de stappen worden de acties in code of beschrijvend genoteerd;
- voeg een initialiseringssignaal (ini) aan de set van de paraat-stop toe, echter niet in de chart.

Overige schakelingen

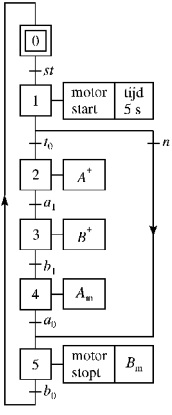
- stappenschakeling, zie figuur 4.13, pag. B2/83.



geheugen	set	reset
Q_0	$q_3 \cdot a_0 \cdot b_0 +$ ini	q_1
Q_1	$q_0 \cdot st$	q_2
Q_2	$q_1 \cdot a_1$	q_3
Q_3	$q_2 \cdot b_1$	q_0

(bistabiel) $A^+ = q_1$
(bistabiel) $B^+ = q_2$
$A^- = q_3$
$B^- = q_3$

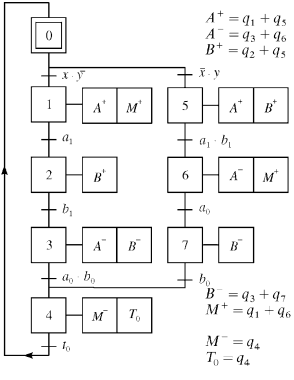
Figuur 4.7 Grafcet functiediagram zonder herhaling



geheugen	set	reset
Q_0	$q_5 \cdot b_0 + \text{ini}$	q_1
Q_1	$q_0 \cdot st$	$q_2 + q_5$
Q_2	$q_1 \cdot t_0$	q_3
Q_3	$q_2 \cdot a_1$	q_4
Q_4	$q_3 \cdot b_1$	q_5
Q_5	$q_4 \cdot a_0 + q_1 \cdot n$	q_0

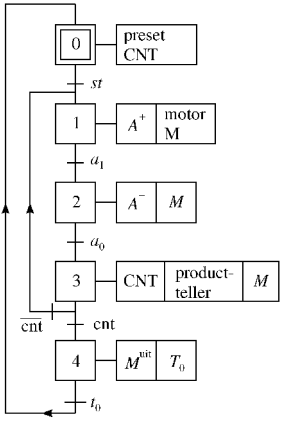
$T_0 = q_1$
(monostabiel) $M = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$
(monostabiel) $A^+ = q_2 + q_3$
(monostabiel) $B^+ = q_3 + q_4$

Figuur 4.8 Grafcet functiediagram met voorwaardelijke sprong



geheugen	set	reset
Q_0	$q_4 \cdot t_0 + \text{ini}$	$q_1 + q_5$
Q_1	$q_0 \cdot x \cdot \bar{y}$	q_2
Q_2	$q_1 \cdot a_1$	q_3
Q_3	$q_2 \cdot b_1$	q_4
Q_4	$q_3 \cdot a_0 \cdot b_0 + q_7 \cdot b_0$	q_0
Q_5	$q_0 \cdot \bar{x}_0 \cdot y$	q_6
Q_6	$q_5 \cdot a_1 \cdot b_1$	q_7
Q_7	$q_6 \cdot a_0$	q_4

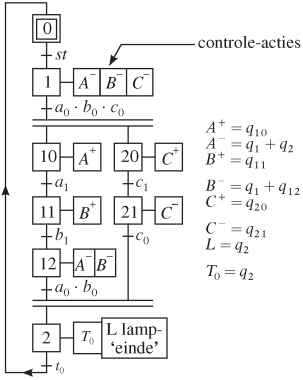
Figuur 4.9 Grafcet functiediagram met vertakking (OF-divergentie)



geheugen	set	reset
Q_0	$q_4 \cdot t_0 + \text{ini}$	q_1
Q_1	$q_0 \cdot st + q_3 \cdot \overline{\text{cnt}}$	q_2
Q_2	$q_1 \cdot a_1$	q_3
Q_3	$q_2 \cdot a_0$	$q_4 + q_1$
Q_4	$q_3 \cdot \text{cnt}$	q_0

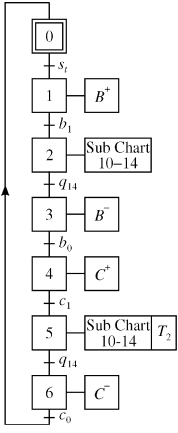
$A^+ = q_1$
$A^- = q_2$
$M^{\text{aan}} = q_1 + q_2 + q_3$
$T_0 = q_4$
preset $= q_0$
CNT
telpuls $= q$

Figuur 4.10 Grafcet functiediagram met voorwaardelijke herhaling



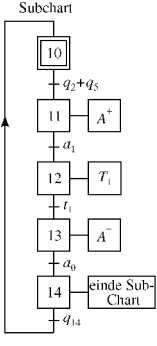
geheugen	set	reset
Q_0	$q_2 \cdot t_0 + \text{ini}$	q_1
Q_1	$q_0 \cdot st$	$q_{10} \cdot q_{20}$
Q_2	$q_{12} \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot q_{21} \cdot c_0$	q_0
Q_{10}	$q_1 \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot c_0$	q_{11}
Q_{11}	$q_{10} \cdot a_1$	q_{12}
Q_{12}	$q_{11} \cdot b_1$	q_2
Q_{20}	$q_1 \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot c_0$	q_{21}
Q_{21}	$q_{20} \cdot c_1$	q_2

Figuur 4.11 Grafcet functiediagram met gelijktijdig bedrijf van meerdere takken (EN-divergentie)



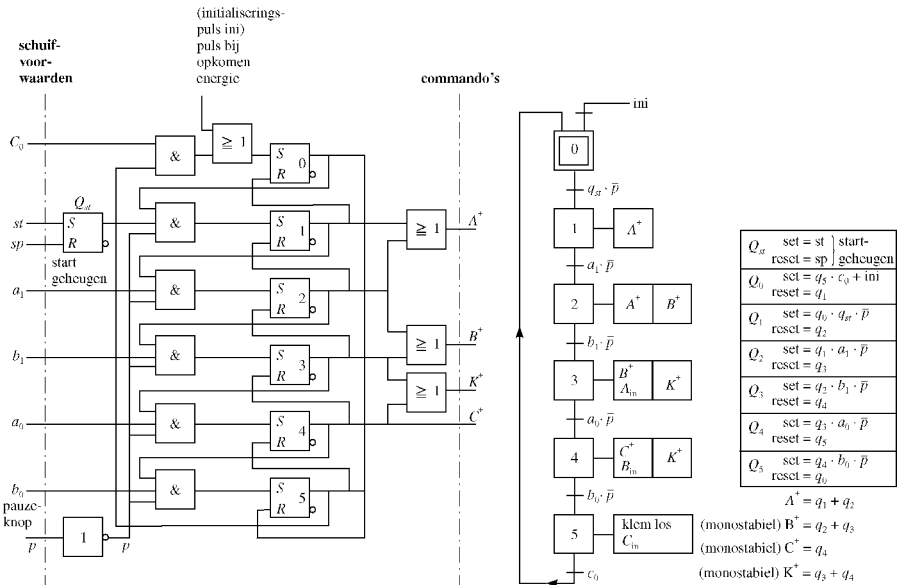
geheugen	set	reset
Q_0	$q_6 \cdot c_0 + \text{ini}$	q_1
Q_1	$S = q_0 \cdot s_1$	q_2
Q_2	$q_1 \cdot b_1$	q_3
Q_3	$q_2 \cdot q_{14}$	q_4
Q_4	$q_3 \cdot b_0$	q_5
Q_5	$q_4 \cdot c_1$	q_6
Q_6	$q_5 \cdot q_{14}$	q_0

$A^+ = q_{11}$ $\quad A^- = q_{13}$
$B^+ = q_1$ $\quad B^- = q_3$
$C^+ = q_4$ $\quad C^- = q_6$
$T_1 = q_{12}$ $\quad T_2 = q_5$



geheugen	set	reset
Q_{10}	$q_{14} + \text{ini}$	q_{11}
Q_{11}	$q_{10} \cdot (q_2 + q_5)$	q_{12}
Q_{12}	$q_{11} \cdot a_1$	q_{13}
Q_{13}	$q_{12} \cdot t_1$	q_{14}
Q_{14}	$q_{13} \cdot a_0$	q_{10}

Figuur 4.12 Sequential Function Chart met sub-chart



Figuur 4.13 Voorbeeld van een logisch uitgevoerde stappenschakeling) (zie ook pag. B2/84)

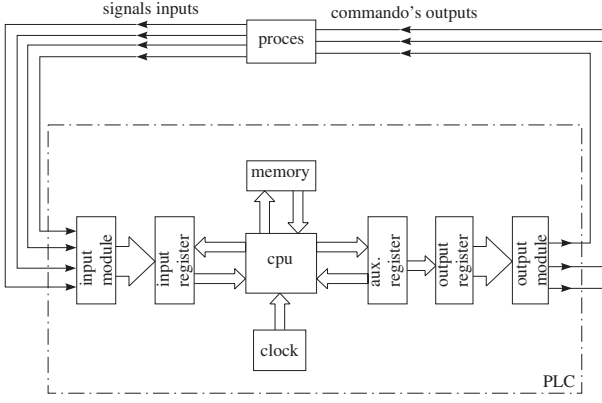
4.5 *Combinatorische schakelingen*

Combinatorische schakelingen: geven het uitgangssignaal zodra een van te voren bepaalde signaalcombinatie op de ingang aanwezig is; de volgorde waarin de ingangssignalen binnenkomen is niet van belang. De van belang zijnde combinatie van ingangssignalen kan worden omschreven in een schakelformule. Deze kan langs wiskundige weg worden vereenvoudigd. Combinatorische schakelingen komen voor in sorteerschakelingen. Hierbij wordt veel gebruik gemaakt van Karnaugh-diagrammen of van de propositielogica (zie hoofdstuk B1 *Informatica-techniek*).

5 PLC-techniek

5.1 Algemeen

Een procesbesturing kan worden uitgevoerd met behulp van een *Programmable Logic Controller (PLC)*. Een PLC is een elektronisch besturingssysteem dat een aantal binnenkomende signalen (*input*) logisch verwerkt met behulp van een programma (*software*) en na bewerking uitgangen (*output*) aanstuurt.



Figuur 5.1 Schematische opbouw van een PLC

5.2 Programmeren

Het *programmeren* van de diverse PLC's die op de markt zijn, gebeurt volgens verschillende principes:

- Boole-schakelformules rechtstreeks invoeren;
- programmeren via een *ladderdiagram* (zie tabel 5.3).

Een moderne ontwikkeling is het programmeren van de PLC via een programma op een PC. Ook is het mogelijk om op een PC het SFC

van een besturing te ontwerpen, waarna het PLC-programma automatisch wordt gegenereerd.

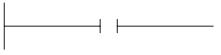
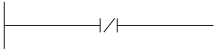
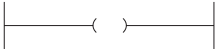
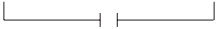
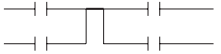
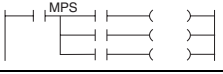
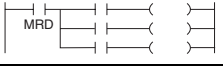
Tabel 5.1 Eigenschappen PLC, relaisbesturing en elektronische bouwstenen

eigenschappen	PLC	relais-besturing	elektronische bouwstenen
inbouwtijd	zeer kort	zeer lang	kort
schakelsnelheid	laag	laag	hoog
schakeltechn. mog.	uitgebreid	beperkt	uitgebreid
flexibiliteit	groot	gering	gering
onderhoud	geen	wel	geen
levensduur	vrijwel onbeperkt	beperkt	vrijwel onbeperkt
gevoeligheid (t.a.v. milieu)	ongevoelig	gevoelig	ongevoelig

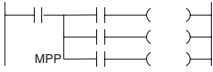
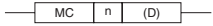
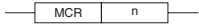
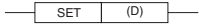
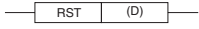
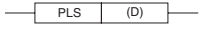
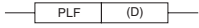
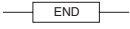
Tabel 5.2 Overzicht beoordelingscriteria PLC's

kosten van een minimum-systeem	cyclustijd van de PLC
kosten programmeereenheid	tekstweergave
aantal digitale inputs	mogelijkheden voor PID-regeling
aantal digitale outputs	seriële communicatie met computer
aantal analoge inputs	mogelijkheid hiërarchische werking
aantal analoge outputs	programmeertaal
spanningsniveaus inputs en outputs	rekenmogelijkheden
afstand I/O-modules van PLC	geheugenomvang
aantal timers	gebruikersvriendelijkheid
aantal counters	

Tabel 5.3 Basisinstructies voor PLC's

aanduiding	contactsymbool	functie[1)]
LD		begin van een bewerking (NO-contact) X, Y, M, S, T, C
LDI		begin van een bewerking (NC-contact) X, Y, M, S, T, C
OUT		uitvoerinstructie resultaat van een bewerking Y, M, S, T, C
AND		AND-bewerking met NO-contact (serie schakeling) X, Y, M, S, T, C
ANI		AND-bewerking met NO-contact (serie schakeling) X, Y, M, S, T, C
OR		OR-bewerking met NO-contact (parallelschakeling) X, Y, M, S, T, C
ORI		OR-bewerking met NC-contact (parallelschakeling) X, Y, M, S, T, C
ANB		samenvoeginstructie serie-schakeling van parallelbewerkingen
ORB		samevoeginstructie, parallel-schakeling van seriebewerkingen
MPS		opslaan van een bewerkingsresultaat
MRD		lezen van een bewerkingsresultaat

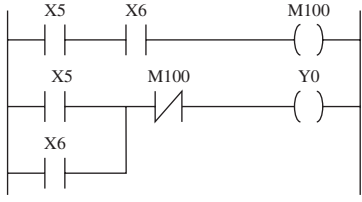
Tabel 5.3 (vervolg)

aanduiding	contactsymbool	functie[1)]
MPP		lezen en wissen van een bewerkingsresultaat
MC		activeren van een gemeenschappelijke besturingsconditie Y, M
MCR		resetten van een gemeenschakelijke besturingsconditie
SET		activeren van operands Y, M, S
RST		resetten van operands Y, M, S, D, V, Z, C
PLS		genereren van plus op opgaande flank Y, M
PLF		genereren van plus op neergaande flank Y, M
NOP		programmeren van lege regel
END		einde van PLC-programma

[1)] Symbolentoelichting: X = ingangssignaal, Y = uitgangssignaal, M = merker, geheugen, S = operant, T = timer, C = counter, D = data register, V = index register, Z = index register, NO = normaal open (maak contact), NC = normaal gesloten (verbreek contact)

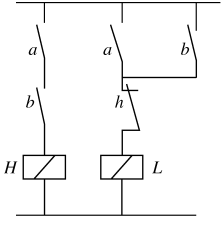
Bron: Geveke Electronics b.v., Amsterdam

Programmeervoorbeelden



regel	instr.	adres
0	LD	X5
1	AND	X6
2	OUT	M100
3	LD	X5
4	OR	X6
5	ANI	M100
6	OUT	Y0
7	END	

Figuur 5.2 Programma uit ladderdiagram



$L = \overline{a \cdot b} \cdot (a + b)$
addressen :
L = Y0
H = M100
a = X5
b = X6
h = M100

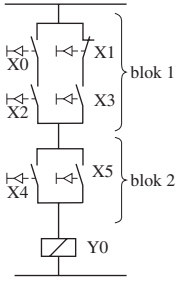
regel	instr.	adres
0	LD	X5
1	AND	X6
2	OUT	M100
3	LD	X5
4	OR	X6
5	ANI	M100
6	OUT	Y0
7	END	

Figuur 5.3 Programma uit stroomkringschema

$$\begin{aligned} &\text{set} = b_0 \cdot a_0 \cdot s \\ Q& \\ &\text{reset} = a_1 \\ Q \quad &= (a_0 \cdot b_0 \cdot s + q) \cdot \overline{a}_1 \\ A^+ \quad &= q \\ B^+ \quad &= a_1 \\ B^- \quad &= a_0 \cdot b_1 \end{aligned}$$

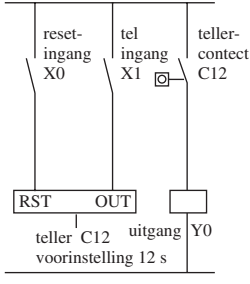
regel	instr.	adres	commentaar
0	LD	X1	load a_0
1	AND	X3	$\cdot \quad b_0$
2	AND	X0	$\cdot \quad s$
3	OR	M100	+ merker (overneem)
4	ANI	X2	$\cdot \quad \overline{a}_1$
5	OUT	M100	= merker
6	LD	M100	load merker
7	OUT	Y0	$= A^+$
8	LD	X2	load a_1
9	OUT	Y1	$= B^+$
10	LD	X1	load a_0
11	AND	X4	$\cdot \quad b_1$
12	OUT	Y2	$= B^-$
13	END		einde programma

Figuur 5.4 Programma uit schakelformules



regel	instr.	adres	comm.
0	LD	400	load X0
1	AND	402	· $\overline{X2}$
2	LDI	401	load $\overline{X1}$
3	AND	403	· X3
4	ORB		(+)
5	LD	404	load X4
6	OR	405	+ X5
7	ANB		(.)
8	OUT	430	= Y0
9	END		einde programma

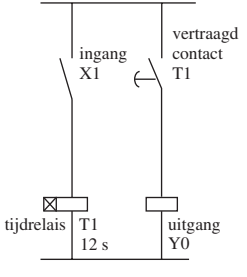
Figuur 5.5 Toepassing OR-blok en AND-blok



regel	instr.	adres
0	LD	X0
1	RST	C12
2	LD	X1
3	OUT	C12
4	K	K12
5	LD	C12
6	OUT	Y0
7	END	

K = aantal

Figuur 5.6 Telfunctie



regel	instr.	adres
0	LD	X1
1	OUT	T1
2	K	12
3	LD	T1
4	OUT	Y0
5	END	

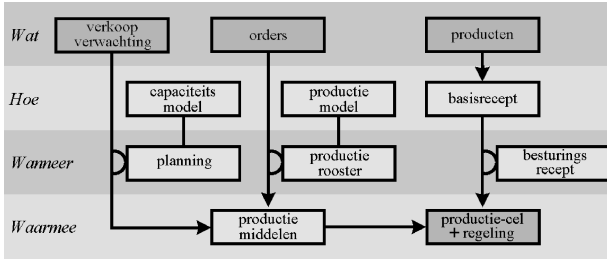
K = tijd [s]

Figuur 5.7 Tijdfunctie

6 Implementatie van besturingssystemen

6.1 Geïntegreerde productie-automatisering: CIM enCIP

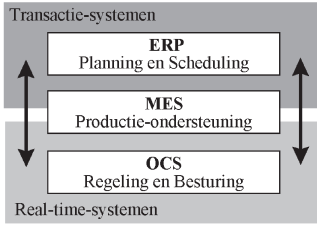
In de discrete fabricage en procesindustrie ondersteunen een reeks van operationele functies de besturing van het productieproces, zoals: de planning van de verkoop, de verroostering (scheduling) van de klantenorders of interne orders en de besturing van het productieproces zelf. Planning, verroostering, en procesbesturing beelden respectievelijk het verkoopvooruitzicht, de orders en het specifieke productrecept af op het productie-apparaat (figuur 6.1). Verder zijn er productiegerelateerde functies, zoals: product-en procesontwikkeling, kwaliteitsbewaking en onderhoud van het productie-apparaat. Een systeem dat een samenhangend geheel vormt van operationele en productiegerelateerde functies wordt bij discrete fabricage, Computer Integrated Manufacturing (CIM) en bij de procesindustrie, Computer Integrated Processing (CIP) genoemd.



Figuur 6.1 Diagram dat de basisrelalaties weergeeft van een productieproces

De operationele en productiegerelateerde functies van een productieproces kunnen hiërarchisch geordend worden naar gelang hun tijdshorizon en de omvang van de beschouwde productiecel. Figuur 6.2 geeft de traditionele opbouw weer in drie hiërarchische operationele lagen. Functies t.a.v. de Enterprice Resource Planning

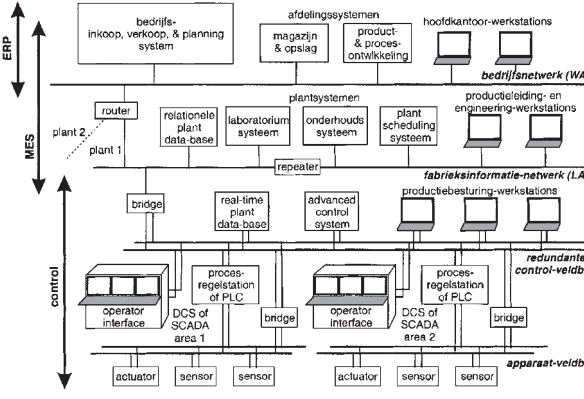
(ERP) zoals planning en verroostering bestrijken een relatief lange termijn en een grote productiecel, zoals een plant of site. Zij hebben een hoog perspectief en abstractie en Zij worden "op kantoor" uitgevoerd m.b.v, transactiesystemen. De berekeningen zijn gecompliceerd en de betrokken data omvangrijk.



Figuur 6.2 Hiërarchische indeling van de besturings-en ondersteuningssystemen: ERP, (MES), en Open Control Systems (OCS)

Het tijdstip waarop de functie wordt uitgevoerd is niet kritisch en is niet direct van belang voor het productieverloop. De productiebesturing en procesregeling daarentegen hebben een beperkte view en scope. Zij vinden "in de fabriek" plaats en zijn real-time van aard. Een belangrijk deel van de informatie komt direct uit het proces en het tijdstip van de responsie op nieuwe informatie heeft weer direct invloed op het proces. Tussen de ERP-functies en de productiebesturing bevinden zich de MES functies. Onder de paraplu van Manufacturing Execution Systems (MES) worden een steeds groeiend aantal functies gerekend. Besturingsfuncties zoals product-tracking, on-line-scheduling, kwaliteitsbewaking en receptoptimalisatie hebben karakteristieken van transactie- en van real-time-systemen. Dat geldt eveneens voor een aantal productiegerelateerde functies. Transactie- en real-time-systemen stellen verschillende eisen t.a.v. de implementatie en met name t.a.v. netwerken. Bij een sterk geïntegreerd systeem zijn de grenzen tussen de lagen niet scherp.

Transactiesystemen werken vooral met databestanden. Zij kenmerken zich door een a-cyclisch berichtenverkeer. Bij real-time-systemen daarentegen ligt de nadruk vooral op besturingsfunctionaliteit en kennen vooral een cyclisch berichtenverkeer. Daar gelden vooral voorwaarden t.a.v. snelheid, synchronisatie en consistentie. De verschillende eisen t.a.v. de systemen vertaalt zich in verschillende implementaties van de functies, databestanden en communicatienetwerken. Ook economische aspecten spelen een rol.



Figuur 6.3 Voorbeeld van een CIP-systeem met laag 1: bedrijfsnetwerk (ERP MES), laag 2: fabrieksnetwerk (MES) en laag 3 & 4: besturingsnetwerken

1. Bedrijfsniveau.
   De systemen op dit niveau zijn gekoppeld m.b.v. een Wide Area Network (WAN). Dit type netwerk verbindt transactiesystemen over grotere afstanden. Tegenwoordig zijn deze netwerken vrijwel altijd gebaseerd op Ethernet. Het netwerk is meestal

van het boom- of bustype. De bekabeling is dan meestal ‘‘twisted pair’’, respectievelijk coax. Om grotere afstanden te overbruggen worden glasvezel of telefoonverbindingen toegepast. De meeste commerciële architectuur is van het client-server type. Deze voorziet in Application Programming Interfaces (API’s) waarmee applicaties onderling kunnen communiceren. Een API is een set van routines en protocols om software applicaties te bouwen.

2. Fabrieksniveau.
   De systemen op fabrieksniveau zijn gekoppeld middels een Local Area Network (LAN). Ook dit type netwerk dient voor transactiesystemen. Ook deze netwerken zijn veelal gebaseerd op Ethernet en berusten op een client-server architectuur.
3. Besturingsniveau.
   Op dit niveau worden zogenaamde veldbussen toegepast. Deze bieden meer op real-time-systemen afgestemde services. Veldbussen worden niet alleen in productiebedrijven gebruikt, maar ook in gebouwautomatisering, tuinbouwkasbeheersing, machinebesturing en laboratoriumautomatisering. Een duidelijke definitie voor veldbus is niet te geven. Het aanbod is zeer divers en vernieuwt zich continu. Er zijn drie sub-niveaus te onderscheiden:

– Control-veldbus of control-LAN
  Dit is een LAN-achtig netwerk dat zowel transactie- als real-time-netwerkverkeer aan kan. Hiermee worden operatorstations, PLC’s en regelstations onderling gekoppeld. Tegenwoordig wordt ook op dit niveau steeds meer op Ethernet gebaseerde netwerken toegepast, maar ook token-arbitrage gebaseerde netwerken worden veel gebruikt.
– Apparaat-veldbus
  Dit is een typisch real-time-netwerk. Zij dient om intelligente (‘‘smart’’) instrumenten onderling of met een PLC’s, regel- of operatorstation te verbinden. Het netwerk is vaak token-gebaseerd. De discrete fabricage wijken en de procesindustrie stellen verschillende eisen aan een netwerk t.a.v. de berichten-frequentie en -omvang. De procesindustrie is met bemonster-frequenties van 2 Hz. veelal tevreden. De discrete fabricage vereist frequenties van 50 Hz en hoger.

– I/O-veldbus
  Dit zijn veldbussen met beperkte services en eenvoudige vormen van dataverkeer. Zij ondersteunen enkel I/O-transport van sensoren en actuatoren of schakelfuncties.

Het is niet strikt noodzakelijk om een computer slechts aan één netwerk te hangen, zoals in figuur 6.3. Met name operatorstations zijn vaak gekoppeld aan meerdere netwerken, zodat informatie afkomstig uit meerdere lagen kan worden gepresenteerd. De netwerken worden onderling verbonden door routers, bridges, gateways, hubs en repeaters.

Een *router* verbindt meerdere LAN's. Hij kan de beste route bepalen voor een bericht. Een *bridge* daarentegen wordt gebruikt om twee LAN's, twee delen van dezelfde LAN of twee verschillende LAN's (b.v. Ethernet en token-ring) te verbinden. De naam *gateway* wordt gebruikt voor de combinatie van hardware en software om twee verschillende LAN's te koppelen. Een *hub* is een verdeelpunt voor een boomgestructureerde LAN. Hij heeft dus meerdere poorten. Er zijn meerdere typen. Passieve hubs kopiëren een bericht naar alle poorten. Switching hubs sturen de berichten alleen naar de correcte poort. Een *repeator* dient vaak als versterker of afscheiding tussen subnetwerken. Zij kunnen ook data doorgeven tussen subnetwerken met verschillend protocol of kabeltype.

6.2 Regelsysteem-instrumentatie

Regelsystemen: DCS en SCADA/PLC

Twee verschillende typen regelsystemen worden toegepast: Supervisory Control and Data Acquisition/Programmable Logic Controller (SCADA/PLC) en Distributed Control System (DCS). Deze systemen distribueren hun afzonderlijke functies (schakelen, regelen, bewaking, recept-management, werkpuntoptimalisatie en data-opslag) over gescheiden computers verbonden door netwerken. De regel- en schakeltaken worden door de PLC verricht of door aparte procesbesturingsstations. DCS-systemen worden als één systeem aangeboden terwijl SCADA/PLC-systemen worden opgebouwd uit losse componenten.

Traditionele communicatiestandaards

Instrumenten communiceren vaak met computers d.m.v. analoge, seriëel-digitale, of parallel-digitale koppelingen. Om meerdere instrumenten gelijktijdig te bedienen kan een multiplexer worden toegepast. Standaards voor directe koppelingen staan in tabel 6.1.

Tabel 6.1 Traditionele communicatie

Interface	20 mA stroomkring	RS-232C	RS-423	RS-485	IEEE-488
max. snelheid	10 kb/s	40 kb/s	100 kb/s	tot 500 kb/s	tot 200 kbs/s
max. aantal zenders/ontvangers	1/1	1/1	1/10	32/32	1/14
max. afstand	1.0 km	15 m	1.2 km	1.2 km	enkele meters

- 20 mA stroomkring: analoog signaal van 4 tot 20 mA. De verbinding is altijd point-to-point.
- RS-232/RS-422/RS-423: asynchrone seriële communicatie. Dit zijn Recommended Standard (RS) interfaces van de Electronic Industries Association (EIA). Zij definiëren seriële bidirectionele, half-duplex-communicatie over een single of dual-twisted-pair kabel. RS-232 verbindingen zijn point-to-point. The RS-422 and RS-423 standaards zijn ontwikkeld om de oudere RS-232 standaard uit 1962 te vervangen. Zij ondersteunen een multipoint-netwerk met hogere datasnelheden en een lagere gevoeligheid voor elektrische storingen.
- RS-485: modificatie van RS-422 die tot 32 zenders en 32 ontvangers ondersteunt.
- IEEE-488 (ook: IEC-625, GPIB): Deze data-bus is speciaal ontworpen voor laboratorium instrumentatie. Maximaal 14 apparaten kunnen gekoppeld worden. De General Purpose Instrument Bus (GPIB) gebruikt 16 parallelle lijnen, waarvan 8 data-lijnen, 3 handshake lijnen voor synchronisatie en 5 busbesturingslijnen. De Europese versie IEC-625 definieert extra isolatie.

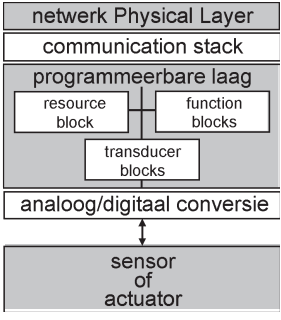
Het Highway Addressable Remote Transducer netwerk (HART) is ontwikkeld zodat aanvullende digitale communicatie mogelijk wordt binnen het concept van de 20 mA-stroomkring. Daartoe wordt een het signaal van 1 mA signaal, dat gemoduleerd is volgens de frequency-shift-key (FSK), gesuperponeerd op het analoge signaal. HART kan daarmee een asynchrone bidirectional communicatie verzorgen van 1200 kbit/s. Omdat het HART-signaal gemiddeld nul is, wordt de nauwkeurigheid nauwelijks beïnvloed. Het applicatie-protocol van HART voor de communicatie met intelligente instrumenten is neergelegd in de Device Description Language (DDL). HART kan gebruikt worden om bestaande DCS-en uit te breiden.

Intelligente instrumenten

In moderne regelsystemen wordt steeds meer gebruik gemaakt van digitale techniek. Door de toepassing microprocessoren in instrumenten zoals sensoren en actuatoren, wordt de intelligentie steeds meer gedistribueerd. Hun belangrijkste eigenschappen zijn:

- Voorwaarde voor een intrinsiek veilige veldbus.
- Snelle bidirectionele digitale communicatie.
- Een instrument kan gekalibreerd worden over een groter meetbereik, waardoor de nauwkeurigheid onder wisselende omstandigheden groot is.
- Een intelligent instrument kan allerlei gegevens opslaan en leveren m.b.t. de leverancier, type, en identificatiegegevens.
- Het kan een diagnose opstellen van zichzelf of van het proces. Op basis van deze gegevens de operatiemode wijzigen.
- Ze kan voorzien in allerlei signaalconditionering, zoals: filtering, schaling, bereikomschakeling, conversie van een-heden, temperatuurcompensatie, en linearisatie.
- Sommige instrumenten (meestal een actuator) zijn in staat een PID-regeling uit te voeren.
- Plug-and-play instrumenten vereenvoudigen de systeemconfiguratie aanzienlijk. Als een instrument met een netwerk wordt verbonden, wordt automatisch een netwerkadres vastgesteld en de installatie-software, die door de leverancier van het instrument is meegeleverd, zorgt ervoor dat het instrument correct in netwerk wordt geconfigureerd en de juiste drivers worden geladen.

Een smart sensor of actuator bevat configureerbare functieblokken. De Fieldbus Foundation bijvoorbeeld heeft drie typen blokken gedefinieerd (figuur 6.4).



Figuur 6.4 Structuur van een intelligent instrument volgens de definities van de Fieldbus Foundation

6.3 Netwerken

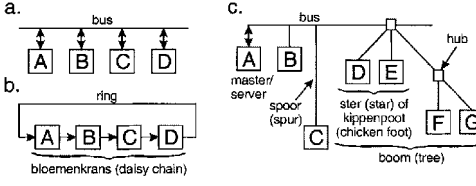
Karakteristieken van netwerken

Media

Voorbeelden van media zijn elektrische verbindingen, zoals Shielded of Shielded Twisted Pair, Unshielded Twisted Pair (STP/UTP), coaxiaal kabel (coax), optische verbindingen of draadloze verbindingen, zoals infra-rood of radio. Het medium kan gekarakteriseerd worden door: signaalvertraging per lengte, signaalverzwakking per lengte, bandbreedte (snelheid), kans op fouten, intrinsieke veiligheid, aanwezigheid van actieve componenten zoals versterkers en prijs.

Netwerktopologie

De netwerktopologie is de structuur op basis waarvan knooppunten (nodes) onderling worden verbonden. Zo'n node kan een computerstation zijn, maar ook een ander apparaat zoals een instrument of een printerstation met een netwerkadres. De basis van een netwerk is de directe point-to-point-verbinding tussen twee nodes of een multipoint-verbinding (ook multidrop genaamd), waarbij een enkelvoudige lijn wordt gebruikt om minimaal drie nodes onderling te verbinden.



Figuur 6.5 Bus-, ring- en boom-topologie

Toelichting bij figuur 6.5:

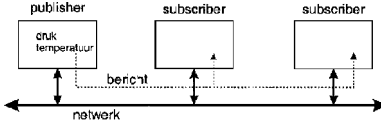
- Bus: de systemen worden niet onderling gekoppeld, maar gebruiken een gezamenlijk communicatiemedium (figuur 6.5.a).
- Ster (star): centrale master of hub met satellieten (figuur 6.5.c).
- Boom (tree): combineert de karakteristieken van een bus- en sternetwerk (figuur 6.5.c).
- Maaswerk (mesh): onderling gekoppelde systemen met meerdere redundante verbindingen.
- Ring: de nodes worden onderling verbonden tot een ringstructuur. De datatransmissie volgt altijd dezelfde richting (figuur 6.5.b).

De apparaten kunnen op verschillende manieren aan het netwerk worden gekoppeld:

- Spoor (spur): een enkel lijn (figuur 6.5.c)
- Kippenpoot (chicken foot): gezamelijke koppeling (figuur 6.5.c)
- Bloemenkrans (daisy chain): onderlinge verbindingen (figuur 6.5.b).

Type hiërarchische relatie en communicatiemodes

- Master-slave.
  De master coördineert het functioneren van zijn satellieten alsmede hun onderlinge communicatie.
- Client-server.
  De server biedt centrale applicaties of informatie aan. Er kan één of meerdere gebruikers (clients) in een netwerk worden opgenomen. De communicatie wordt geopend door de gebruiker, waarop de server reageert.
- Peer-to-peer.
  Bij deze communicatie hebben alle stations dezelfde hiërarchische status.
- Publisher-subscriber.
  Bij deze communicatie stuurt de publisher een bericht rond dat door alle stations die op dit bericht hebben ingeschreven, wordt gelezen (figuur 6.6). Voor real-time-systemen is deze wijze van communiceren belangrijk, omdat zij veel effectiever is dan het versturen van afzonderlijke berichten.
- Reporting (broadcast)/multicast.
  Een bericht wordt verstuurd naar ieder station, respectievelijk naar een selecte groep van stations.
- Cyclische/acyclishe communicatie
  Cyclisch dataverkeer is periodiek terwijl acylisch verkeer willekeurig van aard is. Real-time-systemen behandelen deze vormen van dataverkeer vaak verschillend.
- Synchrone/asynchrone communicatie
  Bij de synchrone communicatie vereist de zender eerst een responsie van de ontvanger voordat hij verder gaat. Bij de asynchrone mode is deze responsie geen noodzakelijke voorwaarde.



Figuur 6.6 Voorbeeld van publisher-subscriber-communicatie

Netwerk toegangsmethode.

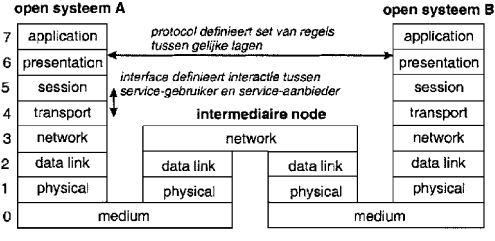
- Polling.
  Polling is een gecentraliseerd toegangsmechanisme dat gebruikt wordt in hiërarchische master-slave-networken. Het master station regelt de netwerktoegang van de slaves door continu bij hun te informeren of zij een bericht hebben.
- Token-passing.
  Ieder station krijgt om de beurt, of op basis van een toewijzingssysteem, het eigendomrecht over een token (vergelijk: estafettestok). Dit tijdelijke eigendomsrecht geeft het station het recht om een bericht te versturen of het berichtenverkeer te regelen. Voor verschillende services kunnen verschillende tokens worden toegewezen.
- Time-slots en frequentieslots.
  Specifieke tijdsperioden en frequentiebanden worden toegewezen aan stations of applicaties. Beide typen van *slots* worden gebruikt bij satelliet -en radiografieverbindingen. Time-slots worden ook toegepast in ringnetwerken.
- Random-access met collision-detection.
  Indien een medium niet bezet is, wat gedetecteerd kan worden middels het carrier-signaal, mag ieder willekeurig station een bericht verzenden. Wanneer een verzender een "botsing" tussen berichten bemerkt, dan wordt het bericht na een periode met een random lengte herhaald. Deze methode voor netwerk-toegang wordt gebruikt door Ethernet, die de basis vormt voor de meeste WAN's en LAN's.

Karakterisering

Netwerken verschillen in hun topologische ordening, de hiërarchische verhouding tussen de stations, de methode waarop een station toegang verkrijgt op het netwerk (access method) en het medium. Deze karakteristieken zijn niet onafhankelijk van elkaar. Niet-hiërarchische real-time-netwerken gebruiken vaak asynchrone peer-to-peer communicatie in een ring-topologie met *token-access*. Hiërarchische real-time-networken daarentegen passen meestal synchrone master-slave communicatie toe met *random-access*. Transactienetwerken werken vaak met synchrone client-server communicatie in een bustopologie met random-access.

OSI referentiemodel

Het OSI-model definieert hiërarchisch geordende services zodat applicaties via een netwerk met elkaar kunnen communiceren (figuur 6.7). Iedere service biedt voor een hogere laag een gewenste functionaliteit. De aanbieder en de gebruiker van een service communiceren onderling middels een *interface*. Het zogenaamde *protocol* definieert de functies en de functionele structuur van een service. Deze is van belang voor de interactie tussen gelijke services van verschillende stations. Zie tevens hoofdstuk B1 par. 4.7. Een meer gedetailleerde beschrijving is te vinden in het *ICT-zakboekje* van Reed Business Information.



Figuur 6.7 OSI referentiemodel

TOP/MAP

TOP/MAP is een goed voorbeeld van een vroege standaard (1980's) gebaseerd op ISO. Deze is ontwikkeld door de gebruikers Boeing (TOP) en General Motors (MAP) ter ondersteuning van CIM. MAP (Manufacturing Automation Protocol) is de standaard voor real-time-systemen en is gebaseerd op token-access. De mini-MAP-versie voor transmissietijden van ongeveer 25 ms gebruikt enkel de lagen 1,2 en 7. TOP (Technical and Office Protocols) is gedefinieerd voor transactiesystemen en gebaseerd op CSMA/CD-access. Tabel 6.2 toont schematische de standaard. Het MAP/TOP applicatie-protocol (laag 7) gaat uit boven dat van ISO en definieert speciale functies geschikt voor discrete fabricage: MMS (Manufacturing Message Specification) and MHS (Message

Handling Specifications). Een vergelijkbaar initiatief t.b.v. CIP met PMS (Processing Message Service) is blijven steken bij voorstellen.

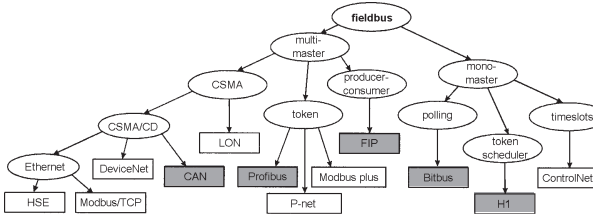
Tabel 6.2 OSI-lagen van MAP/TOP

	Applicatiefuncties en data ↑↓	
	MAP	TOP
OSI laag 7	Manufacturing message services (MMS): protocol and services (ISO 9506.1/2) PLC (ISO/IEC 9506.5) process control (ISO/IEC 9506.6) MAP directory services MAP network management	Message handling system (MHS) e-mail (CCITTX.400)
	File transfer, access and management (subset ISO/IEC 8571) Application control service elements (subset ISO/IEC 8649/8650)	
6	Presentation kernel (ISO/IEC 8822/8823)	
5	session (ISO/IEC 8326/8327)	
4	class 4 transport (ISO/IEC 8072/8073)	
3	network (ISO/IEC 8348) OSI connectionless internet (ISO/IEC 8473)	
2	logical link layer (ISO/IEC 8802) token-bus (ISO/IEC 8802.4)	CSMA/CD (ISO/IEC 8802.3)
1	ISO/IEC 8802.4 broadband (10 Mbits/s) / carrierband (5 Mbits/s)	ISO/IEC 8802.3 baseband (10 Mbits/s) / ISO/IEC 8802.5 token-ring

6.4 Open veldbussen

De veldbus komt oorspronkelijk (1980's) uit de wereld van de discrete fabricage waar meer apparaten en schakelapparatuur wordt gebruikt. Later (1990's) groeiden ze uit tot volwaardige netwerken. Ongeveer 20 open(bare) veldbussen zijn er gedefinieerd. figuur 6.8 laat een taxonomie zien van een aantal bekende. Vijf veldbussen zijn verder uitgewerkt in tabel 6.3. Een open veldbus biedt de volgende voordelen t.o.v. traditionele en gesloten systemen:

- Instrumentatie van verschillende leveranciers is toepasbaar en onderline uitwisselbaar.
- Bekabelingskosten kunnen gereduceerd worden van 100% (traditioneel), tot 80% door field multiplexers, en tot 70% door gebruik van een veldbus.
- Ontwerp, implementatie en onderhoud worden vereenvoudigd door afnemende complexiteit van instrumentatie en documentatie.
- De inbedrijfstelling verloopt efficiënter door diagnostische ondersteuning.
- Uitval loopt terug door de diagnostische ondersteuning en foutdetectieprocedures.



Figuur 6.8 Taxonomie van veldbussen (de grijze vlakken staan uitgewerkt in tabel 6.3)

Tabel 6.3 Overzicht van een aantal veldbussen.

	BITBUS	FIP	Profibus DP/PA	CAN	H1
jaar	1983	1988	DP: 1994 PA: 1995	1995	1995
organisatie	oorspronkelijk Intel	WorldFIP	Profibus International	CiA: CAN-in Automation	Fieldbus Foundation
standaard	IEEE 1118 (in 1990)	EN 50170/IEC 61158-2	EN 50170/IEC 61158-2 (PA)	ISO 11898	IEC 61158-2
topologie	bus	bus	lijn, ster, ring	multipoint-boom	bus, ster
max. snelheid	375 kb/s	1 kb/s	DP: 12 Mb/s PA: 31.25 kb/s	tot 1 Mb/s	31,25 kb/s
max. aantal nodes met/zonder repeaters	250/32	256/64	127/32	n.v.t./30	240
max. afstand zonder repeaters	300 m bij 375 kb/s 1,2 km bij 62,5 kb/s	2 km	100 m bij 12 Mb/s 1,2 km bij 73 kb/s	40 m bij 1 Mb/s, 1 km bij 20 kb/s	1,9 km

Tabel 6.3 (vervolg)

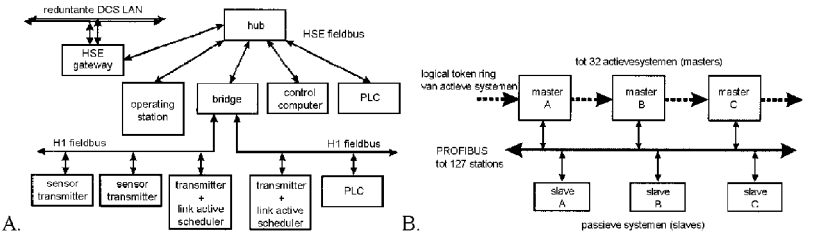
arbitrage	master/slave master = PC	bus arbiter	token-passing	CSMA	master/slave scheduler
communicatie		peer-to-peer	master/slave peer-to-peer	master/slave peer-to-peer multi-cast	client/server publ./subscr. event notification
belangrijkste toepassing	intelligente I/O, procesregeling	real-time control	inter-PLC comm. fabricage (DP) & proces (PA)	I/O-bus, gebouwen apparaten, industrie	proces-regeling

Sinds het jaar 2000 is er overeenstemming over één standaard, de netwerkstandaard IEC-61158 waaraan onder andere Fieldbus Foundation, ControlNet, Profibus, P-Net en WorldFip voldoen.

In figuur 6.9 staan twee voorbeelden van veldbussen weergegeven. De H1-bus van de Fieldbus Foundation (FF) stamt uit de procesindustrie terwijl de Profibus zijn oorsprong heeft in de discrete fabricage. De gegevens van deze bussen staan in tabel 6.3. De FF kent naast de H1-bus ook de HSE-bus voor een control-LAN. Profibus kent drie varianten: PA voor de procesindustrie, DP voor discrete fabricage (responstijd 10 ms) en FMS voor een control-LAN. De opbouw van deze vijf systemen volgens OSI staat in tabel 6.4. FF noemt de combinatie van de lagen 2 en 7: Communication Stack (figuur 6.4). Karakteristiek voor alle veldbussen is dat ze de OSI-lagen 3 t/m 6 niet gebruiken. In de lagen 1 en 2 worden de fysieke verbinding en de netwerk-toegang afgehandeld. Laag 7 biedt de benodigde communicatieservices. Deze zijn applicatie-afhankelijk. Hier zijn de onderlinge verschillen het grootst en dus de mogelijkheden om tot standaards te komen het kleinst.

De Data Link Layer van de Foundation Fieldbus regelt het berichtenverkeer en herkent drie soorten stations: basisstations (slaves), link-master-stations die de mogelijkheid bezitten om LAS te worden en bridges. Het algoritme van de Link Active Scheduler (LAS) bepaalt de token-passing, zodat ieder station de tijd krijgt om cyclische en acyclische berichten uit te wisselen. De IEC-61158-specificatie laat gecentraliseerde regeling toe, regeling in het veld door een instrument, en een combinatie van beide.

Profibus kent dezelfde soorten stations en gebruikt ruwweg een vergelijkbaar token-toegangsmethode. Een Medium Access Controller (MAC) algoritme treedt op als arbiter en zorgt ervoor dat slechts één station toegang heeft tot de bus op een bepaald moment. Bij het opstarten van het systeem bepaalt de MAC van iedere master de organisatiestructuur van de token-bus, -ring, of -sternetwerk. Tijdens bedrijf het wordt het token van de ene master aan de volgende doorgegeven binnen een nauwkeurig tijdsbestek (token-rolatietijd).



Figuur 6.9 Layout van het H1- HSE (A) en het Profibus netwerk (B)

Tabel 6.4 OSI lagen van Profibus and Fieldbus Foundation.

	user application				
	↑↓				
	Profibus			Fieldbus Foundation	
	Fieldbus Message Spec. FMS	De-centralised Periphery DP	Process Automation PA	High-speed Ethernet HSE	Fieldbus H1
	Control LAN SCADA-PLC	discrete fabricage	proces industrie	Control LAN	proces industrie
OSI laag 7	FMS apparaat profielen	DP-profielen DP functies	PA-profielen DP functies	Gelijk H1	Fieldbus Message Spec.
	Fieldbus Message Spec.				Fieldbus Access Sublayer
6		↑↓	↑↓	↑↓	
5	↑↓			TCP of UDP	↑↓
4					
3				IP	
2	token-passing EN-50170	token-passing EN-50170	IEC interface + EN-50170	sterconfiguratie Ethernet	LAS token IEC 61158
1	RS-485/Optic	RS-485/Optic	IEC 61158-2		IEC 61158-2

6.5 *Communicatie in gedistribueerde systemen gebaseerd op Ethernet*

Ethernet beheerst de communicatie van transactiesystemen maar ook op het gebied van de real-time-systemen verovert ze steeds meer terrein. Op het niveau van control-LAN's zijn er voor de applicatielaag verschillende protocols en interfaces. Tabel 6.5 geeft een overzicht van een aantal initiatieven op dit gebied.

De Distributed Computing Environment (DCE) is ontwikkeld door de OpenGroup, een consortium van computergebruikers en- leveranciers. DCE Remote Procedure Call (DCE-RPC) zorgt ervoor dat een procedure-aanroep vanuit een proces (client) naar een ander proces wordt uitgevoerd ook al loopt dat proces op een extern systeem (server). De aanroep is inherent synchroon van aard, waardoor de aanroeper moet wachten op een resultaat voordat hij verder kan. DCE maakt het mogelijk dat een client-proces gelijktijdig meerdere aanroepen heeft uitstaan en een server-proces meerdere aanroepen parallel verzorgt. De DCE RPC specificatie behoort tot de meest geïmplementeerde toepassingen in de industrie.

ModBus Application Protocol (MBAP), ook ModBus/TCP genaamd, is rechtstreeks gekoppeld aan TCP/IP en Ethernet. De Open ModBus/TCP specificatie wordt vooral ondersteund door de middelgrote fabrikanten op het gebied van proces-I/O.

Network Data Delivery Service (NDDS) is ontstaan uit een initiatief genaamd Interface for Distributed Automation (IDA). NDDS ondersteunt de uitwisseling van data en ''events'' binnen een gedistribueerd systeem. NDDS betreft netwerk -''middleware'' die allerlei services van het berichtenverkeer verzorgt: bericht-adressering, data herschikking, flow control, verzendpogingen, enz. IDA richt zich op de discrete fabricage.

High Speed Ethernet (HSE) is een protocol van de Fieldbus Foundation. HSE biedt een groot scala aan services. Het is het enige applicatie-protocol dat redundante verbindingen ondersteunt. De Fieldbus Foundation wordt sterk ondersteunt door de DCS-leveranciers en richt zich op de procesindustrie.

Tabel 6.5 Initiatieven communicatie voor gedistribueerde real-time-systemen.

naam	naam acroniem	organisatie	object-oriented	eigenschappen
Distributed Computer Environment	DCE-REC	OpenGroup	nee	gebaseerd op procedure calls
ModBus Application Protocol	ModBus/TCP or MBAP	Schneider Electric Automation (Modicon)	nee	eenvoudig te implementeren
Network Data Delivery Service	NDDS	Interface for Distributed Automation (IDA)	ja	publisher-subscriber services
High Speed Ethernet	HSE	Fieldbus Foundation	ja	publisher-subscriber services, scheduling, redundantie
Ethernet/Industrial Protocol	Ethernet/IP	ControlNet Int.	ja	publisher-subscriber services, implicit and explicit messaging
OLE for Process Control	OPC	OPC-Foundation	ja	alleen Windows platform

Een ander initiatief is het Ethernet/Industrial Protocol (Ethernet/IP) van ControlNet International. Ethernet/IP maakt een afbeelding van het protocol van de Application Layer van ControlNet en DeviceNet op TCP. Het biedt naast publisher-subscriber services speciale diensten voor cyclische en acyclische communicatie.

OLE voor Process Control (OPC) is een open standaard voorziet in een interface voor communicatie met andere processen en procesregelapparatuur. Het doel van de standaard is Plug-and-Play. OPC bestaat uit een standaard set interfaces en methoden gebaseerd op Microsoft's OLE (now Active X), COM (component object model) en DCOM (distributed component object model) technologieën, geschikt voor toepassingen voor procesregeling en automatisering in de discrete fabricage. Echter, OPC is beperkt tot één operating-system (Windows) en ondersteunt geen publisher-subscriber-services.

Literatuur

REGELTECHNIEK (par. 1 t/m 3)

- Arends, J., F. Reimert, J.J. Schrage
  Inleiding tot de regeltechniek
  Rijswijk, Nijgh & Van Ditmar.
- Cool, J.C., F.J. Schijf en T.J. Viersma
  Regeltechniek
  Amerongen, Delta Press BV.
- Davis, S.A.
  Outline of servomechanisms
  New York, Regents Publishing Co Inc.
- Hutchison, J.W. (editor)
  ISA Handbook of control valves
  Pittsburg, Pennsylvania, Instrument Society of America
- Min. J.L., J.J. Schrage
  Ontwerpen van analoge en digitale systemen
  Rijswijk, Nijgh & Van Ditmar.
- Shinskey, F.G.
  Process control systems
  New York, Mc Graw-Hill.
- Stephanopoulos, G.
  Chemical Process Control
  Englewood Cliffs (NJ), Prentice Hall.

– Vegte, John van de
Feedback Control Systems
Englewood Cliffs (NJ), Prentice Hall.

BESTURINGSTECHNIEK (par. 4 en 5)

– Baumann, A.R.
Pneumatiek (drie delen: *Inleiding, Industriële signaalverwerking en Logisch schakelen*)
Culemborg, Educaboek.
– Boswijk, R.H., en R.W. van der Kolk
PLC's in Nederland
Delft, CME-TNO.
– Deppert, W., en K. Stoll
Pneumatische besturingen en Pneumatische toepassingen
Middelburg, de Vey Mestdagh.
– Drost, A., J. Ouwehand
Hydrauliek
Baarn, Nijgh Versluys
– Krist, T.
Hydraulica en *Fundamentele pneumatiek*
Middelburg, de Vey Mestdagh.
– Ouwehand, J., en A. Drost
Mechanisatie S2, S3, S4, S6 en S7
Baarn, Nijgh Versluys
– Verder kan nog worden verwezen naar publicaties van VEV (Nijkerk), Bosch (Hoofddorp), Festo (Delft), Telemecanique (Haarlem) en Transmark (Weesp).

Mechanica C1

1 Kinematica of bewegingsleer
- 1.1 Rechtlijnige en cirkelvormige beweging
- 1.2 Harmonische beweging
- 1.3 Ruimtelijke beweging
- 1.4 Superpositie (samengestelde beweging)
- 1.5 Kogelbaan

2 Grondwetten

3 Statica van vaste lichamen
- 3.1 Evenwicht (stabiliteit)
- 3.2 Samenstellen en ontbinden van krachten
- 3.3 Momenten en momentenstelling
- 3.4 Koppels
- 3.5 Evenwichtsvoorwaarden
- 3.6 Zwaartepunt (massamiddelpunt, massacentrum)

4 Dynamica
- 4.1 Algemeen
- 4.2 Traagheidsmomenten
- 4.3 Arbeid, energie en vermogen
- 4.4 Krachten bij roterende bewegingen
- 4.5 Impuls en impulsmoment
- 4.6 Botsing
- 4.7 Perkenwet (2e wet van Kepler)
- 4.8 Gyroscopisch moment
- 4.9 Slingers
- 4.10 Wrijving

5 Werktuigen
- 5.1 Momentenstelling en arbeidsstelling
- 5.2 Werktuigen zonder wrijving
- 5.3 Werktuigen met inachtneming van wrijving

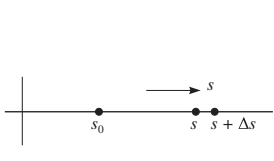
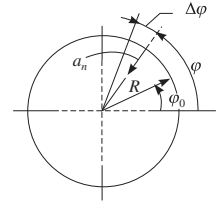
1 Kinematica of bewegingsleer

Symbolen

a = versnelling [m/s^2]
a_n = normale versnelling [m/s^2]
a_t = tangentiële versnelling [m/s^2]
d = versnellingsverandering [m/s^3]
g = gravitatieversnelling [m/s^2]
s = afgelegde weg [m]
t = tijd [s]
T = periode of trillingstijd [s]
v = snelheid [m/s]
α = hoekversnelling [rad/s^2]
δ = hoekversnellingsverandering [rad/s^3]
φ = doorlopen hoek [rad]
ω = hoeksnelheid [rad/s]

1.1 Rechtlijnige en cirkelvormige beweging

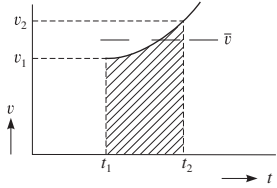
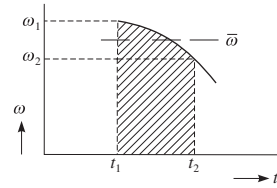
Tabel 1.1 Overzicht rechtlijnige en cirkelvormige bewegingen

rechtlijnige beweging of translatie	cirkelvormige beweging of rotatie
	

Tabel 1.1 (vervolg)

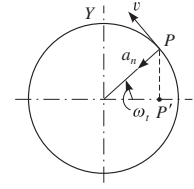
rechtlijnige beweging of translatie	cirkelvormige beweging of rotatie
eenparige beweging	
$a = 0$ $v = \text{constant}$ $\Delta s = v \cdot \Delta t$ $s = s_0 + v \cdot t$	$\alpha = 0$ $\Delta = \text{constant}$ $\Delta\varphi = \omega \cdot \Delta t$ $\varphi = \varphi_0 + \omega \cdot t$ $a_n = -\dfrac{v^2}{R} = -\omega^2 \cdot R$
eenparig veranderlijke beweging	
$a = \text{constant}$ $\Delta v = a \cdot \Delta t$ $v = v_0 + a \cdot t$ $s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$ $\bar{v} = \dfrac{v_0 + v}{2}$ $v_2^2 - v_1^2 = 2a(s_2 - s_1)$	$\alpha = \text{constant}$ $\Delta\omega = \alpha \cdot \Delta t$ $\omega = \omega_0 + \alpha \cdot t$ $\varphi = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2}\alpha \cdot t^2$ $\bar{\omega} = \dfrac{\omega_0 + \omega}{2}$ $\omega_2^2 - \omega_1^2 = 2\alpha(\varphi_2 - \varphi_1)$ $\lvert a_n \rvert = \left\lvert \dfrac{v^2}{R} \right\rvert = \lvert \omega^2 \cdot R \rvert$ $\lvert a \rvert = \lvert \sqrt{a_t^2 + a_n^2} \rvert$
veranderlijke beweging	
De functievergelijking van s of φ in t is van de derde of hogere graad	
$s = f(t)$ $v = \dot{s}$ $a = \dot{v} = \ddot{s}$ $d = \dot{a} = \ddot{v} = \dddot{s} \neq 0$	$\varphi = \varphi(t)$ $\omega = \dot{\varphi}$ $\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\varphi}$ $\delta = \dot{\alpha} = \ddot{\omega} = \dddot{\varphi} \neq 0$
verband tussen translatie en rotatie	
$\boldsymbol{\Delta s} = \boldsymbol{\Delta\varphi} \times \boldsymbol{R}$ $\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{R}$ $\boldsymbol{a}_t = \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{R}$ $\boldsymbol{a}_n = \boldsymbol{\omega} \times v = -\boldsymbol{\omega}^2 \cdot \boldsymbol{R}$	

Tabel 1.1 (vervolg)

rechtlijnige beweging of translatie	cirkelvormige beweging of rotatie
snelheidsdiagram	
	
afgelegde weg: oppervlakte onder de snelheidskromme (gearceerd)	afgelegde hoek: oppervlakte onder de hoeksnelheidskromme (gearceerd)
$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_{t_1}^{t_2} v\,\mathrm{d}t$	$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \int_{t_1}^{t_2} \omega\,\mathrm{d}t$
$\bar{v} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} v\,\mathrm{d}t = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$	$\bar{\omega} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2} \omega\,\mathrm{d}t = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t_2 - t_1}$
(de helling van de snelheidskromme is de *versnelling*)	(de helling van de hoeksnelheidskromme is de *hoekversnelling*)

1.2 Harmonische beweging

Enkelvoudige harmonische beweging: projectie van een eenparige cirkelbeweging op een willekeurige as. Bij een ruimtelijke cirkelbeweging is de component van deze beweging in elke asrichting een enkelvoudige harmonische beweging.



Figuur 1.1 Harmonische beweging

X-richting	*Y-richting*
$s_x = R\ \cos\ \omega t$	$s_y = R\ \sin\ \omega t = R\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$
$v_x = \dot{s}_x = -\omega R \sin \omega t$	s_y, v_y en a_y zijn 90°
$a_x = \dot{v}_x = \ddot{s}_x = -\omega^2 R \cos \omega t = -\omega^2 s$	verschoven t.o.v. s_x, v_x en a_x
$\omega = 2\pi/T$	

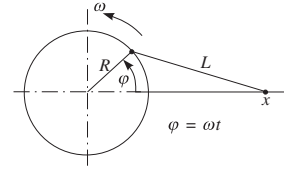
Voorbeelden harmonische beweging: slinger- en zuigerbeweging (zie par. 4 *Dynamica*).

$$x = R\cos\omega t + \sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \omega t}$$

Voor $R \ll L$ geldt:

$$v \approx -\omega R\left(\sin\omega t + \frac{R}{2L}\sin 2\omega t\right)$$

$$a \approx -\omega^2 R\left(\cos\omega t + \frac{R}{L}\cos 2\omega t\right)$$



Figuur 1.2 Slinger- en zuigerbeweging

1.3 Ruimtelijke beweging

Bij een ruimtelijke, in het algemeen niet-rechtlijnige beweging geldt t.o.v. elk willekeurig assenstelsel *X-Y-Z*:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Delta s} &= \boldsymbol{\Delta x} + \boldsymbol{\Delta y} + \boldsymbol{\Delta z} \\ \boldsymbol{v} &= \boldsymbol{v}_x + \boldsymbol{v}_y + \boldsymbol{v}_z \\ \boldsymbol{a} &= \boldsymbol{a}_x + \boldsymbol{a}_y + \boldsymbol{a}_z \end{aligned}$$

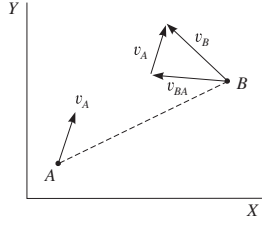
waarin de dikgedrukte symbolen vectoren voorstellen; de dungedrukte symbolen stellen scalairen (getallen) voor.
De bewegingsformules gelden zowel voor $\boldsymbol{\Delta s}$, $\boldsymbol{v}$ en $\boldsymbol{a}$ als voor elke component in *X-*, *Y-* en *Z*-richting.
De snelheidsvector raakt steeds aan de baan.

1.4 Superpositie (samengestelde beweging)

A heeft t.o.v. het assenkruis een snelheid $\boldsymbol{v}_A$.
B beweegt t.o.v. A met een *relatieve* snelheid $\boldsymbol{v}_{BA}$.

De *absolute* beweging van B is de vectorsom van de absolute beweging van A en de relatieve beweging van B:

$$\boldsymbol{s}_B = \boldsymbol{s}_A + \boldsymbol{s}_{BA}$$
$$\boldsymbol{v}_B = \boldsymbol{v}_A + \boldsymbol{v}_{BA}$$
$$\boldsymbol{a}_B = \boldsymbol{a}_A + \boldsymbol{a}_{BA}$$



Figuur 1.3 Superpositie

Dit geldt ook voor de componenten. Is de afstand tussen A en B ($|\boldsymbol{s}_{AB}|$) constant (zoals in een vast lichaam) dan beschrijven A en B t.o.v. elkaar een cirkel.

1.5 Kogelbaan

$$a_x = 0 \qquad a_y = -g$$
$$v_x = v_0 \cos\alpha \qquad v_y = v_0 \sin\alpha - g \cdot t$$
$$x_t = x_0 + (v_0 \cos\alpha)t \qquad y_t = y_0(\sin\alpha)t - \tfrac{1}{2}gt^2$$

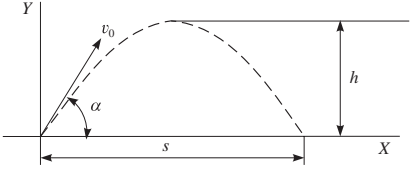
Schootsafstand:

$$s = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

Hoogste punt:

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2\alpha}{2g}$$

waarin:
α = elevatiehoek



Figuur 1.4 Kogelbaan

2 Grondwetten

1e Wet van Newton
Ieder lichaam volhardt in zijn toestand van rust of van een eenparige beweging, zolang er geen kracht op werkt.

2e Wet van Newton
Indien op een lichaam een kracht $\boldsymbol{F}$ werkt, krijgt dit lichaam een daarmee evenredige versnelling $\boldsymbol{a}$ in diezelfde richting: $\boldsymbol{F} = m \cdot \boldsymbol{a}$.

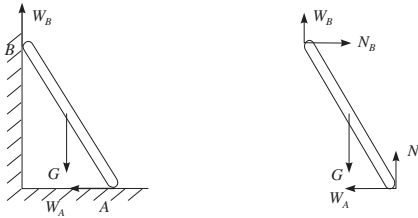
3e Wet van Newton
Een lichaam dat een kracht uitoefent op een ander lichaam, ondervindt van dit laatste lichaam een even grote, maar tegengestelde reactie: **actie** $=$ $-$**reactie**

3 Statica van vaste lichamen

Symbolen
F = kracht [N]
G = gewicht [N]
m = massa [kg]
M = moment [N·m]
N = normaalkracht [N]
R = resultante; ook reactiekracht [N]
W = wrijvingskracht [N]

3.1 Evenwicht (stabiliteit)

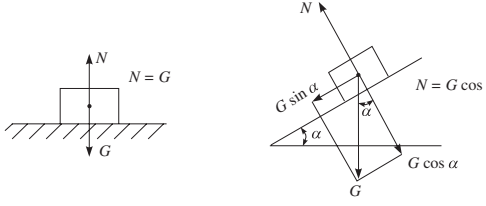
Vrijmaken
Om de evenwichtstoestand van een lichaam te bepalen, wordt het lichaam eerst *vrijgemaakt:* alle voorwerpen die krachten op het lichaam uitoefenen worden weggelaten en door die krachten vervangen (zie figuur 3.1).



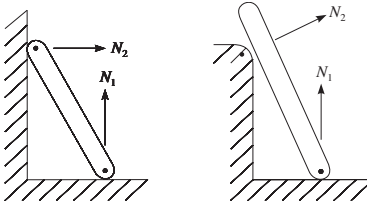
Figuur 3.1 Vrijmaken

Normaalkracht

De *normaalkracht* is de component van de reactiekracht die loodrecht op het contactoppervlak staat (figuur 3.2).



Figuur 3.2 Normaalkrachten

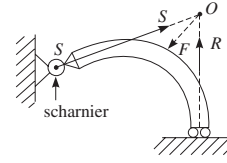


Figuur 3.3 Normaalkrachten bij een gekromd oppervlak dat volkomen glad is

Bij een gekromd oppervlak gaat de normaalkracht altijd door het krommingsmiddelpunt en staat loodrecht op de raaklijn aan die kromme (figuur 3.3).

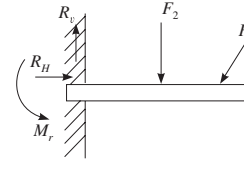
Scharnierkracht
De richting van de reactiekracht door een scharnier uitgeoefend is in het algemeen willekeurig. De *scharnierkracht* is te bepalen uit de evenwichtsvoorwaarden (zie par. 3.5).

Roloplegging
Bij een *roloplegging* staat de reactiekracht altijd loodrecht op het vlak waarover de rollen bewegen. Bij evenwicht gaat de scharnierkracht S door het snijpunt O van F en R.



Figuur 3.4 Roloplegging

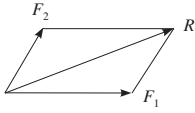
Inklemming
Een *inklemming* levert een horizontale reactiekracht R_H, een verticale reactiekracht R_v en een inklemmingsmoment M_r.
Wanneer de constructie (ondersteuning) statisch bepaald is, zijn de grootten van deze reacties te bepalen met de evenwichtsvoorwaarden (zie par. 3.5).



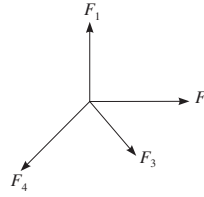
Figuur 3.5 Inklemming

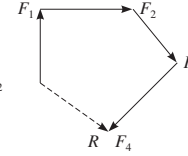
3.2 Samenstellen en ontbinden van krachten

Samenstellen van krachten:
- twee krachten: parallellogram van krachten (figuur 3.6);
- meerdere krachten: herhaald toepassen van parallellogram of krachtenveelhoek (figuur 3.7).



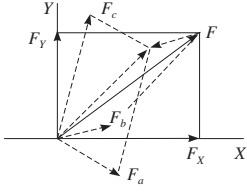
Figuur 3.6 $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2$



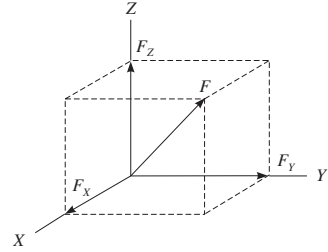


Figuur 3.7 $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2 + \boldsymbol{F}_3 + \boldsymbol{F}_4$

Ontbinden van krachten: elke kracht kan worden ontbonden in een willekeurig aantal componenten (zie figuur 3.8 en 3.9).



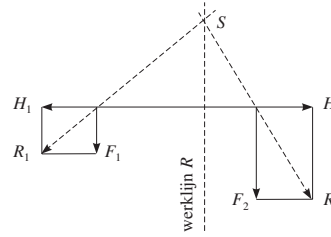
Figuur 3.8 $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_x + \boldsymbol{F}_y$
$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_a + \boldsymbol{F}_b + \boldsymbol{F}_c$



Figuur 3.9 $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}_x + \boldsymbol{F}_y + \boldsymbol{F}_z$

Evenwijdige krachten

De resultante R van twee *evenwijdige krachten* F_1 en F_2 is gelijk aan $F_1 + F_2$. De werklijn, evenwijdig aan die van F_1 en F_2, kan woden bepaald m.b.v. de momentenstelling $M_r = M_1 + M_2$ (zie par. 3.3) of met een grafische constructie (hiervoor



Figuur 3.10 Evenwijdige krachten

worden twee gelijke maar tegengesteld gerichte hulpkrachten H ingevoerd).

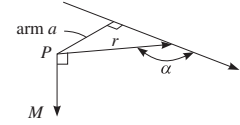
3.3 Momenten en momentenstelling

Het **moment** M van een kracht F t.o.v. een punt P is het vectorproduct van kracht en afstand:

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}.$$

Grootte van M:

$$F \cdot r \cdot \sin\alpha = F \cdot \alpha$$



Figuur 3.11 Moment

Een moment mag in zijn vlak worden verplaatst. Momenten in twee elkaar snijdende vlakken kunnen vectorieel worden opgeteld. In de ruimte geldt:

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_x + \boldsymbol{M}_y + \boldsymbol{M}_z$$

Momentenstelling: de som van de momenten van een aantal krachten t.o.v. eenzelfde punt P is gelijk aan het moment van de resultante van die krachten t.o.v. P:

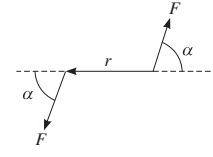
$$\sum \boldsymbol{M}_i = \sum (\boldsymbol{r}_i \times \boldsymbol{F}_i) = \boldsymbol{r}_r \times \boldsymbol{F}_r = \boldsymbol{M}_R$$

3.4 Koppels

Koppel: wordt gevormd door twee gelijke, maar tegengesteld gerichte evenwijdige krachten, die niet langs dezelfde werklijn werken.

Een koppel heeft een moment dat gelijk is aan het product van één der krachten t.o.v. het aangrijpingspunt van de partner:

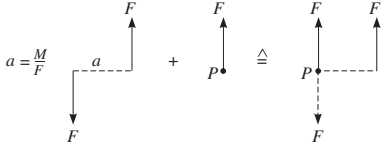
$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F}$$



Figuur 3.12 Koppel

Een koppel mag verplaatst worden in zijn vlak en naar een evenwijdig vlak. Voor het samenstellen van koppels (koppelvectoren) zie par. 3.3.

Koppel en kracht in hetzelfde vlak
Resultante koppel M en kracht F in hetzelfde vlak: evenwijdige verplaatsing van die kracht over $\frac{M}{F}$ (zie figuur 3.13).



Figuur 3.13 Koppel en kracht in hetzelfde vlak

Omgekeerd verwekt een evenwijdige verplaatsing over a van een kracht F een koppel: $M = -a \cdot F$.

3.5 Evenwichtsvoorwaarden

Algemene *kinematische evenwichtsvoorwaarden*:

$$\boldsymbol{v} = \text{constant}; \boldsymbol{\omega} = 0$$

Hiervoor is nodig: $\boldsymbol{F}_R = \sum \boldsymbol{F} = 0$

$$\boldsymbol{M}_R = \sum \boldsymbol{M} = 0$$

en ω is op één bepaald ogenblik gelijk aan nul.

In een plat vlak worden deze voorwaarden:

$$\sum \boldsymbol{F}_x = 0; \sum \boldsymbol{F}_y = 0$$
$$\sum \boldsymbol{M} = 0$$

In de ruimte:

$$\sum \boldsymbol{F}_x = 0;\ \sum \boldsymbol{F}_y = 0;\ \sum \boldsymbol{F}_z = 0$$

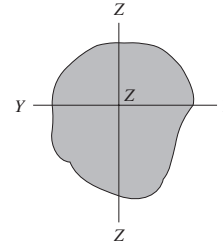
$$\sum \boldsymbol{M}_x = 0;\ \sum \boldsymbol{M}_y = 0;\ \sum \boldsymbol{M}_z = 0$$

3.6 Zwaartepunt (massamiddelpunt, massacentrum)

$$y_Z = \frac{1}{m}\int y \,\mathrm{d}\, m$$

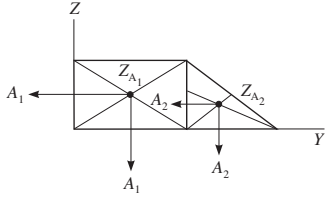
$$z_Z = \frac{1}{m}\int z \,\mathrm{d}\, m$$

Het *zwaartepunt* is onafhankelijk van de gekozen assen.



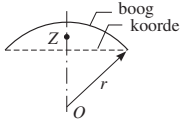
Figuur 3.14 Zwaartepunt

Van een aantal eenvoudige homogene vlakke figuren is het zwaartepunt eenvoudig te bepalen. Wanneer er symmetrieassen zijn, ligt Z altijd in het snijpunt van die assen. Tabel 3.1 geeft de zwaartepunten van een aantal figuren (lijnstukken, oppervlakten en inhouden).
Samengestelde figuren kunnen worden verdeeld in lijnstukken, oppervlakten en inhouden met bekende zwaartepunten.
Van elk onderdeel is het oppervlak A evenredig met het gewicht G. De resultante van die gewichten t.o.v. Y- en Z-as bepaalt de plaats van Z (zie figuur 3.15). Bij niet-homogene lichamen moet de soortelijke massa in aanmerking worden genomen.



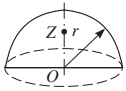
Figuur 3.15 Zwaartepunt samengesteld figuur

Tabel 3.1 Overzicht zwaartepunten (Z)



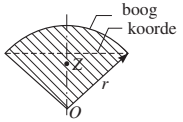
Cirkelboog (lijnstuk):

$$OZ = \text{straal} \times \frac{\text{koorde}}{\text{boog}}$$



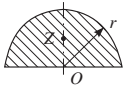
Boog met lengte van halve cirkelomtrek:

$$OZ = \boldsymbol{r} \times \frac{2r}{\pi r} = \frac{2r}{\pi}$$



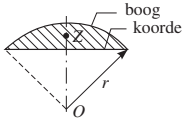
Cirkelsector (oppervlakte):

$$OZ = \tfrac{2}{3}\,\text{straal} \times \frac{\text{koorde}}{\text{boog}}$$



Halve cirkeloppervlakte:

$$OZ = \tfrac{2}{3}r\,\frac{2r}{\pi r} = \frac{4r}{3\pi}$$

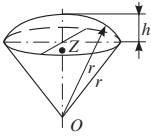


Cirkelsegment (oppervlakte):

$$OZ = \frac{\text{koorde}^3}{12 \times \text{opp.}}$$

Halve cirkeloppervlakte:

$$OZ = \frac{(2r)^3}{12 \cdot \frac{1}{2}\pi \cdot r^2} = \frac{4r}{3\pi}$$



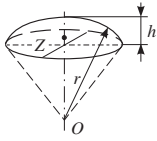
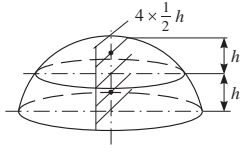
Bolsector (inhoud)

$$OZ = \tfrac{3}{4}r - \tfrac{3}{8}h$$

Voor halve bol:

$$OZ = \tfrac{3}{4}r - \tfrac{3}{8}r = \tfrac{3}{8}r$$

Tabel 3.1 (vervolg)

	*Bolsegment* (inhoud) $OZ = \frac{3}{4}\frac{(2r-h)^2}{(3r-h)}$ Voor halve bol geldt: $OZ = \frac{3}{4}\frac{(2r-r)^2}{(3r-r)} = \frac{3}{8}r$
	*Bolschijf* *Bolschil* } rond oppervlak Voor beide geldt: Z ligt op halve hoogte

Voor piramide en kegel geldt t.o.v. het grondvlak $Z_z = \frac{1}{4}h$. Het zwaartepunt kan ook buiten de figuur vallen (zie ook hoofdstuk E2 *Tabellen voor staalconstucties*).

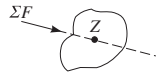
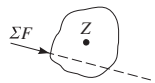
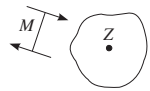
4 Dynamica

Symbolen (zie ook pag. C1/2 en C1/7)
C_{VW} = traagheidsproduct [kg·m^2]
E_k = kinetische energie [N·m]
E_p = potentiële energie [N·m]
f = wrijvingscoëfficiënt [−]
i = traagheidsstraal [m]
J = traagheidsmoment [kg·m^2]
J_l = axiaal traagheidsmoment [kg·m^2]
J_0 = polair traagheidsmoment [kg·m^2]
K_v = planair traagheidsmoment [kg·m^2]
k = veerconstante [N/m] of [N·m/rad]
L = impulsmoment [kg·m^2/s]
P = vermogen [N·m/s]
p = impuls [kg·m/s] of [W]
T = periode; slingertijd [s]
W = arbeid [N·m]
μ = coëfficiënt voor visceuze wrijving [N·s/m]

4.1 Algemeen

De *dynamica* houdt zich bezig met de effecten van krachten en momenten op de bewegingstoestand van een lichaam (zie tabel 4.1).

Tabel 4.1 Krachten en momenten

situatie	effect
$\sum \boldsymbol{F} = 0$ $\sum \boldsymbol{M} = 0$	evenwicht (rust of eenparige translatie)
$\sum \boldsymbol{F} \neq 0$ (werklijn $\sum \boldsymbol{F}$ door Z) $\sum \boldsymbol{M} = 0$ 	translatie in richting $\sum \boldsymbol{F}$
$\sum \boldsymbol{F} \neq 0$ (werklijn $\sum \boldsymbol{F}$ *niet* door Z) $\sum \boldsymbol{M} = 0$ 	translatie in richting $\sum \boldsymbol{F}$ + rotatie
$\sum \boldsymbol{F} = 0$ $\sum \boldsymbol{M} \neq 0$ 	rotatie

4.2 Traagheidsmomenten

– *Axiaal* traagheidsmoment (t.o.v. een as *l*):

$$J_l = \sum_s m_s r_s^2$$

waarin: r_s = afstand materieel punt m_s tot l

– *Planair* traagheidsmoment (t.o.v. een vlak *V*):

$$K_V = \sum_s m_s r_s'^2$$

waarin: r_s' = afstand materieel punt m_s tot vlak V

– *Traagheidsproduct* of *centrifugaalmoment* (t.o.v. twee onderling loodrechte vlakken *V* en *W*):

$$C_{VW} = \sum_s m_s r'_s r''_s$$

waarin: $r'_s; r''_s$ = afstanden materieel punt tot resp. vlak V en W

– *Polair traagheidsmoment* (t.o.v. een punt O):

$$J_0 = \sum_s m_s r_s^2$$

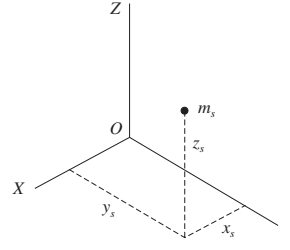
waarin: r_s = afstand materieel punt m_s tot punt O

Tussen de verschillende traagheidsgrootheden gelden de volgende betrekkingen:

$$J_X = \sum_s m_s(y_s^2 + z_s^2) = K_y + K_z$$

(cyclisch voor Y en Z)

$$J_O = \sum_s m_s(x_s^2 + y_s^2 + z_s^2) =$$
$$= K_x + K_y + K_z =$$
$$= \tfrac{1}{2}(J_x + J_y + J_z)$$



Voorts is:

$$C_{yz} = \sum_s m_s y_s z_s$$

(cyclisch voor zx en xy) *Figuur 4.1*

Het *traagheidsproduct* is een maat voor het *buigend moment* dat een roterend lichaam op zijn draaiingsas uitoefent.
Een as is een *hoofdtraagheidsas* wanneer bij rotatie over die as het buigend moment nul is. Er geldt dan:

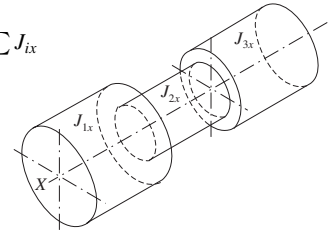
$$\sum_s m_s y_s z_s = 0$$

In het algemeen zijn er drie onderling loodrechte *hoofdtraagheidsassen*. De axiale traagheidsmomenten J_x, J_y en J_z zijn dan extreem (tenminste één maximum en één minimum).
De oorsprong van de drie hoofdtraagheidsassen valt samen met het zwaartepunt.
Symmetrie-assen zijn altijd hoofdtraagheidsassen.

Voor *kwadratische oppervlaktemomenten* van doorsneden, zie hoofdstuk C2 *Toegepaste mechanica*, par. 6, tabel 6.1.

Het traagheidsmoment van een *samengesteld lichaam* om een as is de som van de traagheidsmomenten van de samenstellende delen:

$$J_{\text{tot}} = J_{1x} + J_{2x} + J_{3x} = \sum J_{ix}$$

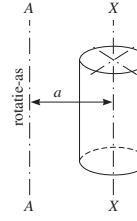


Figuur 4.2 Traagheidsmoment samengesteld lichaam

Verschuivingsstelling (van Steiner)

$$J_a = J_X + m \cdot a^2$$

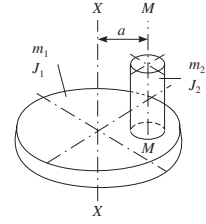
waarin:
J_X = traagheidsmoment om een as X-X door het zwaartepunt
J_a = traagheidsmoment om een as A-A // X-X
a = afstand tussen X-X en A-A
m = massa



Figuur 4.3

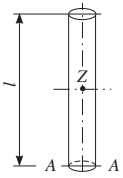
Voorbeeld (zie figuur 4.4):

$$J_X = J_1 + J_2 + m_2 \cdot a^2$$
$$J_M = J_1 + J_2 + m_1 \cdot a^2$$



Figuur 4.4

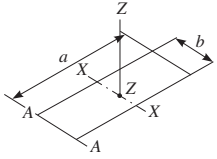
Tabel 4.2 Traagheidsmomenten van enkele homogene lichamen



Dunne staaf

$J_Z = \frac{1}{12}ml^2$

$J_A = \frac{1}{3}ml^2$

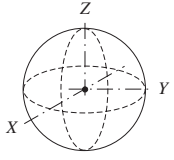


Dunne plaat

$J_X = \frac{1}{12}ma^2$

$J_A = \frac{1}{3}ma^2$

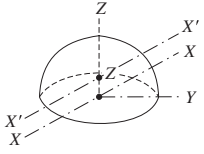
$J_Z = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2)$



Dunne holle bol

$J_Z = \frac{2}{3}mr^2$

$J_X = \frac{2}{3}mr^2$



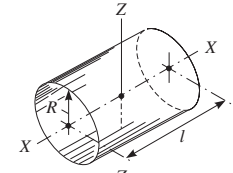
Halve dunne holle bole

$J_Z = \frac{2}{3}mr^2$

$J_X = \frac{1}{3}mr^2$

$J_{X'} = \frac{1}{12}mr^2$

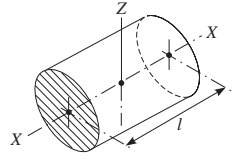
Tabel 4.2 (vervolg)



Dunne holle cilinder

$J_X = mR^2$

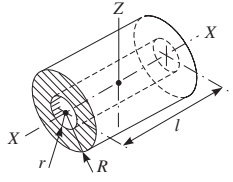
$J_Z = \frac{1}{2}m(6R^2 + l^2)$



Massieve homogene cilinder

$J_X = \frac{1}{2}mR^2$

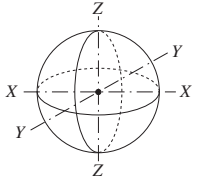
$J_Z = \frac{1}{12}m(3R^2 + l^2)$



Holle homogene cilinder

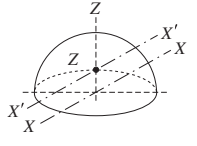
$J_X = \frac{1}{2}m(R^2 + r^2)$

$J_Z = \frac{1}{12}m(3R^2 + 3r^2 + l^2)$



Massieve homogene bol

$J_X = J_Y = J_Z = \frac{2}{5}mR^2$

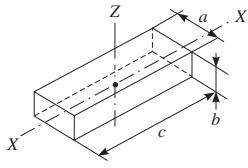


$J_Z = \frac{2}{5}mR^2$

$J_X = \frac{1}{5}mR^2$

$J_{X'} = \frac{19}{320}mR^2$

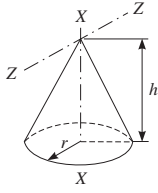
Tabel 4.2 (vervolg)



Homogene rechthoekige balk

$J_X = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2)$

$J_Z = \frac{1}{12}m(a^2 + c^2)$



Massieve homogene kegel

$J_X = \frac{3}{10}mr^2$

$J_Z = \frac{3}{5}m\left(\frac{r^2}{4} + h^2\right)$

Traagheidsstraal

Het traagheidsmoment kan als volgt worden uitgedrukt:

$$J = mi^2$$

waarin: $i = \sqrt{\frac{J}{m}}$ = traagheidsstraal

4.3 Arbeid, energie en vermogen

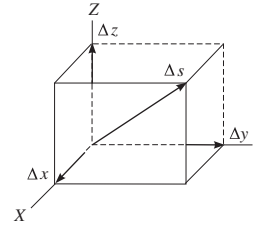
Arbeid

Translatie:
- kracht F
- massa m
- $\boldsymbol{F} = m{\cdot}\boldsymbol{a}$
- $\boldsymbol{\Delta W} = \boldsymbol{F}{\cdot}\boldsymbol{\Delta s}$

Rotatie:
- moment M
- traagheidsmoment J
- $\boldsymbol{M} = J \cdot \boldsymbol{\alpha}$
- $\boldsymbol{\Delta W} = \boldsymbol{M}{\cdot}\boldsymbol{\Delta\varphi}$

In een rechthoekig assenstelsel geldt:

$$\begin{aligned}\Delta \boldsymbol{s} &= \Delta \boldsymbol{x} + \Delta \boldsymbol{y} + \Delta \boldsymbol{z}\\ F &= \boldsymbol{F}_x + \boldsymbol{F}_y + \boldsymbol{F}_z\\ \Delta W &= \boldsymbol{F} \cdot \Delta \boldsymbol{s} =\\ &= \boldsymbol{F}_x \cdot \Delta \boldsymbol{x} + \boldsymbol{F}_y \cdot \Delta \boldsymbol{y} + \boldsymbol{F}_z \cdot \Delta \boldsymbol{z}\\ &= W_X + W_Y + W_Z\end{aligned}$$



Figuur 4.5 Rechthoekig assenstelsel

Energie

Een bewegend lichaam bezit *kinetische energie* t.g.v. zijn snelheid v.
Translatie: $E_k = \frac{1}{2}mv^2$
Rotatie: $E_k = \frac{1}{2}J\omega^2$

In een rechthoekig assenstelsel geldt:

$$\left.\begin{aligned} v^2 &= v_x^2 + v_y^2 + v_z^2\\ E_K &= \tfrac{1}{2}mv^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow E_K = E_{Kx} + E_{Ky} + E_{Kz}$$

Een lichaam met massa m op een hoogte h boven een referentieniveau heeft een *potentiële energie:*

$$E_P = mgh$$

Behoudwet[1)]: wanneer er *geen* arbeid wordt geleverd of verricht, geldt:

$$E_K + E_P = \text{constant}$$

Wanneer er *wel* arbeid wordt geleverd of verricht, geldt:

$$W = \int F\,\mathrm{d}s = \tfrac{1}{2}mv_2^2 - \tfrac{1}{2}mv_1^2$$
$$W = \int M\,\mathrm{d}\varphi = \tfrac{1}{2}J\omega_2^2 - \tfrac{1}{2}J\omega_1^2$$

Vermogen

Vermogen is de hoeveelheid verrichte of geleverde arbeid per tijdseenheid.

[1)] Er is ook een tweede behoudwet m.b.t. behoud van impuls(moment), zie par. 4.5.

Translatie: $P = \dfrac{\Delta W}{\Delta t} = \dfrac{F \cdot \Delta s}{\Delta t} = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{v}$

Rotatie: $P = \dfrac{\Delta W}{\Delta t} = \boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{\omega}$

4.4 *Krachten bij roterende bewegingen*

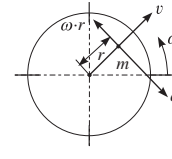
Bij rotatie: $\boldsymbol{a}_n = -\dfrac{v^2}{\boldsymbol{R}} = -\omega^2 \boldsymbol{R}$ (gericht naar rotatiecentrum)

Centripetale kracht: $\boldsymbol{F}_n = m \cdot \boldsymbol{a}_n = -m\dfrac{v^2}{\boldsymbol{R}} = -m\omega^2 \boldsymbol{R}$

Een waarnemer *buiten* het roterende stelsel concludeert dat er een centripetale kracht moet zijn.
Een waarnemer binnen het roterende stelsel ervaart echter een *centrifugale kracht*.
Beide waarnemers werken in verschillende coördinatenstelsels, zodat men hier niet kan spreken van: actie $=$ $-$reactie.

In één coördinatenstelsel werkt òf de centripetale òf de centrifugale kracht.

Corioliskracht
In een *roterend stelsel* ondervindt een voorwerp dat zich verplaatst t.o.v. het rotatiecentrum een extra versnelling:
$\boldsymbol{a}_{\text{cor(intern)}} = 2\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{\omega}$
$\boldsymbol{F}_{\text{cor(intern)}} = 2m\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{\omega}$



Figuur 4.6 Roterend stelsel

4.5 Impuls en impulsmoment

Impuls

Een kracht F, werkend op een lichaam (bijv. bij botsing) kan als veranderlijk in de tijd worden gezien:

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} = \mathrm{m}\dot{\boldsymbol{v}} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(mv) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\,\boldsymbol{p} = \dot{\boldsymbol{p}}$$

$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$ is de *impuls* van het lichaam:

$$\int_{t_1}^{t_2} \boldsymbol{F}\,\mathrm{d}t = m\boldsymbol{v}_2 - m\boldsymbol{v}_1 = \boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1 = \Delta\boldsymbol{p} \qquad (\textbf{krachtstoot})$$

Impulsmoment

Op een lichaam met massa m werkt een kracht F. Dit geeft t.o.v. een punt O een moment:

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F} = \boldsymbol{r} \times m\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\boldsymbol{r} \times m\boldsymbol{v}) = \dot{\boldsymbol{L}}$$

De grootheid $(\boldsymbol{r} \times m\boldsymbol{v}) = (\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p})$ is het *impulsmoment* $\boldsymbol{L}$ van een lichaam t.o.v. O:

$$\int_{t_1}^{t_2} \boldsymbol{M}\,\mathrm{d}t = \int_{t_1}^{t_2} \dot{\boldsymbol{L}}\,\mathrm{d}t = \boldsymbol{L}_2 - \boldsymbol{L}_1 = \boldsymbol{\Delta L} \qquad (\textbf{draaistoot})$$

Verder geldt: $\boldsymbol{M} = J\boldsymbol{\alpha}$ en $\boldsymbol{L} = J\boldsymbol{\omega}$

Behoudwet[1)]

Bij afwezigheid van uitwendige krachten (momenten) blijft de impuls (het impulsmoment) constant.

[1)] Zie ook par. 4.3.

4.6 Botsing

Centrale botsing van twee lichamen met massa's m_1 en m_2:

$$\boldsymbol{p}_1 + \boldsymbol{p}_2 = m_1\boldsymbol{v}_1 + m_2\boldsymbol{v}_2 = m_1\boldsymbol{w}_1 + m_2\boldsymbol{w}_2 = \text{constant}$$

waaring: $\boldsymbol{v}$ = snelheid *voor* de botsing
$\boldsymbol{w}$ = snelheid *na* de botsing

De snelheid in het gemeenschappelijk zwaartepunt:

$$\boldsymbol{w}_m = \boldsymbol{v}_m = \frac{\boldsymbol{m}_1\boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{m}_2\boldsymbol{v}_2}{m_1 + m_2}$$

Relatieve snelheid:

$$\boldsymbol{w}_1 - \boldsymbol{w}_2 = -e(\boldsymbol{v}_1 - \boldsymbol{v}_2)$$

waarin: e = botsingscoëfficiënt

Men onderscheidt:

- $e = 1$ volkomen *elastische* botsing; de kinetische energie blijft behouden:
  $\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1w_1^2 + \frac{1}{2}m_2w_2^2$
- $e = 0$ volkomen *onelastische* botsing; de kinetische energie wordt gedeeltelijk omgezet in warmte, deformatie e.d. Beide lichamen hebben na de botsing dezelfde snelheid: $\boldsymbol{w}_1 = \boldsymbol{w}_2 = \boldsymbol{w}_m = \boldsymbol{v}_m$.
- $0 < e < 1$ *onvolkomen elastische* botsing:

$$\boldsymbol{w}_1 = \boldsymbol{v}_1 + (1+e)(\boldsymbol{v}_m - \boldsymbol{v}_1) = \frac{m_1\boldsymbol{v}_1 + m_2\boldsymbol{v}_2 - em_2(\boldsymbol{v}_1 - \boldsymbol{v}_2)}{m_1 + m_2}$$

$$\boldsymbol{w}_2 = \boldsymbol{v}_2 + (1+e)(\boldsymbol{v}_m - \boldsymbol{v}_2) = \frac{m_1\boldsymbol{v}_1 + m_2\boldsymbol{v}_2 - em_1(\boldsymbol{v}_1 - \boldsymbol{v}_2)}{m_1 + m_2}$$

Verlies aan kinetische energie:

$$\Delta E_K = (1 - e^2)\frac{m_1m_2}{2(m_1 + m_2)}(v_1 - v_2)^2$$

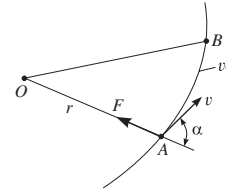
4.7 Perkenwet (2e wet van Kepler)

Is F een centrale kracht (zoals in het zon-planeten-stelsel), dan geldt voor het moment t.o.v. het centrum (van de zon):

$$\boldsymbol{M} = \dot{\boldsymbol{L}} = 0 \text{ of } \boldsymbol{L} = \text{constant}$$
$$L = \boldsymbol{r} \times m\boldsymbol{v} = \text{constant}$$

en ook:

$$\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{v}\ \mathrm{d}t = \text{constant}$$
$$|\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{v}\ \mathrm{d}t| = rv \sin\alpha\ \mathrm{d}t = \text{constant}$$



Figuur 4.7 Perkenwet

Voor $\mathrm{d}t \to 0$:

$$rv \sin\alpha \mathrm{d}t = 2 \times \text{opp. } \Delta AOB$$

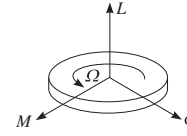
In gelijke tijden worden gelijke perken doorlopen (*perksnelheid* is constant).

4.8 Gyroscopisch moment

Het *gyroscopisch moment* M ontstaat bij kanteling van de draaiingsas (*spinas*) van een roterend lichaam volgens:

$$\boldsymbol{M} = \dot{\boldsymbol{L}} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{L} = \boldsymbol{\omega} \times (J\boldsymbol{\Omega})$$

waarin:
$\boldsymbol{L}$ = impulsmoment
$\boldsymbol{\omega}$ = precessie-snelheid
J = traagheidsmoment om spinas
$\boldsymbol{\Omega}$ = spinsnelheid [rad/s]



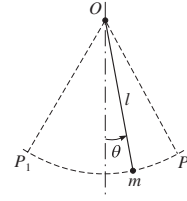
Figuur 4.8 Gyroscopisch moment

Omgekeerd veroorzaakt een uitwendig moment $\boldsymbol{M}$ op de draaiingsas, het *precesseren* van deze as om een andere as loodrecht op het vlak door $\boldsymbol{M}$ en de draaiingsas met een hoeksnelheid evenredig met M.

4.9 Slingers

Werking: onder invloed van een tegenwerkende kracht, die evenredig is met de verplaatsing (uitwijking), voert een lichaam een harmonische beweging (zie par. 1.2) uit.

Mathematische slinger

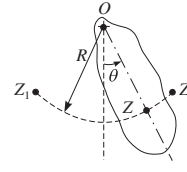


Figuur 4.9
Mathematische slinger

P_1 en P_2: vertrekpunten

$$T \approx 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

Fysische slinger



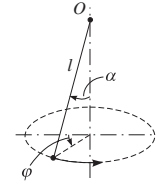
Figuur 4.10
Fysische slinger

Z: zwaartepunt
Z_1 en Z_2: omkeerpunten

$$T \approx 2\pi\sqrt{\frac{J_0}{mgR}}$$

waarin:
J_O = traagheidsmoment t.o.v. O
m = massa

Conische slinger



Figuur 4.11
Conische slinger

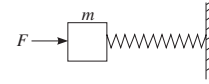
$$\varphi = \omega t$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l\cos\alpha}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l\cos\alpha}{g}}$$

Massa-veersysteem
(zie ook hoofdstuk B2 *Regeltechniek*, par. 1.2)

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$



Figuur 4.12 Massa-veersysteem

waarin:
k = veerstijfheid
= krachtsverandering per eenheid van lengteverandering [N/m]

Er vindt hier een voortdurende uitwisseling plaats van kinetische en potentiële energie.

Voor een *rotatie-massa-veersysteem* geldt: $T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{k}}$

(waarin: $k = \Delta M/\Delta\varphi$ [N · m/rad])

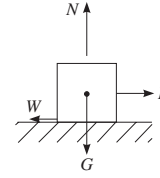
4.10 Wrijving

Slepende wrijving
Wanneer twee lichamen over elkaar glijden (of proberen te glijden) ontstaat er een wrijvingskracht tegen de (eventuele) bewegingsrichting in. De grootte van die wrijvingskracht is rechtevenredig met de normaalkracht en hangt verder af van:
- de aard van de oppervlakken (ruwheid, soort materiaal);
- de smering;
- rust of beweging.

Wanneer $F = 0$, is ook $W = 0$.
Neemt F toe, dan neemt W evenveel toe tot een maximum waarvoor geldt:

$$W_{max} = fN$$

waarin:
f = wrijvingscoëfficiënt; deze is sterk afhankelijk van de omstandigheden (tabel 4.4, pag. C1/31).

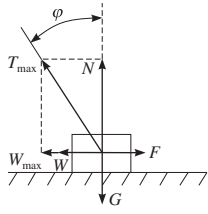


Figuur 4.13 Wrijving

De resultante T_{max} van N en W_{max} maakt een hoek φ met de normaal:

$$\tan \varphi = \frac{W_{max}}{N} = f$$

warrin: φ = wrijvingshoek



Figuur 4.14

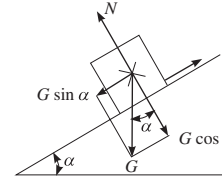
De max. wrijving in rust wordt *statische wrijving* of *stictie* genoemd; de wrijving in beweging *slepende kinetische wrijving* of *frictie*. De wrijvingscoëfficiënt f is voor stictie gewoonlijk groter dan voor frictie.

Tabel 4.3 Effect van een uitwendige kracht F

	voorwerp is in:	
	rust	beweging
$F < W_{max}$	blijft in rust ($W < W_{max}$)	neemt af ($W = W_{max}$)
$F = W_{max}$	op het punt van glijden	eenparige beweging
$F > W_{max}$	gaat bewegen f en W_{max} verminderen vaak plotseling	⇒versnelt

Voor een ongedwongen lichaam op een hellend vlak geldt:

$\alpha < \varphi$: rust (zelfremmend)
$\alpha = \varphi$; op punt van bewegen
$\alpha > \varphi$: glijdt naar beneden



Figuur 4.15 Wrijving op hellend vlak

Tabel 4.4 ***Richtwaarden*** *van de wrijvingscoëfficiënt f*

	klevend		glijdend	
	droog	gesmeerd	droog	gesmeerd
Staal-staal	0,8–0,15	0,23–0,11	0,57–0,03	0,2–0,03
Staal-gietijzer	0,35–0,2	0,2–0,1	0,27–0,13	0,13–0,03
Staal-brons	∼0,5		∼0,35	0,25–0,04
Staal-ferrodo	0,6–0,4		0,6–0,2	0,2–0,1(0,4*)
Staal-hout		0,65*	∼0,5	0,22*–0,075
Brons-brons	1,2–0,55	∼0,11	1,2–0,2	0,1–0,06
Brons-gietijzer		∼0,16	∼0,22	0,21–0,07

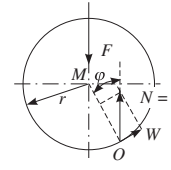
* Water

Tapwrijving

$$W \cdot r = f N \cdot r = f F \cdot r$$

waarin: $W \cdot r$ = wrijvingsmoment
F = tapbelasting

Wrijvingscoëfficiënt f voor:
- glijlagers met:
  - ruime smering : 0,003–0,04
  - matige smering: 0,04 –0,07
  - vetsmering : 0,07 –0,10
- kogellagers : 0,001–0,0015
- rollagers : 0,0018
- naaldlagers : 0,0045



Figuur 4.16 Tapwrijving

Visceuze wrijving

De wrijvingskracht is evenredig met de snelheid:

$$F = \mu \cdot v$$

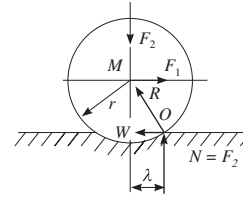
waarin: μ = coëfficiënt van visceuze wrijving
μ is onafhankelijk van rust of beweging (snelheid), maar wordt bepaald door de eigenschappen van een *smeerfilm* tussen de lichamen.

Rolweerstand

Rolweerstand is te wijten aan elastische deformatie van de contactvlakken. Bij een eenparige beweging geldt voor zuiver rollen (momentane rotatie om pool O):

$$F_1 \times r = N \times \lambda \quad W = F_1 = F_2 \frac{\lambda}{r}$$

kleinere r: grotere rolweerstand
λ = coëfficiënt van rolweerstand (zie Tabel 4.5)



Figuur 4.17 Rolweerstand

Meestal is de rolweerstand (veel) kleiner dan de wrijvingsweerstand.

Tabel 4.5 Coëfficiënten van rolweerstand λ

materiaal		
cilinder	grondvlak	λ [mm]
Staal	staal	0,05
Gietijzer	gietijzer	0,05
Wiel met stalen band	tramrails	0,1–0,25
Hout	hout	0,5–1,5
Stalen wiel	beton	10–20
	los zand	300–400
Wiel met luchtband	hard wegdek	4–5

5 Werktuigen

5.1 Momentenstelling en arbeidsstelling

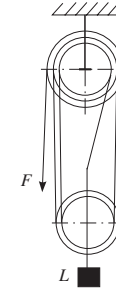
Momentenstelling: kracht × krachtarm = last × lastarm
Arbeidsstelling: kracht × krachtarm = last × lastarm

5.2 Werktuigen zonder wrijving

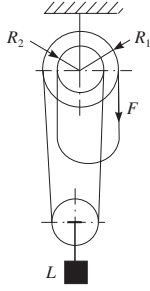
Hangt de last bij *katrollen en takels* aan n strengen dan geldt:

$$\text{krachtweg} = n \times \text{lastweg}$$

$$F \cdot n \cdot l = L \cdot l$$

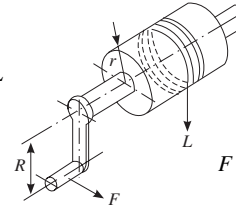


Figuur 5.1 Strengen



$$F = \frac{R_1 - R_2}{2R_1} \cdot L$$

Figuur 5.2 Westontakel



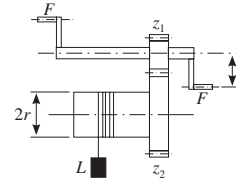
$$F = \frac{r}{R} \cdot L$$

Figuur 5.3 Windas

$$2F \cdot 2\pi R \frac{z_2}{z_1} = L \cdot 2\pi r$$

$$F = \frac{r}{2R} \cdot \frac{z_1}{z_2} \cdot L$$

waarin:
z_1 = aantal tanden kleine tandwiel
z_2 = aantal tanden grote tandwiel



Figuur 5.4 Lier

5.3 Werktuigen met inachtneming van wrijving

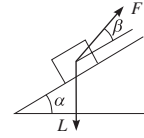
Hellend vlak

Last stijgt: $F_1 = L\dfrac{\sin(\alpha+\varphi)}{\cos(\beta-\varphi)}$

Last daalt: $F_2 = L\dfrac{\sin(\alpha-\varphi)}{\cos(\beta+\varphi)}$

warrin: φ = wrijvingshoek

(N.B. F evenwijdig aan helling: $\beta = 0$)



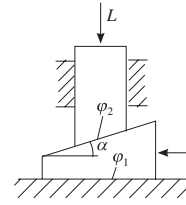
Figuur 5.5 Hellend vlak

Wig

Stel dat de wrijvingshoek in alle vlakken gelijk is, dan geldt: $F = L\tan(\alpha + 2\varphi)$ mits $\alpha \leqq 2\varphi$.
Rendement wig bij heffen last:

$$\eta = \tan\alpha / \tan(\alpha + 2\varphi)$$

Zelfremmend als: $\alpha \leqq \varphi_1 + \varphi_2$



Figuur 5.6 Wig

Schroef

Heffen last: $F = \dfrac{L}{l} r_g \tan(\alpha + \varphi)$

Dalen last: $F = \dfrac{L}{l} r_g \tan(\alpha - \varphi)$

waarin:

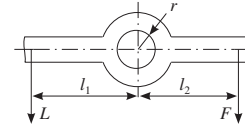
F = kracht aan sleutel op sleutellengte l vanuit het hart van de schroefspil [N]
L = gewicht van de last [N]
r_g = gemiddelde draadstraal (afstand hart schroefspil tot midden draad) [m]
α = hellingshoek draad (vierkante draad: 4°)
φ = wrijvingshoek (wrijvingscoëfficiënt = 0,1 : $\varphi = 6°$)

Hefboom

Heffen: $F_1 = L \dfrac{l_1 + r \sin\varphi}{l_2 - r \sin\varphi}$

Dalen: $F_2 = L \dfrac{l_1 - r \sin\varphi}{l_2 + r \sin\varphi}$

waarin: r = straal tap [m]



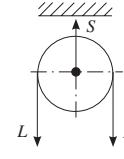
Figuur 5.7 Hefboom

Vaste katrol

Door touwstramheid wordt de lastarm groter en de krachtarm kleiner. Er is ook tapwrijving waardoor *niet* geldt: $F = L$, maar:

- voor hijsen : $F_1 = L/m$
- voor dalen : $F_2 = mL$

warrin:
m = verhouding touwkrachten



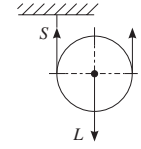
Figuur 5.8 Vaste katrol

Losse katrol

Hijsen: $F_1 = \dfrac{S}{m}$ of $S = mF$

$$L = S + F = (m+1)F \Rightarrow F = \frac{L}{m+1}$$

Dalen: $F_2 = \dfrac{mL}{m+1}$



Figuur 5.9 Losse katrol

waarin:
m = constante:
- henneptouw: 0,92
- staalkabel: 0,96
- schalmenketting: 0,96

Takels

Hijsen: $F_1 = L\dfrac{1-m}{m(1-m^n)}$

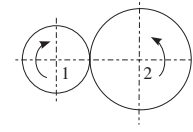
Dalen: $F_2 = L\dfrac{m^n(m-1)}{m^n-1}$

waarin: n = aantal katrolschijven

Tandwielen

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = -\frac{d_1}{d_2} = -\frac{z_1}{z_2}$$

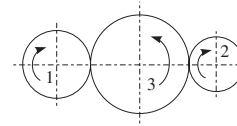


Figuur 5.10 Tandwielen

waarin:
d = diameter
z = aantal tanden
n = rotatie-snelheid

Tussengeschakelde tandwielen beinvloeden alleen de draairichting:

$$\frac{n_2}{n_1} = +\frac{d_1}{d_2} = \frac{z_1}{z_2}$$



Figuur 5.11 Tussengeschakeld tandwiel

Literatuur

- Borghout, A.N.
  Inleiding in de mechanica
  Delft, Delftsche uitgeversmij.
- *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*
  Berlin, Springer-Verlag.

Toegepaste mechanica C2

1 Algemeen

2 Statica
2.1 Evenwichtsvoorwaarden voor het platte vlak
2.2 Berekening van vakwerkconstructies

3 Elasticiteitsleer
3.1 Algemeen
3.2 Vermoeiing en kerfwerking
3.3 Kwadratisch oppervlaktemoment en weerstandsmoment
3.4 Traagheids- en weerstandsmomenten
3.5 Trek en druk
3.6 Buiging (spanning en vervorming)
3.7 Afschuiving
3.8 Wringing
3.9 Combinatie normaalkracht en buiging
3.10 Dubbele buiging
3.11 Buiging en wringing
3.12 Afschuiving en wringing
3.13 Statisch onbepaalde gevallen
3.14 Spanningsleer
3.15 Spanning-rek-relaties
3.16 Dik- en dunwandige buizen
3.17 Contactdruk tussen twee oppervlakken
3.18 Spanningsmetingen met rekstrookjes
3.19 Eindige Elementen Methode (E.E.M)

4 Plasticiteitsleer

5 Stabiliteitsleer

6 Tabellen

Materiaalgegevens: zie hoofdstuk El *Materialen*.

1 Algemeen

Symbolen

A = oppervlakte van doorsnede [mm^2]
D = dwarskracht (algemeen); dwarskracht in rekentoestand [N]
E = elasticiteitsmodulus [N/mm^2]
EI = stijfheidsfactor tegen buiging [–]
F = kracht (algemeen); normaalkracht; normaalkracht in rekentoestand; puntlast [N]
G = glijdingsmodulus (afschuivingsmodulus) [N/mm^2]
GI_p = stijfheidsfactor tegen wringing [–]
I_x = axiaal kwadratisch oppervlaktemoment [mm^4]
I_p = polair kwadratisch oppervlaktemoment [mm^4]
M = buigend moment rekenmoment [N·mm]
M_A = buigend moment in een doorsnede A [N·mm]
M_w = wringend moment, [N·mm]
N = langskracht; normaalkracht [N]
O = Oppervlaktemiddelpunt
Q = belasting (algemeen); totale gelijkmatig verdeelde belasting; rekenbelasting [N]
R = resultante van twee of meerdere krachten [N]
R_A = reactiekracht in punt A (oplegging of inklemming) [N]
S = statisch moment van een doorsnede [N·mm]
T = schuifstroom in dunwandige doorsnede [N/mm]
W_B = weerstandsmoment tegen buiging [mm^3]
W_W = weerstandsmoment tegen wringing [mm^3]
W_Z = weerstandsmoment van een doorsnede t.o.v. de Z-as [mm^3]
a = plaatlengte [mm]
b = profielbreedte, plaatbreedte, balkbreedte [mm]
d = diameter [mm]
e = uiterste vezelafstand gerekent vanaf de neutrale lijn van de doorsnede [mm]
f = zakking (doorbuiging) [mm]
f_{max} = grootste zakking (doorbuiging) [mm]
h = profielhoogte [mm]
i = traagheidsstraal [mm]
l = hart-op-hart afstand opleggingen (overspanning); staaflengte [mm]

l_k = kniklengte [mm]
p = contactdruk tussen twee lichamen; uitwendige druk [N/mm^2]
q = belasting per eenheid van lengte [N/mm]
r = straal buitenomtrek ronde doorsnede [mm]
t = wanddikte, plaatdikte, flensdikte [mm]
t_{lijf} = lijfdikte [mm]
x = afstand van een punt tot de *Y*-as [mm]
y = afstand van een punt tot de *X*-as [mm]
z = afstand van een punt tot de neutrale lijn van een doorsnede [mm]
γ = hoekverandering t.g.v. schuifspanning, afschuifhoek [rad]
ε = relatieve rek [–]
υ = specifieke volumeverandering [–]
λ = slankheid van een staaf [–]
μ = contractiecoëfficiënt [–]
ν = dwarscontractiecoëfficiënt [–]
σ = normaalspanning [N/mm^2]
$\overline{\sigma}$ = toelaatbare normaalspanning [N/mm^2]
σ_x = normaalspanning evenwijdig aan de *X*-as [N/mm^2]
$\sigma_{0,2}$ = 0,2% rekgrens [N/mm^2]
σ_E = Eulerse knikspanning [N/mm^2]
σ_i = vergelijkingsspanning (ideële spanning)[N/mm^2]
σ_{kr} = kritieke normaalspanning [N/mm^2]
σ_p = evenredigheidsgrens [N/mm^2]
σ_v = vloeigrens [N/mm^2]
τ = schifspanning [N/mm^2]
τ_{xy} = schifspanning loodrecht *X*-as, evenwijdig *Y*-as [N/mm^2]
$\overline{\tau}$ = toelaatbare schuifspanning [N/mm^2]
τ_{kr} = kritieke schuifspanning [N/mm^2]
τ_w = wringspanning [N/mm^2]
φ = hoekverdraaiing [rad]
ψ = verhouding randspanningen van een plaat [–]
ω = knikcoëfficiënt [–]

Grenstoestanden

– *Rekenkundige spanningsoverschrijding* of *bezwijken*, waarbij de vloeigrens van het beschouwde materiaal de grenstoestand van rekenkundige spanningsoverschrijding bepaalt.

- Grote elastische of plastische *vervormingen*.
- *Instabiliteit* ten gevolge van knikken, kippen of plooien.

De grenstoestand kan ontstaan in de maatgevende doorsnede, in een verbinding, in een constructie-onderdeel, of in de gehele constructie. Deze criteria worden gebruikt voor civiel-technische berekeningen (NEN 6770, TGB-1990 Staal).
Bij staalconstructies voor hefwerktuigen gelden afwijkende regels (NEN 2019)

Uitgangspunten

- Vlakke doorsneden blijven tijdens het belasten vlak (*wet van Bernoulli*)
- Tot de 0,2% rekgrens (of voor vele staalsoorten de vloeigrens) is er evenredigheid tussen spanning en lengteverandering (*wet van Hooke*).

Deze uitgangspunten gelden voor homogene isotrope materialen en zijn voor alle belastingwijzen van toepassing op de meeste constructiestaalsoorten (voor wringing in mindere mate).
Stelt men hierbij dat de vergelijkingsspanning σ_i de rekenwaarde van de vloeigrens niet mag overschrijden dan gebeurt *de berekening volgens de elasticiteitsleer.* Gaat men daarentegen uit van de bezwijktoestand als ontwerpcriterium voor de sterkte van de constructie, dan wordt *de berekening volgens de plasticiteitsleer* uitgevoerd.

Onderverdeling

- *Krachtenleer*, waarmee de in een constructie optredende krachten alsmede de reactiekrachten in de opleggingen worden berekend, veroorzaakt door de op de constructie werkende uitwendige belastingen.
- *Elasticiteitsleer*, waarmee de in een constructie optredende vervormingen en spanningen worden berekend.
- *Plasticiteitsleer*, waarmee in een constructie optredende blijvende vervormingen en spanningen worden berekend, wanneer deze spanningen uitgaan boven de elasticiteitsgrens.
- *Stabiliteitsleer*, waarmee de stabiliteit van een constructie als geheel en van onderdelen van een constructie wordt onderzocht.

2 Statica

2.1 Evenwichtsvoorwaarden voor het platte vlak

$\Sigma F_x = 0$: de algebraïsche som van de ontbondenen van de krachten en reactiekrachten in X-richting is nul;
$\Sigma F_y = 0$: idem, in Y-richting is nul;
$\Sigma M = 0$: de algebraïsche som van de statische momenten van de werkende krachten en reactiekrachten ten opzichte van een willekeurig punt is nul.

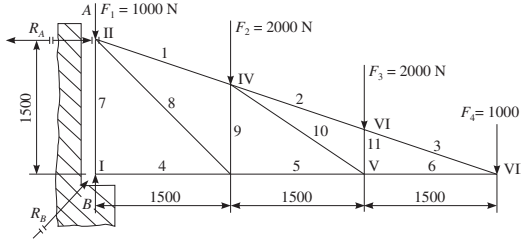
Zie ook C1.3 Statica van vaste lichamen.
Een constructie is *uitwendig statisch bepaald*, wanneer met behulp van de evenwichtsvoorwaarden de oplegreacties kunnen worden bepaald. Een constructie is *uitwendig statisch onbepaald*, wanneer voor het bepalen van de oplegreacties behalve de evenwichts-voorwaarden tevens een of meer elasticiteitsvergelijkingen nodig zijn.

2.2 Berekening van vakwerkconstructies

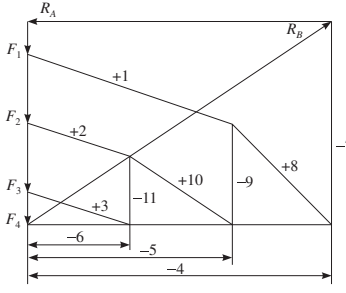
De berekening van de staafkrachten kan geschieden:
- Grafisch uit het evenwicht van de opvolgende knooppunten met de *methode Cremona*.
- Analytisch met de *snedemethode van Ritter* of uit het evenwicht van de opvolgende knooppunten.

Het **cremona-diagram** kan getekend worden wanneer:
- Alle belastingen, ook de steunpuntsreacties, in de knooppunten langs de omtrek van het vakwerk aangrijpen.
- De staven elkaar niet snijden.
- Alle knooppunten van het vakwerk doorlopen worden, waarbij de volgorde vastligt door links of rechts om het vakwerk heen te gaan.
  In diezelfde volgorde moeten de krachten in de krachtenveelhoek worden getekend.

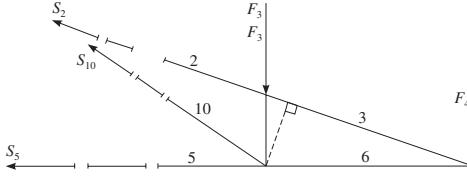
Met de **snedemethode van Ritter** beschouwt men het vakwerk na doorsnijding van dat vakwerk.



Figuur 2.1 Vakwerk aan één zijde ondersteund



Figuur 2.2 Cremona-diagram (verkregen door het vakwerk en elk knooppunt rechtsom te doorlopen)



Figuur 2.3 Bepaling staafkracht met snedemethode van Ritter

Deze rekenwijze is gemakkelijk als controleberekening.
De bepaling van staafkracht S_2 (zie figuur 2.3):

$$F_4 \cdot 1{,}5 - S_2 \cdot 0{,}475 = 0 \text{ of } S_2 = +3{,}16\,\text{kN}.$$

3 Elasticiteitsleer

3.1 Algemeen

Door de aanwezige belastingen ondergaan constructies en onderdelen van constructies *vervormingen* die afhankelijk zijn van de optredende spanningen.
Bij de berekening wordt als regel uitgegaan van *elastische vormveranderingen*, hetgeen betekent dat de optredende spanningen de 0,2% rekgrens niet mogen overschrijden.

Wet van Hooke

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{E}{AE}$$

waarin: σ = optredende spanning (= F/A) (zie par. 3.4)
Δl = verlenging over een lengte l

Dwarscontractie: het verschijnsel dat een staaf wanneer hij wordt gerekt, in de dwarsrichting dunner wordt.

Dwarscontractiecoëfficiënt (*constante van Poisson*): $v = \dfrac{\Delta d/d}{\Delta l/l}$

waarin: v = waarde afhankelijk van het materiaal
(voor metalen is $v \approx \frac{1}{3}$)

Glijdingsmodulus: $G = \dfrac{E}{2(1+v)}$

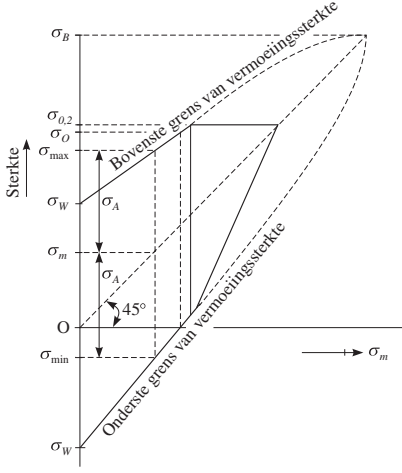
3.2 *Vermoeiing* en *kerfwerking*

Bij *veranderende belasting* kunnen gegevens over toelaatbare spanningen uit het *Smith-diagram* verkregen worden (zie figuur 3.1).
σ_B = breeksterkte
σ_m = gemiddelde spanning
σ_O = sprongsterkte
σ_A = spanningsamplitude
σ_w = wisselsterkte

Bij doorsnede-veranderingen treden in het algemeen spanningspieken op, aangeduid met *kerfwerking*.

Toelaatbare spanning in bouten

$$\overline{\sigma} \leqq a \cdot b \cdot c \cdot e \cdot g \cdot \frac{\sigma_B}{4}$$



Figuur 3.1 Smith-diagram van vermoeiingssterkte

a = factor volgens tabel 3.1
b = factor afhankelijk van de oppervlakteruwheid (= 0,8–1,0)
c = factor afhankelijk van stoten (van sterk tot geen) (0,35–1,00)
e = temperatuurfactor (300 °C:0,64; 120 °C:1,0)
g = wringingsfactor (wringing in combinatie met andersoortige belastingen) ($\approx$ 0,3–1)

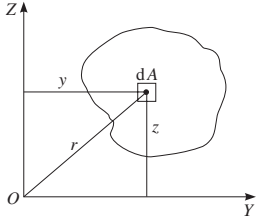
Tabel 3.1 Waarden van de factor a

belastings-geval	werkkracht N	a
I	is constant $= N$	1
II	*verandert* voortdurend tussen 0 en N	$\frac{2}{3}$
III	*wisselt* voortdurend tussen $-N$ en $+N$	$\frac{1}{3}$
IV	*verandert* voortdurend tussen N_{max} en N_{min}	$\frac{2}{3}+\frac{N_{min}}{3N_{max}}$

3.3 Kwadratisch oppervlaktemoment, en weerstandsmoment

Axiaal kwadratisch oppervlakte-moment t.o.v. een willekeurige lijn is gedefinieerd als (zie figuur 3.2):

- $I_Y = \int z^2 \, dA$ (t.o.v. de *Y*-as);
- $I_Z = \int y^2 \, dA$ (t.o.v. de *Z*-as).



Figuur 3.2

Centrifugaal kwadratisch oppervlaktemoment: $I_{YZ} = \int y \cdot z \cdot dA$

Polair kwadratisch oppervlaktemoment: $I_p = \int r^2 \, dA = I_Y + I_z$

Kwadratisch oppervlaktemoment t.o.v. een as l op afstand a evenwijdig aan de Y-as: $I_l = I_Y + A{\cdot}a^2$

Traagheidsstraal: $i_y = \sqrt{\dfrac{I_Y}{A}};\ i_z = \sqrt{\dfrac{I_Z}{A}}$

Weerstandsmoment tegen buiging: $W_\mathrm{B} = \dfrac{I}{e}$

Weerstandsmoment tegen wringing voor ronde doorsneden: $W_W = I_p/r$. Voor formules van I en W, zie tabel 6.1, pag. C2/42.

Statisch moment of *lineair oppervlaktemoment* van een doorsnede:

$$S_Y = \int z\ \mathrm{d}A \text{ en } S_Z = \int y\ \mathrm{d}A$$

Toegepast voor het bepalen van de coördinaten (y_O, z_O) van het middelpunt van een doorsnede:

$$y_\mathrm{O} = \int \frac{\mathrm{y}\ \mathrm{d}A}{A_\mathrm{tot}};\ z_\mathrm{O} = \int \frac{z\ \mathrm{d}A}{A_\mathrm{tot}}$$

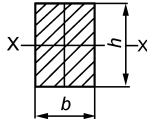
3.4 Traagheids- en weerstandsmomenten

Traagheidsstraal $i = \sqrt{\dfrac{I}{A}}$

Vereenvoudigen: $\dfrac{\pi}{32} \approx 0{,}1(+2\%); \dfrac{\pi}{64} \approx 0{,}05(+2\%)$

Buiging

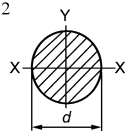
1



$$I_x = \tfrac{1}{12} b \cdot h^3$$
$$W_x = \tfrac{1}{6} b \cdot h^2$$
$$i_x = 0,289h$$
$$I_x = \sum \Delta A \cdot y^2 = \int y^2 \cdot \mathrm{d}A$$

Figuur 3.3

2



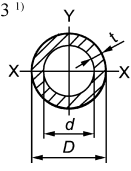
$$I = \frac{\pi}{64} d^4 \approx 0{,}05 d^4$$

$$W_b = \frac{\pi}{32} d^3 \approx 0{,}1 d^3$$

$$i = 0{,}25 d$$

Figuur 3.4

3 [1)]



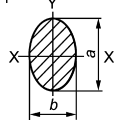
$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)$$

$$W_b = \frac{\pi}{32}\frac{D^4 - d^4}{D}$$

$$i = 0{,}25\sqrt{D^2 + d^2}$$

Figuur 3.5

4



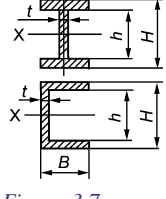
$$I_x = \frac{\pi}{64} b \cdot a^3 \approx 0{,}05 b \cdot a^3$$

$$W_x = \frac{\pi}{32} b \cdot a^2 \approx 0{,}1 b \cdot a^2$$

$$i_x = 0{,}25 a$$

Figuur 3.6

5



$$I_x = \tfrac{1}{12}(B \cdot H^3 - b \cdot h^3)^*$$

$$W_x = \tfrac{1}{6}\frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^{3*}}{H}$$

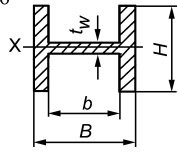
$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^{3*}}{12(B \cdot H - b \cdot h)}}$$

$$^*b = B - t$$

Figuur 3.7

[1)] Voor dunwandige buis is $I < 0{,}393\ D^3 \cdot t$, $W_b < 0{,}785\ D^2 \cdot t$ en $i < 0{,}354 D$
Voor $d = 0{,}9\ D$ (dus $D = 20t$) is $D = 3{,}10\ \sqrt[3]{W_b} = 2{,}77\sqrt[4]{I}$.
Voor $d = 0{,}67\ D$ (dus $D = 6t$) is $D = 2{,}34\ \sqrt[3]{W_b} = 2{,}25\sqrt[4]{I}$.
Voor $d = 0{,}5\ D$ (dus $D = 4t$) is $D = 2{,}22\ \sqrt[3]{W_b} = 2{,}16\sqrt[4]{I}$.

6



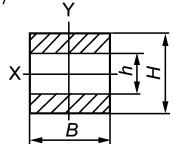
Figuur 3.8

$$I_x = \tfrac{1}{12}(B-b)\cdot H^3 + \tfrac{1}{12} b \cdot t_w^3$$

$$W_x = \frac{I_x}{0{,}5\,H}$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

7



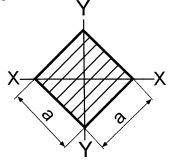
Figuur 3.9

$$I_x = \tfrac{1}{12} B \cdot (H^3 - h^3)$$

$$W_x = \tfrac{1}{6} B \cdot \frac{H^3 - h^3}{H}$$

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}}$$

8



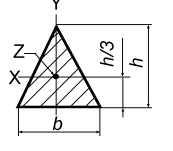
Figuur 3.10

$$I_x = \tfrac{1}{12} a^4$$

$$W_x = \tfrac{1}{12} a^3 \sqrt{2}$$

$$i_x = 0{,}289a$$

9



Figuur 3.11

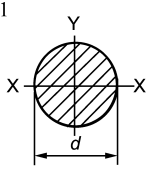
$$I_x = \tfrac{1}{36} b \cdot h^3 \qquad I_y = \tfrac{1}{48} h \cdot b^3$$

$$W_x = \tfrac{1}{24} b \cdot h^2 = \frac{I_x}{\frac{2}{3}h} \qquad W_y = \tfrac{1}{24} h \cdot b^2$$

$$I_{\text{basis}} = \tfrac{1}{12} b \cdot h^3 \qquad I_{\text{top}} = \tfrac{1}{4} b \cdot h^3$$

Wringing: torsie

1



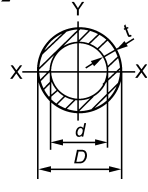
$$I_p = \frac{\pi}{32} d^4 \approx 0{,}1 d^4$$

$$W_{wr} = \frac{I_p}{d/2} = \frac{\pi}{16} d^3 \approx 0{,}2 d^3$$

Figuur 3.12

($I_p = \sum \Delta A \cdot r^2 = \int r^2 \cdot dA$ Aanname: Vanaf het middelpunt naar de buitenomtrek neemt τ lineair toe)

2



$$I_p = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)^{1)}$$

$$W_{wr} = \frac{I_p}{D/2} = \frac{\pi}{16} \frac{D^4 - d^4}{D}$$

Figuur 3.13

$I_t = \frac{\pi}{4} {d_m}^3 \cdot t (I_t = \sum \Delta A \cdot {r_m}^2 \cdot$ Aanname: τ is gelijkmatig over de doorsnede verdeeld $= \tau_m$)

$$W_t = \frac{I_t}{d_m/2} = \frac{\pi {d_m}^2 \cdot t}{2} \text{ waarin } d_m = D - t$$

$$T = W_t \cdot \tau_m \quad \tau_m = \tau_{t;m} (= \tau_m \text{ t.g.v. } T)$$

3.5 Trek en druk

Wanneer op een staaf in de lengterichting twee gelijke maar tegengesteld gerichte krachten F werken, ontstaan in de normaal-

[1)] Voor een dunwandige buis aan één zijde doorgezaagd is $I_t \approx \frac{\pi d_m \cdot t^3}{3}$ en $W_t \approx \frac{\pi d_m \cdot t^2}{3}$

doorsnede (doorsnede loodrecht op de staafas) *normaalspanningen* die gelijkmatig over het oppervlak van de doorsnede zijn verdeeld:

$$\sigma = \pm\frac{F}{A} \qquad (\sigma > 0\text{: trek; } \sigma < 0\text{: druk})$$

Bij een staaflengte l ontstaat een verlenging c.q. verkorting:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$$

Alzijdige compressie: $v = -\dfrac{p}{K}$

waarin: $v =$ specifieke volumeverandering
$p =$ uitwendige druk
$K =$ compressiemodulus $= E/(3 - 6v)$

3.6 Buiging (spanning en vervorming)

Wanneer een ingeklemde of op andere wijze ondersteunde balk loodrecht op de lengterichting wordt belast, treedt buiging op. N.B. Vervorming door afschuiving wordt hier verwaarloosd.
De materiaalvezels worden aan de ene zijde op trek en aan de andere zijde op druk belast.
Optredende grootste normaalspanning:

$$\sigma = \frac{M \cdot e}{I} = \frac{M}{W_B}$$

Door de bij buiging optredende spanningen zal de ligger vervormen. Voor de berekening van deze vervormingen kunnen formules worden afgeleid uit de differentiaalvergelijking van de *elastische lijn* (lijn door de oppervlaktemiddelpunten van de normaaldoorsneden):

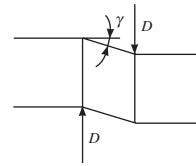
$$\frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}x^2} = z'' = \frac{M}{EI}$$

Hieruit volgen formules voor de elementaire gevallen van eenzijdig ingeklemde liggers (de zgn. *vergeet-me-nietjes*) voor de doorbuigingen f en de hoekverdraaiingen φ.
Zie tabel 6.2, pag. C2/44 e.v.

3.7 Afschuiving

Voor een doorsnede alleen op *afschuiving* belast (krachten// doorsnede) wordt aangenomen, dat D gelijkmatig verdeeld door de doorsnede wordt opgenomen. Voor spanning en vervorming geldt:

$$\tau = \frac{D}{A} \text{ en } \gamma = \frac{\tau_a}{G}$$

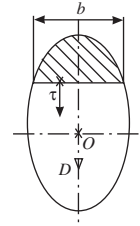


Figuur 3.14 Afschuiving

Buiging en afschuiving

Bij *afschuiving* gecombineerd met *buiging* wordt in de dwarsdoorsnede de schuifspanningscomponent in de richting van D als volgt bepaald:

$$\tau = \frac{D \cdot S}{b \cdot I}$$



Figuur 3.15 Buiging èn afschuiving

In figuur 3.15 werkt de buiging in het vlak van de verticale symmetrie-as en valt D samen met deze as. S is het statisch moment

van het afgesneden gearceerde deel van de doorsnede t.o.v. de neutrale lijn; b is de breedte op de plaats waar men τ wenst te bepalen.

In het algemeen treedt τ_{max} ter plaatse van de neutrale lijn op. Er geldt:

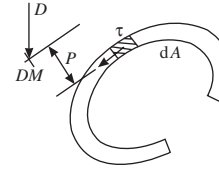
- rechthoekige doorsneden $\tau_{max} = \frac{3}{2} \cdot \tau_{(gem)}$
- cirkelvormige doorsneden $\tau_{max} = \frac{4}{3} \cdot \tau_{(gem)}$
- dunwandige ronde buis $\tau_{max} = 2 \cdot \tau_{(gem)}$

$$\Big\} \quad \tau_{(gem)} = \frac{D}{A}$$

- UNP-, IPE- en HE-profielen $\tau_{max} \approx \dfrac{D}{A_{mf}}$

Dwarskrachtenmiddelpunt

Onder het *dwarskrachtenmiddelpunt* van een balkdoorsnede op buiging en afschuiving verstaat men het punt, waardoor de resulterende dwarskracht moet gaan, opdat uitsluitend buiging en afschuiving en geen wringing van de doorsnede optreedt (zie figuur 3.16).



Figuur 3.16

Voor het dwarskrachtenmiddelpunt DM geldt in het algemeen (zie figuur 3.16): $\int p\tau \, dA = 0$.

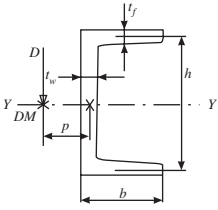
Men kan hiermee de plaats van DM berekenen.
Plaats van DM voor:

- Doorsnede met twee symmetrie-assen: snijpunt symmetrieassen.
- Hoekstaal: snijpunt van de flenzen.
- T-profiel: snijpunt flens en lijf.
- U-profiel (zie figuur 3.17):

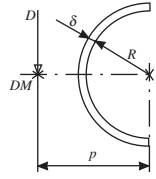
$$p \approx \frac{h^2 \cdot t_f (b - t_w)^2}{4 I_Y}$$

- Halifcirkelvormig profiel (zie figuur 3.18):

$$p = \frac{4R}{\pi} \quad (\delta \ll R)$$



Figuur 3.17 U-profiel



Figuur 3.18 Halfcirkelvormig profiel

3.8 Wringing

Bij wringing van **ronde doorsneden** hol of massief geldt:

$$\tau_w = \frac{M_w}{W_w} \text{ en } \varphi_w = \frac{M_w \cdot l}{G \cdot I_p}$$

waarin: φ_w = wringingshoek

$$W_w = \frac{\pi}{16} d^3 \text{ of } \frac{\pi}{16}\left(\frac{d_1^4 - d_2^4}{d_1}\right)$$

$$I_p = \frac{\pi}{32} d^4 \text{ of } \frac{\pi}{32}(d_1^4 - d_2^4)$$

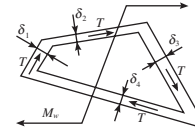
l = lengte van de as
d_1 = uitwendige diameter holle as
d_2 = inwendige diameter holle as

Bij wringing van een willekeurige **dunwandige gesloten** doorsnede geldt voor de *schuifstroom* T en de *schuifspanning* τ_w:

$$T = \frac{M_w}{2A_{\text{omsl}}} \qquad \tau_w = \frac{T}{\delta_n}$$

waarin:

A_{omsl} = oppervlakte door buitenomtrek van de doorsnede omsloten



Figuur 3.19

Voor massieve en dikwandige niet ronde doorsneden en dunwandige open doorsneden bestaan soms benaderingsformules (speciale literatuur).

3.9 Combinatie normaalkracht en buiging

Wanneer de combinatie *normaalkracht* en *buiging* optreedt en geen gevaar voor knik aanwezig is, moet de spanning gecontroleerd worden met:

$$\sigma = \pm\frac{F}{A} \pm \frac{M}{W_B}$$

Bij een grotere belasting op druk zal ook een controle op knik uitgevoerd moeten worden volgens:
- DIN 4114 en NEN 6770, TGB-1990 Staal voor civiele constructies.
- DIN 4114 en NEN 2019 voor staalconstructies voor hefwerktuigen.

3.10 Dubbele buiging

Treedt bij een doorsnede buiging t.o.v. de beide hoofdtraagheidsassen op, dan moet de spanning gecontroleerd worden met:

$$\sigma = \pm\frac{M_Y \cdot z}{I_Y} \pm \frac{M_Z \cdot y}{I_Z}$$

Voor het invullen van y en z moeten de coördinaten van het punt worden genomen, die de grootste σ opleveren.
Bij buiging t.o.v. een willekeurige as, wordt het buigende koppel ontbonden in twee componenten t.o.v. de hoofdtraagheidsassen en wordt de voorgaande spanningsberekening toegepast.

3.11 Buiging en wringing

Bij de combinatie *buiging* en *wringing* worden σ en τ met de spanningformules voor de beide belastingen berekend en met de *hypothese van Huber en Hencky* $\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau_w^2}$ bepaald. σ_i

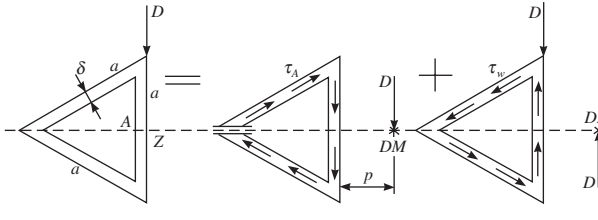
wordt vergeleken met $\overline{\sigma}$ van het materiaal. σ_i wordt ook wel $\sigma_{\text{vergelijk}}$ genoemd.

Bij **ronde assen** kan men omdat $W_w = 2W_B$, uit $\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\pi_w^2}$ de formule voor het vergelijkende buigende moment M_i afleiden en daarmee σ_i berekenen:

$$M_i = \sqrt{M_B^2 + \tfrac{3}{4}M_w^2} \qquad \sigma_i = \frac{M_i}{W_B}$$

3.12 Afschuiving en wringing

Bij deze combinatie moet men τ_a en τ_w in het ongunstigste punt berekenen en deze vectorieel samenstellen tot de resulterende schuifspanning τ_r.
Bij de combinatie *afschuiving* en *buiging*, waarbij de dwarskracht D niet door het dwarskrachtenmiddelpunt DM gaat, treedt ook wringing op. Men brengt D naar DM en het daarbij optredende verplaatsingskoppel is het wringend moment M_W. Een speciaal geval vormen gesloten doorsneden met één symmetrie-as en D niet evenwijdig aan de symmetrie-as. Men maakt dan een opening in de doorsnede op de symmetrie-as en past superposite toe (zie figuur 3.20).



Figuur 3.20 Superpositie

Bij de berekening wordt τ_{max} in het punt A op de symmetrie-as gevonden. Een berekening levert de volgende grootheden en uitkomsten:

$$I_Y = \tfrac{1}{4}\delta \cdot a^3 \quad A_{omsl} = \tfrac{1}{4}a^2\sqrt{3} \quad p = \tfrac{1}{6}a\sqrt{3}$$

Voor A:

$$S = \tfrac{3}{8}\delta \cdot a^2 \quad \tau_A = \frac{D \cdot \frac{3}{8}\delta \cdot a^2}{\delta \cdot \frac{1}{4}\delta \cdot a^3} = \frac{3}{2}\frac{D}{\delta \cdot a}$$

$$\tau_W = \frac{D \cdot \frac{1}{6}a\sqrt{3}}{2 \cdot \frac{1}{4}a^2\sqrt{3} \cdot \delta} = \frac{1}{3}\frac{D}{\delta \cdot a}$$

$$\tau_{max} = \frac{3}{2}\frac{D}{\delta \cdot a} - \frac{1}{3}\frac{D}{\delta \cdot a} = \frac{7}{6}\frac{D}{\delta \cdot a}$$

3.13 Statisch onbepaalde gevallen

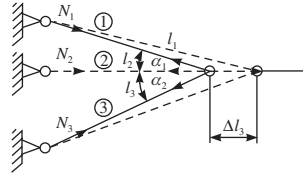
Algemeen

Bij een *statisch onbepaalde* constructie moeten voor de bepaling van in- en of uitwendige krachten behalve de statische evenwichtsvoorwaarden ook vormveranderingsvoorwaarden gebruikt worden.

Trek/druk

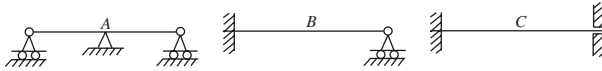
$N_1 \sin\alpha_1 - N_3 \sin\alpha_2 = 0$
$N_1 \cos\alpha_1 + N_2 + N_3 \cos\alpha_2 = F$

- $\Delta l_1 = \Delta l_2 \cos\alpha_1$
  $\Rightarrow \dfrac{N_1 \cdot l_1}{E_1 \cdot A_1} = \dfrac{N_2 \cdot l_2}{E_2 \cdot A_2}\cos\alpha_1$
- $\Delta l_3 = \Delta l_2 \cos\alpha_2$
  $\Rightarrow \dfrac{N_3 \cdot l_3}{E_3 \cdot A_3} = \dfrac{N_2 \cdot l_2}{E_2 \cdot A_2}\cos\alpha_2$



Figuur 3.21 Trek/druk

Buiging



Figuur 3.22 Eenvoudige gevallen van buiging

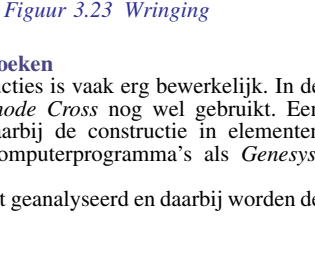
Voor de eenvoudige gevallen van figuur 3.22 stelt men voor A en B de verticale verplaatsing van een ondersteuning t.o.v. een andere ondersteuning gelijk aan 0, of gelijk aan een voorgeschreven waarde.
Voor C stelt men de verplaatsing en hoekverdraaiing van de ene ondersteuning t.o.v. de andere gelijk aan 0.
Tabel 6.2 (pag. C2/38 e.v.) geeft de reacties voor deze liggers voor een groot aantal belastingen.

Wringing

$$M_{w1} + M_{w2} = M_w$$

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\frac{M_{w1} \cdot l_1}{G_1 \cdot I_{p1}} = \frac{M_{w2} \cdot l_2}{G_2 \cdot I_{p2}}$$

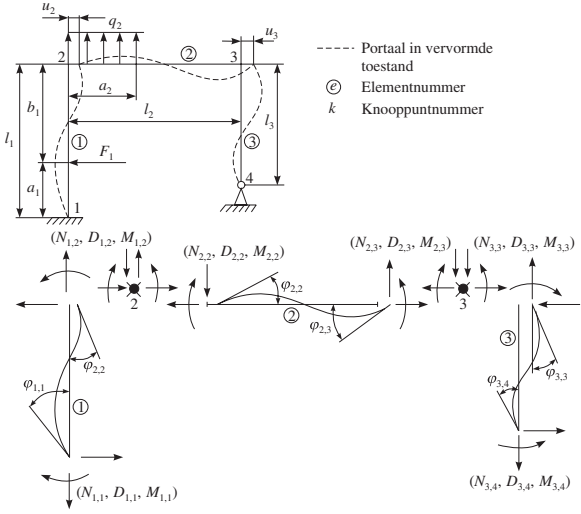


Figuur 3.23 Wringing

Staafconstructies met stijve hoeken

De berekening van deze constructies is vaak erg bewerkelijk. In de civiele techniek wordt de *methode Cross* nog wel gebruikt. Een universele oplossing is die waarbij de constructie in elementen gesplitst wordt. Hierbij zijn computerprogramma's als *Genesys, Diana* en *Nastran* te gebruiken.
Het portaal van figuur 3.24 wordt geanalyseerd en daarbij worden de vergelijkingen opgesteld.

$(N_{2,3}, D_{2,3}, M_{2,3})$ = belastingsvector op knooppunt 3 van element 2
$\varphi_{2,3}$ = vervormingshoek in knooppunt 3 van element 2
$\times$ = knooppunt met belastingsvector



Figuur 3.24 Analyse van een portaal (toelichting: zie tekst)

Rand- en aansluitingsvoorwaarden:

$$\varphi_{1,1} = 0 \quad M_{3,4} = 0 \quad \varphi_{1,2} = \varphi_{2,2} \quad \varphi_{2,3} = \varphi_{3,3} \quad u_2 = u_3$$

Evenwichtsvergelijkingen knooppunten 2 en 3:

$$\begin{array}{lll} D_{1,2} + N_{2,2} = 0 & -N_{1,2} + D_{2,2} = 0 & -M_{1,2} + M_{2,2} = 0 \\ -N_{2,3} + D_{3,3} = 0 & -D_{2,3} + N_{3,3} = 0 & -M_{2,3} + M_{3,3} = 0 \end{array}$$

Evenwichtsvergelijkingen elementen:

$$\begin{array}{ll} -N_{1,1} + N_{1,2} = 0 & -D_{1,1} + D_{1,2} + F_1 = 0 \\ & -M_{1,1} + M_{1,2} + D_{1,2} \cdot l_1 + F_1 \cdot a_1 = 0 \end{array}$$

$$-N_{2,2} + N_{2,3} = 0 \quad -D_{2,2} + D_{2,3} + q_2 \cdot a_2 = 0$$
$$-M_{2,2} + M_{2,3} + D_{2,3} \cdot l_2 + \tfrac{1}{2} q_2 \cdot a_2^2 = 0$$
$$-N_{3,3} + N_{3,4} = 0 \quad -D_{3,3} + D_{3,4} = 0$$
$$-M_{3,3} + M_{3,4} + D_{3,4} \cdot l_3 = 0$$

Hoekverdraaiing knooppunten:

$$\varphi_{1,1} = \frac{F_1 \cdot b_1(l_1^2 - b_1^2)}{6E \cdot I_1 \cdot l_1} - \frac{M_{1,1} \cdot l_1}{3E \cdot I_1} - \frac{M_{1,2} \cdot l_1}{6E \cdot l_1} - \frac{u_2}{l_1}$$

$$\varphi_{1,2} = \frac{-F_1 \cdot a_1(l_1^2 - a_1^2)}{6E \cdot I_1 \cdot l_1} + \frac{M_{1,1} \cdot l_1}{6E \cdot I_1} + \frac{M_{1,2} \cdot l_1}{3E \cdot I_1} - \frac{u_2}{l_1}$$

$$\varphi_{2,2} = \frac{q_2 \cdot a_2^2(2l_2 - a_2)^2}{24E \cdot I_2 \cdot l_2} - \frac{M_{2,2} \cdot l_2}{3E \cdot I_2} - \frac{M_{3,3} \cdot l_2}{6E \cdot I_2}$$

$$\varphi_{2,3} = \frac{-q_2 \cdot a_2^2(2l_2^2 - a_2^2)}{24E \cdot I_2 \cdot l_2} + \frac{M_{2,2} \cdot l_2}{6E \cdot I_2} + \frac{M_{2,3} \cdot l_2}{3E \cdot I_2}$$

$$\varphi_{3,3} = \frac{-M_{3,3} \cdot l_3}{3E \cdot I_3} - \frac{M_{3,4} \cdot l_3}{6E \cdot I_3} - \frac{u_3}{l_3}$$

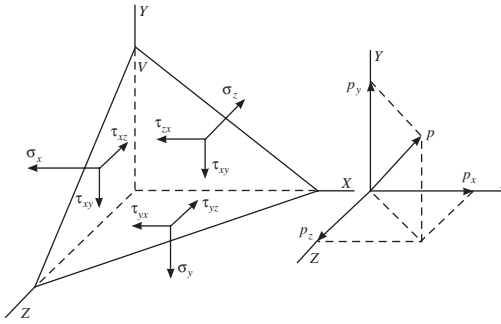
$$\varphi_{3,4} = \frac{M_{3,3} \cdot l_3}{6E \cdot I_3} + \frac{M_{3,4} \cdot l_3}{3E \cdot I_3} - \frac{u_3}{l_3}$$

Deze vergelijkingen zijn opgezet m.b.v. tabel 6.2 (pag. C2/38 e.v.). Oplossing van alle vergelijkingen levert de belastingsvectoren, hoekverdraaiingen van de knooppunten, u_2 en u_3. Hierna kan men de elementen volledig narekenen.

3.14 Spanningsleer

Algemeen – ruimtespanningstoestand

De spanningen op vlakken door een punt zijn volledig bepaald wanneer de spanningen op drie loodrechte vlakken door het punt de *spanningstensor* T vormend gegeven zijn.



Figuur 3.25 Spanningen op vlakken door een punt

In figuur 3.25 kan de spanning $\boldsymbol{p}$ op vlak V met richtingsvector $\boldsymbol{n}$ bepaald worden:

$$\boldsymbol{p} = T \times \boldsymbol{n}$$

waarin:

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \qquad \begin{aligned} \boldsymbol{n}^T &= [\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma] \\ \boldsymbol{p}^T &= [p_x, p_y, p_z] \end{aligned}$$

α, β en γ zijn de richtingshoeken tussen de normaal op V en de X-, Y- en Z-as.

De normaalspanning σ op V wordt bepaald met:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{n}^T \times T \times \boldsymbol{n}$$

Verder geldt:

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1, \ |p| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \text{ en}$$
$$|\tau| = \sqrt{p^2 - \sigma^2}$$

Vlakspanningstoestand

Voor de *vlakspanningstoestand*, waarbij in figuur 3.25 het vlak loodrecht op de Z-as spanningsloos is, geldt:

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De vlakken *door* de Z-as dragen de ongunstigste combinaties van σ en τ, en worden bepaald door de richtingsvector

$$\boldsymbol{n}^T = [\cos\alpha, \cos\beta, 0] \quad \text{waarbij } \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha.$$

Spanningsrelaties:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\cos 2\alpha + \tau_{xy}\sin 2\alpha$$

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\sin 2\alpha - \tau_{xy}\cos 2\alpha$$

De hoofdvlakken met de hoofdspanningen $\sigma_{\max}$ en $\sigma_{\min}$ worden bepaald door:

$$\tan 2\alpha_M = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Hoofdspanningen:

$$\sigma^{\max.}_{\min.} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \tfrac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Op de hoofdvlakken is $\tau = 0$.
De vlakken met maximale schuifspanning maken hoeken van 45° met de hoofdvlakken en hierop zijn:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \qquad \text{en } \tau^{\max.}_{\min.} = \pm\tfrac{1}{2}\sqrt{(\sigma^x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Lijnspanningstoestand

Voor de *lijnspanningstoestand* (bijv. trekstaaf) is:

$$\sigma = \sigma_x \cos^2\alpha \text{ en } \tau = \tfrac{1}{2}\sigma_x \cdot \sin 2\alpha$$

Hoofdspanning ($\alpha = 0$): $\sigma_{\max} = \sigma_x$ en $\tau_{\max} = \frac{1}{2}\sigma_x$

Grensspanningshypothesen
Om de combinatie van een schuif- en een normaalspanning op een doorsnede te beoordelen en te vergelijken met een toelaatbare spanning $\overline{\sigma}$ voor een materiaal, worden *grensspanningshypothesen* gehanteerd. Deze hypothesen geven een vergelijkende normaalspanning σ_i, die even gevaarlijk geacht mag worden als de optredende combinatie van σ en τ.
De meest gebruikte hypothese is die van *Huber* en *Hencky*

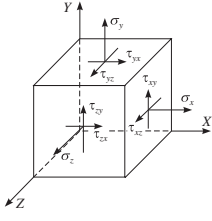
$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Voor specifieke toepassingen (bijv. verbindingen in staalconstructies) worden dikwijls andere hypothesen gebruikt. Voor de berekening van hoeklassen volgens NEN 2062 geldt bijv.:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 2\tau^2}.$$

3.15 Spanning-rek-relaties

Algemeen – ruimtespanningstoestand



Figuur 3.26 Ruimtespanningstoestand bij een rechthoekig blokje

Toepassing van de *Wet van Hooke* op het rechthoekig blokje van figuur 3.26:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z) \qquad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x + \sigma_y - \nu\sigma_z) \qquad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x - \nu\sigma_y + \sigma_z) \qquad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

Inverse vorm:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\{(1-\nu)\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z\} \qquad \tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\{\nu\varepsilon_x + (1-\nu)\varepsilon_y + \nu\varepsilon_z\} \qquad \tau_{xz} = G \cdot \gamma_{xz}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\{\nu\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y + (1-\nu)\varepsilon_z\} \qquad \tau_{yz} = G \cdot \gamma_{yz}$$

Vlakspanningstoestand

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y); \qquad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(-\nu\sigma_x - \nu\sigma_y); \qquad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

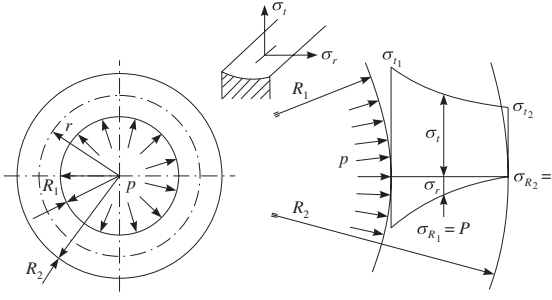
$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y); \quad \sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y)$$

$$\tau_{xy} = \sigma\gamma_{xy}$$

Lijnspanningstoestand

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}; \quad \varepsilon_y = \varepsilon_z = -\frac{\nu\sigma_x}{E}; \quad \sigma_x = E\varepsilon_x$$

3.16 Dik- en dunwandige buizen



Figuur 3.27 Verloop σ_r en σ_t over doorsnede dikwandige buis

Voor een *dikwandige buis* onder een inwendige overdruk p (zie figuur 3.27) zijn de radiale en tangentiële normaalspanningen σ_r en σ_t op straal r in een radiale doorsnede:

$$\sigma_r = \frac{p \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}\left(1 - \frac{R_2^2}{r^2}\right) \qquad \sigma_t = \frac{p \cdot R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}\left(1 + \frac{R_2^2}{r^2}\right)$$

Voor een *dunwandige* buis met wanddikte δ geldt:

$$\sigma_r = p \text{ en } \sigma_t = \frac{p \cdot R}{\delta}$$

Voor een dikwandige buis onder een uitwendige overdruk p geldt (R_1 en R_2 van plaats verwisseld):

$$\sigma_r = \frac{-pR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}\left(1 - \frac{R_1^2}{r^2}\right) \text{ en } \sigma_t = \frac{-pR_2^2}{R_2^2 - R_1^2}\left(1 + \frac{R_1^2}{r^2}\right)$$

3.17 Contactdruk tussen twee oppervlakken

Oppervlaktecontact

Voor twee platte vlakken is de maximum *contactdruk* gelijk aan de gemiddelde contactdruk p_M.

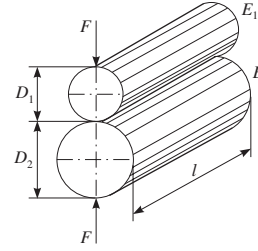
$$p_{\max} = p_M = \frac{F}{A}$$

Lijncontact (formules van Hertz)

Figuur 3.28:

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{F}{2{,}8l} \cdot \frac{D_1 + D_2}{D_1 D_2} \cdot \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2}}$$

$$P_M = \frac{p_{\max}}{1{,}27}$$

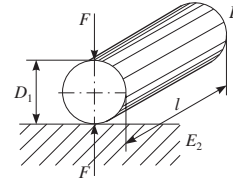


Figuur 3.28

Figuur 3.29:

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{F}{2{,}86l} \cdot \frac{1}{D_1} \cdot \frac{2E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}}$$

$$P_M = \frac{p_{\max}}{1{,}27}$$



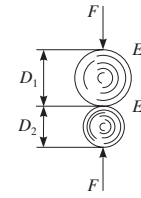
Figuur 3.29

Puntcontact (formules van Hertz)

Figuur 3.30:

$$p_{\max} = \sqrt[3]{\frac{F}{4{,}28} \cdot \left(\frac{D_1 + D_2}{D_1 \cdot D_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{2E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}\right)^2}$$

$$p_M = \frac{p_{\max}}{1{,}5}$$

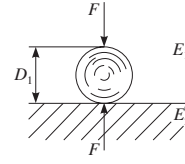


Figuur 3.30

Figuur 3.31:

$$p_{\max} = \sqrt[3]{\frac{F}{4{,}28} \cdot \frac{1}{D_1^2} \cdot \left(\frac{2E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}\right)^2}$$

$$p_M = \frac{p_{\max}}{1{,}5}$$



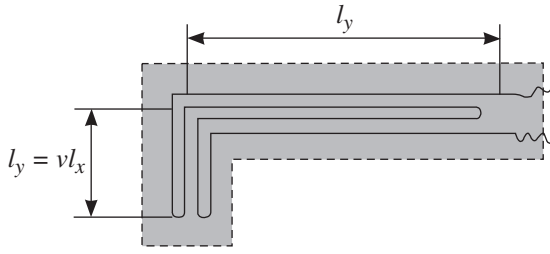
Figuur 3.31

3.18 Spanningsmetingen met rekstrookjes

Met *rekstrookjes* worden rekken aan het buitenoppervlak van een lichaam gemeten. Hieruit kan men met de spanning-rek-formules spanningen berekenen. Voor een buitenoppervlak geldt de vlak-spanningstoestand. Als men in een punt de hoofdrichtingen kent, kan men met twee rekstrookjes direct de hoofdrekken ε_x en ε_y meten; de hoofdspanningen zijn dan:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1 - \nu^2)}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \text{ en } \sigma_y = \frac{E}{(1 - \nu^2)}(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y)$$

Met het speciale L-vormige rekstrookje (figuur 3.32) kan men door de lengteverhouding $l_y/l_x = \nu$ direct $(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)$ bepalen.
Wanneer het rekstrookje 90° gedraaid wordt, is ook $(\nu\varepsilon_x + \varepsilon_y)$ te bepalen.



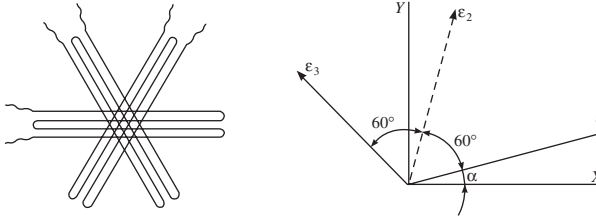
Figuur 3.32 L-vormig rekstrookje

Wanneer de hoofdrichtingen niet bekend zijn, moeten de rekken in drie richtingen worden gemeten; op die manier kunnen dan de hoofdspanningen worden bepaald. Hiervoor bestaan speciale *rosette-strookjes* (figuur 3.33) waarmee de drie rekken ε_1, ε_2 en ε_3 onder hoeken van 60° worden gemeten.

Zijn de hoofdrekken ε_x en ε_y en de hoek tussen ε_x en ε_1 α, dan geldt:

$$\tan 2\alpha = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3} \qquad \varepsilon_x = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{2} + \frac{2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{3\cos 2\alpha}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{2} - \frac{2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3}{3\cos 2\alpha}$$



Figuur 3.33 Rosette-strookjes

3.19 Eindige Elementen Methode (E.E.M)

De eindige elementen methode wordt in het Engels aangeduid met Finite Element Method, afgekort FEM.
Principe van de methode: de constructie wordt in 'elementen' verdeeld, b.v. bij een vakwerkconstructie zijn de staven de 'elementen' en de verbindingspunten de 'knooppunten'.
Bij een plaatconstructie zijn de elementen 'plaatelementen'.
Definitie van een element: een elementaire constructie van een bepaald type (b.v. staaf, balk, plaat, etc.) dat zich uitstrekt tussen knooppunten. Dit zijn voor een staafelement de uiteinden en voor een plaatelement de hoekpunten.
Het elastisch gedrag van een element wordt nu bepaald door de krachten op de knooppunten uit te drukken als functie van de knooppuntsverplaatsingen. Dit levert een aantal vergelijkingen op die worden vastgelegd in een matrixnotatie. Het quotiënt van de krachtvector en de verplaatsingsvector is de '*stijfheidsmatrix*' van het element.
De verplaatsingen van twee knooppunten van twee aanliggende elementen kunnen aan elkaar gelijk worden gesteld, dus de elementstijfheidsmatrices kunnen worden samengevoegd tot een grote stijfheidsmatrix. Deze beschrijft het elastisch gedrag van de gehele constructie aan de hand van de belastingen en verplaatsingen van de knooppunten.
Het elastisch gedrag van een constructie is nu beschreven in de vorm van n vergelijkingen met n onbekenden. Hierbij kan n zeer groot zijn. Numeriek kunnen deze vergelijkingen worden opgelost met behulp van de eliminatiemethode van Gauss ofwel de methoden van Jacobi en Gauss-Seidel (zie hoofdstuk A2 *Wiskunde*, par. 10.2)
Het stelsel vergelijkingen wordt in matrixnotatie geschreven als:

$$f = Q \cdot u$$

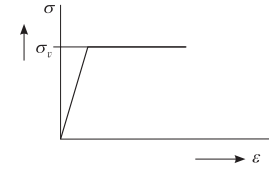
waarin:

f = krachtvector
Q = stijfheidsmatrix
u = verplaatsingsvector

Voor het overige wordt verwezen naar de opgegeven literatuur en naar de vele eindige elementenpakketten die op dit moment beschikbaar zijn.

4 Plasticiteitsleer

Voor de berekening van de *bezwijkbelastingen* neemt men aan, dat de spanningen in alle vezels van de doorsnede de waarde σ_e of σ_v van het materiaal aannemen. Voor staal gaat men uit van het *vereenvoudigd bilineaire σ–ε-diagram* (figuur 4.1).



Figuur 4.1 Vereenvoudigd bilineair σ–ε-diagram

Bij belasting op **trek** is de bezwijklast:

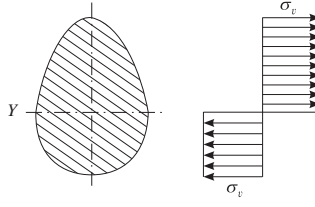
$$F_v = A \times \sigma_v$$

Bij belasting op **buiging** gaat men voor de berekening van de bezwijkbelasting M_v uit van de spanningsverdeling volgens figuur 4.2. De neutrale lijn (*Y*-as) deelt hierbij de doorsnede in gelijke oppervlakten:

$$A_{\text{trek}} = A_{\text{druk}} = \tfrac{1}{2}A_{\text{tot}}$$

Bezwijkmoment $M_v = \sigma_v\,(S_{TY} + S_{DY})$

S_{TY} = statisch moment *trekzone* t.o.v. *Y*-as
S_{DY} = statisch moment *drukzone* t.o.v. *Y*-as.



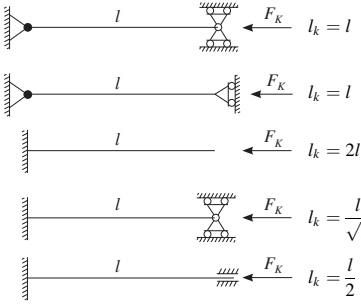
Figuur 4.2 Spanningsverdeling bij buiging

5 Stabiliteitsleer

Knik

Voor *knik* in het elastische gebied van het materiaal geldt de theorie van *Euler*:

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2}; \quad \sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}; \quad \lambda = \frac{l_k}{i_{\min}}$$



Figuur 5.1 Knikgevallen met bijbehorende kniklengten

De theorie van Euler geldt voor σ_E kleiner dan de evenredigheidsgrens σ_p van een materiaal. Voor $\sigma_E > \sigma_p$ *bestaan andere benaderingstheoriën, zoals die van Engesser* en *Tetmajer.*
In NEN 6770 en NEN 2019 volgt men voor de berekening van drukstaven voor bouwconstructies en staalconstructies voor hefwerktuigen, in het algemeen DIN 4114. Voor de praktische rekenwijze hanteert men hierbij een *fictieve spanning*:

$$\sigma = \frac{\omega \cdot F}{A}$$

De *knikcoëfficiënt* ω is afhankelijk van de *slankheid* λ (zie hoofdstuk E1, par. 2.3, tabel 2.5b en hoofdstuk F3, par. 5 *Staalconstructies*, tabel 5.14.

De berekende fictieve spanning wordt vergeleken met de $\overline{\sigma}$ of de $\sigma_{0,2}$ van het materiaal. In de normen zijn rekenregels voor samengestelde staven en knik gecombineerd met buiging opgenomen.

Op druk en afschuiving belaste platen (plooien)

De in een vlakke rechthoekige plaat optredende grootste spanningen σ en τ moeten worden vergeleken met de *kritieke plooi-spanningen* σ_{KR} en τ_{KR}.

$$\sigma_{KR} = k_D \cdot \sigma_E \text{ en } \tau_{KR} = k_S \cdot \sigma_E$$

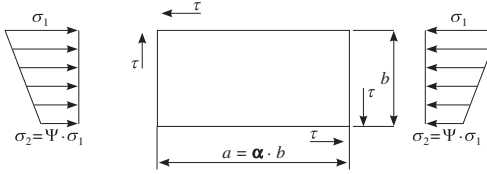
σ_E is de knikspanning volgens Euler voor een plaat:

$$\sigma_E = 19\left(\frac{100t}{b}\right)^2$$

σ_E wordt aan de bovenzijde begrensd door $\sigma_{0,2}$.

De plooifactoren k_D en k_S zijn afhankelijk van Ψ en α en de manier waarop de plaat aan de randen ondersteund wordt. Voor de bepaling van k_D en k_S voor civiele constructies zie DIN 4114 en NEN 6770. Voor staalconstructies voor hefwerktuigen moet behalve DIN 4114, ook NEN 2019 geraadpleegd worden.
Algemeen moet aangetoond worden, dat:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{KR}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{KR}}\right)^2} \leqslant 1$$

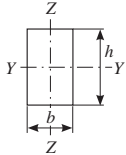
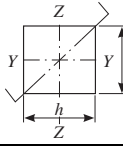
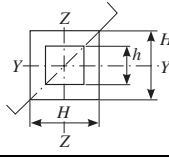
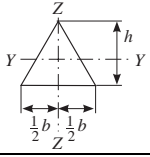


Figuur 5.2 Spanningssituatie voor een plaat

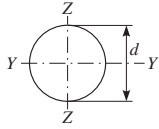
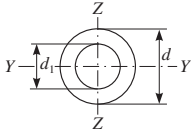
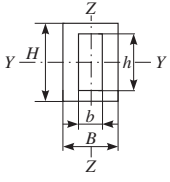
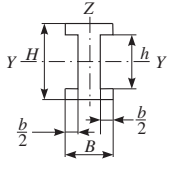
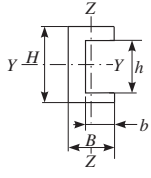
Kip van een op buiging belaste stalen ligger
NEN 6770 en NEN 2019 geven rekenregels voor de berekening van de kipveiligheid van stalen liggers.

6 Tabellen

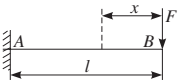
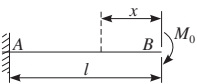
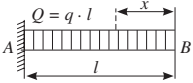
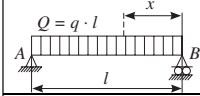
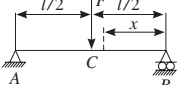
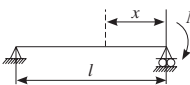
Tabel 6.1 Kwadratisch oppervlaktemoment en weerstandsmomenten voor verschillende doorsneden

vorm doorsnede	kwadr.opp. moment	weerstandsmomenten
	$I_y = \frac{bh^3}{12}$ $I_z = \frac{hb^3}{12}$	$W_y = \frac{bh^2}{6}$ $W_z = \frac{hb^2}{6}$
	$I_y = I_z = \frac{h^4}{12}$ $I_l = \frac{h^4}{12}$	$W_y = W_z = \frac{h^3}{6}$ $W_l = \frac{h^3\sqrt{2}}{12}$
	$I_y = I_z = \frac{h^4 - h^4}{12}$ $I_l = \frac{H^4 - h^4}{12}$	$W_y = W_z = \frac{1}{6}\left(\frac{H^4 - h^4}{H}\right)$ $W_l = \frac{\sqrt{2}}{12}\left(\frac{H^4 - h^4}{H}\right)$
	$I_y = \frac{bh^3}{36}$ $I_z = \frac{hb^3}{48}$	$W_{y\,\text{onder}} = \frac{bh^2}{12}$ $W_{y\,\text{boven}} = \frac{bh^2}{24}$ $W_z = \frac{hb^2}{24}$

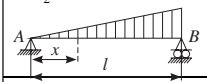
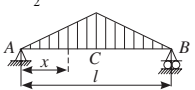
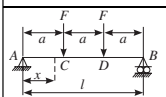
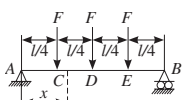
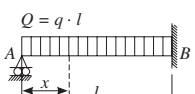
Tabel 6.1 (vervolg)

vorm doorsnede	kwadr.opp. moment	weerstandsmomenten
Cirkelvormig 	$I_y = I_z = \frac{\pi d^4}{64}$ $I_p = \frac{\pi d^4}{32}$	$W_y = W_z = \frac{\pi d^3}{32}$ $W_w = \frac{\pi}{16} d^3$
Buisvormig 	$I_y = I_z = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64}$ $I_p = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{32}$	$W_y = W_z = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{32d}$ $W_w = \frac{\pi}{16}\left(\frac{d^4 - d_1^4}{d}\right)$
	$I_y = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$W_y = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$
		
		

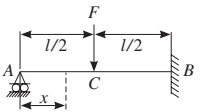
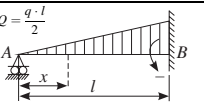
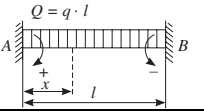
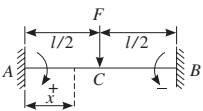
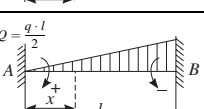
Tabel 6.2 Gegevens voor verschillende belastinggevallen

belastinggeval	steunpuntsreacties R bij punt A en B dwarskracht D	(max.) buigend moment	doorbuiging (zakking) max. doorbuiging en hoekverdraaiing φ
	$R_A = +F$ $D = F$	$M = F \cdot x$ $M_{\max A} = F \cdot l$	$f = \frac{1}{6}\frac{F}{EI}(x^3 - 3l^2x + 2l^3)$ $f_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{3EI}$ in B $\varphi_A = 0\ \varphi_B = \frac{F \cdot l^2}{2EI}$
	$R_A = 0$ $D = 0$	$M = M_0$ $M_{\max} = M = M_0$	$f = \frac{M_0}{2EI}(l^2 - 2lx + x^2)$ $f_{\max} = \frac{M_0 \cdot l^2}{2EI}$ in B $\varphi_A = 0\ \varphi_B = \frac{M_0 \cdot l}{EI}$
	$R_A = Q$ $D = \frac{Q \cdot x}{l}$	$M = \frac{Q \cdot x^2}{2l}$ $M_{\max A} = \frac{Q \cdot l}{2}$	$f = \frac{Q}{24EI \cdot l}(x^4 - 4l^3x + 3l^4)$ $f_{\max} = \frac{Q \cdot l^3}{8EI}$ in B $\varphi_A = 0\ \varphi_B = \frac{Q \cdot l^2}{6EI}$
	$R_A = \frac{Q}{2}$ $R_B = \frac{Q}{2}$ $D = \frac{1}{2}Q\left(1 - \frac{2x}{l}\right)$	$M = \frac{Q}{2}\left(x - \frac{x^2}{l}\right)$ $M_{\max} = \frac{Q \cdot l}{8}$ bij $x = \frac{l}{2}$	$f = \frac{Q \cdot x}{24EI \cdot l}(l^3 - 2lx^2 + x^3)$ $f_{\max} = \frac{5}{384}\frac{Q \cdot l^3}{EI}$ bij $x = \frac{1}{2}$ $\varphi = \frac{Q \cdot l^2}{24EI}$ bij A en B
	$R_A = \frac{F}{2}$ $R_B = \frac{F}{2}$ $D = \frac{F}{2}$	$M = \frac{F}{2} \cdot x$ van B tot C $M = \frac{F}{2}(1 - x)$ van A tot C $M_{\max} = \frac{F \cdot l}{4}$ in C	$f = \frac{F}{48EI}(3l^2x - 4x^3)$ $f_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{48EI}$ in C $\varphi = \frac{F \cdot l^2}{16EI}$ bij A en B
	$R_A = -\frac{M_0}{l}$ $R_B = \frac{M_0}{l}$ $D = \frac{M_0}{l}$	$M = M_0 - \frac{M_0 \cdot x}{l}$ $M_{\max} = M_0$ in B	$f = \frac{M_0}{6EI}\left(3x^2 - \frac{x^3}{l} - 2lx\right)$ $f_{\max} = 0,0642\frac{M_0 \cdot l^2}{EI}$ bij $x = 0,422l$ $\varphi_A = \frac{M_0 \cdot l}{6EI}$ $\varphi_B = \frac{M_0 \cdot l}{3EI}$

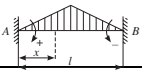
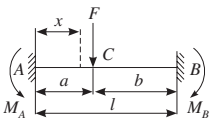
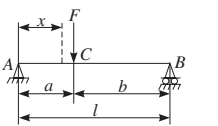
Tabel 6.2 (vervolg)

belastinggeval	steunpuntsreacties R bij punt A en B dwarskracht D	(max.) buigend moment	doorbuiging (zakking) max. doorbuiging en hoekverdraaiing φ
$Q = \frac{q \cdot l}{2}$ 	$R_A = \frac{Q}{3}$ $R_B = \frac{2Q}{3}$ $D = Q\left(\frac{1}{3} - \frac{x^2}{l^2}\right)$	$M = \frac{Q}{3}\left(x - \frac{x^3}{l^2}\right)$ $M_{\max} = 0,128Q \cdot l$ bij $x = 0,5774l$	$f = \frac{Q \cdot x}{180EI \cdot l^2}(3x^4 - 10l^2x^2 + 7l^4)$ $f_{\max} = -0,01304\frac{Q \cdot l^3}{EI}$ bij $x = 0,519l$ $\varphi_A = \frac{7Q \cdot l^2}{180EI}$ $\varphi_B = \frac{2Q \cdot l^2}{45EI}$
$Q = \frac{q \cdot l}{2}$ 	$R_A = \frac{Q}{2}$ $R_B = \frac{Q}{2}$ $D = \frac{Q}{2}\left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right)$ van A tot C $D = \frac{Q}{2}\left\{1 - \frac{4(l-x)^2}{l^2}\right\}$ van C tot B	van A tot C $M = \frac{Q}{6}\left(3x - 4\frac{x^3}{l^2}\right)$ van C tot B $M = \frac{Q}{6}\left\{3(l-x) - 4\frac{(1-x)^3}{l^2}\right\}$ $M_{\max} = \frac{Q \cdot l}{6}$ in C	$A \to C$ $f = \frac{Q \cdot x}{6EI \cdot l^2}\left(\frac{l^2x^2}{2} - \frac{x^4}{5} - \frac{5l^4}{16}\right)$ $f_{\max} = \frac{Q \cdot l^3}{60EI}$ in C $\varphi_A = \varphi_B = \frac{5Q \cdot l^2}{96EI}$
	$R_A = F$ $R_B = F$ $D = F$ van A tot C $D = 0$ van C tot D	$M = F \cdot x$ van A tot C $M = F \cdot \frac{1}{3}$ van C tot D $M_{\max} = F \cdot a$	$f_{\max} = \frac{F \cdot l^2 \cdot a}{8EI} - \frac{F \cdot a^3}{6EI}$ $\varphi_A = \varphi_B = \frac{F \cdot l \cdot a}{2EI} - \frac{F \cdot a^2}{2EI}$
	$R_A = \frac{3F}{2}$ $R_B = \frac{3F}{2}$ $D = \frac{3}{2}F$ van A tot C $D = \frac{1}{2}F$ van C tot D	$M = \frac{3}{2}F \cdot x$ van A tot C $M = F\left(\frac{x}{2} + \frac{1}{4}\right)$ van C tot D $M_{\max} = \frac{F \cdot l}{2}$ in D	$f_{\max} = \frac{19F \cdot l^3}{384EI}$ in D $\varphi_A = \varphi_B = \frac{5F \cdot l^2}{32EI}$
$Q = q \cdot l$ 	$R_A = \frac{3Q}{8}$ $R_B = \frac{5Q}{8}$ $D = Q\left(\frac{3}{8} - \frac{x}{l}\right)$	$M = Q\left(\frac{3x}{8} - \frac{x^2}{2l}\right)$ $M_{\max} = \frac{Q \cdot l}{8}$ in B	$f = \frac{Q}{48EI \cdot l}(3lx^3 - 2x^4 - l^3x)$ $f_{\max} = \frac{Q \cdot l^3}{185EI}$ bij $x = 0,4215l$ $\varphi_A = \frac{Q \cdot l^2}{48EI}$

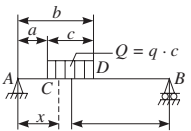
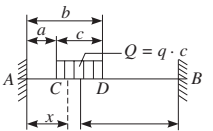
Tabel 6.2 (vervolg)

belastinggeval	steunpuntsreacties R bij punt A en B dwarskracht D	(max.) buigend moment	doorbuiging (zakking) max. doorbuiging en hoekverdraaiing φ
	$R_A = \frac{5F}{16}$ $R_2 = \frac{4F}{16}$ $D = \frac{5F}{16}$ van A tot C $D = \frac{-11F}{16}$ van C tot B	$M = \frac{5F \cdot x}{16}$ van A tot C $M = F\left(\frac{l}{2} - \frac{11x}{16}\right)$ van B tot C $M_C = \frac{5F \cdot l}{32}$ in C $M_B = \frac{-3F \cdot l}{16}$ in B	$f = \frac{F}{96EI}(5x^3 - 3l^2 \cdot x)$ van A tot C $f = \frac{F}{96EI}\left\{5x^3 - 16\left(x - \frac{l}{2}\right)^3 - 3l^2x\right\}$ van C tot B $f_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{48\sqrt{5EI}}$ in C $\varphi_A = \frac{F \cdot l^2}{32EI}$
$Q = \frac{q \cdot l}{2}$ 	$R_A = \frac{Q}{5}$ $R_B = \frac{4Q}{5}$ $D = F\left(\frac{1}{5} - \frac{x^2}{l^2}\right)$	$M = Q\left(\frac{x}{5} - \frac{x^3}{3l^2}\right)$ $M_{\max B} = -\frac{2Q \cdot l}{15}$ bij $x = 0,447l$	$f = \frac{Q}{60EI \cdot l}\left(2lx^3 - l^3x - \frac{x^5}{l}\right)$ $f_{\max} = \frac{Q \cdot l^3}{210EI}$ bij $x = 0,447l$ $\varphi_A = \frac{F \cdot l^2}{60EI}$
$Q = q \cdot l$ 	$R_A = \frac{Q}{2}$ $R_B = \frac{Q}{2}$ $D = \frac{Q}{2}\left(1 - \frac{2x}{l}\right)$	$M = \frac{Q}{2}\left(x - \frac{x^2}{l} - \frac{l}{6}\right)$ $M_{\max+} = \frac{Q \cdot l}{24}$ bij $x = \frac{l}{2}$ $M_{\max-} = -\frac{Q \cdot l}{12}$ in A en B	$f = \frac{Q \cdot x^2}{24EI \cdot l}(2lx - l^2 - x^2)$ $f_{\max} = \frac{Q \cdot l^3}{384EI}$ bij $x = \frac{1}{2}$ $\varphi_A = \varphi_B = 0$
	$R_A = \frac{F}{2}$ $R_B = \frac{F}{2}$ $D = \frac{F}{2}$	$M = \frac{F}{8}(4x - l)$ van A tot C $M = \frac{F}{8}(3l - 4x)$ van C tot B $M_{\max+} = \frac{+F \cdot l}{8}$ in C $M_{\max-} = \frac{-F \cdot l}{8}$ in A en B	$f = \frac{F}{48EI}(3lx^2 - 4x^3)$ $f_{\max} = \frac{F \cdot l^3}{192EI}$ in C $\varphi_A = \varphi_B = 0$
$Q = \frac{q \cdot l}{2}$ 	$R_A = \frac{3}{10}Q$ $R_B = \frac{7}{10}Q$ $D = Q\left(\frac{3}{10} - \frac{x^2}{l^2}\right)$	$M = Q\left(\frac{3x}{10} - \frac{l}{15} - \frac{x^3}{3l^2}\right)$ $M_{\max+} = \frac{+Q \cdot l}{15}$ in A $M_{\max-} = \frac{-Q \cdot l}{10}$ in B	$f = \frac{Q}{60EI}\left(3x^3 - 2lx^2 - \frac{x^5}{l^2}\right)$ $f_{\max} = \frac{Q \cdot l^3}{382EI}$ bij $x = 0,525l$

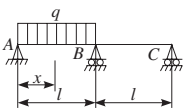
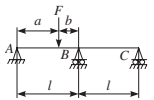
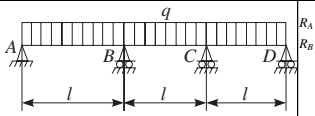
Tabel 6.2 (vervolg)

belastinggeval	steunpuntsreacties R bij punt A en B dwarskracht D	(max.) buigend moment	doorbuiging (zakking) max. doorbuiging en hoekverdraaiing φ
$Q = \frac{q \cdot l}{2}$ 	$R_A = \frac{Q}{2}$ $R_B = \frac{Q}{2}$	$M_A = \frac{5}{48} Q \cdot l$ $M_B = -\frac{5}{48} Q \cdot l$	$f_{\max} = \frac{7Q \cdot l^3}{1920EI}$ bij $x = \frac{l}{2}$ $\varphi_A = \varphi_B = 0$
	$R_A = \frac{F \cdot b^2}{l^3}(3a + b)$ $R_B = \frac{F \cdot a^2}{l^3}(3b + a)$ $D = R_A$ van A tot C $D = R_A - F$ van C tot B	$M_A = \frac{F \cdot a \cdot b^2}{l^2}$ $M_B = \frac{F \cdot b \cdot a^2}{l^2}$ $M = \frac{-F \cdot ab^2}{l^2} + R_A \cdot x$ van A tot C $M = \frac{-F \cdot ab^2}{l^2} + R_A \cdot x - F(x-a)$ van C tot B $M_{\max+} = \frac{-F \cdot ab^2}{l^2} + R_A \cdot a$ $= \frac{F \cdot l}{8}$ als $a = l/2$ $M_{\max-} = -0{,}1481\, F : l$ als $a = \frac{1}{3}l$ of $a = \frac{2}{3}l$	$f = \frac{x^2}{6EI}\{F(3a - x) + R_B(x - 3l) + 3M_B\}$ tussen A en C voor $0 < x \leq a$ $f = \frac{(l-x)^2}{6EI}\{F(3b + x - l) - R_A(2l + x) + 3M_A\}$ tussen C en B voor $a < x \leq l$ $f_{\max} = \frac{2F \cdot a^3 b^2}{3EI(3a + b)^2}$ als $x = \frac{2al}{3a + b}$ en $a > b$ $f_{\max} = \frac{2F \cdot a^2 b^3}{3EI(3b + a)^2}$ als $x = l - \frac{2bl}{3b + a}$ en $a < b$
	$R_A = \frac{F \cdot b}{l}$ $R_B = \frac{F \cdot a}{l}$ $D = \frac{F \cdot b}{l}$ van A tot C $D = \frac{F \cdot a}{l}$ van C tot B	$M = \frac{F \cdot b}{l} \cdot x$ van A tot C $M = \frac{F \cdot a}{l}(l - x)$ van C tot B $M_{\max} = \frac{F \cdot ab}{l}$ in C	$f = \frac{F \cdot bx}{6EI \cdot l}\{2l(l - x) - b^2 - (l - x)^2\}$ van A tot C $f = \frac{F \cdot a(l - x)}{6EI \cdot l}\{2lb - b^2 - (l - x)^2\}$ van C tot B $F_{\max} = \frac{F \cdot ab}{27EI \cdot l}(a + 2b)\sqrt{3a(a + 2b)}$ bij $x = \sqrt{\frac{a}{3}(a + 2b)}$ als $a > b$ $\varphi_A = \frac{F}{6EI}\left(bl - \frac{b^3}{l}\right)$ $\varphi_B = \frac{F}{6EI}\left(2bl + \frac{b^3}{l} - 3b^2\right)$

Tabel 6.2 (vervolg)

belastinggeval	steunpuntsreacties R bij punt A en B dwarskracht D	(max.) buigend moment	doorbuiging (zakking) max. doorbuiging en hoekverdraaiing φ
	$R_A = \frac{Q \cdot d}{l}$ $R_B = \frac{Q}{l}\left(a + \frac{c}{2}\right)$ $D = R_A$ van A tot C $D = R_A - Q\frac{x-a}{c}$ van C tot D $D = R_A - Q$ van D tot B	$M = R_A \cdot x$ van A tot C $M = R_A \cdot x - Q\frac{(x-a)^2}{2C}$ van C tot D $M = R_A \cdot x - Q\left(x - \frac{a}{2} - \frac{b}{2}\right)$ van D tot B $M_{max} = Q \cdot \frac{d}{l}\left(a + \frac{c \cdot d}{2l}\right)$ als $x = a + \frac{c \cdot d}{b}$	$f = \frac{1}{48EI}\left\{8R_A(x^3 - l^2x) + \right.$ $\left. + Q \cdot x\left(\frac{8d^3}{l} - \frac{2bc^2}{l} + \frac{c^3}{l} + 2c^2\right)\right\}$ van A tot C $f = \frac{1}{48EI}\left\{8R_A(x^3 - l^2x) + \right.$ $+ Q \cdot x\left(\frac{8d^3}{l} - \frac{2bc^2}{l} + \frac{c^3}{l} + 2c^2\right) +$ $\left. - 2Q\frac{(x-a)^4}{c}\right\}$ van C tot D $f = \frac{1}{48EI}\left\{8R_A(x^3 - l^2x) + Q \cdot x\left(\frac{8d^3}{l} - \frac{2bc^2}{l} + \frac{c^3}{l}\right) + \right.$ $+ Q \cdot x\left(\frac{8d^3}{l} - \frac{2bc^2}{l} + \frac{c^3}{l}\right) +$ $\left. - 8Q\left(x - \frac{a}{2} - \frac{b}{2}\right)^3 + Q(2bc^2 - c^3)\right\}$ van D tot B $\varphi_A = \frac{1}{48EI}\left\{-8R_A \cdot l^2 + \right.$ $\left. + Q\left(\frac{8d^3}{l} - \frac{2bc^2}{l} + \frac{c^3}{l} + 2c^2\right)\right.$ $\varphi_B = \frac{1}{48EI}\left\{16R_A \cdot l^2 + \right.$ $\left. - Q\left(24d^2 - \frac{8d^3}{l} + \frac{2bc^2}{l} - \frac{c^3}{l}\right)\right\}$
	$R_A = \frac{Q}{4l^2}\left(12d^2 - \frac{8d^3}{l} + \right.$ $\left. - \frac{2bc^2}{l} - \frac{c^3}{l} - c^2\right)$ $R_B = Q - R_A$ $D = R_A$ van A tot C $D = R_A - Q \cdot \frac{x-a}{c}$ van C tot D $D = R_A - Q$ van D tot B	$M_A = -\frac{Q}{24l}\left(24\frac{d^3}{l} - 6\frac{bc^2}{l} + \right.$ $\left. + 3\frac{c^3}{l} + 4c^2 - 24d^2\right)$ $M_B = \frac{Q}{24l}\left(24\frac{d^3}{l} - 6\frac{bc^2}{l} + \right.$ $\left. + \frac{3c^3}{l} + 2c^2 - 48d^2 + \right.$ $\left. + 24dl\right)$ $M = -M_A + R_A \cdot x$ van A tot C $M = -M_A + R_A \cdot x +$ $- \frac{1}{2}Q\frac{(x-a)^2}{C}$ van C tot D	$f = \frac{R_A \cdot x^3 - 3M_A x^2}{6EI}$ van A tot C $f = \frac{1}{6EI}\left\{R_A \cdot x^3 - 3M_A \cdot x^2 - \frac{Q(x-a)^4}{4\ C}\right\}$ van C tot D $f = \frac{R_B(l-x)^3 - 3M_B(l-x)^2}{6EI}$ van D tot B

Tabel 6.2 (vervolg)

belastinggeval	steunpuntsreacties R bij punt A en B dwarskracht D	(max.) buigend moment	doorbuiging (zakking) max. doorbuiging en hoekverdraaiing φ
		$M = -M_A + R_A \cdot x +$ $-Q(x - l + d)$ van D tot B M_{max+} : tussen C en D als $x = a + \frac{R_A}{Q} \cdot C$ $M_{max-} : -M_A$ als $a < l - b$ $M_{max-} : -M_B$ als $a > l - b$	
	$R_A = \frac{7}{16} q \cdot l$ $R_B = \frac{5}{8} q \cdot l$ $R_C = -\frac{1}{16} q \cdot l$ $D_{max} = \frac{9}{16} q \cdot l$ bij B	$M_{max} = \frac{49}{512} q \cdot l^2$ bij $x = \frac{7}{16} l$ $M_B = \frac{1}{16} q \cdot l^2$ $M = \frac{q \cdot x}{16}(7l - 8x)$ als $x < 1$	
	$R_A = \frac{F \cdot b}{4l^3}[4l^2 - a(l + a)]$ $R_B = \frac{F \cdot a}{2l^3}[2l^2 + b(l + a)]$ $R_C = -\frac{F \cdot ab}{4l^3}(l + a)$	$M_{max} = \frac{F \cdot ab}{4l^3}[4l^2 - a(l + a)]$ onder de last F $M_B = \frac{F \cdot ab}{4l^2}(l + a)$	
	$R_A = 0{,}40q \cdot l = R_D$ $R_B = 1{,}10q \cdot l = R_c$	$M_A = 0 = M_D$ $M_B = -0{,}10q \cdot l^2 = M_C$ $M_{AB,max} = 0{,}08q \cdot l^2$ $M_{BC,max} = 0{,}03q \cdot l^2$ $M_{CD,max} = 0{,}08q \cdot l^2$	$f_{AB} = 0{,}007 \frac{q \cdot l^4}{EI} = f_{CD}$ $f_{BC} = 0{,}005 \frac{q \cdot l^4}{EI}$

In het onderstaande gecompliceerde belastinggeval zijn in plaats van de in tabel 6.2 genoemde gegevens, de evenwichtsvergelijkingen gegeven. Indien de belastingen F_1 en F_2 bekend zijn, kunnen de steunpuntsreacties, de buigende momenten en de doorbuigingen bepaald worden.

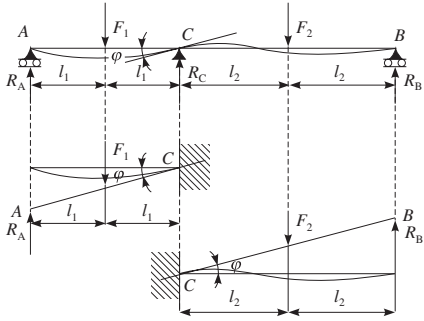
Balk op drie steunpunten met willekeurige verticale belasting

Indien punt C 'fictiel' wordt ingeklemd onder een hoek φ, geldt t.o.v. C dat de doorbuiging van A en de doorbuiging van B gelijk is aan nul.

$$\left.\begin{aligned} 2l_1\varphi + \frac{5F_1l_1^3}{6EI} - \frac{8R_Al_1^3}{3EI} &= 0 \\ -2l_2\varphi + \frac{5F_2l_2^3}{6EI} - \frac{8R_Bl_2^3}{3EI} &= 0 \end{aligned}\right\} R_Al_1^2 + R_Bl_2^2 = \tfrac{5}{16}(F_1l_1^2 + F_2l_2^2)$$

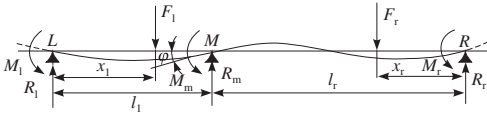
De som van de momenten (ΣM) om C is nul:

$$R_Al_1 - R_Bl_2 = \tfrac{1}{2}(F_1l_1 - F_2l_2)$$



Figuur 6.1 Balk op drie steunpunten met willekeurige verticale belasting

Driemomentenstelling van Clapeyron



Figuur 6.2 Balk op drie steunpunten

Van een ligger – die in meer dan twee even hoog gelegen punten wordt ondersteund – kunnen m.b.v. de *driemomentenstelling van Clapeyron* de buigende momenten boven de steunpunten worden herleid. Hieruit kunnen dan de steunpuntreacties worden berekend. Tenslotte kan de gehele spanningsverdeling aan de hand van de dwarskrachten- en momentenlijn worden onderzocht.

(a) Indien de belasting uit één kracht per veld bestaat geldt:

$$M_l l_l + 2M_m(l_l + l_r) + M_r l_r = \\ = \frac{F_l(l_l^2 - x_l^2)x_l}{l_l} + \frac{F_r(l_r^2 - x_r^2)x_r}{l_r}$$

(b) Meerdere krachten per veld en tevens een per veld verschillende gelijkmatig verdeelde belasting ($q_l \neq q_r$). Nu geldt:

$$M_l l_l + 2M_m(l_l + l_r) + M_r l_r = \\ = \frac{\Sigma F_l(l_l^2 - x_l^2)x_l}{l_l} + \frac{\Sigma F_r(l_r^2 - x_r^2)x_r}{l_r} + \frac{q_l l_l^3}{4} + \frac{q_r l_r^3}{4}$$

(c) Belasting als onder b) maar steunpunten op verschillende hoogten. Als $y_{\mathbf{L}}$, $y_{\mathbf{M}}$ en $y_{\mathbf{R}}$ de zakkingen van de punten L, M en R zijn, dan geldt:

$$6EI\left(\frac{y_{\mathbf{M}}-y_{\mathbf{L}}}{l_1}+\frac{y_{\mathbf{M}}-y_{\mathbf{R}}}{l_\mathrm{r}}\right)+M_1l_1+2M_\mathrm{m}(l_1+l_\mathrm{r})+M_\mathrm{r}l_\mathrm{r}=$$
$$=\frac{\Sigma F_1(l_1^2-x_1^2)x_1}{l_1}+\frac{\Sigma F_\mathrm{r}(l_\mathrm{r}^2-x_\mathrm{r}^2)x_\mathrm{r}}{l_\mathrm{r}}+\frac{q_1l_1^3}{4}+\frac{q_\mathrm{r}l_\mathrm{r}^3}{4}$$

Literatuur

- Hofman, G.E.
  Eindige elementenmethode, deel 1 en 2
  deel 1, 1994
  deel 2, 1996
  Amsterdam, Nijgh & Van Ditmar.
- Koiter, W.F.
  Stijfheid en sterkte
  Houten, Bohn Stafleu Van Loghum.
- Niemann, G.
  Maschinenelemenenten
  Berlin, Springer-Verlag.
- Ludolph, G.L., A.P. Potma, R.J. Legger
  Sterkteleer
  Groningen, Wolters-Noordhoff.

Technisch tekenen D1

1 Formaten, schalen, projecties
1.1 Formaten
1.2 Schalen
1.3 Projecties

2 Lijnen en aanduidingen
2.1 Lijnsoorten, letters, cijfers en leestekens
2.2 Arcering
2.3 Maataanduiding

3 Overzicht gegevens technisch tekenwerk

Opmerking. Alle maten in mm, tenzij anders aangegeven.

1 Formaten, schalen, projecties

1.1 Formaten

Het meest worden de zgn. *A-formaten* toegepast. Hierbij bestaat een vaste verhouding tussen lengte en breedte, nl. $\sqrt{2}$:1, waardoor de oppervlakte van het volgende formaat steeds de helft is van het voorgaande. M.a.w. voor het volgende formaat wordt steeds de lengte maat gehalveerd.

Tabel 1.1 Aanduiding en nominale afmetingen ***A-formaten***

aanduiding	nominale afmetingen	oppervlakte [m^2]
A0	841 × 1189	1
A1	594 × 841	0,5
A2	420 × 594	0,25
A3	297 × 420	0,125
A4	210 × 297	0,0625
A5	148 × 210	0,0312

Tabel 1.2 Aanduiding en nominale afmetingen ***Z-formaten***

lange (enkelvoudige) Z-formaten		samengestelde Z-formaten	
aanduiding	nominale afmetingen	aanduiding	nominale afmetingen
1Z	297 × 210[1)]	2 × 2Z	549 × 390
2Z	297 × 390	2 × 3Z	549 × 570
3Z	297 × 570	2 × 5Z	549 × 930
4Z	297 × 750	3 × 3Z	811 × 570
5Z	297 × 930	3 × 5Z	811 × 930
7Z	297 × 1290		
9Z	297 × 1650		
enz.			

[1)] De afmetingen van dit formaat komen overeen met de afmetingen van het A4 formaat.

Opmerking. In tegenstelling tot A-formaten kan bij *Z-formaten* door het ontbreken van een vaste verhouding tussen breedte en

hoogte, bij fotografisch verkleinen geen voorafgaand kleiner Z-formaat worden verkregen.

Een eveneens genormaliseerde reeks papierformaten is de *B-reeks*, die echter *niet* gebruikt wordt voor technisch tekenpapier.

Tabel 1.3 Nominale afmetingen ***B-formaten***

formaat	afmetingen	formaat	afmetingen
B0	1000 × 1414	B3	353 × 500
B1	707 × 1000	B4	250 × 353
B2	500 × 707	B5	176 × 250

Tabel 1.4 Nominale afmetingen **Amerikaanse papierformaten**

formaat	afmetingen	Nederlandse naam
Executive	184,2 × 266,7	Executive
Letter[1)]	215,9 × 279,4	Kwarto
Legal	215,9 × 355,6	Folio

[1)] De officiële naam is: ANSI "-A format", ook bekend als: 8,5 × 11 inch.

Vouwen van tekeningen
Technische tekeningen worden zig-zag gevouwen zodat een A4-formaat ontstaat, met de legenda zichtbaar op de voorkant. Zie verder NEN 379.

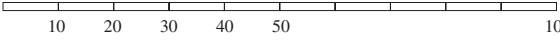
1.2 Schalen

De schaal van een tekening wordt vermeld in de rechteronderhoek. Bij toepassing van verschillende schalen op één tekening wordt

Tabel 1.5 Schalen voor technische tekeningen

benaming	aanduiding			
schalen voor vergrotingen	2:1		5:1	10:1
ware grootte			1:1	
schalen voor verkleiningen	1:2 1:20 1:200 1:2000	1:2,5 1:25	1:5 1:50 1:500 1:5000	1:10 1:100 1:1000 1:10000

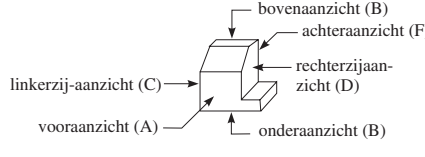
alleen de hoofdschaal in de rechteronderhoek vermeld en de hiervan afwijkende schalen bij het stuknummer of bij de benaming van een detail. Wanneer een tekening op kleiner formaat moet worden gereproduceerd bijv. langs fotografische weg, moet de hoofdschaal uit een getekende schaallijn blijken:



Bij een vergroot getekend werkstuk verdient het aanbeveling ter informatie een afbeelding op ware grootte toe te voegen. De omtreklijnen van het product zijn hiervoor voldoende, te plaatsen rechts onder op de tekening.

1.3 Projecties

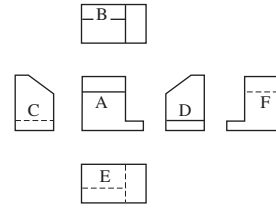
Benaming van de aanzichten



Het vooraanzicht moet in het algemeen het werkstuk in de stand van gebruik weergeven. Voor werkstukken die in elke stand worden

gebruikt, wordt als vooraanzicht de stand in de hoofdbewerking gekozen. De aanzichten worden gezien in richtingen die onderling hoeken van 90° of veelvouden van 90° maken.

Plaatsing aanzichten volgens de Amerikaanse projectie



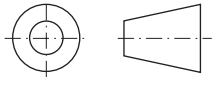
De plaatsing van de aanzichten is als volgt: het linker aanzicht (C) wordt links van de beschouwde figuur (A) geplaatst, het rechter zijaanzicht rechts (D), het bovenaanzicht boven (B), het onderaanzicht onder (E) en het achteraanzicht (F) kan rechts van (D) of links van (C) worden geplaatst.

Europese projectie

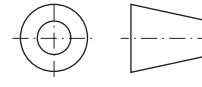
De plaatsing van de aanzichten is als volgt: het linkeraanzicht rechts, het rechteraanzicht links, het onderaanzicht boven en het bovenaanzicht onder.

Aanduiding in tekeninghoofd

Amerikaanse projectie



Europese projectie



2 Lijnen en aanduidingen

2.1 Lijnsoorten, letters, cijfers en leestekens

Lijndikten

Er is een reeks lijndikten ontwikkeld, waarvan de voornaamste zijn:

0,13 0,18 0,25 0,35 0,5 0,7 1,0 1,4 2,0

Tabel 2.1 Lijnsoorten en lijndikten

lijnsoort	omschrijving	toepassing
	dikke lijn	1 begrenzingslijnen van doorsneden 2 aanduiding van details
	middelmatig dikke lijn	zichtbare begrenzingslijn
	dunne lijn	1 maatlijnen 2 hulplijnen en stramienlijnen 3 arceringen 4 begrenzingslijnen van aangrenzende delen 5 begrenzingslijnen van gekantelde aanzichten en van gekantelde doorsneden
	middelmatig dikke streeplijn	niet zichtbare begrenzingslijnen
	middelmatig dikke gemengde streeplijn	afbreeklijnen van gedeeltelijke aanzichten en van gedeeltelijke doorsneden
	dunne gemengde streeplijn	hartlijnen
	dunne gemengde streeplijn, aan de einden verdikt	doorsnijdingsvlakken
	dikke gemengde streeplijn	aanduiding van gedeelten van oppervlakken met een aanvullende of een afwijkende behandeling of bewerking
	streeplijn dun	bij betontekeningen: lijnen niet zichtbaar onder doorsnedevlak
	dunne gemengde streeplijn	bij betontekeningen: lijnen niet zichtbaar boven doorsnedevlak

De dikte van de lijnsoorten wordt gekozen in overeenstemming met de grootte en de aard van de tekening. Voor alle aanzichten van een werkstuk op dezelfde schaal wordt de dikte van elke lijnsoort gelijk gehouden.

Gebruikelijke lijndikte-combinaties:

– dik	0,35	0,5	0,7
– middeldik	0,25	0,35	0,5
– dun	0,18	0,25	0,35

Schriftsoorten:

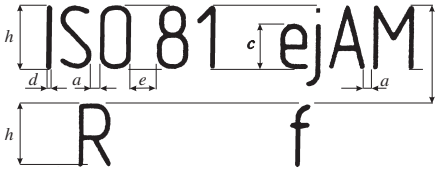
– *Smal schrift* (type A) met lijndikte 1/14 *h*, in het bijzonder geschikt voor reproductie op microfilm.
– *Gewoon schrift* (type B) met lijndikte 1/10 *h*
– *Schuin schrift* kan ook worden gebruikt (75° rechts hellend).

Tabel 2.2 Letterhoogten bijbehorende lijndikten[1)]

letterhoogte (*h*)		2,5	3,5	5	7	10	14	20
lijndikte (*d*)	(1/14 *h*)	0,18	0,25	0,35	0,5	0,7	1	1,4
	(1/10 *h*)	0,25	0,35	0,5	0,7	1	1,4	2

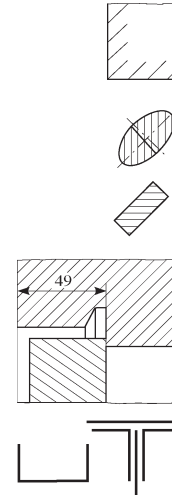
[1)] Bij het gebruik van sjablonen moet worden gelet op de juiste combinatie van letterhoogte en lijndikte (bijbehorende pengrootte). Meestal zijn sjablonen ingericht voor een lijndikte van 0,1 *h*. Dus bij een letterhoogte van 3,5 mm, een lijndikte van 0,35 mm.

Tabel 2.3 Verhouding hoofdletters/kleine letters en onderlinge afstanden



hoogten en afstanden	smal schrift (type A)	gewoon schrift (type B)
hoogte van de hoofdletters (*h*)	14/14 *h*	10/10 *h*
hoogte van de kleine letters (*c*)	10/14 *h*	7/10 *h*
min. afstand tussen letters en andere tekens (*a*)	2/14 *h*	2/10 *h*
min. regelafstand (*b*)	22/14 *h*	16/10 *h*
min. afstand tussen woorden en/of getallen (*e*)	6/14 *h*	6/10 *h*

2.2 Arcering

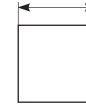


Doorsneden worden in beginsel gearceerd, bij voorkeur onder een hoek van 45° met de begrenzingslijnen, of met de hartlijnen van de doorsnede.
De onderlinge afstand tussen de arceerlijnen wordt gekozen in verhouding tot de grootte van de doorsnede.
Bij grote doorsneden kan worden volstaan met een arcering langs de begrenzingslijnen.

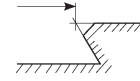
Voor cijfers of letters die niet buiten de doorsnede kunnen worden geplaatst, moet ruimte in de arcering worden uitgespaard.

Doorsneden van geringe dikte kunnen vol worden getekend, waarbij voldoende ruimte moet worden gelaten tussen aan elkaar grenzende doorsneden.

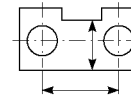
2.3 Maataanduiding



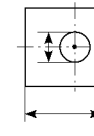
Voor maatlijnen en hulplijnen wordt de dunne lijn gebruikt.Maatlijnen moeten in het algemeen worden getekend in de nabijheid van, en evenwijdig aan het element dat van een maat moet worden voorzien.
Hulplijnen moeten loodrecht op de maatlijn staan en iets voorbij de maatlijn worden doorgetrokken.



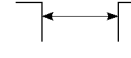
Constructielijnen en *snijdende hulplijnen* worden iets voorbij het snijpunt doorgetrokken.



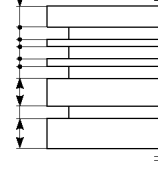
Hartlijnen en *begrenzingslijnen* mogen niet als maatlijn worden gebruikt.
Een maatlijn mag wel direct tussen de begrenzingslijnen, tussen hartlijnen, of tussen een begrenzingslijn en een hartlijn worden geplaatst.



Maatlijnen en hulplijnen moeten zo weinig mogelijk andere lijnen snijden. In het bijzonder mogen maatlijnen niet worden gesneden door andere maatlijnen en door hulplijnen die bij een andere maatlijn behoren.

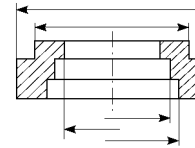


Elk uiteinde van een maatlijn moet worden voorzien van een pijlpunt, die duidelijk de begrenzing van de maatlijn aangeeft.



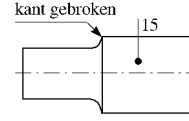
Pijlpunten moeten in het algemeen binnen de begrenzing van de maatlijn worden getekend.Wanneer de ruimte hiervoor ontbreekt, mogen de pijlpunten buiten de begrenzing van de maatlijn worden aangegeven.

Aan elkaar grenzende pijlpunten mogen worden vervangen door een duidelijke stip.

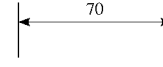


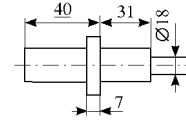
Indien mogelijk wordt aanbevolen maatlijnen van binnenmaten en van buitenmaten van elkaar te scheiden.

Aanhaallijnen moeten in het algemeen aan het einde zijn voorzien van:
- een *stip*, voor aanhaallijnen die binnen de begrenzingslijnen van een werkstuk eindigen;
- een *pijlpunt*, voor aanhaallijnen die op de begrenzingslijnen van een werkstuk eindigen.

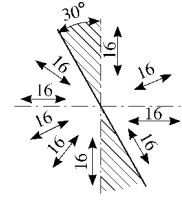


Maten worden in het algemeen boven en bij voorkeur in het midden van de maatlijn geplaatst en zo dat de maataanduiding niet wordt doorkruist of gesneden door andere lijnen van de tekening.
In uitzonderingsgevallen mag de maatlijn worden onderbroken voor het inschrijven van de maat.





Wanneer plaatsing boven de maatlijn niet mogelijk is, mogen de maten boven het verlengde van de maatlijn worden geplaatst, bij voorkeur rechts ervan.
Maten van niet op schaal getekende delen moeten worden onderstreept.

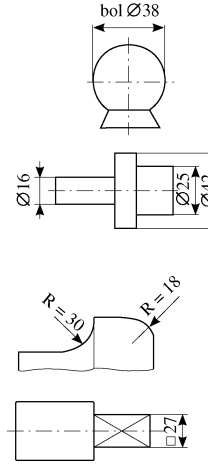


Voor een goede leesbaarheid moeten de maten zo worden geplaatst, dat zij van de onderzijde of van de rechterzijde van de tekening af kunnen worden gelezen.

Alleen in uitzonderingsgevallen mogen maatlijnen en maten in de zone van 30° worden geplaatst, zoals gearceerd is aangegeven in de figuur hiernaast.

De maat van de *straal* of van de *middellijn* van een bol moet worden voorafgegaan door het woord 'bol'.

Tenzij duidelijk uit de figuur blijkt dat de maat betrekking heeft op een middellijn, een straal of een vierkante doorsnede, moeten voor de maat de volgende symbolen worden geplaatst:
- voor een middellijn, het symbool ∅
- voor een straal, de hoofdletter R;
- voor een vierkante doorsnede, het symbool □.



3 Overzicht gegevens technisch tekenwerk

Ook in andere hoofdstukken van dit *Poly-Technisch Zakboekje* zijn symbolen en aanwijzingen opgenomen voor technisch tekenwerk. Tabel 3.1 geeft een overzicht.

Tabel 3.1 Overige vindplaatsen in het Poly-Technisch Zakboekje met gegevens over (technisch) tekenwerk

tekenwerk betreffende	in hoofdstuk
Griekse lettertekens	A1 Eenheden en symbolen, par. 3
grafieken/diagrammen	A3 Statistiek, par. 2.1
digitale schakelingen	B1 Informatica-techniek, par. 1
regeltechnische schema's	B2 Regel-en besturingstechniek, par. 2.8.
pneumatiek	B2 Regel-en besturingstechniek, par. 4.2– 4.3
hydrauliek	B2 Regel-en besturingstechniek, par. 4.2
cultuurtechniek (plankaart)	F2 Civiele techniek, par. 5.5
bouwkunde	D2 Bouwtechnische symbolen,
werktuigbouwkunde	H Werktuigbouwkunde, par. 6
elektrotechniek	B2 Regel-en besturingstechniek, par. 4.2– 4.3
	G4 Elektro-installatietechniek, par. 5
elektronica	I Elektronica, verspreid in tekst,
procestechnologie	J Procestechnologie, par. 6

Literatuur

Op het gebied van technisch tekenen bestaat een groot aantal normen. Informatie hierover is verkrijgbaar bij het *NEN Nederlands Normalisatie-instituut* te Delft.

Bouwtechnische symbolen D2

1 Bouwmaterialen

2 Bouwelementen

1 Bouwmaterialen

Tabel 1.1 Symbolen voor steenachtige bouwmaterialen

omschrijving	aanduiding doorsnede	schaal						opmerking
		1:100	1:50	1:20	1:10	1:5	1:1	
metselwerk van baksteen								schoon metselwerk
speciale steenachtige materialen		M	M	M	M	M	M	bijv. cementraam, vuurvast materiaal, raamdorpelsteen, dakpannen, e.d.
metselwerk van niet gebakken kunststeen		M	M	M	M	M	M	bijv. kalkzandsteen, beton-blokken, e.d.
niet dragende lichte scheidingswanden								
						M	M	
gewapend beton (in het werk gestort)								
gewapend beton (niet in het werk gestort)								
ongewapend beton		M	M	M	M	M	M	bijv. vulbeton, schuimbeton, werkvloeren, e.d.
sierbeton								
natuursteen								
enkele vloer- en wandafwerking						M	M	bijv. pleisterwerk, cementdekvloer
samengestelde vloer- en wandafwerking				M	M	M	M	

= voorkeur M = nadere materiaalomschrijving toevoegen

Tabel 1.2 Symbolen voor timmermaterialen

omschrijving	aanduiding doorsnede	schaal						
		1:100	1:50	1:20	1:10	1:5	1:1	
naaldhout								
loofhout								
naald- en loofhout (langshout)								
lijmnaad								
bekledingsplaat					M	M	M	

= voorkeur M = materiaaloomschrijving toevoegen

Tabel 1.3 Symbolen voor metalen

omschrijving	aanduiding doorsnede	schaal						opmerking
		1:100	1:50	1:20	1:10	1:5	1:1	
staal								voor constructietekeningen mag de doorsnede worden opengelaten
aluminium, brons,koper,e.d.				M	M	M	M	
lood				M	M	M	M	met vermelding van zwaarte
zink				M	M	M	M	met vermelding van nummer

= voorkeur M = nadere materiaalaanduiding toevoegen

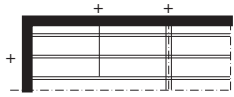
Tabel 1.4 Symbolen voor diverse materialen

omschrijving	aanduiding doorsnede	schaal						opmerking
		1:100	1:50	1:20	1:10	1:5	1:1	
kunststof						M	M	
afdichtingsmiddel						M	M	
bitumenweefsel, folie						M	M	
maaiveld								
zand								
grind								
water								
glas					M	M	M	
isolatieplaat					M	M	M	∠ 60°

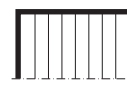
= voorkeur M = nadere materiaalaanduiding toevoegen

2 Bouwelementen

Balklagen en vloeren



houten balklaag met verankering



elementenvloer

houten balk

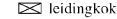
gestorte vloer

stalen balk

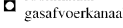
Kanalen

ventilatiekanaal

kanaal met aanduiding van uitblaasopening

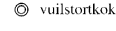


leidingkoker



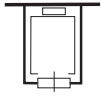
rookkanaal
gasafvoerkanaal

kanaal met aanduiding van afzuigopening



vuilstortkoker

Liften



bij een *goederenlift*
het hefvermogen in kg aangeven

bij een *personenlift*
het aantal personen aangeven

Trappen

rechte steektrap

twee boven elkaar gelegen rechte steektrappen

trap met één kwart

trap met twee kwarten

scheluwe trap

schuiftrap met luik

roltrap

trap met rijstroken

bordestrap

spiltrap (rechthoekig)

ronde spiltrap

wenteltrap

helling

klimbeugels

vloersparing
vide

Keukeninrichting, sanitair

werkblad met
enkele spoelbak

werkblad met
dubbele spoelbak

kooktoestel

koel- of vrieskast

wasmachine

vaatwasmachine

douche

ligbad

zitbad

wastafel

elektrische boiler

gasboiler

gasgeiser

handwasbak

closet/toilet

bidet

urinoir

invaliden
closet/toilet

kraan

wastrog

slophopper

uitstortgootsteen

waszuil

Brandbeveiliging

ANV ruimte voorzien van algemene noodverlichting

NNV ruimte voorzien van nachtnoodverlichting

RM ruimte voorzien van rookmelder

TM ruimte voorzien van thermodifferentiaal maximaalmeter

transparanten

uitgang met verlichtingspijl

uitgang met aan twee zijden een verlichtingspijl

uitgang

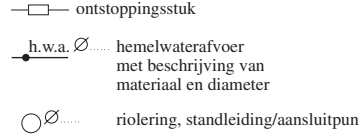
nooduitgang

Installaties

afzuigpunt mechanische ventilatie

afzuigpunt natuurlijke ventilatie

leiding met beschrijving van materiaal en diameter

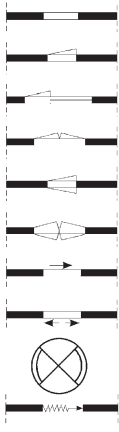


ontstoppingsstuk

hemelwaterafvoer met beschrijving van materiaal en diameter

riolering, standleiding/aansluitpunt

Muurdoorbrekingen



raam

deur

puikozijn

dubbele deur

doordraaiende deur

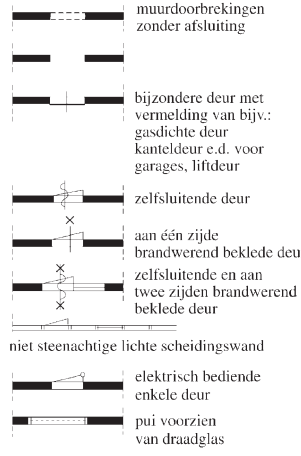
dubbele doordraaiende deur

enkele schuifdeur

dubbele schuifdeur

tourniquet

vouwwand of vouwdeur



muurdoorbrekingen zonder afsluiting

bijzondere deur met vermelding van bijv.: gasdichte deur kanteldeur e.d. voor garages, liftdeur

zelfsluitende deur

aan één zijde brandwerend beklede deur

zelfsluitende en aan twee zijden brandwerend beklede deur

niet steenachtige lichte scheidingswand

elektrisch bediende enkele deur

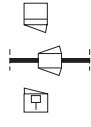
pui voorzien van draadglas

Kasten

hangkast

hang-legkast

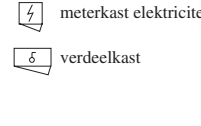
zuurkast



legkast

doorgeefkast

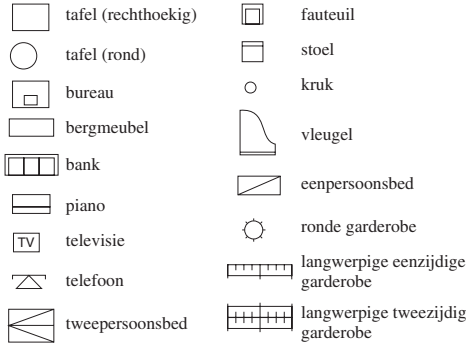
werkkast



meterkast elektriciteit

verdeelkast

Meubilair



Literatuur

– *NEN* 47 *Technische tekeningen–Doorsnede-aanduidingen van materialen op bouwkundige tekeningen*
Delft, Nederlands Normalisatie-instituut.
– *NEN* 114 *Tekeningen in de bouw–Aanduidingen van onderdelen en inrichting van bouwwerken op tekeningen* 1:50 *en* 1:100
Delft, Nederlands Normalisatie-instituut.

Materialen E1

1 Algemene gegevens
- 1.1 Fysische gegevens
- 1.2 Praktische gegevens voor de scheikunde

2 Metalen
- 2.1 Metalen en hun toepassingen
- 2.2 Technische eigenschappen
- 2.3 Staal
- 2.4 Ferro-gietmateriaal
- 2.5 Non-ferrometalen algemeen
- 2.6 Aluminium (legeringen)
- 2.7 Koper (legeringen)
- 2.8 Nikkel (legeringen)
- 2.9 Corrosie
- 2.10 Bescherming tegen corrosie
- 2.11 Bewerkingsgegevens

3 Kunststoffen
- 3.1 Overzicht polymeren
- 3.2 Fysische gegevens
- 3.3 Thermoharders
- 3.4. Rubbers (elastomeren)
- 3.5 Thermoplasten
- 3.6 Kunststofschuimen
- 3.7 Bewerkingsgegevens

4 Technische keramiek
- 4.1 Eigenschappen en toepassingen
- 4.2 Gegevens keramische materialen

5 Bouwstoffen algemeen

6 Hout
6.1 Voorschriften
6.2 Houtsoorten
6.3 Naald- en loofhout (afmetingen)
6.4 Triplex
6.5 Vezelplaten
6.6 Spaanplaat
6.7 Medium Density Fiberboard (MDF) of middelhardboard
6.8 Oriënted Strand Board (OSB-platen)

7 Steen
7.1 Gebakken steen
7.2 Niet-gebakken steen
7.3 Cementsoorten, samenstelling en aanduiding
7.4 Metselverbanden

8 Beton
8.1 Eigenschappen
8.2 Uitvoeringen

9 Glas
9.1 Voorschriften
9.2 Vlakglas
9.3 Ruitdikte (venster-en spiegelglas)
9.4 Veiligheidsglas
9.5 Brandwerende beglazing

10 Dakbedekkingen
10.1 Toelaatbare dakhelling
10.2 Dekking met pannen
10.3 Keramische dakpannen
10.4 Betondakpannen
10.5 Bitumineuze dakbedekkingen
10.6 Kunststof dakbedekkingen

11 Begroeide daken
11.1 Soorten begroeide daken

12 Verbinding en bevestiging
12.1 Houtverbindingen

12.2 Draadnagels
12.3 Houtdraadbouten en -schroeven
12.4 Kramplaten en deuvels
12.5 Sterkteklassen van bouten, moeren, schroeven, draadstangen en tapeinden
12.6 Bouten, moeren en schroeven
12.7 Borgingen
12.8 Pennen
12.9 Afdichtringen

13 Lijmen
13.1 Algemeen
13.2 Lijmverbindingen
13.3 Keuze van een lijm
13.4 Praktische uitvoering en beproeven lijmverbindingen
13.5 Veiligheid en milieu
13.6 Chemische borgmiddelen

14 Verven, lakken en beitsen
14.1 Samenstelling verf
14.2 Eigenschappen en toepassingen
14.3 Conservering en schilderwerk van metalen
14.4 Etikettering van verfproducten

Literatuur

1 Algemene gegevens

Tabel 1.1 Overzicht gegevens par.1

gegevens	pag.	gegevens	pag.
Compressibiliteit	E1/4	Prandtl-getallen	E1/18
Dynamische viscositeit	E1/4	Wandoneffenheden bij buizen	E1/18
Eigenschappen vloeistoffen	E1/5	Voortplantingssnelheden geluid	E1/19
Eigenschappen gassen en dampen	E1/6	Brekingsindices	E1/20
Eigenschappen metalen	E1/8	Relatieve diëlektrische constanten	E1/21
Eigenschappen legeringen	E1/9	Doorslagvastheden	E1/21
Eigenschappen diverse vaste stoffen	E1/10	Verlieshoeken	E1/22
Verzadigingsdrukken	E1/12	Magnetische eigenschappen materialen	E1/22
Diffusiecoëfficiënten	E1/12	Magnetische inductie, relatieve permeabiliteit en veldsterkte	E1/24
Kook-en sublimatiepunten	E1/13	Samenstelling lucht	E1/24
Homogene series aroma-componenten	E1/14	Standaardatmosfeer	E1/25
Verzadigde stoom	E1/15	Temperatuur aardatmosfeer	E1/25
Soortelijke enthalpie oververhitte stoom	E1/16	Handelstriviale namen en samenstelling	E1/26
Soortelijk volume oververhitte stoom	E1/17	Constructiematerialen chemische werktuigen	E1/31
Warmte-overdrachtscoëfficiënten	E1/17		

1.1 Fysische gegevens

Tabel 1.2 Compressibiliteit κ vloeistoffen [Pa^{-1}] *bij* $T = 293$ K

water	460×10^{-12}	olie	$550 - 800 \times 10^{-12}$
ethylalcohol	990×10^{-12}	chloroform	$1000 - 1200 \times 10^{-12}$
kwik	37×10^{-12}	glycerol	370×10^{-12}

Tabel 1.3 Dynamische viscositeit η [Pa·s] *(zie ook tabel 1.4)*

	t [°C]	η		t [°C]	η
alcohol	0	$1{,}84 \times 10^{-3}$	machineolie	10	0,676
alcohol	19	$1{,}21 \times 10^{-3}$	machineolie	44	0,071
azijnzuur	20	$1{,}23 \times 10^{-3}$	kwik	20	$1{,}59 \times 10^{-3}$
azijnzuur	57	$0{,}73 \times 10^{-3}$	tolueen	0	$0{,}77 \times 10^{-3}$
benzeen	20	$0{,}64 \times 10^{-3}$	water	0	$1{,}8 \times 10^{-3}$
benzeen	60	$0{,}39 \times 10^{-3}$	water	20	$1{,}0 \times 10^{-3}$
glycerol	3	4,22	water	50	$0{,}5 \times 10^{-3}$
glycerol	21	0,778			

Tabel 1.4
Vloeistoffen

	1 Dichtheid ρ [kg/m^3][1)]	2 Oppervlaktespanning σ [N/m][1)]	3 Dynamische viscositeit η [Pa·s][1)] Zie ook tabel 1.3	4 Kubieke uitzettingscoëfficiënt γ [K^{-1}] (T = 293 – 373 K)	5 Soortelijke warmte c [J/(kg·K)] (T = 293 – 373 K)	6 Warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/(m·K)][1)]	7 Smeltpunt [K] ($p = p_n$)	8 Soortelijke smeltwarmte [J/kg]	9 Kookpunt [K] ($p = p_n$)	10 Soortelijke verdampingswarmte [J/kg]	11 Kritische temp. [K]	12 Kritische druk [Pa]
	× 10^3	× 10^{-3}	× 10^{-3}	× 10^{-3}	× 10^3			× 10^3		× 10^3		× 10^6
aceton	0,79	23	0,33	1,5	2,20	0,16	178	92	329	515	509	6,1
alcohol	0,80	22	1,2	1,1	2,43	0,17	159	105	351	841	516	6,2
aniline	1,02	43	4,4	0,84	2,05	0,17	267	88	457	435	699	5,1
benzeen	0,88	29	0,65	1,2	1,71	0,15	279	127	353	393	563	4,6
benzine	0,72			1,0	2,1		123					
chloroform	1,49	27	0,6	1,3	0,96	0,12	210	244	335	250	535	5,5
ether	0,71	17	0,23	1,7	2,30	0,14	157	115	308	377	467	3,3
glycerol	1,26	62	1500	0,5	2,43	0,29	292	175	563	83	725	
koolstofdisulfide	1,26	32	0,36	1,2	1,00	0,14	161	57	319	350	552	7,5
kwik	13,5[2)]	500	1,55	0,182	0,14	10,4	234	12	630	301	1720	100
melk	1,02–1,04	45	2,1	0,8[3)]	3,9	0,49	272,5	92	373			
methanol	0,79	23	0,60	1,2	2,50	0,21	175	145	338	1110	513	7,8
olijfolie	0,92	33	84	0,72	1,65	0,17			570			
petroleum	0,79	27		1,0	2,1	0,15	203		423	319		
siliconenolie	0,76	16	0,49	1,6	1,37	0,10	205		373			
spiritus (95%)	0,85						183		351			
stookolie	0,95											
terpentijn	0,84	27	1,5	0,97	1,75	0,15	263		453	293	649	7,9
tetra	1,59	26	0,97		0,84	0,10	250	17	350	193	556	4,4
water	0,998	73	1,00	0,21[4)]	4,18	0,60	273	334	373	2260	647	22,1
zeewater[5)]	1,024		1,01		3,93	0,60	270	334		2260		
zwaar water	1,105				4,22	0,58	277	318	374	2070	645	21,7
zwavelzuur	1,84	55	28	0,56	1,38		284		603	511		

[1)] T = 293 K [2)] 13,6 bij 273 K [3)] 273–333 K [4)] 293 K [5)] 3% zout p_n = 101325 Pa (= 1 atm)

Tabel 1.5 Gassen en dampen

	1 Dichtheid ρ [kg/m^3] ($p = p_n$)	2 Dynamische viscositeit η [Pa·s]	3 Soort. warmte bij const. druk c_p [J/kg·K]	4 $\gamma = c_p/c_v$ [1)]	5 Warmtegeleid. coëfficiënt λ [W/m·K] [1)]	6 Smeltpunt [K] ($p = p_n$)	7 Kookpunt [K] ($p = p_n$)	8 Soortelijke verdampingswarmte [J/kg]	9 Kritische temp. [K]	10 Kritische druk [Pa]	11 Inverse temperatuur [K]	12 Temperatuur tripelpunt [K]	13 Druk tripelpunt [Pa]
		$\times 10^{-6}$	$\times 10^3$		$\times 10^{-3}$			$\times 10^3$		$\times 10^6$			$\times 10^3$
aardgas (Groningen)	0,833	11	1,9	1,31	29				187[2)]	4,5[2)]			
acetyleen (ethyn)	1,18	10	1,67	1,25	19		190[6)]		309	6,3			
alcoholdamp		10,8[3)]				159	351	841	516	6,2			
ammoniak	0,77	9,2	2,06	1,32	22	195	240	1370	405	11,9		195	6,07
argon	1,78	21	0,52	1,66	16	84	87	160	151	4,9	780	83,8	68,8
butaan (iso-)	2,67	6,9	1,61	1,11	14	128	263		408	3,6			
chloor	3,21	16,8[3)]	0,49	1,36	7,6	172	239	290	417	8,4			
chloroform-damp		9,4	0,60	1,15[5)]		210	335	240	535	5,5			
deuterium	0,180			1,73		18	23	310	38	1,7		18,6	17,07
ethaan	1,36	8,5	1,72	1,22	18	90	185	490	241	4,9			
etheen	1,26	9,4	1,41	1,25	17				283	5,1			
etherdamp		6,8	2,0	1,09		157	308	377	467	3,3			
fluor	1,70					53	85	170	144	5,7			
freon-12	5,51	12	0,06	1,14	8,5	123	243		385	4,1			
helium	0,178	18,6	5,1	1,66	144	1,0[5)]	4,3	21	5,2	0,23	50	2,19	5,1
koolstof-dioxide	1,98	13,9	0,82	1,31	14	195[6)]		570	304	7,3	2052	216,6	517
koolstof-monoxide	1,25	16,6	1,05	1,40	23	68	82	210	134	3,6			
krypton	3,74	23,3	0,25	1,69	8,7	116	120	110	210	5,5	1090	115,8	73,5
kwikdamp		50[3)]		1,67[4)]		234	630	301	1720	100			
lucht	1,29	17,1	1,00	1,40	24	60[2)]	80[2)]	210[2)]	132[2)]	3,8[2)]	659[2)]		
methaan	0,72	10,2	2,21	1,31	30	91	112	510	190	4,6	968	90,7	11,7
neon	0,90	29,7	1,03	1,64	46	25	27	130	44	2,7	231	24,6	43,2
ozon	2,22		0,79	1,40		81	163	250	268	7,0			
propaan	2,02	7,6	1,53	1,13	15	85	231	430	370	4,2			
stikstof	1,25	17	1,04	1,40	24	63	77	200	126	3,3	621	63,2	12,54
waterdamp	0,598[3)]	12,5[3)]	2,0	1,33[3)]	16	273	373	2260	647	22,1	4367	273,16	0,6112
waterstof	0,090	8,4	14,3	1,41	174	14	20	450	33	2,0	193	13,84	7,04
xenon	5,9	21,0		1,67	5,2	161	165	100	290	5,8	1456	161,4	81,7
zuurstof	1,43	18,9	0,92	1,40	25	54	90	210	154	5,1	764	54,36	0,152
zwavel-dioxide	2,93	11,6	0,64	1,27	8,4	198	263	390	431	7,8		197,7	0,167

[1)] $T = 273$ K
[2)] gewogen gemiddelde: eigenlijk traject
[3)] bij 373 K
[4)] bij 550 K
[5)] bij $2{,}5 \cdot 10^6$ Pa
[6)] bij $p = p_n$ rechtstreekse overgang vast–gas
$p_n = 101325$ Pa (= 1 atm)

Tabel 1.6
Metalen

	1 Dichtheid ρ [kg/m^3][1)] ($p = p_n$)	2 Elasticiteitsmodulus E [Pa][1)]	3 Lineaire uitz. coëff. α [K^{-1}] (T = 273–373 K)	4 Soortelijke warmte c [J/(kg·K)][1)]	5 Warmtegeleid coëfficiënt λ [W/(m·K)][1)]	6 Smeltpunt [K] ($p = p_n$)	7 Soortelijke smeltwarmte [J/kg]	8 Soortelijke weerstand ρ [Ω·m][1)]	9 Weerstandstemperatuur coëfficiënt α [K^{-1}] T = 298 K
	× 10^3	× 10^9	× 10^{-6}	× 10^3			× 10^3	× 10^{-9}	× 10^{-3}
aluminium	2,70	70	23,2	0,88[4)]	237	932	400	27	3,8/4,4
beryllium	1,85	300	11,5	1,78	170	1551	1384	33	9,0
bismut	9,80	32	13,5	0,12	9	544	54	1164	4,3
cadmium	8,65	60	31,5	0,234	92	594	57	75	4,0
calcium	1,55	20	22,3	0,65	96	1112	330	43	4,2
chroom	7,19	25	7,0	0,45	87	2160	280	130	3
goud	19,32	80	14,0	0,13	310	1336	66	24	3,9
kalium	0,87		83	0,754	103	336	65	72	5,4
kobalt	8,85	210	13,7	0,42	70	1768	260	58	6,0
koper (zacht/hard)	8,96	124	16,8	0,39[4)]	390	1356	205	16,7/17,5	3,9/4,3
kwik	13,5[2)]		182[3)]	0,14	8,4	234	12	960	0,93
lood	11,36	15	28,9	0,13[4)]	35	601	25	210	4,1
magnesium	1,74	44	25,6	1,03	150	923	370	46	3,8
molybdeen	10,22	330	5	0,26	138	2890	290	52	4,3
natrium	0,97		69,6	1,25	132	371	115	47	5,5
nikkel	8,89	196	12,7	0,46	92	1726	310	70	4,7
platina	21,45	165	8,9	0,133	72	2043	110	106	3,9
tantaal	16,60	190	6,5	0,14	54	3270	170	133	3,1
tin wit tetragonaal	7,30	55	22	0,22[4)]	63	505	59	115	4,3
wit rombisch	6,54		17			505			
grijs	5,75		35			505	40		
titaan	4,51	115	8,7	0,47	22	1940		430	
uraan	19,07	130	15	0,116	27	1406	40	290	2,1
vanadium	6,10			0,48	31	2193		357	
wolfraam	19,30	360	4,5	0,135	170	3680	190	55	4,9
ijzer	7,87	220	11,7	0,46[4)]	79	1812	276	98	6,5
zilver	10,50	77	19,2	0,24[4)]	417	1234	105	16,1	3,9
zink	7,14	93	29,7	0,39	116	693	107	59	4,1

[1)] T = 293 K [2)] 13,6 bij T = 273 K [3)] kubieke uitzettingscoëfficiënt p_n = 101325 Pa (= 1 atm)
[4)] bij T = 2000 K: aluminium 1,1 · 10^3; koper 0,50 · 10^3; lood 0,14 · 10^3; tin 0,24 · 10^3; ijzer 0,82 · 10^3; zilver 0,28 · 10^3

Tabel 1.7
Legeringen

Samenstelling	1 Dichtheid ρ [kg/m^3][1)]	2 Elasticiteits-modulus E [Pa][1)]	3 Lineaire uitz. coëff. α [K^{-1}] (T = 273–373 K)	4 Soortelijke warmte c [J/(kg·K)][1)]	5 Warmtegeleid coëfficiënt λ [K/(m·K)][1)]	6 Smeltpunt K ($p = p_n$)	7 Soortelijke weerstand ρ [Ω·m][1)]	8 Weerstands-temperatuur coëfficiënt α [K^{-1}]
massa %	× 10^3	× 10^9	× 10^{-6}				× 10^{-9}	× 10^{-3}
alumel 95% Ni, 1% Si, 2% Al, 2% Mn	8,7				30		330	2,4
brons 92% Cu 8% Sn	8,9	100	19	380	190	1280	140	0,6
chromel A 80% Ni, 20% Cr	8,4		17		18	1673	113	0,1
constantaan 54% Cu 45% Ni 1% Mn	8,9	110	15	410	22	1540	490	0,02
duraluminium 95% Al, 4% Cu	2,8	71	23	920	160	652		
gietijzer 94% Fe 3–4% C 2, 5% Si	7,3	100	11,5	500	60	1450	100	6,5
invar 64% Fe, 36% Ni	8,1	145	1–2	500	16	1700	80	1,4
manganine 84% Cu 12% Mn 4% Ni	8,5	130	16	410	22	1270	440	0,02
messing 55–70% Cu 30–45% Zn	8,5	100	21	380	122	1170	66	2
nichroom 60% Ni, 18% Cr 22% Fe	8,2		13		13	1620	112	0,13
nieuw zilver (duits zilver) 45–70% Cu 5–30% Ni, 8–45% Zn	8,9	110	18	400	33	1375	330	0,4
novoconstant 82% Cu 12% Mn 4% Al 2% Fe	8,8						450	
soldeer (zacht) 50% Pb, 50% Sn	9,0	0,045	23	176	80	490	150	
staal:								
koolstofstaal 99% Fe, 0 8% C	7,8	200	12	480	50	1630	180	
magneetstaal 62% Fe, 20% Ni, 12% Al (alnico)	6,9	200						
roestvast staal (messenstaal)[2)] 85% Fe, 0, 2% C, 13% Cr	7,8	200	10	460	27	1780	720	
RVS 302 70% Fe, 18% Cr, 8% Ni	7,9	200	17	500	16	1690	765	0,2
Woods' metaal 44 5% Bi, 35, 5% Pb 10% Cd 10% Sn	9,7			150	13	344		

[1)] T = 293 K [2)]Zie ook tabel 2.8, par. 2.3. p_n = 101325 Pa (=1 atm)

Tabel 1.8 Diverse vaste stoffen

1 Dichtheid[1] ρ [kg/m^3]	2 Elasticiteitsmodulus [Pa] E	3 Lineaire uitzettingscoëfficiënt [K^{-1}] (275–373 K)	4 Soortelijke warmte c [J/kg K]	5 Warmtegeleidingscoëfficiënt λ [W/(m K)]	6 Smeltpunt K ($p = p_0$)	7 Soortelijke smeltwarmte [J/kg]	8 Min. rookbare temperatuur [K]	9 Soortelijke weerstand ρ [Ω m]
$\times 10^3$	$\times 10^9$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^3$			$\times 10^6$		
akryl	1,2		70–100	1,4–2,1	0,2			10^{10}
asfalt	1,2		200	0,92	0,6			
bakeliet	1,3	6–10	30	0,92	0,2		680	10^8–10^9
barnsteen	1,0		54		0,13			
basalt	2,7–3,2			0,84–0,92	1			
been (bot)	1,9	0,014						
beton	1,5–2,4	20–40	10–12	09–1,1	0,2–20			
bruinsteen	3,4			0,73				
boter	0,86–0,87							
calciet	2,7							
diamant	3,52		1,3	0,49	165	>3800	17	10^{13}
eboniet	1,15		80–85	1,67	0,17			10^{6}
fosfor (wit)	1,83		124	0,79		317	0,022	10^{17}
(rood)	2,20							
germanium	5,46		6,1	0,31	63	1210	0,44	0,59
gips	2,32		25	0,8–1,1	1,3		400	
glas gewoon	2,6	50–100	8–9	0,84	0,93	1000	1000	10^{12}
flint	3,1–3,9	60–80	8	0,5	0,8		900	
grafiet	2,25		1–2	0,69–0,72	160	3823	17	10^{-5}
graniet	2,6–2,7		7–8	0,82	3,5			
hout balsa-	0,15		5–50		0,1			
ebbe-	1,26		3–5		0,3–0,5			
eike	0,78	11	3–5	2,4	0,3–0,5			
vure-	0,58	10–20	5	2,7	0,3–0,5			10^{12}
vroor	1,9				0,6–1,2			
kamfer	0,99					453		
keukenzout	2,17		40	0,88	0,045–0,06	1081	0,5	
koolstof	3,5		28	0,85				10^{4}
kurk	0,20–0,35			17–21	0,05–0,11			10^{9}
kwarts	2,2–2,5	70	0,4	0,75	0,22	1880	0,2	1563	10^{20}
marmer	2,7	40–50	12	0,88	2–4			10^{8}
mica	2,8	140–210	3	0,88	0,4–0,6			10^{14}
naftaleen	1,15		94	1,3		353	0,151	$3 \cdot 10^{5}$
nylon 6	1,14	1–2,5	100–140	1,7	0,2–0,3	215–220		$>10^{14}$
papier	0,7–1,2				0,18			10^{10}
paraffine	0,85		100–200	2,1–2,9	0,21–0,26	325–329	0,147	10^{15}
PMMA (plexiglas /perspex)	1,2	2,5–3,5	80	1,5	1,9		640	$>10^{19}$
polyetheen (PE)	0,93	0,5	180	2,2	0,23–0,29	398	660	$3 \cdot 10^{15}$
polystyreen	1,06	2,5–3	70	1,3	0,08			$>10^{14}$
porselein	2,4	70–80	2–5	0,8	1,0–1,7	1900		10^{12}
PVC hard	1,3	2,5–3,5	150–250	1,0–2,0	0,16		540	10^{12}–10^{14}
rubber	1,2–1,6	10^{-3}–10^{-4}	200	1,1–2,0	0,15		520	10^{13}
seleen	4,82		39	0,35		490	0,066	10^{7}
silicium	2,33	100–110	4,2	0,76	80–150	1683	0,164	625
steen (klinker)	1,5–2,0		3–9	0,75	0,6–1,1			
suiker (sacharose)	1,6		80	1,2	0,6	458	0,056	
teflon (PTFE)	2,2		90	1,0	0,2–0,3	600		10^{20}
was	0,95	1,8		2,5		338		
ijs (269 K)	0,917	3	50	2,2	2,1	273	0,334	
zand (droog)	1,6			0,80	1			
zwavel rombisch	2,07		61	0,73	0,2		0,038	
monoklien	1,96		80	0,74	0,2	392	0,046	10^{23}

[1] $T = 293$ K

$p_0 = 101\,325$ Pa (= 1 atm)

Voor kunststoffen zie ook par. 3.1.

Tabel 1.9 Verzadigingsdrukken [Pa]

T [K]	kwik	benzeen	alcohol	ether	water
		$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^5$	
273	$2{,}47{\cdot}10^{-2}$	3,47	1,67	0,247	zie hfd. F4,
283	$6{,}53{\cdot}10^{-2}$				par. 3.1,
293	$1{,}60{\cdot}10^{-1}$	10,0	5,38	0,587	tabel 3.1
303	$3{,}70{\cdot}10^{-1}$				
313	$8{,}10{\cdot}10^{-1}$	24,3	17,8	1,23	
323	1,69				
333	3,36	51,9	46,8	2,32	
343	6,44				
353	$1{,}18{\cdot}10^{-1}$	101	108	4,00	
363	$2{,}11{\cdot}10^{-1}$				
373	$3{,}64{\cdot}10^{-1}$	179	225	6,54	
423	$3{,}74{\cdot}10^{-2}$				
473	$2{,}30{\cdot}10^{-3}$	1700	1800		
523	$9{,}92{\cdot}10^{-3}$				

Tabel 1.10 Diffusiecoëfficiënten

mengsel (A–B)	temperatuur [K]	D°_{AB}[m^2/s]
gassen		
waterdamp-lucht	293	$25{,}6 \times 10^{-6}$
methanol-lucht	293	16×10^{-6}
propionzuur-lucht	293	$9{,}9 \times 10^{-6}$
butylamine-lucht	293	$10{,}1 \times 10^{-6}$
CO_2-lucht	293	$16{,}4 \times 10^{-6}$
H_2-lucht	293	41×10^{-6}
vloeistoffen		
H_2-water	293	$5{,}0 \times 10^{-9}$
H_2-sojaboonolie	293	$2{,}4 \times 10^{-9}$
CO_2-water	293	$1{,}77 \times 10^{-9}$
glucose-water	293	$0{,}60 \times 10^{-9}$
lactose-water	293	$0{,}43 \times 10^{-9}$
sucrose-water	293	$0{,}45 \times 10^{-9}$
ethanol-water	298	$1{,}13 \times 10^{-9}$
water-aardnotenolie	298	$0{,}25 \times 10^{-9}$

*Tabel 1.11 Kook- en **sublimatiepunten***[1] [K]

	druk [Pa]											
	133,3	1,333 $\times 10^3$	5,33 $\times 10^3$	13,33 $\times 10^3$	53,3 $\times 10^3$	101,3 $\times 10^3$	202,6 $\times 10^3$	507 $\times 10^3$	1,013 $\times 10^6$	2,026 $\times 10^6$	4,05 $\times 10^6$	6,08 $\times 10^6$
alcohol	242	271	292	308	337	351	371	399	425	456	491	515
ammoniak	**164**	**181**	**194**	205	228	240	254	278	299	323	352	371
benzeen	**236**	**262**	281	299	334	353	377	416	452	495	545	
chloor	**155**	**171**	189	201	226	239	254	283	309	338	375	400
chloormethaan		181	197	210	235	249	267	295	320	350	387	411
ethaan	114	130	143	154	173	185	198	220	241	267	297	
ether	199	225	245	262	291	308	329	363	395	432		
fenol	313	347	373	394	433	455	481	521	557	602	655	692
glycerol	399	440	471	493	536	563						
grafiet	**3860**	**4220**	**4470**	**4650**	**4930**	**5100**						
helium	1,4	1,8	2,4	2,8	3,8	4,3	5,1					
jood	**312**	**346**	**371**	390	433	456						
koolstofdioxide	**139**	**154**	**165**	**173**	**187**	**195**	**204**	216	234	254	279	296
koolstofdisulfide	199	228	251	268	301	319	342	378	409	449	496	529
koolstofmonoxide	**51**	**58**	**63**	**67**	77	82	90	102	112	121		
koper	1901	2152	2340	2480	2740	2855						
kwik	399	457	501	535	596	630						
lood	1246	1435	1582	1694	1903	2024						
methaan	67	78	85	92	104	112	121	135	148	165	187	
methanol	229	257	278	294	323	338	357	386	411	441	477	497
stikstof	47	54	59	63	72	77	84	94	103	115		
water	**256**	284	307	325	356	373	393	425	454	486	524	550
waterstof	10	12	14	16	18	20	23	27	31			
waterstofchloride	**122**	**137**	**149**	159	178	188	202	223	241	264	291	309
zuurstof	54	63	69	74	84	90	97	109	120	133	149	
zwavel	457	517	561	600	673	718						

[1] De sublimatiepunten zijn **vet** gedrukt. 133,3 Pa = 1 mm Hg; 5,33 $\times$ 10^3 Pa = 40 mm Hg; 101,3 $\times$ 10^3 Pa = 1 atm

Tabel 1.12 Gegevens homogene series aromacomponenten (25 °C)

stof	normaal kookpunt [°C]	dampdruk [Pa]	activiteitscoëfficiënt γ_i^∞	relatieve vluchtigheid	
				berekend	experimenteel
butanol	117,4	1133	43	15	16
hexanol	155,5	160	680	34	30
octanol	195,5	24	11000	85	43
aceton	56,2	30660	7,8	75	70
butan-2-on	79,6	12000	27	100	82
pentan-2-on	102	4930	100	160	110
heptan-2-on	151,5	640	1600	330	260
octan-2-on	172,9	250	6600	530	330
nonan-2-on	195	100	27000	870	650
undecan-2-on	228	25	460000	3700	1100
acetaldehyde	21	121300	4,2	160	120
propanal	48	38650	16	190	130
butanal	75	12000	61	240	200
pentanal	103	5000	250	400	260
hexanal	131	1600	1000	500	310
heptanal	153	625	4200	820	610
octanal	177	225	17000	1200	910
nonanal	191	119	71000	2700	1300
methyl acetaat	57,5	22500	24	240	200
methyl propionaat	79,7	9330	95	380	310
methyl butyraat	102,3	3330	390	560	370
methyl pentanoaat	130	973	1300	560	560
methyl hexanoaat	150	387	7100	1200	650
methyl octanoaat	193	49	13000	2800	1000

Tabel 1.13a Gegevens verzadigde stoom

absolute druk [MPa]	tempe-ratuur [°C]	soortelijk volume stoom [m^3/kg]	dich-theid [kg/m^3]	soort. enthalpie water [kJ/kg]	verdam-pings-warmte [kJ/kg]	soort. enthalpie stoom [kJ/kg]	soortelijk volume water [dm^3/kg]
0,001	7,0	129,2	0,0077	29	2484	2513	–
0,002	17,5	67,0	0,0149	73	2459	2533	–
0,003	24,1	45,7	0,0219	101	2444	2545	–
0,004	29,0	34,8	0,0287	121	2433	2554	–
0,005	32,9	28,2	0,0355	138	2423	2561	–
0,006	39,0	20,5	0,0488	163	2409	2572	–
0,01	45,8	14,7	0,068	192	2392	2584	–
0,02	60,1	7,7	0,130	251	2358	2609	–
0,03	69,1	5,2	0,193	289	2335	2624	–
0,05	81,4	3,2	0,312	340	2305	2645	–
0,07	90,0	2,4	0,416	377	2282	2659	–
0,1	99,6	1,69	0,591	417	2257	2674	1,044
0,2	120,2	0,89	1,12	505	2200	2705	1,061
0,3	133,5	0,61	1,64	561	2162	2723	1,074
0,4	143,6	0,46	2,18	604	2132	2737	1,084
0,5	151,8	0,37	2,70	640	2107	2747	1,093
0,7	165,0	0,27	3,71	697	2065	2762	1,108
1	179,9	0,19	5,24	762	2015	2777	1,128
2	212,4	0,100	10,1	908	1893	2801	1,177
3	233,8	0,067	14,7	1008	1798	2806	1,217
4	250,3	0,050	20,0	1087	1715	2802	1,252
5	264,0	0,039	25,6	1154	1641	2795	1,286
6	275,6	0,032	31,3	1213	1571	2784	1,319
8	295,0	0,023	43,5	1316	1440	2756	1,384
10	311,0	0,018	54,2	1407	1318	2726	1,451
12	324,6	0,0143	70,0	1490	1197	2687	1,525
14	336,6	0,0115	93,0	150	1067	2637	1,610
16	347,3	0,0093	108,0	1649	932	2581	1,713
18	357,0	0,0075	133,0	1733	778	2511	1,85
20	365,7	0,0059	169,0	1827	590	2417	2,06
22	373,7	0,0039	256,0	2010	208	2218	2,64
22,13	374,2	0,0032	313,0	2099	0	2099	3,20

Tabel 1.13b Soortelijke enthalpie oververhitte stoom [kJ/kg]

stoom-druk	ver-zadi-gings temp.	temperatuur [°C]							
[MPa]	[°C]	200	250	300	400	500	600	700	800
0,1	99,6	2875	2974	3074	3277	3487	3704	3927	4158
0,2	120,2	2870	2970	3071	3276	3486	3703	3927	4158
0,3	133,5	2866	2967	3068	3274	3485	3702	3926	4157
0,4	143,6	2861	2964	3066	3272	3484	3701	3926	4156
0,5	151,8	2857	2966	3063	3271	3483	3700	3925	4156
0,7	165,0	2847	2954	3058	3268	3481	3699	3924	4155
1,0	179,9	2831	2943	3051	3263	3479	3697	3922	4154
2,0	212,4	–	2906	3024	3246	3466	3689	3916	4149
3,0	233,8	–	2859	2995	3230	3455	3681	3910	4144
4,0	250,3	–	–	2963	3213	3444	3673	3904	4140
5,0	264,0	–	–	2927	3195	3433	3665	3898	4135
6,0	275,6	–	–	2886	3177	3421	3657	3892	4130
8,0	295,0	–	–	2784	3139	3398	3641	3880	4121
10	311,0	–	–	–	3098	3375	3625	3868	4112
12	324,6	–	–	–	3053	3351	3608	3856	4103
14	336,6	–	–	–	3002	3326	3592	3844	4093
16	347,3	–	–	–	2946	3300	3576	3832	4084
18	357,0	–	–	–	2884	3274	3559	3820	4074
20	365,7	–	–	–	2815	3246	3542	3809	4066
22	373,7	–	–	–	2738	3217	3525	3796	4057
23	–	–	–	–	2692	3202	3516	3790	4052
24	–	–	–	–	2640	3187	3508	3784	4048
25	–	–	–	–	2579	3172	3499	3778	4043
26	–	–	–	–	2509	3156	3490	3772	4038
28	–	–	–	–	2321	3123	3472	3760	4030
30	–	–	–	–	2151	3089	3454	3748	4021
35	–	–	–	–	1988	3002	3408	3717	3998
40	–	–	–	–	1928	2911	3360	3686	3976
45	–	–	–	–	1895	2819	3311	3654	3953
50	–	–	–	–	1870	2731	3263	3623	3931

Tabel 1.13c Soortelijk volume oververhitte stoom [m^3/kg]

stoomdruk [MPa]	oververhittingstemperatuur [°C]					
	200	250	300	400	500	600
0,1	2,17	2,4	2,6	3,1	3,6	4,12
0,2	1,08	1,20	1,31	1,55	1,78	2,01
0,3	0,72	0,80	0,9	1,–	1,2	1,3
0,4	0,54	0,6	0,65	0,77	0,89	1,01
0,5	0,43	0,47	0,52	0,62	0,71	0,9
1,0	0,21	0,23	0,26	0,31	0,35	0,4
1,5	0,13	0,15	0,17	0,2	0,24	0,27
2,0		0,11	0,13	0,15	0,18	0,2
2,5		0,9	0,1	0,12	0,14	0,16
3,0		0,07	0,8	0,1	0,12	0,13
4,0			0,06	0,07	0,09	0,1
5,0			0,045	0,06	0,07	0,08
6,0			0,04	0,05	0,06	0,07
8,0			0,02	0,03	0,04	0,05
10,0				0,025	0,03	0,04
12,5				0,02	0,025	0,03
15,0				0,016	0,02	0,025
17,5				0,012	0,017	0,02
20,0				0,01	0,015	0,018

Tabel 1.14 Warmte-overdrachtscoëfficiënten α [$W/(m^2 \cdot K)$]

	α
gas (vrije convectie)	5–15
gas (gedwongen convectie)	10–100
vloeistof (vrije convectie)	50–1000
vloeistof (gedwongen convectie)	500–3000
water in rust	350–580
water (geforceerde stroming)	580–2300
condenserend water	11600
condenserend ammoniak	9300
condenserend R_{12}, R_{12}	2300

Tabel 1.15 Prandtl-getallen Pr (bij 20 °C,1 atm)

	Pr		*Pr*
lucht, H_2, N_2	ca. 0,7	stoom (100 °C)	1,12
benzeen	7,36	water (0 °C)	13,7
glycerol	$12{,}4 \cdot 10^3$	water (20 °C)	7,03
kwik	0,023	water (100 °C)	1,74

Tabel 1.16 Wandoneffenheden bij buizen

materiaal	toelichting	wandoneffenheid [mm]
glas		0,01
PVC, polyetheen polyvinylchloride		0,01
beton	gladde bekisting	0,1 –1
	delen bekisting	1 –3
metselwerk	onbewerkt	2 –5
	gepleisterd	0,2 –0,5
gietijzer	nieuw onbehandeld	0,25
	geroest	1 –1,5
	geasfalteerd	0,02–0,01
staal	nieuw onbehandeld	0,05–0,1
	egaal geroest	0,1 –0,4
	geasfalteerd	0,02–0,1
messing	getrokken	0,02
hout	geschaafd	0,2 –0,5
	ruw	0,5 –2

Tabel 1.17 Voortplantingssnelheden geluid [m/s]

vaste stof[1)]	$T = 293$ K	**vloeistof**	$T = 293$ K	**gas/damp**	$T = 273$ K
aluminium	5100	aceton	1190	ammoniak	415
been (massief)	3000	alcohol	1170	argon	308
(poreus)	2600	aniline	1660	chloor	206
beton	4300	benzeen	1320	chloroform (360 K)	171
glas	4000–4500	chloroform	990	deuterium	890
graniet	4000	glycerol	1930	ether (360 K)	206
hout	1500–4000	koolstofdisulfide	1170	helium	965
ivoor	3000	kwik	1450	koolstofdioxide	259
koper	3800	methanol	1120	koolstofmonoxide	338
kurk	500	olie	1500	lucht (233 K)	307
lood	1200	siliconenolie	790	(253 K)	319
marmer	3800	terpentijn	1220	(273 K)	332
paraffine	1300	water (273 K)	1403	(293 K)	343
polyetheen	920	(293 K)	1484	(313 K)	354
rubber	50	(313 K)	1529	(333 K)	365
staal	5100	(333 K)	1540	methaan	430
steen	3600	(353 K)	1555	neon	435
ijs (269 K)	3280	(373 K)	1543	stikstof	334
ijzer	5100	zeewater	1510	waterdamp (407 K)	494
zilver	2700	zwaar water	1380	waterstof	1284
zink	3800			zuurstof	316
				zwaveldioxide	213

[1)] Bij metalen gelden de getallen voor *dunne staven* (zie ook hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par. 6.2).

Tabel 1.18 Brekingsindices

stof	brekingsindex 687 nm (rood)	589 nm (geel)	486 nm (blauw)	434 nm (violet)	grenshoek in graden 589 nm (geel)	doorlatingsgebied [μm]
vaste stoffen (t.o.v. lucht, $T = 293$ K)						
calciumfluoride (fluoriet)	1,43	1,43			44,4	0,125–9
canadabalsem		1,53			41	
diamant		2,42			24,4	
flintglas (licht)	1,507	1,510	1,516	1,522	41,5	
(zwaar)	1,64	1,65	1,66	1,67	37,3	
(zeer zwaar)	1,88	1,89	1,92	1,94	32,0	
kaliumchloride	1,48	1,49	1,51	1,52	42,2	0,2–24
kalkspaat						
(gewone straal)	1,65	1,66	1,67	1,68	37,3	0,2–2
(buitengewone straal)	1,48	1,49	1,49	1,49	42,2	0,2–2
keukenzout		1,54			40,5	0,2–15
kiezelaarde	1,46	1,46	1,46	1,47	43,2	0,2–3,5
kroonglas (licht)	1,51	1,51	1,52	1,52	41,5	
(zwaar)	1,61	1,61	1,62	1,62	38,4	
kwarts						
(gewone straal)	1,54	1,54	1,55	1,55	40,5	–7
(buitengewone straal)	1,55	1,55	1,56	1,56	40,2	
natriumjodide		1,77			34,4	
PMMA (plexiglas/perspex)	1,49	1,49	1,50	1,50	42,2	0,34–2
polycarbonaat (pc)	1,59					
polystyreen	1,58	1,59	1,60	1,62	39,0	0,34–2
steenzout	1,538	1,541	1,553	1,56	40,5	–19
topaas		1,61			38,4	
ijs (273 K)		1,31			49,8	
vloeistoffen (t.o.v. lucht, $T = 293$ K)						
aceton		1,359			47,4	
benzeen	1,494	1,501	1,513	1,520	41,8	
ehtanol	1,36	1,362	1,366	1,371	47,2	
ether	1,350	1,353	1,375	1,361	47,7	
fosfor in koolstofdisulfide		$\geqq$1,95			$\leqq$31	
glycerol	1,466	1,47	1,475	1,480	42,9	
keukenzoutoplossing (1 molair)		1,38			46,4	
koolstofdisulfide	1,615	1,628	1,652	1,677	38	
paraffine		1,48			42,5	
terpentijn		1,472			42,8	
tetra		1,466			43,0	
water	1,330	1,333	1,337	1,341	48,6	
gassen ($T = 273$ K, $p = p_n = 101325$ Pa $= 1$ atm)						
helium		1,000035				
lucht		1,00029				
zuurstof		1,00027				
zwaveldioxide		1,00069				

Tabel 1.19 Relatieve diëlektrische constanten ε_r

vaste stoffen ($T = 298$ K)			
asfalt	2,7	mica	6–7
bakeliet	4,5	nylon	3,5
calciet	8,0–8,5	papier	2,2
diamant	5,5	paraffine	2,2
eboniet	2,7–2,9	PMMA (plexiglas/perspex)[1)]	3–3,5
fosfor (rood)	4,1	polystyreen	2,55
(wit)	3,6	porselein	6,5
germanium	16	prespaan	3,5–4,5
glas (pyrex)	4–5	pvc	4,5
glas	5–16	rubber	2,8
hout	3–7	seleen	6,6
keukenzout	6,1	silicium	12
kwarts	4,3	steatiet	6,5
marmer	8,5	teflon	2,1
		zwavel	3,6–4,3

vloeistoffen ($T = 298$ K)			
aceton	21	methanol	34
alcohol	24–26	olie	1,5–4,7
aniline	6,9	paraffine-olie	2,2
benzeen	2,3	siliconenolie	2,2
chloroform	4,8	terpentijn	2,2
ether	4,3	tetra	2,2
glycerol	42–43	tolueen	2,4
koolstofdisulfide	2,6	water	80

gassen ($T = 273$ K, $p = p_n = 101325$ Pa $= 1$ atm)			
ammoniak	1,0072	lucht	1,00056
koolstofdioxide	1,00099	methaan	1,0009
koolstofmonoxide	1,00070	waterdamp (393 K)	1,00060
helium	1,00007	waterstof	1,00027

Tabel 1.20 Doorslagvastheden [kV/cm]

lucht		PF (pertinax)[2)]	100–150
(1 bar, 20 °C)	30	porselein	150–250
olie (transf.)	50–300	micaniet	250–350
prespaan	10–100	glas	400–600

[1)] merknaam voor polymethylmethacrylaat (PMMA)
[2)] merknaam voor een laminaat op basis van fenolformaldehyde (PF)

Tabel 1.21 Verlieshoek ($\delta \approx \tan \delta$)

bakeliet	10×10^{-3}	polypropeen	$<0{,}4 \times 10^{-3}$
eboniet	8×10^{-3}	polystreen	$<0{,}4 \times 10^{-3}$
kwartsglas	$0{,}1 \times 10^{-3}$	teflon	$<0{,}4 \times 10^{-3}$
mica	$0{,}1 \times 10^{-3}$	porselein	$7\text{–}25 \times 10^{-3}$
olie (transf.)	5×10^{-3}	papier (droog)	4×10^{-3}
polyetheen	$<0{,}4 \times 10^{-3}$	papier (geolied)	$4\text{–}40 \times 10^{-3}$

Zie ook par. 3.2 *Fysische gegevens* (kunststoffen).

Tabel 1.22 Magnetische eigenschappen verschillende materialen

diamagnetisch ($\mu_r = \kappa + 1$) (20°C, tenzij anders vermeld)	κ, χ_m	**paramagnetisch** ($\mu_r = \kappa + 1$) (20°C, tenzij anders vermeld)	κ, χ_m
bismuth	-170×10^{-6}	aluminium	$+20{,}7 \times 10^{-6}$
germanium	$-7{,}1 \times 10^{-6}$	lucht	$0{,}36 \times 10^{-6}$
glas	-13×10^{-6}	magnesium	$11{,}8 \times 10^{-6}$
goud	$-34{,}5 \times 10^{-6}$	mangaan	$0{,}9 \times 10^{-3}$
koper	$-9{,}7 \times 10^{-6}$	natrium	8×10^{-6}
kwik	$-28{,}4 \times 10^{-6}$	palladium	$0{,}78 \times 10^{-3}$
lood	$-15{,}8 \times 10^{-6}$	platina	$0{,}28 \times 10^{-3}$
selenium	$-19{,}0 \times 10^{-6}$	uranium	$0{,}41 \times 10^{-3}$
silicium	$-3{,}3 \times 10^{-6}$	wolfram	$77{,}8 \times 10^{-6}$
telluur	$-24{,}3 \times 10^{-6}$	zuurstof	
tin	$-28{,}6 \times 10^{-6}$	gas,1 atm.	$3{,}87 \times 10^{-3}$
water	$-9{,}0 \times 10^{-6}$	vloeistof, 70 K	$1{,}9 \times 10^{-3}$
waterstof (1 atm)	$-4{,}5 \times 10^{-9}$		
ijs (0°C)	$-8{,}8 \times 10^{-6}$		
zilver	$-23{,}8 \times 10^{-6}$		
zirkoon	-109×10^{-6}		
zink	$-15{,}6 \times 10^{-6}$		
zwavel	$-12{,}6 \times 10^{-6}$		

Tabel 1.22 (vervolg)

zacht ferromagnetisch en ferrimagnetisch

	samenstelling massa%		μ_r max	$B_{verz.}$ [T]	$H_{coërc.}$ [A/m]	Curie-temp. [K]
			$\times 10^3$			
kobalt	100 Co		0,250	1,79	800	1390
nikkel	100 Ni		0,530	0,62	56	630
ijzer (zuiver)	100 Fe		200	2,16	4	1040
ijzer	99,8 Fe		5	2,16	80	1040
staal	1 C	rest Fe	3,8	2,0	600	1040
silicium-ijzer	3 Si	rest Fe	50	2,0	8	1010
45-permalloy	45 Ni	rest Fe	25	1,6	24	750
78-permalloy	78,5 Ni	rest Fe	70	1,08	4	870
hipernik	50 Ni	rest Fe	70	1,6	4	770
permendur	50 Co, 1 V	rest Fe	5	2,45	160	1250
mumetaal	77 Ni, 5 Cu, 2 Cr	rest Fe	100	0,65	4	670
Mn-Zn ferriet (ferroxcube 3A)	$(MnO)_{0,5}(ZnO)_{0,5}Fe_2O_3$		2,2	0,37	8	420
Ni-Zn ferriet (ferroxcube 4A)	$(NiO)_{0,36}(ZnO)_{0,64}Fe_2O_3$		6,5	0,37	30	410
supermalloy			800–1000			

hard ferromagnetisch

			B_{rem} [T]	$H_{coërc.}$ [A/m]	$(B{\cdot}H)_{max}$ [J/m^3]	Curie-temp. [K]
				$\times 10^3$	$\times 10^3$	
koolstofstaal	1 C,0,5 Mn	rest Fe	0,9	4	1,6	1040
chroomstaal	3 Cr,0,9 C,0,3 Mn	rest Fe	0,9	4,8	2,3	1040
wolfraamstaal	6 W,0,7 C,0,3 Cr	rest Fe	1,05	5,2	2,4	1030
remalloy	17 Mo, 12 Co	rest Fe	1,0	1,8	8	1050
alnico I	21 Ni, 12 Al, 5 Co, 3 Cu	rest Fe	0,69	39	11,1	1050
alnico V (ticonal)	24 Co, 14 Ni, 8,5 Al,3,5 Cu	rest Fe	1,25	53	45,3	1160
samarium-kobalt	Co_5Sm		0,87	670	150	1000
ferroxdur 1	$BaO–6Fe_2O_3$ (isotr.)		0,22	140	7,6	720
ferroxdur 2	$BaO–6Fe_2O_3$ (anisotr.)		0,40	180	28	730
neodymium-ijzer	Nd, Fe B		0,45	310	320	100

Tabel 1.23 Magnetische inductie B en relatieve permeabiliteit μ_r afhankelijk van de magnetische veldsterkte H

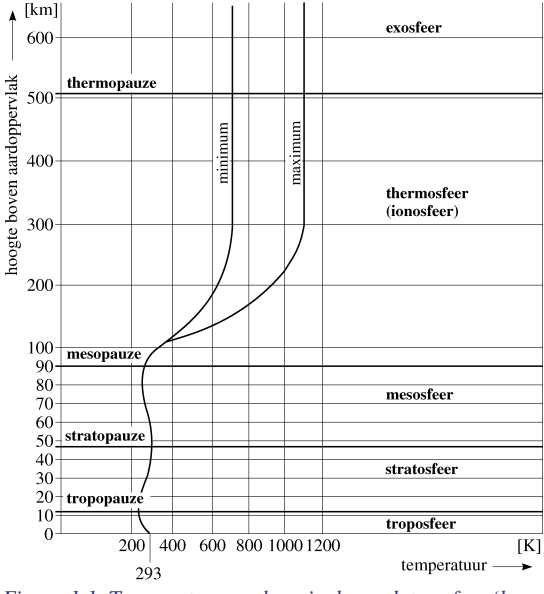
	dynamoplaat		gietstaal		gietijzer	
H [A/m]	B [T]	μ_r	B [T]	μ_r	B [T]	μ_r
20	0,05	1990				
40	0,20	3950				
60	0,32	4210				
80	0,40	3970				
100	0,46	3660				
200	0,69	2780	0,53	2110	0,19	756
400	1,02	1985	0,83	1650	0,29	580
600	1,18	1590	1,05	1378	0,36	477
800	1,26	1270	1,20	1195	0,41	406
1000	1,32	1035	1,30	1035	0,46	366
1500	1,43	763	1,45	770	0,54	287
2000	1,49	597	1,52	605	0,61	247
3000	1,56	413	1,61	430	0,71	191
4000	1,61	318	1,63	326	0,78	159
5000	1,65	263	1,64	263	0,82	127
6000	1,68	223	1,68	222	0,85	111
7000	1,70	193	1,70	191	0,89	103
8000	1,73	172	1,73	171	0,92	96
9000	1,75	156	1,75	154	0,94	79
10000	1,78	142	1,78	141	0,97	77
11000	1,80	130	1,80	130	0,99	72
12000	1,82	121	1,82	127	1,01	67

Tabel 1.24 Samenstelling lucht: voornaamste bestanddelen van atmosferische lucht nabij aardoppervlak

gas		volume gehalte [%]	relatieve molecuulmassa
N_2	stikstof	78,09	28,013
O_2	zuurstof	20,95	31,999
A	argon	0,93	39,948
CO_2	koolstofdioxide	0,035	44,010
Ne	neon	$1{,}8 \times 10^{-3}$	20,183
He	helium	$0{,}52 \times 10^{-3}$	4,003
Kr	krypton	$0{,}1 \times 10^{-3}$	83,80
H_2	waterstof	50×10^{-6}	2,016
Xe	xenon	8×10^{-6}	131,30
O_3	ozon	1×10^{-6}	47,998
Rn	radon	6×10^{-18}	222
H_2O	waterdamp	variabel	

Tabel 1.25 Standaardatmosfeer boven aardoppervlak

hoogte [km]	druk [mbar]	dichtheid [kg/m^3]
0	1013	1,225
12	194	0,312
20	55	0,0889
48	1	$1{,}3 \times 10^{-3}$
50	0,8	$1{,}0 \times 10^{-3}$
80	$10{,}0 \times 10^{-3}$	$20{,}0 \times 10^{-3}$
90	$1{,}6 \times 10^{-3}$	$3{,}0 \times 10^{-6}$
100	$0{,}3 \times 10^{-3}$	$0{,}5 \times 10^{-6}$
200	$1{,}3 \times 10^{-6}$	$0{,}3 \times 10^{-9}$



Figuur 1.1 Temperatuur-verloop in de aardatmosfeer (bron: Zon en Aarde, *Herbert Friedman*, Natuur & Techniek *1989)*

1.2 Praktische gegevens voor de scheikunde

Tabel 1.26 Handels (triviale) namen en samenstelling[1)]

triviaal- of handelsnaam	chemische naam/synoniem	chemische formule	dichtheid [kg/m^3]	opmerkingen
			$\times 10^3$	
aardgas	moerasgas, mijngas hoofdzakelijk methaan	CH_4	$0{,}415^{-164}$	
aceton	2-propanon	$CH_3{-}CO{-}CH_3$	$790{,}5^{20}_4$	
acetyleen alcohol	ethyn ethanol	C_2H_2 C_2H_5OH	$0{,}613^{-80}$ $0{,}7893^{20}_4$	
aluin 12 aq.	Kalium–aluminium–sulfaat verzamelnaam voor dubbelzouten van sulfaten	$K_2SO_4Al_2(SO_4)_3$ 24 aq.	1,725	24aq komt in de gebruikelijke handboeken niet voor
ammonia 25%	waterige oplossing van ammoniakgas	NH_4OH	$0{,}9106^{15}_{15}$	
ammoniak	ammoniakgas	NH_3	0,5967 lucht 1	
aniline	aminobenzeen	$C_6H_5NH_2$	$1{,}0217^{20}_4$	
antimoonglans	antimoonsulfide	Sb_2S_3	4,64	
bauxiet	aluminiumoxide als erts aluinaarde	$Al_2SO_3{\cdot}2$ aq.	2,55	
benzol	benzeen	C_6H_6	$0{,}8789^{20}_4$	
bergkristal	gekristalliseerd silicium dioxide: ook kwarts	SiO_2	2,635–2,66	
blauwzuur	cyaanwaterstofzuur	HCN	0,687 0,941 lucht 1	als vloeistof
bleekwater	oplossing van kalium– of natrium–hypochloriet in water; ook wel eau de javelle	KClO of NaClO	1,025	als gas max. hangt af van samenstelling
bloedloogzout, geel	kaliumhexacyanoferraat (II)	$K_4Fe(CN)_6$	1,85	3 aq
bloedloogzout, rood	kaliumhexacyanoferraat (III)	$K_3Fe(CN)_6$	1,89	3 aq.
borax	natriumtetraboraat	$Na_2B_4O_7{\cdot}10$ aq.	1,73	
broomkali	kaliumbromide	KBr	2,75	
broomzilver	zilverbromide	AgBr	6,47	
bruinsteen	mangaandioxide	MnO_2	5,0	ruw
carbid	calciumcarbide	CaC_2	2,2	
carbolzuur	fenol	C_6H_5OH	1,071	
carborundum	siliciumcarbide	SiC	3,23	
chilisalpeter	natriumnitraat	$NaNO_3$	2,26	
chloorkalk	calciumoxichloride in wisselende samenstelling	$Ca(OCl)_2{\cdot}CaCl_2$ $Ca(OH)_2{\cdot}H_2O$		groen waarden beschikbaar i. v. m. samenstellingsvariaties
chloroform	trichloormethaan	$CHCl_3$	$1{,}4832^{20}$	
cinnaber	kwiksulfide	HgS	8,06–8,15	7,55–7,7 amorf
cyaankali	kaliumcyanide	KCN	1,56	
dolomiet	mineraalerts met magnesium- en calciumcarbonaat	$MgCO_3{\cdot}CaCO_3$	2,9	
druivensuiker	glucose, ook dextrose dextropur	$C_6H_{12}O_6$	$1{,}542^{25}$	
dynamiet	75% nitroglycerol geabsorbeerd in 24,5% infusoriënaarde met 0,5% natriumcabonaat	$CH_2ONO_2{-}CHONO_2{-}CH_2ONO_2$	$1{,}6009^{25}_4$	
ether	diethylether	$C_2H_5{-}O{-}C_2H_5$	$0{,}713^{20}_4$	$0{,}707^{25}_4$
fenol	ook carbolzuur	C^6H^5OH	1,071	zie ook carbolzuur
fixeerzout	ook hypo, natriumthiosulfaat	$Na_2S_2O_3$ 5 aq.	1,69	
formaline	waterige oplossing van formaldehyde	HCHO	$1{,}081^{25}_4$	
freon	chloorfluorkoolstof	varieert	varieert	verzamelnaam
gips	calciumsulfaat. 2aq.	$CaSO_4{\cdot}2$ aq.	2,32	
glauberzout	natriumsulfaat	Na_2SO_4	2,68	1,47 10 aq.
glycerine	glycerol	$C_3H_8O_3$	$1{,}2613^{20}$	
glucose	ook druivensuiker of dextrose	$C_6H_{12}O_6$	$1{,}542^{25}$	
grafiet	hexagonaal gekristalliseerde koolstof	C	2,25	

Tabel 1.26 (vervolg)

triviaal- of handelsnaam	chemische naam/synoniem	chemische formule	dichtheid [kg/m³]	opmerkingen
			$\times 10^{-3}$	
helse steen	zilvernitraat	$AgNO_3$	4,35	
hertshoornzout	ook hoornzout, ammoniumbicarbonaat	NH_4HCO_3	geen gegevens i.v.m. samenstelling. mengsel van am. bicarbonaat en -carbamaat.	
houtgeest	methanol	CH_3OH	$0,7915^{20}$	
hypo	natriumthiosulfaat	$Na_2S_2O_3.5$ aq.	1,69	
joodkali	kaliumjodide	KI	3,13	
kalk	gebrand calciumoxide	CaO	3,0–3,55	
kalk	geblust calciumhydroxide	$Ca(OH)_2$	1,15–1,25	
kalkmelk	calciumhydroxide in water	$Ca(OH)_2$ in H_2O	$0,9998–1,2195^{20}_4$	van 0% CaO tot 24,6% CaO afh. v. conc. 0–50% KOH
kaliloog	kaliumhydroxide in water	KOH	1–1,51	
keukenzout	natriumchloride	NaCl	$2,1652^{25}_4$	
kiezelzuur	een verschijningsvorm van siliciumdioxide, amorf	SiO_2 ook H_2SiO_3	2,163 2,2–2,6	
koolzuur	koolstofdioxide	CO_2	1,9768	
konningswater	ook aqua regia, mengsel van 3 delen sterk zoutzuur en 1 deel sterk salpeterzuur	3 HCl en 1 HNO_3	geen waarden opgegeven	
kopervitriool	kopersulfaat	$CuSO_4.5$ aq.	2.286	
korund	aluminiumoxide	Al_2O_3	3,4	
krijt	calciumcarbonaat ook mergel, kalksteen	$CaCO_3$	2,72	
kwarts	gekrist. siliciumdioxide, bergkristal	SiO_2	2,635–2,66	
lachgas	distikstofoxide ook stikstofoxidule	N_2O	1,9780	
loodglans	loodsulfide	PbS	7,8–8,0	
loodglit	loodoxide	PbO	9,6 rhomb.	9,3 tetragon.
loodsuiker	loodacetaat	$(CH_3COO)_2$	3,250 aq. 1,69	10 aq. en 2,553 aq.
loodwit	basisch loodcarbonaat	$2PbCO_3.Pb(OH)_2$	6,5	
magnesia	magnesiumoxide	MgO	3,2–3,6	
magnesiet	mineraalerts magnesium carbonaat	$MgCO_3$	3,09	
marmer	gekrist. vorm van calciumcarbonaat, in veel variëteiten	$CaCO_3$	2,5–2,8	
melksuiker	een der koolhydraten	$C_{12}H_{22}O_{11}$	1,525	
menie	loodmenie loodoxide	Pb_3O_4	9,0	
menthol	menthanol pepermuntkamfer	$C_{10}H_{19}O$		
mergel	kalkmergel, kalksteen krijt, calciumcarbonaat als mineraal gesteente	$CaCO_3$	2,3–2,6	
moerasgas	ook mijngas, aardgas hoofdzakelijk methaan	CH_4	$0,415^{-164}$	
natronloog	natriumhydroxide in water	NaOH	1–1,52 (2,1)	opl. van 0–48% NaOH
natronkalk	calciumoxide met 5–20% NaOH en 6–18% water	$CaO–NaOH.H_2O$	2,1	
pekel	oplossing van NaCl in water in water	NaCl	1–1,19	van 0 tot 25% NaCl in water
potas	kaliumcarbonaat	K_2CO_3	2,29	
pyriet	ook ijzerkies, ijzersulfide	FeS_2	2,8–3,0 in massa	4,5–4,8 krist.
rattenkruid	arsenitrioxide	As_2O_3	3,7	
salmiak	ammoniumchloride	NH_4Cl	1,53	
salpeter	kaliumnitraat	KNO_3	2,1	
salpeterzuur	salpeterzuur	HNO_3	$1,5129^{20}$	zie ook tabel 2.10 pag. A5/27
soda	natriumcarbonaat	Na_2CO_3	2,53 (anh.)	kristalsoda 1,45–2,25
steenzout	ruw mineraal natriumchloride	NaCl	2,3–2,4	
stijfsel	zetmeel	$(C_6H_{10}O_5)x$	1,6	
styreen	styrol, cinnamol, fenylethyleen, vinylbenzeen	$C_6H_5–CH=CH_2$		
sublimaat	kwikchloride	$HgCl_2$	5,33	
suiker	sacharose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	1,61	
superfosfaat	calciumfosfaat plus calciumsulfaat	$CaH_2PO_4)_2.2NaSO_4.2H_2O$	2,8 $\times 10^{-3}$	
tinsteen	ook tinas, tinoxide	SnO_2	6,95	
tinzout	tinchloride	$SnCl_2$ 2 aq.	2,710	
tetra	tetrachloorkoolstof	CCl_4	1,6	
tri	trichloorethyleen	C_2HCl_3		
urethaan	ethylcarbonaat, ethylurethaan	$NH_2–CO–OC_2H_5$		
veldspaath	kaliumaluminiumsilicaat	$K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$	2,55	
	of natriumaluminiumsilicaat	$Na_2O.Al_2O_3.6SiO_2$		
pijpaarde	ook kaoline, klei	$Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$	2,2	
vermiljoen	kwiksulfide	HgS	8,06–8,15	7,55–7,7 amorf
ijzervitriool	ferrosulfaat	$FeSO_4$ 7 aq.	355	
zand	siliciumoxide met verontreinigingen	SiO_2	1,4–1,8	afh. van vochtigheid
zetmeel	koolhydraat uit div. planten: stijfsel aardappelmeel, maïszetmeel, tapiocameel enz.	$(C_6H_{10}O_5)x$	1,5–1,6	
zinkblende	zinksulfide	ZnS	4,0	
zinkboter	zinkchloride	$ZnCl_2$ 2 aq.		
zout	zie keukenzout			
zoutzuur	zoutzuur	HCL	$1,198^{20}$	bij 40% in water
zinkwit	zinkoxide	ZnO	5,6	
zuiveringszout	natriumbicarbonaat natriumwaterstofcarbonaat	$NaHCO_3$	2,2	
zuringzuur	oxaalzuur	$COOH.COOH.2H_2O$	1,65	
zwaarspaath	bariumsulfaat	$BaSO_4$	4,5	
zwavelzuur	zwavelzuur	H_2SO_4	$1,8305^{20}$	zie ook tabel 2.10 pag. A5/27

[1] De index: $^{20}_{4}$ ^{20} enz. geeft de dichtheid aan vergeleken met die van water bij 20 resp. 25 graden Celsius en die van 4 graden Celsius.
De index: -164 enz. geeft de temperatuur aan [°C].

Tabel 1.27 Constructiematerialen voor chemische werktuigen

metalen en legeringen	
IJzer en staal	Tanks voor olie, NH_3, alcohol, geconc. H_2SO_4, Oleum.
Gietijzer	Reactiekolommen NH_3-synthese, idem Solvaysodaproces, HNO_3-retorten, Mannheimer-HCl-retorten, Nitrerings-en sulfoneringsapparatuur; nooit voor aanvoerleidingen (bros), wel afvoerleidingen.
Duriron	Gietijzer met 13–14% Si; bestand tegen hooggeconc. H_2SO_4 en HNO_3; goed bestand tegen geconc. HCl.
Temperguss	Gietijzer met 0,2–2,0% C, 0,6–0,8% Si, 0,1–0,3% Mn, 0,06–0,12% P, 0,15–0,25% S. Zeer hittebestending.
Chroomnikkel-stalen	Vaak roestvrij staal genoemd, met aanduidingen als V2A V4A, V6A-stalen of USA-nomenclatuur met nummers. IJzer met C, Cr, Ni eventueel Mo, Cu. Over het algemeen min of meer zuurbestendig. Toch voorzichtig o.a. met HCl.
Koper	Destileerapparaten, spiralen in warmtewisselaars, niet bestand tegen chloride en ammoniakalkalische vloeistoffen en HNO_3. Appendages. Messing: Cu en Zn; Brons: Cu en Sn.
Lood	Overal waar zwavelzuur voorkomt. Bekleding tanks en leidingen, galvanische industrie, accumulatoren saturatoren. Niet bestand tegen verd. warm HNO_3 en logen. Geen zelfdragend constructiemateriaal. Daarvoor hardlood, Pb met 14–23% Sb. Platen voor accumulatoren en apparatenbouw.
Nikkel	Alkalismeltketels. Wordt aangetast door verd. zuur.
Monel	Legering van Ni met 30% Cu en bepaalde percentages Fe, Mn, Si, C en soms Al. Bestand tegen NaCl. Apparaten in de NaCl-verwerkende industrie, koelinstallaties, zeepijpleidingen.
Inconel	Ni met Cr, Fe, Cu, Si, Mn, C en soms Al, Nb, en Ti. Apparaten voor voedingsmiddelenindustrie.
Contracid	Ni met Cr, Fe, Cu, Mo, Si, Mn, Wo. Bestand tegen HCl.
Chroom	Ook verchroomd en hardverchroomd. 'Roestvrij' staal, verschillende legeringen. Kraakinstallaties, in verdampen verstuivingskamers. Bestand tegen NH_3 en NaOH, niet tegen NaCl.

Tabel 1.27 (vervolg)

Aluminium	Vrijwel altijd toegepast in de vorm van legeringen waarvan vele niet bestand tegen NaCl. Wel bestand tegen zeewater en NaCl: BS- en KS-legering. Bekende namen voor apparatenbouwlegeringen *lautal, aludur, aldrey, aluman, bondur.*
Magnesium	Als legering aantrekkelijk door lage dichtheid en alkalibestendigheid. Speciaallegering: elektronmetaal: 90–92% Mg, 6% Al, Zn en Mn. Dichtheid 1800, smeltpunt 630 °C, brandbaar magnalium, Al met Mg, taai en rekbaar.
Bismuth	Als speciaallegeringen voor laagsmeltende metalen. Woodsmetaal: 50% Bi, 12,5% Sn, 25% Pb, 12,5% Cd. 60,5 °C. Lippowitzmetaal: 50% Bi, 13,3% Sn, 26,7% Pb, 10% Cd. 70 °C. Rose-metaal: 50% Bi, 25% Sn, 25% Pb. 94 °C.
Tin	Witmetaal (lagermetaal) 42% Sn, 14% Sb, 3% Cu, 41% Pb en varianten.
anorganische materialen	
Glas	In vele samenstelligen constructiemateriaal voor laboratoriumapparatuur en semi-technische apparaten. Zelfs voor productieapparaten, destillatiekolommen, buisleidingen, pyrex, jena, murano enz.
Glaswol	Isolatiemateriaal, alkaligevoelig.
Glasvezel	Wapeningsmateriaal o.a. voor kunststoffen.
Emaille	Bekleding van apparatuur van gietijzer of staal; corrosiebestendig, maar gevoelig voor regelmatige temperatuurschommelingen en schokken.
Kwarts	Bestand tegen sterke temperatuurwisselingen. Apparatenbouw, smeltkroezen en buizen.
Keramisch materiaal	Porselein, aardewerk, steengoed, zuurvast aardewerk, steatiet. Voeringen van reactieketels, ovens, zuurvaste tanks en zuurvaste leidingen. Kogelmolens, vulmaterialen van absorptieapparaten.
organische materialen	
Kunststoffen	Corrosiebestendigheid,vaak lage dichtheid, gemak-

Tabel 1.27 (vervolg)

	kelijke vormgeving, goede bewerkbaarheid Raadpleging vakliteratuur noodzakelijk en kritische benadering bij het doen van een keuze. Er is niet één plastic voor elk doel, maar bijna wel voor elk doel één nauwkeurig gedefinieerde kunststof.
Rubber	Natuurrubber en synthetische rubber. Corrosiebestendige voeringen voor tanks, leidingen en appendages. Natuurlijke rubber niet bestand tegen olie en benzine e.d. Gevoelig voor frequente temperatuurwisselingen. Verouderingsverschijnselen.
Hout	Inlandse, Europese en tropische houtsoorten van uit eenlopende eigenschappen. Tanks en vaten in azijnfabrieken, leerlooierijen, brouwerijen, gistingsbedrijven, papierfabrieken, synthetische rubberfabrieken, koeltorens, absorptietorens gradeerwerken, lijmfabrieken, NaCl-verwerkende industrie.

houtsoorten voor gebruik in corrosieve omgeving

In de buitenlucht of onder vochtige omstandigheden:	
– zeer duurzaam:	afrormosia, azobé, bangkirai, basralocus, billinga, doussié, groenhart, iroko, merbau, peroba de campos, teak.
– duurzaam:	alerce, bossé, eiken, jarrah, afr. mahonie, makoré, calif. redwood, tola branca, west. red cedar.
Constructies blootgesteld aan zure dampen:	pitch pine, teak, eiken, groenhart, azobé, iroko, oregon pine, europ. grenen (spintvrij), doussié, west. red cedar, basralocus, peroba de campos.
Kuipen en vaten voor vloeistoffen:	pitch pine, oregon pine, java teak, larix, doussié, eiken, redwood.
Bedrijfsmateriaal dat weerstand tegen zuren vereist:	azobé, groenhart, iroko, pitch pine, teak, jarrah, bilinga, peroba de campos.
Kuipen en vaten voor licht corrosieve vloeistoffen:	pitch pine, oregon pine, grenen, doussié, tola branca, larix, eiken, parana pine.

Gegevens ontleend aan publicaties van het Centrum Hout

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

2 Metalen

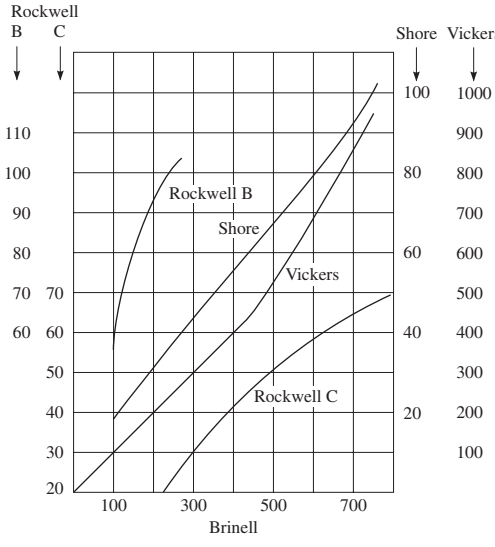
2.1 Metalen en hun toepassingen

De keuze van een *metaal* of *metaallegering* wordt bepaald door zijn prijs en door zijn eigenschappen. De prijs is vooral afhankelijk van het voorkomen van het metaal in de aardkorst en de moeilijkheidsgraad van de raffinage. De aardkorst bevat onder meer 8,13% aluminium, 5% ijzer en 0,007% koper. Van deze metalen zijn ijzer en koper vrij eenvoudig te raffineren d.m.v. een reductieproces, terwijl het raffinageproces van aluminium door zijn grotere affiniteit tot zuurstof veel gecompliceerder is en een veel grotere hoeveelheid energie vergt. Hierdoor zijn ijzer en staal (ijzer + koolstof) veel goedkoper dan de andere metalen en mede door de gunstige mechanische eigenschappen, die vaak door een warmtebehandeling nog te verbeteren zijn, worden ze het meest toegepast.
In deze paragraaf worden de metalen veelal aangeduid met hun chemische symbolen; zie voor de betekenis hiervan hoofdstuk A5 *Scheikunde* par. 1.4 tabel 1.1.

2.2 Technische eigenschappen

Mechanische eigenschappen
De belangrijkste *mechanische* eigenschappen, waarmee in de metaalkunde wordt gewerkt om de weerstand tegen breuk of vervorming van het materiaal aan te geven, zijn:
- *treksterkte* R_m (σ_B) in N/mm^2;
- 0,2% *rekgrens* $R_{p0,2}$ (σ_R) in N/mm^2;
- rek bij breuk A in %;
- *elasticiteitsmodulus* E in N/mm^2;
- *Vickers-hardheid HV.*

In plaats van de Vickers-hardheid wordt voor zachte en inhomogene materialen als gietijzer ook wel de *Brinell-hardheid* (HB) opgegeven en voor harde materialen, o.a. bij gereedschapsstalen, de *Rockwell-hardeid* (HRC voor harde- en HRB voor zachte metalen). Zie figuur 2.1.



Figuur 2.1 Verband tussen hardheidsschalen

Voor bijzondere belastingsgevallen wordt ook gebruik gemaakt van:
- *vermoeiingssterkte* bij wisselende belastingen;
- *kruipsterkte* bij een langdurige constante belasting;
- *veerbuiggrens*, rekgrens bij een buigbelasting;
- *afschuifsterkte*, weerstand tegen afschuiving.

Fysische eigenschappen

Zie voor de belangrijkste *fysische* eigenschappen, par. 1.1 (tabel 1.6 en 1.22). In het algemeen spelen deze eigenschappen bij constructies een ondergeschikte rol in vergelijking met de mechanische eigenschappen. Bij specifieke toepassingsgebieden evenwel kunnen juist bepaalde fysische eigenschappen zeer belangrijk worden.

Enkele voorbeelden hiervan zijn:
- smeltpunt bij solderen, lassen en gieten;
- dichtheid bij vliegtuigonderdelen;
- soortelijke weerstand bij stroomvoerende delen;
- weerstandstemperatuurcoëfficiënt bij materialen voor thermokoppels;
- lineaire uitzettingscoëfficiënt bij nauwkeurige meetgereedschappen of bij combinaties van verschillende materialen.

Chemische eigenschappen

Van de *chemische* eigenschappen is de *corrosievastheid* van groot belang voor veel toepassingen van metalen en metaallegeringen in constructies. Hierdoor wordt immers voor een belangrijk deel de levensduur van het materiaal van het onderdeel in de constructie bepaald. Zie par. 2.9 *Corrosie*.

Technologische eigenschappen

De *technologische* eigenschappen geven de moeilijkheidsgraad aan voor het vervaardigen van producten van het betreffende materiaal. De belangrijkste technologische eigenschappen van constructiematerialen zijn:
- koud- en in enkele gevallen warmvervormbaarheid;
- verspaanbaarheid;
- las- en soldeerbaarheid;
- geschiktheid om een deklaag aan te brengen.

Voor het vergelijken van deze eigenschappen voor verschillende materialen zijn geen exacte waarden aan te geven, maar moet van een bepaalde kwalificatie worden uitgegaan.

Beïnvloeding van de eigenschappen

De mechanische eigenschappen van metalen en legeringen kunnen worden beïnvloed door koudvervorming en warmtebehan-deling. Bij *koudvervorming* nemen in het algemeen de sterkte-eigenschappen en de hardheid toe, terwijl de vervormbaarheid afneemt. Door gloeien kan de versteviging ten gevolge van koudvervorming weer teniet worden gedaan. Bij staal en enige andere metaallegeringen bestaat de mogelijkheid de sterkte te vergroten en de hardheid te verhogen door een *warmtebehandeling* (het harden). De fysische en

chemische eigenschappen ondergaan bij deze processen over het algemeen weinig verandering en kunnen slechts door het toevoegen van legeringselementen aanzienlijk worden gewijzigd.

Ferro- en non-ferrometalen
- *Ferrometalen*: metaallegeringen waarvan het basismateriaal ijzer is (zie par. 2.3 Staal en par. 2.4 *Ferro-gietmateriaalr*).
- *Non-ferrometalen*: alle metalen met uitzondering van ijzer (zie par. 2.5 t/m 2.7).

2.3 Staal

IJzer en staal
Omdat *koolstof* in ijzer en ijzerlegeringen bijna altijd voorkomt, wordt het niet tot de legeringselementen gerekend. De samenstelling ijzer + een bepaald gehalte aan koolstof wordt *staal* genoemd. Er zijn slechts enige toepassingsgebieden van ferrometalen, waarbij de koolstof slechts als een verontreiniging mag voorkomen. De belangrijkste daarvan zijn de ferromagnetische materialen, waarvan magneet- en siliciumijzer en het IF-staal (interstitial free steel) met zéér goede vervormbaarheid bekende voorbeelden zijn. De benaming *gietijzer* voor ijzer met minimaal 2% C en ongeveer 2% Si is in dit verband wat misleidend. Het onderscheidt zich van gietstaal, doordat gietstaal veel minder koolstof en silicium bevat (in het algemeen max.0,4% C en 0,7% Si).

Aanduidingen staalsoorten
Staalsoorten kunnen worden ingedeeld in groepen die aangeven in hoeverre deze gelegeerd zijn of die het toepassingsgebied van de staalsoorten aangeven. Om hierover eenstemmigheid te verkrijgen zijn er normen opgesteld, die aangeven hoe een staalsoort omschreven moet worden. In West Europa zijn de Euronormen hiervoor het meest gangbaar: EN 10020 ‘Definities en Indeling van Staalsoorten’ en EN 10027 ‘Regels voor het aanduiden van staalsoorten’.

Belangrijke aandachtspunten bij de omschrijving van staalsoorten zijn:

- *Ongelegeerde* staalsoorten bevatten naast koolstof geen grotere gehalten aan andere elementen dan in de norm is vastgelegd.
- *Ongelegeerd* staal wordt meestal aangeduid op basis van de mechanische eigenschappen of toepassingsmogelijkheden. Alleen wanneer de chemische samenstelling voor het betreffende staal zeer belangrijk is, gaat men hiervan uit.
- *Gelegeerd* staal wordt onderscheiden in zwak gelegeerd staal (elk legeringselement $< 5\%$) en gelegeerd staal en wordt bijna altijd aangeduid op basis van de chemische samenstelling.
- Men onderscheidt daarnaast de groepen *staalsoorten voor algemeen gebruik, kwaliteitsstaal* en *speciaalstaal* afhankelijk van het toepassingsgebied en de hiermee samenhangende eisen.
- Dikwijls worden ook gecombineerde materiaalaanduidingen toegepast, bijv. FeG440 = gietstaal met een gewaarborgde minimum treksterkte van 440 N/mm^2.

Bij materiaalaanduidingen op basis van de *chemische samenstelling* worden de volgende regels in acht genomen (op enkele uitzonderingen na):
- Het eerste getal geeft het gemiddelde koolstofpercentage weer, vermenigvuldigd met 100.
- Hierna volgen de chemische symbolen van de belangrijkste legeringselementen.

Tabel 2.1 Vermenigvuldigingsfactor i.v.m. aanduiding staalsoorten

symbool	chemisch element	factor	symbool	chemisch element	factor
Co	Kobalt	4	Pb	Lood	10
Cr	Chroom		Ta	Tantalium	
Mn	Mangaan		Ti	Titanium	
Ni	Nikkel		V	Vanadium	
Si	Silicium		Zr	Zirconium	
W	Wolfraam				
			N	Stikstof	100
Al	Aluminium	10	P	Fosfor	
Be	Beryllium		S	Zwavel	
Cu	Koper				
Mo	Molbdeen		B	Borium	1000
Nb	Niobium				

- Vervolgens komen getallen die het percentage van deze legeringselementen aangeven, echter vermenigvuldigd met de in tabel 2.1 vermelde factor.
- Bij lage percentages van een element wordt meestal wel het symbool in de benaming opgenomen maar niet het gehalte.
- Bij hooggelegeerde staalsoorten wordt de materiaalaanduiding voorafgegaan door de letter X en worden de werkelijk aanwezige percentages van de belangrijkste legeringselementen vermeld m.u.v. het percentage koolstof, dat met 100 vermenigvuldigd blijft.

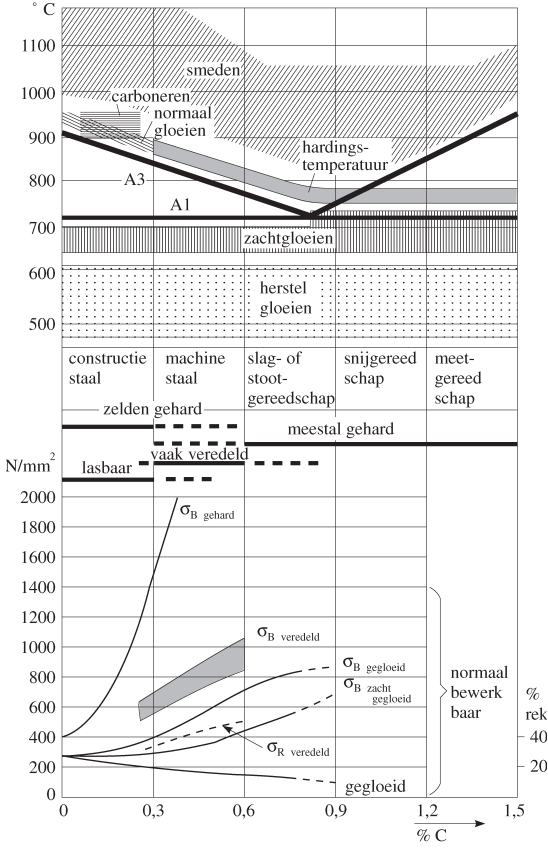
Voorbeelden van aanduidingen:
35 Cr AlMo 5 10: gelegeerd staal met gemiddeld 0,35% C, 1,25% Cr, 1% Al en een niet nader aangeduid laag gehalte aan Mo.

X 10 Cr Ni 18 8: corrosievast chroomnikkelstaal met gemiddeld 0,1% C, 18% Cr en 8% Ni.

Warmtebehandelingen

De eigenschappen van de verschillende staalsoorten kan men door *warmtebehandelingen* beïnvloeden. Dit is mogelijk doordat koolstof alleen bij hoge temperatuur in het ijzer kan oplossen, omdat het ijzerrooster boven een bepaalde temperatuur (723 °C bij ongelegeerd staal met 0,8% C) overgaat van *ferriet* in *austeniet* ($\alpha \rightarrow \gamma$). Bij het smeden, normaal gloeien, carboneren en harden maakt men hiervan dankbaar gebruik. De grote hardheidsver-hoging bij het harden wordt verkregen door het staal vanaf de hardingstemperatuur, waarbij voldoende koolstof in de austeniet is opgelost, snel af te koelen; hierdoor krijgt de koolstof geen kans zich uit te scheiden en Fe_3 C-verbindingen te vormen. Er ontstaat dan het zeer harde en brosse *martensiet* waarvan de taaiheid verbeterd kan worden door het staal na het harden zo snel mogelijk op een lage temperatuur te gloeien (*ontlaten*). Gloeit men na het harden op een hogere temperatuur (ca. 600 °C) dan spreekt men van *veredelen*.

In figuur 2.2 is een gedeelte van het *Fe-C diagram* opgenomen met daarin vermeld de temperaturen, waarbij verschillende warmtebehandelingen kunnen worden uitgevoerd en de invloed van enkele



Figuur 2.2 Fe-C diagram voor ongelegeerd staal, wamtebehandelingen (σ_B = treksterkte; σ_R = rekgrens)

warmtebehandelingen op enige mechanische eigen-schappen. Dit diagram geldt alleen voor ongelegeerd staal.
Legeringselementen in staal beïnvloeden de temperatuur waarbij structuuromzettingen plaatsvinden (en dus ook de temperatuur waarbij warmtebehandelingen moeten worden uitgevoerd) èn de meeste eigenschappen van het staal. Zie tabel 2.2 en 2.3.

Tabel 2.2 Invloed legeringselementen (combinaties kunnen een bepaalde invloed versterken of verzwakken)

	Koolstof C	Mangaan Mn	Silicium Si	Aluminium Al	Nikkel Ni	Chroom Cr	Molybdeen Mo	Vanadium V	Wolfraam W	Kobalt Co	Koper Cu	Zwavel S	Fosfor P	Titanium Ti	Tantalium Ta	Niobium Nb
Rekgrens	↗	↗	↗		↗	↗	↗	↗								
Treksterkte	↗↗	↗↗	↗↗		↗	↗↗	↗	↗	↗	↗	↗		↗	↗	↗	↗
Rek	↙↙	↙	↙		↙	↙	↙		↙	↙	↙↙		↙			
Treksterkte bij hoge temperatuur	↗					↗↗	↗↗	↗	↗	↗			↗			
Kruipsterkte	↗	↗	↗	↙	↗	↗	↗↗									
Vermoeiingssterkte	↗					↗	↗↗	↗↗	↗	↗						
A1		↙↙	↗↗	↗	↙↙	↗↗	↗	↗	↗							
A3		↙	↗	↗	↙	↗	↗	↗	↗	↙	↙		↗	↗	↗	↗
Austenietgebied		↗	↙	↙	↗	↙↙	↙	↙	↙	↗	↗		↙	↙	↙	↙
Korrelgroei	↗	↗↗	↗	↙↙	↙	↗		↙↙		↙			↗	↙		
Gevoeligheid voor oververhitting		↗	↙		↙	↙		↙	↙	↙			↗			
Bestandheid tegen oxidatie			↗↗	↗↗		↗↗				↗						
Warmbrosheid												↗↗				
Kritische afkoelsnelheid		↙	↙		↙↙	↙	↙	↙	↙	↗						
Hardbaarheid	↗↗	↗↗	↗↗		↗↗	↗↗	↗	↗	↗							
Hardheid	↗↗	↗	↗		↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗		↗	↗	↗	↗
Stabiliteit na ontlaten	↙		↗		↗	↗	↗↗	↗↗	↗	↗↗				↗	↗	↗
Carbidevorming	↗↗					↗↗	↗	↗↗	↗					↗↗	↗↗	↗↗

Verklaring van de tekens. Het legeringselement oefent een:
– versterkende (↗)
– zeer versterkende (↗↗)
– verzwakkende (↙)
– zeer verzwakkende (↙↙)

} invloed uit op de bepaalde eigenschap

Tabel 2.3 Temperaturen voor smeden en warmtebehandeling [°C]

staalsoort	smeden	zacht-gloeien	normaal-gloeien	veredelen		
				in water	in olie	ontlaten
C22, Ck22	1100–850	650–700	880–910	860–890	870–900	
C35, Ck35	1100–850	650–700	860–890	840–870	850–880	530–670
C45, Ck45	1100–850	650–700	840–870	820–850	830–860	
C60, Ck60	1050–850	650–700	820–850	800–830	810–840	
40 Mn4	1100–850	650–700	850–880	820–850	830–860	
30 Mn5	1100–850	650–780	850–880	820–840	830–850	
37 MnSi5	1050–850	680–720	860–890	830–850	840–860	530–670
42 MnV7	1050–850	640–680	860–890	840–860	850–870	
34 Cr4	1050–850	680–720	850–880	820–840	830–850	
41 Cr4	1050–850	680–720	850–880	820–840	830–850	530–670
34 Cr Mo4	1050–850	680–720	860–890	830–850	840–860	
42 Cr Mo4	1050–850	680–720	850–880	820–840	830–850	
50 Cr Mo4	1050–850	680–720	850–880	820–840	830–850	530–670
30 Cr Mo4	1050–850	680–720	850–880	820–840	830–850	
25 Cr Mo V4	1050–850	680–720	870–900	840–870	850–880	
36 Cr Ni Mo4	1050–850	650–700	850–880	820–840	830–850	
34 Cr Ni Mo6	1050–850	650–700	850–880	–	830–850	530–670
30 Cr Ni Mo8	1050–850	650–700	850–880	–	830–850	

Staalsoorten naar toepassingsgebied

In de praktijk worden staalsoorten veelal ingedeeld naar toepassingsgebied (zie ook tabel 2.4 t/m 2.9):

- laag C-staal voor vervormingsdoeleinden;
- constructiestaal;
- gereedschapsstaal;
- verenstaal;
- corrosievast staal (RVS);
- hittevast staal;
- staal met bedekking.

Beschermende metaallagen op staal

Naast alle bekende goede eigenschappen en de lage prijs hebben ijzer en staal een zeer slechte corrosievastheid. Dit '*roesten*' van staal kan meestal voorkomen worden door het aanbrengen van een beschermlaag. Enkele specifieke metaallagen die hiervoor worden gebruikt zijn: nikkel, nikkel + chroom, tin en zink.

Het nadeel van nikkel en tin is dat ze een hogere potentiaal hebben dan ijzer (ze zijn edeler), waardoor het ijzer of staal bij beschadigingen of poriën in de laag toch gaat roesten.

Zink echter is onedeler dan ijzer en voorkomt daardoor dit probleem.Men spreekt wel van het 'opofferingsgedrag' van zink t.o.v. ijzer. Andere factoren waardoor zink zo'n groot toepassingsgebied heeft gevonden als deklaag op ijzer en staal zijn: de lage prijs, de eenvoudige wijze van aanbrengen en de goede corrosievastheid van zink zelf (in de atmosfeer wordt op het zink veelal een beschermende laag bestaande uit basische zinkcarbonaten gevormd). In verontreinigde atmosferen (vooral t.g.v. zwaveldioxide) neemt deze beschermende werking evenwel sterk af.

Inmiddels zijn er nieuwe zinklegeringslagen ontwikkeld als bescherming voor staal, waarvan de corrosievastheid in vooral industriële atmosferen aanzienlijk beter is. De belangrijkste hiervan zijn:
- Plaat en band van staal bekleed met zink-aluminium (ZA) door continu dompelen EN 10214.
- Plaat en band van staal bekleed met aluminium-zink (AZ) door continu dompelen EN 10215.
- Zinkchromaatlagen (Dacromet).

Zie verder par. 2.10 *Bescherming tegen corrosie*.

Tabel 2.4 Laag C-staal voor vervormingsdoeleinden

gradatie	kenmerken[1)]	Euronorm EN	type	treksterkte [N/mm^2]	vloeigrens of 0,2% rekgrens [N/mm^2]	rek [%] (L_0 = 80 mm)
hard	matig vervormbaar goed stampbaar constructies	10139	DC03 C590	590–690	$\geqslant$ 540	–
halfhard	redelijk vervormbaar constructies	10139	DC 03 C390	390–490	$\geqslant$ 330	$\geqslant$ 5
zacht	eenvoudig trek- en buigwerk	10130	DC 01	270–410	$\leqslant$ 280	$\geqslant$ 28
	dieptrekken-algemeen	10130	DC 03 LC	270–370	$\leqslant$ 240	$\geqslant$ 34
	dieptrekken-speciaal	10130	DC 04 LC	270–350	$\leqslant$ 210	$\geqslant$ 38

[1)] Alle soorten zijn goed lasbaar en te voorzien van een oppervlaktebedekking.

Tabel 2.5a Constructiestaal

kenmerken	Euronorm EN	type	treksterkte [N/mm^2]	0,2% rekgrens [N/mm^2]	rek [%]
lage sterkte beperkt lasbaar	10025	S185	$<$ 3 mm: 310–540 $\geqslant$ 3 mm: 290–510	$\leqslant$ 16 mm: $\geqslant$ 185 $>$ 16 mm: $\geqslant$ 175	$\leqslant$ 1 mm: $\geqslant$ 10 $>$ 3 mm: $\geqslant$18
redelijke sterkte goed lasbaar	10025	S235JR	$\leqslant$ 3 mm: 360–510 $>$ 3 mm: 340–470	$\leqslant$ 16 mm: $\geqslant$ 235 $>$ 16 mm: $\geqslant$ 225	$\leqslant$ 1 mm: $\geqslant$ 17 $>$ 3 mm: $\geqslant$ 26
hoge sterkte goed lasbaar	10025	S335JR	$\leqslant$ 3 mm: 510–680 $>$ 3 mm: 490–630	$\leqslant$ 16 mm: $\geqslant$ 355 $>$ 16 mm: $\geqslant$ 345	$\leqslant$ 1 mm: $\geqslant$ 14 $>$ 3 mm: $\geqslant$ 22
goed verspaanbar slecht lasbaar	87–70	11SMnPb 28[1)]	$\leqslant$ 10 mm: 565–815 $>$ 10 $\leqslant$ 16: 515–765 $>$ 16 $\leqslant$ 40: 465–715	$\geqslant$ 445 $\geqslant$ 415 $\geqslant$ 375	$\geqslant$ 6 $\geqslant$ 7 $\geqslant$ 8
redelijke sterkte verhoogde corrossievastheid	10155	Fe 360 B K3	$\leqslant$ 63 mm: 360–460 $>$ 63 mm: $\geqslant$ 355	$\geqslant$ 215 $\geqslant$ 195	ca. 24
hoge sterkte verhoogde corrossievastheid	10155	Fe 510 D2 K3	$\leqslant$ 63 mm: 510–610 $>$ 63 mm: $\geqslant$ 500	$\geqslant$ 335 $\geqslant$ 315	ca. 20

[1)] De vermelde mechanische eigenschappen van 11 S Mn Pb 28 zijn van de koudgetrokken toestand.

Tabel 2.5b Knikcoëfficiënt ω voor Fe 360 (berekening staalconstructies hefwerktuigen)[1)]

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,04	1,04	1,05
20	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11
30	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17	1,18	1,18
40	1,19	1,20	1,21	1,21	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26
50	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34	1,35	1,36
60	1,37	1,38	1,39	1,40	1,41	1,42	1,43	1,44	1,45	1,46
70	1,47	1,48	1,50	1,51	1,52	1,53	1,55	1,56	1,57	1,59
80	1,60	1,61	1,63	1,64	1,66	1,67	1,69	1,70	1,72	1,73
90	1,75	1,77	1,78	1,80	1,82	1,83	1,85	1,87	1,89	1,91
100	1,93	1,97	2,01	2,05	2,09	2,13	2,17	2,21	2,25	2,29
110	2,33	2,38	2,42	2,46	2,51	2,55	2,60	2,64	2,69	2,73
120	2,78	2,83	2,87	2,92	2,97	3,01	3,06	3,11	3,16	3,21
130	3,26	3,31	3,36	3,41	3,46	3,52	3,57	3,62	3,67	3,73
140	3,78	3,84	3,89	3,95	4,00	4,06	4,11	4,17	4,23	4,28
150	4,34	4,40	4,46	4,52	4,58	4,64	4,70	4,76	4,82	4,88
160	4,94	5,00	5,06	5,13	5,19	5,25	5,32	5,38	5,45	5,51
170	5,58	5,64	5,71	5,78	5,84	5,91	5,98	6,05	6,11	6,18
180	6,25	6,32	6,39	6,46	6,53	6,60	6,68	6,75	6,82	6,89
190	6,97	7,04	7,11	7,19	7,26	7,34	7,41	7,49	7,56	7,64
200	7,72	7,80	7,87	7,95	8,03	8,11	8,19	8,27	8,35	8,43
210	8,51	8,59	8,67	8,75	8,84	8,92	9,00	9,08	9,17	9,25
220	9,34	9,42	9,51	9,60	9,68	9,77	9,86	9,94	10,03	10,12
230	10,21	10,30	10,39	10,48	10,57	10,66	10,75	10,84	10,93	11,02
240	11,11	11,21	11,30	11,39	11,49	11,58	11,68	11,77	11,87	11,96

[1)] Voor de knikcoëfficiënt bij de berekening van *bouwkundige* staalconstructies, zie hoofdstuk F3, par. 5 Staalconstructies tabel 5.14.

Tabel 2.6 Gereedschapsstaal

	kenmerken	Euronorm	type	Rockwell-hardheid HRC na harden + ontlaten	Brinell hardheid HB in leverings-toestand	hardings-temperatuur (± 10°C)	afkoel-middel	ontlaat-temperatuur (± 10° C)
vorm- en stampgereedschap	hoger gelegeerd ↓ toenemende slijtvasheid ↓ toenemende vorm- en maatvastheid	96–79	CT 105	⩾ 61	⩽212	780	water	180
		96–79	90Mn V8	⩾ 60	⩽229	790	olie	180
		96–79	X160CrMoV121	⩾ 61	⩽255	1020	lucht	180
		96–79	X210CrW121	⩾ 62	⩽255	970	olie/lucht	180
matrijzen voor kunststoffen	goede taaiheid en schok-vasheid;	96–79	40NiCrMoV16	⩾40	⩽277	850	olie	500
	goede corrosie-vastheid; redelijke sterkte bij hoge temp.	96–79	X41Cr13	⩾51	⩽255	1010	olie	180
snelstaal snijgereedschap		96–79	HS6–5–2	⩾64	ca. 250	1220	olie	550

Tabel 2.7a Verenstaal: treksterkte van gepatenteerde staaldraad voor veren; Euronorm 150–87 [N/mm^2]

type	draaddiameter [mm]				
	0,5	1	2	5	10
Fe F11	–	1720–1970	1520–1750	1260–1450	1060–1230
Fe F22	2200–2470	1980–2220	1760–1970	1460–1650	1240–1400
Fe F33	–	–	1980–2200	1660–1840	1410–1570
Fe F44	2480–2740	2230–2470	1980–2200	1660–1840	1410–1570

Tabel 2.7b Verenstaal: gegevens koudgewalste staalband voor veren; Euronorm 132–79 (C + A = zachtgegloeid; C + Q + T = gehard + ontlaten)

type		treksterkte [N/mm^2]	rek [%]	Vickers-hardheid HV	hardings-temp. [°C]	ontlaat-temp.[1] [°C]
1 C S 55[2]	C + A	$\leqslant$610	$\geqslant$13	$\leqslant$180		
(2)	C + Q + T	1150–1650		340–490	830–860	300–500
1 C S 67[2]	C + A	$\leqslant$640	$\geqslant$12	$\leqslant$190		
(2)	C + Q + T	1230–1770		365–525	815–845	300–500
2 C S 100	C + A	$\leqslant$690	$\geqslant$11	$\leqslant$205		
	C + Q + T	1500–2100		445–620	790–820	300–500

[1] 300 °C: max. waarden voor treksterkte en hardheid Vickers;
500 °C: min. waarden voor treksterkte en hardheid en iets taaier.
[2] De soorten 2 C S.. zijn iets zuiverder dan de soorten 1 CS..

Tabel 2.8 Corrosievast staal (ook: RVS)

soort	kenmerken	Euronorm EN	type	treksterkte [N/mm^2]	0,2%-rekgrens [N/mm^2]	rek [%]	overeenkomend AISI-type
ferritisch ferro-magnetisch	buig-en licht trekwerk						
	algemeen	10088	X6Cr17	430–630	$\geqslant$240	$\geqslant$20	430
	laskwaliteit	10088	X3CrTi17	420–600	$\geqslant$230	$\geqslant$23	430 Ti
	good verspaanbaar koudvervormbaar	10088	X6CrMoS17	430–630	$\geqslant$250	$\geqslant$20	430 F
austenitisch (in het algemeen niet ferromagnetisch)	buig- en licht trekwerk						
	temp.tot 800 °C algemeen	10088	X5 Cr Ni 18 10	520–720	$\geqslant$210	$\geqslant$45	304
	laskwaliteit	10088	X2 Cr Ni 18 9	500–650	$\geqslant$200	$\geqslant$45	321
	buig- en licht trekwerk						
	zeer goede corrossie-vastheid algemeen	10088	X 5 Cr Ni Mo 17122	520–670	$\geqslant$220	$\geqslant$45	316
	laskwaliteit	10088	X 2Cr Ni Mo 17122	520–670	$\geqslant$220	$\geqslant$45	316 Ti
	good verspaanbaar koudvervormbaar	10088	X 8 Cr Ni S 189	500–750	$\geqslant$190	$\geqslant$35	303
	hittevast tot 1150 °C hoge kruipsterkte	95–79	X 15 Cr Ni Si 25 20	550–750	$\geqslant$239	$\geqslant$30	314
martensitisch ferro-magnetisch	goed verspaanbaar hoge sterkte	10088	X 14 Cr Mo S17	650–850	$\geqslant$500	$\geqslant$12	–
	hardbaar messenstaal	10088	X 46 Cr 13	leveringstoestand: HB $\leq$ 245 na harden + ontlaten: HRC $\geqslant$ 50			–

Tabel 2.9 Staalband en staalplaat met metaalbedekking

soort bedekking		vorm	Euronorm EN	mogelijke laagdikten [µm]	bijzonderheden
zink	– thermisch	plaat en band	10147	7t/m42	algemene toepassingen goede corrosievastheid
	– elektrolytisch	plaat en band	10152	1t/m7,5	in gefosfateerde of gechromateerde toestand beter corrosievast
zink-aluminium (ZA)	– thermisch	plaat en band	10214	7–23	verbeterde corrosievastheid
tin	– thermisch	bladen	10203	1,5 en 2	goed soldeerbaar
	– elektrolytisch	bladen	10203	0,4t/m1,5	soldeerbaar verschillende tinlaagdikten aan beide zijden mogelijk
lood	– thermisch	plaat en band	153–80	3,5t/m5,5	soldeerbaar goede corrosievastheid
aluminium-zink (AZ)	– thermisch	plaat en band	10215	7–23	verbeterde slijtvastheid en corrosievastheid bij temp. tot 300 °C
aluminium-silicium (AS)	– thermisch	plaat en band	10154	10–25	voor toepassing bij verhoogde temperatuur

Opmerkingen:
– De in deze tabel vermelde materialen zijn globaal genomen te verkrijgen met de mechanische eigenschappen zoals vermeld in tabel 2.4.
– Verzinkte, vertinde en veraluminiseerde band en plaat worden meestal in gepassiveerde en/of geoliede toestand geleverd.

2.4 Ferro-gietmateriaal

Gietijzer is de benaming van een groep ferrogietlegeringen die als hoofdbestanddelen Fe, C en Si bevatten en daarnaast ook altijd Mn, S en P. De structuur van ongelegeerd gietijzer is voornamelijk afhankelijk van het C-, Si- en Mn-gehalte en van de afkoelsnelheid. Zie voor een overzicht van gegevens, tabel 2.10.

Grijs gietijzer wordt zo genoemd omdat het breukvlak door de aanwezigheid van koolstof een grijs uiterlijk heeft. Het ontstaat bij een hoog C- en Si-gehalte, een laag Mn-gehalte en langzaam afkoelen. Afhankelijk van de structuur spreekt men van *ferritisch, perlitisch* of *gewoon* (ferritisch + perlitisch) grijs gietijzer. De taaiheid van grijs gietijzer is in sterke mate afhankelijk van de grootte van de grafietlamellen omdat op die plaatsen scheuren kunnen worden ingeleid. Door deze grafietlamellen volgt grijs gietijzer ook niet de Wet van Hooke en is de elasticiteitsmodulus aanzienlijk lager dan die van staal en nodulair gietijzer. Grijs gietijzer wordt aangeduid met de letters G G, gewoonlijk gevolgd door cijfers die de minimale treksterkte aangeven bij een bepaalde materiaaldikte.

Wit gietijzer ontstaat bij een hoge afkoelsnelheid en bij een lager C- en Si-gehalte en een hoger Mn-gehalte dan bij grijs gietijzer normaal wordt toegepast. De koolstof blijft dan gebonden aan het ijzer in de vorm van cementiet en perliet. Wit gietijzer is daardoor zeer hard en bros. Door te legeren met Ni, Cr en Mo kunnen de hoge hardheid en slijtvastheid behouden blijven, maar wordt het minder bros en beter bestand tegen een schokbelasting.

Nodulair gietijzer is gietijzer waarbij door toevoeging van bepaalde elementen aan het vloeibare gietijzer de grafiet in globulaire of nodulaire vorm wordt uitgescheiden. Hierdoor heeft het betere sterkte-eigenschappen en is het vooral taaier. Er bestaat een groot aantal nodulaire gietijzersoorten, waarvan de gepatendeerde *Meehanite-soorten* door de zeer fijne uitscheidingen de beste eigenschappen bezitten. Nodulair gietijzer wordt aangeduid met de letters G N en wordt o.a. toegepast voor zwaar belaste onderdelen zoals gereedschapswerktuigen.

Smeedbaar gietijzer is wit gietijzer dat vervormbaar gemaakt wordt door het te gloeien in een bepaalde atmosfeer. Bij langdurig gloeien in een neutrale atmosfeer wordt het cementiet en soms ook het perliet ontbonden en ontstaan er nestvormige grafietuitscheidingen. Men spreekt dan van *zwart smeedbaar gietijzer* dat wordt aangeduid met de letters G Sm T (ferritisch of temperijzer) of G Sm P (perlitisch). *Wit smeedbaar gietjzer* wordt aangeduid met de letters G Sm F (ferritisch). Het is te verkrijgen door zeer lang (tot 100 uur) te gloeien in een oxiderende atmosfeer, waardoor naar de oppervlakte diffunderende koolstof onder vorming van CO_2 en CO uit het gietijzer verdwijnt en dus alleen het ferriet overblijft.

Gietstaal bevat veel minder koolstof en silicium dan gietijzer (in de regel minder dan 0,5% koolstof) en wordt dikwijls in gelegeerde vorm toegepast. Het is minder goed gietbaar dan gietijzer en wordt na het gieten altijd normaalgegloeid om de structuur te verfijnen, waardoor niet alleen de sterkte maar vooral de taaiheid sterk toeneemt. Gietstaal wordt aangeduid met de letters GSt.

Tabel 2.10 Ferro-gietmateriaal: gietijzer en gietstaal

soort	kenmerken	aanduiding	grondstructuur	treksterkte [N/mm^2]	0,2% rekgrens [N/mm^2]	rek [%]
grijs gietijzer met lamellaire grafiet	meest toegepaste soorten; goed dempingsvermogen voor trillingen o.a. gereedschapsmachines motorblokken	G G 15 G G 25 G G 35	ferriet + perliet perliet perliet	$\geqslant$ 150 $\geqslant$ 250 $\geqslant$ 350	ca. 110 ca. 175 ca. 240	ca. 0, 5 ca. 0, 5 ca. 0, 5
grijs gietijzer met nodulaire grafiet	taaiere soorten o.a. gereedschappen tandwielen stuurarmen	G N 38 G N 50 G N 70	ferriet ferriet + perliet ferriet	$\geqslant$ 380 $\geqslant$ 550 $\geqslant$ 700	$\geqslant$ 250 $\geqslant$ 350 $\geqslant$ 500	$\geqslant$ 17 $\geqslant$ 7 $\geqslant$ 2
wit smeedbaar gietijzer	goed lasbaar en elektrolytisch te bedekken	G Sm F	ferriet	$\geqslant$ 400	–	$\geqslant$ 4
zwart smeedbaar gietijzer (tempergietijzer)	vooral geschikt voor dunwandige gietstukken; veelal verdrongen door nodulair gietijzer	G Sm T 35 G Sm P 50 G Sm P 65	ferriet ferriet + perliet perliet	$\geqslant$ 350 $\geqslant$ 500 $\geqslant$ 650	$\geqslant$ 190 $\geqslant$ 300 $\geqslant$ 390	$\geqslant$ 12 $\geqslant$ 5 $\geqslant$ 3
gietstaal	door diverse warmtebehandelingen als zachtgloeien en harden variatie van eigenschappen mogelijk	G St 38 G St 52 G St 70		$\geqslant$ 376 $\geqslant$ 510 $\geqslant$ 690	$\geqslant$ 185 $\geqslant$ 255 $\geqslant$ 345	$\geqslant$ 25 $\geqslant$ 18 $\geqslant$ 12

2.5 Non-ferrometalen algemeen

Van de *non-ferometalen* (zie tabel 2.11) worden alleen aluminium (zie par. 2.6), koper (zie par. 2.7) nikkel (zie par. 2.8) en zink op grote schaal toegepast als constructiemateriaal, bijna altijd in de vorm van een legering.

Aanduiding non-ferro metaallegeringen

Non-ferro metaallegeringen worden gewoonlijk aangeduid door achtereenvolgens het hoofdelement en de legeringselementen te vermelden met de percentages, waarmee deze in de legering voorkomen. Bij gehalten kleiner dan 1% wordt het percentage meestal weggelaten. Enkele voorbeelden zijn:

Cu Al 10 Ni 5 Fe 4: koperlegering met ca. 10% Al, 5% Ni en 4% Fe
Al Mg 4,5 Mn: aluminiumlegering met ca. 4,5% Mg en minder dan 1% Mn.

Tabel 2.11 Non-ferrometalen (zie ook tabel 1.6, par. 1.1)

non-ferro metaal	eigenschappen	toepassingsgebieden
aluminium (Al)	– lage dichtheid – goede geleidbaarheid voor warmte en elektriciteit – goede corrosievastheid	– constructies (o.a. in vliegtuigen) – bewegende delen – corrosievaste profielen
koper (Cu)	– zeer goede geleidbaarheid voor warmte en elekrichteit – vrij goede corrosievastheid	– stroomvoerende draden en onderdelen – diverse corrosievaste legeringen met een redelijke sterkte
nikkel (Ni)	– goede corrosievastheid – ferromagnetisch	– legeringselement in diverse legeringen zoals in austenitisch corrosievast chroomnikkelstaal (18-8) en in monel en in inconel – legeringselement in veel ferromagnetische materialen – deklaag op staal en messing
lood[1)] (Pb)	– hoge dichtheid – laag smeltpunt – goede corrosievastheid	– bedekking van grondkabels – legeringsbestanddeel van zachtsoldeer en lagermaterialen

Tabel 2.11 (vervolg)

non-ferro metaal	eigenschappen	toepassingsgebieden
tin (Sn)	– laag smeltpunt – goede corrosievastheid	– bedekking van staal (blik) – legeringsbestanddeel van zachtsoldeer, lagermaterialen en brons
zink[2)] (Zn)	– vrij laag smeltpunt – anodisch t.o.v. ijzer en staal – en daardoor corrosiebeschermend	– bedekking van stall – legeringselement in messing – dakgoten en dakbedekking – gietlegeringen
magnesium[3)] (Mg)	– zeer lage dichtheid	– gietlegeringen met een gering gewicht
Titanium (Ti)	– vrij lage dichtheid – hoog smeltpunt – zeer goede corrosievastheid	– corrosievaste legeringen o.a. in de chemische industrie en bij hoge temperaturen
wolfraam (W) en molybdeen (Mo)	– zeer hoog smeltpunt	– onderdelen toegepast bij hoge temperaturen, o.a. ovens – legeringselementen in hardbare staalsoorten
chroom (Cr)	– zeer goede corrosievastheid – zeer hard	– corrosievaste en/of slijvaste deklagen – belangrijkste legeringselement in corrosievast staal

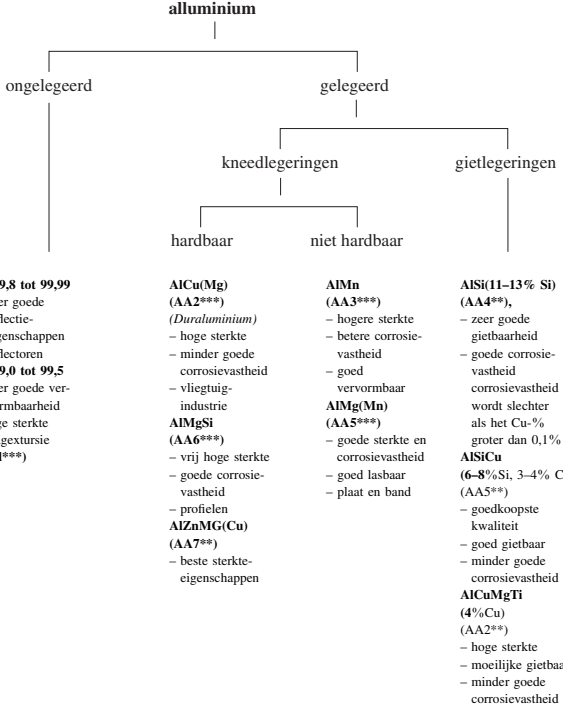
[1)] Zie ook par. 5, tabel 5.3.
[2)] Zie ook tabel 2.13 en par. 5, tabel 5.2.
[3)] Zie ook tabel 2.13.

2.6 Aluminium (legeringen)

Aluminium (zie ook figuur 2.3 en tabel 2.12 en 2.13) is t.o.v. andere veel toegepaste constructiematerialen als staal en koper een relatief nieuw metaal, doordat het vanwege zijn grote affiniteit tot zuurstof moeilijker uit zijn erts was vrij te maken.
De bijzondere eigenschappen van aluminium zijn de geringe dichtheid en de corrosievastheid door de zeer harde en dichte Al_2O_3-laag die spontaan ontstaat.

Bij het toepassen van aluminiumlegeringen moet men steeds rekening houden met:

– De lage elasticiteitsmodulus (ca. $\frac{1}{3}$ van staal) waardoor de elastische doorbuiging groot is.
– De maximaal toelaatbare temperatuur waarbij de sterkte nog niet in belangrijke mate afneemt: 125 á 200 °C.



∗: nader te bepalen cijfer (zie bijv. tabel 2.12)

Figuur 2.3 Overzicht aluminium en aluminiumlegeringen

Tabel 2.12 Aluminium-kneedlegeringen (zie ook figuur 2.3)

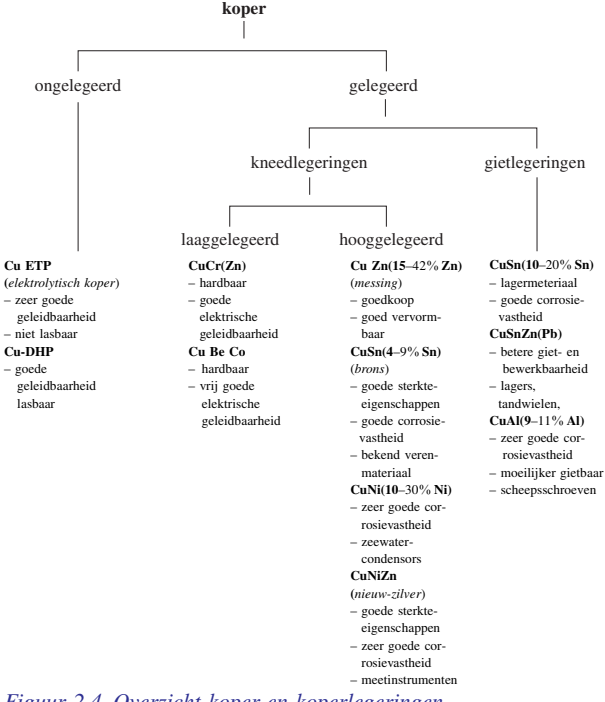
soort	kenmerken	type EN 485	gradatie	treksterkte [N/mm^2]	0,2% rekgrens [N/mm^2]	rek [%]	Vickers-hardheid HV	anodiseer-baarheid
niet thermisch hardbaar	slagextrusie koudvervormen	A199,5 AW-1050 A	zacht O halfhard H 14	65–95 105–145	$\geqslant$20 $\geqslant$85	$\geqslant$20 $\geqslant$ 4	ca. 20 ca. 40	goed
	dieptrekken goede koudvervormen chemische plaat met besten- hoge sterkte digheid	AlMg2,5 AW-5052	zacht O halfhard H 14 hard H 26	170–215 230–280 250–300	$\geqslant$65 $\geqslant$150 $\geqslant$180	$\geqslant$17 $\geqslant$ 3 $\geqslant$ 2	ca. 60 ca. 75 ca. 90	goed
	laskwaliteit hogesterkte ook na lassen goede chem. bestendigheid	AlMg 4,5 Mn AW-5182	zacht O	255–315	$\geqslant$110	$\geqslant$12	ca. 80	redelijk
thermisch hardbaar	extrusie profielen/staven	AlMgSi Cu AW-6061	hard T6	$\geqslant$290	$\geqslant$240	$\geqslant$ 6	ca. 90	goed
	hoge sterkte constructies goede corrosievastheid	AlSi 1 Mg Mn AW-6082	hard T6	$\geqslant$310	$\geqslant$260	$\geqslant$ 8	ca. 100	redelijk
	zeer hoge sterkte vrij goede corrosievastheid	AlZn 5,5 Mg Cu AW-7075	hard T6	$\geqslant$540	$\geqslant$460	$\geqslant$ 6	ca. 165	slecht
	zeer goed verspaanbaar minder goede corrosievastheid	AlCu 6 Bi Pb AA-2011	hard	$\geqslant$295	$\geqslant$195	$\geqslant$ 8	ca. 100	slecht

Tabel 2.13 Non-ferro gietlegeringen (aluminium, magnesium, zink)

soort	kenmerken	type (AA***)	giet-methode	treksterkte [N/mm^2]	0,2% rekgrens [N/mm^2]	rek (ca.) [%]	Brinell-hardheid HB
aluminium	standaard legeringen; goede sterkte-eigensch.; minder goede corrosie-vastheid	Al Si 6 Cu 4 (319)	zand- en coquillegieten	ca. 220	150	0,5	85
		Al Si 8 Cu 3 Fe (380)	spuitgieten	240–310	140–240	0,5–3	80–120
	complexe, dunwandige gietstukken; zeer goede corrosie-vastheid	Al Si 12	zacht- en coquillegieten	ca. 200	100	1–3	60
		Al Si 12 Fe	spuitgieten	220–280	140–180	2	80–120
	complexe gietstukken; goede corrosie-vastheid	Al Si 12 Cu	zend- en coquillegieten	ca. 210	110	2	65
		Al Si 12 Cu Fe (413)	spuitgieten	220–230	140–200	1–3	60–80
magnesium	gietstukken met een laag gewicht	Mg Al9 Zn (AZ91)	zand- en coquillegieten	160–220	90–130	2–5	50–70
			spuitgieten	200–250	150–170	0,5–3	85–105
zink	zeer complexe dun-wandige gietstukken; lage kruipsterkte	Zn Al4 Cu	spuitgieten	280–350	220–250	2–5	85–105
		Zn Al4	spuitgieten	250–300	200–230	3–6	70–90
		Zamak					

2.7 Koper (legeringen)

Koper is een van de oudste metalen die worden toegepast. In zuivere vorm wordt het door zijn goede elektrische geleidbaarheid vooral gebruikt voor elektrische leidingen en andere stroomvoerende delen. Daarnaast bestaat er een groot aantal koperlegeringen, die vooral in de elektrotechnische industrie ingang hebben gevonden. Zie figuur 2.4 en tabel 2.14.



Figuur 2.4 Overzicht koper en koperlegeringen

Tabel 2.14 Gegevens koper en koperlegeringen

soort	kenmerken	type (ISO)[1]	gradatie	treksterkte [N/mm²]	0,2% rekgrens [N/mm²]	rek [%]	Vickers-hardheid HV	gleid-baarheid [m/Ω·mm²)]
koper–ongelegeerd	zeer goede geleidbaarheid voor elektriciteit en warmte; stroomgeleiders	Cu-ETP (1337) (1634-1)	zacht halfhard hard	⩽210 250–290 280–330	ca. 80 ca. 180 ca. 270	⩾ 30 ca. 16 ca. 8	⩽ 70 ca. 80 ca. 100	>57
	idem laskwaliteit	Cu-DHP (1337) (1634–1)	halfhard hard	250–290 280–360	ca. 180 ca. 270	ca. 20 ca. 5	ca. 80 ca. 105	ca. 50
koper–laaggelegeerd	vrij goede geleidbaarheid stroomvoerende delen van machines	Cu Cr 1	uitgehard	ca .500	⩾440	⩾8	⩾130	ca. 45
		Cu Co 2 Be (1634–1)	uitgehard	750–900	⩾650	–	220–270	Ca. 27
	zeer goede sterkte-eigenschappen	Cu Be 2 Co Ni	veerhard	1270–1450	1080–1300	–	370–430	ca. 15
koper–zink legeringen	*Tombak* redelijke sterkte en geleidbaarheid	Cu Zn 15 (426/1) (1634)	hard	360–420	ca. 300	ca. 12	ca. 120	ca. 21
	zeer goede vervormbaarheid forceren, diepterkken	Cu Zn 30 (426/1) (1634–1)	zacht	⩽360	ca. 120	⩾45	⩽85	ca. 16,5
	messing veel toegepaste koper-legeringen voor diverse doeleinden; onder bepaalde omstan-digheden gevoelig voor spanningscorrosie	Cu Zn 37 (426/1)	zacht halfhard hard veerhard	ca. 340 360–440 410–490 ⩾610	ca. 130 ca. 260 ca. 400 ⩾580	⩾40 ca. 35 ca. 15 –	⩽85 ca.110 ca.140 ca. 190	ca.15,5
	zeer goede verpaanbaarheid	Cu Zn 40 Pb 3	hard	440–510	ca. 400	ca. 15	ca. 140	ca. 14,5
koper–tin-legering	*fosforbrons* goede veer-eigenschappen; niet gevoelig voor spanningscorrosie	Cn Sn 6 Cu Sn 8 (1634–1) (427)	veerhard	550–650 660–760	⩾510 ⩾650	⩾1	ca. 185 ca. 220	ca. 9 ca. 1,5
koper-nikkel-zink-legering	*nieuw-zilver* goede corrosievastheid	Cu Ni 18 Zn 20	zacht	ca. 430	ca. 200	⩾ 30	⩽ 120	
	goede veereigenschappen	(430)	hard	ca. 550	ca. 430	ca. 3	160–190	ca.3,3
	aluminiumbrons goede slijt-en corrosievastheid	Cu Al 10 Ni 5 Fe4 (428)	hard	ca. 740	⩾340	⩾10	ca. 200	ca. 2,3
koper-nikkel-legeringen	zeer goede corrosievastheid in o.a zeewater en niet-oxiderende oplossingen	Cu Ni 10 Fe	zacht	ca. 330	ca. 120	⩾30	ca. 90	ca. 5,6
		Cu Ni 30 Fe	zacht	ca. 420	ca. 160	⩾30	⩽105	ca. 2,6

[1] ISO 1337, 426/1, 427, 428, en 430: samenstelling. ISO 1634: mechanische eigenschappen.

2.8 Nikkel (legeringen)

Nikkel is een relatief hard en taai metaal dat vooral als legeringselement in corrosievast staal en als deklaag op andere metalen gebruikt wordt. Nikkellegeringen worden echter ook toegepast in de chemische procesindustrie als het materiaal zeer corrosiebestendig moet zijn en/of als het de nodige sterkte en taaiheid moet hebben bij extreem lage of hoge temperaturen.

De meest bekende en meest gebruikte nikkellegeringen zijn:

Nikkel-koper-legeringen (Monel). Deze legeringen zijn goed bestand tegen zeewater en ongevoelig voor spanningscorrosie. Voorbeeld: Monel K 500 met 30% Cu, 2,7% Al en 1% Fe. Deze legering is uitscheidingshardbaar tot een treksterkte van 900 á 1000 MPa (hardheid 24 HRC) en heeft dan nog een rek van 25%.

Nikkel-chroom-ijzer-legeringen (Inconel en Incoloy). Deze legeringen worden vooral gebruikt vanwege de weerstand tegen oxidatie, de kruipvastheid en de relatief hoge sterkte bij temperaturen tot 1100 °C. Voorbeeld: Inconel 600 met 16% Cr en 8% Fe.

Nikkel-chroom-molybdeen-legeringen (Hastelloy). Door de toevoeging van molybdeen zijn deze legeringen zeer goed bestand tegen putcorrosie (pitting). Voorbeeld: Hastelloy C-276 met 16% chroom, 16% molybdeen, 5,5% ijzer en 3,5% wolfraam.

2.9 Corrosie

Corrosie is een ongewenste chemische of elektrochemische aantasting van een metaal, uitgaande van het oppervlak (bijv. het roesten van ijzer).

Chemische corrosie

Chemische of *droge* corrosie treedt op wanneer metalen worden aangetast door de zuivere inwerking van bepaalde elementen of verbindingen (bijv. oxidatie van metalen bij hoge temperatuur).

Elektrochemische corrosie

Elektrochemische of *natte* corrosie komt tot stand door de vorming van een elektrisch element, waarbij water essentieel is. Een dergelijk elektrisch element bestaat vaak uit twee verschillende metalen met daartussen een elektrolyt. Als corrosie-element kunnen ook verschillende fasetoestanden van één metaallegering optreden of onzuiverheden en één metaal.
Elektrochemische corrosie is de meest optredende vorm van corrosie en deze wordt dan ook stilzwijgend bedoeld wanneer men het over corrosie heeft.

Reacties

Het metaal (gedeelte) dat bij de corrosieprocessen wordt aangetast, is de *anode*; het andere metaal (gedeelte) is de *kathode*. Het *water* van de elektrolyt is zelf voor een klein deel gesplitst in ionen volgens:

$$H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$$

Aan de *anode* maken positief geladen metaalionen zich los uit het metaaloppervlak, waarna er een negatieve lading in de vorm van elektronen in het metaal achterblijft. Reactie (Me = metaal):

$$Me \rightarrow Me^{z+} + ze$$

Tegelijkertijd moet bij de *kathode* een tegenreactie verlopen. Dit is een waterstofreactie in een zuur of neutraal milieu:

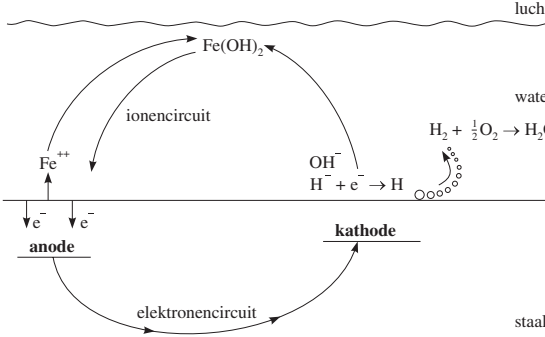
$$2zH^+ + 2ze \rightarrow zH_2 \uparrow$$

Of een zuurstofreactie in een basisch milieu:

$$2zH_2O + zO_2 + 4ze \rightarrow 4zOH^-$$

Tegengaan van corrosie

Het corrosieproces wordt verhinderd door te zorgen dat de anodische en/òf de kathodische reactie niet kan verlopen.



Figuur 2.5 Primaire corrosie van staal (de eerste verschijnselen van corrosie, waarbij nog geen roest wordt gevormd)

Macro- en lokaal-elementen

- *Macro-elementen*: twee stukken van een verschillend metaal die met elkaar in aanraking worden gebracht (bijv. een stalen boutverbinding met een koperen strip).
- *Lokaal-elementen*: kleinere elektrische elementen die zich bijv. vormen als zich op een metaal kleine deeltjes van een ander metaal bevinden.

Polarisatie

Onder *polarisatie* verstaat men in de elektrochemie grenslaagverschijnselen die remmend werken. Tijdens het corrosieproces kan zich polarisatie voordoen: zowel aan de anode als de kathode hopen zich reactieproducten op waardoor de oorspronkelijke stroomsterkte vermindert (de elektrische weerstand wordt groter). De corrosieverschijnselen verlopen hierdoor langzamer.
Kathode-polarisatie doet zich voor wanneer zich aan de kathode een waterstoffilm vormt die de elektrische weerstand vergroot.

Bij corrosieprocessen die zich aan de atmosfeer afspelen, is in de elektrolyt echter zuurstof opgelost. De gevormde waterstof wordt dan door deze zuurstof weggenomen onder de vorming van water. De kathodische reacties kunnen hierdoor weer doorgaan. Zuurstof werkt hier als *kathodische depolarisator.*

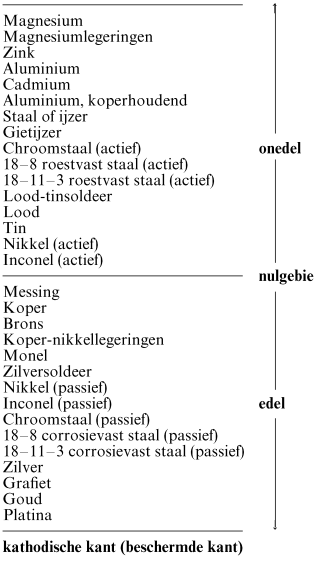
Factoren die corrosiesnelheid verhogen (+) c.q. verlagen (−)

+ Kleine concentratie zuurstof opgelost in de elektrolyt (kathodische depolarisator).
+ Bepaalde zouten, zoals chloriden (keukenzout), die de elektrolyt beter geleidend maken en bepaalde chemische reacties bevorderen.
+ De pH van de elektrolyt (de zuurgraad).
+ Temperatuurstijging.
− *Inhibitoren*: stoffen die het corrosieproces vertragen of zelfs geheel tot stilstand brengen. Vaak zijn inhibitoren stoffen die polarisatie bevorderen. Een alkalische omgeving werkt inhiberend op de corrosieverschijnselen van staal.
− *Passief worden van metaal*: er vormt zich op het metaal een uiterst dun huidje, meestal een oxide, dat de aantasting door corrosie verhindert. Stoffen die gemakkelijk zuurstof afgeven kunnen een metaal passief maken. Daarom wordt corrosievast staal vaak gedompeld in salpeterzuur. Bij de chemische voorbehandeling van metalen gebruikt men chromaten als passiveermiddelen. Om dezelfde reden worden in grondverven ook chromaten gebruikt.

Spanningsreeks

Bij corrosie zal het *minst edele* metaal (de anode) worden aangetast. Welk metaal het minst edel is, volgt uit de spanningsreeks. De wetenschappelijke (theoretische) spanningsreeks is opgesteld voor metalen in een oplossing van eigen zout. In de praktijk komt dit zelden voor en kan men beter de *praktische spanningsreeks* gebruiken (figuur 2.6).

Opmerking. De spanningsreeks van figuur 2.6 geldt alleen voor normale atmosferische corrosie bij omgevingstemperatuur (dit soort corrosie komt wel het meeste voor). De potentiaal waarbij corrosie optreedt is afhankelijk van de zuurgraad van de elektrolyt. Voor potentiaal-pH diagrammen (*Pourbaix-diagrammen*), zie literatuur aan einde hoofdstuk.



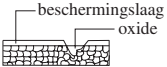
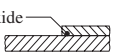
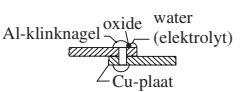
Figuur 2.6 Praktische spanningsreeks van constructiematerialen (volgens International Nickel Comp.) alleen geldig onder normale atmosferische omstandigheden. Voor normaalpotentialen tegen standaard waterstof-elektrode, zie tabel 2.13, pag. A5/29.

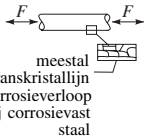
2.10 Bescherming tegen corrosie

Corrosie kan naar de verschijningsvorm in verschillende klassen worden ingedeeld. Men moet zich echter steeds realiseren dat het corrosiemechanisme, de elektrochemische aantasting, het allesoverheersende basisprincipe is. Belangrijke beschermingsmaatregelen zijn (zie ook tabel 2.15):

- kathodische bescherming (pag. E1/63);
- oppervlaktebehandelingen (pag. E1/63);
- fosfateren (pag. E1/66);
- anodiseren (pag. E1/66);
- constructieve maatregelen (pag. E1/66).

Tabel 2.15 Verschijningsvormen van corrosie met remedies

soort	schematische voorstelling	kenmerken	remedie
algemene of gelijkmatige corrosie		– materiaalverlies nagenoeg oppervlak – minst gevaarlijke vorm	– afsluiten van het milieu door deklagen – kathodische bescherming – inhibitoren – edeler materiaal kiezen
putvormige corrosie		– plaatselijk materiaalverlies in de vorm van krater- of naaldvormige materiaalonderbreking – gevaarlijke vorm, vooral bij vaten en leidingen – komt veel voor bij RVS in aanwezigheid van Cl^- -ionen	– afsluiten milien door deklagen – oppervlak zonder beschadigingen – betere materiaal-keuze
spleetcorrosie		– plaatselijk sterke corrosievorming in nauwe spleten	– voorkom spleten – opvullen met kit
contactcorrosie		– door vochtige lucht of regen onstaat een galvanisch element – daardoor aantasting minst edele metaal	– elektrisch van elkaar isoleren – materialen kiezen die dicht bij elkaar staan in de spanningsreeks

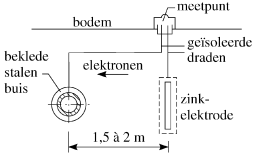
soort	schematische voorstelling	kenmerken	remedie
interkristallijne		– corrosie treedt op langs kristalgrenzen en dringt diep door in materiaal – gavaarlijke vorm bij belaste onderdelen – komt veel voor bij RVS	– geschikter materiaal kiezen – warmtebehandeling toepassen
spanningscorrosie en waterstofschade		– corrosie-aantasting in randzone met trek spanningen (eventueel wisselend) in combinatie met zuren, logen of zouten – komt voor bij austenitisch corrosievast staal, koper-zink (messing) en aluminium-magnesium legeringen	– voorkomen in- of uitwendige trekspanningen – afschermen van het milieu door deklaag – soms kathodische bescherming – andere materiaalkeuze

Kathodische bescherming

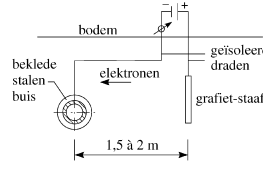
Bij *kathodische bescherming* wordt de te beschermen constructie tot kathode gemaakt door deze 'elektrisch' te verbinden met een minder edel, geleidend materiaal. Het minder edele metaal is dan anode geworden en zal oplossen of corroderen. Vaak wordt hiervoor zink, magnesium of aluminium gebruikt.

Voorbeelden:

- Pijpleidingen in de grond die worden verbonden met stukken zink (zie figuur 2.7). De leiding is nu de kathode en het zink de anode.
- Olietanks verbonden met magnesium (het magnesium wordt dan ook wel een *opofferingsanode* genoemd).
- Het aanbrengen van zink-anodes op een scheepshuid.



Figuur 2.7 Kathodische bescherming



Figuur 2.8 Bescherming door opgedrukte stroom

Een tweede methode van kathodische bescherming is die met behulp van een *opgedrukte stroom*. Hierbij wordt het stroompje dat bij corrosie zou ontstaan, bewust tegengewerkt. Ook hier is dan het te beschermen object als kathode geschakeld. Meestal worden als anode grafietplaten gebruikt (zie figuur 2.8).
Toepassing van deze methode: vooral als extra bescherming van geverfde of anderzins 'gecoate' materialen.

Oppervlaktebehandelingen

Voor het tegengaan van corrosie met een beschermlaag is het noodzakelijk dat deze laag *volkomen* afsluit tegen lucht en vocht

Tabel 2.16 Verschillende soorten zinklagen op staal

	thermisch	thermisch continu	gesherar-diseerd	zinkstof-verf	gespoten	elektro-lytisch	elektro-lytisch continu
laagdikte [μm]	50–150 moeilijk instelbaar	15–30 instelbaar	15–25	20–100	30–100	5–20	1,5–4
hechting	zeer goed	zeer goed	extreem goed	soms matig	soms matig	zeer goed	zeer goed
poreusheid	niet poreus	niet poreus	niet poreus	weinig poreus poreus	poreus	niet poreus	niet poreus
legeringslaag	dik	dun	alleen legeringslaag	geen	geen	geen	geen
vervormbaarheid	slecht	goed	slecht	matig	slecht	goed	goed
slagvastheid	goed	zeer goed	goed	goed	matig	zeer goed	zeer goed
corrosiewering	zeer goed	goed	goed	goed	goed	goed	matig
vormveranderingen	kans op trekken	geen	geen	geen	geen	geen	geen
beperking afmetingen	tot 18 m	walsmaat	tot 1 m	geen	geen	tot 6 m	walsmaat
verfhechtig	voorbehan-delen	voorbehan-delen	goed	goed	goed	voorbehan-delen	voorbehan-delen
schroefdraad	nasnijden	–	goed	ongeschikt	ongeschikt	goed	–
reparatiemogelijkheid	zinkstof-verf	zinkstof-verf	geen	indien vers	indien vers, anders zink-stofverf	geen	geen
uiterlijk	redelijk	goed	lelijk	niet fraai	niet fraai	fraai	redelijk

en een *hechte verbinding* krijgt met het te beschermen oppervlak. Hiertoe is een goede reiniging van het te beschermen oppervlak noodzakelijk.
De meest toegepaste oppervlaktebehandelingen zijn verzinken, verven en emailleren. Tabel 2.16 geeft een overzicht van de mogelijkheden voor het beschermen van staal met een *zinklaag* (zie hiervoor ook par. 2.3). Als het oppervlak moet worden voorzien van een kleur of bloot staat aan een agressief milieu, past men naast verzinken ook *verven* toe (*duplexsysteem*). De beschermingsduur is ongeveer 1,5 maal de som van de afzonderlijke beschermingsduurwaarden. Tabel 2.17 geeft een overzicht van verschillende verftypen voor toepassing in een bepaalde omgeving. Zie tevens par. 14 *Verven lakken* en *beitsen*.

Tabel 2.17 Geschiktheid van verschillende verftypen voor toepassing in een bepaalde omgeving

	olie	alkhyd-hars	vinyl-hars	chloor-rubber	bitumi-neuze	epoxy	dikke laag exposy	epoxy-teer	poly urethaan
landklimaat	+	+	+						
zeeklimaat		+	+	+		+			
industrie			+	+		+			
agressieve industrie			+				+		+
ondergronds					+		+	+	
zoet water			+		+		+	+	
zeewater			+	+	+	+	+	+	

Het *emailleren* heeft voor corrosiebescherming grote mogelijkheden. Het email bestaat uit een mengsel van kwarts, borax, veldspaat, Na-, K-, of Li-zouten en metaaloxiden. De metaaloxiden geven het email een bepaalde kleur. Deze massa wordt aangebracht op het te beschermen metaaloppervlak en er in een oven ingebrand. Aan het email worden ook stoffen toegevoegd (loodverbindingen) die de elasticiteit verbeteren. Emailleren wordt vooral toegepast bij huishoudelijke artikelen, maar ook in de industrie. Men onderscheidt het twee-lagen email (grondlaag en deklaag) en het moderne één-laag email (direct email).

Fosfateren

Bij *fosfateren* wordt het te beschermen oppervlak enkele minuten blootgesteld aan een oplossing van fosforverbindingen. Hierdoor slaan fosfaten neer op het staal en vormen daarmee een hechte verbinding. Wanneer alléén de fosfaatlaag de beschermende werking moet geven, worden dikkere lagen *mangaan-fosfaat* (zwart van kleur) aangebracht; deze fosfaatlagen kunnen olie opnemen (smerende werking) en worden daarom toegepast bij o.a. klepveerschotels en geleidebanen. *IJzer-fosfateren* en *zink-fosfateren* worden hoofdzakelijk gebruikt als ondergrond voor verflagen (auto-industrie). Zink-fosfateren dient ook om latere mechanische vervorming mogelijk te maken en als elektrische isolator (transformator-blik).

Anodiseren

Aluminium(legeringen) kunnen door *anodiseren* worden voorzien van een sterke, goed afsluitende oxidelaag. Hiertoe wordt eerst de reeds op het aluminium aanwezige oxidelaag verwijderd door middel van beitsen. De anodiseerlaag wordt direct daarna via elektrochemische weg aangebracht in een bad met verdund zwavelzuur of chroomzuur. Door het anodiseren wordt ook voorko-men dat het aluminium zwart afgeeft.
Anodiseren wordt ook toegepast als een voorbehandeling bij lakken en lijmen. De lak of de lijm kan zich na speciale voorbehandeling goed hechten op de oxidelaag.

Constructieve maatregelen

Door goed construeren en een juiste materiaalkeuze kan de schade door corrosie aanzienlijk worden verminderd of zelfs geheel worden voorkomen. Enkele aanwijzingen:

- Zorg dat er zich geen water kan verzamelen.
- Zorg dat er zich geen vuil kan verzamelen.
- Vermijd spleten en nauwe openingen.
- Voorkom scherpe randen bij geverfde of geëmailleerde constructies.

- Zorg voor strakke of nabewerkte lasnaden.
- Voorkom contactcorrosie.
- Vermijd besmetting met ander materiaal bij de toepassing van corrosievaste materiaalsoorten.
- Voorkom krassen en andere beschadigingen van het oppervlak.

2.11 Bewerkingsgegevens

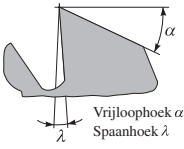
Tabel 2.18 Bewerkingsgegevens metalen

bewerkingsgegevens[1)]	ongelegeerd staal	gelegeerd staal	gietstaal	roestvast staal	gietijzer
draaien					
snelstaal					
spaanhoek	12–18	8–16	8–12	17	2–6
vrijloophoek	6–8	6–8	6–8	10	6–8
snijsnelheid [m/min]	10–82	8–32	9–29	10–60	7–66
aanzet [mm/omw]	0,2–1,6	0,2–1,6	0,2–1,6	0,2–1,6	0,2–1,6
hardmetaal					
spaanhoek	6–20	5–8	6–15	13–20	3–10
vrijloophoek	6	6–8	6	6	6
snijsnelheid [m/min]	15–540	10–370	15–200	30–280	30–225
aanzet [mm/omw]	0,05–3	0,05–3	0,1–2,5	0,1–2,5	0,1–2
frezen					
snelstaal					
spaanhoek	6–18	4–8	8–13	8–14	4–12
vrijloophoek	4–8	4–5	5–7	5–8	4–8
snijsnelheid [m/min]	13–45	10–15	13–30	18–35	10–25
aanzet [mm/tand]	0,02–0,25	0,02–0,1	0,04–0,2	0,04–0,3	0,04–0,3
hardmetaal					
spaanhoek	0–8	0–8	3	3–8	0–7
vrijloophoek	3–5	3–4	4–5	3–4	4–6
snijsnelheid [m/min]	40–300	25–190	30–185	45–245	40–170
aanzet [mm/tand]	0,04–0,4	0,04–0,4	0,04–0,4	0,04–0,4	0,04–0,4
boren					
snelstaal					
spaanhoek	20–30	20–30	20–30	20–30	18–20
punthoek	118–120	118–120	118–120	118–120	118
snijsnelheid [m/min]	15	15	15	12	8–15
aanzet [mm/omw]	0,07–0,35	0,07–0,35	0,07–0,35	0,01–0,3	0,1–0,4
hardmetaal					
spaanhoek	20–30	20–30	20–30	20–30	18–20
punthoek	118–120	118–120	118–120	118–120	118
snijsnelheid [m/min]	20–25	20–25	20–25	20–25	15–25
aanzet [mm/omw]	0,07–0,35	0,07–0,35	0,07–0,35	0,01–0,3	0,1–0,4
slijpen					
snelstaal					
rondslijpen [m/s]	30	30	30	30	25
valkslijpen [m/s]	25	25	25	25	20
aanzet					
rondslijpen [mm/omw]	1/10 – 3/4 steenbreedte, afhankelijk				
vlakslijpen [mm/slag]	van het type bewerking				

[1)] De hoeken zijn gegeven in graden.

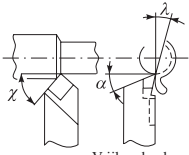
Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze pragraaf.

koper	messing	brons	aluminium
0–27	0–27	0–27	30
6–8	6–8	6–8	12
35–138	35–138	35–140	75–405
0,2–1,6	0,2–1,6	0,2–1,6	0,2–1,6
20–24	3–6	5–6	25–30
8	4–6	4–6	8–10
100–300	175–600	175–350	1000–2000
0,1–2	0,1–2	0,1–2	0,1–2



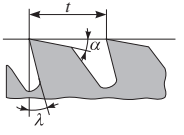
Vrijloophoek α
Spaanhoek λ

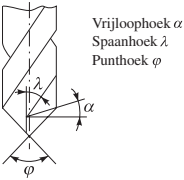
10–15	4–12	8–12	20–30
6–8	4–8	6–8	6–10
30–60	30–50	30–50	150–300
0,05–0,3	0,04–0,3	0,05–0,25	0,05–0,3
5–7	5–7	5–7	10–20
8–10	5–7	5–7	5–7
70–350	80–350	80–350	400–700
0,05–0,3	0,04–0,2	0,05–0,18	0,05–0,3



Vrijloophoek α
Spaanhoek λ
Instelhoek χ

10–15	10–15	10–15	35–40
118	118	118	140
25–40	25–40	10–15	50
0,05–0,8	0,05–0,8	0,05–0,35	0,15–0,55
10–15	10–15	10–15	35–40
118	118	118	140
40–60	40–60	20–40	80–100
0,05–0,8	0,05–0,8	0,05–0,35	0,15–0,35





Vrijloophoek α
Spaanhoek λ
Punthoek φ

–	30	–	–
–	30	–	–

$\frac{1}{10}$ – $\frac{3}{4}$ steenbreedte, afhankelijk van het type bewerking

3 Kunststoffen

3.1 Overzicht polymeren

Tabel 3.1 Polymeernamen volgens Technical Committee 61 ISO (International Standard Organisation); namen tussen ( ) worden ook gebruikt

naam		soort[1)]
ABS	Acrylonitril-butadieën-styreen	TP
ASA	Acrylonitril-styreenacrylester	TP
CA	Celluloseacetaat	TP
CAB	Celluloseacetobutyraat	TP
CAP	Celluloseacetopropionaat	TP
CF	Cresolformaldehyde	TH
CMC	Carboxymethylcellulose	TP
CN	Cellulosenitraat	TP
CP	Cellulosepropionaat	TP
CPE	Gechloreerde PE	TP
CS	Caseïne	TH
CSF	Caseïne-formaldehyde	TH
EC	Ethylcellulose	TP
EP	Epoxyhars	TH
EPDM	Etheen/propeen/dieën-rubber	R
EPM	Etheen/propeenrubber	R
EVA	Etheenvinylacetaat	TP
HDPE	Hoge-dichtheid PE	TP
LCP	Vloeibaar kristallijne polymeer	TP
LDPE	Lage-dichtheid PE	TP
LLDPE	Lineaire, lage-dichtheid PE	TP
MDPE	Midden-dichtheid PE	TP
MF	Melamineformaldehyde	TH
PF	Fenolformaldehyde	TH
PA	Polyamide (Nylon)	TP
PAI	Polyamideimide	TP/TH
PAN	Polyacrylonitril	TH
PAR	Polyarylaat	TP
PB	Polybuteen	TP
PBI	Polybenzimidazool	TH
PBT	Polybutyleentereftalaat	TP
PC	Polycarbonaat	TP

Tabel 3.1 (vervolg)

naam		soort[1)]
PCTFE	Polychloortrifluoretheen	TP
PCT	Polycyclohexyldimethyltereftalaat	TP
PE	Polyetheen	TP
PEEK	Polyetheretherketon	TP
PEI	Polyetherimide	TP
PEK	Polyetherketon	TP
PES	Polyethersulfon	TP
PET	Polyetheentereftalaat (Polyester)	TP
PI	Polyimide	TH
PIB	Polyisobuteen	TP
PMMA	Polymethylmethacrylaat (Perspex)	TP
POM	Polyoxymethyleen, acetaal	TP
PP	Polypropeen	TP
PPO	Polyfenyleenoxide	TP[2)]
PPS	Polyfenyleensulfide	TP
PS	Polystyreen	TP
PSU	Polysulfon	TP
PTFE	Polytetrafluoretheen (Teflon)	TH
PUR	Polyurethaan	TP/TH
PVAC	Polyvinylacetaat	TP
PVAL	Polyvinylalcohol	TP
PVB	Polyvinylbutyraat	TP
PVC	Polyvinylchloride	TP
PVCA	Polyvinylchlorideacetaat	TP
PVCC	Gechloreerd PVC	TP
PVDC	Polyvinylideenchloride	TP
PVDF	Polyvinylideenfluoride	TP
PVF	Polyvinylfluoride	TP
PVP	Polyvinylpyrrolidon	TH
PVFO	Polyvinylformal	TP
SAN	Styreenacrylonitril	TP
SB	Styreen-butadieën	TP
SI	Silicon	TH
SMA	Styreen-maleïnezuuranhydride	TP
UHMWPE	Ultra-hoog moleculair PE	TP
UF	Ureum-formaldehyde	TH
UP	Onverzadigde polyester	TH
VLDPE	Zeer lage-dichtheid, lineaire PE	TP

[1)] TH = thermotharder. TP = Thermoplast. R = Rubber.
[2)] Mits PS bevattend.

3.2 Fysische gegevens

Tabel 3.2 Eigenschappen van enkele kunststoffen (aalle gegevens zijn richtwaarden)

eigenschappen	VLDPE	LLDPE	LDPE
DICHTHEID [kg/m^3]	900–915	915–935	918–930
mechanische eigenschappen (bij 20 °C)			
buigsterkte [N/mm^2]	< 10	<15	8–15
rek bij breuk [%]	600–800	400–800	200–600
drukvastheid [N/mm^2]	–	–	10–15
E-modulus [N/mm^2]	50–100	90–600	150–1100
kerfsterkte (volgens Izod) [kJ/m^2]	geen breuk	geen breuk	gene breuk
slagsterkte (volgens Charpy) [kJ/m^2]	geen breuk	geen breuk	geen breuk
treksterkte [N/mm^2]	10–13	8–18	9–28
wrijvingscoëfficiënt t.o.v. staal, droog	>1,3	>1,3	0,17–1,5
thermische eigenschappen			
verwekingspunt (Vicat) [°C]	60–70	85–130	82–100
smeltpunt [°C]	120–130	120–130	105–120
lineaire uitzettingscoëfficiënt, parallel [°C^{-1}]	–	–	$200–250 \cdot 10^{-6}$
Toelaatbare temperatuur [°C]	70	70	70
– max. (onbelast)			
– min. (onbelast)	–95/ –130	–95/ –130	–120/ –90
elektrische eigenschappen			
diëlektrische constante ε_r	2,3	2,3	2,3
diëlektrische verliesfactor tan δ	0,0003	0,0003	0,0002
doorslagspanning [kV/mm]	40–45	40–45	40–45
oppervlakteweerstand [Ω]	$0{,}1 \cdot 10^{15}$	$0{,}1 \cdot 10^{15}$	$0{,}1 \cdot 10^{15}$
soortellijke weerstand [Ω·m]	$0{,}1 \cdot 10^{21}$	$0{,}1 \cdot 10^{21}$	$0{,}1 \cdot 10^{21}$
wateropname (bij 20° C)			
– bij rel. vochtigheid 50%	0.01 (ISO 62)	0.01 (ISO 62)	0.01 (ISO 62)
– bij onderdompeling	0,01–0,002 (ISO 62)	0,01–0,002 (ISO 62)	0,01–0,002 (ISO 62)

Tabel 3.2 (vervolg)

HDPE	PP	hard PVC	hoog-slagvast PVC	PVCC	zacht PVC
945–965	900–915	1390	1380	1540	1200
20–30	40–45	80–110	50	90–120	–
250–>500	> 450	20–50	60–70	ca. 70	> 350
22–32	–	80	110	70–80	–
700–1750	1250–2200	3000	2500	800	50–100
13– > 60	2– > 60	–	> 2	1–2	40
3-geen breuk	geen breuk	geen breuk	geen breuk	–	geen breuk
25–34	30–40	50–60	23–40	55–65	16–25
0,25–0,30	0,5	0,55	0,5	–	–
120–130	90	80	55–75	105	50–60
125–135	160–165	amorf	amorf	amorf	amorf
$200 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}$	$80 \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6}$	$60–80 \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6}$
90	130	70	70	100	50
−90/ −140	−20	−10	−30	−10	0
2,3	2,4	3,3	3,7–3,8	3,5	> 6,5
0,0004	0,0005	0,02–0,04	0,02–0,04	0,01	0,01
40–45	75	40	50	20	24–30
$0,1 \cdot 10^{15}$	$> 10 \cdot 10^{12}$	$10 \cdot 10^{12}$	10^{12}	10^{12}	$0,1 \cdot 10^{12}$
$0,1 \cdot 10^{21}$	$50 \cdot 10^{18}$	$0,5 \cdot 10^{18}$	10^{18}	$8 \cdot 10^{15}$	$50 \cdot 10^{12}$
0,01	0,01	0,2	0,2	–	0,2
0,01–0,02	0,1	3,5	3,0	–	–

Tabel 3.2 (vervolg)

eigenschappen	PS	ABS	PMMA gegoten
dichtheid [kg/m^3]	1050–1150	1040–1070	1180
mechanische eigenschappen (bij 20 °C)			
buigsterkte [N/mm^2]	80	55–80	140
rek bij breuk [%]	15	15–30	3,5
drukvastheid [N/mm^2]	–	–	120
E-modulus [N/mm^2]	2600–3200	1800–2500	3250
kerfslagsterkte (volgens Izod) [kJ/m^2]	7	3– > 25	4
slagsterkte (volgens Charpy) [kJ/m^2]	15–25	geen breuk	20
treksterkte [N/mm^2]	40–65	30–45	75
wrijvingscoëfficiënt t.o.v. staal, droog	0,5	0,25–0,45	0,54
thermische eigenschappen			
verwekingspunt (Vicat) [°C]	100	90	115
smeltpunt [°C]	amorf	amorf	amorf
lineaire uitzettingscoëfficiënt, parallel [°C^{-1}]	$70{\cdot}10^{-6}$	$60-110{\cdot}10^{-6}$	$80{\cdot}10^{-6}$
Toelaatbare temperatuur [°C]			
– max. (onbelast)	70–80	85–100	70
– min. (onbelast)	−10	−70	−40
elektische eigenschappen			
diëlektrische constante ε_r	2,4–2,6	3,2	3,5
diëlektrische verliesfactor tan δ	0,0004	0,02–0,03	0,02–0,06
doorslagspanning [kV/mm]	200	30–50	30
oppervlakteweerstand [Ω]	10^{15}	$0{,}01{\cdot}10^{15}$	niet meetbaar
soortelijke weerstand [Ω·m]	$> 100{\cdot}10^{15}$	10^{15}	$> 100 \cdot 10^{15}$
wateropname (bij 20 °C)			
– bij rel. vochtigheid 50%	0,1	0,2–0,4	0,15–0,4
– bij onderdompeling	0,15	1–1,8	1,7–2

Tabel 3.2 (vervolg)

PMMA geëxtrudeerd	SMA	PC	POM	PET	PA6 droog
1180	1170	1200	1410	1380	1130
110	45	75	110	40	30
5–6	3	>110	20–30	70	200
120	–	80	90	–	90
3250	3500	2200	2800–3200	2800	3000–3300
3–4	1–2	2	geen breuk	3	> 25
20	6–7	geen breuk	–	geen breuk	geen breuk
74	50	65	25–70	30–45	40–50
0,54	–	0,55	0,25	0,5	0,3
110 amorf	160 amorf	170 amorf	155 164–175	185 255	180 220
$80 \cdot 10^{-6}$	$80 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$	$130 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$	$80 \cdot 10^{-6}$
70 –40	125 –20	130 –100	90–140 –40	100 –100	140 –70
3,5	–	3,0	4,0	3,4	4,0
0,04	–	0,007	0,001	0,002	0,02
30	–	29–35	40	25	80
niet meetbaar	$100 \cdot 10^{15}$	$>10^{15}$	$0{,}01 \cdot 10^{15}$	$0{,}6 \cdot 10^{15}$	$0{,}01 \cdot 10^{-15}$
$>100 \cdot 10^{15}$	10^{18}	10^{18}	10^{15}	$0{,}2 \cdot 10^{15}$	10^{15}
–	–	0,2	0,2	0,3	2,5
0,3	–	0,7	0,7	0,8	9,5

Tabel 3.2 (vervolg)

eigenschappen	PA6.6	PA4.6	PPO/PS (Noryl)
dichtheid [kg/m^3]	1140	1180	1060
mechanische eigenschappen (bij 20 °C)			
buigsterkte [N/mm^2]	80	150	95
rek bij breuk [%]	200	80	20
drukvastheid [N/mm^2]	110	–	115
E-modulus [N/mm^2]	2000	3300	2500
kerfslagsterkte (volgens Izod) [kJ/m^2]	20	10	13
slagsterkte (volgens Charpy) [kJ/m^2]	geen breuk	geen breuk	4
treksterkte [N/mm^2]	70	80	65
wrijvingscoëfficiënt t.o.v. staal, droog	0,3	0,3	0,45
thermische eigenschappen			
verwekingspunt (Vicat) [°C]	200	270	130
smeltpunt [°C]	255	285	230–315
lineaire uitzettingscoëfficiënt, parallel [°C^{-1}]	$80{\cdot}10^{-6}$	$73{\cdot}10^{-6}$	$60{\cdot}10^{-6}$
Toelaatbare temperatuur [°C]			
– max. (onbelast)	160	160	90
– min. (onbelast)	−60	−60	−20
elektische eigenschappen			
diëlektrische constante ε_r	4,0	3,9	2,6
diëlektrische verliesfactor tan δ	0,03	0,01	0,001
doorslagspanning [kV/mm]	40	30	55
oppervlakteweerstand [Ω]	$0{,}1{\cdot}10^{15}$	$8{\cdot}10^{15}$	$5{\cdot}10^{15}$
soortelijke weerstand [Ω·m]	10^{15}	$10{\cdot}10^{15}$	$10{\cdot}10^{18}$
wateropname (bij 20 °C)			
– bij rel. vochtigheid 50%	2,5	3,7	0,1
– bij onderdompeling	8–9	2,3	0,15

Tabel 3.2 (vervolg)

PTFE	PSU	PEEK	LCP
2150	1240	1280	1400
–	–	170	140
350–550	50–100	5	4–8
40	100	120	80
400–600	2500	3700	8000–20 000
3	geen breuk	9	10–>60
–	geen breuk	geen breuk	10–>50
25–35	50–60	92	140
0,1	0,6	0,4	0,4
–	185	–	–
327°C	260	334	280–410[1)]
$60 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$
260	150	260	260
−100	−40	−100	−100
2,0	3,2	3,2	2,8
0,0005	0,004	0,003	0,004
55	20	190	200
$5 \cdot 10^{15}$	$30 \cdot 10^{15}$	$50 \cdot 10^{15}$	$10 \cdot 10^{15}$
$10 \cdot 10^{18}$	10^{18}	10^{18}	10^{18}
0,1	0,3	0,5	0,1
0,1	0,8	0,5	0,1

[1)]Afhankelijk van type

3.3 Thermoharders

Polyesters(onverzadigd)

Producten van *polyester* zijn vaak met glasvezels gewapend die de sterkte bepalen. Ze komen voor als:

- Dakgoten met hulpstukken.
- Vlakke en gegolfde plaat: dakbedekking, luifels, borstweringen, balkonafscheidingen.
- Buitenlaag voor sandwichplaten.
- Straatkolken en rioolbuizen.
- Kielen van zeilschepen.

Fenol-formaldehydeharsen

Licht-tot donkerbruine hars (bakeliet) met vulstoffen (bijv. houtmeel) voor bijv. contactdozen. Is goed te schuimen en is dan vrij sterk en watervast. Lijmen op basis van deze hars worden gebruikt bij triplex-, houtspaander- en vlasschevenplaten. Ook leverbaar in golfplaten, ondoorzichtig en zeer sterk.

Ureum-formaldehydeharsen

Kleurloos, dus ook voor lichtgekleurde voorwerpen. Sterker gevoelig voor milieu- en temperatuurinvloeden dan fenol-formaldehydeharsen. Ook voor elektrotechnische artikelen, laden, closetbrillen. Geschuimd voor thermische isolatie. Ook als basis voor diverse lijmsoorten.

Melamine-formaldehydeharsen

Hoogwaardige thermoharder, voornamelijk voor elektrotechnische artikelen, deklaag van decoratief plaatmateriaal (meubels), behuizingen en lijmsoorten.

Vezelversterkte thermoharders (composieten)

Wapening van thermoharders met vezels leidt tot materialen met verbeterde mechanische eigenschappen. In de trekrichting kan de elasticiteitsmodulus (E-modulus) toenemen met een factor 20 tot 50 t.o.v. ongewapende thermoharders en de treksterkte tot maximaal 25, afhankelijk van het gekozen vezeltype. De gewapende thermoharders zijn aantrekkelijk als constructiematerialen vanwege hun hoge stijfheden en sterktes per gewichtseenheid. De hechting tussen matrix en vezel is van essentieel belang en kan vaak worden verbeterd door een hecht- laag op de vezels aan te brengen.

Matrixmaterialen:
- Onverzadige polyesters uit diolen en maleïnezuur, ‘vernet’ met styreen.
- Epoxyharsen uit bisfenol A en epichloorhydrine, ‘vernet’ met diamines of zuuranhydrides.

Vezels:
- Glas, koolstof, aramides, keramische vezels.

Toepassingen: botenbouw (polyester met glas of aramide), automobielindustrie (SMC, BMC), lucht- en ruimtevaart (epoxy’s met koolstof- of aramidewapening), ski’s en vishengels (epoxy’s met koolstofwapening).

3.4 Rubbers (elastomeren)

Natuurrubber (NR) -60 tot $+$ 60 °C
Hoge stootelasticiteit, koude flexibiliteit, scheursterkte en slijtvastheid. Nadelen: slechte gasdichtheid en aantasting door chemicaliën. Toegepast in vrachtwagenbanden en daar waar hoge rekvastheden worden vereist: ballonnen, (chirurgische) handschoenen, textielbekleding, transportbanden.

Styreenbutadieënrubber (SBR) -30 tot $+$ 70 °C
Verhoudingsgewijs de belangrijkste synthetische rubber, met zeer hoge slijtweerstand. Wordt verwerkt in schoenzolen, als onderdeel van kabelommantelingen, afdichtingen, autobanden en vloerbedekking.

Butylrubber (BR) -30 tot $+$ 120 °C
Synthetisch rubber, een copolymerisaat van isobuteen en iso preen. Bezit een zeer hoge gasdichtheid, bestendig tegen koude en inwerking van zuurstof. Toepassing vooral in binnenbanden en transportbanden, alsook in kabelommantelingen.

Neopreenrubber (CR) -60 tot $+$ 90 °C
Gemiddelde chemische resistentie, met name voor minerale oliën. Vlamdovend en redelijk weervast. Toepassing in slangen (olietransport), in dakbedekkingen en bouwproflelen.

Siliconenrubber (M...Q, Si) -60 tot $+$ 250 °C
Flexibiliteit over een zeer groot temperatuurgebied. Grote weerstand tegen veroudering door UV-licht en ozon. Uitstekende elektrische isolatie. Toegepast in koeltechniek, elektrotechniek, kabelindustrie en vliegtuigindustrie.

Etheen-propeen-dieënrubber (EPM/EPDM) -50 tot $+$ 150 °C
Zeer hoogwardig synthetisch rubbertype, met zeer hoge resistentie tegen chemicaliën UV-straling en weerinvoleden (mits voldoende gestabiliseerd). Toepasbaar tot ca. 150 °C. Wordt ook geleverd als blend met bijv. PP, als stootvast materiaal voor bumpers. Verdere toepassingen: afdichtingen in automobielen en bouwprofielen.

Thermoplastische elastomeren -30 tot $>+$ 120 °C
Styreen-butadieën-styreen (SBS)blokcopolymeren, thermoplastische polyurethanen en polyesters (zie tabel 3.1, par. 3.1). Kunnen als thermoplasten worden verwerkt, zonder afzonderlijke vulcanisatiestap. Hoge elasticiteit en hoge wrijvingscoëfficiënt. Vooral in gebruik binnen de schoenindustrie, de automobielindustrie, voor slangen en in diverse huishoudelijke artikelen.

3.5 Thermoplasten

Cellulose en cellulosederivaten
Geregenereerde cellulose uit cellulose:
– Toepassingen: rayon (kunstzijde), cellofaan, textielvezels en sponzen.

Cellulose-esters:
– *Nitraat-esters*: lakken, folies.
– *Acetaat- of propionaatesters* (afhankelijk van substitutiegraad): vezels, lakken, folies, fotografische films.

Cellulose-ethers:
– *Methylcellulose*: verdikkingsmiddel in levensmiddelen, bestanddeel van cosmetica, coating-materiaal voor farmaceutische producten.

- *Ethylcellulose*: toepassing in verven, lakken, inkten en vernis.
- *Hydroxyethylcellulose*: verven, lijmen.
- *Carboxymethylcellulose*: in verdikkingsmiddelen, wasmiddelen, verven enz.

Polyetheen (LDPE, LLDPE, HDPE, UHMWPE)

Verkrijgbaar in blaasfolie-, (blaas-) extrusie- en spuitgietkwaliteit. De blaasfolies worden bijvoorbeeld toegepast als zakken, krimpfolies, (eventueel meerlaagse) voedselverpakkingen en landbouwfilms. De blaasextrusietypes worden gebruikt ter vervaardiging van flessen en flacons. Overige extrusie-grades worden ingezet als coating-materialen, diverse typen leidingen en rioleringsbuizen (incl.hulpstukken), benzinetanks, kabelommantelingen en films. Door middel van spuitgieten verwerkt tot producten als doppen, kratten, kleine containers enz.
PE is niet te lijmen, en dient verbonden te worden door gebruik te maken van klemkoppelingen, flensverbindingen, stomplassen of ultrasone lastechnieken. Halffabrikaten (folies, (geschuimde) plaat) zijn in vele maten en kleuren te verkrijgen.

Polystyreen (PS)

PS is bros, verweekt bij 70 °C; slagvast PS (verkregen door copolymerisatie met acrylonitril, butadieën of SBR) is tot 90 °C bruikbaar. Wordt toegepast in huishoudelijke apparaten, tegels, schalen, koffiebekertjes, wegwerpverpakkingen, koelkastbehuizingen, schrijfgerei e.d.

Polyvinylchloride (PVC)

Hard PVC: bevat geen toegevoegde weekmakers (hoornachtig, tamelijk bros).
Week PVC: plastische vorm met 20–70 massaprocent weekmaker.
PVC is onbrandaar, vervormbaar bij ca. 130 °C en ontbindt vanaf 170–180 °C. PVC is goed lijmbaar.Het is in diverse copolymere vormen verkrijgbaar, ter verhoging van de slagvastheid, lagetemperatuur taaiheid en weinig gevoelig voor milieu-invloeden: bijv.met gechloreerd PVC, acrylesters of EVA.
Toepassing in diverse buissoorten (met CE-markering): in elektrische installaties (met KEMA-keur), waterleidingen (met

KIWA-keur), gasleidingen (met Gastec QA), binnen- en buitenrioleringen, draineerbuizen enz. Week PVC wordt vooral toegepast in slangen, folies in de bouwindustrie (dakbedekking) en de voedselverpakkingsindustrie en strippen voor afwerking van meubilair. Is ook in plaatvorm verkrijgbaar, o.a. voor vloerbedekking, voor wanden en dakbedekkingen, als plinten en rolluiken.

Polymethylmethacrylaat (PMMA)

Glasheldere en gekleurde vlakke en gegolfde plaat, buis, als lichtkoepels in ronde, vierkante of rechthoekige vorm en als wasbakken, verlichtingsornamenten. Wordt ook gebruikt als ooglensmateriaal, in linealen, tekendriehoeken en sjablonen.

Acrylonitril-butadieën-styreen (ABS)

Is in zeer slagvaste vorm verkrijgbaar en vertoont kenmerkende fraaie oppervlaktes na verwerking. Goede chemische weerstanden mechanische eigenschappen, maar slecht bestand tegen UV-licht en weerinvloeden. Kan zeer fraai worden ingekleurd of gemetalliseerd. Komt in vele modificaties voor. Spuitgiettoepassingen: behuizingen, veiligheidshelmen, speelgoed, handvatten van koffers, haardrogers enz. Als geëxtrudeerde folies of platen koffers, bekledingsmaterialen, profielen (ski's, surfplanken), onderdelen van vrachtwagencabines enz.

Polypropeen (PP)

PP neemt qua productievolume de derde plaats onder de thermoplasten in, na PE en PVC. Het bezit een zeer aantrekkelijk eigenschappenpakket (hoge impactvastheid, goede chemische weerstand, goede verwerkbaarheid) en wordt vaak in veeleisende toepassingen ingezet. Ook als copolymeer verkrijgbaar (met hoge slagvastheden). Beter verlijmbaar dan PE. Wordt vooral bij spuitgiettoepassingen gebruikt: o.a. onderdelen van huishoudelijke apparatuur, keukengerei, speelgoed, antenneon-derdelen, doppen, scharnieren. Als extrusieproduct ook gebruikt in farmaceutische industrie (flacons) en in de automobielindustrie (onderdelen van dashboards enz.).

3.6 Kunststofschuimen

Zogenaamde 'onechte' schuimen met meestal gesloten cellen komen in de bouw voor in geprefabriceerde vormen als platen, schalen, strippen en korrels maar ook als 'in situ' gevormde schuimen. Ter plaatse aangebracht (alleen thermohardend) schuim wordt bijv. in spouwen toegepast.

Polystyreenschuim ca. 12–60 kg/m^3
Wit, met gesloten cellenstructuur. Goedkoop materiaal voor contactgeluidsisolatie, warmte-isolatie, als toeslagstof voor lichtgewicht beton en als wegwerpverpakking voor 'fast-food'.

PVC-schuim ca. 40 kg/m^3
Crème tot lichtgeel met gesloten celstructuur, of gemengd (vrij kostbaar) maar met gesloten cellenstructuur en goed dampdicht.

Polyurethaanschuim ca. 20–100 kg/m^3
Wit tot grijzig van kleur. Hard-schuim typen met overwegend gesloten cellen, zachte typen zowel met open als gesloten cellen. Wordt veel in de bouw-en de automobielindustrie gebruikt.

Fenolformaldehydeschuim ca. 20–100 kg/m^3
Oranje tot (donker)bruin gekleurd schuim, met 50–70% gesloten cellen, stevig maar bros. Gedurende korte tijd tot 250 °C te gebruiken. Neemt relatief veel water op. Komt in geprefabriceerde vorm voor, maar wordt ook 'in situ' toegepast.

Ureumformaldehydeschuim ca. 30–50 kg/m^3
Met 'open' celstructuur, eveneens met vrij hoge wateropname. Vooral voor thermische isolatie van daken en leidingen, voor geluidsabsorptie en spouwvulling.

Sandwichplaten
Worden vaak met polystyreen- en polyurethaanschuim vervaardigd. Veelal met buitenlagen van PVC of PE en met glasvezel versterkt polyesterhars.

3.7 Bewerkingsgegevens

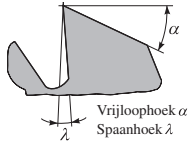
Tabel 3.3 Bewerkingsgegevens van enige kunststoffen

bewerkingsgegevens[1)]	hard-PVC	hoogslagvast-PVC	PVC-C (high temp)	holypropeen	hard-polyetheen (lagedruk PE)	zacht-polyetheen (hogedruk PE)
cirkelzaag						
Vrijloophoek α	5–10	5–10	5–10	10–15	10–15	10–15
Spaanhoek λ	0	0	0	0–15	0–15	0–15
Snijsnelheid [m/min]	3000–4000	3000–4000	3000–4000	1000–3000	1000–3000	1000–3000
Tandafstand t [mm]	3–5	3–5	3–5	3	3	3
lintzaag						
Vrijloophoek α	30–40	30–40	30–40	30–40	30–40	30–40
Spaanhoek λ	0–5	0–5	0–5	0–5	0–5	0–15
Snijsnelheid [m/min]	1200	1200	1200	500–1500	500–1500	500–1500
Tandafstand t [mm]	3	3	3	3	3	3
boreb						
Vrijloophoek α	5–10	5–10	5–10	10–12	10–12	10–16
Spaanhoek λ	3–5	3–5	3–5	3–5	3–5	2,3–3
Punthoek φ	60–110	60–110	60–110	60–90	60–90	60–90
Snijsnelheid [m/min]	30–120	30–120	30–120	50–100	50–100	50–100
Aanzet [mm/omw.]	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,2–0,5	0,2–0,5	0,1–0,3
draaien						
Vrijloophoek α	5–10	5–10	5–10	5–15	5–15	5–15
Spaanhoek λ	0–5	0–5	0–5	0–10	0–10	0–10
Instelhoek χ	45–60	45–60	45–60	45–90	45–90	45–90
Snijsnelheid [m/min]	200–750	200–750	200–750	140–500	200–500	200–500
Aanzet [mm/omw.]	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,2	0,1–0,5	0,1–0,5
frezen						
Vrijloophoek α	5–10	5–10	5–10	5–15	5–15	5–15
Spaanhoek λ	0–15	0–15	0–15	0–15	0–15	0–15
Snijsnelheid [m/min]	tot 1000	tot 1000	tot 1000	tot 1000	tot 1000	tot 1000
Aanzet [mm/omw.]	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,2	0,1–0,5	0,1–0,5

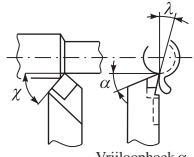
[1)] De hoeken zijn gegeven in graden.

Tabel 3.3 (vervolg)

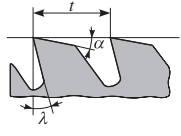
polyetheen (hoogmoleculair)	polycarbonaat	polymethylmethacrylaat (gegoten)	polymethylmethacrylaat (geëxtrudeerd)
10–15	20–40	5–10	5–10
0–15	5–15	0	0
1000–3000	1000–3000	1000–2000	1000–2000
3	5–10	3–5	3–5
30–40	20–40	30–40	30–40
0–5	0–5	0–5	0–5
500–1500	600–1000	1200	1200
3	2,5–3,5	3	3
10–12	5–8	3–8	3–8
3–5	3–5	0–4	0–4
60–90	60–90	60–90	60–90
50–100	50–120	20–60	20–60
0,2–0,5	0,2–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5
5–15	5–10	5–10	5–10
0–10	0–5	0–4	0–4
45–90	45–60	ca. 15	ca. 15
140–500	200–300	200–300	200–300
0,1–0,2	0,1–0,5	0,1–0,2	0,1–0,2
5–15	5–10	2–10	2–10
0–15	0–10	1–5	1–5
tot 1000	tot 1000	tot 1000	tot 2000
0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5

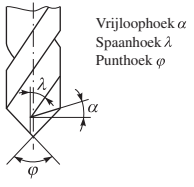


Vrijloophoek α
Spaanhoek λ



Vrijloophoek α
Spaanhoek λ
Instelhoek χ





Vrijloophoek α
Spaanhoek λ
Punthoek φ

Tabel 3.3 (vervolg)

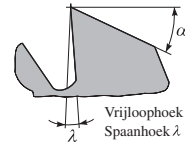
bewerkingsgegevens[1)]	polystyreen	ABS	polyamide (nylon 6)	polyacetaat	thermoplastische polyester	polyfenyleenoxyde
cirkelzaag						
Vrijloophoek α	5–10	5–10	30–40	10–15	5–10	10–15
Spaanhoek λ	0	0	5–8	0–15	0–10	0–15
Snijsnelheid [m/min]	1000	1000	tot 2000	1000 3000	2000– 2500	600– 1000
Tandafstand t [mm]	2,5	2,5	5–10	2–8	3	3
lintzaag						
Vrijloophoek α	20–30	20–30	30–40	30–40	30–40	30–40
Spaanhoek λ	0–5	0–5	5–8	0–5	0–5	0–5
Snijsnelheid [m/min]	1200	1200	800– 1000	500– 1500	1200– 2000	1200
Tandafstand t [mm]	3	3	5–10	2–8	2–3	2–3
boreb						
Vrijloophoek α	3–8	5–10	10–12	5–8	5	5
Spaanhoek λ	3–5	3–5	3–5	3–5	3–5	3–5
Punthoek φ	60–90	60–90	60–90	60–90	60–90	118
Snijsnelheid [m/min]	20–60	30–80	30–80	50–100	12–25	50–75
Aanzet [mm/omw.]	0,1–0,5	0,1–0,5	0,2–0,5	0,1–0,5	0,2	0,1–0,4
draaien						
Vrijloophoek α	5–10	8–10	8–10	5–15	5–15	5–10
Spaanhoek λ	0–2	4–5	0–10	0–5	0–5	0–5
Instelhoek χ	ca. 15	50–60	ca. 45	45–60	45–60	45–60
Snijsnelheid [m/min]	140–250	800–1000	100–200	200–500	400	200
Aanzet [mm/omw.]	0,1–0,2	0,3–0,5	0,1–0,3	0,1–0,2	0,1–0,25	0,1–0,25
frezen						
Vrijloophoek α	25–30	25–20	25–20	5–10	2–10	2–10
Spaanhoek λ	25	25	25	0–15	15	15
Snijsnelheid [m/min]	tot 1000	tot 1000	tot 1000	tot 1000	tot 2000	tot 2000
Aanzet [mm/omw.]	0,3–3,0	0,3–3,0	0,3–3,0	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5

[1)]De hoeken zijn gegeven in graden.

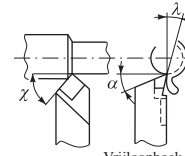
Zie de literatuurlijst op pag. E1/238 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

Tabel 3.3 (vervolg)

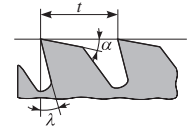
noryl	polytetrafluoretheen (teflon e.d.)	hardpapier	hardweefsel
5–10	5–10	30–45	30–45
0–10	0–15	5–8	5–8
600–1000	600–1000	3200–5000	3200–5000
3	5	4–6	4–6
30–40	30–40	30–40	30–40
0–5	0–5	5–8	5–8
1200	500–800	1500–2000	1500–2000
2–3	4–6	4–6	4–6
5	16	6–8	6–8
3–5	3–5	10	10
118	110–130	60–100	60–100
50–75	50–100	40–120	40–120
0,1–0,4	0,2–0,4	0,2–0,4	0,2–0,4
5–10	10–15	8–10	5–10
0–5	10–15	12–25	6–25
45–90	ca. 90	45	45
200	300–500	80–150	80–150
0,1–0,25	0,05–0,25	0,1–0,5	0,1–0,5
10–15	20–30	8–30	
15	10–15	20–25	20–70
tot 2000	300–500	40–50	40–50
0,1–0,5	0,1–0,5	0,5–0,8	0,4–0,6

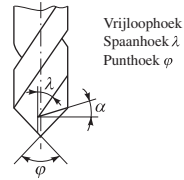


Vrijloophoek α
Spaanhoek λ



Vrijloophoek α
Spaanhoek λ
Instelhoek χ





Vrijloophoek α
Spaanhoek λ
Punthoek φ

4. Technische keramiek

4.1 Eigenschappen en toepassingen

Onder *technische keramiek* wordt hier verstaan: alle anorganische, niet-metallische materialen (uitgezonderd glas) die worden gebruikt voor technische toepassingen.

Omschrijving

Keramische materialen voor technische toepassingen worden veelal vervaardigd via poeder-processing. Hierbij wordt gebruik gemaakt van chemisch bereide poeders met sub-micron ($<10^{-6}$ m) afmetingen en een zeer hoge zuiverheid. Veel gebruikte vervaardigingsmethodes voor (technische) keramiek zijn: uniaxiaal en koud-isostatische droogpersen, (druk-)slibgieten, extrusie, spuitgieten en foliegieten.

Keramische materialen kunnen worden 'vertaaid' door de inbouw van een tweede vaste stof veelal in de vorm van een discontinue of continue vezel. Deze zogenaamde keramische matrix composieten vertonen een geheel andere breukgedrag dan hun meer brosse zogenaamde monolithische verwanten.

De materiaalgegevens in par. 4.2 hebben alleen betrekking op zuivere monolithische keramische materialen die in het algemeen polykristallijn van aard zijn. Gewoonlijk zal er alleen sprake zijn van toevoegingen van sinterhulpmiddelen of toevoegingen in verband met stabilisatie van een bepaalde fase. In voorkomende gevallen zal hiervan een specificatie worden gegeven. Het overzicht is beperkt tot de keramische materialen voor technische- en constructie-toepassingen. Er wordt niet ingegaan op materiaaleigenschappen van elektrokeramische, biokeramische en vuurvaste materialen, van op klei gebaseerde producten of via de gasfase gevormd (pyrolytisch) keramiek.

Eigenschappen technisch keramische materialen

Keramische monolithische materialen vertonen een aantal eigenschappen waardoor zij zich sterk onderscheiden van andere materialen, zoals:

- hoge hardheid;
- grote slijtvastheid;

- hoge smelt-, sublimatie-, of ontledingstemperatuur;
- chemische inertheid en goede corrosiebestendigheid;
- lage thermische uitzettingscoëfficiënt;
- gering elektrisch geleidingsvermogen;
- lage soortelijke massa/hoge specifieke sterkte, ook bij hoge temperatuur;
- lage ductiliteit, brosheid;

Keramische composietmaterialen vertonen bovendien:
- hoge bestandheid tegen plotselinge temperatuurveranderingen (thermo-shock);
- verhoogde breuktaaiheid;
- hoge betrouwbaarheid (geringe spreiding in sterkte).

In het algemeen is het voor de ontwerper of gebruiker van een keramisch onderdeel niet eenvoudig om een deskundig en objectief advies te krijgen over toepassingsmogelijkheden en beperkingen van het materiaal dat hij op het oog heeft. Het overzicht in par. 4.2 van eigenschappen wil hierin helpen.
Hierbij dient echter het volgende in acht te worden genomen. De eigenschappen van technisch keramische materialen zijn sterk afhankelijk van het uitgangspoeder, de vervaardigingsmethode en de sintering (warmtebehandeling bij ongeveer $^2/_3$ van de smelttemperatuur waardoor het poedercompact tot nagenoeg 100% van de theoretische dichtheid verdicht wordt), en de uiteindelijke microstructuur die hierdoor ontstaat.
Onder *microstructuur* wordt verstaan de kristalstructuur, kristalgrootte en -grootteverdeling, morfologie van de kristallen, porositeit, defecten, insluitingen en de oppervlaktegesteldheid. Verder is de sterkte van een keramisch materiaal statistisch bepaald. Met behulp van Weibull-statistiek kan de faalkans van een keramisch materiaal dat volgens een bepaalde methode uit een bepaald poeder is vervaardigd, voor een gegeven belasting worden vastgesteld. De *Weibull-modulus m* geeft dan de spreiding rond een gemiddelde waarde van de sterkte aan.

Toepassingen van technisch keramische materialen

Er bestaan vele toepassingen waarbij de specifieke eigenschappen die vaak ook bij hoge temperatuur behouden blijven, optimaal worden benut.

Voorbeelden: elektro- en magneto-keramiek, slijpmiddelen, bougies, motoronderdelen, beitels voor metaalbewerking, pompafdichtingen, kogellagers, bevestigingspinnen bij lassen, katalysatordragers, tandheelkundige en orthopedische implantaten, ovenbuizen, translucente buizen voor natriumlampen, schaatsen, messen, schaartjes, horloges en golfsticks.

Technische keramiek kan ook als poreus materiaal worden vervaardigd.
Toepassingen: filter voor vloeibare metalen, branderplaat, katalysatordrager, biomedisch implantaat of microfiltratie-, ul- trafiltratie- of gasscheidingsmembraan.
Specifieke toepassingen voor keramische composietmaterialen zijn eigenlijk gelijk aan de hierboven genoemde. De keuze tussen monolieten of composieten wordt bepaald door de waarschijnlijkheid van het optreden van grote trekspanningen in het materiaal, thermo-shock of betrouwbaarheid.
Een speciale toepassing vormen de *keramische deklagen* op veelal metaalsubstraten. Deze deklagen die met een dikte van 5 tot meer dan 100 micron (10^{-6} m) kunnen worden aangebracht, verhogen de hardheid, slijtvastheid, corrosie- en temperatuurbestendigheid van het substraat aanzienlijk.

4.2 Gegevens keramische materialen

Hoe te gebruiken?
Met de gegevens uit deze paragraaf is het mogelijk om een eerste selectie van materialen te maken voor een bepaalde toepassing op grond van (een combinatie van) hun eigenschappen. Met deze kennis kan de ontwerper c.q. gebruiker in spézijn voordeel doen in gesprekken met specialisten, leveranciers en fabrikanten.

Verantwoording
De gegevens zijn beperkt. Dat geldt voor het aantal gegevens per materiaal en voor de wijze van vervaardiging die vaak niet bekend is. Ook informatie over de Weibull-modulus die de spreiding in de sterkte van het materiaal geeft, is niet beschikbaar. Voor meer

Tabel 4.1 Smeltpunt en maximale toepassingstemperatuur keramische materialen [°C]

materiaal	smeltpunt (eventueel; sublimatiepunt of ontledingstemperatuur)	max. toepassingstemperatuur		
		oxiderend milieu	vacuüm	gereduceerd milieu (H_2)
Al_2O_3	2050	1900[2)]	1900	1650
AlN	2227	500[5)]	1700	700
B_4C	2450	800	2000	2000
BN	2500[1)]	1200	1900	1870
BeO	2483[1)]	1900[4)]	2100	–
MgO	2850	2200	1600	1700
β-SiAlON	1900[3)]	1400[2)]	1500[2)]	–
SiC	2760[2)]	1000–1600[2)]	1700	2300
Si_3N_4	1870[3)]	1200–1400[2)]	1500[2)]	1600[2)]
TiB_2	2871	800	≃2200	≃2000
TiC	3067	800	≃2200	–
TiN	2948	1200	1000	–
WC	2867	550	≃2200	2000
ZrO_2	2715	2200	2300	2100

[1)] Sublimeert, smelt onder N_2 bij ongeveer 3000 °C.
[2)] (Sterk) afhankelijk van de microstructuur.
[3)] Ontleedt.
[4)] Tot 800 °C in waterhoudende omgeving.
[5)] Oxideert reeds bij 180 °C o.i.v. water.

informatie wordt de lezer verwezen naar de literatuur voor deze paragraaf aan het einde van dit hoofdstuk en naar de leveranciers van keramische materialen.

Over het algemeen kan worden gesteld dat de grootste vertaaiing van de monolithische matrix wordt verkregen door de inbouw met vezels met een zo groot mogelijke lengte/diameter verhouding. Verhoging van de breuktaaiheid van het monolithische keramiek met een factor 10 en de buigsterkte met een factor 3 zijn dan mogelijk.
De eigenschappen van keramische matrix composieten zijn moeilijk in een eenvoudige tabel weer te geven. Deze zijn nl. sterk afhankelijk van de eigenschappen van de constituenten t.w. de versterkingsfase (zoals bijvoorbeeld de vezels) en de keramische matrix. Bovendien speelt het gehalte aan vezels en de oriëntatie van de vezels in het composiet een grote rol. In de meeste gevallen

zijn de keramische matrix composieten dus anisotrope materialen en de eigenschappen richtingsafhankelijk. Of het keramische composiet zich minder bros gedraagt wordt met name gedomineerd door de conditie van het vezelmatrix grensvlak.

Tabel 4.2 Dichtheid monolithische keramische materialen

materiaal	dichtheid [kg/m^3]	materiaal	dichtheid [kg/m^3]
Al_2O_3	4000	RB-SiC	2600–2700
AlN	3260	SiC Si-Sic	2900–3100
B_4C	2520	S-SiC	3000–3150
BN(hex.)	2340	HP-SiC	3200
(kub.)	3480		
BeO	3030	Si_3N_4 α	3170–3190
MgO	2800	β	3190–3200
β-SiAlON	3100	TiB_2	4520
		TiC	4250[1)]
		TiN	5400
		WC	4550
		ZrO_2	5700–6100

[1)]Bij een samenstelling Ti 55 at %, C 45 at %.

Tabel 4.3 Elektrische geleiding monolithische keramische materialen bij 20 °C[1)]

materiaal	elektrische geleiding [$\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$]	materiaal	elektrische geleiding [$\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$]
Al_2O_3	$\simeq 10^{-12}$	SiC	$10^{-1} - 10^{+3}$
AlN	$10^{-7} - 10^{-5}$	Si_3N_4	$10^{-13} - 10^{-9}$
B_4C	$10^{-2} - 10^{+2}$	TiB_2	10^{-6}
BN (hex.)	10^{-3}	TiC	10^{-6}
(kub.)	10^{-10}	TiN	10^{-6}
BeO	10^{-17}	WC	10^{-5}
MgO	10^{-6}	ZrO_2	10^{-14}
β-SiAlON	10^{-12}		

[1)] Voor alle materialen geldt: sterk afhankelijk van de microstructuur en mogelijk afhankelijk van de omgeving (atmosfeer) waarin gemeten wordt.

Tabel 4.4 Thermischeeische eigenschappen monolithische keramische materialens

materiaal		lineaire (thermische) uitzettingscoëfficiënt bij 20 °C [K^{-1}]	warmtegeleidingscoëf.[4] [W/(m·K)]		soortelijke warmte[4] [J/(mol·K)]	
			bij 20 ° C	bij 1000 ° C	bij 20° C	bij 1000 ° C
		$\times 10^{-6}$				
Al_2O_3		8–9	40–70	7	0,78–0,9	1,25
AlN		4,5	150[1]	20[1]	0,80[1]	1,57[1]
B_4C		6,0	29	26	0,95	2,21
BN		0–2,5[1]	19	15–20[1]	0,78[1]	1,95[1]
BeO		8,5	50	5	–	–
MgO		7–8	40	7	0,94	1,28
β-SiAlON		2,7–3,2	6	6	0,72	1,24
SiC	RB-SiC	4,5	50	25	–	–
	Si-SiC	4,3	120	40	0,9	–
	S-SiC	4,6	90	40	1,0	–
	HP-SiC	4,6	80	40	–	–
Si_3N_4	RB-Si_3N_4	3,0	11	8		
	S-Si_3N_4	3,4	32	18	0,7	1,26
	HP/HIP-Si_3N_4	3,2	35	20		
TiB_2		7,7–8,1	80	80	0,63	1,17
TiC		7,4–8,6[2]	20–30	40	0,54	–
TiN		8,0	20	50	0,63	–
WC		5,2–7,3[1]	40	45	0,18	0,26
ZrO_2	Mg-PSZ	9,8[3]				
	Y-PSZ	9,3[3]	4	–	0,4	0,64

[1] Sterk afhankelijk van voorkeursrichting.
[2] Afhankelijk van samenstelling.
[3] Afhankelijk van stabilisatietoestand.
[4] Voor deze materialen geldt: afhankelijk van de microstructuur, in het bijzonder de porositeit.

Tabel 4.5 Mechanische eigenschappen monolithische keramische materialen

materiaal		buigsterkte[1] [MPa]		weerstand tegen scheurgroei K_{IC}[2] bij 20 °C [MPa$\sqrt{m}$]	elasticiteits-modulus bij 20 °C[3] [GPa]	hardheid [GPa]
		bij 20°	bij 100 ° C			
Al_2O_3		500–700	400	3–4	370	18–23
AlN		350	250	3	350	12–14
B_4C		400	250	3–4	450	29
BN		60–120 (hex.)	10–20 (hex.)	–	600 (kub.)	47
BeO		210–320	–	2–3	400	–
MgO		200	150	–	320	4–6
β-SiAlON		700–800	700	5–7	230–305	15
SiC	RB-SiC	–	–	–	280	20–30
	Si-SiC	540	540	4,0	360–410	20–30
	S-SiC	450	450	4,8	400	20–30
	HP-SiC	800	620	5,5	420–480	20–30
Si_3N_4	RB-Si_3N_4	250	250	6–8	220	8–19
	S-Si_3N_4	650	250	5	290	8–19
	HP/HIP-Si_3N_4	–	–	4,1–7	310	8–19
	HP-Si_3N_4	1000	900	–	–	8–19
TiB_2		240	–	6–8	514–574	15–45
TiC		240–390	–	–	430–451	28–35
TiN		–	–	–	251	16–20
WC		1400	–	–	696	12–25
ZrO_2	Mg-PSZ	430–700	250	7,7–15	100–210[4]	14–17[5]
	Ca-PSZ	400–650	250	5,0–9,6	100–210[4]	14–17[5]
	Y-PSZ	1000–1500	250	5,8–9,0	100–210[4]	14–17[5]

[1] Zeer afhankelijk van de microstructuur, maar ook van preparaatbereiding, testgeometrie en -omstandigheden.

[2] Sterk afhankelijk van microstructuur.

[3] Afhankelijk van microstructuur en manier van bepalen.

[4] Afhankelijk van toevoegingen.

[5] Gestabiliseerd.

5 Bouwstoffen algemeen

In deze paragraaf zijn opgenomen:
- Fysische gegevens bouwstoffen (tabel 5.1, pag. E1/96)
- Gegevens bladzink (tabel 5.2, pag. E1/102).
- Gegevens Nederlands Handelslood (tabel 5.3, pag. E1/103).

Gebruikte symbolen in tabel 5.1:
ρ = dichtheid (volumieke massa) [kg/m^3]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m·K)]
c = soortelijke warmte [J/(kg·K)]
α = lineaire uitzettingscoëfficiënt [m/(m·K)]
E = elasticiteitsmodulus [N/mm^2]
μ = dampdiffusie-weerstandsgetal
ψ_H = hygroscopisch vochtgehalte [vol. %]

Drogingskrimp van nat naar evenwichtig met lucht van 17% relatieve vochtigheid en 50 °C.

Tabel 5.1 Fysische gegevens bouwstoffen

materiaalsoort	ρ [kg/m^3]	λ^* [W/(m·K)]	c [J/(kg·K)]	α [m/(m·K)]
A Metalen (zie tabel 1.6, par. 1.1)				$\times 10^{-6}$
B Natuursteen				
Basalt	2700–3200	3,5	840	5–8
Graniet	2000–3000	3,5		5–9
Kalksteen	2750	2,3		3,5–6
Hardsteen	2750	2,3		5–9
Marmer	2750	2,3		4–7
Zandsteen	2000–3000	2–4		10–13
C Baksteenmetselwerk				
Gevelklinkers	2100	0,80	840	5–7
Hardgrauw	1900	0,70		
	1700	0,65		
Rood	1500	0,56		
	1300	0,46		
D Kalkzandsteenmetselwerk				
Kalkzandsteen	2000	1,0		10–12
E Grindbeton				
Verdicht gewapend	2500	1,9	840	12
Verdicht ongewapend	2400	1,75		
Niet verdicht gewapend	2300	1,4		
Niet verdicht ongewapend	2200	1,3		
Cassetteplaat	2500	1,9		
F Lichte betonsoorten				
Algemene indicatie	1900	0,93	840	
	1600	0,70		
	1300	0,46		
	1000	0,35		
	700	0,23		
	500	0,17		
	300	0,12		
	200	0,08		
Bimsbeton	700–1000	0,23–0,35		5,5–7
	1000–1400	0,35–0,50		5,5–7
Cassetteplaat	1600	0,70		–
Schuimbeton	220	0,07		
	400	0,11		4–6,5
	650	0,20		
Cellenbeton	1300	0,52	840	
	1000	0,35		10–12
	700	0,23		
	400	0,17		
Houtbeton	450	0,13	840	–

Tabel 5.1 (vervolg)

materiaalsoort	E [N/mm^2]	μ [–]	Ψ_H[vol%] $\varphi = 40\%$	$\varphi = 65\%$	$\varphi = 95\%$	drogings krimp %
A Metalen (zie tabel 1.6, par. 1.1)	$\times 10^{-6}$					
B Natuursteen						
Basalt	52–115					0,23–0,50
Graniet	30					0,06–0,15
Kalksteen						
Hardsteen	60	∞	0	0	0–	0,04–0,26
Marmer						
Zandsteen	10–50					0,06–2,00
C Baksteenmetselwerk						
Gevelklinkers	5–10	28	0,1	0,15	0,30	0,05–0,20
Hardgrauw	4–8	13				
Rood	3–7	9	0,2–0,3	0,3–0,4	0,8–1,1	0,15–0,30
	2–6	8				
	1–5	7				
D Kalkzandsteenmetselwerk						
Kalkzandsteen	7–10	12	2	4	8–12	0,25–0,70
E Grindbeton						
Verdicht gewapend		33				
Verdicht ongewapend		29				
Niet verdicht gewapend	5–50	26	2–3	3–4	8	0,2–0,8
Niet verdicht ongewapend		23				
Cassetteplaat		20				
F Lichte betonsoorten						
Algemene indicatie		14 8 7 5 4 64 3				
Bimsbeton	2–15	5–6	2	2,5	7	0,5–0,8
	2–15	6–11	2	2,5	7	0,5–0,8
Cassetteplaat	10–15	8	2	2,5	5	0,6
Schuimbeton	8–20	5	0,5–1	1–2	2–4	0,3–0,9
			–	–	–	0,5–1,5
		7–9	–	–	–	
Cellenbeton	1,5–4,5	5–7	–	–	–	0,5–1,5
		5	–	–	–	0,5–1,5
		4	–	–	–	
Houtbeton	–	5	–	–	–	–

Tabel 5.1 (vervolg)

materiaalsoort	ρ [kg/m^3]	λ^* [W/(m·K)]	c [J/(kg·K)]	α [m/(m·K)]
				$\times 10^{-6}$
G Andere anorganische materialen				
Gipsplaten	800–1400	0,23–0,46		–
Glas (spiegelglas en vensterglas)	2500	0,8	– 840	8–9
Minerale toeslag voor beton	50–800	0,04–0,23		–
Minerale wol met cement gebonden	300–400	0,12–0,14		–
H Pleisterlagen				
Cementpleister	1900	0,93		
Kalkpleister	1600	0,70	–840	10–12
Gipspleister	1300	0,52		
J Tegels				
Hardgebakken tegels	2000	1,2	840	5–7
Plavuizen	1700	0,18	840	5–7
K Organische materialen al dan nit gebonden (met uitzondering van houtproducten en kunststoffen)				
Linoleum	1200	0,17		–
Rubber	12–1500	0,17–0,29	–1470	–
Geëxpandeerde eboniet	100	0,035		–
L Houtproducten				
Hardhout	800	0,17[2)]	1880	4[1)]
Naaldhout	550	0,14[2)]	1880	30[2)]
Triplex	700	0,17	1880	–
Hardboard	1000	0,29	1680	–
Zachtboard	250–300	0,08	2100	–
Spaanplaat	450	0,10		–
	600	0,15	– 1880	–
	1000	0,29		–
OSB-plaat	650	0,14	1880	–
MDF-plaat	750	0,17	1700	–

Tabel 5.1 (vervolg)

materiaalsoort	E [N/mm^2]	μ [–]	Ψ_H[vol%]			drogings krimp ‰
			$\varphi = 40\%$	$\varphi = 65\%$	$\varphi = 95\%$	
	$\times 10^3$					
G Andere anorganische materialen						
Gipsplaten	–	6	<0,1	<0,1	3,5	0,30
Glas (spiegelglas en vensterglas)	70	∞	0	0	0	0
Minerale toeslag voor beton	–	–	–	–	–	–
Minerale wol met cement gebonden	–	–	–	–	–	–
H pleisterlagen						
Cementpleister	6–15	15–22	0,5	1	4	0,3–0,7
Kalkpleister	7–11	9–14	–	–	–	–
Gipspleister	7–11	–	–	–	3	–
J Tegels						
Hardgebakken tegels	0,6–0,9	28	< 0,5	< 0,8	< 1,0	0,05–0,15
plavuizen	0,6–0,9	23	< 0,5	< 0,8	< 1,0	0,05–0,15
K Organische materialen al dan niet gebonden (met uitzondering van houtproducten en kunststoffen)						
Linoleum	–	$1{,}8 \cdot 10^3$	0	0	–	–
Rubber	–	$9 \cdot 10^3$	0	0	0	–
Geëxpandeerde eboniet	–	$(5–9) \cdot 10^3$	–	–	–	–
L Houtproducten						
Hardhout	8,5–10[1]	[3]	–	4	–	3–4[1]
	0,4–1[2]		2	4–5	10–12	40–90[2]
Naaldhout	8–10[1]		2–3	–	12–15	3–4[1]
	0,4–0,6[2]		–		–	30–70[2]
Triplex	–	50	2–3	4–5	12–15	–
Hardboard	–	12	3–5	4–7,5	10–15	50–80
Zachtboard	–	4	1,5	2,5	9	–
Spaanplaat	–	12–14	2	3	–	–
	–				–	–
	–				7–9	–
OSB-plaat	3–4	–	2–4	4–8	10–12	–
MDF-Plaat	2–4	–	2–3	4–6	7–12	–

Tabel 5.1 (vervolg)

meteriaalsoort	ρ [kg/m^3]	λ^* [W/(m·K)]	c [J/(kg·K)]	α [m/(m·k)]
				$\times 10^{-6}$
M Harde kunststoffen				
Polyesterplaat (met glasvezels versterkt)	1200			25–100
Polyetheen	920–950			200
Polymethlmethacrylaat	1200	0,2	1470	80–130
Polypropeen	900			110
Polyvinylchloride	1400			60–90
N Isolatiematerialen				
Mineral producten				
Glaswol	35–250	0,04		–
Steenwol	35–250	0,04		–
Schuimglas	125–135	0,045	840	8–9
Perlite	80–100	0,05		–
Gebitumineerd perlite	250	0,65		–
Geëxpandeerde klei	340–425	0,00–0,10		–
Organische producten				
Geëxpandeerde kurk	100–200	0,041–0,046	1760	–
Riet- en strovezelplaat	200-400	0,80–0,12	2100	–
Vlasscjheven	300–700	0,09–0,17	1880	–
Houtwolcement	350-700	0,09–0,21	1470	–
Houtvezelmagnesiet	450–500	0,10-0,12	1470	–
				–
Kunststofschuimen				
Polystyreenschuim geëxpandeered	20–40	0,040	–	–
Polystyreenschuim geëxtrudeerd	30–40	0,040	1470	40–90
Polystyreenschuim gecacheerd	30–60	0,027–0,037		90
PIR gecacheerd	30	0,035		–
Resolschuim	30	0,025	1470	–
Achteraf geschuimde spouw	20–100	0,045		–

* Een correctiefactor voor normale vochtimvloeden is inde waarden verweket. Indien de materialen in omstandigheden van hoger vochtgehalte worden toegepast zal de isolateiwaarde afnemen.

Tabel 5.1 (vervolg)

materiaalsoort	E [N/mm^2]	μ [–]	Ψ_H[vol%]			drogings krimp ‰
			$\varphi = 40\%$	$\varphi = 65\%$	$\varphi = 95\%$	
	$\times 10^3$					
M Harde kunststoffen						
Polyesterplaat	5–50	$>9\cdot10^3$	0	0	0	–
(met glasvezels versterkt)	0,1–0,9		0	0	0	–
Polyetheen	1,4–4,5		0	0	0	–
Polymethlmethacrylaat	–		0	0	0	–
Polypropeen	1,5–3,5		0	0	0	–
Polyvinylchloride						
N Isolatiematerialen						
Mineral producten						
Glaswol	–	1–2	$< 0,1$	$< 0,1$	$< 0,1$	–
Steenwol	–	1–22	$< 0,1$	$< 0,1$	$< 0,1$	–
Schuimglas	1–1,2	2–40·10^3	0,	0,	0,	–
Perlite	–	6	–	–	–	0
Gebitumineerd perlite	–	7	–	–	–	–
Geëxpandeerde klei	–	–	–	–	–	–
Organische producten						
Geëxpandeerde kurk	–	5–30	0,6	1,2	3	–
Riet- en strovezelplaat	–	3	2	3	5	–
Vlasscheven	0,4–2,8	8–46	2	3	7–9	3,5
Houtwolcement	–	4–10	1–2	2–3	4–7	1–3,6
Houtvezelmagnesiet	–	4–10		5,5	10–15	–
Kunststofschuimen						
Polystyreenschuim geëxpandeered	–	25	0	0	$< 0,2$	–
Polystyreenschuim geëxtrudeerd	–	20–100	0	0	0	–
Polyurethaanschuim gecacheerd	–	60	0	0	$< 0,4$	–
PIR gecacheerd	–	60	–	–	–	–
Resolschuim	–	40	–	–	–	–
Achteraf geschuimde spouw	–	–	0	0	–	–

[1] In de richting van de vezels.
[2] Loodrecht op de vezels
[3] Over de μ-waarden van houtproducten is nog weinig bekend. Bovendien hangt deze waarde sterk af van het vochtgehalte. Het lijkt daarom nein verantwoord waarden te geven

Tabel 5.2 Gegevens bladen, rollen en stroken bladzink (titaanzink)

dikte [mm]	tolerantie [mm]	theoretisch gewicht [N/m^2]	oude aanduiding [no.]
0,50		36,0	10
0,60		43,2	11
0,65[1)]		46,8	12
0,75	$\pm 0,03$	54,0	13
0,80[1)]		57,6	14
0,95		68,4	15
1,10[1)]		79,2	16

afmetingen titaanzink

- Bladen: 2000 × 1000 mm, 2250 × 1000 mm, 3000 × 1000 mm
- Rollen: inwendige diameter 500 mm, breedte 1000 mm (gewicht 2500 N)
- Stroken: afmetingen op aanvraag, max. breedte 1000 mm, standaard lengte 3000 mm

toepassingen titaanzink

- Standaard bakgoten: type B30, B37, B44, B50, B55
- Standaard mastgoten: type M30, M37, M44
- Lengte goten standaard 3000 mm, dikte 0,80 mm (B30 en M30 op aanvraag); goten inclusief hulpstukken leverbaar
- Standaard HWA-buizen: diameter 70 mm, 80 mm, 100 mm; standaardlengte 3000 mm, dikte 0,65 mm
- Dakbedekkingen uitgevoerd o.a. als roevensysteem of felssysteem.
- Op aanvraag leverbaar zijn diverse profielen en diverse hulpstukken.

[1)] Standaarddikten.

Tabel 5.3 Gegevens Nederlands Handelslood (NHL)

type nr.		min. wals-dikte [mm]	theor. dikte [mm]	gewicht[1)] [N/m^2]	gewicht per rol [N]	handels-lengte [m]	Kleur code
NHL	15	1,26	1,32	150	600	4,0	groen
NHL	18	1,51	1,59	180	720	4,0	oranje
NHL	20	1,67	1,76	200	1000	5,0	blauw
NHL	25	2,09	2,20	250	1000	4,0	ood
NHL	30	2,50	2,64	300	1000	3,3	bruin
NHL	35	2,93	3,08	350	1000	2,8	paars
NHL	40	3,35	3,53	400	1000	2,5	zwart

[1)] Rolbreedte 1 m. Bron: *BDA-Dakboekje* 2000.

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

Tabel 5.4 Toepassingen Nederlands Handelslood (NHL)

toepassing	normaal	zwaar
voet-, stel- en kozijnlood	type 18	type 20
loketten	type 20	type 25
hemelwaterafvoeren		
-plakplaat	type 20	type 20
-uitloop	type 25	type 25
dakbedekking/goten	type 35	type 35

normaal = – gemiddelde kwaliteitseisen;
– normale atmosferische omstandigheden;
– normale constructies;
– bijzondere vlakken
zwaar = – hoge duurzaamheidseisen;
– ongunstige atmosferische omstandigheden
– ingewikkelde toepassingen
– grote naar de zon gekeerde vlakken

6 Hout

6.1 Voorschriften

KVH 1980. Kwaliteitseisen voor hout bestaande uit:
NEN 5461. Gezaagd hout en rondhout – Algemeen gedeelte.
NEN 5466. Houtsoorten Europees vuren en Europees grenen[2)]
A1. Houtsoort Europees lariks
NEN 5468. Houtsoort Europees douglas.[1)]
NEN 5470. Houtsoort oregon pine.[1)]

NEN 5471. Houtsoort western red cedar.[3)]
NEN 5476. Houtsoort Europees eiken – ongekantrecht. [1)]
NEN 5477. Houtsoort Europees eiken – gekantrecht.[1)]
NEN 5478. Houtsoort Europees beuken – ongekantrecht.[1)]
NEN 5479. Houtsoort Europees beuken – gekantrecht.[1)]
NEN 5480. Houtsoort azobé.[1)]
NEN 5481. Houtsoort merbau.[4)]
NEN 5482. Houtsoort iroko.[5)]
NEN 5483. Houtsoort rode meranti.[1)]
NEN 5484. Houtsoort red lauan.[1)]
NEN 5491. Heipalen – Europees naaldhout.[1)]
NEN 5492. Rondhoutpalen.[1)]
NEN 1015. Benamingen van handelshoutsoorten.

[1)] Handelsmaten volgens opgave leverancier.
[2)] Handelsmaten volgens tabel 6.3.
[3)] Handelsmaten volgens tabel 6.4.
[4)] Handelsmaten volgens tabel 6.5.
[5)] Handelsmaten volgens tabel 6.6.

KVT '95. Kwaliteit van houten gevelelementen.
NEN 6766. TGB 1990–Houtconstructie-basiseisen.

Verduurzaming

NEN 2907. Houtverduurzaming. Bescherming door middel van bestrijken en bespuiten met de hand.
NEN 2908. Houtverduurzaming. Sproeien in een cabine.
NEN 2909. Houtverduurzaming. Dompelen.
NEN 2910. Houtverduurzaming. Drenken.
NEN 2911. Houtverduurzaming. Dompelen gevolgd door diffusie.
NEN 2912. Houtverduurzaming. Vacuümmethode.
NEN 2913. Houtverduurzaming. Vacuümm- en drukmethode. Behandeling met creosootolie (creosoteren).
NEN 2914. Houtverduurzaming. Vacuüm- en drukmethode. Behandeling met in water oplosbare of met water mengbare middelen, niet afgeleid van creosootolie.
NEN 2930. Houtverduurzaming-, vacuüm- en drukmethode. Behandeling met middelen anders dan creosootolie.

In deze normen is uitgebreide informatie opgenomen. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* (NEN) te Delft.

Tabel 6.1 Tijd waarin hout (kernhout) goed blijft onder verschillende omstandigheden [jaar]

Duurzaamheidsklasse	Hout in voortdurende aanraking met *vochtige grond* zonder dat deze grond onder water staat, terwijl het hout niet is verduurzaamd of anders is beschermd.	Hout blootgesteld aan *weer en wind* en niet verduurzaamd is of anders door vernis of verf e.d. beschermd.	Verduurzaamd gevernist of geverfd hout.
I (zeer duurzaam)	meer dan 25	50	onbeperkt
II (duurzaam)	15–25	40–50	onbeperkt
III (matig duurzaam)	10–15	25–40	onbeperkt
IV (weinig duurzaam)	5–10	12–25	tientallen
V (zeer weinig duurzaam)	minder dan 5	6–12	13–20

6.2 Houtsoorten

Tabel 6.2 Eigenschappen en toepassingen van houtsoorten

soort[2)]	groeigebied	hoofdkleur (kernhout)	volumieke massa[3)] [kg/m^3]	algemene kenmerken	duur-zaam-heids-klasse[4)]	toepassing
Europese naaldhoutsoorten						
Dennen	M. en Z. Europa	grauwwit	450	Zacht taai veerkrachtig, geen hars, harde kwasten, zware maten.	IV	Balklagen kapconstructies. Funderingen en waterwerk mits onder water blijvend.
Grenen, Europees	N. Europa en Siberië	donker geelachtig	510	Zacht, vrij vast, harsrijk, rode kwasten.	IV	Veel toegepast voor allerlei buitenwerk, mits in de verf; heipalen, masthout, dwarsliggers.
Lariks (Lerken of lorken)	Europa vooral bergstreken. N-Amerika.	roodbruin	530–580	Zacht maar vast vrij harsrijk weinig neiging tot werken.	III	Water- en scheepsbouw, stophout en dwarsliggers. Bouwhout. Binnen- en buitenwerk.
Taxus	Midden-Europa West-Azië en Noord-Amerika.	roserood tot bruinrood	750	Vast en zeer fijndradig.		Meubelindustrie en machinebouw. Sportartikelen, muziekinstrumenten.
Vuren, Europees	Geheel Europa, hoofdzakelijk Midden- en Noord-.	witgeel	460	Zacht vrij vast weinig hars en bruine kwasten.	IV	Het meest toegepast. Heipalen allerlei binnenwerk buitenwerk in de verf. Bekistingen, stelhout en emballage. Scheepsbouw (binnenbetimmering sloepen en buikdenning).

Amerikaanse naaldhoutsoorten						
Grenen, Amerikaans (Caribbean pine, Carolina pine)	Geheel N. Amerika vooral Z.O. der Ver. Staten, Centr. Amerika	geelbruin tot oranjebruin	710	Zacht, zeer harsrijk, dicht, sterk, zware maten	III	Grof: voor waterwerken. Fijn: Buiten- en binnentimmerwerk; scheepsdekken; meubelen, vloeren.
Hemlock	N.O. en N.W. Ver. Staten, Z.O. Canada	witachtig tot rose	450	Zacht, weinig harsrijk, goed te bewerken,	IV	Ruw timmer- en schoeiingswerk, koffers, kisten, koelkasten. Bouwhout binnenwerk (sauna's).
Oregon-pine (Inlands douglas)	W. van N. Amerika en Canada	roodgeel	530	Zacht, tamelijk harsrijk, weinig werken, slijtvast, zware maten.	III	Voor waterwerk onder water. Fijnere kwaliteit: Riftvloeren lijst- en paneelwerken, triplex, ladderbomen. Bouwhout binnen- en buitenwerk.
Californian Redwood	N.W. van N. Amerika (Californië Oregon)	gestreept matrood	340–450	Zeer zacht, weinig hars, rechtdradig, weinig werken, zeer grote afmetingen.	II	Binnen- en buitenwerk, grote panelen, tafelbladen en ander meubelwerk, laboratoria en chemische industrie.
Vuren, Amerikaans (Sitka spruce)	N.W. Amerika W. Canada	creme-wit tot lichtbruin	430	Rechtdradig, sterk, vast, taai.	IV	Scheepsbouw (kano's, betimmeringen, dekken). Vliegtuigindustrie, roeiriemen. Klankborden.
Western Red Cedar	W.N. Amerika	bruin	370	Zacht, sterk, rechtdradig.	II	Bouwhout. Binnen- en buitenwerk.

Tabel 6.2 (vervolg)

soort[2)]	groeigebied	hoofdkleur (kernhout)	volumieke massa[3)] [kg/m^3]	algemene kenmerken	duur-zaam-heids-klasse[4)]	toepassing
overige naaldhoutsoorten						
Kauri (Agathis)	Nieuw-Zeeland. Z.O. Azië, Queensland	lichtgeel tot bruinachtig	450–600	Weinig harsrijk, zeer rechtdradig, zacht, goed te verwerken.	IV	Voor alle soorten timmerwerk.
Alerce	Chili, Patagonië	roodbruin tot oranjeachtig	420	Matig hard, elastisch, rechtdradig werkt weinig.	II	Bouwhout binnen- en buitenwerk, scheepsbouw, honingvaten, koelkasten.
Cypressen, Amerikaans	Z.O. der Ver. Staten, Mexico	geelrood	400–600	Zacht, vast, harsrijk en duurzaam, rechtdradig.		Komt in uiterlijk en in toepassing overeen met pitch-pine.
Parana Pine	Brazilië, Argentinië	lichtbruingeelachtig	480–640	Vrij zacht, rechtdradig, prima te verwerken.	IV	Bouwhout binnenwerk, gereedschapsstelen, meelstortkokers.
loofhoutsoorten						
Azijnhout	Z. Europa, N. Afrika	bruin	800–960	Hard, vast, zwaar en warrig.	III	Heiblokken, houten hamers, houten kammen in raderwerk, hak- en stansblokken.
Berken	Midden en N. Europa, O. van N. Amerika	wit	650	Zacht en taai met enige glans, fijne nerf.	V	Snijwerk, meubels en binnentimmerwerk, vooral betere triplexsoorten, sportartikelen.
Beuken	Geheel Europa	rosebruin	700	Vrij hard, fijn van nerf, goed te verwerken.	V	Gereedschappen, huish. art., dwarsliggers, schoolmeubelen, etc. Gebogen en gestoomd voor meubelen. Draaiwerk.

Eiken	Geheel Europa, West-Azië, Amerika, Japan	bruingeel	700	Hard, vast, sterk, duurzaam, duidelijke vaten.	II/ III	Waterwerk, dwarsliggers, scheepsbouw, parketvloeren. Buitentimmerwerk. Kuiperij meubelen en zeer vele andere doeleinden.
Elzen	Geheel Europa, vooral Midden en Zuid	bruinrood	530	Zacht, vast en matig sterk.	V	Voor massa-triplex fabricage, lucifers en goedkope meubelen rijshout, borstelhout, houtwarenindustrie.
Esdoorn	Europa, N. Amerika Klein-Azië	wit-geel	610 (Eur.) 530–720 (Am.)	Hard, dicht en fijn van nerf; soms met veel pitjes = vogeloogahorn.	IV	Winkel- en kantoorbetimmering, meubelen. Parketvloeren. Triplex fineer, huish. art., sportart. Muziekinstrumenten.
Essen	Geheel Europa, N. Amerika, Japan	witgeel	530–830	Hard, zeer taai en veerkrachtig, moeilijk te splijten.	V	Wagenmakerij. Gereedschapsstelen, roeiriemen en turntoestellen, laddersporten, sleden, etc.
Haagbeuken	Midden-Europa Zuid-Europa West-Azië	grijs-wit	750	Zeer hard en moeilijk splijtbaar.	II/ III	Stoelen, schoenleesten, slagersblokken, houten hamers tandwielen, katrollen, etc.
Hickory	O. der Ver. Staten	donkergeel-bruin	780–850	Hard, sterk en zéér taai.	IV	Rijtuig- en wagenmakerij. Ski's, tuinart. en verder waar taaiheid belangrijk is.
Iepen	Geheel Europa, N. Amerika Japan	roodbruin	540	Hard, taai vast, trekvrij en moeilijk te splijten.	IV	Scheepsbouw voor gebogen onderdelen leuningwrongen meubels, wagenmakerij, model- en draaiwerk, landb. gereedschap.
Kastanje, Europees	Z. Eur., N. Afr., K.I. Azië O.N-Amerika	bruin	540	Lijkt zeer veel op Eiken, doch spiegels ontbreken.	II	Meubelindustrie, lijsten, buitendeuren, carosseriebetimmeringen.
Linden	Europa N. Amerika	geelwit tot lichtbruin	540 (Eur.) 420 (Am.)	Zeer zacht taai, fijn van nerf, weinig werken.	V	Snij- en beeldhouwwerk, tekenborden, muziekinstrumenten, keukengerei.

Tabel 6.2 (vervolg)

soort[2)]	groeigebied	hoofdkleur (kernhout)	volumieke massa[3)] [kg/m^3]	algemene kenmerken	duur-zaam-heids-klasse[4)]	toepassing
Noten	Geheel Europa, N. Amerika, Canada KI. Azië	grijs grijsbruin of paarsachtig bruin	610–770	Hard, mooi donkerbruin gevlamd, duurzaam; iets stug in het bewerken, trekvrij.	III	Fijn timmer- en beeldhouwwerk; meubelen; geweerkolven en laden, wortelnoten-fineer.
Peren	Midden-en Z. Europa	roodbruin	700	Hard, fijne nerf, moeilijk te splijten.	IV	Fijne meubelen, steekwerk en tekengereedschap.
Platanen	Midden-en Z. Europa, N. Amerika	bruinrood tot lichtbruin	620 (Eur.) 560 (Am.)	Hard, moeilijk te splijten, goed te bewerken.	V	Houtwaren, stoffeerregels, meubelen.
Populieren, witte (aspen, abelen)	Geheel Europa N-Amerika	grijsachtig wit	450	Zeer zacht, fijn van nerf.	V	Klompen en lucifers lichte emballage, autovloeren, keukengerei, speelgoed tekenborden etc.
Pruimen en kersen	Midden-en Z. Europa	paarsbruin resp. bruingeel	610	Hard, zeer fijne samenstelling.	III	Fijn sierwerk en luxe meubelen.
Robinia	Europa, Canada	geelgroen tot bruingroen	540–860	Tamelijk hard, zeer vast, moeilijk te splijten, weinig neiging tot werken	II	Wagenmakerij. Laddersporten.
Wilgen	Europa, Amerika M. Azië	lichtbruin	450	Zeer zacht, fijn van nerf.	V	Klompen, mandenmakerij, rijshout stelen.
tropisch loofhout: voornaamste Indonesische en Aziatische soorten						
Bangkirai	Kalimantan	licht- tot diepbruin	900	Hard, vast, slijtvast, bestand tegen witte mieren.	I	Waterbouwkundige constructies, scheepsdekken, klokkenstoelen, kuipen voor de chemische industrie, bedrijfsvloeren.
Keroewing (Gurjun)	Birma India, Sri Lanka	grijs, roodachtig bruin	740–870	Goed te bewerken, eenmaal goed gedroogd werkt het weinig.	III	Constructiewerken brug- en havenwerken, bedrijfsvloeren.

Keroewing	Maleisië, Sumatra, Kalimantan, Filippijnen	grijsbruin	740–870	Matig grof van nerf, vrij zwaar, goed te bewerken.	III	Constructiewerken, brug- en havenwerken, wagon-, scheeps- en bedrijfsvloeren, dwarsliggers.
Keroewing (Yang)	Thailand	roodachtig bruin	740–870	Bevat vrij veel harsachtige olie, dus niet gemakkelijk te schilderen, vrij vast, hard en sterk.	III	Constructiewerken brug- en havenwerken, wagon-, scheeps- en bedrijfsvloeren, dwarsliggers, kozijnen en ramen.
Meranti, donkerrood	Maleisië Indonesië Thailand	rozerood tot purperachtig roodbruin	580–770	Matig grof van nerf, vrij vast en sterk, goed te bewerken.	III/ II	Binnen- en buitentimmerwerk, kozijnen, plinten, carrosseriebouw.
Merbau	Indonesië, Z.O. Azië	bruingrijs tot donker roodbruin	800–900	Hard, vast, sterk.	II	Waterweken, dwarsliggers, betimmeringen, meubels, kozijnen, vloeren.
Ramin	Maleisië	strogeel	670	Hard en sterk, matig fijne nerf.	V	Meubelen, lijstwerk, traptreden, speelgoed.
Satijnhout, Indisch	India, Sri Lanka	kanariegeel	880–980	Hard en zeer fijn van nerf. Hoge satijnglans.	II	Fijne betimmering, luxe-meubelen, muziekinstrumenten.
Teak (Java teak)	Java	diepbruin tot licht goudbruin	630–680	Hard, vast, slijtvast, kalkhoudend, bestand tegen witte mieren.	I	Winkelpuien, voordeuren, fijn binnentimmerwerk, scheeps- en wagonbouw, meubelen, waterwerk, straatblokjes, zuivel- en chem. industrie, scheepsdekken en voor alle doeleinden, waar geen bijzondere taaiheid of buigzaamheid verlangd wordt.
Teak (Burma teak)	Birma	diepbruin	630–680	Egaler kleur dan Java Teak, iets zachter niet kalkhoudend.	I	

Tabel 6.2 (vervolg)

soort[2)]	groeigebied	hoofdkleur (kernhout)	volumieke massa[3)] [kg/m^3]	algemene kenmerken	duurzaamheidsklasse[4)]	toepassing
tropisch loofhout: voornaamste West-Indische en Zuid-Amerikaanse soorten						
Basralocus	Suriname Frans Guyana	chocoladekleurig tot grijsbruin	700–900	Hard en vast, lastig te bewerken, bestand tegen paalworm, zware maten.	I	Waterwerken, dwarsliggers wagonbouw, bedrijfs- en parketvloeren, puibetimmeringen. Sluisdeuren.
Bolletrie	N. van Z. Amerika	donker roodbruin	900–1050	Zeer hard en gelijkmatig, dicht van nerf.		Fijn timmerwerk, strijkstokken, biljartkeus
Bruinhart	Suriname, Brazilië Frans en Brits Guyana	diepbruin	850–1050	Zeer hard, vast, rechtdradig, slijtvast.	I	Parketvloeren, vitrines, wandelstokken, constructiewerk bij waterbouw, scheepsbouw.
Ceder	Centraal Amerika	roodachtig bruin	370–650	Zacht licht en met aromatische geur.	II	Betimmering, knutselwerk, sigarenkisten, jachtbouw.
Demerara Groenhart	N. van Z. Amerika en Suriname	bruingroen	1020	Zeer hard en dicht, goed te bewerken, bestand tegen paalworm.	I	Zeeweringen, sluizen, remmingwerk, bedrijfsvloeren.
Krappa, Amerikaans	Suriname, Guyana	roodbruin	570–740	Vrij hard, sterk, duurzaam.	III	Parketvloeren, betimmeringen, meubels, kano's, scheepsdekjes.
Letterhout	Ned. Antillen, Suriname	roodpaars gevlekt	1250	Zeer hard, dicht en vast.	III	Siermeubelen, vitrines, luxeartikelen wandelstokken.
Mahonie, Amerikaans	Centraal Amerika Antillen	roodbruin gestreept en bebloemd	540	Vrij hard, sierlijk getekend en gevlamd, goed te bewerken en te politoeren.	II	Fijne betimmering, sier- en meubelwerk, jachtbouw. Fineerwerk.
Manbarklak	Suriname	grijsbruin	980–1140	Zeer hard, taai, zeer vast, stugen duurzaam. Zeer lastig te bewerken. Bestand tegen paalworm.	II	Waterwerken, steigers, meerpalen.
Mora	Centraal Amerika Brazilië	roodbruin tot grijsachtig	850–1170	Vrij hard en dicht.	II	Waterwerken, maar ook voor meubel-industrie als imitatie- mahonie constructiehout.

Peroba de Campos	Brazilië	rose beige tot goudbruin	690–830	Zwaar, vast, hard, sterk en taai.	I	Voor vrijwel alle constructiewerk, carosserie, wagon- en scheepsbouwtoepassingen, kozijnen en ramen, broeikassen, vloeren, chem. industrie.
Pokhout	W.I. Archipel	groenzwart geel spint	1150–1350	Zeer hard en dicht moeilijk te bewerken voelt vettig aan; wordt per gewicht verkocht.	I	Schijven voor rol- en blokwerk; voering voor kussenblokken; riemschijven, kegelballen.
Purperhart	Suriname, Brazilië	paars blauw	950–1000	Zeer hard, taai, sterk en dicht.	I	Fijne betimmering, vitrines, meubels, sierhout.
Bahia rozehout	Brazilië	dieprood gestreept	900–1000	Zeer hard en vast.		Meubels, sierwerk, edelfineer
Walaba	Suriname, Guyana's	donkerbruin tot steenrood	900	Sterk en zeer duurzaam, niet bestand tegen paalwormaantasting.	I	Funderingshout, telefoonpalen, constructiehout, havenwerken, scheepsbouw.
tropisch loofhout: Afrikaanse soorten						
Tola branca	Tropisch W-Afrika	geelachtig rosebruin	510	Matig hard, vrij sterk, rechtdradig prima te verwerken, peperachtige geur.	II	Bouwhout buiten- en binnenwerk, carosseriebouw (binnen- en buitenwerk vloeren), puibetimmeringen.
Afzelia, Afrikaans (Doussié)	Tropisch W. Afrika	lichtbruin, later donker bruin	730–900	Vrij zwwar en vrij hard, grove nerf, trekt zeer weinig. Termietenbestendig.	I	Constructiehout voor woningen, loodsen, schepen, wagon- en carrosseriebouw puien, brugdekken, chemische industrie, etc.
Avodiré	Tropisch W. Afrika	geelachtig met satijn glans	540	Matig hard, fijne nerf, goed te bewerken.	III	Binnenbetimmeringen, meubelen.
Azobë	Tropisch W. Afrika	chocolade bruin	940–1100	Zwaar, hard, zeer sterk, grove nerf, zware kruisdraad, werkt weinig, zwaar te bewerken. Paalwormbestendig.	I	Constructiehout voor bouw- en waterwerken bruggen en scheepswerven. Vlechtwerken.

Tabel 6.2 (vervolg)

soort[2]	groeigebied	hoofdkleur (kernhout)	volumieke massa[3] [kg/m^3]	algemene kenmerken	duurzaamheidsklasse[4]	toepassing
Bilinga	Tropisch W. Afrika	citroengeel, later oranjeachtig	660–900	Zwaar tot matig zwaar, hard tot vrij hard en sterk. In zekere mate bestand tegen paalwormaantasting.	I	Waterbouwkundige objecten, carrosseriebouw scheepsbouw industrievloeren.
Iroko	Tropisch Oost en West Afrika	geelachtig tot goudbruin	640	Matig hard matig zwaar, met vrij grove nerf. Trekt en werkt weinig. Termietenbestendig.	I	Kozijnen, binnen- en buitendeuren, ramen, trappenhuizen, laboratoriumtafels, puibetimmeringen.
Mahonie Afrikaans (Sapeli, Sipo, Tiama e.d.)	Tropisch W. Afrika	rose tot roodbruin	550–750	Vrij hard, matig zwaar, soms kruisdradig, goed te verwerken.	II	Meubelen, betimmeringen en scheepsbouw.
Okoumë	West Afrika	roserood tot lichtrood	450	Vrij zacht, fijn van nerf vaak kruisdraad.	IV	Fijner timmerwerk, meubelen, triplexfineer, sigarenkisten.
Zebrano	Tropisch W. Afrika	geel en bruin gestreept	700–850	Vrij hard, matig grove tot fijne nerf.	II	Winkelbetimmering, toonkamers, sierhout, fineer triplex.
tropisch loofhout: A stralische soorten						
Jarrah	W. Australië	bruinrood	800	Hard, fijn, vast en duurzaam, zware maten.	I	Waterwerken, houtbestrating, vloeren en meubelhout.
Karri	W. Australië	bruinrood	880	Hard, minder fijn van nerf, maar ook duurzaam en zware maten.	II	Waterwerken, brugplanken, vloeren.

[1] Voor meer informatie, zie *Houtvademecum* (publicatie Centrum Hout/HI TNO).
[2] Genormaliseerde namen volgens NEN 1015.
[3] Gemiddelde volumieke massa bij een vochtgehalte van 12% (m/m).
[4] Zie voor verklaring tabel 6.1.

6.3 Naald- en loofhout (afmetingen)

Tabel 6.3 Gangbare handelsmaten voor Europees vuren en Europees grenen [mm]

dikte *d*	breedte *b*												
	38	50	63	75	100	125	150	160	175	200	225	250	275
16				×	×	×							
19				×	×	×	×		×				
22				×	×	×	×		×	×	×		
25				×	×	×	×		×	×	×		
32					×	×	×		×	×	×		
38		×[2]			×	×[1]	×[1]		×[2]	×[2]	×[2]		×[2]
44				×[2]	×[2]	×[2]	×[2]		×[2]	×	×		
50		×[2]	×[2]	×[2]	×[1]	×[1]	×[1]		×[1]	×[1]	×[1]	×[2]	
63				×[2]	×[1]	×[1]	×[1]	×[2]	×[1]	×[2]	×	×[2]	×[2]
75				×[2]	×[2]	×[2]	×[1]		×[1]	×[1]	×[1]	×[2]	×[2]
95					×[2]	×[2]	×[2]						
100					×[2]	×[2]	×[2]			×[1]	×[2]	×[2]	

De houtdikten 95 mm en 100 mm zijn als gedroogd hout in de kwaliteitseisen A en B volgens de NEN 5466 moeilijk verkrijgbaar als gevolg van grotere kans op scheurvorming tijdens het droogproces.
Handelslengten: vanaf 1800 mm oplopend met stappen van 300 mm tot ca. 6000 mm.
Niet ingevulde maten kunnen door herzagen worden verkregen. Hierdoor ontstaat zaagverlies. De nominale maten zullen 1 à 2 mm kleiner zijn dan in tabel 6.3 is aangegeven.
[1] Gangbare handelsmaat volgens NEN-EN 1313-1
[2] Aanvullende handelsmaat in Nederland volgens tabel A.9 van NEN-EN 1313–1

Tabel 6.4 Gangbare handelsmaten voor Western red cedar [mm]

dikte *d*	breedte *b*					
	100	125	150	200	250	300
32	×		×	×		
44	×		×	×	×	
50	×		×	×	×	×
75	×	×	×	×	×	×
100	×	×	×	×	×	×
150	×	×	×	×	×	×

Vochtgehalte 20%, ongeschaafd, lengte 1800 t/m 6000 mm.

Tabel 6.5 Gangvare handelsmaten voor Merbau [mm]

dikte *d*	breedte *b*								
	75	100	125	150	200	225	250	275	300
16	×	×	×						
19	×	×	×						
22	×	×	×						
25	×	×	×	×	×	×	×	×	
32		×	×	×	×	×	×	×	×
38	×	×	×	×	×	×	×	×	×
44		×	×	×	×	×	×	×	×
50		×		×	×	×	×	×	×
63		×	×	×	×				
75	×	×	×	×	×				
100		×	×	×					

Vochtgehalte 17% in de rand, 21% in de kern, ongeschaafd, lengte 600 t/m 7200 mm.

Tabel 6.6 Gangbare maten voor Iroko [mm]

dikte *d*	breedte *b*														
	75	88	100	125	150	175	200	225	250	300	350	375	400	425	450
25	×		×	×	×		×		×						
32					×		×		×						
38					×		×		×						
44				×	×		×	×	×	×	×	×	×	×	×
50					×										
63	×	×	×	×	×										
75	×		×	×	×	×	×	×	×	×					
100			×	×	×	×	×	×	×	×					

Vochtgehalte 17% in de rand, 21% in de kern, ongeschaafd, lengte 600 t/m 5400 mm.

6.4 *Triplex*

Triplex is een plaatmateriaal, bestaande uit drie of meer op elkaar gelijmde (fineer) lagen van hout, waarvan de vezelrichtingen elkaar kruisen.

Kwaliteit

De *soort* triplex wordt bepaald door de houtsoort, gebruikt voor de deklagen.
Het uiterlijk van de dekfineren bepaalt de kwaliteit. Kwaliteitsindeling van in Nederland vervaardigd triplex:

A = dekfineer bestemd om blank te worden verwerkt (gelakt of gevernist).
B = dekfineer bestemd om te worden geschilderd of overgefineerd.
C = dekfineer voor bestemmingen waarbij het uiterlijk niet van belang is.

Duurzaamheidsklasse

– Duurzaamheidsklasse van de toegepaste houtsoort(en): I t/m V volgens NEN 6760.

Tabel 6.7 Constructie-triplex[1)]

	dikten [m]				lengte × breedte [mm]	kwaliteiten	
Canadese triplexsoorten met COFI-kwaliteitsmerk (COFI= Council of Forest Industries of British Columbia)	7,5	9,5	12,5		standaardplaten; ongeschuurd; 2240 × 1220	geschuurd	Good Two Sides
	15,5	18,5	20,5				Good one Side
	22,5	25,5	28,5				Underlay
	31,5				2240 × 1220		
	6	8	11		standaardplaten, geschuurd: 2240 × 1220	ongeschuurd	Select Tight Face
	14	17	19				Select
	21	24	27				Sheathing
	30				2240 × 1220		
	12,5	15,5	18,5		platen met messing en groef, ongeschuurd: 2440 × 1207 (werkend) 2440 × 1207 (werkend)		Medium Density Overlaid
	20,5	22,5	25,5				
	28,5	31,5					
Amerikaanse triplexsoorten met APA kwaliteitsmerk (APA= American Plywood Association)	9,5	12,5	15		2400 × 1220		A
	16	18	19				B
	22						C-Plugged
							C
							D
– Hechthout (binnen- en dekineren: Okoumé)	4	5	6	7	2500 × 1250 1720 3000 × 1250		A/A
	8	10	12	15			
	18	20	22	25			
	30	40					
Suprahecht (fineren: Regina Mahonie)	4	5	6	7	2500 × 1250 1720		A/A
	8	10	12	15			
	18	20	22	25			
	30	40					

[1)] Triplex waaraan eisen worden gesteld t.a.v. sterkte en stijfheid.

*Tabel 6.8 Toelaatbare spanningen en elastische grootheden triplex (**Canadees COFI–Exterior**)*

belastinggeval		vezel-richting deklaag	**naaldhout triplex-CSP**						**Douglas Fir triplex-DFP**					
			triplexdikte [mm]						triplexdikte [mm]					
			7,5	9,5	12,5	15,5	18,5	20,5	7,5	9,5	12,5	15,5	18,5	20,5
σ, τ, E en G in N/mm^2			minimum aantal fineerlagen						minimum aantal fineerlagen					
			3	3	4	4	5	6	3	3	4	4	5	6
buigspanning		//	7,5	7,0	6,5	5,5	5,0	5,0	10,5	9,5	8,0	7,5	6,5	6,0
($\perp$ plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{b1}$	$\perp$	1,5	1,5	3,0	3,0	3,5	3,5	1,5	1,5	3,0	3,0	3,5	3,5
buig- en trekspanning	$\overline{\sigma}_{b2}$	//	4,5	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	7,0	5,5	4,0	4,0	4,0	4,0
(// plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{t}$	$\perp$	2,4	2,3	2,3	2,3	1,9	1,7	2,4	2,3	2,3	2,3	1,9	1,7
drukspanning		//	6,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	9,0	7,0	5,5	5,5	5,5	5,5
(// plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{d1}$	$\perp$	3,5	3,5	3,5	3,5	2,5	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	2,5	2,5
drukspanning ($\perp$ plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{d2}$		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
rolschuifspanning	$\overline{\tau}_{r}$		0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
paneelschuif-spanning	$\overline{\tau}_{p}$		1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
elasticiteitsmodulus		//	9000	8000	7000	7000	6000	6000	11000	10000	9000	8000	8000	7000
(buiging $\perp$ plaatvalak)	E_{b1}	$\perp$	600	600	1800	2000	2500	2500	600	600	1800	2000	2500	2500
elasticiteitsmodulus (buiging, trek en druk // plaatvlak)	E_{b2} E_{t} E_{d}	//	8000	6000	6000	6000	5000	5000	10000	8000	6000	6000	6000	6000
		$\perp$	4000	4000	4000	4000	3000	3000	4000	4000	4000	4000	3000	3000
afschuivingsmodulus bij panneelafschuiving	G_{p}		500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

*Tabel 6.9 Toelaatbare spanningen en elastische grootheden triplex (**Amerikaans APA Rated**)*

belastinggeval		vezel-richting deklaag	**Sheating Exposure 1 C-D Interior with exterior glue**						**Sturd-I-Floor underlayment with exterior glue**					
			triplexdikte [mm/inch]						triplexdikte [mm/inch]					
			9,5 3/8	11,5 15/32	12,5 1/2	16 5/8	19 3/4	22 7/8	8,5 11/32	12,5 1/2	15 19/32	16 5/8	18 23/32	19 3/4
σ, τ, E en G in N/mm^2			minimum aantal fineerlagen						minimum aantal fineerlagen					
			3	4	4	5	5	7	3	4	5	5	5	5
buigspanning		//	6,5	7,0	6,0	5,5	5,0	6,0	6,5	6,5	5,5	5,0	5,0	5,0
($\perp$ plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{b1}$	$\perp$	1,4	2,3	2,4	2,6	2,6	4,0	1,4	2,7	3,0	3,0	2,7	2,7
buig- en trekspanning	$\overline{\sigma}_{b2}$	//	4,5	5,5	5,0	4,5	4,5	5,5	5,5	5,0	4,0	4,0	4,5	4,0
(// plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{t}$	$\perp$	2,0	2,4	2,5	2,4	2,6	3,0	2,2	2,7	2,6	2,6	2,7	2,7
drukspanning		//	4,5	5,0	4,5	4,0	4,0	5,5	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0	4,0
(// plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{d1}$	$\perp$	1,9	2,3	2,3	2,3	2,4	3,0	2,1	2,5	2,4	2,4	2,5	2,5
drukspanning ($\perp$ plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{d2}$		2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
rolschuifspanning	$\overline{\tau}_{r}$		0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
paneelschuif-spanning	$\overline{\tau}_{p}$		1,4	1,3	1,5	1,5	1,3	2,1	1,2	1,6	1,7	1,6	1,4	1,4
elasticiteitsmodulus		//	9800	8700	8900	7700	7200	7900	9900	8600	7400	7000	6800	6500
(buiging $\perp$ plaatvalak)	E_{b1}	$\perp$	500	1000	1100	1600	1500	3100	600	1300	1800	1800	1600	1600
elasticiteitsmodulus (buiging, trek en druk // plaatvlak)	E_{b2} E_{t} E_{d}	//	5200	5900	5300	4900	4800	6200	5900	5700	4600	4500	4600	4600
		$\perp$	2200	2600	2700	2600	2900	3500	2400	2900	2800	2800	2900	2900
afschuivingsmodulus bij panneelafschuiving	G_{p}		500	300	500	500	500	700	300	600	600	600	500	500

*Tabel 6.10 Toelaatbare spanningen en elastische grootheden van triplex (**Amerikaans APA B-C Exterior–group1**)*

belastinggeval		vezel-richting deklaag	triplexdikte [mm/inch]					
			8,5 $^{11}/_{32}$	9,5 $^{3}/_{8}$	12,5 $^{1}/_{2}$	16 $^{5}/_{8}$	19 $^{3}/_{4}$	22 $^{7}/_{8}$
σ, τ, E en G in N/mm^2			minimum aantal fineerlagen 3	3	4	5	5	7
buigspanning		//	5,5	5,0	6,5	5,0	4,5	4,0
(⊥ plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{b1}$	⊥	0,8	2,2	3,5	3,5	4,0	4,0
buig- en trekspanning	$\overline{\sigma}_{b2}$	//	3,5	3,5	4,0	3,5	3,5	3,0
(// plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{t}$	⊥	1,2	3,0	4,0	2,5	3,0	3,5
drukspanning		//	3,5	3,0	3,5	3,5	3,5	3,0
(// plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{d1}$	⊥	1,1	3,0	3,5	2,3	3,0	3,5
drukspanning (⊥ plaatvlak)	$\overline{\sigma}_{d2}$		2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
rolschuifspanning	$\overline{\tau}_{r}$		0,7	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
paneelschuif-spanning	$\overline{\tau}_{p}$		1,1	1,4	1,6	1,6	1,4	1,7
elasticiteitsmodulus		//	7300	6500	8700	6400	5800	5600
(buiging ⊥ plaatvalak)	E_{b1}	⊥	300	1000	1900	2200	2900	3000
elasticiteitsmodulus	E_{b2}	//	4000	3600	4100	4100	4000	3500
(buiging, trek en	E_{t}							
druk // plaatvlak)	E_{d}	⊥	1300	3300	4200	2700	3400	3800
afschuivingsmodulus bij panneelafschuiving	G_{p}		300	500	600	600	500	600

6.5 Vezelplaten

Vezelplaten zijn vervaardigd door vervilting van houtvezels of van ander plantaardig materiaal, al of niet onder toevoeging van een organisch bindmiddel, meestal fenol- of ureumhars tot 10%. Bovendien kan er ter vermindering van de vochtopname 1 à 2% paraffine-emulsie aan zijn toegevoegd. Het materiaal kan nog middelen bevatten ter verhoging van de duurzaamheid en ter verlaging van de brandbaarheid.

Mechanische eigenschappen

De mechanische eigenschappen zijn vooral van belang voor dragende constructies. Hiervoor komen alleen geperste platen (halfhard, hard en extra hard) in aanmerking.

Normen

NEN 3217. Spaan- en vezelplaten, Fysisch en mechanisch onderzoek.
NEN-EN 309. Spaanplaat – Definities en classificaten (nl).
NEN-EN 622–1 t/m 4. Vezelplaten keuringseisen.

Tabel 6.11 Eisen voor vezelplaten bestemd voor constructie

eigenschap	extra hard	hard	halfhard
dikte [mm]	3–7	3–7	9–16
wateropneming [massa-%]	$\leqslant 15$	$\leqslant 30$	$\leqslant 40$
zwelling [volume-%]	$\leqslant 10$	$\leqslant 20$	$\leqslant 20$
buigsterkte [N/mm^2]	$\geqslant 50$	$\geqslant 40$	$\geqslant 15$

Tabel 6.12 Soorten vezelplaten

soort	volumegewicht [kg/m^3]	dikten (toleranties) [mm]		lengte[1)] [mm]	breedte[1)] [mm]	oppervlakafwerking
Niet-geperste platen (zachtboard)	200–350	6 tot 20[2)]	($<12: \pm 0,6$) ($\geqslant 12: \pm 0,75$)		1220	pulp, papier, hardboard, grondverf, kunststoffolie
Geperste platen	350–850	4 tot 12	($\pm 0,4$)	2440 3050	1220	verflaag, geplamuurd, harde laklaag, PVC-folie, in melamine-hars gedrenkt papier, gefineerd, bedrukt, gestructureerd oppervlak (bijv. leermotief)
Halfharde platen						
Harde platen (hardboard)	>850	4	($\pm 0,3$)		1220	
Extra harde platen (superhardboard)	>850	3,2 tot 12,5	($\pm 0,3$)		1220	

[1)] Speciale maten als deuren en tegels.
[2)] Meestal 10 en 12½ mm.

Tabel 6.13 Toelaatbare spanningen en moduli voor vezelplaten[1] [N/mm^2]

	buig-spanning	trekspanning		drukspanning		schuifspanning		E-modulus trek & druk	G-modulus
		//	⊥	//	⊥	rol	paneel		
Groep I (droog)									
extra hard	11	6	0,2	6	5	0,4	4	3600	1800
hard	7	5	0,15	4	4	0,3	3	1700	850
halfhard	3	1,5	0	1,5	1	0,05	1	900	450
Groep II (vochtig)									
extra hard	5,5	2,5	0,08	2,5	4	0,3	2	1800	900
hard	3	2	0,05	1,3	3	0,2	1,3	900	450
halfhard	1	8	0	0,4	0,5	0,04	0,6	350	175

[1] Toelichting:

– De waarden gelden voor normale belastingsgevallen (geen windbelasting).
Voor kortdurende belastingen *mogen* de waarden met 1,5 worden vermenigvuldigd;
voor permanente belastingen *moeten* de waarden met 0,6 worden vermenigvuldigd.

– De onder groep I gegeven waarden gelden voor ruimten waar de relatieve luchtvochtigheid normaal niet boven de 65% en nooit boven de 75% ligt.
De waarden van groep II gelden voor ruimten waar de relatieve luchtvochtigheid normaal niet boven de 90% en nooit boven de 95% ligt.

6.6 *Spaanplaat*

Spaanplaat bestaat uit kleine deeltjes hout of andere lignocellulosehoudende materialen (vlasscheven, hennepscheven, riet e.d.), die met een organisch bindmiddel zijn samengebonden met gebruikmaking van één of meer fysische en/of chemische hulpmiddelen.

Duurzaamheidsklassen
- Klasse N normaal.
- Klasse V enigszins vochtbestendig.

Volumieke massa: 400–650 kg/m^3.

Afmetingen [mm]
Dikten (tolerantie: ongeschuurde platen 0/+ 2; geschuurde platen ± 3):

8, 10, 12, 16, 18, 22, 24

Lengte × breedte (tolerantie: ± 5):

2500 × 1250
2750 × 1250
3050 × 1250
2440 × 1220 (minder gebruikelijk)

Normen
NEN 3217. Spaan-en vezelplaten. Fysisch en mechanisch onderzoek.
NEN-EN 312–3 Spaanplaat. Specificaties.
Deel 3: Eisen voor platen voor binneninrichtingen (inclusief meubelen) voor gebruik in droge omstandigheden.

6.7 *Medium Density Fiberboard (MDF) of middelhardboard*

Middelhardboard is een homogeen materiaal dat uit houtvezels bestaat die onder hoge druk en temperatuur met behulp van kunstharsen aan elkaar zijn gelijmd. Als grondstof kan zowel loof- als naaldhout dienen in de vorm van rondhout, gezaagd hout, afvalhout of houtkrullen.

Afmetingen [mm]
Dikten

6, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 19, 22, 25, 28, 30
gelamineerd: 32, 36, 38, 44, 50

Plaatafmetingen

1220 × 1830	1220 × 2440	1220 × 2745
1220 × 3050	1525 × 1830	1525 × 2440
1525 × 2745	1225 × 3050	

Volumieke massa: 600–900 kg/m^3

Tabel 6.14 Eigenschappen standaard MDF

eigenschap of grootheid		dikte [mm]				
		⩽6	<6–12	>12–19	>19–35	>35
diktetolerantie	[mm]	± 0,2	± 0,2	± 0,2	± 0,3	± 0,3
buigsterkte	[N/mm^2]	35	30	30	28	25
E-modulus	[N/mm^2]	2800	2500	2500	2000	2000
schroefvastheid:[1]:						
– oppervlak	[N]	–	–	1050	950	950
– zijkanten	[N]	–	–	850	650	650
vochtopname[2]	[%]	40	25	18	16	16
zwelling[3]	[%]	15	10	6	6	6

[1] Schroefvastheid niet van toepassing bij platen dunner dan 15 mm.
[2] Vochtopname na 24 uur in een waterbad.
[3] Diktezwelling na 24 uur in een waterbad.

6.8 Oriënted Strand Board (OSB-platen)

OSB-plaat is een constructieplaat op houtbasis die wordt gemaakt van bomen met een kleine diameter, afkomstig uit duurzaam in stand gehouden bossen. Deze bomen worden verwerkt tot spaanders, die met toevoeging van speciale waterbestendige kunstharsen onder hoge druk en temperatuur worden samengeperst.
Afmetingen: De standaardmaten zijn 2440 $\times$ 1220 mm, 2400 $\times$ 1200 mm, 2440 $\times$ 590 mm of 2400 $\times$ 590 mm.
Dikten 6, 8, 9, 11, 15, 18 en 25 mm.
Brandwerendheid vlamuitbreiding klasse 3
Warmtegeleiding $\lambda \leqslant$0,14 W/mK

Er zijn 4 typen platen, die als volgt zijn te onderscheiden:

OSB-1 Platen voor algemeen gebruik t.b.v. interieurinrichting (inclusief meubelconstructies) onder droge omstandigheden.(niet dragende toepassingen)

OSB-2 Dragende platen voor gebruik onder droge omstandigheden.

OSB-3 Dragende platen voor gebruik onder vochtige omstandigheden.

OSB-4 Dragende platen voor grotere belastingen onder vochtige omstandigheden.

Opmerking: Dragende platen zijn bestemd voor de constructie van dragende of tot de stijheid bijdragende bouwelementen onder droge of vochtige omstandigheden.

Tabel 6.15 Gegevens OSB-2

	toleranties kwaliteit OSB-2		
dikten	6–9 mm	11–15 mm	18–25 mm
dikte ± (ongeschuurd)	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
lengte ±	3,0 mm	3,0 mm	3,0 mm
breedte ±	3,0 mm	3,0 mm	3,0 mm
haaksheid	2,0 mm/1000	2,0 mm/1000	2,0 mm/1000
rechtheid	1,5 mm/1000	1,5 mm/1000	1,5 mm/1000
rolafschuivingsmodulus	1,5 mm/1000	1,5 mm/1000	1,5 mm/1000
– lengterichting N/mm^2	22	20	18
– dwars op de plaatrichting N/mm^2	11	10	9
elasticiteitsmodulus			
– lengterichting N/mm^2	3500	3500	3500
– dwars op de plaatrichting N/mm^2	1400	1400	1400
treksterkte loodrecht			
op oppervlak N/mm^2	0,34	0,32	0,30
diktezwelling %	20	20	20
gemiddelde dichtheid kg/m^3	650	650	650
vochtgehalte %	2–12	2–12	2–12
formaldehyde (klasse 1)	$\leqslant$8 mg/100 g	$\leqslant$8 mg/100 g	$\leqslant$8 mg/100 g

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebrikte documentatie in deze paragraaf

7 Steen

7.1 Gebakken steen

Metselbaksteen

Normen

– NEN-EN 772–2/–3/–7/–9 Metselstenen
– BRL 1007–96

Typen en benamingen. Metselbaksteen wordt als volgt aangeduid:
– Naar *vormmethode*:
  - vormbaksteen;
  - strengperssteen;
  - stempelperssteen;
  - handvormsteen.

Tabel 7.1 Afmetingen van metselbaksteen [mm]

benaming		standaard-maten[1)]	grensmaten voor toetsing per maatklasse			werkende maat[2)]
			I	II	III	
standaard	l	210	208–212	206–213	205–214	220
vecht-formaat	b	100	98–101	97–102	97–103	110
	d	40	39– 41	38– 41	38– 42	50
standaard	l	210	208–212	206–213	205–214	220
waal-formaat	b	100	98–101	97–102	97–103	110
	d	50	49– 51	48– 51	48– 52	60
standaard	l	210	208–212	206–213	205–214	220
dik-formaat	b	100	98–101	97–102	97–103	110
	d	65	64– 66	63– 66	63– 67	75
standaard	l	230	228–232	226–233	225–234	240
F5-formaat	b	110	108–111	107–112	107–113	120
	d	57	56– 58	55– 58	55– 59	67
formaten volgens	l	L_n	$L_n \pm 2$	$L_n{}^{+3}_{-4}$	$L_n{}^{+4}_{-5}$	L_n+10
fabrieks-opgave	b[3)]	B_n	$B_n{}^{+1}_{-2}$	$B_n{}^{+2}_{-3}$	$B_n \pm 3$	B_n+10
	d	D_n	$D_n \pm 1$	$D_n{}^{+1}_{-2}$	$D_n \pm 2$	D_n+10

[1)] De gemiddelde maten kunnen afwijken van de standaardmaten.
[2)] De *werkende maat* is de standaardmaat + de standaardvoeg van 10 mm.
[3)] Aan formaten volgens fabrieksopgave worden voor bepaalde gebruiksklassen nadere eisen gesteld aan de ondergrens voor de breedte B_0 (zie tabel 7.2).

- Naar *toepassing* worden drie hoofdgroepen onderscheiden, elk op hun beurt weer onderverdeeld in *gebruiksklassen* (A0, A1, enz., zie tabel 7.2) die overeenkomen met functionele kwaliteitseisen. De hoofdgroepen zijn:
  A binnenmuursteen;
  B buitenmuursteen;
  C hogedruksteen.
- Naar *formaat* en *maatklasse*. Het gaat hier om formaten met algemeen vastgestelde standaardafmetingen en formaten waarvan de standaardafmetingen worden opgegeven door de fabrikant (zie tabel 7.1). Elk van de formaten wordt onderscheiden in de maatklassen I, II en III waarmee toleranties voor fabricage worden gegeven (zie ook tabel 7.1). De formaten met vastgestelde standaardafmetingen zijn:
  - standaard vecht-formaat;
  - standaard waal-formaat;
  - standaard dik-formaat;
  - standaard F5-formaat;
- Naar kleur en oppervlakte-geaardheid.

Bijzonder gebakken metselstenen

Geperforeerde baksteen: bevat een aantal kleine sleufvormige gaten die 15–20% van de doorsnede uitmaken. Ook geschikt voor buitenwerk (met eventueel terugliggend voegwerk), in dikkere formaten vnl. voor binnenmuren.

Tabel 7.2 Kwaliteitseisen voor metselbaksteen naar toepassingsgebied

gebruiksklassen	fysisch				mechanisch			chemisch	
	maten en tole-ranties [mm]	speci-fieke water-opzui-ging [gram/dm^2·min] bovengrens	water-opne-ming [vol.-%] bovengrens	vorst-bestand-heid	druksterkte [N/mm^2] min.gem. waarde	druksterkte [N/mm^2] ondergrens	splijt-trek-sterkte [N/mm^2] ondergrens	sulfaat-gehalte ($-SO_4^{2}-$) [massa-%] bovengrens	Lipinski-getal [massa-%] bovengrens
binnenmuursteen									
A0 binnenmuren waaraan geen speciale eisen worden gesteld	–	–	–	–	–	7,5	0,3		
A1 dragende of steunende halfsteens binnenmuren	tabel 7.1 $B_0 \geqq 97$	–	–	–	–	10	0,5		
A2 binnenmuren van lichtgewichtste-nen (schijnbare volumeke massa-1200 tot 1400 kg/m^3)	tabel 7.1	–	–	–	–	7,5	–	–1,15	
A3 binnenmuren van lichtgewichtste-nen (schijnbare volumieke massa 1000 tot 1200 kg/m^3)		–	–	–	–	6	–		
A4 binnenmuren van lichtgewichtste-nen (schijnbare volumieke massa 800 tot 1000 kg/m^3)		–	–	–	–	5	–		
A5 binnenmuren van holle blokken (zgn. *A5-stenen*)		–	–	–	–	10	0,4		
binnenmuren van 'schoon' metselwerk (zie ook A1)		–	–	–	–	7,5	0,3	0,12	0,04

Tabel 7.2 (vervolg)

buitenmuursteen e.d.									
B1 binnenmuren waaraan geen speciale eisen worden gesteld	$B_0 \geqq 87$	–	–	*	12,5	7,5	0,3	0,24	0,08
B2 binnenmuren voldoende aan normale verhoogde eisen o.a. in verband met stabiliteit	tabel 7.1 $B_0 \geqq 97$	–	–	*	17,5	10	0,5	0,18	0,06
B3 (bijv. muurhoogte > 10 m) verzwaarde condities		–	–	*	25	15	0,8	0,12	0,04
B4 trasramen	tabel 7.1	35	27	*	30	20	1,0	0,12	0,04
B5 kelders	tabel 7.1 $(d_1 - D) \leqq 1$	25	22	*	45	30	1,5		
hogedruksteen									
C1 sterkteklasse 30 (30 N/mm^2 ≈ 300 kgf/cm^2)	tabel 7.1 maatklasse I $B_0 \geqq 97$ aanv. bep. 1 en 2	30	30	*	30	20	1,0	– 0,12	0,04
C2 sterkteklasse 45 (45 N/mm^2 ≈ 450 kgf/cm^2)		25	25	*	45	30	1,5		
C3 sterkteklasse 60 (60 N/mm^2 ≈ 600 kgf/cm^2)		20	20	*	60	40	2,0		

Tabel 7.3 Materiaalgebruik bij toepassing van veel gebruikte standaardformaten

	per m^2 muur		per m^3 muur	
	aantal stenen	liter metselmortel	aantal stenen	liter metselmortel
standaard waal-formaat				
½-steens	78	25	780	250
1 -steens	156	61	743	290
1½-steens	234	97	731	303
standaard dik-formaat				
½-steens	62	21	624	210
1 -steens	125	53	594	252
1½-steens	187	86	584	269

Tabel 7.4 Afmetingen en materiaalverbruik gebakken straatstenen

formaat	minimale afmetingen [mm]			aantal stuks per m^2	
	l	d	b	staand	liggend
waal-formaat	195	48	85	100	–
dik-formaat	195	64	85	70	50
kei-formaat					
– normaal	195	92	85	–	50
– plat	195	92	70	–	50

Verblend-steen of *bekledingssteen*: zeer strakke en kantige strengpersteen (geperforeerd of massief), gebakken van fijne Duitse klei. Leverbaar in de kleuren geel, rood, gebroken wit of gesmoord, transparant of in kleur geglazuurd.

Porisosteen: een poreuze baksteen van Limburgse klei met als uitbrandstof steenkoolafval en zaagsel.

Gasbeton: een mengsel van in hoofdzaak kalk en zand met een poreuze structuur (door de gasontwikkeling tijdens de binding) dat onder stoomdruk wordt verhard.
Toepassingen: blokken voor metselwerk, wandelementen van verdiepinghoogte, buitenmuur-elementen, gewapende dakplaten.

Baksteen gelijmd
De hechsterkte van lijmmortel is veel groter dan die van metselmortel. Daardoor zijn gelijmde baksteenconstructies beduidend sterker.
De samenstelling van de lijm vaststellen in overleg met de leverancier. Voor het verlijmen kunnen alle soorten en maten bakstenen worden toegepast. Hieronder volgen enkele voorbeelden:

- Formaten conform tabel 7.4.
- IJssel formaat: ca. 160 × 77 × 41.
- Rijnformaat: ca. 177 × 85 × 42.
- Vechtformaat: ca. 210 × 100 × 40.
- Moduulmaten: 190 × 190 × 50; 190 × 190 × 57; 190 × 190 × 65; 190 × 190 × 90; 290 × 90 × 65; 290 × 90 × 90; 290 × 140 × 90; 290 × 190 × 90; 200 × 98 × 50; 200 × 98 × 65.
- Diverse profielstenen: rond, vierkant.
- Diverse structuren: strengpers glad (bezand of onbezand) vormbak, handvorm.
- Diverse kleuren: in overleg.

De voegen variëren van ca. 4 mm tot ca. 6 mm.

7.2 Niet-gebakken steen

Kalkzandsteen
Normen:
- NEN-EN 771–2, 772–1/–9/–16/–18. Kalkzandstenen en kalkzandsteenblokken.
- NEN-EN 771–2, 772–1/–9/–16/–18. Kalkzandsteenelementen.
- BRL 1004–96.

Type en benamingen. Onderscheid wordt gemaakt naar:
- Kwaliteit: gewoon, klinker, gevel, hoge-druk (zie tabel 7.5).
- Afmetingen (zie tabel 7.6 en tabel 7.7).
- Kleur.

Tabel 7.5 Kwaliteitskenmerken van kalkzandstenen, kalkzandsteen-blokken en -elementen

kwaliteit	kenmerk op elke steen of elk blok	kenmerk op de verpakking
gewoon	geen	geen
klinker	door-en-door blauwe kleur, of twee evenwijdige ribbels op een kop, of een stempelopdruk met de druksterkte in N/mm^2	geen
gevel	geen	opdruk 'gevel-kwaliteit'
hoge-druk	drie evenwijdige ribbels op een kop, of een stempelopdruk met de druksterkte in N/mm^2	geen

Tabel 7.6 Afmetingen en toleranties van kalkzandstenen en kalkzandsteenblokken

type	benaming	nominale maten [mm]			grens-maten [mm]	max. maat-varschil binnen één partij [mm]
		l_n	b_n	h_n		
stenen	waalformaat	214	102	55		
	amstelformaat	214	102	72	l_n, b_n, h_n ± 2	2
	maasformaat	214	102	82		
	dubbel AF	214	150	72		
	dubbel MF	214	150	82		
metsel-blokken	½ steens	327	100	157		
		327	100	240	l_n, b_n, h_n ± 2	2
	¾ steens	327	150	157		
		327	214	157		
lijm-blokken	klamp	437	67	298		
	½ steens	437	100	198		
		437	100	298		
	6/10 steens	437	120	198	l_n, b_n, h_n ± 2	2
		297	120	198		
	¾ steens	297	150	198		
	steens	297	214	148		
velling-blokken	klamp	437	67	298		
	½ steens	437	100	198		
		437	100	298		
	¾ steens	437	150	148	l_n, b_n, h_n ± 2	2
		297	150	198		
		437	150	298		
	steens	437	214	298		
		297	214	148		

Tabel 7.7 Afmetingen en toleranties kalkzandsteen-elementen

formaten		streefmaten [mm]			grensmaten [mm]	max, maatverschil binnen één partij [mm]
		l_n	b_n	h_n		
standaard-formaten	dun 100	897	100	598	l_n, b_n, h_n ± 1	1
	120	897	120	598		
	150	897	150	598		
	dik 214	897	214	598	l_n, b_n, h_n ± 1	1
	300	300	300	598		
Dubo Warmtewand-elementen	dun 150	897	150	498		
		897	150	598		
formaten volgens fabrieksopgave		L_n	B_n	H_n	L_n, B_n, H_n ± 1	1

Betonnen metselstenen en -blokken

Norm: geen.
Typen en benamingen. Er wordt een onderscheid gemaakt naar:
- Toepassing: binnenmuursteen en buitenmuursteen.
- Formaten volgens fabrieksopgave.
- Oppervlakte-geaardheid:
  - eenzijdig schoon;
  - tweezijdig schoon;
  - splitblokken;
  - gewassen.
- Kleur.
- Drukterkte.

Betonstraatstenen: vervaardigd van beton met een gelijkmatige samenstelling en al of niet voorzien van een deklaag (min 4 mm) met een andere samenstelling dan de rest van de steen. Aan het cement of aan het mengsel kunnen kleurstoffen zijn toegevoegd. Keuringseisen en -methoden volgens NEN 7000. Betonstraatstenen kunnen worden geleverd met KOMO-certificaat. Zie ook tabel 7.8.

Tabel 7.8 Afmetingen en verbruik betonstraatstenen

vorm	afmetingen[1] [mm]			aantal stuks per m^2
	lengte[2] [mm]	breedte[2] [mm]	dikte[3] [mm]	
	220	108,5	70, 80, 100, 120	41
	213/211	105	70, 80, 90, 100	44
	213/211	69	70, 80	46
	200	50/100	70, 80	50/100
	200	66	80	75
	210	105	80, 100	44
	210, 250	210/250	80	25
	150	150	70	44
	300	150		22
	300	300	45, 50, 60, 70, 80	11
	300	450		7

[1] Veelal ook verkrijgbaar als halve stenen en bisschopsmutsen.
[2] Het gemiddelde van de lengte en breedte mag niet meer dan 2 mm afwijken van de door de fabrikant opgegeven maaat.
[3] De gemiddelde dikte mag niet minder bedragen dan de overeengekomen waarde.

7.3 Cementsoorten, samenstelling en aanduiding

Cementsoorten

Gewone cementen zijn onderverdeeld in de volgende vijf hoofdsoorten, conform NEN 3550 (wordt vervangen door NEN-EN 196–8/–9 (ontwerp) en NEN-EN 197–1/–2 (ontwerp):

I Portlandcement
II Samengestelde Portlandcementen
III Hoogovencementen
IV Puzzolaancementen
V Composietcementen

Cementsoorten en samenstelling, zie tabel 7.9;
Mechanische en fysische eisen, zie tabel 7.10;
Chemische eisen, zie tabel 7.11.

Lijmmortels

Mortels voor metselwerk van stenen, blokken of elementen van kalkzandsteen of gasblokken.

Lijmmortels t.b.v. gelijmde bakstenen buitenwandconstructies in overleg met de leverancier.

Stukadoormortels

Normen:
NEN 3550. Cement (wordt vervangen, zie bij cementsoorten).
NEN 931. Kalk.
NEN 492. Gips.
NEN 5905. Zand.

Speciegroepen stukadoorswerk, zie tabel 7.12.
Speciegroepen stukadoorswerk vervolg, zie tabel 7.13.
Beoordelingscriteria oppervlak stukadoorsmortel binnen, zie tabel 7.14.
Beoordelingscriteria oppervlak stukadoorsmortels buiten, zie tabel 7.15.

Tabel 7.9 Cementsoorten en samenstelling[1)]

hoofd-soort	benaming	aanduiding van de cementsoort	hoofdbestanddelen						
			portland-cement-klinker (K)	gegranuleerde hoog-ovenslak (S)	natuurlijke puzzolanen (P)	poeder-koolvlieg-as (V)	gebrande leisteen (T)	kalk-steen (L)	overige[2)] bestanddelen (gesommeerde gehalten)
I	portland cement	CEM I	95–100	–	–	–	–	–	0–5
II	portland slakcement	CEM II/A-S	80–94	6–20	–	–	–	–	0–5
		CEM II/B-S	65–79	21–35	–	–	–	–	0–5
	portland puzzolaan-cement	CEM II/A-P	80–94	–	6–20	–	–	–	0–5
		CEM II/B-P	65–79	–	21–35	–	–	–	0–5
	portland vliegas-cement	CEM II/A-V	80–94	–	–	6–20	–	–	0–5
		CEM II/B-V	55–79	–	–	21–35	–	–	0–5
	portland leisteen-cement	CEM II/A-T	80–94	–	–		6–20	–	0–5
		CEM II/B-T	65–79	–	–	–	21–35	–	0–5
	portland kalksteen-cement	CEM II/A-L	80–94	–	–	–	–	6–20	0–5
	portland composiet-cement	CEM II/A-M	80–94	←		6–20[3)]	→		
		CEM II/B-M	65–79	←		21–35[3),4)]	→		
III	hoogoven-cement	CEM III/A	35–64	36–65	–	–	–	–	0–5
		CEM III/B	20–34	66–80	–	–	–	–	0–5
		CEM III/C	5–19	81–95	–	–	–	–	0–5
IV	puzzolaan-cement	CEM IV/A	65–89	–	11-35		–	–	0–5
		CEM IV/B	45–64	–	36-55		–	–	0–5
V	composiet-cement	CEM V/A	40–64	18–30	18-30		–	–	0–5
		CEM V/B	20–39	31-50	31-50		–	–	0–5

[1)] De samenstelligen (in % (m/m)) in de tabel zijn betrokken op de hoofdbestanddelen; dus exclusief calciumsulfaat en toevoegingen.
[2)] Overige bestanddelen zijn fillers (F) de hoofdbestanddelen volgens de tabel in de NEN 3550 of één of meer van de in bovenstaande tabel genomemde hoofdbestanddelen, tenzij deze als hoofdbestanddeel in het cement voorkomt(ten.
[3)] Het gehalte aan filler mag niet meer dan 5% (m/m) bedragen.
[4)] Het kalksteengehalte mag niet meer dan 20% (m/m) bedragen.
Bron: NEN 3550 (zie par. 7.3, zal vervangen worden)

Tabel 7.10 Mechanische en fysische eisen

sterkte-klasse	druksterkte in N/mm²				begin van de binding [min]	vormbou-dendheid [mm]
	beginsterkte 2 dagen	7 dagen	sterkte 28 dagen			
32,5	–	⩾16		⩽52,5		
32,5 R	⩾10	–	⩾32,5		⩾60	
42,5	⩾10	–				⩽10
42,5 R	⩾20	–	⩾42,5	⩽62,5		
52,5	⩾20	–		–	⩾45	
52,5 R	⩾30	–	⩾52,5			

Tabel 7.11 Chemische eisen

eigenschap	beproeving volgens	cementsoort	sterkteklasse	eis[1)]
gloeiverlies	NEN–EN 196–2	CEM I CEM III	alle	≤5,0
onoplosbare rest	NEN–EN 196–2	CEM I CEM III	alle	≤5,0
sulfaat (SO_4^{2-})	NEN–EN 196–2	CEM I CEM II[2)] CEM IV CEM V CEM III[3)]	32,5 32,5 R 42,5 42,5 52,5 R 52,5 R alle	≤3,5 ≤4,0 ≤4,0
chloride ($C1^-$)	NEN–EN 196–21	alle[4)]	alle	≤0,10
puzzolaniteit	NEN–EN 196–5	CEMIV	alle	moet de proef doorstaan

[1)] Eis in % (m/m).
[2)] Dit betreft de cementsoorten CEM II/A en CEM II/B met inbegrip van portland composietcementen die slechts één ander hoofdbestanddeel bevatten, bijv. II/A-S of II/B-V met uitzondering van CEM II/B-T dat voor alle sterkteklassen niet meer den 4,5% SO_3 bevatten.
[3)] Cementsoort CEM III/C mag niet meer dan 4,5% SO_3 bevatten.
[4)] Cementsoort CEM III mag meer den 0,10% chloride bevatten, maar in dat geval moet het werkelijke chloridegehalte worden vermeld.

Bron: NEN 3550 (zie par. 7.3 wordt vervangen)

Tabel 7.12 Speciegroepen stukadoorwerk PI, PII, PIII

stuka-door specie	groep	omschrijving	cement NEN 3550	kalk NEN 931	gips NEN 492	zand NEN 5905	zand fijn	kunsthars dispersie volgens voorschrift	dichtings middle volgens voorschrift	laagdikte [mm]
P I	a	kalkspecie				3,5				dekkend
	b[1)]	kalkdunpleister specie								[3)]
	c[1)]	kalkspecie								[3)]
P II	a[1)]	sterk hydraulische kalkspecie								[3)]
	a.1[1)]	sierpleister mineraal								[3)]
	b	kalkcementspecie	1 deel op 5–8 delen kalkspecie	1		6				10
	b.1	kalkcementspecie	1	1/4		4				max. 10 mm per laag
	b.2	kalkcementspecie	1	1/4		5		1 liter op 20 liter cement[2)]		5–8
	b.3	kalkcementspecie	1	1/4		4			[3)]	5–8
	b.4	kalkcementspecie	1	1		7		1 liter op 20 liter cement[2)]		10
	b.5	kalkcementspecie	1	1		7				10
	b.6[1)]	kalkcementspecie								[3)]
	b.7[1)]	kalkcementspecie						hechtmiddel		[3)]
	b.8[1)]	kalkcementspecie							water–afstotend	[3)]
	b.9[1)]	kalkcementspecie		1					water–afstotend	[3)]
	b.10	kalkcementspecie	1 deel op 10 delen kalkskpecie	1			3	1 deel op 40 delen specie		1

Tabel 7.12 (vervolg)

stuka-door specie	groep	omschrijving	cement NEN 3550	kalk NEN 931	gips NEN 492	zand NEN 5905	zand fijn	kunsthars dispersie volgens voorschrift	dichtings middle volgens voorschrift	laagdikte [mm]
	b.11	kalkcementspecie	1 deel op 10 delen kalkspecie	1			6	1 deel op 40 delen specie[2)]		2–3
	b.12[1)]	kalkcementspecie								[3)]
	c[1)]	traskalkspecie								[3)]
	d[1)]	lichthgewicht kalkcementspecie								[3)]
P III	a[1)]	cementkalkspecie (luchtkalk)								[3)]
	b	cementspecie	1			2,5		1 liter op 20 liter cement		5–8
	b.1	cementspecie	1			3				10
	b.2	cementspecie	1			3				10
	b.3[1)]	cementspecie								10–20
	b.4[1)]	cementspecie								3–5
	b.5[1)]	cementspecie								3–5
	b.6[1)]	cementdunpleister-specie								[3)]
	c[1)]	trascementspecie								[3)]
	d[1)]	cementspecie								[3)]

[1)] = fabrieksmatig
[2)] = percentage vaste stof minimaal 50%
[3)] = volgens voorschrift leverancier

Bron: Jellema Hogere Bouwkunde deel 5 Afbouw 1999.

Tabel 7.13 Speciegroepen stukadoorwerk P IV t/m P VIII

stuka-door-specie	groep	omschrijving	cement NEN 3550	kalk NEN 931	gips NEN 492	zand NEN 5905	zand fijn	kunsthars dispersie volgens voorschrift	dichtings middle volgens voorschrift	laagdikte [mm]
P IV	a[1)]	gipsspecie								[3)]
	b[1)]	gipsspecie								[3)]
	b.1[1)]	hechtgipsspecie (pleisterwerk)								[3)]
	b.2[1)]	hechtgipsspecie (schuurwerk)								[3)]
	b.3[1)]	handgipsspecie (pleisterwerk)								[3)]
	b.4[1)]	handgipsspecie (schuurwerk)								[3)]
	c[1)]	gipskalkspecie								[3)]
	c.1[1)]	gipskalkspecie								[3)]
	d	kalkgipsspecie		1	1 deel op 2,5 delen kalkspecie	5				10 per laag
	e	kalkgipsspecie		1	1 deel op 5 delen kalkspecie	5				10 per laag
	f[1)]	kleefgips								
	g[1)]	voeggips								
P V	a	kalkgipsspecie		2	1					< 3
P VI	a	kalkgipsschuurspecie		1	1 deel op 4 delen kalkspecie		2			2–4
	b	kalkgipsschuurspecie		1	1 deel op 2 delen kalkspecie		2			

Tabel 7.13 (vervolg)

stuka-door-specie	groep	omschrijving	cement NEN 3550	kalk NEN 931	gips NEN 492	zand NEN 5905	zand fijn	kunsthars dispersie volgens voorschrift	dichtings middle volgens voorschrift	laagdikte [mm]
	c	kalkcementschuur-specie	1 deel op 10 delen kalkspecie	[1]			2			1–2
	d	kalkcementschuur-specie	1 deel op 8 delen op kalkspecie	[1]			2			1–2
P VII	a	[1] spuitpleister (spack)								[3]
	b	[1] sierpleister kunstharsgebonden								[3]
P VIII	a	hechtmateriaal							1 deel op 1,5 delen water [2]	[3]
	b	hehtmateriaal	1						1 deel op 1,5 delen water [2]	
	c	hehtmateriaal							1 deel op 4 delen water [2]	
	d	hehtmateriaal [1]							verstrijkbaar	[3]
	e	impregneermateriaal [1]							max.	[3]

[1] = fabrieksmatig.
[2] = per entage vaste stof minimaal 50%.
[3] = volgens voorschrift leverancier.

Bron: Jellema Hogere Bouwkunde deel 5 Afbouw 1999

Tabel 7.14 Beoordelingscriteria oppervlak stukadoormortels

groep[1)]		1	2	3	4
plaatselijke onregelmatigheden		zijn niet toegestaan	onregelmatigheden $\leq$1 mm zijn toegestaan	zijn niet toegestaan	onregelmatigheden $\leq$2 mm zijn toegestaan
kleurverschillen		zijn niet toegestaan	geen eisen	zijn niet toegestaan	zijn niet toegestaan
profilering		afwijkingen tot $\leq$2 mm/m zijn toegestaan	afwijkingen tot $\leq$2 mm/m zijn toegestaan	afwijkingen tot $\leq$3 mm/m zijn toegestaan	afwijkingen tot $\leq$ 4 mm/m zijn toegestaan
vlakheidstoleranties [mm] bij	1 m	3	3	3	4
	4 m	8	8	9	10
afstand tussen meetpunten van:	10 m	12	12	15	15
	15 m	15	15	20	20

[1)] Groep 1 = glad oppervlak, waaraan hoge visuele eisen worden gesteld.
Groep 2 = glad oppervlak dat naderhand wordt voorzien van afwerking, zoals behang.
Groep 3 = gelijkmatig gestructureerd oppervlak.
Groep 4 = grof gestructureerd oppervlak.

Tabel 7.15 Beoordelingscriteria Stukadoorswerk Buiten

groep	1	2	3
kleurverschil	niet toegestaan[1)]	toegestaan[1)]	toegestaan[1)]
aanzetten/steigerslag	niet toegestaan[1)]	toegestaan[1)]	toegestaan[1)]
plaatselijke onregelmatigheden[2)]	niet toegestaan	onregelmatigheden ≤3 mm zijn toegestaan	onregelmatigheden ≤5 mm zijn toegestaan
gevels[3)]	≤4 mm	≤6 mm	≤8 mm
vlakheidstolerantie bij een onderlinge afstand tussen meetpunten profielen[3)]			
vlakheidstolerantie bij 2 m	≤3 mm	≤3 mm	≤3 mm
idem bij een onderlinge afstand tussen meetpunten van 10 m	≤8 mm	≤8 mm	≤8 mm

Visule beoordeling:
Alvorens het gevelvlak visueel te beoordelen moet het klim- en steigermateriaal zijn verwijderd.
Tijdens deze beoordeling mag het gevelvlak niet door direct zon- of kunstlicht worden aangelicht.
Als het gevelvlak na oplevering door kunstlicht wordt beschenen, moet deze lichtbron ook tijdens de uitvoering van het stucwerk en op een vergelijkbaar tijdstip worden gebruikt.

[1)] Tenzij vooraf anders is overeengekomen en vastgelegd.
[2)] Opname geschiedt met een rei van 400 mm lengte.
[3)] Opname geschiedt met een rei van 2000 mm lengte.
Groep 1: fijn geschuurd of gepleisterd oppervlak waaraan hoge afwerkeisen worden gesteld en dat indien gewenst met een verflaag kan worden afgewerkt.
Groep 2: fijne oppervlaktetextuur bijvoorbeeld fijne mineraal- of kunstharsgebonden sierpleisters.
Groep 3: oppervlak met een grove textuur bijvoorbeeld dikke mineraalgebonden sier- en krabpleisters.

Bron: Jellema Hogere Bouwkunde deel 5 Afbouw 1999.

7.4 Metselverbanden

Norm

Geen.

Keuze metselverband

Bij de keuze van het *metselverband* is van belang:

- *Esthetische kwaliteit*. Dit speelt alleen een rol bij schoon metselwerk.
- *Gewenste wanddikte*. Er zijn metselverbanden die specifiek geschikt zijn voor een bepaalde wanddikte (zie ook figuur 7.1). De gewenste wanddikte kan afhangen van de benodigde mechanische sterkte van de wand, maar ook van bijv. bouwfysische aspecten als geluidsisolatie vocht-en/of waterdichtheld.

Halfsteens wanddikte

Voor een *halfsteens* wanddikte zijn de volgende steenverbanden geschikt (zie ook figuur 7.1):

- halfsteensverband;
- klezorenverband;
- wildverband.

Wanneer grotere wanddikten in een voor halfsteens wanddikte geschikt metselverband moeten worden gerealiseerd, dan zal een doorgaande voeg tussen de halfsteens wanden ontstaan. Dit kan ongewenst zijn.

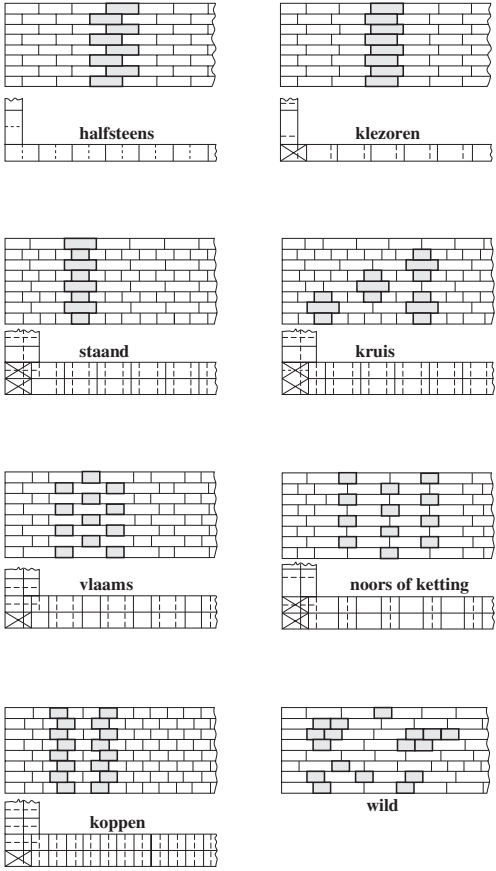
Steens wanddikte of meer

Voor een steens wanddikte of meer zijn de volgende verbanden geschikt (zie ook figuur 7.1):

- staand verband;
- vlaams verband;
- koppenverband;
- kruisverband;
- noors- of kettingverband.

Wanneer met deze metselverbanden een halfsteens wanddikte moet worden gerealiseerd, dan betekent dit dat veel stenen moeten worden doorgehakt. Tweezijdig schoon, halfsteens metselwerk is met bedoelde metselverbanden niet te realiseren.

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.



Figuur 7.1 Metselverbanden

8 Beton

8.1 Eigenschappen

Tabel 8.1 Betonsoorten

	betonsoort	toeslagmaterialen	toepassingen
1	**normaal beton** (2000–2800 kg/m^3)		
a	*grindbeton* gewapend, al dan niet voorgespannen	zand en grind	in het algemeen voor producten met sterkte-eisen als hoofdzaak
	ongewapend	zand en grind	bij kleine of ondergeschikte artikelen of onderdelen
b	*steenslagbeton*	zand en basalt	bij kleine of ondergeschikte artikelen of onderdelen
		zand en porfier	in het algemeen voor producten met dezelfde eisen
		zand en quenast	als voor grindbeton maar met een grotere stoot-
		zand en gebroken grind (z.g. Hollands steenslag)	weerstand; de kruip is ca. $^2/_3$ van die van grindbeton
c	*vezelversterkt beton*	vezelmaterialen:	in het algemeen voor producten met dezelfde eisen
		– glas (bijv. GRC)	als voor grindbeton maar met een grotere taaiheid;
		– staal	geschikt voor dunwandige constructies
		– polypropyleen	
		– nylon	
		– aramide	
		– koolstof	

Tabel 8.1 (vervolg)

	betonsoort	toeslagmaterialen	toepassingen
1	**lichtbeton** (600–2000 kg/m^3) gewapend ongewapend	–met lichte toeslagstoffen: bims, gegranuleerde hoogovenslak, sintels, slakken, geëxpandeerde klei PS-schuimkorrels geëxpandeerd gesteente (hollith, perliet, vermiculite) –cellen- en schuimbeton –vezels (hout, vlas)	in het algemeen voor artikelen met als primair doel laag gewicht en thermische isolatie (goed brandvast) ook voor constructieve toepassingen
3	**sierbeton** al dan niet gewapend en veelal met wit portlandcement	–natuursteen: grind, gebroken grind, basalt, porfier, kwartsiet en graniet –gebakken materiaal: gebroken baksteen, gresslag, glas enz.	voor bouwelementen van decoratieve en/of representatieve aard, doorgaans volgens tekening uitgevoerd, met eisen betreffende kleur en zichtbare structuur
4	**kunststeen** meestal gewapend en grijs of wit portland cement	slijp- en polijstbare natuursteensoorten met of zonder deklaag, al dan niet met kleurstoffen	in hoofdzaak bestemd voor sanitaire doeleinden; voorts traptreden, drempels, platen en vloertegels
5	**glasbeton** al of niet gewapend	glazen tegels in grindbeton	in muren en daken en als kelderlichten
6	**slijtvast beton**[1)]	gebroken grind, basalt, profier, amaril, ijzergrit, carborundum en staalgruis	voor afwerklaag op tegelbanden, bedrijfsvloeren, traptreden e.d.
7	**hittevast beton** met aluminiumcement	vurvaste materialen als: chamotte (tot 1200 °C), siliciumcarbide (carborundum), silimaniet (mulliet), chromiet	voor bekleding op plaatsen met hoge temperaturen
8	**zwaarbeton** (2800–400 kg/m^3)	basaltsplit, bariet of zwaar spaat ($BaSO_4$) loodslakken=4,5 s.m.	voor afscherming van radio-actieve straling

[1)] Onderzoek nar slijtvastheid d.m.v.:
zandstralen; test hechting toeslag-cementsteen; slijtproef; test slijtvastheid van toeslag.

8.2 Uitvoeringen

Betontegels en -platen

Betontegels vaak met bijzondere toeslagen ten behoeve van slijtweerstand, sterkte enz. bijv. basalt (basaltine-tegels), porfier, deklaag min. 4 mm dik. Voor kwaliteitseisen en keurings-methoden zie NEN 7014.

Tegelafmetingen: *hele tegel* in mm: 300 × 300, dik 40, 45, 50, 60, 70 en 80; 250 × 250, dik 70 en 80; *halve tegel* in mm: 300 × 150, dik 40, 45, 50, 60, 70 en 80; 250 × 125, dik 70 en 80; alle met toelaatbare maatafwijking van + of − 2 mm, waarbij deze maatafwijking bij één partij alle in dezelfde richting moeten vallen.

Voor diagonaal werk zijn hoekstukken (één schuine zijde passend bij de tegel) bij te leveren. Tegels zijn leverbaar met of zonder vellingkanten, met of zonder deklaag met carborundum of staalgruis. Voor bedrijfsvloeren zijn gewapend-betonplaten 2000 × 2000 × 120 mm of 2000 × 1500 × 120 mm in de handel met hoekstalen rand of geheel met staalplaat bedekt.

Bij het tegelwerk zijn leverbaar: bijpassende boomkransen, geperforeerde tegels, rijwieltegels, draineertegels, trottoirbanden (breed 150 òf 200, hoog 160, 200 òf 250 mm met één afgeschuinde zijde 120 × 20 mm) opsluitbanden (60, 80 òf 100 × mm en 120 mm), verkeersblokken en tegels met witte deklaag, alsook voor licht werk betonplanken 50 × 150 mm, lang 1 m.

Betonstraatstenen

Zie hiervoor par. 7.2.

Keerwanden

Keerwanden met L-vormige doorsnede, breed 1, 2 òf 4 meter, hoogte vanaf 750 mm met 250 mm oplopend tot 6000 mm.

Perronwandstukken, L-vormig, breed 600 mm, hoog 1200 mm, voetlengte 650 mm met tot 150 mm verbrede kop.

Vloerelementen

Vloerelementen van grindbeton of lichtbeton, tevens geluid- en warmte-isolerend:

- balkenvloeren, kokerbalken of voorgespannen I-liggers naast elkaar;
- plaatvloeren, schaaldelen of kanaalplaten;
- ribbenvloeren losse blokken, met gewapend beton aaneen-gestort
- holle-blokvloeren voorgespannen liggers met tussenliggende blokken.

Alle vloersystemen zijn al of niet van een druklaag te voorzien. Er is grote verscheidenheid in vloerelementen.
Volledige documentatie is verkrijgbaar bij de fabrikant.

Betonstenen
Zie hiervoor par. 7.2.

Gevelelementen
- borstwering-elementen;
- niet-dragende gevelelementen (verdieping hoogte);
- dragende gevelelementen (verdieping hoogte);
- bekledingselementen;
- decoratieve gevelelementen.

Betonnen dakpannen
Zie hiervoor par. 10.4.

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

9 Glas

9.1 Voorschriften

NEN 1301. Glas voor gebouwen. Benamingen en definities van glassoorten.
NEN 1303. Bewerking van de zikanten van en gaten in vlak-glas. Benamingen.
NEN 2608. Vlakglas voor gebouwen. Weerstand tegen windbelasting. Eisen en bepalingsmethode.
NEN 2608-2: 2e ontw. Vlakglas voor gebouwen. Niet verticaal geplaatst glas. Weerstand tegen windbelasting, sneeuw, eigengewicht. Eisen en bepalingsmethode.
NEN 2696 (ontwerp). Glas voor gebouwen. Berekeningsmethode voor warmtedoorgangscoëfficiënt van glasruiten voor toepassing in de bouw.
NEN 3264. Glas voor gebouwen; Gesneden maten van floatglas.
NEN 3567. Glas voor gebouwen. Isolerend dubbelglas. Eisen en beproevingsmethoden.
NEN 3568. Glas voor gebouwen. Voorgespannen glas. Eisen en beproevingsmethoden.
NEN 3569: 1993 nl. Veiligheidsbeglazing in gebouwen.
NEN 3569: 2000 2e ontw.nl. Veiligheidsbeglazing in gebouwen.
NEN 3576 Beglazing van kozijnen, ramen en deuren. Functionele eisen.
NPR 3577. Beglazen van gebouwen (met correctieblad januari 1989).
NPR 3599. Vlakglas voor gebouwen. Bepaling van de minimum dikte voor windbelasting, zie NEN 2608.
NPR 3599. Aanvulling. Vlakglas voor gebouwen. Bepaling van de minimum glasdikte voor windbelasting. Afgestemd op de NEN 2608.
NEN 5128. Energieprestatie van woningen en woongebouwen. Bepalingsmethode.
NEN-EN 12412-2 (ontwerp). Ramen, deuren en luiken. Bepaling van de warmtegeleiding met de warmtekastmethode. Deel 2: kozijnen.

In deze normen is uitgebreide informatie te vinden. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* (NEN) te Delft. Een compleet overzicht is gegeven in de NEN-bundel 15: 1998. Normen voor glas en beglazen van gebouwen.

9.2 Vlakglas

Tabel 9.1 Gegevens diverse vlakglassoorten

glas	doorzichtig vlakglas dat een mechanische en/of thermische behandeling heeft ondergaan om de opervlakken parallel en vlak te maken	
dikten [mm]	3 ± 0,2	10 ± 0,3
	4 ± 0,2	12 ± 0,3
	5 ± 0,2	15 ± 0,5
	6 ± 0,2	19 ± 1,0
	8 ± 0,3	
norm	eisen, monsterneming en beproevingsmethoden volgens NEN 3264	
lichttoetredingsfactor	van ca. 0,83 (19 mm dik) tot ca. 0,91 (3 mm dik)	
buigbreeksterkte	ca. 42 N/mm^2	
dichtheid	ca. 2500 kg/m^3	
figuurglas	vlakglas met een gefigureerd oppervlak aan één of beide zijden	
dikten [mm]	alle dessins 4, 5, 6, 8, 10 enkele dessins ook 15, 20	
afmetingen [mm]	een aantal soorten niet breder dan 1200–1700	
kleuren	blank, brons, geel	
lichttoetredingsfactor	max. 0,92 afhankelijk van kleur en dessin	
buigbreeksterkte	32 N/mm^2	
dichtheid	ca. 2500 kg/m^3	

Tabel 9.1 (vervolg)

profielglas	glasstrook in U-vorm in standaard-breedte, met of zonder draadinleg	
soorten	licht gefigureerd, bepaalde soorten met draad in lengterichting, warmte-reflecterende uitvoering alleen zonder draad	
dikten [mm]	5/6, 6, 8	
afmetingen [mm]	breedten uitwendig	232, 249, 262, 331, 498
	profielhoogten	41, 55, 60
	lengten	max. 7000
lichttoetredingsfactor	enkele uitvoering	ca. 0,89
	dubbele uitvoering	ca. 0,81
	afhankelijk van fabrikaat	
dichtheid	ca. 2500 kg/m^3	
draadglas	doorschijnend vlakglas met draadinleg	
soorten	normaal draadglas figuurdraadglas	gepolijst draadglas
dikten [mm]	6–7 8–10 (speciale bestelling)	5,5–7
afmetingen [mm]		
–max. breedte	1880	1830
–max. lengte	4500	3300
lichttoetredingsfactor	normaal 0,85–0,87 figuur	0,80 0,81–0,83
draadnet	vierkant gepuntlast, 12 mm maas	
buigbreeksterkte	ca. 30 N/mm^2	
brandwerendheid	20–45 minuten afhankelijk van glasafmetingen, aard van de sponningen, plaatsingsmethode en omringende constructie	

Tabel 9.1 (vervolg)

bestand tegen temperaturschokken	gering	
dichtheid	ca. 2600 kg/m^3	
voorgespannen glas	**thermisch** gehard normale en warmte-absorberende uitvoeringen	
soorten	glas	figuurglas
dikte [mm]	5, 6, 8, 10, 12	6, 8, 12
dikten deuren [mm]	8, 10, 12	8, 10
lichttoetredingsfactor	0,85–0,88	max. 0,92
kleuren	brons grijs groen	brons geel
afmetingen [mm]	max. o.a 4500 × 1800 3170 × 2540 3500 × 3000	
	afhankelijk van fabricagemogelijkheden	
norm	keuring volgens NEN 3568	
buigbreeksterkte	ca. 200 N/mm^2	
brandwerendheid	ruim 10 minuten (onvoldoende)	
bestand tegen temperatuurschokken	in sterke mate	
dichtheid	ca. 2500 kg/m^3	
half gehard glas:	**thermisch** versterkt	
soorten	glas, gecoat glas, gëmailleerd glas, glas voorzien van een translucente dekaag, gegoten glas, getrokken glas	
dikten	volgens opgave fabrikant	
afmetingen	volgens opgave fabrikant	

Tabel 9.1 (vervolg)

norm	**BRL** 2206
brandwerendheid	bestand tegen een temperatuursverschil van 100 K, bij breuk valt het uiteen in grote stukken
buigbreeksterkte	hoger dan van gewoon glas
voorgespannen glas	**chemisch** gehard
soorten	glas, bepaalde patronen figuurglas, warmtewerend glas
dikten [mm]	2,7–53 (gelaagd)
afmetingen [mm]	max. 3000 × 1955
lichttoetredingsfactor	0,75–0,93
buigbreeksterkte	ca. 400 N/mm^2
brandwerendheid	ruim 10 minuten (onvoldoende)
bestand tegen temperatuurschokken	in sterke mate
dichtheid	ca. 2500 kg/m^3
voorgespannen glas:	**geëmailleerd**
soorten	glas, figuurglas
dikten [mm]	normale handelsdikten glas en figuurglas min. 6
afmetingen [mm]	max. 4500 × 1800 3170 × 2540 3500 × 3000
kleuren	30 à 40
buigbreeksterkte	ca. 120 N/mm^2

Tabel 9.1 (vervolg)

warmte-absorberend glas			
soorten	glas	figuurglas	draadglas figuur- draadglas
dikten [mm]	4, 5, 6 8, 10, 12	3, 4, 5, 6, 8	6, 7, 8
kleuren	brons grijs groen	brons	brons
lichttoetredingsfactor	afhankelijk van dikte, kleur en soort		
warmtereflecterend glas			
soorten	met in vacuüm opgedampte metaallaag met ingebrande metaaloxidelaag		
dikten [mm]	4, 5, 6, 8, 10, 12 afhankelijk van fabrikaat		
afmetingen	afhankelijk van fabrikaat		
lichttoetredingsfactor	0,08–0,60		
isolerend dubbelglas			
soorten	gesoldeerd: d.m.v. metaalstrip tussen de vooraf verkoperde glasranden versmolten: d.m.v. versmelten glas-randen gekit: met organische kitten en metalen afstandshouder isolerend glas met luchtgevulde spouw isolerend glas met gasgevulde spouw		
norm	BRL 2201, 2202, 2203, 2204		

Tabel 9.1 (vervolg)

spouwbreedten [mm]	6, 8, 9, 10, 12 (deze worden meest toegepast)
afmetingen	min. en max. afhankelijk van fabrikaat
norm	eisen, keuring en beproevingsmethoden volgens NEN 3567
hoogrendement glas:	warmtereflecterend isolerend dubbel glas dat aan speciale eisen voldoet
soorten	met in vacuüm opgedampte metaalaag met ingebrande metaaloxidelaag, spouw luchtgevuld, spouw gasgevuld
spouwbreedten [mm]	6, 9, 12, 15
afmetingen	afhankelijk van het fabrikaat
lichttoetredingsfactor	$\geq$ 70% i.v.m. subsidie
norm	BRL 2202/2, NEN 2676
gelaagd glas:	**kunststoffolie** tussenlaag (polyvinylbutiral, PVB)
soorten	blank glas, warmte-warmte-absorberend glas of folie, figuurglas, gepolijst draadglas, warmtereflecterend glas, voorgespannen glas, isolerend dubbelglas
dikten [mm]	7–75
afmetingen [mm]	max. 2550 $\times$ 3600
max. massa/eenheid	850 kg
lichttoetredingsfactor	0,75–0,93
buigbreeksterkte	ca. 42 N/mm^2
brandwerendheid	ruim 10 minuten voor drie lagen (onvoldoende)
bestand tegen	gering
temperatuurschokken	
dichtheid	ca. 2500 kg/m^3

Tabel 9.1 (vervolg)

gelaagd glas:	harsachtige tussenlaag (acrylaat-giethars)
soorten	geluidwerend glas gelaagd, geluidwerend-isolerend glas gelaagd met luchtgevulde spouw, geluidwerend-isolerend glas gelaagd met gasgevulde spouw
dikten [mm]	afhankelijk van fabrikant, spouwbreedte variërend van 12 tot 14 mm
geluidwerendheid	29–34 dB(A)
veiligheid	de dikte van de gietharslaag is 1,3-2,0 mm en is beperkt splinterbindend, het mag derhalve niet als veiligheidsglas worden gebruikt
duurzaamheid	isolerend glas waarbij de spouw met gas is gevuld dienen met voorzichtigheid te worden toegepast omdat de duurzaamheid onzeker is en door de oncontroleerbaarheid van de spouw
gelaagd glas:	tussenlaag gevormd door doorzichtig materiaal
soorten	gelaagd glas met doorzichtig materiaal dat bij hitte een isolerende en vuurvaste schuimlaag vormt gelaagd isolerend glas met doorzichtige gel in de spouw dat bij verhitting in brandwerende schuim overgaat, zonlicht kan dit glas ondoorzichtig maken
brandwerendheid	30–90 min.
dikten [mm]	afhankelijk van de fabrikant
glazen bouwstenen	uit geperst glas vervaardigde glazen stenen
soorten	holle stenen, diverse dessins en kleuren

Tabel 9.1 (vervolg)

afmetingen [mm]	190 × 190 × 80		
	240 × 240 × 80		
	240 × 115 × 80		
	300 × 300 × 100		
lichttoetredingsfactor	0,50–0,55		
opalineglas	vlakglas bestaande uit een blank basisglas en een dunne opgesmolten, ondoorzichtige laag van wit of gekleurd glas		
soorten	wit		gekleurd (o.a. wit, geel)
dikten [mm]	1,7–2,6	4,0–5,0	1,8–2,5
	2,7–3,3	5,0–6,0	2,5–3,5
	3,5–4,2	3,5–4,2	
lichttoetredingsfactor	ca. 0,50–0,55		
antiek glas			
soorten	antiekglas	nieuw antiekglas	
dikten [mm]	ca. 2–5	ca. 2–3	
glasschuim			
soorten	T2	S3	board
afmetingen [mm]	300 × 450	450 × 600	600 × 1200
druksterkte [N/mm^2]	0,45	0,53	
buigsterkte [N/mm^2]	0,45	0,53	
dikten [mm]	25, 30, 35, . . . , 85, 90, 100, 120, 130		

9.3 Ruitdikte glas

Tabel 9.2 Bepaling toelaatbare ruitoppervlakte aan de hand van ruithoogte en gebiedsafhankelijke[1] windbelasting

hoogte midden ruit boven maaiveld [m]						**wind-belasting** [N/m^2]	**toelaatbare ruitoppervlakte** [m^2]						
gebied I		gebied II		gebied III			enkel glas, dikte [mm]				dubbel glas dikte [mm]		
o	b	o	b	o	b		4	5	6	8	5–4	6–4	8–6
				<4	<10	450	1,59	2,54	3,71	6,54	3,27	4,10	8,03
				4		500	1,43	2,29	3,34	5,89	2,94	3,69	7,23
		<4	<10	5		550	1,30	2,08	3,03	5,35	2,68	3,36	6,57
		4	10	6	10–13	600	1,19	1,91	2,78	4,91	2,45	3,08	6,03
<3	<10		11	7–8	14–15	650	1,10	1,76	2,57	4,53	2,26	2,84	5,56
3	10	5	12–13	9	16–17	700	1,02	1,63	2,38	4,21	2,10	2,64	5,16
	11	6–7	14	10–11	18–19	750	0,95	1,53	2,22	3,93	1,96	2,46	4,82
4	12	8	15–16	12–14		800	0,89	1,43	2,09	3,68	1,84	2,31	4,52
5	13	9	17	15–17	20–22	850	0,84	1,35	1,96	3,46	1,73	2,17	4,25
6	14	10–11	18–19	18–19	23–25	900	0,79	1,27	1,85	3,27	1,64	2,05	4,02
7	15	12–13	20	20	26–30	950	0,75	1,20	1,76	3,10	1,55	1,94	3,81
8–9	16–17	14–15		21–25		1000	0,72	1,14	1,67	2,94	1,47	1,85	3,62
10	18	16–18	21–25	26–30	31–35	1050	0,68	1,09	1,59	2,80	1,40	1,76	3,44
11–12	19–20	19–20		31–35	36–40	1100	0,65	1,04	1,52	2,68	1,34	1,68	3,27
13–14			26–30	36–40	41–50	1150	0,62	0,99	1,45	2,56	1,28	1,61	3,14
15–16		21–25	31–35	41–45		1200	0,60	0,95	1,39	2,45	1,23	1,54	3,01
17–19	21–25	26–30	36–40	46–50		1250	0,58	0,92	1,33	2,36	1,18	1,48	2,89
20		31–35				1300	0,55	0,88	1,28	2,27	1,13	1,42	2,78
21–25	26–30	36–40	41–45			1350	0,53	0,85	1,24	2,18	1,09	1,37	2,68
		41–45	46–50			1400	0,51	0,82	1,19	2,10	1,05	1,32	2,58
26–30	31–35	46–50				1450	0,49	0,79	1,15	2,03	1,02	1,27	2,49
31–35	36–40					1500	0,48	0,76	1,11	1,96	0,98	1,23	2,41
36–40	41–45					1550	0,46	0,74	1,08	1,90	0,95	1,19	2,33
41–45	46–50					1600	0,45	0,72	1,04	1,84	0,92	1,15	2,26
46–50						1650	0,43	0,69	1,01	1,78	0,89	1,12	2,19
				100	100	1500	0,48	0,76	1,11	1,96	0,98	1,23	2,41
		100	100			1700	0,42	0,67	0,98	1,73	0,87	1,09	2,13
100	100					1900	0,38	0,60	0,88	1,55	0,77	0,97	1,90

[1] Gebied I: Markermeer, Waddeneilanden, Noord-Holland ten noorden van de gemeenten Heemskerk, Uigeest, Wormer, Jisp, Purmerend en Edam- Volendam.
Gebied II: resterend deel van Noord-Holland, de IJsselmeerpolders, Zeeland, Zuid-Holland, Friesland en Groningen.
Gebied III: resterend deel van Nederland.
o = onbewoond; b = bewoond.

Normen: NEN 2608, NPR 3599.

Tabel 9.3 Minimum handelsdikte van het binnenblad van isolerend dubbelglas (tweebladig) [mm]

handelsdikte buitenste glasblad	min. handelsdikte 2e glasblad[1)]	handelsdikte buitenste glasblad	min. handelsdikte 2e glasblad[1)]
4	4	8	6
5	4	10	6
6	4	12	8

[1)] Het is toegestaan om af te wijken van deze min. handelsdikte (bijv. om akoestische redenen). Dit dient in overleg met de fabrikant te worden vastgesteld (min. 4 mm).

9.4 Veiligheidsglas

Tabel 9.4 Klasse- en type-indeling voor de toepassing van veiligheidsglassoorten

gebouwdelen	hoogte (h) + voorwaarden	categorieën van bouwwerken					
		A	B	C	D	E	F
scheidingsconstructies incl. beweegbare constructieonderdelen	$h \leqslant 0{,}85$ m[1)]	IIb,c	IIb,c	IIb,c	IIb,c	IIb,c	IIb,c
scheidingsconstructies incl. beweegbare constructieonderdelen	$0{,}85 \text{ m} < h \leqslant 1{,}40$ m[1)]	–	IIIb,c	IIIb,c	IIIb,c	–	–
scheidingsconstructies incl. beweegbare constructieonderdelen	$h \leqslant 0{,}85$ m én ter plaats van niveauverschil $> 1{,}0$ m[1)]	Ib	Ib	Ib	Ib	Ib	Ib
scheidingsconstructies incl. beweegbare constructieonderdelen	$0{,}85 \text{ m} < h \leqslant 1{,}40$ m én ter plaatse van ontsluitingswegen van ruimten én ter plaatse van een niveauverschil $> 1{,}0$ m[1)]	–	IIIb	IIIb	IIIb	–	–

balustraden	$h \leqslant 1{,}0$ m én niveauverschil ter plaatse $\leqslant$ 13,0 m én $h \leqslant 1{,}20$ m én niveauverschil ter plaatse $> 13{,}0$ m	Ib	Ib	Ib	Ib	Ib	Ib
dakbeglazing		Ib	Ib	Ib	Ib	Ib	Ib
dakramen en daglichten		IIb,c	IIb,c	IIb,c	IIb,c	IIb,c	IIb,c

Deze tabel is gebaseerd op NEN 3569 (bron).

h = hoogte vloerafscheiding, gemeten vanaf de aangrenzende vloer.

Klasseindeling volgens 2e ontwerp van NEN-EN 12600:
I = valhoogte 1200 mm
II = valhoogte 450 mm
III = valhoogte 190 mm

Breukpatroontype:
b = Breuk waarbij scherven bij elkaar worden gehouden en geen grotere opening ontstaat dan 76 mm (voorbeelden zijn gelaagd veiligheidsglas, draadglas en kunststof).
c = Volledige desintegratie in kleine stukjes (bijv. thermisch voorgespannen glas).

1) = Wand ter afscheiding betreft ook windschermen.

Categorieën van bouwwerken:
A = Niet gemeenschappelijk deel van woonfuncties of logiesfuncties, alsmede daartoe behorende overige gebruiksfuncties, zoals buitenbergingen en garages.
B = Kantoorfuncties, onderwijsfuncties, gezondheidsfuncties en niet onder A bedoelde ruimten van woongebouwen en logiesverblijven.
C = Verkoopruimten van winkelfuncties.
D = Bijeenkomstfuncties, sportfuncties, overige gebruiksfuncties voor het personenvervoer en het gedeelte van bouwwerken, geen gebouw zijnde, mede bestemd voor bezoekers.
E = Industriefunctie.
F = Bibliotheek - en archiefruimten.

Opmerkingen:

– Voor isolerend dubbel glas moet het veiligheidsglas in ieder geval aan de stootsijde worden geplaatst, omdat daar persoonlijk letsel kan optreden bij glasbreuk.
– Bij dakbeglazing moet het veiligheidsglas in ieder geval aan de onderzijde worden geplaatst.
– Bij mogelijkheid tot doorloop van het niet zichtbaar zijn van glas op ooghoogte markeringen aanbrengen conform het ARBO-besluit.

9.5 *Brandwerende beglazing*

Indeling in hoofdgroepen:

a. Enkelbladig brandwerend glas
- draadglas;
- voorgespannen glas.

Eigenschappen:
- verweking treedt op bij brand tussen 30 en 60 min. (zonder dat dit ten koste hoeft te gaan van de brandwerende functie);
- blijven transparant tijdens een brand;
- behoeven geen UV-bescherming.

b. Meerbladig brandwerend glas
- glas met anorganische (giethars) tussenlaag;
- glas met een anorganische (silicaatgel) tussenlaag

Respectievelijk de niet-opschuimende en de opschuimende brandwerende glastypen.

Eigenschappen:
- de ruit aan de niet brandzijde blijft over het algemeen langer stabiel door een lagere oppervlakte-temperatuur die ontstaat door de isolerende werking van de tussenlaag;
- de ruit verandert in de beginfase van de brand van transparant naar ondoorzichtig.

De hiervoor beschreven brandwerende beglazing kan worden opgenomen in verticaal toegepast isolerend dubbelglas, volgens de richtlijnen van de fabrikant.
Bij brandwerende glasconstructies moeten altijd de randaan-sluitingen en de beglazingsmaterialen mede in ogenschouw worden genomen.

Tabel 9.5 Overzicht van maximaal toepasbare oppervlakte

Tijdsduur brandwering/soort glas	Max. toepasbare oppervlakte
30 min. Brandwering	
Enkelbladig glas	
– draadglas[1)]	tot 1,7 m^2
– diverse soorten enkel	tot 10 m^2
– diverse soorten dubbelglas	van 10 m^2 tot geen beperking
Meerbladig glas	
– diverse soorten	van 4,5 m^2 tot geen beperking
60 min. Brandwering	
Enkelbladig glas	
– draadglas[1)]	tot 0,9 m^2
– diverse soorten enkel	tot 2,1 m^2
– diverse soorten dubbel	van 3,6 m^2 tot 5,8 m^2
Meerbladig glas	
– diverse soorten	van 3,1 m^2 tot geen beperking

[1)] Voor draadglas geldt een toepassing in een segment van maximaal 2,5 × 2,5 m^2 en alleen mits een TNO rapport aanwezig is waarin de randvoorwaarden van de test zijn vastgelegd.

Tabel 9.6 U-waarden van raamsystemen (kozijn + glas); ongeacht het glaspercentage

U_{glas} [W/(m^2.K)]	kozijn met U_{kozijn} [W/(m^2.K)]												
	1,0	1,4	1,8	2,0	2,4[1)]	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8[2)]	7,0[3)]
enkel glas	4,8	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3	5,4	5,4	6,2
meervoudig glas													
3,3	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	4,6
3,2	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	4,5
3,0	2,7	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	4,4
2,8	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	4,2
2,6	2,4	2,5	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1	3,1	4,1
2,4	2,3	2,4	2,4	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	3,0	3,0	4,0
2,2	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7	2,8	2,8	2,9	3,8
2,0	2,0	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	3,7
1,8	1,8	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	3,6
1,6	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,5	3,4
1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3	3,3
1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,1	2,1	2,2	3,1
1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	3,0
0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	2,0	2,9
0,7	0,9	1,1	1,2	1,2	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	2,8
0,5	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	2,7

Tussenliggende waarden moeten rechtlijnig geïnterpoleerd worden.
U_{glas} is de *U*-waarde van het glas in W/(m^2.K).
U_{kozijn} is de *U*-waarde van het kozijn in W/(m^2.K).
[1)] Zie B.3 van NEN 5128 of gebruik voor een kozijn van hout of kunststof als forfaitaire waarde $U_{kozijn} = 2{,}4$ W/(m^2.K).
[2)] Zie B.3 van NEN 5128 of gebruik voor een metalen kozijn met thermische onderbreking als forfaitaire waarde $U_{kozijn} = 3{,}8$ W/(m^2.K).
[3)] Zie B.3 van NEN 5128 of gebruik voor metalen kozijn zonder (voldoende) thermische onderbreking: $U_{kozijn} = 7{,}0$ W/(m^2.K).

Bron: Poly-Installatie Zakboekje 4e druk, Elsevier/Intechnium
Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf

10 Dakbedekkingen

10.1 Toelaatbare dakhelling

Tabel 10.1 Toelaatbare dakhelling bij verschillende soorten dak bedekking

dakbedekking	helling [graden]	gewicht dakvlak [N/m^2]
pannen	25–75[1)]	400–500
leien	40–90	300–500
leipannen	30–90	700
asfaltpapier	10–55	100–300
teerhoudende bedekking (met grind)	2–7	300–400 (200 per cm. dikte extra)
teervrije bedekking	10–55	100–120
zink	2–90	50–100
koper	2–90	150–200
lood	2–90	250–400
gegolfd plaatstaal	20–90	250–350
gegolfd kunststof	20–90	20–50
draadglas	25–90	200–400
riet	40–90	300–500

[1)] Met speciale voorzieningen is een flauwere dakhelling mogelijk.

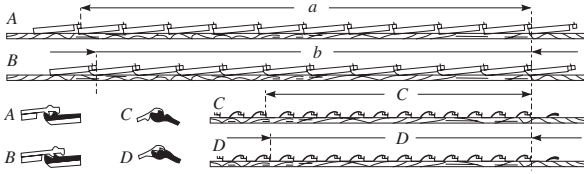
10.2 Dekking met pannen

Latafstand en dekkende breedte

Bepaling van de verticale en horizontale dekkingen:

- Men neemt 12 pannen uit de tas en legt die ‘getrokken’ neer op de wijzen zoals in figuur 10.1 is aangegeven, en meet dan de aangegeven lengte over 10 pannen op; men legt de pannen daarna ‘gedrukt’ neer en meet nogmaals.
- de latafstand wordt dan gevonden met $(a + b)/20$, de dekkende breedte volgens $(c + d)/20$.

Wanneer voor een goede afwerking van het dakvlak bekende hulpstukken als bovenpannen, onderpannen of gevelpannen worden gebruikt, moeten deze in de berekening worden betrokken.



A Bepaling latafstand pannen – pannen 'getrokken': afstand *a*.
B Bepaling latastand pannen – pannen 'gedrukt': afstand *b*.
C Bepaling dekkende breedte pannen – pannen 'getrokken': afstand *c*.
D Bepaling dekkende breedte pannen – pannen 'gedrukt': afstand *d*.

Figuur 10.1 Meten van de latafstand en de dekkende breedte

10.3 Keramische dakpannen

Norm

NEN-EN 539–2. Keramische dakpannen; Bepaling van de fysische eigenschappen (deels).
NEN-EN 1024. Keramische dakpannen; Bepaling van de geometrische eigenschappen
NEN-EN 1304. Keramische dakpannen (deels)
NEN-EN 6707. Bevestiging van dakbedekkingen. Eisen en bepalingsmethode.
NPR 6708. Bevestiging van dakbedekkingen. Richtlijnen.

Voorschriften en adviezen dakdekken Nedaco

Door de *Vereniging Nederlandse Dakpannenfabrikanten Corporate Nedaco* (Postbus 36, 6994 ZG De Steeg) zijn de volgende voorschriften en adviezen voor het dakdekken gegeven, waarnaar zowel in de leveringsvoorwaarden, als in de garantiebepalingen wordt verwezen. De fabrikant garandeert van dakpannen en hulpstukken voor 10 jaar de vorstbestandheid bij technisch verantwoord gebruik; daarbij is het een vereiste dat aan de volgende voorschriften wordt voldaan:

V1 Isolatie

Gespoten of geblazen isolatie die de ruimte tussen pannen en beschot geheel dichtzet, niet toepassen.

V2 Aansmeren

a Gebruik mortel ½ P.C., 1 kalk: 4–5 metselzand, en nooit meer dan nodig is om het bewegen van hulpstukken te voorkomen.
b Vul vorsten en broekstukken nooit geheel op met specie.
c Smeer de gewone dakpannen nooit aan.
d Gebruik geen schuimplastic-strips e.d. in de voegen tussen de pannen.

V3 Minimum dakhelling

De minimum dakhelling is 25°. Het is noodzakelijk om bij een dakhelling die kleiner is dan 25° de fabrikant en/of Nedaco te raadplegen.

V4 Ventilatie en constructie dakschild

Tabel 10.2 geeft voor de verschillende dakhellingen de aan te houden minimum afmetingen van de tengels en de maximum lengte van het dakschild.

Bij *niet-ventilerende* nokconstructies moeten ter weerszijden van de nok over de volle dakbreedte ventilatiepannen worden toegepast, zoals in tabel 10.2 is aangegeven.

De volgende nokconstructies worden als *ventilerend* beschouwd:
– Niet-aangesmeerde zadel- of omloopvorsten en ballonvor-sten.
– Halfronde vorsten met universele ventilerende ondervorsten.
– Halfronde vorsten op ventilerende bovenpannen.

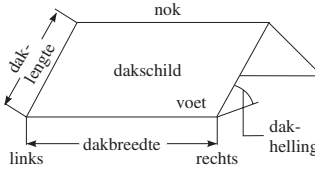
V5 Verankeren

Ten aanzien van de verankering moet aan de eisen van het bouwbesluit resp. NEN 6707 en NPR 6708 worden voldaan.

Tabel 10.2 Minima voor vrije tengelhoogte[1] en maximale lengte dakschild (Voorschriften en adviezen dakdekken, Nedaco)

dakhelling [graden]	vrije tengelhoogte [mm]	lengte dakschild	max. h.o.h. afstand ventilatiepannen langs nok[1] [m]
15°–20°	32	maximale lengte in m =	1
20°–25°	22	helft aantal graden van de dakhelling	1½
25° en steiler	10 (22)[2]	bijv. dakhelling 25° max. lengte dakschild = ½ × 25 = 12,5 m	2

[1] Onder *vrije tengelhoogte* wordt verstaan de open ruimte tussen dakbeschot en/of isolatie en onderkant panlat.
[2] Voor vlakke dakpanmodellen wordt een vrije tengelhoogte van 22 mm aanbevolen.



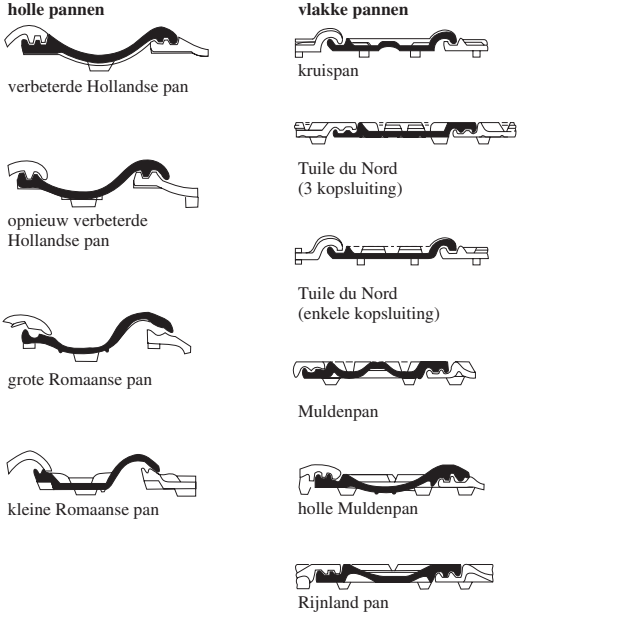
Figuur 10.2 Begrippen bij daken

Eigen gewicht [N/m^2]
- Pannendak met latten, tengels, bebording en gordingen: 750.
- Pannendak met latten, sporen en gordingen: 700.

Tabel 10.3 Gegevens keramische pannen[1)] *(zie ook figuur 10.3)*

pantype	panlat-afstand h.o.h. [mm]	werkende breedte [mm]	aantal per m^2	gewicht [N/m^2]
holle pannen				
Hollandse pan	220–290	190–210	17–19	370–540
verbeterde Holl. pan	295–315	220	15,5	400–440
opn. ver. Holl. pan	295–315	205	16	400–440
super opn. verb. Holl. pan	344	205	14,5	405
kleine Romaanse pan	265	180	21	400
grote Romaanse pan	287	204	17,1	440
vlakke pannen				
Tuile du nord	235–262	192–205	19–23	440
Muldenpan	345	208	14	395
holle Muldenpan	350	200–210	14	405
Rijnland pan	349	202	15	390
platte Friese pan	290	210	17	430
gegolfde Friese pan	285	210	17	420
grote kruispan	240	200	21	400
kleine kruispan	170	140	40	360
leipan rechthoekig	lang 270	breed 165	55	680
leipan afgerond	lang 270	breed 138	69	550

[1)] De verschillende fabrieken leveren volgens eigen maten (er is nog geen normalisatie): deze tabel geeft een aanwijzing.



Figuur 10.3 Modellen van holle en vlakke keramische pannen

Tabel 10.4 Toepasbaarheid van keramische pannen

dakhelling	toepasbaarheid
15°–25°	enkele fabrikanten en modellen (o.a. super opnieuw verbeterde holle pan): – extra voorzieningen aan onderdak – vooraf overleg met fabrikant en/of Nedaco gewenst
25°–55°	meest gangbaar
55°–75°	panhaken
<15°, >75°	ongeschikt

10.4 Betondakpannen

sneldek

Dubbele asymmetrische golf; oppervlak met granulaatafwerking of glad; kleuren: antraciet, bruin, herfstkleur, zilverkleur, donkerbruin, hollands rood, framhouse.

stonewold

Leipan met zijsluiting; glad oppervlak; kleuren: antraciet en bruin.

Neroma

Dubbele symmetrische golf; glad oppervlak; kleuren; als sneldek pannen, waartoe pannen uit de diverse pakketten door elkaar verwerkt moeten worden.

Bourgondische lei

Glad oppervlak; kleur: rustiek bruin.

Figuur 10.4 Soorten betondakpannen

Norm

NEN-EN 490. Betonnen dakpannen en hulpstukken. Producteisen.
NEN-EN 491. Betonnen dakpannen en hulpstukken. Beproevingsmethode.

Tabel 10.5 Technische gegevens betondakpannen

(maten in mm)		sneldek	stonewold	Neroma	Bourgondische lei
afmetingen		420 × 332	420 × 332	420 × 332	270 × 165
gem. werkende breedte		300	300[2]	300	300
gewicht per stuk (ca.) [N]		47	56	47	55
aantal per m^2		9,7	9,7	9,7	68
gewicht per m^2	[N]	460	540	460	800
dakhelling[3]					
> 30°	max. latafstand	345	345	345	105
	min. overlap[1]	75	75	75	90
25–30°	max. latafstand	335	335	335	–
	min. overlap[1]	85	85	85	–
20–25°	max. latafstand	325	325	325	–
	min. overlap[1]	95	95	95	–

[1] Deze pannen hebben geen opstand bij de kopsluiting, wel een waterhol aan de onderzijde van de pan.
[2] Inclusief voeg van 4 mm.
[3] Bij een zeer flauwe dakhelling (< 15°) kan het nodig zijn een waterkerend onderdak toe te passen; zie de voorschriften van de fabrikant.

10.5 Bitumineuze dakbedekking

Normen

NEN 2081. Bitumen dakbanen, van geblazen bitumen, met SBS of APP gemodificeerd bitumen.
NEN 2086. Bitumen dakbanen, monsterkeuring.
NEN 2087. Bitumen dakbanen, bepaling van de samenstelling.
NEN 2088. Bitumen dakbanen, bepaling van de vloei bij een voorgeschreven temperatuur.
NEN 2089. Bitumen dakbanen, bepaling van de lage temperatuurs-flexibiliteit.
NEN 2091. Bitumen dakbanen, bepaling van de weerstand tegen trekbelasting.
NEN 2093. Bitumen dakbanen, bepaling van de scheursterkte.
NEN 2094. Bitumen dakbanen, bepaling van de waterdichtheid.
NEN 2095. Bitumen dakbanen, aanvullende bepalingen voor onderzoek van geperforeerde dakbanen.
NEN 3940. Bitumen en teerproducten, monsterneming.
NEN-EN544. Bitumen shingels met minerale- en/of synthetische inlage.

Kwaliteitseisen

Zie hiervoor *Venedak kwaliteitseisen* opgesteld door *Venedak* te Scherpenzeel en *BDA* te Gorinchem.

Bitumineuze producten gebruikt voor dakbedekking zijn:
- gewapende dakrollen;
- ongewapende dakrollen;
- vloeibare dakbedekking;
- hecht-, kleef- en afwerklagen.

Inlagematerialen

De belangrijkste functie van inlagematerialen van bitumineuze dakbanen is die van wapening, bedoeld om de rek in het bitumen te beperken.

Soorten: glasvezel, glasvlies, geperforeerd glasvlies, polyestermat, polyestermat + glasvlies, glasvlies + polyestermat, polyesterglas-combinate.

Tabel 10.6 Eigenschappen van diverse bitumensoorten

bitumensoorten	eigenschappen
geblazen bitumen	– sterk gevoelig voor veroudering door verwering onder invloed van zuurstof (wordt harder en brosser) – sterke teruggang van de breukrek in de loop der tijd – relatief goedkoop – wordt niet meer voor een toplaag toegepast
SBS-gemodificeerd bitumen[1)]	– fraai uiterlijk in gemineraliseerde uitvoering – goede lage temperatuurflexibiliteit – hoge vermoeiingsweerstand en elasticiteit (bepaald door het type inlage) – minder goede UV-bestendigheid, waardoor in het algemeen bescherming nodig is (gemineraliseerd of geballast) – eventuele krimp van polyesterinlage zal zich gemakkelijk manifesteren, dus baanlengte $\leq$ 5 m – vervolgonderhoud is minder eenvoudig dan bij APP door gemineraliseerde uitvoering – iets duurder dan APP
APP-gemodificeerd bitumen[2)]	– hoge temperatuurstabiliteit – hoge weerstand tegen veroudering waardoor bescherming nauwelijks nodig is – weinig onderhoud nodig en het vervolgonderhoud is eenvoudig en goedkoop uit te voeren – zeer geschikt voor de brandmethode, niet voor het gietsysteem – geen fraai uiterlijk – minder goede lage temperatuurflexibiliteit – minder hoge vermoeiingsweerstand en elasticiteit (afhankelijk van de inlage) – niet geschikt voor toepassing in combinatie met onbehandeld zink en loden hulpstukken, deze moeten dan van een bitumenoplossing worden voorzien – oplosmiddelhoudende hechtlagen en koude kleefstoffen kunnen het APP oplossen – iets goedkoper dan SBS

[1)] SBS = Styreen Butadien Styreen
[2)] APP = Atactisch Poly Propeen

10.6 Kunststof dakbedekking

Normen

- Ontw. NEN-EN 495-1 t/m 495-4. Dakbanen en afdichtingsbanen van thermoplasten en elastomeren.
- Bepaling van de maatverandering na verwarming (1-Eng).
- Bepaling van de scheurweerstand (2-Eng).
- Bepaling van de weerstand tegen spleetdruk (3-Eng).
- Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen (4-Eng).

Kwaliteitseisen

Zie hiervoor BDA Dakadvies te Gorinchem.

Soorten kunststoffen voor dakbanen

Kunststoffen voor dakbedekkingssystemen zijn in twee groepen te onderscheiden die verschillen vertonen in structuur en eigenschappen:

- *plastomeren* (of thermoplasten): de macro-moleculen zijn onderling niet chemisch aan elkaar verbonden, maar bevinden zich in meerdere of mindere mate in willekeurige positie ten opzichte van elkaar.
- *elastomeren* (of synthetische rubbers): de macro-moleculen zijn door chemische dwarsverbindingen op relatief grote afstanden tot wijdmazige netwerken verbonden (door middel van vulkanisatie).

Voorbeelden van plastomeren: PVC niet bitumenbestand, PVC bitumenbestand, PEC gechloreerd polyethyleen, PEH samengesteld uit meerdere kunststoffen, PIB polyisobuthyleen, ECB plastomere kunststof. Nieuwe kunststof dakbanen zijn op basis van FPO thermoplastische polyolefinen of FPO flexibele polyolefinen

Voorbeelden van elastomeren: CSM gechlorosulftoneerd Polyethyleen, EPDM elastomere kunststof TPE thermoplastische elastomeer. Meest toegepast kunststof dakbaan is EPDM. Algemene opmerkingen PVC en EPDM:

- in verband met gevaar van teveel inwendige condensatie niet toepassen op ongeïsoleerde houten onderconstructies;
- bij overige ongeïsoleerde constructies rekening houden met thermische werking van de onderconstructie;
- op geprofileerde stalen dakplaten altijd een thermische isolatie toepassen;

– op steenachtige ondergrond met afschotlaag een dampremmende laag toepassen.

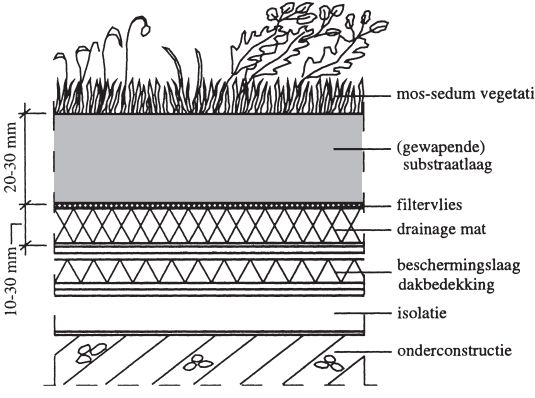
Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

11 Begroeide daken

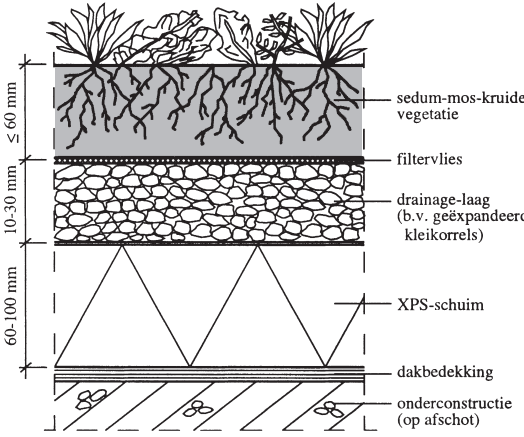
Normen: voor de bitumen ondergrond gelden de normen volgens par. 10.5.
De begroeide daken dienen te worden aangebracht conform de voorschriften van de leverancier.

11.1 Soorten begroeide daken

a. Kruidendak
(Zie figuur 11.1 t/m figuur 11.3). Voor kruidendaken zijn diverse combinaties mogelijk van sedum, mos en kruiden. Eventueel ook gras. Afhankelijk van de gekozen combinatie kan de substraatdikte variëren van 20 tot 200 mm. Tabel 11.1 geeft hiervan een overzicht.



Figuur 11.1 Mos-sedumdak



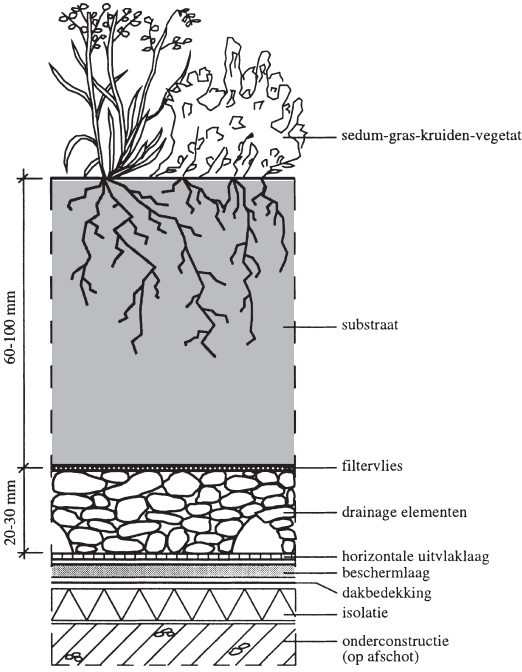
Figuur 11.2 Sedum-mos-kruidendak

b. Grasdak

(Zie figuur 11.4). Het hiervoor onder a. genoemde kruidendak wordt ten onrechte vaak benoemd als grasdak. Er is echter een aanzienlijk verschil. Een grasdak heeft altijd een vegetatie die bestaat uit een combinatie van grassen en kruiden waarbij de grassen de hoofdmoot vormen. Hiervoor is veel meer onderhoud nodig en een grasdak is veel zwaarder dan een kruidendak. Voor platte daken moet op een substraatlaag worden gerekend van 80 mm en voor hellende daken op 150 mm.

c. Tuindak

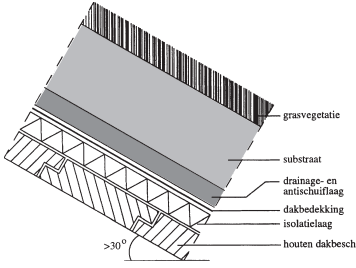
(Zie figuur 11.5). Bij tuindaken maakt men een onderscheid tussen opbouw met echte aarde als substraat en grind als drainagelaag en de opbouw waarbij veel lichtere substraatmengsels worden toegepast en de drainagelaag uit een kunststofschuim bestaat. De opbouw met aarde wordt weinig meer toegepast. Tabel 11.2 geeft een overzicht van de substraatdikte en de noodzaak voor het toepassen van een worteldoek met de positie.



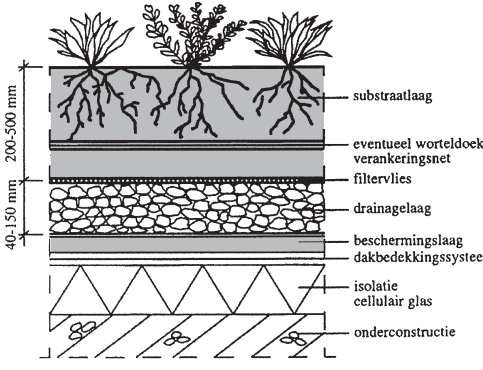
Figuur 11.3 Sedum-gras-kruidendak

Tabel 11.1 Overzicht van substraatlaag- en drainagelaagdikte van kruiden- en grasdaken.

vegetatie	dikte substraatlaag [mm]	dikte drainagelaag [mm]
1. mos-sedum	20–30	10–30
2. sedum-mos-kruiden	tot 60	10–60
3. sedum-gras-kruiden	60–100	20–80
4. gras (-kruiden)	80–200	20–60



Figuur 11.4 Grasdak



Figuur 11.5 Tuindak

Tabel 11.2 Substraatdikte bij tuindak + worteldoek

dikte substraatlaag [mm]	begroeiing	worteldoek
200–350	bodembedekkers	niet nodig
300–500	heesters	voor heesters tot 1,2 m niet nodig anders direct boven de drainagelaag
500–700	hoge heesters	± halverwege de substraatlaag
700–800	bomen	± halverwege de substraatlaag

De onderstaande tabel geeft een overzicht van het gewicht van de verschillende begroeide daken

Tabel 11.3 Gewicht begroeide daken

type	drainage	begroeiing	gewicht [kg/m^2]
grasdak	kunststof	gras-kruiden	150
kruidendak	kunststof	mos-sedum-kruiden	20–150
aarde tuindak	grind	gras en kleine planten	530
aarde tuindak	grind	struiken en boompjes	900
tuindak licht	kunststof of kleikorrels	gras en kleine planten	280
tuindak licht	kunststof of kleikorrels	struiken en boompjes	550

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

12 Verbinding en bevestiging

12.1 Houtverbindingen

Normen

NEN 6762. Stalen stiftvormige verbindingsmiddelen voor dragende houtconstructies.
NEN-EN 912. Verbindingsmiddelen voor houtconstructies. Specificaties.
NEN-EN 1194. Houtconstructies, gelijmd gelamineerd hout. Sterkteklassen en bepaling van karakteristieke waarden.
NEN-EN 1380. Houtconstructies. Beproevingsmethoden. Dragende nagelverbindingen.
NEN-EN 1381. Houtconstructies. Beproevingsmethoden. Dragende nietverbindingen.
NPR 7070. Gelijmde dragende hout- en bouwconstructies. Algemeen gedeelte.
NPR 7071. Gelijmde dragende hout- en bouwconstructies. Horizontaal gelamineerd hout.
NPR 7072. Gelijmde dragnede hout- en bouwconstructies. Verticaal gelamineerd hout en kruislanghout.

TGB 1990 (vervangt NEN 6770). Houtconstructies. Basiseisen en basisregels voor overwegend statisch belaste constructies.

Zie ook hoofdstuk F3 *Berekenen van bouwconstructies* par. 2.5 *Verbindingen*.

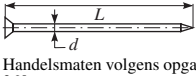
12.2 Draadnagels

Tabel 12.1 Maximaal toelaatbare maatafwijkingen draadnagels voor d_{nom}, d_{knom}, en l_{nom} [mm][1)]

d_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
–	1,2	±0,04
1,2	2,0	±0,06
2,0	2,7	±0,08
2,7	4,0	±0,10
4,0	6,0	±0,12
6,0	–	±0,15

d_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
–	3,0	±0,30
3,0	6,0	±0,37
6,0	10,0	±0,37
10,0	–	±0,45

d_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
–	25	±1,5
25	50	±2,0
50	70	±3,0
70	110	±4,0
110	–	±5,0



Handelsmaten volgens opgave van de leverancier. Max. dikte ca. 90 mm, max. lengte ca. 260 mm.

[1)] d_{nom} = nominale uitwendige middellijn van de kop van het verbindingsmiddel.
d_{knom} = nominale middellijn van de kop van het verbindingsmiddel.
l_{nom} = nominale lengte van de steel van het verbindingsmiddel.

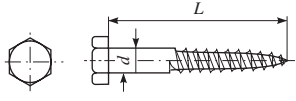
Tabel 12.2 Bijzondere soorten draadnagels en spijkers

soort	toepassing	afmetingen	in de handel
asfaltnagels (draadnagels met grote platte koppen)	bevestigen van asfaltpapier en dergelijke	lengte ¾, 1 en 1¼ duim (resp. 20 25 en 32 mm)	in pakken van 50 N
leinagels (draadnagels van rood koper)	bevestigen van leien	lengte ¾ en 1 duim (resp. 20 en 25mm)	in pakken van 50 N
stukadoornagels (al of niet vertinde spijkers)	bevestigen van de koperdraden bij gestukadoorde plafonds	1½ - ponds (1000 stuks wegen 1½ pond)	in pakken van 1000 stuks; ook in vaatjes van 500 N
vertinde spijkers (in plaats van vertind ook blauw)	door behangers en stoffeerders gebruikt	lengte 20 tot 100 mm	in pakken van 50 N
spijkers, taaie spijkers en ankernagels (deze spijkers of nagels worden machinaal geperst)	bevestigen van ankers en ander ijzerwerk	met spitse punt 3-, 4-, 6-, 10- en 15-ponds (lengte resp. 1 ¼, 1½, 1¾, 2 en 2½ duim); met platte punt 10,- 15-, 20-, 30-, 40-, 60-, en 100 ponds (lengte resp. 2, 2½ 3, 3½, 4, 5 en 6 duim); staalankernagels: spitspunt lang 1½, 2, 2½ en 3 duim, platpunt lang 2, 2½ en 3 duim	in pakken van 50 N

12.3 Houtdraadbouten en- schroeven

Tabel 12.3 Maximaal toelaatbare maatafwijkingen voor d_{nom}, en l_{nom} [mm][1] van houtdraadbouten

d_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
	6,0	±0,15
l_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
–	50	±1,25
50	80	±1,5
80	80	±1,75
120	180	±2,0
180	–	±2,3



Handelsmaten volgens opgave van de leverancier. Max. dikte houtdraadbouten ca. 20 mm, max. lengte ca. 180 mm.

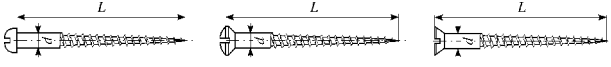
[1] d_{nom} = nominale uitwendige middellijn van de steel.
l_{nom} = nominale lengte van de steel van het verbindingsmiddel.

Tabel 12.4 Maximaal toelaatbare maatafwijkingen voor d_{nom}, d_{knom}, en I_{nom} [mm][1] van hout schroeven

d_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
–	3,0	±0,10
3,0	6,0	±0,12
6,0	–	±0,15

d_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
–	6,0	±0.38
6,0	10,0	±0,45
10,0	–	±0,55

I_{nom} groter dan	tot en met	maximaal toelaatbare maatafwijkingen
–	10	±0,75
10	18	±0,9
18	30	±1,0
30	50	±1,25
50	80	±1,5
80	120	±1,75
120	180	±2,0
180	–	±2,3



Handelsmaten volgens opgave van de leverancier. Max. dikte houtschroeven ca.18 mm, max. lengte ca. 180 mm.

[1] d_{nom} = nominale uitwendige middellijn van de steel.
d_{knom} = nominale middellijn van de kop van het verbindingsmiddel.
I_{nom} = nominale lengte van de steel van het verbindingsmiddel.

12.4 Kramplaten en deuvels

Tabel 12.5 Gegevens Bulldog-kramplaten (afmetingen in mm)

afmetingen		∅50	∅62	∅75	∅95	∅117	ovaal 70 × 130	□100	□130
tandhoogte	buitenrand	6	8	9	12	14	14 en 10	7	10
	binnen				10	12		7	10
aantal tanden per zijde	buitenrand	12	12	12	12	12	8 en 6	18	18
	binnen				6	6		10	10
plaatdikte ca.		1,0	1,3	1,3	1,4	1,5	1,5	1,4	1,5
boutdiameter *d*		een- en tweezijdig getand						alleen tweezijdig getand	
		10							
		12	12	12					
			16	16	16		16	16	
					20	20	20	20	20
						24			24
sluitplaten	□	40	50	60	80	90	80	90	110
	d	4	5	5	6	6	6	6	8

Tabel 12.6 Ring - en plaatdeuvels (afmetingen in mm)

	ringdeuvels		plaatdeuvels
diameter *D* van de deuvel	73	112	67
boutdiameter d_b	12	20	20
boutgatdiameter d_g	14	21	21
sluitplaten □	50	80	70
dikte	3	4	4

12.5 Sterkteklassen van bouten, moeren, schroeven, draadstangenen en tapeinden

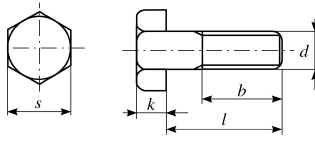
Tabel 12.7 Sterkteklassen van bouten, moeren, schroeven, draadstangen en tapeinden

	klasse	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9
								t/m M16	> M16			
treksterkte	[N/mm^2]	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
vloeigrens	[N/mm^2]	190	240	340	300	420	480	–	–	–	–	–
0, 2% rekgrens	[N/mm^2]	–	–	–	–	–	–	640	660	720	940	1100
proefspanning	[N/mm^2]	180	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970
Rockwell:												
– HRB min.		52	67	71	79	92	89	–	–	–		–
– HRB max.		95	95	95	95	95	99	–	–	–	–	–
– HRC min.		–	–	–	–	–	–	20	23	27	31	38
– HRC max.		–	–	–	–	–	–	30	34	36	39	44
rek na breuk	[%]	25	22	14	20	10	8	12	12	10	9	8
moerklasse[1)]												
– t/m M16		5	5	5	5	5	6	8	8	9	10	12
– M16 t/m M39		4	4	4	5	5	6	8	8/9	–	10	12
– < M39		4	4	4	5	5	6	8	8	–	10	–

[1)] Minimumbijbehorende moerklasse (hoger dan minimum is altijd toelaatbaar). Bij een bout/moerverbinding met belastingen boven de vloeigrens of proefspanning wordt een hogere moerklasse dan het minimum aanbevolen. (Bron: *Jeveka* Amsterdam)

12.6 Bouten, moeren en schroeven

*Tabel 12.8 Zeskantbouten en -tapbouten metrische schroefdraad** (*maten in* mm)



d		M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36
b	$l \leqq 125$	16	18	22	26	30	38	46	54	66	78
	$125 \leqq l \leqq 200$	–	24	28	32	36	44	52	60	72	84
	$l \geqq 200$	–	–	–	45	49	57	65	73	85	97
k		3,5	4	5,5	7	8	10	13	15	19	23
s		8	10	13	17	19	24	30	36	46	55
lengte *l*	16	×	×	×	×						
	20	×	×	×	×	×					
	25		×	×	×	×	×				
	30	○	○	×	×	×	×				
	35		○	○	×	×	×	○			
	40	○	○	○	○	×	×	×			
	45		○	○	○	○	×	×			
	50	○	○	○	○	○	×	×	×		
	55		○	○	○	○	○	×	×		
	60		○	○	○	○	○	×	×		
	65						○	○	×		
	70		○	○	○	○	○	○	×		
	75						○	○	○		
	80		○	○	○	○	○	○	○	×	
	90			○	○	○	○	○	○	○	
	100			○	○	○	○	○	○	○	×
	110				○	○	○	○	○		
	120				○	○	○	○	○	○	○
	130				○	○	○	○	○		
	140				○	○	○	○	○	○	○

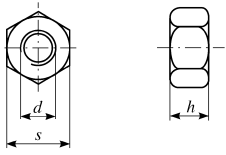
Tabel 12.8 (vervolg)

d		M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30	M36
b	$l \leqq 125$	16	18	22	26	30	38	46	54	66	78
	$125 \leqq l \leqq 200$	–	24	28	32	36	44	52	60	72	84
	$l \geqq 200$	–	–	–	45	49	57	65	73	85	97
k		3,5	4	5,5	7	8	10	13	15	19	23
s		8	10	13	17	19	24	30	36	46	55
lengte *l*	150				○	○	○	○	○	○	○
	160				○	○	○	○	○	○	○
	180				○	○	○	○	○	○	○
	200				○	○	○	○	○	○	○
	220					○	○	○	○		○
	240					○	○	○	○		
	260					○	○	○	○		
	280					○	○	○	○		
	300					○	○	○	○		
spoed *p* (grof)		0,8	1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4
spoed *p* (fijn) le voorkeurreks		0,5	0,75	1	1,25	1,25	1,5	1,5	2	2	3

* Voor schroefdraadprofiel, zie hoofdstuk H *Werktuigbouwkunde*, par. 2.1.
× Doorgaans standaard leverbaar als tapbout (schroefdraad loopt door tot onder de kop).
○ Doorgaans standaard leverbaar met opgegeven afmetingen voor maat *b*.

Zie ook ISO 4017 (DIN 933).

Tabel 12.9 Zeskantmoeren,metrisch (maten in* mm)



d	M3	M4	M5	M6	M7[2)]	M8	M10	M12
s	5,5	7	8	10	11	13	17 (16)	19 (18)
h	2,4	3,2	4 (4,7)	5(5,2)	5,5	6,5 (6,8)	8 (8,4)	10 (10,8)

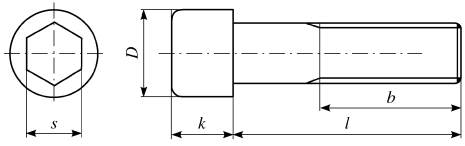
d	M14[2)]	M16	M18[2)]	M20	M22[2)]	M24	M27[2)]	M30
s	22 (21)	24	27	30	32 (34)	36	41	46
h	11 (12,8)	13 (14,8)	15 (15,8)	16 (18)	18 (19,4)	19 (21,5)	22 (23,8)	24 (25,6)

d	M33[2)]	M36	M39[2)]	M42	M45[2)]	M48	M52[2)]	M56
s	50	55	60	65	70	75	80	85
h	26 (28,7)	29 (31)	31 (33,4)	34	36	38	42	45

* Voor schroefdraadprofiel, zie hoofdstuk H *Werktuigbouwkunde*, par. 2.1.
[1)] Afmetingen zijn ISO, tussen haakjes zijn DIN.
[2)] Deze moeren zo mogelijk *niet* toepassen.

Zie ook ISO 4032 (DIN 934).

Tabel 12.10 Cilinderkopschroef met binnenzeskant (maten in* mm)

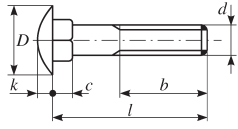


		M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20
b		9	12	15	18	22	25	28	30	35	40	40
Dh 13		5,5	7	9	10	13	16	18	22	24	27	30
kh 13		3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
s		2,5	3	4	5	6	8	10	12	14	14	17
lengte *l*	6	×	×									
	8	×	×									
	10	×	×	×	×							
	12	×	×	×	×							
	14											
	16	×	×	×	×	×	×					
	20	○	×	×	×	×	×	×				
	25	○	○	×	×	×	×	×	×			
	30	○	○	○	○	×	×	×		×		
	40	○	○	○	○	○	×	×		×		×
	45		○	○	○	○	○	○		×		×
	50		○	○	○	○	○	○		×		×
	60			○	○	○	○	○		○		×
	70					○	○	○		○		○
	80					○	○	○		○		○
	90					○	○	○		○		○
	100					○	○	○		○		○
	120						○	○		○		○
	140							○		○		○
	160											○
	180											○
	200											

* Voor schroefdraadprofiel, zie hoofdstuk H *Werktuigbouwkunde*, par. 2.1.
× Doorgaans standaard leverbaar als tapbout (schroefdraad loopt door tot onder de kop).
○ Doorgaans standaard leverbaar met opgegeven afmetingen voor maat *b*.

Zie ook ISO 4762 (DIN 912).

Tabel 12.11 Slotbouten, metrisch * (*maten in* mm)



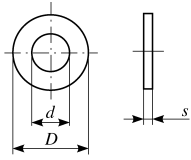
R = straal bolvormige kop
b = min. draadlengte

leverbaarheid en draadlengte b kunnen per leverancier verschillen

d		M5	M6	M8	M10	M12	M16	M20
D		13,5	16,5	20,6	24,6	30,6	38,8	46,8
k		3,3	3,8	4,8	5,3	6,9	8,9	11,0
R		10,7	12,6	16,0	19,2	24,1	29,3	33,9
c		3,5	4	5	6	8	12	15
b_1 boven		12	15	18	20	22	28	32
b_2 onder		15	18	22	25	28	35	40
steellengte l	16	•	•					
	20	•	•	•				
	25	•	•	•	•			
	30	•	•	•	•	•		
	35	•	•	•	•	•		
	40	•	•	•	•	•		
	45	•	•	•	•	•		
	50	•	•	•	•	•		
	55	•	•	•	•	•		
	60	•	•	•	•	•	•	
	65	•	•	•	•	•		
	70	•	•	•	•	•	•	•
	80	•	•	•	•	•	•	•
	90		•	•	•	•		
	100		•	•	•	•	•	•
	110		•	•	•	•		
	120		•	•	•	•	•	•
	130			•	•	•		
	140			•	•	•	•	•
	150			•	•	•		
	160				•	•	•	•
	180				•	•		
	200				•	•	•	•
	220				•	•	•	

* Voor schroefdraadprofiel, zie hoofdstuk H *Werktuigbouwkunde, par* 2.1.

Tabel 12.12 Vlakke stalen sluitringen (maten in mm)



d	2,2	2,7	3,2	4,3	5,3	6,4	7,4	8,4	10,5	13
D	5	6,5[1)]	7	9	10	12,5[1)]	14	17[1)]	21[1)]	27
s	0,3	0,5	0,5	0,8	1	1,6	1,6	1,6	2	2,5
voor	M2	M2,5	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M10	M12

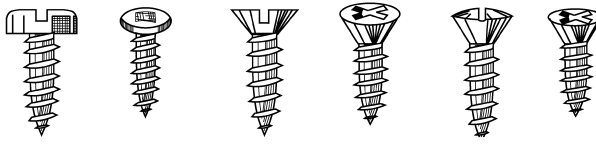
d	17	19	21	23	25	28	31	34	37	
D	30	34	37	39	44	50	56	60	66	
s	3	3	3	3	4	4	4	5	5	
voor	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30	M33	M36	

[1)] Afmetingen volgens ISO wijken iets af.

Zie ook ISO 7089 (DIN 125A).

Tabel 12.13 Plaatschroeven (benodigde gatdiameter in mm)

cilinderkop **platverzonken kop** **bolverzonken kop**[1)]



diameter		mat.	dikte	∅ geboord of geponsd gat staal RVS messing	al. plaat
[mm]	nr.	van	tot	tol. + 0,1	
2,2	2	–	0,56	1,6	–
		0,56	0,75	1,7	1,6
		0,75	0,88	1,8	1,6
		0,88	1,13	1,85	1,6
		1,13	1,38	1,85	1,7
		1,38	1,5	1,9	1,8
2,9	4	–	0,56	2,2	–
		0,56	0,63	2,25	–
		0,63	0,75	2,25	2,2
		0,75	0,88	2,4	2,2
		0,88	1,25	2,4	2,2
		1,25	1,38	2,4	2,2
		1,38	1,75	2,5	2,25
		1,75	2,5	2,6	2,4
3,5	6	–	0,56	2,6	–
		0,56	0,75	2,7	–
		0,75	0,88	2,7	2,65
		1	1,25	2,8	2,65
		1,25	1,38	2,8	2,65
		1,38	1,75	2,9	2,75
		1,75	2,5	3	2,85
		2,5	3	3,2	3
		3	6	–	3
3,9	7	–	0,5	2,95	–
		0,5	0,63	2,95	–
		0,63	0,88	2,95	2,9
		0,88	1,13	2,95	2,95
3,9	7	1,13	1,25	3	2,95
		1,25	1,38	3	2,95
		1,38	1,75	3,2	3
		1,75	2	3,2	3,5
		2	2,5	3,5	3,5
		2,5	3,5	3,6	3,5
4,2	8	–	0,5	–	–
		0,5	0,63	3,2	–
		0,63	0,88	3,2	2,95
		0,88	1,13	3,2	3
		1,13	1,38	3,3	3,2
		1,38	2,5	3,5	3,5
		2,5	3	3,8	3,7
		3	3,5	3,9	3,8
		3,5	10	–	3,9
4,8	10	–	0,5	–	–
		0,5	0,75	3,7	–
		0,75	1,13	3,7	3,7
		1,13	1,38	3,9	3,7
		1,38	1,75	3,9	3,7
		1,75	2,5	4	3,8
		2,5	3	4,1	3,8
		3	3,5	4,3	3,9
		3,5	4	4,4	3,9
		4	4,75	4,4	4
		4,75	10	–	4,2

[1)] *Bolverzonken kop* wordt ook *lenskop* genoemd (afgeleid van het Duits).

Tabel 12.14 Gehard stalen snijschroeven[1)]

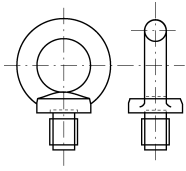
zeskante kop **cilinderkop** **platverzonken kop** **bolverzonken kop**

	M 2,5	M3	M4	M5	M6	M8
zeskante kop				○	○	○
cilindrische kop		○	○	○	○	
verzonken kop		○	○	○	○	
bol-verzonken kop	○	○	○	○	○	
gemiddelde boordiameter[2)] [mm]	2,3	2,7	3,6	4,5	5,5	7,4

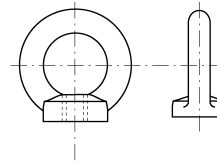
[1)] Toepassing voor bevestiging in materialen die dikker zijn dan ca. 1 mm; ook met kruissleuf verkrijgbaar. DIN 7513 geeft uitgebreide informatie.

[2)] Zacht en/of dun materiaal: kleinere diameter.
Hard en/of dik materiaal: grotere diameter.

Tabel 12.15 Oogbouten, en -moeren (maten in* mm)



DIN 580



DIN 582

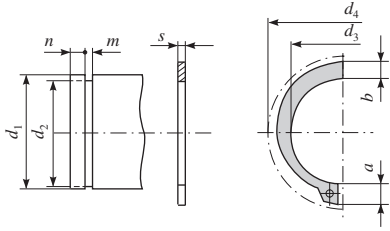
	lengte draadeind	uitw. oog ∅	inw. oog ∅	richtwaarde[1)] max.te dragen massa in verti-cale richting [kg]
M6	13	36	20	–
M8	13	36	20	85
M10	17	45	25	150
M12	20,5	54	30	220
M16	27	63	35	380
M20	30	72	40	570
M22	35	81	45	700
M24	36	90	50	1050
M27	36	90	50	1700
M30	45	108	60	2500

*) Voor schroefdraadprofiel, zie hoofdstuk H *Werktuigbouwkunde*, par. 2.1.
1) Voor maximale belasting, zie DIN norm.

12.7 Borgingen

Borgmoren en-ringen zijn in zeer veel uitvoeringen leverbaar en komen hier verder niet aan de orde (zie documentatie van de leverancier).

Tabel 12.16 Asborgveren (*maten in* mm)



n = min. maat

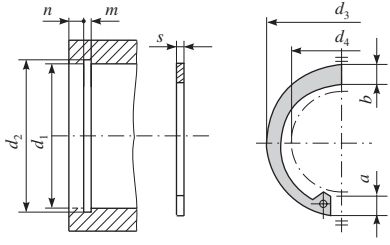
d_1	d_2	tol.	d_3	d_4	a	b	n	m H 13	s h 11
6	5,7	−0,04	5,6	12,2	2,7	1,3	0,5	0,80	0,7
7	6,7	−0,06	6,5	13,8	3,1	1,4	0,5	0,90	0,8
8	7,6	−0,06	7,4	15,2	3,2	1,5	0,6	0,90	0,8
9	8,6	−0,06	8,4	16,4	3,3	1,7	0,6	1,10	1,0
10	9,6	−0,11	9,3	17,6	3,3	1,8	0,6	1,10	1,0
12	11,5	−0,11	11,0	19,6	3,3	1,8	0,8	1,10	1,0
14	13,4	−0,11	12,9	22,0	3,5	2,1	0,9	1,10	1,0
15	14,3	−0,11	13,8	23,0	3,6	2,2	1,1	1,10	1,0
16	15,2	−0,11	14,7	24,4	3,7	2,2	1,2	1,10	1,0
18	17,0	−0,11	16,5	26,8	3,9	2,4	1,5	1,30	1,2
20	19,0	−0,13	18,5	29,0	4,0	2,6	1,5	1,30	1,2
22	21,0	−0,13	20,5	31,4	4,2	2,8	1,5	1,30	1,2
24	22,0	−0,21	22,2	33,8	4,4	3,0	1,7	1,30	1,2
25	23,9	−0,21	23,2	34,8	4,4	3,0	1,7	1,30	1,2
26	24,9	−0,21	24,2	36,0	4,5	3,1	1,7	1,30	1,2
28	26,6	−0,21	25,9	38,4	4,7	3,2	2,1	1,60	1,5
30	28,6	−0,21	27,9	41,0	5,0	3,5	2,1	1,60	1,5
32	30,3	−0,25	29,6	43,4	5,2	3,6	2,6	1,60	1,5
35	33,0	−0,25	32,2	47,2	5,6	3,9	3,0	1,60	1,5
38	36,0	−0,25	35,2	50,6	5,8	4,2	3,0	1,85	1,75

Tabel 12.16 (vervolg)

d_1	d_2	tol.	d_3	d_4	a	b	n	m $H13$	s $h11$
40	37,5	−0,25	36,5	53,0	6,0	4,4	3,8	1,85	1,75
42	39,5	−0,25	38,5	56,0	6,5	4,5	3,8	1,85	1,75
45	42,5	−0,25	41,5	59,4	6,7	4,7	3,8	1,85	1,75
48	45,5	−0,25	44,5	62,8	6,9	5,0	3,8	1,85	1,75
50	47,0	−0,25	45,8	64,8	6,9	5,1	4,5	2,15	2,0
55	52,0	−0,30	50,8	70,4	7,2	5,4	4,5	2,15	2,0
60	57,0	−0,30	55,8	75,8	7,4	5,8	4,5	2,15	2,0
65	62,0	−0,30	60,8	81,6	7,8	6,3	4,5	2,65	2,5
70	67,0	−0,30	65,5	87,2	8,1	6,6	4,5	2,65	2,5
75	72,0	−0,30	70,5	92,8	8,4	7,0	4,5	2,65	2,5
80	76,5	−0,30	74,5	98,2	8,6	7,4	5,3	2,65	2,5
85	81,5	−0,35	79,5	104,0	8,7	7,8	5,3	3,15	3,0
90	86,5	−0,35	84,5	109,0	8,8	8,2	5,3	3,15	3,0
95	91,5	−0,35	89,5	115,0	9,4	8,6	5,3	3,15	3,0
100	96,5	−0,35	94,5	121,0	9,6	9,0	5,3	3,15	3,0

Zie ook DIN 471.

Tabel 12.17 Gatborgveren (maten in mm)



n = min. maat

d_1	d_2	tol.	d_3	d_4	a	b	n	m $H13$	s $h11$
10	10,4	+0,11	10,8	3,1	3,2	1,4	0,6	1,10	1,00
11	11,4	+0,11	11,8	3,9	3,3	1,5	0,6	1,10	1,00
12	12,5	+0,11	13,0	4,7	3,4	1,7	0,8	1,10	1,00
13	13,6	+0,11	14,1	5,3	3,6	1,8	0,9	1,10	1,00
14	14,6	+0,11	15,1	6,0	3,7	1,8	0,9	1,10	1,00

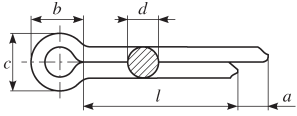
Tabel 12.17 (vervolg)

d_1	d_2	tol.	d_3	d_4	a	b	n	m $H13$	s $h11$
15	15,7	+0,11	16,2	7,0	3,7	2,0	1,1	1,10	1,00
16	16,8	+0,11	17,3	7,7	3,8	2,0	1,2	1,10	1,00
18	19,0	+0,15	19,5	8,9	4,1	2,2	1,5	1,10	1,00
20	21,0	+0,15	21,5	10,6	4,1	2,3	1,5	1,10	1,00
22	23,0	+0,15	23,5	12,6	4,2	2,5	1,5	1,10	1,00
24	25,2	+0,21	25,9	14,2	4,3	2,6	1,8	1,30	1,20
25	26,2	+0,21	26,9	15,0	4,5	2,7	1,8	1,30	1,20
26	27,2	+0,21	27,9	15,6	4,7	2,8	1,8	1,30	1,20
28	29,4	+0,21	30,1	17,4	4,8	2,9	2,1	1,30	1,20
30	31,4	+0,25	32,1	19,4	4,8	3,0	2,1	1,30	1,20
32	33,7	+0,25	34,4	20,2	5,4	3,2	2,6	1,30	1,20
35	37,0	+0,25	37,8	23,2	5,4	3,4	3,0	1,60	1,50
38	40,0	+0,25	40,8	26,0	5,5	3,7	3,0	1,60	1,50
40	42,5	+0,25	43,5	27,4	5,8	3,9	3,8	1,85	1,75
42	44,5	+0,25	45,5	29,2	5,9	4,1	3,8	1,85	1,75
45	47,5	+0,25	48,5	34,6	6,2	4,3	3,8	1,85	1,75
48	50,5	+0,30	51,5	34,6	6,4	4,5	3,8	1,85	1,75
50	53,0	+0,30	54,2	36,0	6,5	4,6	4,5	2,15	2,00
52	55,0	+0,30	56,2	37,6	6,7	4,7	4,5	2,15	2,00
55	58,0	+0,30	59,2	40,4	6,8	5,0	4,5	2,15	2,00
58	61,0	+0,30	62,2	43,2	6,9	5,2	4,5	2,15	2,00
60	63,0	+0,30	64,2	44,4	7,3	5,4	4,5	2,15	2,00
65	68,0	+0,30	69,2	48,8	7,6	5,8	4,5	2,65	2,50
70	73,0	+0,30	74,5	3,4	7,8	6,2	4,5	2,65	2,50
75	78,0	+0,30	79,5	8,4	7,8	6,6	4,5	2,65	2,50
80	83,5	+0,35	85,5	62,0	8,5	7,0	5,3	2,65	2,50
85	88,5	+0,35	90,5	66,8	8,6	7,2	5,3	3,15	3,00
90	93,5	+0,35	95,5	71,8	8,6	7,6	5,3	3,15	3,00
95	98,5	+0,35	100,5	76,4	8,8	8,1	5,3	3,15	3,00
100	103,5	+0,35	105,5	81,0	9,2	8,4	5,3	3,15	3,00

Zie ook DIN 472.

12.8 Pennen

Tabel 12.18 Splitpennen (maten in mm)



d(nom.)		1	1,2	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10
d	max.	0,9	1	1,4	1,8	2,3	2,9	3,7	4,6	5,9	7,5	9,5
	min.	0,8	0,9	1,3	1,7	2,1	2,7	3,5	4,4	5,7	7,3	9,3
a	max.	1,6	2,5	2,5	2,5	2,5	3,2	4	4	4	4	6,3
b	≈	3	3	3,2	4	5	6,4	8	10	12,6	16	20
c	max.	1,8	2	2,8	3,6	4,6	5,8	7,4	9,2	11,8	15	19
	min.	1,6	1,7	2,4	3,2	4	5,1	6,5	8	10,3	13,1	16,6

lengte *l*												
	4 5 6											
	8 10 12											
	14 16 18											
	20 22 25											
	28 32 36											
	40 45 50											

Tabel 12.18 (vervolg)

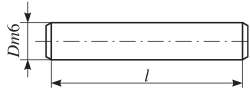
d(nom.)		1	1,2	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10
d	max.	0,9	1	1,4	1,8	2,3	2,9	3,7	4,6	5,9	7,5	9,5
	min.	0,8	0,9	1,3	1,7	2,1	2,7	3,5	4,4	5,7	7,3	9,3
a	max.	1,6	2,5	2,5	2,5	2,5	3,2	4	4	4	4	6,3
b	≈	3	3	3,2	4	5	6,4	8	10	12,6	16	20
c	max.	1,8	2	2,8	3,6	4,6	5,8	7,4	9,2	11,8	15	19
	min.	1,6	1,7	2,4	3,2	4	5,1	6,5	8	10,3	13,1	16,6

lengte *l*												
	56 63 71											
	80 90 100											
	112 125 140											
	160 180 200											
	224 250 280											

= gangbare afmetingen

Zie ook DIN 94.

Tabel 12.19 Niet geharde paspennen (maten in mm)

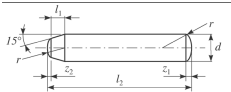


l \ *D*	0,8	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	13	14	16	20
4																
5																
6																
8																
10																
12																
14																
16																
18																
20																
24																
28																
32																
36																
40																
45																
50																
55																
60																
70																
80																
90																
100																
120																

= gangbare afmetingen

Zie ook ISO 2338A (DIN 7).

Tabel 12.20 Gehard en geslepen stalen paspennen (maten in mm)[1)]



d m6	0,8	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	13	14	16	20
l_1	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,5	1,8	2	2,5	2,5	2,5	3	4
$r \approx$	0,8	1	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	12	16	16	20
$z_1 \approx$	0,12	0,15	0,23	0,3	0,4	0,45	0,6	0,75	0,9	1,2	1,5	1,8	2	2	2,5	3
$z_2 \approx$	0,06	0,08	0,12	0,18	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,3	1,3	1,3	1,7	2

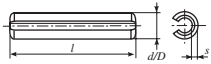
lengte l_2																
4																
5																
6																
8																
10																
12																
14																
16																
18																
20																
24																
28																
32																
36																
40																
45																
50																
55																
60																
70																
80																
90																
100																
120																

= gangbare afmetingen

Zie ook ISO 8734A (DIN 6325).

[1)] $\sigma_t \approx 600$ N/mm²; hardheid $\approx R_c$ 60 (zie gegevens leverancier).

Tabel 12.21 Spanbussen, zware[1] *uitvoering (maten in* mm)



D H11 = gatdiameter
d = ongespannen diameter
s = materiaaladikte

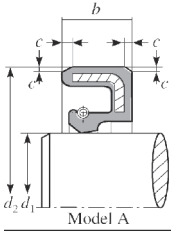
D H11	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	8	10	12	13	14	16	18	20
d	1,2	1,7	2,3	2,8	3,3	3,8	4,4	4,9	5,4	6,4	8,5	10,5	12,5	13,5	14,5	16,5	18,5	20,5
s	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,75	0,8	1	1	1,25	1,5	2	2,5	2,5	3	3	3,5	4
lengte *l*																		
4 5 6 8 10																		
12 14 16 18 20																		
22 24 26 28 30																		
32 36 40 45 50																		
55 60 65 70 75																		
80 85 90 95 100																		
120 140 160 180 200																		

[1] Voor lichte uitvoering zie DIN 7346.

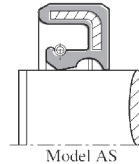
Zie ook ISO 8752 (DIN 1481).

12.9 Afdichtringen

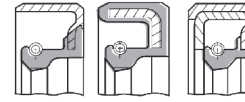
Tabel 12.22 Afmetingen afdichtringen [mm]



Model A



Model AS



andere modellen

d_1	d_2 [1]	b ±0,2	c min	d_1	d_2 [1]	b ±0,2	c min.	d_1	d_2 [1]	b ±0,2	c min.
6	16	7	0,3		26				32		
	22			15	30	7	0,3	22	35		
7	22	7	0,3		32				40	22	0,3
					35				47		
8	22	7	0,3		28				35		
	24			16	30	7	0,3	24	37		
	22				32				40		
9	24	7	0,3		35				47		
	26				28				35		
	22				30				40		
10	24	7	0,3	17	32	7	0,3	25	42	7	0,3
	26				35				47		
					40				52		
11	22	7	0,3		30				37		
	26			18	32	7	0,3	26	42	7	0,3
	22				35				47		
	24				40						
12	28	7	0,3						40		
	30				30			28	47	7	0,4
					32				52		
	24			20	35	7	0,3				
14	28	7	0,3		40				40		
	30				47				42		
	35							30	47	7	0,4
									52		
									62		

Tabel 12.22 (vervolg)

d_1	d_2[1)]	b ± 0,2	c min
32	45 47 52	7	0,4
35	47 50 52 62	7	0,4
36	47 50 52 62	7	0,4
38	52 55 62	7	0,4
40	52 55 62 72	7	0,4
42	55 62 72	8	0,4
45	60 62 65 72	8	0,4
48	62 72	8	0,4
50	65 68 72 80	8	0,4
52	68 72	8	0,4
55	70 72 80 85	8	0,4
56	70 72 80 85	8	0,4
58	72 80	8	0,4
60	74 80 85 90	8	0,4
62	85 90	10	0,5
63	85 90	10	0,5
65	85 90 100	10	0,5
68	90 100	10	0,5
70	90 100	10	0,5
72	95 100	10	0,5
75	95 100	10	0,5
78	100	10	0,5
80	100 110	10	0,5
85	110 120	12	0,8
90	110 120	12	0,8
95	120 125	12	0,8
100	120 125 130	12	0,8
105	130 140	12	0,8
110	130 140	12	0,8
115	140 150	12	0,8
120	150 160	12	0,8
125	150 160	12	0,8
130	160 170	12	0,8
135	170	12	0,8
140 145	170 175	15	1
150 160 170	180 190 200	15	1
180 190 200	210 220 230	15	1
210 220 230	240 250 260	15	1

[1)] *Toleranties*, zie tabel 12.20.

Tabel 12.22 (vervolg)

d_1	d_2 [1)]	b ± 0,2	c min	d_1	d_2 [1)]	b ± 0,2	c min.	d_1	d_2 [1)]	b ± 0,2	c min.
240	270	15	1	320	360	20	1	440	480	20	1
250	280			340	380			460	500		
				360	400			480	530		
260	300	20	1					500	450		
280	320			380	420	20	1				
300	340			400	440						
				420	460						

[1)] *Toleranties*, zie tabel 12.23.

Tabel 12.23 Toleranties afdichtringen [mm]

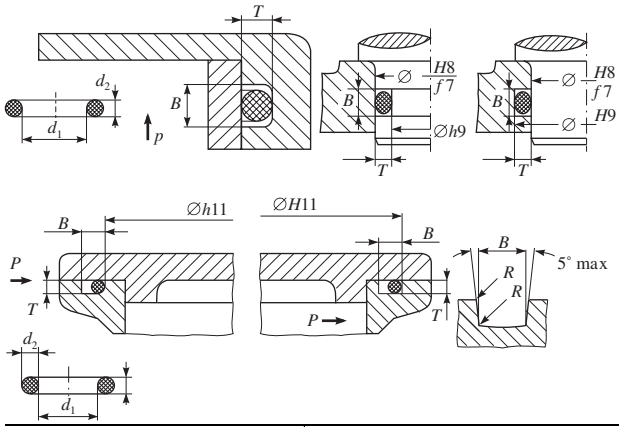
diameter d_2	passing d_2	toelaatbare rondheidsafwijking
t/m 50	+ 0,3 + 0,15	0,25
> 50 t/m 80	+ 0,35 + 0,2	0,35
> 80 t/m 120	+ 0,35 + 0,2	0,5
> 120 t/m 180	+ 0,45 + 0,25	0,65
> 180 t/m 300	+ 0,45 + 0,25	0,8
> 300 t/m 500	+ 0,55 + 0,3	1

Bron: Freudenberg-Simrit.

Dynamische afdichtingen

Voor dynamische afdichtingen zijn *O-ringen* minder geschikt. De leveranciers van afdichtringen bieden voor dynamische afdichtingen een groot aantal andere vormen en materialen voor vele toepassingen.

Tabel 12.24 Inbouwmaten O-ringen (statische afdichting) [mm]



d_2	$T \pm 0{,}05$	R	$B + 0{,}2$	d_2	$T \pm 0{,}01$	R	$B + 0{,}2$
1,5	1,1	0,2	1,9	7	5,85	1,5	9,1
1,6	1,2	0,3	2,1	7,5	6,3	1,5	9,7
1,78	1,3	0,4	2,3	8	6,75	1,5	10,4
2	1,5	0,5	2,6	8,4	7,15	2,0	10,9
2,4	1,8	0,5	3,1	8,5	7,25	2,0	11
2,5	1,9	0,5	3,2	9	7,7	2,0	11,7
2,62	2	0,6	3,4	9,5	8,2	2,0	12,3
3	2,3	0,8	3,9	10	8,65	2,0	13
3,5	2,7	1,0	4,5	10,5	9,15	2,0	13,6
3,53	2,75	1,0	4,5	11	9,65	3,0	14,3
4	3,15	1,0	5,2	11,5	10,1	3,0	15
4,5	3,6	1,0	5,8	12	10,6	3,0	15,6
5	4	1,0	6,5	12,5	11,05	3,0	16,2
5,33	4,3	1,2	6,9	13	11,55	3,0	16,9
5,5	4,5	1,2	7,1	13,5	12,05	3,0	17,5
5,7	4,65	1,2	7,4	14	12,55	3,0	18,2
6	4,95	1,2	7,8	14,5	13	3,0	18,8
6,5	5,4	1,2	8,4	15	13,5	3,0	19,5
6,99	5,85	1,5	9,1			3,0	

Opmerking: d_1 nodig bij bestelling O-ring. *Bron*: Freudenberg-Simrit.

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

13 Lijmen

13.1 Algemeen

Definities

Adhesie: aantrekkingskracht tussen lijmmoleculen en substraatmoleculen.
Anaeroob: reagerend bij afwezigheid van lucht.
Bevochtiging: het vermogen van een lijm om zich over een oppervlak te verspreiden.
Cohesie: aantrekkingskracht tussen lijmmoleculen onderling.
Contactlijm: Lijm die na opbrenging op twee vlakken en na verdamping van het oplosmiddel direct hecht wanneer de vlakken met elkaar in contact worden gebracht.
Cross-linking: ontstaan van een netwerk door reactie van nietverharde lijmmoleculen met elkaar na toevoeging van harders of katalysators.
Interface: contactvlak tussen lijm en de te verlijmen materialen.
Pot-life: tijd gedurende welke een lijm verwerkt kan worden na het gebruiksklaar maken.
Smeltlijm: lijm die door warmtetoevoer smelt, de oppervlak (ken) bevochtigt en bij afkoeling weer stolt en de lijmverbinding tot stand brengt.
Tack: spontane kleefkracht van een lijmfilm (vooral van belang bij zelfklevende materialen).
Thixotropie: de viscositeit van een lijm neemt af bij langere inwerking van een afschuifkracht, bijvoorbeeld door roeren of strijken en neemt weer toe als zij tot rust komt.
Viscositeit: maat voor de weerstand tegen stroming van vloeistoffen.

Samenstelling

Lijmen zijn opgebouwd uit de volgende bestanddelen:
– *Bindmiddelen*: meestal polymere stoffen van thermoplastische, thermohardende of elastomere aard (zie par. 3). De eigenschappen van de lijm worden in hoofdzaak bepaald door het bindmiddel.
– *Oplosmiddelen*: zoals alcoholen, ketonen, esters e.d. Het bevochtigend vermogen wordt hierdoor bepaald.

- *Weekmakers*: geven kuntstoffen meer elasticiteit.
- *Vulstoffen*: hiermee kunnen eigenschappen als krimp, viscositeit, elektrische en thermische isolatie worden beïnvloed.

Indeling van lijmen

Lijmen kunnen op verschillende manieren worden ingedeeld:

- *Naar te verlijmen materialen*: houtlijm, rubberlijm, enz.
- *Naar sterkte*: er wordt vaak onderscheid gemaakt tussen *constructief* en *niet-constructief* lijmen, waarbij de laatste categorie bedoeld is voor het tijdelijk hechten of het positioneren van onderdelen; de grens wordt vaak gelegd bij ca. 10 N//mm^2 (treksterkte) bij kamertemperatuur.
- *Naar eigenschappen*: hittevaste lijm, zuurvaste lijm, thermisch isolerende lijm
- *Naar verhardingsvorm*: fysisch drogend, chemisch verhardend.
- *Naar hoofdbindmiddel*: dit is de meest duidelijke indeling. De volgende lijmtypen kunnen worden onderscheiden:
  - Op *rubberbasis*: natuurrubberlijm, chloropreenrubberlijm, nitrilbutadieenrubberlijm en siliconrubberlijm.
  - Op *thermoplastische* basis: polyvinylacetaatlijm, PVC lijm en polystyreenlijm.
  - Op *thermohardende* basis: epoxylijm en cyanoacrylaatlijm.

Voordelen van lijmen

- Gelijksoortige- en ongelijksoortige materialen en van sterk uiteenlopende dikten kunnen verbonden worden.
- Er wordt een uniforme verdeling van de krachten over het totale gelijmde oppervlak verkregen; geen spanningspieken en een hogere vermoeiingssterkte.
- Er vindt geen vervorming van de te lijmen materialen plaats; het product ziet er gladder en fraaier uit.
- Trillingen worden gedempt.
- Geen spleetcorrosie, de verbindingen zijn vloeistof- en gasdicht.
- Er kunnen elektrisch geleidende als ook isolerende verbindingen worden gemaakt; dit geldt ook voor thermische eigenschappen.

Nadelen van lijmen

- De sterkte van een constructie is moeilijk voorspelbaar.
- De duurzaamheid wordt door vocht sterk negatief beïnvloed.
- De verbinding heeft tijd nodig om haar sterkte op te bouwen.
- De sterkte van een lijmverbinding loopt sterk terug bij hoge temperaturen.
- Bij continue belasting kan bij thermoplastische lijmen kruip optreden.
- De verbinding is moeilijk op kwaliteit te beoordelen.

Zelfklevende materialen

Lijmen worden vaak in de vorm van *zelfklevende materialen* aangetroffen. Deze bestaan uit een drager die aan één of beide zijden bedekt is met een klevende materie.
Zelfklevend material wordt vaak op rollen geleverd; de rugzijde van enkelzijdig kleefband is meestal voorzien van een lossingslaag. Bij dubbelzijdig kleefband wordt een gemakkelijk te verwijderen schutlaag (*liner*) aan één zijde toegepast. Elke drager is in principe mogelijk; alleen moet er wel een goede hechting met de kleeflaag aanwezig zijn. Dit kan eventueel worden verbeterd met een speciale hechtlaag.

De mate van hechting op een ondergrond wordt bepaald door:

- de oppervlaktetoestand van het te lijmen oppervlak;
- de druk waarmee de kleefband wordt aangebracht (*pressure-sensitive adhesives*).

Belangrijke eigenschappen van zelfklevende materialen zijn de spontane kleefkracht (*tack*), de sterkte, elektrische eigenschappen (van zowel drager als kleefmassa), bestandheid tegen veroudering. Belangrijkste toepassingen zijn die bij verpakken en het sluiten van dozen. Ook voor elektrotechnische en industriële toepassingen neemt het gebruik van deze materialen toe.

13.2 Lijmverbindingen

Hechting

De *hechting* van lijm op een ondergrond kan op verschillende manieren worden verwezenlijkt:

- *Mechanische verankering* in poriën en oneffenheden van het oppervlak.
- *Diffusie*: lijm en substraat vermengen zich aan het tussenvlak, er ontstaat een *interpenetrating network*. Deze vorm van hechting kan vooral bij kunststoffen optreden.
- *Chemische en fysische intermoleculaire binding*. Voor het optreden van deze binding is een zeer geringe afstand noodzakelijk. Een goede bevochtiging van het oppervlak door de lijmmoleculen is van groot belang. Voorwaarden daarvoor zijn dat de lijm voldoende vloeibaar is en dat het oppervlak schoon is. De oppervlaktespanning van de lijmvloeistof en de contacthoek tussen lijm en oppervlak bepalen de bevochtiging. Verhoging van temperatuur bevordert de bevochtiging.

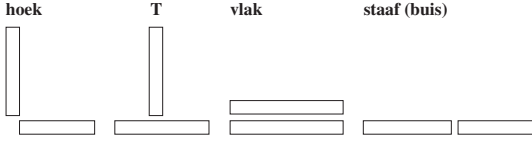
Een schoon oppervlak is van grote invloed op een goede hechting. Daarom zijn veelal voorbehandelingen noodzakelijk. Zie par. 13.4.

Aanbevelingen bij ontwerpen lijmverbindingen

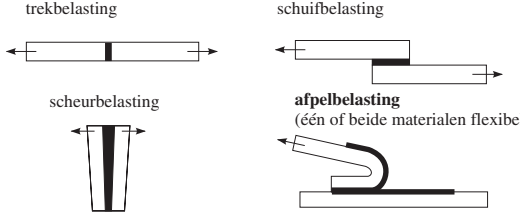
Afhankelijk van de belastingvorm en -richting (zie figuur 13.2) kan voor alle soorten verbindingen (zie figuur 13.1) de meest gunstige constructie worden bepaald.
Zie voor uitgebreide informatie hierover de publicatie van Shields (zie literatuur voor deze paragraaf aan het einde van dit hoofdstuk).

Algemene regels:

- Ontwerp een constructie zodanig dat bij voorkeur een *schuifbelasting* ontstaat. De over te dragen krachten worden daarmee over een vrij groot oppervlak verdeeld. Een verbinding, die zuiver op trek is belast, geeft weliswaar ook een regelmatige verdeling van de krachten, maar het is praktisch onmogelijk een centrische belasting te verwezenlijken. Verbindingen die bloot staan aan scheur- of afpelbelastingen moeten zo veel mogelijk worden vermeden.
- Let bij toepassing van materialen als hout en gelamineerde kunststoffen op dat de er op werkende krachten geen delaminatie veroorzaken.
- Maak de oppervlakken die tegen elkaar worden gelijmd zo groot mogelijk.



Figuur 13.1 Soorten lijmverbindingen



Figuur 13.2 Vormen van belasting

- Vermijd spanningspieken; deze worden veelal veroorzaakt door een lage elasticiteitsmodulus van de te verlijmen materialen, door een te geringe dikte van deze materialen en door starre lijmlagen. Deze spanningspieken kunnen sterk worden verminderd door het toepassen van flexibele lijmen aan de rand van de verbinding, door een lijmmeniscus of door afkanting van de delen die overlappen.
- Zorg voor een gelijkmatige lijmspleet; bij harde starre lijmen (thermohardend) geeft een *dunne* lijmlaag grotere sterkte bij schuifbelasting. Bij scheur- of afpelbelastingen geven *dikkere*, elastische lijmlagen betere resultaten.
- Houd rekening met verschillen in uitzettingscoëfficiënt bij het verbinden van verschillende materialen, zeker indien bij hoge temperaturen moet worden uitgehard.
- Dynamische belasting resulteert in lagere sterkten dan statische belasting.

- Houd rekening met neiging tot kruip van vooral thermoplastische lijmen.
- Besteed aandacht aan toe te passen montagetechnieken.

De uiteindelijke sterkte van een lijmverbinding hangt af van:
- adhesie;
- eigenschappen van de te verlijmen delen;
- geometrie;
- cohesie.

13.3 Keuze van een lijm

De keuze van een lijm wordt in eerste instantie bepaald door de typen materialen die moeten worden verlijmd. Daarnaast moeten eisen in acht worden genomen t.a.v.:
- temperatuurbestandheid;
- bestandheid tegen vocht;
- bestandheid tegen chemicaliën;
- bestandheid tegen ultra-violet licht, röntgen-straling;
- elektrische geleidbaarheid.

Ook moet rekening worden gehouden met de vorm van de constructie en de daarop werkende belastingen. Een verdere beperking kan worden gevormd door de aanwezige fabricagemogelijkheden. Tabel 13.1 geeft voor een aantal materialen aan met welke soort lijm zij te verbinden zijn. Indien verschillende materialen met elkaar moeten worden verbonden, kan men bij de verschillende materiaalsoorten naar een overeenstemmende lijmsoort zoeken. Bijv. indien men staal met chloropreenrubber wil verbinden, komen chloropreenrubberlijmen, nitrilbutadieenrubberlijmen of cyanoacrylaten in aanmerking.
Moeilijk verlijmbare kunststoffen als PE, PP, POM en PTFE zijn niet in de tabel opgenomen.
De genoemde lijmcategorieën vertonen in hun groep nog grote verschillen. Epoxy's kunnen bijv. met diverse harders aangemaakt worden, zij kunnen heet- of koudhardend zijn, enz. Na keuze van een lijmtype moet de betreffende productinformatie van de leverancier worden geraadpleegd om na te gaan of de gekozen lijm voldoet aan alle eisen.

Tabel 13.1 Lijmkeuze voor diverse materialen

	lijmsoort[1]															oplosmiddel[2]							
	natuurrubber	chloropreenrubber	nitrilbutadieenrubber	siliconrubber	polyurethan	zelfklevende materialen	polyvinylacetaat	polyvinylchloride	polystyreen	acrylaat	cyanoacrylaat	epoxy	smeltlijmen	aceton	methylethylketon	dichloormethaan	toluen	ethylacetaat	mierenzuur	cyclohexanon	tetrahydrofuraan
papier, karton						×	×						×								
hout		×					×			×		×	×								
leer, textiel		×	×			×	×						×								
staal, zink, RVS		×	×							×	×	×	×								
aluminium		×	×			×				×	×	×	×								
koper (legeringen)		×	×			×				×	×	×	×								
nikkel		×	×							×	×	×									
glas, keramiek[3]										×	×	×									
natuurrubber	×	×	×			×					×										
chloropreenrubber		×	×			×					×										
urethanrubber		×	×		×	×					×										
siliconrubber				×																	
polycarbonaat		×	×			×				×		×				×					
polymethyl-metacrylaat		×	×							×	×				×	×					
polystreen	×	×	×			×			×	×	×			×	×		×	×				

Tabel 13.1 (vervolg)

acrylonitrilbu-tadieen-styreen	×	×	×							×	×	×					×	×						×
polyvinylchloride		×	×				×		×		×	×			×								×	×
cellulose-acetaat		×	×				×				×	×			×	×					×			×
polyamide 6 en polyamide 6.6		×	×									×	×									×		
ureum-formaldehyde, melamine-formaldehyde		×	×								×	×	×											
epoxy		×	×								×	×	×											
fenol-hardweefsel		×	×								×	×	×											

[1] Voor het lijmen van verschillende materialen, dient men een lijmsoort te kiezen die bij beide materialen is aangegeven.
[2] Thermoplasten kunnen met diverse oplosmiddelen worden gelijmd. Een innig contact tussen de te lijmen delen is dan wel noodzakelijk. Lijmspleten kunnen op deze manier *niet* worden overbrugd.
[3] Voor glas en keramiek kunnen ook cementgebonden producten als lijmsoort gebruikt worden.

13.4 Praktische uitvoering en beproeven lijmverbindingen

Voorbehandelingen van de te lijmen oppervlakken
Aan pas bewerkte oppervlakken beginnen zich onmiddellijk chemische en fysische processen af te spelen, die de oppervlaktetoestand zodanig veranderen dat bevochtiging moeilijker wordt. Er ontstaan bijv. oxidelagen die ongelijkmatig en brokkelig zijn en waaraan allerlei zaken adsorberen zoals water, koolzuur, olie-additieven, enz. Ook niet verwijderde oliën die gebruikt zijn uit verspanende, vervormende en corrosiewerende gronden maken de bevochtiging moeilijker. Alhoewel er lijmen zijn die een bepaalde hoeveelheid olie in zich kunnen opnemen, is het voor het verkrijgen van reproduceerbare resultaten raadzaam deze olieresten te verwijderen.

De volgende *voorbehandelingen* kunnen worden toegepast (uiteraard moeten zij aangepast zijn aan het type substraat):

Ontvetten:
- In oplosmiddelen als aceton, ethylacetaat, alifatische koolwaterstoffen e.d. door middel van dompelen, afvegen, sproeien, ultrasoon trillen.
- In waterige, alkalische middelen.

Mechanische voorbehandelingen zoals stralen, trommelen of schuren. Hierdoor ontstaat een grotere oppervlakteruwheid en dus een groter oppervlak (niet te ruw maken). Het *straalmiddel* moet aan de ondergrond worden aangepast. Staalstralen dient bijv. niet bij zink of magnesium te worden toegepast. Bij kunststoffen kan men stralen met glasparels of vruchtenpitten.

Chemische voorbehandelingen zoals etsen. Hierdoor ontstaat een ander oppervlak dat zich beter laat bevochtigen. De samenstelling van de etsvloeistof hangt van het te etsen materiaal af.

Aanbrengen van hechtlagen. Glas en kunststoffen worden na reinigen vaak voorzien van een *silaanlaag*. Deze categorie stoffen

reageert met hydroxylgroepen van de ondergrond en bevat zelf weer reactieve groepen zoals amines ($-NH_2$) en chloor die een verbinding kunnen aangaan met bepaalde lijmen.
Sommige silanen worden behalve voor verbetering van de hechting toegepast als vochtbarrière.

Op bepaalde kunststoffen als polytheen, polypropyleen, polytetrafluorethyleen wordt moeilijk een goede hechting verkregen. Dit lukt alleen met fysische voorbehandelingen zoals coronaontlading, zuurstofplasma e.d.

N.B. Het verlijmen moet zo snel mogelijk na de voorbehandeling plaatsvinden; de bevochtiging gaat namelijk snel achteruit. Een goede voorbehandeling is de basis voor een goede lijmverbinding en moet uit kostenoverwegingen niet worden nagelaten!

Gebruiksklaar maken van de lijm

Twee-componenten lijmen moeten in de juiste gewichts- of volumeverhouding worden gemengd. Na dit aanmaken heeft het mengsel een beperkte houdbaarheid (pot-life); hoe hoger de temperatuur, hoe korter de houdbaarheid. Bij bewaren in een koelkast is de houdbaarheid dus langer; vermijd condensvorming als het mengsel weer op kamertemperatuur wordt gebracht. Maak twee-componenten lijmen niet in te grote hoeveelheden aan, dit leidt alleen maar tot verspilling.
De meeste vloeibare één-component lijmen zijn zonder verdere maatregelen gebruiksklaar; soms moet de viscositeit met een verdunningsmiddel worden aangepast.

Aanbrengen van de lijm

Dit kan handmatig (kwasten, rakelen, zeefdrukken) of mechanisch gebeuren. Een goede dosering waarbij lijm in de juiste hoeveelheden en op de juiste plaats terecht komt, is belangrijk. Er zijn twee-componenten spuittechnieken waarbij de lijmcomponenten gescheiden worden tot vlak voor het opbrengen.

Positioneren en aandrukken

Verschuiven is bij enkele lijmen niet mogelijk (contactlijmen). Droge lijmfilms hebben in dit verband voordelen. Tijdens het verharden van een lijm is soms druk nodig om de delen op hun

plaats te houden of om optredende krimp te compenseren. Het eigen gewicht van de delen is vaak niet voldoende; extra druk wordt verkregen via gewichten en klemming of via pneumatische c.q. hydraulische persen. Klemmen moeten verend zijn om krimp tijdens uitharding te compenseren.

Verharden

Het verharden van de lijm vindt plaats door verdamping van het oplosmiddel en/of door chemische reacties. Indien de verharding bij hoge temperatuur moet plaatsvinden zijn ovens met luchtcirculatie en afzuiging nodig. Ook kunnen bij sommige toepassingen infra-rood lampen en hoog- of laagfrequent verwarming worden gebruikt.
Andere lijmen harden onder invloed van UV-straling uit.

Beproeven van lijmen en lijmverbindingen

Om iets te kunnen zeggen over de duurzaamheid en het gedrag van een gelijmde constructie, moet de verbinding eigenlijk worden getest onder condities en gedurende de tijdspanne waarvoor zij is ontworpen. Omdat deze procedure tijdrovend en kostbaar is wordt overgegaan tot eenvoudige testen, waarvan men hoopt dat de uitkomsten overeenkomen met het gedrag in de praktijk. Vaak worden belastingsproeven gedaan die een lijmverbinding testen op een manier waarvoor zij duidelijk niet is bedoeld: nl. om meteen de eerste keer stuk te gaan.
Hieronder worden een aantal toegepaste tests genoemd.

Bepalen *afschuifsterkte*:
ASTM D 1002. Method of test for strength properties of adhesives in shear by tensile loading.
DIN 53283. Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen. Bestimmung der Klebfestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen (Zugscherversuch).
Nadeel van deze testen is dat een asymmetrische constructie resulteert in een niet zuivere afschuifbelasting. Er ontstaat een buigmoment en het proefstuk vervormt.

Bepalen *afpelsterkte*:
ASTM D 1876. Method of test for peel resistance of adhesives (T-peel test).

DIN 53282. Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen. Winkelschälversuch.
Stijfheid van lijm en te verlijmen materialen hebben invloed op de resultaten.

Bepalen *slagsterkte*:
ASTM D 950. Method of test for impact strength of adhesive bonds.

Bepalen *treksterkte*:
DIN 53288. Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen. Zugversuch.

Deze testen kunnen het beste worden gebruikt om een eerste selectie te maken. Daarna kan worden overgegaan op een test, die meer relatie heeft met de praktijk bijv. bepalen van vermoeiingseigenschappen.

Bepalen *vermoeiingseigenschappen*:
ASTM D 3166. Method of test for fatigue properties of adhesives in shear by tension loading.
DIN 53285. Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen. Dauerschwingversuch an einschnittig überlappten Klebungen.

Bestandheid tegen *temperaturen en chemicaliën* en eventuele *corrosiviteit*:
ASTM D 3310. Method of test for corrosivity of adhesives.
ASTM D 896. Method of test for resistance of adhesive bonds to chemical reagents.
ASTM D 2295. Strength properties of metal-to-metal adhesives in shear by tensile loading at elevated temperatures.
DIN 53286. Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen. Bedingungen für die Prüfung bei verschiedenen Temperaturen.
DIN 52387. Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen. Bestimmung der Beständigkeit gegenüber Flüssigkeiten.

13.5 Veiligheid en milieu

Lijmen bevatten vaak componenten die brandbaar, giftig, bijtend en/of eczeemverwekkend zijn. In de uitvoering van het lijmproces moet met deze gevaarsaspecten rekening worden gehouden. Men moet echter waken voor overdrijving als slechts enkele druppels lijm per dag worden aangebracht. In tabel 13.2 zijn de gevaren genoemd, die bij de verschillende processtappen spelen.

Tabel 13.2 Gevaren bij het maken van lijmverbindingen

	voor-behan-deling		lijmen									
			aanbrengen van lijm					uithardenvan lijm				
	brandbare oplosmiddelen	alkalisch/zuur reiniger	oplosmiddelhoudende lijmen	epoxy's	acrylaten	cyano-acrylaten	smeltlijmen	oplosmiddelhoudende lijmen	epoxy's	acrylaten	cyano-acrylaten	smeltlijmen
brandgevaar	×		×		×			×		×		
explosiegevaar	×		×					×				
inademing van dampen												
– algemene effecten	×		×	×				×	×			
– (pre)narcotische effecten	×		×					×				
ademhalingstraject												
– irritatie	×	×	×	×	×	×						
– astmatische symptomen				×	×	×	×		×	×	×	
ogen												
– irritatie t.g.v. dampen	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×	
– irritatie door spatten	×	×	×			×						
huid												
– ontvettende werking	×	×										
– irriterende dermatitis		×		×	×	×						
– allergische dermatitis				×	×	×			×	×		
– verbranding							×					

Met ingang van 1 januari 2000 is een nieuwe regelgeving van kracht: bij oplosmiddelgebruik voor binnen voor lijmen (en tevens voor verven en coatings) geldt een maximum VOS-gehalte van 125 gram/liter.

Milieu
Lijmresten en lijmen die niet meer bruikbaar zijn of waarvan de uiterste verbruiksdatum is overschreden moeten als *chemisch afval* worden afgevoerd.

In het BAGA (Besluit aanwijzing gevaarlijke afvalstoffen) wordt een uitzondering gemaakt voor uitgeharde lijmen; maar uitloogtesten aan zogenaamd volledig uitgeharde lijmen hebben aangetoond dat hier aanzienlijke hoeveelheden ongereageerd materiaal uit geëxtraheerd kunnen worden. Deze kunnen op de stortplaats in het grondwater terecht komen.
Indien er voorbehandelingen worden toegepast moet rekening worden gehouden met maximaal toegestane emissies in water en lucht.

13.6 Chemische borgmiddelen

Chemische borgmiddelen hebben een grote verwantschap met lijmen. Terwijl de laatste echter krachten moeten kunnen overbrengen, moeten borgmiddelen vooral zorgen voor een *afdichting* van de verbinding. Beide groepen moeten echter hechten aan de oppervlakken en de lijmspleet volledig opvullen.

Chemische borgmiddelen vervangen meer en meer mechanische afdichtingsmiddelen als stelringen, opsluitringen en pakkingen. Het zijn vloeibare, één-component verbindingen op polymethacrylesterbasis die onder anaerobe condities uitharden. *Anaeroob* betekent hier dat de hars begint uit te harden indien er geen zuurstof meer aanwezig is. De verharding geschiedt bij kamertemperatuur en er verdampt geen oplosmiddel. Het afsluiten van zuurstof uit de lucht vindt plaats door de vloeibare hars tussen twee in of op elkaar passende vlakken te brengen; de lucht wordt verdreven en er vormt zich een dun, taaihard laagje dat zich in de oppervlakteruwheid van de pasvlakken verankert. Elke beweging tussen beide vlakken is daardoor onmogelijk.

Borgen van schroefdraadverbindingen

Tot voor kort ging men ervan uit dat de beste borging wordt verkregen door een blijvende voorspanning in de bout. Bij dynamisch belaste verbindingen kunnen echter bepaalde trillingen een inwendig losdraaimoment veroorzaken. Een chemisch borgmiddel dat alle ruimte in de draad opvult, verhindert elke beweging; bovendien is *passingcorrosie* uitgesloten.

Vastzetten van cilindrische passingen

Bijv. kogel- en glijlagers in boringen, tandwielen op assen. Het voordeel is dat krimp- of perspassingen niet meer nodig zijn. Men kan volstaan met een glijpassing met grotere speling en minder fijne eindbewerking.

Afdichten van vlakke verbindingen

Dunne pakkingen van papier, fiber of kurk zijn niet meer nodig en hoeven niet meer op voorraad gehouden te worden.

Afdichten van geschroefde pijpverbindingen

Lekkage van vloeistoffen en gassen is hiermee uitgesloten. Er moet wel worden opgelet dat bij toepassing in hydraulische en pneumatische systemen de vloeibare hars niet op ongewenste plaatsen terecht komt.

Gebruik chemische borgmiddelen

Anaerobe borgmiddelen kunnen bij alle metalen worden toegepast. Soms is een activator nodig, vooral bij elektrolytische nikkel- en chroomlagen. Ook bij glas, keramiek en thermohardende kunststoffen zijn deze middelen inzetbaar (ook met activator). Thermoplastische kunststoffen als PVC, PS, PC worden echter aangetast.
Anaerobe borgmiddelen zijn in verschillende viscositeiten te krijgen. Als de passing ruimer is, kan een dikker borgmiddel worden gebruikt om wegvloeien te voorkomen.

De borgmiddelen zijn ook verkrijgbaar met verschillende *sterkten* in uitgeharde toestand. Losbreek- of afschuifsterkten kunnen worden gekozen. De sterkte wordt verder beïnvloed door:

– *Speling tussen de onderdelen*. Indien met materialen met verschillende uitzettingscoëfficiënt wordt gewerkt en een grotere

speling noodzakelijk is, neemt de sterkte af. Optimale sterkte bij een speling van 0,1 mm.
- *Oppervlakteruwheid*. De sterkte neemt toe met de ruwheid; bij $Ra = 3{,}2\ \mu$m is deze sterkte ca. 100%.
- G*ebruik van een activator*. Dit resulteert in een lagere sterkte.
- *Verhardingstemperatuur*.
- *Bedrijfstemperatuur*. Bij 150 °C is de sterkte nog 40% van die bij kamertemperatuur.

De *verhardingstijd* wordt beïnvloed door:
- Speling: grotere speling werkt vertragend.
- Toegepaste materialen: actief, passief.
- Temperatuur: hoe lager hoe langzamer.
- Type borgmiddel.
- Gebruik van een activator.
- Mate van reiniging.

Demontage

Demontage kan plaatsvinden door het product te verwarmen op 200°–250 °C, afhankelijk van het type borgmiddel. In warme toestand kan de verbinding worden verbroken.

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf.

14 Verven, lakken en beitsen

14.1 Samenstelling verf

Verf bestaat uit een aantal stoffen, die als volgt kunnen worden gegroepeerd:

- *Bindmiddel*: de stof (of combinatie van stoffen) die na verharding de pigmentdeeltjes tot een samenhangend geheel verbindt.
- *Pigment*: een poedervormige stof die de verf zijn kleur en dekkend vermogen geeft.
- *Vulstoffen*: poedervormige stoffen, die aan de verf worden toegevoegd om de verflaag meer dikte, stevigheid en vullend vermogen te geven.
- *Versnijdingsmiddelen*: poedervormige stoffen, die dienen om de verf bepaalde eigenschappen te geven.
- *Oplosmiddelen*: vloeistoffen die in staat zijn om in de verf aanwezige, min of meer vaste stoffen op te lossen.
- *Verdunningsmiddelen*: vluchtige vloeistoffen die in staat zijn om zich zo met de verf te vermengen, dat ze de vloeibaarheid vergroten.
- *Hulpstoffen*: niet vluchtige vloeistoffen, die aan de verf worden toegevoegd om bepaalde gedragingen van de verf en/of de verffilm te bereiken, te versterken, te belemmeren of te verhinderen.

Afhankelijk van de *pigmentering* onderscheidt men:

- *Lakken*, met ongepigmenteerde films.
- *Beitsen*, met zeer laag gepigmenteerde transparante of semi-transparante films.
- *Verven*, met hoog gepigmenteerde, dekkende films.

14.2 Eigenschappen en toepassingen

Tabel 14.1 Vergelijking alkydhars-verven en acrylaatdispersie-verven

	alkyd	acrylaat
droging	±16 uur	±4 uur, bij vochtig weer langer
vloei	uitstekend	matig, grote vlakken moeilijk met de kwast te verwerken
glansbehoud	matig tot zeer goed afhankelijk van het verftype	uitstekend geen afkrijten van de verf
glans	hoogglans	lage hoogglans
verwerking	bijspuiten kans op kratervorming waardoor ter plaatse van de kraters geringe laagdikte tot $1\frac{1}{3}$ van de oorspronkelijke laag	bij spuiten van grof hout lopen de nerven goed vol plamuren niet nodig. Hecht niet op vettige ondergrond (stop- en reparatiepasta's die vethoudend zijn); hecht moeilijk op hout dat met een waterafstootbaar conserveermiddel is behandeld; moeilijk toepasbaar op houtsoorten die in water oplosbare kleurstoffen bevatten (merbau)
verwijderbaarheid oude verflagen	door afbranden en met behulp van afbijtmiddelen	alleen met behulp van afbijtmiddelen
laagdikte in één arbeidsgang	tot maximaal 40 micron	tot 100 à 200 micron

Tabel 14.1 (vervolg)

	alkyd	acrylaat
hechting op andere verflaag	goede hechting op acrylaatdispersies	goede hechting op alkydharsverven
weersinvloeden	niet verwerkbaar beneden 5 °C	niet verwerkbaar beneden 10 °C; kans op afspoelen van de verf bij regen wanneer deze nog niet voldoende gedroogd is.
milieu	brandbaar; milieu schadelijke oplosmiddelen	milieuvriendelijk; water als oplosmiddel
kleurechtheid	goed	zeer goed
U.V.-bestendigheid	redelijk tot goed; sterk afhankelijk van de hoeveelheid vaste stof en de toepassing van U.V.-absorbers	goed tot zeer goed; afhankelijk van de toepassing van de U.V.-absorbers
oplosmiddel	koolwaterstoffen (bijv. terpentine/ aromaten)	water
onderhoudsfrequentie	gemiddeld 4 jaar	gemiddeld 5 jaar
thermoplastisch (wordt week bij hoge temperaturen)	niet	wel

Tabel 14.2 Verven en lakken ingedeeld naar ***bindmiddelen***

soort	onderverdeling	eigenschappen en toepassingen
door verdamping drogende verven (bij omgevingstemperatuur drogende verven)	nitrocellulose-verven	Uitsluitend met spuiten aan te brengen. Toepassingen in de autoreparatiesector. Sneldrogende lakken.
	cellulose-acetaat en cellulose-acetobutyraat lakken	Aan te brengen met spuiten en dompelen. Goed bestand tegen inwerking van licht en tegen verhoogde temperaturen.
	ethylcellulose-verven	Gebruikt voor het lakken van metaalfolie.
	chloorrubber-verven	Gebruikt voor het beschermen van staalconstructies in chemische en levensmiddelenindustrie.
	neoprene verven gecycliseerde rubber-verven vinyl-verven	Chemisch bestendige, buitenduurzame lakken en muurverven. Toepassingen op constructiestaal, chemische installaties e.d.
	polystyreen-verven acrylaat-lakken	Blanke acrylaat-lakken worden gebruikt voor het beschermen van gepolijste metalen.
	schellak-vernis	Beperkte toepassing in elektrische isolatie en voor het behandelen van gieterijmodellen.
emulsie-verven (droging door coagulatie gevolgd door verdamping)	PVAC emulsie-verven	Watergevoelig en slecht bestand tegen chemicaliën.
	PVC-PVAC copolymeer emulsieverven	Goede chemische weerstand
	PVAC-acrylaat emulsie-verven	Bestand tegen buitenexpositie, afwasbaar en nat afboenbaar
	PVP emulsie-verven	Geschikt voor buitentoepassing: goederenwagons van spoorwegen.
	butadieen-styreen emulsie-verven	Allen voor binnentoepassing.
	acrylaatemulsie-verven	Voor buitentoepassing. Goede mechanische eigenschappen en behoorlijke chemische weerstand.

Tabel 14.2 (vervolg)

soort	onderverdeling	eigenschappen en toepassingen
oxidatief drogende verven	olie-verven alkyd-verven	Thans vervangen door alkydharsverven. Meest toegepaste verven in de 'doe-het-zelf-sector.
twee-componenten verven (reactie lakken)	epoxy-lakken polyurethan-lakken (isocyanaat-lakken) onverzadigde polyester-lakken washprimers	Zeer goede corrosieweerstand en mechanische eigenschappen Chemische bestendige en slijtvaste lakken, vliegtuiglakken, beschermen van metalen (o.a. ramen)
moffellakken (bij verhoogde temperatuur drogende verven)	alkyd-ureum hars-lakken alkyd-melamine hars-lakken moffelacrylaat-lakken fenolhars-lakken moffel epoxy-lakken siliconhars-lakken Butyltitanaat-lakken moffellakken met in water oplosbaar bindmiddel	Gebruikt voor stalen meubelen, fietsen e.d. Hard, slijtvast, niet al te best bestand tegen water. Toepassingen: wasmachines, koelkasten, auto's Goed bestand tegen weersinvloeden en hoge temperaturen. Toepassingen: autolakken en lakken van gevelelementen. Door geelbruine kleur van fenolhars niet geschikt voor decoratieve toepassingen. Goede chemische weerstand en mechanische eigenschappen. Toepassingen in de chemische industrie, bij de vliegtuigbouw. Goed bestand tegen hogere temperaturen, goede chemische weerstand. Toepassing als haardlakken. Hittevaste lakken. Toepassingen zijn grondlaag op auto's, stalen ramen en toplaag op stalen meubelen en koelkasten.

Tabel 14.2 (vervolg)

soort	onderverdeling	eigenschappen en toepassingen
silicaat-verven		Gebaseerd op waterglas (met water verdunbaar) Gebaseerd op ethylsilicaat of alkylsilicaat (met alcohol verdunbaar).
high-build verven		Verftypen waarmee in één keer lagen van 60 μm of meer kunnen worden aangebracht. Applicatie methode: airless spuiten.
organosolen en **plastisolen** (droging door gelering		Plastisol wordt aangebracht door dompelen en langzaam uithijsen. Toepassing: draadartikelen. Organosolen worden door spuiten aangebracht. Typische toepassing: inwendige bescherming van wasmachines.

Bron: Vademecum oppervlaktetechnieken (metalen), uitgave VOM.

*Tabel 14.3 Verven ingedeeld naar **pigmenten***

soort	onderverdeling	eigenschappen en toepassingen
kleurende pigmenten	natuurlijke anorganische pigmenten synthetische anorganische pigmenten natuurlijke organische pigmenten synthetische organische pigmenten	Kleur en kwaliteit kunnen verschillen. Voorbeelden: terra de sienna (geel), grafiet (zwart). Constante kwaliteit en zuiver van samenstelling. Voorbeelden: chromaatgeel, Berlijns blauw. Voorbeelden: karmijnrood; kraplak (rood). Niet lichtecht; niet geschikt voor buitentoepassing. Voorbeelden: vlamzwart, gaszwart
witte pigmenten	zinkwit, loodwit, titaanwit	De belangrijkste zijn anorganisch en synthetisch bereid. Zinkwitverven ongeschikt voor buitentoepassing, loodwitverven (giftig) geschikt voor buitentoepassing. Titaanwit is niet giftig en verkleurt niet.
kleur-pigmenten	geel, oranje, rood, blauw, groen, zwart	Voorbeelden: cadmiumgeel (giftig), chromaatgeel, cadmiumoranje, cadmiumrood, vermiljoen (giftig), kobaltblauw, chromaatgroen, Parijsgroen (giftig), grafiet, roetzwart.
corrosie-werende pigmenten	loodmenie, zinkchromaat, calciumplumbaat	Hoofdzakelijk gebruikt in grondverven. Goede roestwerende werking. Verwerkbaarheid van loodmenie verbeteren door toevoeging van krijt of ijzeroxide (loodijzermeniesoorten). Zinkchromaatverven kunnen gemakkelijk worden gespoten.

metaal-pigmenten	zink-, aluminium-, loodpoeder andere metaalpigmenten	Het gebruik van een metaalpigment kan plaatsvinden om zijn kleur (brons), om zijn corrosiewerende werking (zink), om zijn afdekkend vermogen (aluminium) e.d.
aangroeiwerende pigmenten	bactericide en fungicide toevoegingen aan verf	Toepassing op schepen onder de waterlijn (antifouling compounds). Bactericiden en fungiciden gebruikt men in verfsoorten om aantasting door bacteriën, algen en schimmels tegen te gaan..
pigmenten met speciale optische eigenschappen	camouflageverf lichtgevende verf infrarood reflecterende verf	Toepassing op militaire objecten; remissiekromme in het infrarood dient overeen te stemmen met die van bladgroen. Fosforescrende verf blijft na belicht te zijn nog enige tijd licht uitzenden. Verf met radioactieve pigmenten geeft continu licht.
matteringsmiddelen		Siliciumdioxide, bepaalde silicaten e.d. hebben de eigenschap dat zij in kleine percentages gebruikt de glans van een verf aanzienlijk verlagen.
stroefmakende pigmenten		Toevoegingen die de wrijvingscoëfficiënt van een verflaag sterk vergroten. Voorbeeld: schoolborden-verf (glas), antislipverven (zand, korund, amaril e.d.)
vulstoffen		Voorbeelden: Krijt, talk, siliciumoxide, bariet e.d. gebruikt als versnijdingsmiddel voor dure pigmenten.

14.3 Conservering en schilderwerk van metalen

De meeste metalen worden aangetast wanneer ze in onbeschermde toestand aan de lucht of water zijn blootgesteld. Metalen gaan dan over in allerlei metaalverbindingen. We noemen dit corrosie. De meest voorkomende vormen zijn:

- Elektrochemische corrosie veroorzaakt door potentiaalverschillen van de metalen onderling (zie tabel 14.4 Potentiaalverschillen).
- Atmosferische corrosie veroorzaakt door de omringende lucht.

Staal

Afhankelijk van de vochtigheidsgraad en de agressiviteit van het milieu kunnen voor bescherming van staal tegen corrosie drie beschermingsmethoden worden toegepast:

1. Verfsystemen, te gebruiken bij normale vochtigheid en geringe tot matige chemische inwerking. Een en ander is afhankelijk van het gekozen verfsysteem.
2. Bedekken met een metaal dat weinig corrosiegevoelig is. Voornamelijk thermisch verzinken komt hiervoor in aanmerking. Toepassing bij normale tot hoge vochtigheid en matige tot sterke chemische inwerking. De toepassing is afhankelijk van de dikte van de zinklaag.
3. Duplexsystemen. Hierbij gaat het om een combinatie van de onder 1 en 2 genoemde mogelijkheden. Te denken valt aan het schilderen van verzinkt staal. Toepassing bij extreme omstandigheden.

Aluminium

Voor de bescherming van aluminium worden over het algemeen drie methoden toegepast:

1. Anodiseren, opbrengen door middel van een elektrolytisch proces.
2. Lakken, opbrengen door middel van een mechanisch proces.
3. Poedercoaten, opbrengen door middel van een thermisch proces.

Tabel 14.4 Overzicht potentiaalverschillen metalen[1)]

	platina	goud	RVS 18/8 passief	zilver	kwik	nikkel	koper nikkel brons	koper	aluminium brons	messing	brons 88/12	tin	lood	duraluminium	zachtstaal	Alphax H	aluminium 99,5	hardstaal	Duralinox	cadmium	RVS 18/8 actief	zilver ijzer	almasillum	chroom	witmetaal	zink	magnesium
platina	0	130	750	350	350	430	450	570	600	650	770	800	840	940	1000	1065	1090	1095	1100	1100		1105	1105	1200	1350	1400	1950
goud	130	0	110	220	220	300	320	440	470	520	640	670	710	810	870	935	960	965	970	970		975	975	1070	1230	1270	1820
RVS 18/8 passief	250	110	0	100	100	180	200	320	350	400	520	550	590	690	750	815	840	845	850	850		855	855	950	1110	1150	1700
zilver	350	220	100	0	0	80	100	230	250	300	420	450	490	590	650	715	740	745	750	750		755	755	850	1010	1050	1600
kwik	350	220	100	0	0	80	100	220	250	300	420	450	490	590	650	715	740	745	750	750		755	755	850	1010	1050	1600
nikkel	430	300	180	80	80	0	20	140	170	220	340	370	410	510	570	635	660	665	670	670		675	675	770	930	970	1570
koper nikkel brons	450	320	200	100	100	20	0	120	150	200	320	350	380	490	550	615	640	645	650	650		655	655	750	910	950	1500
koper	570	440	320	220	220	140	120	0	30	80	200	230	270	370	430	495	520	525	530	530		535	535	630	790	830	1380
aluminium brons	600	470	350	250	250	170	150	30	0	50	170	200	240	340	400	465	490	495	500	500		505	505	600	760	800	1350
messing	650	520	400	300	300	220	200	80	50	0	120	150	190	290	350	415	440	445	450	450		455	455	550	710	750	1300
brons 88/12	770	640	520	420	420	340	320	200	170	170	0	30	70	170	230	295	320	325	330	330		335	335	430	590	630	1180
tin	800	670	550	450	450	370	350	230	200	150	30	0	40	140	200	265	290	295	300	300		305	305	400	560	600	1150
lood	840	710	590	490	490	410	380	270	240	190	70	40	0	100	160	225	250	255	260	260		265	265	360	520	560	1110
duraluminium	940	810	690	590	590	520	490	370	340	290	170	140	100	0	60	125	150	155	160	160		165	165	260	420	530	1010
zachtstaal	1000	870	750	650	650	570	550	430	400	350	230	200	160	60	0	65	90	95	100	100		105	105	200	360	400	950
Alphax H	1065	935	815	715	715	635	615	495	465	415	295	265	225	125	65	0	25	30	35	35		40	40	135	295	335	885
aluminium 99.5	1090	960	845	740	740	660	640	520	490	440	320	290	250	150	90	25	0	5	10	10		15	15	110	270	310	860
hardstaal	1095	965	845	745	745	665	645	525	495	445	325	295	255	155	95	30	5	0	5	5		10	10	105	265	305	855
Duralinox	1100	970	850	750	750	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	5	0	0		5	5	100	260	300	850
cadmium	1100	970	850	750	750	670	650	530	500	450	330	300	260	160	100	35	10	5	0	0		5	5	100	260	300	850
RVS 18/8 actief																											
zuiver ijzer	1105	975	855	755	755	675	655	535	505	455	335	305	265	165	105	40	15	10	5	5		0	0	95	250	295	845
almasillum	1105	975	855	755	755	675	655	535	505	455	335	305	265	165	105	40	15	10	5	5		0	0	95	250	295	845
chroom	1200	1070	950	850	850	770	750	630	600	550	430	400	360	260	200	135	110	105	100	100		95	95	0	25	200	750
witmetaal	1350	1230	1110	1010	1010	930	910	790	760	710	590	560	520	420	360	295	270	265	260	260		255	255	25	0	40	590
zink	1400	1270	1150	1050	1050	970	950	830	800	750	630	600	560	530	400	335	310	305	300	300		295	295	200	40	0	550
magnesium	1950	1820	1700	1600	1600	1520	1500	1380	1350	1300	1180	1150	1110	1010	950	885	860	855	850	850		845	845	750	590	550	0

[1)] Het licht gearceerde rlak is toepasbaar

14.4 Etikettering van verfproducten

Voor de verfproducten is een Europees etiketteringsysteem van toepassing. Dit systeem geeft richtlijnen voor de op etiketten en of verpakking aan te brengen veiligheidszinnen en gevarensymbolen. De gecodeerde zinnen en gevarencodes staan ook in de productveiligheidsbladen vermeld (EG-afspraak).

De volgende vier onderdelen zijn in het systeem opgenomen:

1. Gevarensymbolen (zie hoofdstuk K, par. 2.4).
2. R-zinnen (Risk), deze geven de specifieke risico's aan van gevaarlijke (verf-)producten.
3. S-zinnen (Safety), deze geven aan welke voorzorgsmaatregelen moeten worden getroffen om het (verf-)product veilig te kunnen verwerken.
4. P-zinnen, dit zijn speciale waarschuwingszinnen.

Er zijn diverse internetsites die informatie geven over dit etiketteringsysteem. Zie bijv. www.bbzfnv.nl

Zie de literatuurlijst op pag. E1/239 voor gebruikte documentatie in deze paragraaf

Literatuur

Zie tevens de in de tekst vermelde normen, verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* (NEN), Postbus 5059, 2600 GB Delft.

ALGEMEEN (par. 1 t/m 14)

- Brady, G., H. Clauser
  Materials Handbook
  Maidenhead UK, McGraw-Hill.
- Giacoletto, L.J.
  Electronic Designers' Handbook
  New York, McGraw-Hill.
- Lide, D.R. e.o. (eds.)
  Handbook of Chemistry and Physics
  Cleveland, CRC Press.
- *Materiaalkeuze in de werktuigbouw*
  Culemborg, Educaboek.
- Waterman, N.A., M.F. Ashby (eds.)
  Elsevier Materials Selector (3 vol.)
  Essex UK, Elsevier Science Publishers.

METALEN (par. 2)

- *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle* (Band 1 t/m 4)
  Dusseldorf, Verlag Stahleisen.
- *Duurzaamheid van Staalconstructies*
  Rotterdam, Centrum Staal.
- Jongenburger, P.
  Kennis der Metalen
  Delft, Delftsche Uitgeversmaatschappij.
- 'Metals Handbook':
  - *Selection and Properties*
    (10th ed., Vol. 1 and 2)
  - *Corrosion*
    (9th ed., Vol. 13)

  Materials Park, ASM.

KUNSTSTOFFEN (par. 3)

- Bhowmick, A.K., H.L. Stephens (eds.)
  Handbook of Elastomers
  New York, Marcel Dekker Inc.

- Domininghaus, H.
  Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften
  Düsseldorf, VDI Verlag.
- Gächter, R., H. Müller (eds.)
  Plastics Additives Handbook
  München, C. Hanser Verlag.
- Lutz, J.T. (ed.)
  Thermoplastic Polymer Additives
  New York, Marcel Dekker Inc.
- Saechtling, H.
  Kunststoff Taschenbuch
  München, C. Hanser Verlag.
- Utracki, L.A.
  Polymer Alloys and Blends
  New York, C. Hanser Publ.
- Zachariades, A.E., R.S. Porter (eds.)
  High Modulus Polymers
  New York, Marcel Dekker Inc.

TECHNISCHE KERAMIEK (par. 4)

- Grayson, M. (ed.)
  Encyclopedia of Glass, Ceramics and Cement
  New York, John Wiley & Sons.
- *Handbuch der Keramik*
  Freiburg, Verlag Schmid.
- Morell, R.
  Handbook of properties of technical and engineering ceramics
  (part 1 and 2)
  London, Her Majesty's Stationary Office.
- Reed, J.S.
  Introduction to the principles of ceramic processing
  New York, John Wiley and Sons.
- Nederlandse Keramische Vereniging
  Uitgever tijdschrift en jaarboek met leverancieradressen
  Postbus 36, 6994 ZG De Steeg.
  Internet adressen:
  www.ceramics.nl
  www.keramiek.nl
  www.kgk.nl

– Roman, Y.G.
'Keramische matrix composieten' in *Handboek Technische Materialen*
Samson BedrijfsInformatie b.v.
– Terpstra, R.A. e.a., (eds.)
'Ceramic Processing'
Chapman and Hall, 1995

BOUWSTOFFEN ALGEMEEN (par. 5)

– *Eigenschappen van bouw- en isolatiematerialen*
Rotterdam, Stichting Bouwresearch SBR.
– *Titaanzink in de Bouw*
Budel, Ned Zink

HOUT (par. 6)

– Centrum Hout
Houtdocumentatie
Deventer, Kluwer Technische Boeken.
– Centrum Hout/HI TNO (Almere)
Houtvademecum, 2000 (nieuwe uitgave verschijnt in 2001)
Deventer, Kluwer Technische Boeken.

STEEN (par. 7)

– *Hogere Bouwkunde deel 2, Onderbouw*
Leiden, Waltman, 2001
– *Hogere Bouwkunde deel 5, Afbouw*
Leiden, Waltman, 1999
– Iken H.W. e.a.
Handbuch der Betonprüfung: Anleitungen und Beispiele
Düsseldorf, Betonverlag
– *Schoon beton, verschijningsvormen en keuringscriteria*
's Hertogenbosch, Enci Media, 1990.
– Souwerbren, C. (eindred.)
Betontechnologie
's Hertogenbosch, Enci Media, 10e volledig herziene druk, 1998.

GLAS (par. 9)
- Tijdschrift *Fles in beeld*
  Uitgeverij Eisma b.v.
- Informatie over glassoorten is op te vragen bij leveranciers.

DAKBEDEKKINGEN (par. 10)
- *BDA dakboekje 2000*
  Gorinchem, Buro Dakadvies.

VERBINDING EN BEVESTIGING (par. 12)
- Deutsches Institut für Normung
  Mechanische Verbindungselemente 1: Schrauben, Massnormen
  Berlin/Köln, Beuth Verlag.

LIJMEN (par. 13)
- Chemiewinkel Amsterdam
  Lijmwijzer
  Amsterdam, De Wetenschapswinkel
- Endlich, W.
  Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Technik
  Essen, Girardet.
- Schliekelman, R.J.
  Gelijmde metalen constructies
  Amsterdam, Elsevier.
- Shields, J.
  Adhesives Handbook
  London, Newness-Butterworths

VERVEN (par. 14)
- Kooistra, M.F.
  Technieken en toepassingen van verven en lakken
  Deventer, Kluwer Uitgeverij b.v.
- *Hogere Bouwkunde deel 5, Afbouw* (Jellema) Leiden, Waltman 1999
- Klis, T. van der
  Vademecum oppervlaktetechnieken (metalen)
  Bilthoven, Adviescentrum VOM, (030)228 71 11, wordt in 2001 nieuw uitgegeven (+ cd-rom).

Tabellen voor staalconstructies E2

1 Symbolen, eenheden en voetnoten

2 Warmgewalste profielen
2.1 Balkstaal UNP
2.2 Balkstaal INP
2.3 Balkstaal IPE
2.4 Breedflensbalken HEA
2.5 Breedflensbalken HEB
2.6 Breedflensbalken HEM
2.7 Breedflensbalken HD
2.8 Gehalveerde IPE-balken
2.9 Gehalveerde breedflensbalken HEA
2.10 Gehalveerde breedflensbalken HEB
2.11 Gehalveerde breedflensbalken HEM
2.12 Raatliggers
2.13 Geïntegreerde liggers
2.14 Vierkante buisprofielen
2.15 Rechthoekige buisprofielen
2.16 Ronde buisprofielen
2.17 Ellipsvormige buisprofielen
2.18 Gelijkzijdige hoekstalen
2.19 Ongelijkzijdige hoekstalen
2.20 Platbulbstaal (Hollandprofiel)
2.21 T-stalen
2.22 Rondstaal
2.23 Vierkantstaal
2.24 Platstaal
2.25 Strip
2.26 Plaatstaal
2.27 Geruite platen
2.28 Kraanrails
2.29 Spoorstaven

3 Koudgevormde profielen

3.1 Gelijkzijdige hoekstalen
3.2 Ongelijkzijdige hoekstalen
3.3 Gelijkzijdig U-staal
3.4 Ongelijkzijdig U-staal
3.5 Z-profielen
3.6 Omega-profielen
3.7 Doosprofielen
3.8 Railprofielen
3.9 Trailerprofielen
3.10 Plaatstaal

Opmerkingen:

- Zie voor meer gegevens hoofdstuk F3 *Berekenen van bouwconstructies*, par. 5 *Staalconstructies*.
- *RVS-profielen:* de verkrijgbaarheid hiervan is sterk afhankelijk van de leverancier, zodat het moeilijk is gegevens van courante profielen te geven. In principe moet het mogelijk zijn, mede in relatie tot het gevraagde kwantum, elk profiel te laten maken. Hetzelfde geldt voor *aluminium profielen*.

1 Symbolen, eenheden en voetnoten

Symbolen

A = oppervlakte-doorsnede [mm^2]
M = theoretische massa per lengte [kg/m′]
(volumieke massa $\rho = 7850$ kg/m^3)
O = verfoppervlakte [m^2/m′]
e = zwaartelijnafstand [mm]
I = kwadratisch oppervlaktemoment [mm^4]
W = weerstandsmoment [mm^3]
W_{el} = elastisch weerstandsmoment [mm^3]
$W_{pl} = 2 \times S$ = plastisch weerstandsmoment
(bij symmetrische profielen) [mm^3]

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \text{traagheidsstraal [mm]}$$

S = statisch moment van de halve doorsnede [mm^3]

$$s = \frac{I}{S} = \text{afstand van druk- en trekmiddelpunt [mm]}$$

d_1 = grootste gatmiddellijn [mm]

Alle maten in mm **tenzij anders aangegeven.**

Krasmaten

De *krasmaten* zijn volgens DIN 997. De *voetnoten* hebben de volgende betekenis:

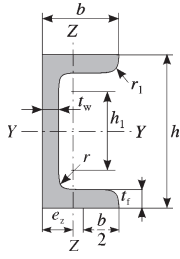
1 Voor *klinknagels en schroefbouten in ruime gaten*, waarvan de middellijn kleiner is dan de hier aangegeven grootste gatmiddellijn, kunnen dezelfde krasmaten aangehouden worden.
2 Als bij een *profiel* twee getalwaarden voor d_1 of d_2 zijn aangegeven, dan dient de kleinste getalwaarde te worden gebruikt bij voorspanbouten.
3 Als bij een *profiel* twee krasmaten zijn aangegeven, dan dient de grootste krasmaat slechts bij voorspanbouten te worden toegepast.
* Voorspanbouten zoals die zijn aangegeven in het normblad zijn hier niet te gebruiken.

2 Warmgewalste profielen

2.1 *Balkstaal UNP*

Helling flenzen 8% bij profielen met $h \leqslant 300$

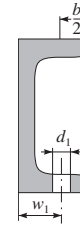
Helling flenzen 5% bij profielen met $h > 300$



Profiel no.	Afmetingen							Krasmaten		*M*	*O*	*O/A*	*A*
	h	*b*	t_w	$t_f = r$	r_1	h_1	e_y	d_1 [1)2)]	w_1	[kg/m′]	[m²/m′]	[1/m]	[mm²]
80	80	45	6	8	4	46	14,5	13	25	8,64	0,312	284	1100
100	100	50	6	8,5	4,5	64	15,5	13	30	10,6	0,372	276	1350
120	120	55	7	9	4,5	82	16	17|13	30	13,4	0,434	255	1700
140	140	60	7	10	5	98	17,5	17	35	16	0,489	240	2040
160	160	65	7,5	10,5	5,5	115	18,4	21|17	35	18,8	0,546	228	2400
180	180	70	8	11	5,5	133	19,2	21	40	22	0,611	218	2800
200	200	75	8,5	11,5	6	151	20,1	23|21	40	25,3	0,661	205	3220
220	220	80	9	12,5	6,5	167	21,4	23	45	29,4	0,718	192	3740
240	240	85	9,5	13	6,5	184	22,3	25|23	45	33,2	0,775	183	4230
260	260	90	10	14	7	200	23,6	25	50	37,9	0,834	173	4830
280	280	95	10	15	7,5	216	25,3	25	50	41,8	0,890	167	5330
300	300	100	10	16	8	232	27	28	55	46,2	0,950	162	5880
320	320	100	14	17,5	8,75	246	26	28	58	59,5	0,98	129	7580
350	350	100	14	16	8	282	24	28	58	60,6	1,05	136	7730
380	380	102	13,5	16	8	312	23,8	28	60	63,1	1,11	138	8040
400	400	110	14	18	9	324	26,5	28	60	71,8	1,18	129	9150

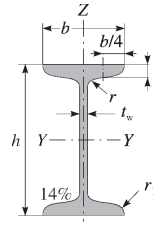
Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

Balkstaal UNP (vervolg)



Profiel no.	*Y-Y* as					*Z-Z* as		
	I_y	W_y	i_y	S_y	s_y	I_z	W_z	i_z
	$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$	
80	106	26,5	31	15,9	66,5	19,4	6,36	13,3
100	206	41,2	39,1	24,5	84,2	29,3	8,49	14,7
120	364	60,7	46,2	36,3	100	43,2	11,1	15,9
140	605	86,4	54,5	51,4	118	62,7	14,8	17,5
160	925	116	62,1	68,8	133	85,3	18,3	18,9
180	1350	150	69,5	89,6	151	114	22,4	20,2
200	1910	191	77	114	168	148	27	21,4
220	2690	245	84,8	146	185	197	33,6	23
240	3600	300	92,2	179	201	248	39,6	24,2
260	4820	371	99,9	221	218	317	47,7	25,6
280	6280	448	109	266	236	399	57,2	27,4
300	8030	535	117	316	254	495	67,8	29
320	10870	679	121	413	263	597	80,6	28,1
350	12840	734	129	459	286	570	75	27,2
380	15760	829	140	507	311	615	78,7	27,7
400	20350	1020	149	618	329	846	102	30,4

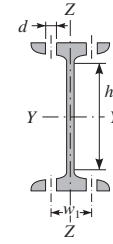
2.2 *Balkstaal INP*



Profiel no.	Afmetingen						Krasmaten		*M*	*O*	*O/A*	*A*
	h	*b*	t_w	t_f	r_1	h_1	d_1	w_1	[kg/m′]	[m²/m′]	[1/m]	[mm²]
80	80	42	3,9	5,9	2,3	59	6,4	22	5,94	0,304	402	757
100	100	50	4,5	6,8	2,7	75	6,4	28	8,34	0,370	349	1060
120	120	58	5,1	7,7	3,1	92	8,4	32	11,1	0,439	309	1420
140	140	66	5,7	8,6	3,4	109	11	34	14,3	0,502	276	1820
160	160	74	6,3	9,5	3,8	125	11	40	17,9	0,575	252	2280
180	180	82	6,9	10,4	4,1	142	13	44	21,9	0,640	229	2790
200	200	90	7,5	11,3	4,5	159	13	48	26,2	0,709	212	3340
220	220	98	8,1	12,2	4,9	176	13	52	31,1	0,775	196	3950
240	240	106	8,7	13,1	5,2	192	17	56	36,2	0,844	183	4610
260	260	113	9,4	14,1	5,6	208	17	60	41,9	0,906	170	5330
280	280	119	10,1	15,2	6,1	225	17	62	47,9	0,966	158	6100
300	300	125	10,8	16,2	6,5	241	21	64	54,2	1,03	149	6900
320	320	131	11,5	17,3	6,9	258	21	70	61,0	1,09	140	7770
340	340	137	12,2	18,3	7,3	274	21	74	68,0	1,15	133	8670
360	360	143	13,0	19,5	7,8	290	23	76	76,1	1,21	125	9700
380	380	149	13,7	20,5	8,2	306	23	82	84,0	1,27	119	10700
400	400	155	14,4	21,6	8,6	323	23	86	92,4	1,33	113	11800
425	425	163	15,3	23,0	9,2	343	25	88	104	1,41	107	13200
450	450	170	16,2	24,3	9,7	363	25	94	115	1,48	101	14700
475	475	178	17,1	25,6	10,3	384	28	96	128	1,55	95	16300
500	500	185	18,0	27,0	10,8	404	28	100	141	1,63	91	17900
550	550	200	19,0	30,0	11,9	445	28	110	166	1,80	85	21200
600	600	215	21,6	32,4	13,0	485	28	120	199	1,92	76	25400

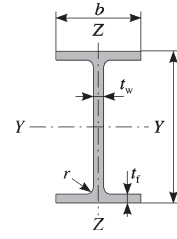
Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

Balkstaal INP (vervolg)



Profiel no.	*Y-Y* as					*Z-Z* as		
	I_y	W_y	i_y	S_y	s_y	I_z	W_z	i_z
	$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$	
80	77,8	19,5	32,0	11,4	68,4	6,29	3,00	9,1
100	171	34,2	40,1	19,9	85,7	12,2	4,88	10,7
120	328	54,7	48,1	31,8	103	21,5	7,41	12,3
140	573	81,9	56,1	47,7	120	35,2	10,7	14,0
160	935	117	64,0	68,0	137	54,7	14,8	15,5
180	1450	161	72,0	93,4	155	81,3	19,8	17,1
200	2140	214	80,0	125	172	117	26,0	18,7
220	3060	278	88,0	162	189	162	33,1	20,2
240	4250	354	95,9	206	206	221	41,7	22,0
260	5740	442	104	257	223	288	51,0	23,2
280	7590	542	111	316	240	364	61,2	24,5
300	9800	653	119	381	257	451	72,2	25,6
320	12510	782	127	457	274	555	84,7	26,7
340	15700	923	135	540	291	674	98,4	28,0
360	19610	1090	142	638	307	818	114	29,0
380	24010	1260	150	741	324	975	131	30,2
400	29210	1460	157	857	341	1160	149	31,3
425	36970	1740	167	1020	362	1440	176	33,0
450	45850	2040	177	1200	383	1730	203	34,3
475	56480	2380	186	1400	404	2090	235	36,0
500	68740	2750	196	1620	424	2480	268	37,2
550	99180	3610	216	2120	468	3490	349	40,2
600	139000	4630	234	2730	509	4670	434	43,0

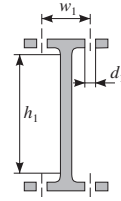
2.3 Balkstaal IPE



Profiel no.	Afmetingen						Krasmaten				M	O	O/A	A
	h	b	t_w	t_f	r	h_1	d	w_1	w_2	w_3	kg/m	m²/m	1/m	mm²
80	80	46	3,8	5,2	5	60	6	26			6,0	0,328	429	764
100	100	55	4,1	5,7	7	75	8	30			8,10	0,400	387	1032
120	120	64	4,4	6,3	7	93	8	36			10,37	0,475	360	1321
140	140	73	4,7	6,9	7	112	11	40			12,89	0,551	335	1643
160	160	82	5	7,4	9	127	13	44			15,77	0,623	310	2009
180	180	91	5,3	8	9	146	13	50			18,80	0,698	291	2395
200	200	100	5,6	8,5	12	159	13	56			22,36	0,768	270	2848
220	220	110	5,9	9,2	12	178	17	60			26,20	0,848	254	3337
240	240	120	6,2	9,8	15	190	17	68			30,71	0,922	236	3912
270	270	135	6,6	10,2	15	220	21/17	72			36,07	1,041	227	4595
300	300	150	7,1	10,7	15	249	23	80			42,24	1,160	216	5381
330	330	160	7,5	11,5	18	271	25/23	86			49,15	1,254	200	6261
360	360	170	8	12,7	18	299	25	90			57,09	1,353	186	7273
400	400	180	8,6	13,5	21	331	28/25	96			66,30	1,467	174	8446
450	450	190	9,4	14,6	21	379	28	106			77,57	1,605	162	9882
500	500	200	10,2	16	21	426	28	110			90,68	1,744	151	11552
550	550	210	11,1	17,2	24	468	28	120			105,52	1,877	140	13442
600	600	220	12	19	24	514	28	120			122,45	2,015	129	15598

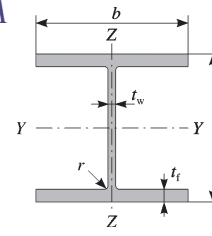
Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

Balkstaal IPE (vervolg)



Profiel no.	Sterke as y-y					Zwakke as z-z				Torsie	Welving
	A_w mm^2	I_y mm^4 $\times 10^4$	W_y;e_1 mm^3 $\times 10^3$	W_y;p_1 mm^3 $\times 10^3$	i_y mm	I_z mm^4 $\times 10^4$	W_z;e_1 mm^3 $\times 10^3$	W_z;p_1 mm^3 $\times 10^3$	i_z	I_t mm^4 $\times 10^4$	I_{wa} mm^6 $\times 10^9$
80	429	80,14	20,03	23,22	32,38	8,49	3,69	5,82	10,54	0,70	0,118
100	612	171,0	34,2	39,4	40,7	15,9	5,8	9,1	12,4	1,2	0,351
120	746	317,8	53,0	60,7	49,0	27,7	8,6	13,6	14,5	1,7	0,890
140	893	541,2	77,3	88,3	57,4	44,9	12,3	19,2	16,5	2,4	1,981
160	1136	869,3	108,7	123,9	65,8	68,3	16,7	26,1	18,4	3,6	3,959
180	1312	1317,0	146,3	166,4	74,2	100,9	22,2	34,6	20,5	4,8	7,431
200	1652	1943,2	194,3	220,6	82,6	142,4	28,5	44,6	22,4	7,0	12,988
220	1863	2771,8	252,0	285,4	91,1	204,9	37,3	58,1	24,8	9,1	22,672
240	2269	3891,6	324,3	366,6	99,7	283,6	47,3	73,9	26,9	12,9	37,391
270	2587	5789,8	428,9	484,0	112,3	419,9	62,2	97,0	30,2	15,9	70,578
300	2965	8356,1	557,1	628,4	124,6	603,8	80,5	125,2	33,5	20,1	125,934
330	3581	11767	713,1	804,3	137,1	788,1	98,5	153,7	35,5	28,1	199,097
360	4073	16266	903,6	1019,1	149,5	1043,5	122,8	191,1	37,9	37,3	313,580
400	4953	23128	1156,4	1307,1	165,5	1317,8	146,4	229,0	39,5	51,1	490,048
450	5835	33743	1499,7	1701,8	184,8	1675,9	176,4	276,4	41,2	66,9	791,005
500	6823	48199	1927,9	2194,1	204,3	2141,7	214,2	335,9	43,1	89,3	1249,37
550	8251	67117	2440,6	2787,0	223,5	2667,6	254,1	400,5	44,5	123,2	1884,10
600	9518	92083	3069,4	3512,4	243,0	3387,3	307,9	485,6	46,6	165,4	2845,53

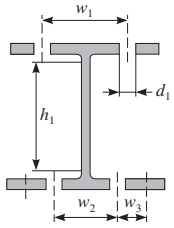
2.4 *Breedflensbalken HEA*



Profiel no.	Afmetingen						Krasmaten				*M*	*O*	*O/A*	*A*
	h	*b*	t_w	t_f	*r*	h_1	*d*	w_1	w_2	w_3	kg/m	m^2/m	l/m	mm^2
100	96	100	5	8	12	56	13	56			16,67	0,561	264	2124
120	114	120	5	8	12	74	17	66			19,89	0,677	267	2534
140	133	140	5,5	8,5	12	92	21	76			24,66	0,794	253	3142
160	152	160	6	9	15	104	23	86			30,44	0,906	234	3877
180	171	180	6	9,5	15	122	25	100			35,52	1,024	226	4525
200	190	200	6,5	10	18	134	25	110			42,26	1,136	211	5383
220	210	220	7	11	18	152	25	120			50,51	1,255	195	6434
240	230	240	7,5	12	21	164	25		94	35	60,32	1,369	178	7684
260	250	260	7,5	12,5	24	177	25		100	40	68,15	1,484	171	8682
280	270	280	8	13	24	196	25		110	45	76,35	1,603	165	9726
300	290	300	8,5	14	27	208	28		120	45	88,33	1,717	153	11253
320	310	300	9	15,5	27	225	28		120	45	97,63	1,756	141	12437
340	330	300	9,5	16,5	27	243	28		120	45	104,78	1,795	134	13347
360	350	300	10	17,5	27	261	28		120	45	112,06	1,834	128	14276
400	390	300	11	19	27	298	28		120	45	124,80	1,912	120	15898
450	440	300	11,5	21	27	344	28		120	45	139,75	2,011	113	17803
500	490	300	12	23	27	390	28		120	45	155,07	2,110	107	19754
550	540	300	12,5	24	27	438	28		120	45	166,23	2,209	104	21176
600	590	300	13	25	27	486	28		120	45	177,77	2,308	102	22646
650	640	300	13,5	26	27	534	28		120	45	189,69	2,407	100	24164
700	690	300	14,5	27	27	582	28		120	45	204,48	2,505	96	26048
800	790	300	15	28	30	674	28		130	40	224,37	2,698	94	28583
900	890	300	16	30	30	770	28		130	40	251,61	2,896	90	32053
1000	990	300	16,5	31	30	868	28		130	40	272,27	3,095	89	34685

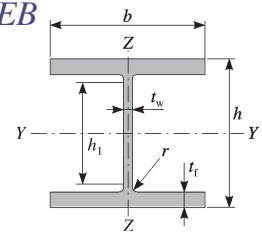
Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3

Breedflensbalken HEA (vervolg)



Profiel no.	Sterke as y-y					Zwakke as z-z				Torsie	Welving
	A_w mm^2	I_y mm^4 $\times 10^4$	$W_y;e_1$ mm^3 $\times 10^3$	$W_y;p_1$ mm^3 $\times 10^3$	i_y mm	I_z mm^4 $\times 10^4$	$W_z;e_1$ mm^3 $\times 10^3$	$W_z;p_1$ mm^3 $\times 10^3$	i_z	I_t mm^4 $\times 10^4$	I_{wa} mm^6 $\times 10^9$
100	988	349,23	72,76	83,01	40,55	133,81	26,76	41,14	25,10	5,24	2,581
120	1078	606,2	106,3	119,5	48,9	230,9	38,5	58,9	30,2	6,0	6,472
140	1263	1033,1	155,4	173,5	57,3	389,3	55,6	84,8	35,2	8,1	15,064
160	1645	1673,0	220,1	245,1	65,7	615,6	76,9	117,6	39,8	12,2	31,410
180	1789	2510,3	293,6	324,9	74,5	924,6	102,7	156,5	45,2	14,8	60,211
200	2233	3692,2	388,6	429,5	82,8	1335,5	133,6	203,8	49,8	21,0	108,000
220	2540	5409,7	515,2	568,5	91,7	1954,6	177,7	270,6	55,1	28,5	193,266
240	3112	7763,2	675,1	744,6	100,5	2768,8	230,7	351,7	60,0	41,6	328,486
260	3569	10455	836,4	919,8	109,7	3667,6	282,1	430,2	65,0	52,4	516,352
280	3902	13673	1012,8	1112,2	118,6	4762,6	340,2	518,1	70,0	62,1	785,367
300	4603	18263	1259,6	1383,3	127,4	6309,6	420,6	641,2	74,9	85,2	1199,77
320	5090	22929	1479,3	1628,1	135,8	6985,2	465,7	709,7	74,9	108,0	1512,36
340	5543	27693	1678,4	1850,5	144,0	7436,0	495,7	755,9	74,6	127,2	1824,36
360	6016	33090	1890,8	2088,5	152,2	7886,8	525,8	802,3	74,3	148,8	2176,58
400	6968	45069	2311,3	2561,8	168,4	8563,8	570,9	872,9	73,4	189,0	2942,08
450	7954	63722	2896,4	3215,9	189,2	9465,3	631,0	965,5	72,9	243,8	4147,63
500	8990	86975	3550,0	3948,9	209,8	10367	691,1	1058,5	72,4	309,3	5643,05
550	9968	111932	4145,6	4621,8	229,9	10819	721,3	1106,9	71,5	351,5	7188,91
600	10996	141208	4786,7	5350,4	249,7	11271	751,4	1155,7	70,5	397,8	8978,20
650	12074	175178	5474,3	6136,3	269,3	11724	781,6	1204,8	69,7	448,3	11027
700	13547	215301	6240,6	7031,8	287,5	12179	811,9	1256,7	68,4	513,9	13352
800	15983	303443	7682,1	8699,5	325,8	12639	842,6	1312,3	66,5	596,9	18290
900	18613	422075	9484,8	10811	362,9	13547	903,2	1414,5	65,0	736,8	24962
1000	20828	553846	11189	12824	399,6	14004	933,6	1469,7	63,5	822,4	32074

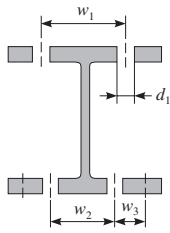
2.5 *Breedflensbalken HEB*



Profiel no.	Afmetingen						Krasmaten				*M*	*O*	*O/A*	*A*
	h	*b*	t_w	t_f	*r*	h_1	*d*	w_1	w_2	w_3	kg/m	m^2/m	l/m	mm^2
100	100	100	6	10	12	56	13	56			20,44	0,567	218	2604
120	120	120	6,5	11	12	74	17	66			26,69	0,686	202	3401
140	140	140	7	12	12	92	21	76			33,72	0,805	187	4296
160	160	160	8	13	15	104	23	86			42,59	0,918	169	5425
180	180	180	8,5	14	15	122	25	100			51,22	1,037	159	6525
200	200	200	9	15	18	134	25	110			61,29	1,151	147	7808
220	220	220	9,5	16	18	152	25	120			71,47	1,270	140	9104
240	240	240	10	17	21	164	25		96	35	83,20	1,384	131	10599
260	260	260	10	17,5	24	177	25		106	40	92,98	1,499	127	11844
280	280	280	10,5	18	24	196	25		110	45	103,12	1,618	123	13136
300	300	300	11	19	27	208	28		120	45	117,03	1,732	116	14908
320	320	300	11,5	20,5	27	225	28		120	45	126,65	1,771	110	16134
340	340	300	12	21,5	27	243	28		120	45	134,15	1,810	106	17090
360	360	300	12,5	22,5	27	261	28		120	45	141,80	1,849	102	18063
400	400	300	13,5	24	27	298	28		120	45	155,26	1,927	97	19778
450	450	300	14	26	27	344	28		120	45	171,11	2,026	93	21798
500	500	300	14,5	28	27	390	28		120	45	187,33	2,125	89	23864
550	550	300	15	29	27	438	28		120	45	199,44	2,224	88	25406
600	600	300	15,5	30	27	486	28		120	45	211,92	2,323	86	26996
650	650	300	16	31	27	534	28		120	45	224,78	2,422	85	28634
700	700	300	17	32	27	582	28		126	45	240,51	2,520	82	30638
800	800	300	17,5	33	30	674	28		130	40	262,33	2,713	81	33418
900	900	300	18,5	35	30	770	28		130	40	291,45	2,911	78	37128
1000	1000	300	19	36	30	868	28		130	40	314,04	3,110	78	40005

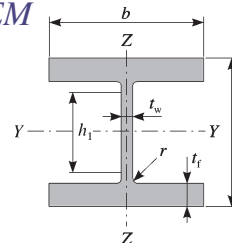
Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3

Breedflensbalken HEB (vervolg)



Profiel no.	Sterke as *y-y*					Zwakke as *z-z*				Torsie	Welving
	A_w mm^2	I_y mm^4 × 10^4	W_y;e_1 mm^3 × 10^3	W_y;p_1 mm^3 × 10^3	i_y mm	I_z mm^4 × 10^4	W_z;e_1 mm^3 × 10^3	W_z;p_1 mm^3 × 10^3	i_z	I_t mm^4 × 10^4	I_{wa} mm^6 × 10^9
100	1204	449,5	89,9	104,2	41,6	167,3	33,5	51,4	25,3	9,2	3,375
120	1432	864,4	144,1	165,2	50,4	317,5	52,9	81,0	30,6	13,8	9,410
140	1680	1509,2	215,6	245,4	59,3	549,7	78,5	119,8	35,8	20,1	22,479
160	2253	2492,0	311,5	354,0	67,8	889,2	111,2	170,0	40,5	31,2	47,943
180	2563	3831,1	425,7	481,4	76,6	1362,8	151,4	231,0	45,7	42,2	93,746
200	3158	5696,2	569,6	642,5	85,4	2003,4	200,3	305,8	50,7	59,3	171,125
220	3520	8091,0	735,5	827,0	94,3	2843,3	258,5	393,9	55,9	76,6	295,418
240	4207	11259	938,3	1053,1	103,1	3922,7	326,9	498,4	60,8	102,7	486,946
260	4774	14919	1147,6	1282,9	112,2	5134,5	395,0	602,2	65,8	123,8	753,651
280	5162	19270	1376,4	1534,4	121,1	6594,5	471,0	717,6	70,9	143,7	1130,15
300	5978	25166	1677,7	1868,7	129,9	8562,8	570,9	870,1	75,8	185,0	1687,79
320	6520	30824	1926,5	2149,2	138,2	9238,8	615,9	939,1	75,7	225,1	2068,71
340	7028	36656	2156,3	2408,1	146,5	9689,9	546,0	985,7	75,3	257,2	2453,63
360	7556	43193	2399,6	2683,0	154,6	10141	676,1	1032,5	74,9	292,5	2883,25
400	8618	57681	2884,0	3231,7	170,8	10819	721,3	1104,0	74,0	355,7	3817,15
450	9734	79888	3550,6	3982,4	191,4	11721	781,4	1197,7	73,3	440,5	5258,45
500	10900	107176	4287,0	4814,6	211,9	12624	841,6	1291,6	72,7	538,4	7017,70
550	12008	136691	4970,6	5590,6	232,0	13077	871,8	1341,1	71,7	600,3	8855,76
600	13166	171041	5701,4	6425,1	251,7	13530	902,0	1391,1	70,8	667,2	10965
650	14374	210616	6480,5	7319,9	271,2	13984	932,3	1441,4	69,9	739,2	13363
700	15982	256888	7339,7	8327,1	289,6	14441	962,7	1495,0	68,7	830,9	16064
800	18733	359084	8977,1	10229	327,8	14904	993,6	1553,1	66,8	946,0	21840
900	21623	494065	10979	12584	364,8	15816	1054,4	1658,3	65,3	1137,5	29461
1000	24093	644748	12895	14855	401,5	16276	1085,1	1716,3	63,8	1254,4	37636

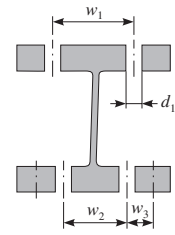
2.6 Breedflensbalken HEM



Profiel no.	Afmetingen						Krasmaten				*M*	*O*	*O/A*	*A*
	h	*b*	t_w	t_f	*r*	h_1	*d*	w_1	w_2	w_3	kg/m	m^2/m	l/m	mm^2
100	120	106	12	20	12	56	13	60			41,79	0,619	116	5324
120	140	126	12,5	21	12	74	17	68			52,13	0,738	111	6641
140	160	146	13	22	12	92	21	76			63,24	0,857	106	8056
160	180	166	14	23	15	104	23	86			76,19	0,970	100	9705
180	200	186	14,5	24	15	122	25	100			88,90	1,089	96	11325
200	220	206	15	25	18	134	25	110			103,06	1,203	92	13128
220	240	226	15,5	26	18	152	25	120			117,31	1,322	88	14944
240	270	248	18	32	21	164	25		100	35	156,67	1,460	73	19959
260	290	268	18	32,5	24	177	25		110	40	172,42	1,575	72	21964
280	310	288	18,5	33	24	196	25		116	45	188,53	1,694	71	24016
300	340	310	21	39	27	208	25		120	50	237,92	1,832	60	30308
320	359	309	21	40	27	225	28		126	47	244,96	1,866	60	31205
340	377	309	21	40	27	243	28		126	47	247,92	1,902	60	31583
360	395	308	21	40	27	261	28		126	47	250,26	1,934	61	31881
400	432	307	21	40	27	298	28		126	47	255,74	2,004	62	32578
450	478	307	21	40	27	344	28		126	47	263,32	2,096	62	33544
500	524	306	21	40	27	390	28		130	45	270,27	2,184	63	34430
550	572	306	21	40	27	438	28		130	45	278,19	2,280	64	35438
600	620	305	21	40	27	486	28		130	45	285,47	2,372	65	36366
650	668	305	21	40	27	534	28		130	45	293,38	2,468	66	37374
700	716	304	21	40	27	582	28		130	42	300,67	2,560	67	38302
800	814	303	21	40	30	674	28		132	42	317,35	2,746	68	40427
900	910	302	21	40	30	770	28		132	42	332,55	2,934	69	42363
1000	1008	302	21	40	30	868	28		132	42	348,70	3,130	70	44421

Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

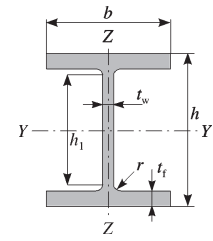
Breedflensbalken HEM (vervolg)



Profiel no.	Sterke as *y-y*					Zwakke as *z-z*				Torsie	Welving
	A_w mm^2	I_y mm^4 × 10^4	W_y;e_1 mm^3 × 10^3	W_y;p_1 mm^3 × 10^3	i_y mm	I_z mm^4 × 10^4	W_z;e_1 mm^3 × 10^3	W_z;p_1 mm^3 × 10^3	i_z	I_t mm^4 × 10^4	I_{wa} mm^6 × 10^9
100	2524	1142,6	190,4	235,4	46,3	399,2	75,3	116,3	27,4	68,2	9,925
120	2882	2017,6	288,2	350,6	55,1	702,8	111,6	171,6	32,5	91,7	24,786
140	3260	3291,4	411,4	493,8	63,9	1144,3	156,8	240,5	37,7	120,0	54,329
160	4093	5098,3	566,5	674,6	72,5	1758,8	211,9	325,5	42,6	162,4	108,054
180	4533	7483,1	748,3	883,4	81,3	2580,1	277,4	425,2	47,7	203,3	199,326
200	5378	10642	967,4	1135,1	90,0	3651,2	354,5	543,2	52,7	259,4	346,258
220	5870	14605	1217,1	1419,4	98,9	5012,0	443,5	678,6	57,9	315,3	572,684
240	7927	24290	1799,2	2116,9	110,3	8152,6	657,5	1005,9	63,9	627,9	1151,99
260	8834	31307	2159,1	2523,6	119,4	10449	779,7	1192,5	69,0	719,0	1728,35
280	9397	39547	2551,4	2965,6	128,3	13163	914,1	1396,7	74,0	807,3	2520,23
300	11978	59201	3482,4	4077,7	139,8	19403	1251,8	1913,2	80,0	1407,6	4386,03
320	12485	68135	3795,8	4435,0	147,8	19709	1275,7	1950,7	79,5	1500,6	5003,86
340	12863	76372	4051,5	4717,6	155,5	19711	1275,8	1952,7	79,0	1506,1	5584,50
360	13241	84867	4297,1	4989,3	163,2	19522	1267,6	1942,4	78,3	1507,4	6137,02
400	14018	104119	4820,3	5570,6	178,8	19335	1259,6	1934,1	77,0	1514,6	7410,30
450	14984	131484	5501,4	6331,0	198,0	19339	1259,9	1939,2	75,9	1528,8	9251,50
500	15950	161929	6180,5	7094,3	216,9	19155	1251,9	1932,0	74,6	1538,7	11187
550	16958	197984	6922,5	7932,7	236,4	19158	1252,2	1937,3	73,5	1553,5	13516
600	17966	237448	7659,6	8772,1	255,5	18975	1244,3	1930,4	72,2	1564,1	15908
650	18974	281668	8433,2	9657,0	274,5	18979	1244,5	1935,7	71,3	1578,9	18650
700	19982	329278	9197,7	10539	293,2	18797	1236,7	1928,8	70,1	1589,5	21397
800	22667	442598	10875	12488	330,9	18627	1229,5	1930,4	67,9	1645,6	27775
900	24683	570434	12537	14442	367,0	18452	1222,0	1928,9	66,0	1671,0	34746
1000	26741	722299	14331	16568	403,2	18459	1222,5	1939,7	64,5	1701,3	43015

2.7 *Breedflensbalken HD*

(leverbaar als walswerk)

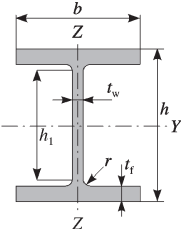


Profiel no.	h	b	t_w	t_f	r	h_1	Krasmaten d	w_1	w_2	w_3	M kg/m	O_2 m²/m	O/A 1/m	A mm²
hd260 × 54,1	244	260	6,5	9,5	24	177	28	106	170	42	54,14	1,474	214	6897
× 68,2	250	260	7,5	12,5	24	177	28	107	170	42	68,15	1,484	171	8682
× 93	260	260	10,0	17,5	24	177	28	109	170	42	92,98	1,499	127	11844
× 114	268	262	12,5	21,5	24	177	28	112	172	42	114,40	1,518	104	14573
× 142	278	265	15,5	26,5	24	177	28	115	175	42	141,51	1,544	86	18027
× 172	290	268	18,0	32,5	24	177	28	117	178	42	172,42	1,575	72	21964
× 225	309	271	24,0	42,0	24	177	28	123	181	42	224,97	1,613	56	28658
× 299	335	278	31,0	55,0	24	177	28	130	188	42	298,69	1,679	44	38049
hd320 × 74,2	301	300	8,0	11,0	27	225	28	110	210	42	74,24	1,740	184	9458
× 97,6	310	300	9,0	15,5	27	225	28	111	210	42	97,63	1,756	141	12437
× 127	320	300	11,5	20,5	27	225	28	114	210	42	126,65	1,771	110	16134
× 158	330	303	14,5	25,5	27	225	28	117	213	42	157,98	1,797	89	20124
× 198	343	306	18,0	32,0	27	225	28	120	216	42	198,07	1,828	72	25232
× 245	359	309	21,0	40,0	27	225	28	123	219	42	244,96	1,866	60	31205
× 300	375	313	27,0	48,0	27	225	28	129	223	42	299,92	1,902	50	38207
× 368	395	319	33,0	58,0	27	225	28	135	229	42	367,67	1,954	42	46837
× 451	419	326	40,0	70,0	27	225	28	142	236	42	450,79	2,016	35	57426
hd360 × 134	356	369	11,2	18,0	15	290	28	101	279	42	133,93	2,140	125	17061
× 147	360	370	12,3	19,8	15	290	28	102	280	42	147,47	2,150	114	18786
× 162	364	371	13,3	21,8	15	290	28	103	281	42	161,95	2,160	105	20630
× 179	368	373	15,0	23,9	15	290	28	105	283	42	179,18	2,172	95	22826
× 196	372	374	16,4	26,2	15	290	28	106	284	42	196,50	2,181	87	25032
hd400 × 187	368	391	15,0	24,0	15	290	28	105	301	42	186,52	2,244	94	23761
× 216	375	394	17,3	27,7	15	290	28	107	304	42	216,27	2,266	82	27550
× 237	380	395	18,9	30,2	15	290	28	109	305	42	236,22	2,276	76	30092
× 262	387	398	21,1	33,3	15	290	28	111	308	42	262,66	2,298	69	33460
× 287	393	399	22,6	36,6	15	290	28	113	309	42	287,53	2,311	63	36627
× 314	399	401	24,9	39,6	15	290	28	115	311	42	313,34	2,326	58	39915
× 347	407	404	27,2	43,7	15	290	28	117	314	42	346,94	2,350	53	44196
× 382	416	406	29,8	48,0	15	290	28	120	316	42	382,34	2,371	49	48705
× 421	425	409	32,8	52,6	15	290	28	123	319	42	421,62	2,395	45	53709
× 463	435	412	35,8	57,4	15	290	28	126	322	42	462,79	2,421	41	58954
× 509	446	416	39,1	62,7	15	291	28	129	326	42	509,43	2,452	38	64895
× 551	455	418	42,0	67,6	15	290	28	132	328	42	550,59	2,472	35	70138
× 592	465	421	45,0	72,3	15	290	28	135	331	42	592,58	2,498	33	75488
× 634	474	424	47,6	77,1	15	290	28	138	334	42	634,25	2,523	31	80796
× 677	483	428	51,2	81,5	15	290	28	141	338	42	677,78	2,550	30	86341
× 744	498	432	55,6	88,9	15	290	28	146	342	42	744,23	2,587	27	94806
× 818	514	437	60,5	97,0	15	290	28	151	347	42	819,00	2,629	25	104331
× 900	531	442	65,9	106	15	289	28	156	352	42	902,12	2,672	23	114919
× 990	550	448	71,9	115	15	290	28	162	358	42	990,99	2,722	22	126241
× 1086	569	454	78,0	125	15	289	28	168	364	42	1087,8	2,772	20	138575

Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

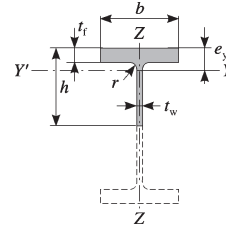
Breedflensbalken HD (vervolg)

(leverbaar als walswerk)



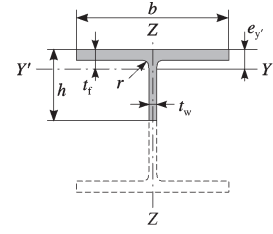
Profiel no.	Sterke as *y-y*					Zwakke as *z-z*				Torsie Welving	
	A_w mm^2	I_y mm^4 × 10^4	W_y;e_1 mm^3 × 10^3	W_y;p_1 mm^3 × 10^3	i_y mm	I_z mm^4 × 10^4	W_z;e_1 mm^3 × 10^3	W_z;p_1 mm^3 × 10^3	i_z	I_t mm^4 × 10^4	I_{wa} mm^6 × 10^9
hd260 × 54,1	2992	7980,6	654,1	714,5	107,6	2788,0	214,5	327,7	63,6	30,3	382,576
× 68,2	3569	10455	836,4	919,8	109,7	3667,6	282,1	430,2	65,0	52,4	516,352
× 93	4774	14919	1147,6	1282,9	112,2	5134,5	395,0	602,2	65,8	123,8	753,651
× 114	5908	18912	1411,4	1599,7	113,9	6455,9	492,8	752,5	66,6	222,4	978,960
× 142	7347	24331	1750,5	2015,3	116,2	8235,7	621,6	950,5	67,6	406,8	1299,72
× 172	8834	31307	2159,1	2523,6	119,4	10449	779,7	1192,5	69,0	719,0	1728,35
× 225	11942	43752	2831,8	3395,7	123,6	13974	1031,3	1583,2	69,8	1545,3	2482,95
× 299	16159	64219	3834,0	4726,5	129,9	19773	1422,5	2189,7	72,1	3437,5	3860,13
hd320 × 74,2	4222	16447	1092,8	1196,2	131,9	4959,1	330,6	505,7	72,4	55,9	1040,74
× 97,6	5090	22929	1479,3	1628,1	135,8	6985,2	465,7	709,7	74,9	108,0	1512,36
× 127	6520	30824	1926,5	2149,2	138,2	9238,8	615,9	939,1	75,7	225,1	2068,71
× 158	8165	39644	2402,7	2718,4	140,4	11842	781,7	1193,5	76,7	420,5	2740,51
× 198	10256	51896	3026,0	3479,1	143,4	15311	1000,7	1530,2	77,9	805,3	3695,08
× 245	12485	68135	3795,8	4435,0	147,8	19709	1275,7	1950,7	79,5	1500,6	5003,86
× 300	15935	86905	4634,9	5521,8	150,8	24603	1572,1	2414,3	80,2	2649,6	6557,81
× 368	19925	113189	5731,1	6960,9	155,5	31497	1974,7	3041,1	82,0	4694,1	8909,40
× 451	24946	149194	7121,4	8826,1	161,2	40613	2491,6	3847,5	84,1	8288,9	12308
hd360 × 134	5260	41509	2332,0	2562,0	156,0	15078	817,3	1237,2	94,0	168,8	4305,01
× 147	5809	46289	2571,6	2838,3	157,0	16722	903,9	1369,3	94,3	223,7	4836,46
× 162	6342	51539	2831,8	3139,3	158,1	18562	1000,6	1516,4	94,9	295,5	5431,59
× 179	7147	57440	3121,8	3482,3	158,6	20683	1109,0	1682,7	95,2	393,8	6119,03
× 196	7866	63632	3421,1	3837,4	159,4	22858	1222,4	1856,1	95,6	517,1	6828,96
hd400 × 187	7153	60183	3270,8	3642,4	159,1	23922	1223,6	1854,7	100,3	414,6	7073,71
× 216	8343	71138	3794,1	4262,4	160,7	28254	1434,2	2176,2	101,3	637,3	8514,65
× 237	9187	78777	4146,2	4685,6	161,8	31042	1571,7	2387,0	101,6	825,5	9489,13
× 262	10357	89406	4620,5	5259,5	163,5	35019	1759,7	2675,8	102,3	1115,6	10943
× 287	11271	99706	5074,1	5812,7	165,0	38783	1944,0	2957,0	102,9	1463,8	12304
× 314	12504	110232	5525,4	6374,0	166,2	42604	2124,9	3236,5	103,3	1870,1	13743
× 347	13886	124945	6139,8	7138,8	168,1	48085	2380,4	3628,7	104,3	2510,2	15847
× 382	15470	141317	6794,1	7964,7	170,3	53616	2641,2	4030,6	104,9	3326,3	18126
× 421	17289	159581	7509,7	8880,5	172,4	60081	2938,0	4489,3	105,8	4398,2	20795
× 463	19210	180162	8283,3	9877,7	174,8	67035	3254,1	4978,4	106,6	5734,5	23848
× 509	21394	204528	9171,6	11033	177,5	75401	3625,0	5552,3	107,8	7513,1	27632
× 551	23359	226110	9938,9	12051	179,5	82495	3947,1	6051,4	108,5	9410,1	30873
× 592	25456	250161	10760	13138	182,0	90172	4283,7	6574,5	109,3	11564	34665
× 634	27382	274171	11568	14222	184,2	98251	4634,5	7116,8	110,3	14023	38575
× 677	29813	299470	12400	15346	186,2	106871	4994,0	7680,1	111,3	16789	42919
× 744	33216	342121	13740	17167	190,0	119932	5552,4	8548,9	112,5	21843	49981
× 818	37110	392191	15260	19255	193,9	135529	6202,7	9561,3	114,0	28511	58651
× 900	41546	450204	16957	21619	197,9	153340	6938,4	10708	115,5	37352	68887
× 990	46638	518907	18869	24282	202,7	173359	7739,2	11962	117,2	48208	81527
× 1086	52075	595723	20939	27211	207,3	196248	8645,3	13376	119,0	62288	96080

2.8 Gehalveerde IPE-balken



Uit profiel no.	Afmetingen						*M*	*O*	*A*	*Y′-Y′* as			*Z-Z* as		
	h	*b*	t_w	t_f	*r*	$e_{y'}$	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]	$I_{y'}$	$W_{y'}$	$i_{y'}$	I_z	W_z	i_z
										× 10⁴	× 10³		× 10⁴	× 10³	
80	40	46	3,8	5,2	5	9,6	3	0,168	382	4,81	1,58	11,2	4,25	1,85	10,5
100	50	55	4,1	5,7	7	11,8	4,05	0,204	516	10,3	2,7	14,1	7,96	2,9	12,4
120	60	64	4,4	6,3	7	14	5,19	0,242	661	19,3	4,2	17,1	13,8	4,32	14,5
140	70	73	4,7	6,9	7	16,2	6,45	0,275	821	33	6,14	20,1	22,5	6,15	16,5
160	80	82	5	7,4	9	18,4	7,89	0,317	1000	52,9	8,57	22,9	34,2	8,33	18,4
180	90	91	5,3	8	9	20,5	9,4	0,351	1200	80,3	11,5	25,9	50,4	11,1	20,5
200	100	100	5,6	8,5	12	22,5	11,2	0,39	1420	117	15,1	28,7	71,2	14,2	22,4
220	110	110	5,9	9,2	12	24,5	13,1	0,43	1670	165	19,3	31,5	102	18,6	24,8
240	120	120	6,2	9,8	15	26,3	15,4	0,468	1960	227	24,3	34,1	142	23,6	26,9
270	135	135	6,6	10,2	15	29,7	18	0,527	2300	346	32,8	38,8	210	31,1	30,2
300	150	150	7,1	10,7	15	33,2	21,1	0,587	2690	509	43,6	43,5	302	40,3	33,5
330	165	160	7,5	11,5	18	36,5	24,6	0,635	3130	717	55,8	47,9	394	49,3	35,5
360	180	170	8	12,7	18	39,9	28,5	0,685	3640	992	70,8	52,2	522	61,4	37,9
400	200	180	8,6	13,5	21	45,2	33,2	0,74	4220	1450	93,7	58,6	659	73,2	39,5
450	225	190	9,4	14,6	21	52,8	38,8	0,812	4940	2218	129	67	838	88,2	41,2
500	250	200	10,2	16	21	60,1	45,3	0,882	5780	3263	172	75,2	1071	107	43,1
550	275	210	11,1	17,2	24	67,7	52,8	0,95	6720	4665	225	83,3	1334	127	44,6
600	300	220	12	19	24	74,8	61,2	1,02	7800	6496	288	91,3	1694	154	46,6

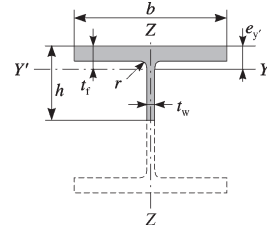
2.9 Gehalveerde breedflensbalken HEA



Uit profiel no.	Afmetingen						M	O	A	Y'-Y' as			Z-Z as		
	h	b	t_w	t_f	r	$e_{y'}$	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]	$I_{y'}$	$W_{y'}$	$i_{y'}$	I_z	W_z	i_z
										× 10^4	× 10^3		× 10^4	× 10^3	
100	48	100	5	8	12	8,9	8,34	0,286	1060	12,4	3,16	10,8	66,9	13,4	25,1
120	57	120	5	8	12	9,8	9,94	0,344	1270	21,3	4,52	13	115	19,2	30,2
140	66,5	140	5,5	8,5	12	11,3	12,3	0,403	1570	37,5	6,79	15,5	195	27,8	35,2
160	76	160	6	9	15	12,8	15,2	0,459	1940	61,5	9,72	17,8	308	38,5	39,9
180	85,5	180	6	9,5	15	13,7	17,8	0,516	2260	89,1	12,4	19,9	462	51,4	45,2
200	95	200	6,5	10	18	15,2	21,1	0,577	2690	133	16,6	22,2	668	66,8	49,8
220	105	220	7	11	18	16,7	25,3	0,637	3220	194	21,9	24,5	977	88,8	55,1
240	115	240	7,5	12	21	18,1	30,2	0,693	3840	273	28,2	26,7	1384	115	60
260	125	260	7,5	12,5	24	19,1	34,1	0,748	4340	355	33,6	28,6	1834	141	65
280	135	280	8	13	24	20,7	38,2	0,808	4860	477	41,8	31,3	2381	170	70
300	145	300	8,5	14	27	22,1	44,2	0,869	5630	630	51,2	33,5	3155	210	74,9
320	155	300	9	15,5	27	24,1	48,8	0,889	6220	808	61,7	36	3493	233	74,9
340	165	300	9,5	16,5	27	26,4	52,4	0,905	6670	1019	73,5	39,1	3718	248	74,6
360	175	300	10	17,5	27	28,7	56	0,925	7146	1268	86,7	42,2	3943	263	74,3
400	195	300	11	19	27	33,9	62,4	0,966	7950	1894	118	48,8	4282	285	73,4
450	220	300	11,5	21	27	39,4	69,9	1,017	8900	2815	156	56,2	4733	316	72,9
500	245	300	12	23	27	45,1	77,5	1,067	9880	4018	201	63,8	5184	346	72,4
550	270	300	12,5	24	27	51,7	83,1	1,118	10590	5528	253	72,3	5410	361	71,5
600	295	300	13	25	27	58,7	88,9	1,168	11320	7399	313	80,8	5636	376	70,6
650	320	300	13,5	26	27	66,1	94,8	1,219	12080	9675	381	89,5	5862	391	69,7
700	345	300	14,5	27	27	75	102	1,265	13020	12736	472	98,9	6089	406	68,4
800	395	300	15	28	30	90,6	112	1,365	14290	19331	635	116	6319	421	66,5
900	445	300	16	30	30	107,7	126	1,466	16030	28714	851	134	6774	452	65
1000	495	300	16,5	31	30	125,3	136	1,567	17340	39837	1077	152	7002	467	63,5

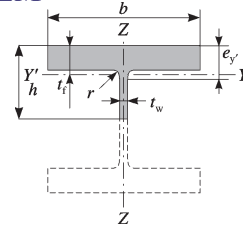
Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

2.10 Gehalveerde breedflensbalken HEB



Uit profiel no.	Afmetingen						M [kg/m']	O [m²/m']	A [mm²]	Y'-Y' as			Z-Z as		
	h	b	t_w	t_f	r	$e_{y'}$				$I_{y'}$	$W_{y'}$	$i_{y'}$	I_z	W_z	i_z
										× 10⁴	× 10³		× 10⁴	× 10³	
100	50	100	6	10	12	10	10,2	0,290	1300	16,2	4,05	11,2	83,6	16,7	25,4
120	60	120	6,5	11	12	11,4	13,3	0,350	1700	30,9	6,35	13,5	159	26,5	30,6
140	70	140	7	12	12	12,9	16,9	0,410	2150	53,5	9,37	15,8	275	39,3	35,8
160	80	160	8	13	15	14,8	21,3	0,467	2710	91,3	14	18,3	445	55,6	40,5
180	90	180	8,5	14	15	16,2	25,6	0,529	3260	139	18,9	20,7	681	75,7	45,7
200	100	200	9	15	18	17,7	30,6	0,584	3900	204	24,8	22,9	1002	100	50,7
220	110	220	9,5	16	18	19,2	35,7	0,645	4550	289	31,8	25,2	1422	129	55,9
240	120	240	10	17	21	20,6	41,6	0,700	5300	397	40	27,4	1961	163	60,8
260	130	260	10	17,5	24	21,7	46,5	0,760	5920	512	47,3	29,4	2567	197	65,8
280	140	280	10,5	18	24	23,2	51,6	0,821	6570	674	57,7	32	3297	236	70,9
300	150	300	11	19	27	24,7	58,5	0,876	7450	871	69,5	34,2	4281	285	75,8
320	160	300	11,5	20,5	27	26,8	63,3	0,897	8070	1097	82,3	36,9	4619	308	75,7
340	170	300	12	21,5	27	29,1	67,1	0,917	8540	1362	96,7	39,9	4845	323	75,3
360	180	300	12,5	22,5	27	31,5	70,9	0,938	9030	1671	113	43	5071	338	74,9
400	200	300	13,5	24	27	36,6	77,6	0,979	9890	2437	149	49,6	5410	361	74
450	225	300	14	26	27	42,3	85,6	1,029	10900	3566	195	57,2	5861	391	73,3
500	250	300	14,5	28	27	48,3	93,7	1,075	11930	5020	249	64,9	6312	421	72,7
550	275	300	15	29	27	55	99,7	1,125	12700	6834	311	73,4	6538	436	71,7
600	300	300	15,5	30	27	62	106	1,176	13500	9060	381	81,9	6765	451	70,8
650	325	300	16	31	27	69,4	112	1,226	14320	11746	459	90,6	6992	466	69,9
700	350	300	17	32	27	78,2	120	1,277	15320	15281	562	99,9	7220	481	68,7
800	400	300	17,5	33	30	93,9	131	1,373	16710	22998	751	117	7452	497	66,8
900	450	300	18,5	35	30	111,1	146	1,474	18560	33768	996	135	7908	527	65,3
1000	500	300	19	36	30	128,7	157	1,574	20000	46562	1254	153	8138	543	63,8

2.11 Gehalveerde breedflensbalken HEM



Uit profiel no.	Afmetingen						M	O	A	Y'-Y' as			Z-Z as		
	h	b	t_w	t_f	r	$e_{y'}$	[kg/m']	[m²/m']	[mm²]	$I_{y'}$	$W_{y'}$	$i_{y'}$	I_z	W_z	i_z
										× 10⁴	× 10³		× 10⁴	× 10³	
100	60	106	12	20	12	15,7	20,9	0,322	2660	49	11,1	13,6	200	37,7	27,4
120	70	126	12,5	21	12	17,2	26,1	0,382	3320	83,2	15,8	15,8	351	55,8	32,5
140	80	146	13	22	12	18,7	31,6	0,442	4030	132	21,5	18,1	572	78,4	37,7
160	90	166	14	23	15	20,5	38,1	0,499	4850	205	29,5	20,5	879	106	42,6
180	100	186	14,5	24	15	22	44,5	0,560	5660	296	37,9	22,9	1290	139	47,7
200	110	206	15	25	18	23,5	51,5	0,615	6560	413	47,8	25,1	1826	177	52,7
220	120	226	15,5	26	18	25	58,7	0,676	7470	561	59,1	27,4	2506	222	57,9
240	135	248	18	32	21	28,9	78,3	0,748	9980	918	86,5	30,3	4076	329	63,9
260	145	268	18	32,5	24	30,1	86,2	0,803	10980	1156	101	32,4	5224	390	69
280	155	288	18,5	33	24	31,5	94,3	0.864	12010	1463	119	34,9	6581	457	74
300	170	310	21	39	27	35,5	119	0,936	15150	2170	161	37,8	9702	626	80
320	179,5	309	21	40	27	37,4	122	0,956	15600	2551	179	40,4	9855	638	79,5
340	188,5	309	21	40	27	39,1	124	0,971	15790	2952	198	43,2	9855	638	79
360	197,5	308	21	40	27	41	125	0,986	15940	3392	217	46,1	9761	634	78,3
400	216	307	21	40	27	45	128	1,021	16290	4432	259	52,2	9668	630	77
450	239	307	21	40	27	50,3	132	1,071	16770	5997	318	59,8	9670	630	75,9
500	262	306	21	40	27	56	135	1,111	17210	7876	382	67,6	9577	626	74,6
550	286	306	21	40	27	62,2	139	1,161	17720	10206	456	75,9	9579	626	73,5
600	310	305	21	40	27	68,8	143	1,206	18180	12924	536	84,3	9488	622	72,2
650	334	305	21	40	27	75,6	147	1,256	18690	16071	622	92,7	9490	622	71,3
700	358	304	21	40	27	82,8	150	1,301	19150	19645	714	101	9399	618	70,1
800	407	303	21	40	30	98,1	159	1,396	20210	28427	920	119	9314	615	67,9
900	455	302	21	40	30	114,1	166	1,486	21180	39051	1145	136	9226	611	66
1000	504	302	21	40	30	131	174	1,586	22210	52175	1399	153	9230	611	64,5

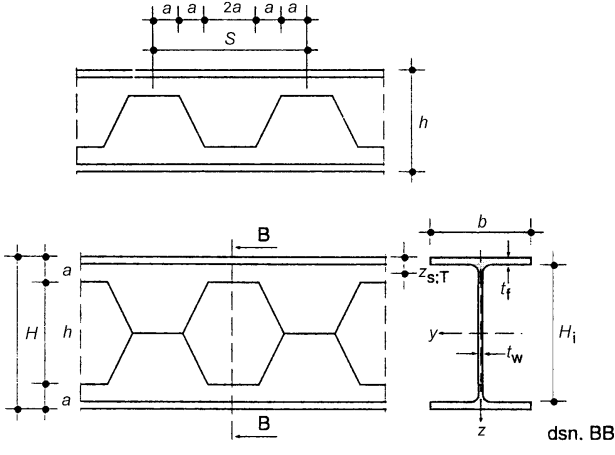
Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

2.12 Raatliggers

Met computergestuurde apparatuur is het mogelijk om uit standaardprofielen nieuwe profielvormen te realiseren in elke gewenste vorm en afmeting.

Toepassingen hiervan zijn:
- raatliggers, al dan niet met tussenplaat;
- geïntegreerde liggers: SFB, IFB en THQ (zie par. 2.13).

De in de navolgende tabel betreffende raatliggers aangehouden maten zijn NIET genormaliseerd en mogelijk zijn de afmetingen per leverancier verschillend. De ontwerpvrijheid is dus groter dan de tabel suggereert.



Raatbalken (kanteelbalken) samengesteld uit **IPE**

Uit profiel	$H = S^{1)}$ mm	b mm	t_w mm	t_f mm	r mm	h_1 mm	M kg/m	O m²/m	O/A l/m	A mm²	Sterke as y-y			Zwakke as z-z			T-stuk	Boven	Onder
											I_y × 10⁴	W_y;e_1 × 10³	i_y	I_z × 10⁴	W_z;e_1 × 10³	i_z	z mm	I_y × 10⁴	W_y;e_1 × 10³	W_y;e_1 × 10³
IPE180	270	91	5,3	8,0	9	236	18,80	0,698	291	2872	3331,8	246,8	107,7	101,0	22,2	18,8				
										1918	3074,2	227,7	113,3	100,7	22,1	20,5	8,8	10,5	11,9	2,9
IPE200	300	100	5,6	8,5	12	259	22,36	0,768	270	3408	4908,3	327,2	120,0	142,5	28,5	20,4				
										2288	4535,0	302,3	126,2	142,2	28,4	22,3	9,7	15,3	15,7	3,8
IPE220	330	110	5,9	9,2	12	288	26,20	0,848	254	3986	6986,2	423,4	132,4	205,1	37,3	22,7				
										2688	6462,7	391,7	139,2	204,7	37,2	24,8	10,5	21,6	20,6	4,8
IPE240	360	120	6,2	9,8	15	310	30,71	0,922	236	4656	9788,8	543,8	145,0	283,9	47,3	24,7				
										3168	9074,6	504,1	152,3	283,4	47,2	26,9	11,3	29,7	26,3	6,1
IPE270	405	135	6,6	10,2	15	355	36,07	1,041	227	5486	14552	718,6	162,9	420,2	62,3	27,7				
										3704	13470	665,2	171,2	419,5	62,2	30,2	12,4	45,4	36,5	8,2
IPE300	450	150	7,1	10,7	15	399	42,24	1,160	216	6446	21008	933,7	180,5	604,2	80,6	30,6				
										4316	19411	862,7	189,9	603,3	80,4	33,5	13,7	67,2	49,2	11,0
IPE330	495	160	7,5	11,5	18	436	49,15	1,254	200	7498	29580	1195,2	198,6	788,7	98,6	32,4				
										5023	27334	1104,4	209,0	787,6	98,4	35,5	15,0	94,7	63,0	14,0
IPE360	540	170	8,0	12,7	18	479	57,09	1,353	186	8713	40890	1514,4	216,6	1044,2	122,8	34,6				
										5833	37780	1399,2	227,9	1042,7	122,7	37,9	16,4	131,0	80,0	17,8
IPE400	600	180	8,6	13,5	21	531	66,30	1,467	174	10166	58291	1943,0	239,5	1318,9	146,5	36,0				
										6726	53704	1790,1	252,2	1316,8	146,3	39,5	18,5	192,5	104,3	23,6
IPE450	675	190	9,4	14,6	21	604	77,57	1,605	162	11997	85433	2531,3	266,9	1677,4	176,6	37,4				
										7767	78294	2319,8	281,5	1674,3	176,2	41,2	21,2	297,1	140,1	32,6
IPE500	750	200	10,2	16,0	21	676	90,68	1,744	151	14102	122430	3264,8	294,6	2143,9	214,4	39,0				
										9002	111805	2981,5	311,1	2139,5	213,9	43,0	24,0	439,4	183,3	43,5
IPE550	825	210	11,1	17,2	24	743	105,52	1,877	140	16494	171096	4147,8	322,1	2670,7	254,4	40,2				
										10389	155706	3774,7	340,4	2664,4	253,8	44,5	26,9	631,2	234,3	57,1
IPE600	900	220	12,0	19,0	24	814	122,45	2,015	129	19198	235252	5227,8	350,1	3391,7	308,3	42,0				
										11998	213652	4747,8	370,1	3383,0	307,5	46,6	29,8	880,7	295,9	73,3

[1)] $H = S = 1{,}5 \times$ hoogte I-profiel

Raatbalken (kanteelbalken) samengesteld uit **HEA**

Uit profiel	$H = S$[1] mm	b mm	t_w mm	t_f mm	r mm	h_1 mm	M kg/m	O m²/m	O/A 1/m	A mm²	Sterke as y-y			Zwakke as z-z			T-stuk		Boven	Onder
											I_y × 10⁴	W_y:e_1 × 10³	i_y	I_z × 10⁴	W_z:e_1 × 10³	i_z	z mm	I_y × 10⁴	W_y:e_1 × 10³	W_y:e_1 × 10³
HE180A	257	180	6,0	9,5	15	208	35,52	1,024	226	5038	6146,0	479,2	110,4	924,8	102,8	42,8				
										4012	5896,0	459,7	114,1	924,5	102,7	45,2	7,3	11,6	16,0	3,3
HE200A	285	200	6,5	10,0	18	229	42,26	1,136	211	6001	9033,3	633,9	122,7	1335,7	133,6	47,2				
										4766	8661,7	607,8	126,8	1335,3	133,5	49,8	8,0	17,3	21,8	4,4
HE220A	315	220	7,0	11,0	18	257	50,51	1,255	195	7169	13219	839,3	135,8	1954,9	177,7	52,2				
										5699	12679	805,0	140,4	1954,3	177,7	55,1	8,6	25,1	29,0	5,7
HE240A	345	240	7,5	12,0	21	279	60,32	1,369	178	8546	18962	1099,2	149,0	2769,2	230,8	56,9				
										6821	18201	1055,2	153,9	2768,4	230,7	60,0	9,5	35,6	37,6	7,4
HE260A	375	260	7,5	12,5	24	302	68,15	1,484	171	9619	25466	1358,2	162,7	3668,0	282,2	61,8				
										7744	24489	1306,1	167,9	3667,1	282,1	65,0	10,0	46,5	46,4	8,9
HE280A	405	280	8,0	13,0	24	331	76,35	1,603	165	10806	33284	1643,7	175,5	4763,2	340,2	66,4				
										8646	31972	1578,9	181,3	4762,1	340,1	70,0	10,6	61,9	58,5	10,9
HE300A	435	300	8,5	14,0	27	353	88,33	1,717	153	12485	44452	2043,8	188,7	6310,3	420,7	71,1				
										10020	42724	1964,3	194,9	6308,8	420,6	74,9	11,4	81,9	71,8	13,4
HE320A	465	300	9,0	15,5	27	380	97,63	1,756	141	13832	55913	2404,9	201,1	6986,2	465,7	71,1				
										11042	53679	2308,8	207,8	6984,3	465,6	74,9	12,4	104,7	84,1	16,1
HE340A	495	300	9,5	16,5	27	408	104,78	1,795	134	14915	67666	2734,0	213,0	7437,2	495,8	70,6				
										11780	64821	2619,0	220,4	7434,8	495,7	74,6	13,4	131,4	98,1	19,0
HE360A	525	300	10,0	17,5	27	436	112,06	1,834	128	16026	81015	3086,3	224,8	7888,3	525,9	70,2				
										12526	77442	2950,2	232,9	7885,4	525,7	74,3	14,4	163,0	113,3	22,3
HE400A	585	300	11,0	19,0	27	493	124,80	1,912	120	18043	110817	3788,6	247,8	8566,0	571,1	68,9				
										13753	105379	3602,7	257,5	8561,7	570,8	73,4	16,3	242,2	148,3	29,8

[1] $H = S$ = 1,5 × hoogte I-profiel

Raatbalken (kanteelbalken) samengesteld uit **HEB**

Uit profiel	$H = S^{1)}$ mm	b mm	t_w mm	t_f mm	r mm	h_1 mm	M kg/m	O m²/m	O/A 1/m	A mm²	Sterke as y-y I_y × 10⁴	W_y;e_1 × 10³	i_y	Zwakke as z-z I_z × 10⁴	W_z;e_1 × 10³	i_z	T-stuk z mm	I_y × 10⁴	Boven W_y;e_1 × 10³	Onder W_y;e_1 × 10³
HE180B	270	180	8,5	14,0	15	212	51,22	1,037	159	7290	9537,1	706,5	114,4	1363,3	151,5	43,2				
										5760	9124,0	675,9	118,2	1362,4	151,4	45,7	9,4	18,9	20,1	5,3
HE200B	300	200	9,0	15,0	18	234	61,29	1,151	147	8708	14149	943,2	127,5	2004,0	200,4	48,0				
										6908	13549	903,2	131,7	2002,8	200,3	50,6	10,2	27,8	27,1	7,0
HE220B	330	220	9,5	16,0	18	262	71,47	1,270	140	10149	20048	1215,0	140,5	2844,1	258,6	52,9				
										8059	19205	1163,9	145,2	2842,5	258,4	55,9	10,9	38,7	35,4	8,8
HE240B	360	240	10,0	17,0	21	284	83,20	1,384	131	11799	27857	1547,6	153,7	3923,7	327,0	57,7				
										9399	26705	1483,6	158,7	3921,7	326,8	60,8	11,8	53,4	45,3	11,1
HE260B	390	260	10,0	17,5	24	307	92,98	1,499	127	13144	36785	1886,4	167,3	5135,6	395,0	62,5				
										10544	35320	1811,3	172,7	5133,4	394,9	65,8	12,3	68,8	55,8	13,1
HE280B	420	280	10,5	18,0	24	336	103,12	1,618	123	14606	47429	2258,5	180,2	6595,9	471,1	67,2				
										11666	45508	2167,1	186,1	6593,2	470,9	70,8	12,9	89,1	69,1	15,6
HE300B	450	300	11,0	19,0	27	358	117,03	1,732	116	16558	61891	2750,7	193,3	8564,5	571,0	71,9				
										13258	59416	2640,7	199,6	8561,2	570,7	75,8	13,7	115,6	84,3	18,9
HE320B	480	300	11,5	20,5	27	385	126,65	1,771	110	17974	75930	3163,7	205,5	9240,9	616,1	71,7				
										14294	72790	3032,9	212,4	9236,8	615,8	75,7	14,8	144,8	97,9	22,2
HE340B	510	300	12,0	21,5	27	413	134,15	1,810	106	19130	90433	3546,4	217,4	9692,4	646,2	71,2				
										15050	86502	3392,3	225,0	9687,5	645,8	75,3	15,8	178,1	113,1	25,7
HE360B	540	300	12,5	22,5	27	441	141,80	1,849	102	20313	106726	3952,8	229,2	10144	676,3	70,7				
										15813	101866	3772,8	237,5	10138	675,9	74,9	16,7	216,9	129,6	29,6
HE400B	600	300	13,5	24,0	27	498	155,26	1,927	97	22478	142993	4766,4	252,2	10823	721,5	69,4				
										17078	135793	4526,4	262,0	10815	721,0	73,9	18,7	312,6	167,5	38,4
HE450B	675	300	14,0	26,0	27	569	171,11	2,026	93	24948	198408	5878,7	282,0	11726	781,8	68,6				
										18648	187776	5563,7	293,5	11716	781,1	73,3	20,9	455,1	217,3	49,7

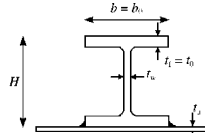
[1)] $H = S = 1{,}5 \times$ hoogte I-profiel

Raatbalken (kanteelbalken) samengesteld uit **HEB** (*vervolg*)

Uit profiel	$H = S^{1)}$ mm	b mm	t_w mm	t_f mm	r mm	h_1 mm	M kg/m	O m²/m	O/A 1/m	A mm²	Sterke as y-y			Zwakke as z-z			T-stuk		Boven	Onder
											I_y × 10⁴	W_y:e_1 × 10³	i_y	I_z × 10⁴	W_z:e_1 × 10³	i_z	z mm	I_y × 10⁴	W_y:e_1 × 10³	W_y:e_1 × 10³
HE500B	750	300	14,5	28,0	27	640	187,33	2,125	89	27489	266715	7112,4	311,5	12630	842,0	67,8				
										20239	251611	6709,6	324,7	12618	841,2	72,7	23,3	639,5	274,4	62,9
HE550B	825	300	15,0	29,0	27	713	199,44	2,224	88	29531	341065	8268,2	339,8	13085	872,3	66,6				
										21281	320268	7764,1	355,1	13069	871,3	71,7	25,6	871,5	340,2	77,9
HE600B	900	300	15,5	30,0	27	786	211,92	2,323	86	31646	428023	9511,6	367,8	13540	902,6	65,4				
										22346	400123	8891,6	385,0	13521	901,4	70,8	28,1	1159,8	413,1	95,1
HE650B	975	300	16,0	31,0	27	859	224,78	2,422	85	33834	528700	10845	395,3	13995	933,0	64,3				
										23434	492084	10094	414,6	13973	931,5	69,9	30,7	1511,7	493,0	114,7
HE700B	1050	300	17,0	32,0	27	932	240,51	2,520	82	36588	648240	12347	420,9	14455	963,7	62,9				
										24688	599649	11422	442,4	14427	961,8	68,6	33,8	1981,9	586,5	140,4
HE800B	1200	300	17,5	33,0	30	1074	262,33	2,713	81	40418	911236	15187	474,8	14922	994,8	60,8				
										26418	836569	13943	500,3	14886	992,4	66,7	39,3	3025,5	769,8	188,3
HE900B	1350	300	18,5	35,0	30	1220	291,45	2,911	78	45453	1262356	18702	527,0	15840	1056,0	59,0				
										28803	1149969	17037	556,5	15792	1052,8	65,2	45,6	4498,2	986,3	250,7
HE1000B	1500	300	19,0	36,0	30	1368	314,04	3,110	78	49505	1657324	22098	578,6	16304	1087,0	57,4				
										30505	1498991	19987	612,1	16247	1083,1	63,7	51,9	6287,2	1210,3	317,5

[1)] $H = S = 1{,}5 \times$ hoogte I-profiel

2.13 Geïntegreerde liggers

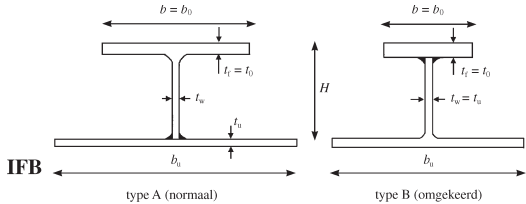


SFB

H-profiel + $b_u \times t_u$	G_8[4] kg/m	Classificatie S355 M+[1]	M−[2]	I_y mm^4 × 10^4	$W_{y;el}$ mm^3 × 10^3	$W_{y;pl}$ mm^3 × 10^3	$M_{y;u;d}$[3] kNm	$V_{z;u;d}$ kN
180-HE 180 B + 400 × 10	84,2	1	3	6073	482	599	213	527
180-HE 180 B + 400 × 12	90,6	1	3	6386	488	612	217	527
180-HE 160 M + 400 × 10	109,7	1	4	7658	649	845	300	841
180-HE 160 M + 400 × 12	116,1	1	3	8064	661	866	308	841
180-HE 160 M + 400 × 15	125,7	1	2	8635	680	898	319	841
180-HE 160 M + 400 × 20	141,7	1	1	9511	705	950	337	841
190-HE 200 A + 400 × 10	75,0	3	3	5990	434	529	154	458
200-HE 200 B + 400 × 10	94,5	1	3	8616	634	783	278	648
200-HE 200 B + 400 × 12	100,9	1	3	9042	646	799	283	648
200-HE 200 B + 400 × 15	110,5	1	1	9629	655	822	292	648
200-HE 180 M + 400 × 10	122,6	1	3	10746	846	1081	384	931
200-HE 180 M + 400 × 12	129,0	1	3	11277	854	1105	392	931
200-HE 180 M + 400 × 15	138,6	1	1	12027	878	1140	405	931
200-HE 180 M + 400 × 20	154,6	1	1	13184	903	1198	425	931
250-HE 260 A + 450 × 12	112,6	3	2	16169	924	1107	328	732
260-HE 260 B + 450 × 12	137,9	1	2	21786	1259	1532	544	978
260-HE 260 B + 450 × 15	148,7	1	1	23061	1281	1565	556	978
270-HE 240 M + 450 × 12	202,9	1	3	32746	1985	2513	892	1626
270-HE 240 M + 450 × 15	213,7	1	1	34546	2020	2569	912	1626
270-HE 240 M + 450 × 20	231,7	1	1	37362	2076	2664	946	1626
270-HE 240 M + 450 × 25	249,7	1	1	40002	2123	2759	979	1626
310-HE 320 A + 500 × 12	147,5	2	3	33429	1615	1930	635	1043
310-HE 320 A + 500 × 15	159,5	2	1	35300	1634	1964	697	1043
320-HE 320 B + 500 × 12	177,0	1	3	42378	2092	2531	899	1337
320-HE 320 B + 500 × 15	189,0	1	1	45198	2122	2575	914	1337
320-HE 320 B + 500 × 20	209,0	1	1	48693	2164	2650	941	1337
310-HE 280 M + 500 × 12	240,2	1	3	52001	2781	3477	1234	1927
310-HE 280 M + 500 × 15	252,2	1	1	54656	2817	3542	1258	1927
310-HE 280 M + 500 × 20	272,2	1	1	58806	2883	3653	1297	1927
310-HE 280 M + 500 × 25	292,2	1	1	62682	2957	3764	1336	1927

1) Doorsnedeklasse onder positief buigend moment (in het veld).
2) Doorsnedeklasse onder negatief buigend moment (boven een tussensteunpunt).
3) Indien M + 1 of 2 is, is hiervoor W_{pl} genomen, indien M + 3 is, is W_{el} genomen. In verband met de effecten van dwarsbuiging van de onderplaat is het verstandig met een gereduceerde $M_{y;u;d}$ te rekenen. De reductie is afhankelijk van het gekozen profiel en is meestal kleiner dan 10%.
4) Soortelijkgewicht = 8000 kg/m^3.

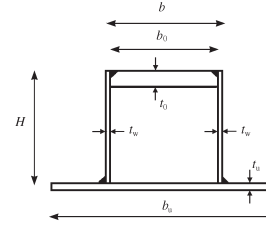
Geïntegreerde liggers (vervolg)



$H-b_u \cdot t_u$ + half profiel: type A	G_8 [4] kg/m	Classificatie S355 M+ [1]	M− [2]	I_y mm^4 × 10^4	$W_{y;el}$ mm^3 × 10^3	$W_{y;pl}$ mm^3 × 10^3	$M_{y;u;d}$ [3] kNm	$V_{z;u;d}$ kN
175–500 · 10 + HE 360 A	97,1	1	4	8008	852	955	339	617
175–500 · 12 + HE 360 A	105,1	1	4	8841	902	1048	372	617
180–500 · 12 + HE 360 B	120,2	1	4	10284	1039	1194	424	775
180–500 · 15 + HE 360 B	132,2	1	4	11658	1143	1351	480	775
179–500 · 20 + HE 320 M	204,8	1	4	16684	1620	1944	690	1279
179–500 · 25 + HE 320 M	224,8	1	4	19205	1812	2259	802	1279
195–500 · 10 + HE 400 A	103,6	1	4	10370	969	1108	393	715
195–500 · 12 + HE 400 A	111,6	1	4	11453	1080	1231	437	715
200–500 · 12 + HE 400 B	127,2	1	4	13168	1186	1370	486	886
200–500 · 15 + HE 400 B	139,2	1	4	14915	1356	1566	556	886
250–400 · 10 + IPE 500	78,4	1	4	12277	877	1038	368	705
245–500 · 12 + HE 500 A	127,2	1	4	19880	1484	1694	601	927
245–500 · 15 + HE 500 A	139,2	1	4	22394	1659	1911	678	927
250–500 · 15 + HE 500 B	155,6	1	4	25233	1855	2122	753	1121
250–500 · 20 + HE 500 B	175,6	1	4	29476	2033	2442	867	1121
300–450 · 10 + IPE 600	98,4	1	4	21624	1360	1552	551	976
320–500 · 15 + HE 650 A	156,8	1	4	41378	2448	2732	970	1242
320–500 · 15 + HE 650 B	174,4	1	4	44282	2488	2939	1043	1453
320–500 · 20 + HE 650 B	194,4	1	4	51557	2929	3410	1211	1453

Voor voetnoten zie SFB-tabel

Geïntegreerde liggers (vervolg)



THQ

$H \times t_w - b_0 \times t_0 - b_u \times t_u$	G_8 kg/m	Classificatie S355 M+[1]	M−[2]	I_y mm^4 × 10^4	$W_{y;el}$ mm^3 × 10^3	$W_{y;pl}$ mm^3 × 10^3	$M_{y;u;d}$[3] kNm	$V_{z;u;d}$ kN
180 × 5 – 190 × 20 – 400 × 10	76,8	1	3	6484	662	764	271	369
180 × 5 – 190 × 25 – 400 × 10	84,4	1	3	6976	705	815	289	369
180 × 5 – 190 × 25 – 400 × 12	90,8	1	3	7718	787	910	323	369
180 × 5 – 190 × 30 – 400 × 12	98,4	1	3	8155	824	949	337	369
180 × 5 – 240 × 25 – 450 × 12	105,6	1	3	9083	927	1055	375	369
180 × 5 – 240 × 30 – 450 × 15	116,4	1	1	10297	999	1190	422	369
180 × 5 – 240 × 35 – 450 × 15	126,0	1	1	10931	1115	1274	452	369
180 × 5 – 190 × 20 – 400 × 10	135,6	1	3	11402	1118	1280	454	369
180 × 5 – 290 × 30 – 500 × 15	144,0	1	2	12554	1243	1429	507	369
180 × 5 – 290 × 30 – 500 × 20	164,0	2	1	14889	1392	1691	600	369
180 × 5 – 290 × 35 – 500 × 25	175,6	1	1	15640	1533	1816	645	369
200 × 5 – 190 × 20 – 400 × 10	78,4	1	3	8109	751	861	306	410
200 × 5 – 190 × 20 – 400 × 12	84,8	2	3	8894	767	926	329	410
200 × 5 – 190 × 25 – 400 × 10	86,0	1	3	8741	795	922	327	410
200 × 5 – 190 × 25 – 400 × 12	92,4	1	3	9652	894	1024	364	410
200 × 5 – 240 × 20 – 450 × 12	97,6	1	3	10483	936	1095	389	410
200 × 5 – 240 × 25 – 450 × 12	107,2	1	3	11349	1051	1188	422	410
200 × 5 – 240 × 25 – 450 × 15	118,0	1	1	12832	1126	1337	474	410
200 × 5 – 240 × 30 – 450 × 15	127,6	1	1	13655	1264	1433	509	410
200 × 5 – 290 × 30 – 500 × 15	145,6	1	3	15674	1412	1610	571	410
200 × 5 – 290 × 30 – 500 × 20	165,6	3	1	18523	1583	1897	562	410
200 × 5 – 290 × 35 – 500 × 20	177,2	1	1	19501	1741	2037	723	410
265 × 6 – 190 × 20 – 400 × 10	87,8	1	3	15077	1077	1225	435	652
265 × 6 – 190 × 20 – 400 × 12	94,2	2	3	16452	1104	1320	469	652
265 × 6 – 190 × 25 – 400 × 10	95,4	1	3	16288	1131	1319	468	652
265 × 6 – 190 × 25 – 400 × 12	101,8	1	3	17868	1276	1445	513	652

Geïntegreerde liggers (vervolg)

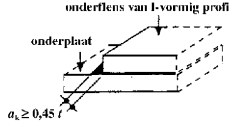
$H \times t_w - b_0 \times t_0 - b_u \times t_u$	G_8 kg/m	Classificatie S355 M+[1]	M−[2]	I_y mm^4 × 10^4	$W_{y;el}$ mm^3 × 10^3	$W_{y;pl}$ mm^3 × 10^3	$M_{y;u;d}$[3] kNm	$V_{z;u;d}$ kN
265 × 6 – 240 × 20 – 450 × 12	107,0	1	3	19254	1337	1539	546	652
265 × 6 – 240 × 25 – 450 × 12	116,6	1	3	20892	1461	1671	593	652
265 × 6 – 240 × 25 – 450 × 15	127,4	1	1	23457	1596	1864	662	652
265 × 6 – 240 × 30 – 450 × 15	137,0	1	1	25041	1763	1998	709	652
265 × 6 – 290 × 30 – 500 × 15	155,0	1	2	28648	1962	2253	800	652
265 × 6 – 290 × 30 – 500 × 20	175,0	2	1	33536	2221	2623	931	652
265 × 6 – 290 × 35 – 500 × 20	186,6	1	1	35443	2461	2803	995	652
320 × 8 – 190 × 20 – 400 × 12	109,8	1	2	25790	1457	1761	625	1050
320 × 8 – 190 × 25 – 400 × 12	117,4	1	2	27898	1671	1907	677	1050
320 × 8 – 190 × 30 – 400 × 12	125,0	1	2	29623	1702	2020	717	1050
320 × 8 – 190 × 25 – 400 × 15	127,0	1	1	30989	1731	2091	742	1050
320 × 8 – 190 × 30 – 400 × 15	134,6	1	1	33052	1933	2240	795	1050
320 × 8 – 190 × 35 – 400 × 15	142,2	1	1	34767	2021	2356	836	1050
320 × 8 – 190 × 30 – 400 × 20	150,6	2	1	38030	2023	2513	892	1050
320 × 8 – 190 × 35 – 400 × 20	158,2	1	1	40227	2222	2689	954	1050
320 × 8 – 190 × 40 – 400 × 20	165,8	1	1	42090	2419	2831	1005	1050
320 × 8 – 190 × 40 – 400 × 25	181,8	2	1	47252	2500	3109	1104	1050
320 × 8 – 240 × 20 – 450 × 12	122,6	1	2	29869	1737	2020	717	1050
320 × 8 – 240 × 25 – 450 × 12	132,2	1	2	32340	1891	2185	776	1050
320 × 8 – 240 × 25 – 450 × 15	143,0	1	1	36067	2073	2416	858	1050
320 × 8 – 240 × 30 – 450 × 15	152,6	1	1	38472	2263	2581	916	1050
320 × 8 – 240 × 35 – 450 × 15	162,2	1	1	40441	2272	2695	957	1050
320 × 8 – 240 × 30 – 450 × 20	170,6	1	1	44493	2431	2933	1041	1050
320 × 8 – 240 × 35 – 450 × 20	180,2	1	1	47060	2689	3131	1112	1050
320 × 8 – 240 × 40 – 450 × 20	189,8	1	1	49207	2861	3278	1164	1050
320 × 8 – 240 × 35 – 450 × 25	198,2	2	1	52814	2780	3420	1214	1050
320 × 8 – 240 × 40 – 450 × 25	207,8	1	1	55477	3032	3652	1296	1050
320 × 8 – 290 × 20 – 500 × 12	135,4	1	2	33885	2029	2275	808	1050
320 × 8 – 290 × 25 – 500 × 12	147,0	1	2	36692	2085	2451	870	1050
320 × 8 – 290 × 25 – 500 × 15	159,0	1	1	41061	2430	2734	971	1050
320 × 8 – 290 × 30 – 500 × 15	170,6	1	1	43782	2502	2905	1031	1050
320 × 8 – 290 × 30 – 500 × 20	190,6	1	1	50852	2857	3345	1187	1050
320 × 8 – 290 × 35 – 500 × 20	202,2	1	1	53762	3162	3556	1262	1050
320 × 8 – 290 × 40 – 500 × 20	213,8	1	1	56171	3174	3694	1311	1050
320 × 8 – 290 × 35 – 500 × 25	222,2	2	1	60529	3254	3926	1394	1050
320 × 8 – 290 × 40 – 500 × 25	233,8	1	1	63551	3570	4177	1483	1050

Voor voetnoten zie SFB tabel

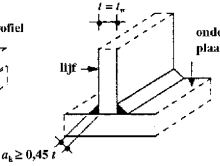
Lasdimensies van geintegreerde liggers

Lasdimensies van geintegreerde liggers

SFB
$t = t_w$ = lijfdikte van I-vormig profiel

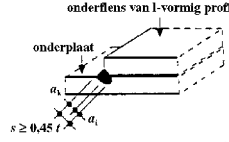


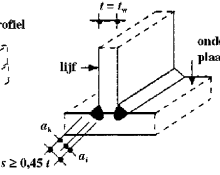
IFB (type a)



lasdimensies
(t.b.v. SFB en IFB)

t = 10 mm; a_k = 4,5 mm
t = 12 mm; a_k = 5,5 mm
t = 14 mm; a_k = 6,5 mm
t = 16 mm; a_k = 7,5 mm
t = 18 mm; a_k = 8,0 mm
t = 20 mm; a_k = 9,0 mm

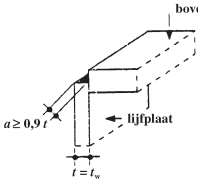


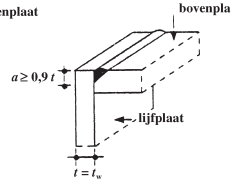


t = 10 mm; a_k = 4,0 mm
t = 12 mm; a_k = 4,5 mm
t = 14 mm; a_k = 5,5 mm
t = 16 mm; a_k = 6,0 mm
t = 18 mm; a_k = 7,0 mm
t = 20 mm; a_k = 7,5 mm

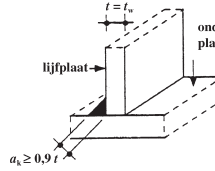
THQ

lasdimensies (t.b.v. THQ)

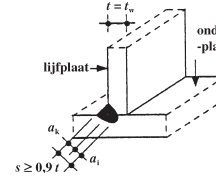




t = 5-6 mm; a = 5,5 mm
t = 7-8 mm; a = 7,5 mm
t = 10 mm; a = 9,0 mm



t = 5-6 mm; a_k = 5,5 mm
t = 7-8 mm; a_k = 7,5 mm
t = 10 mm; a_k = 9,0 mm



t = 5-6 mm; a_k = 4,5 mm
t = 7-8 mm; a_k = 6,0 mm
t = 10 mm; a_k = 7,5 mm

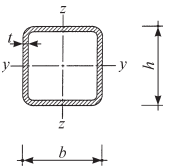
2.14 Vierkante warmgevormde buisprofielen

DIN afmetingennorm DIN59410 mei 1974

afrondingsstraal	$h \leq 100$	$r_u = 1{,}00 \times t$	$r_i = r_u - t$
	$100 < h \leq 140$	$r_u = 1{,}40 \times t$	$r_i = r_u - t$
	$h > 140$	$r_u = 2{,}00 \times t$	$r_i = r_u - t$

BS afmetingennorm BS4848:Part 2:1991

afrondingsstraal	uitwendig	$r_u = 1{,}25 \times t$
	inwending	$r_u = 1{,}00 \times t$



Benaming											Torsiestijfheden	
$h \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O m²/m	O/A 1/m	A mm²	I $\times 10^4$	W_{el} $\times 10^3$	W_{pl} $\times 10^3$	i	I_t $\times 10^4$	W_t $\times 10^3$
40 × 40 ×	2,5	BS	2,92	0,155	416	372	8,67	4,33	5,21	15,27	13,49	7,00
	2,9	DIN	3,32	0,155	366	423	9,66	4,83	5,86	15,11	15,02	7,97
	3,0	BS	3,45	0,154	349	440	9,96	4,98	6,07	15,05	15,59	8,16
	4,0	DIN	4,41	0,153	272	562	12,09	6,05	7,55	14,67	19,02	10,34
	4,0	BS	4,46	0,151	266	568	12,14	6,07	7,61	14,62	19,19	10,23
	5,0	DIN	5,33	0,151	223	679	13,82	6,91	8,84	14,27	21,92	12,20
	5,0	BS	5,40	0,149	217	688	13,83	6,92	8,92	14,18	22,02	11,98
50 × 50 ×	2,9	DIN	4,23	0,195	362	539	19,85	7,94	9,49	19,19	30,66	12,86
	3,0	DIN	4,37	0,195	350	556	20,39	8,16	9,77	19,15	31,52	13,24
	3,0	BS	4,39	0,194	346	560	20,50	8,20	9,83	19,14	31,85	13,20
	4,0	DIN	5,67	0,193	267	722	25,35	10,14	12,40	18,74	39,55	16,90
	4,0	BS	5,72	0,191	263	728	25,48	10,19	12,49	18,71	39,98	16,79
	5,0	DIN	6,90	0,191	218	879	29,52	11,81	14,74	18,33	46,43	20,20
	5,0	BS	6,97	0,189	213	888	29,64	11,86	14,86	18,27	46,86	19,98
	6,0	BS	8,15	0,187	180	1039	33,04	13,22	16,95	17,84	52,52	22,76
	6,3	DIN	8,38	0,189	177	1067	33,88	13,55	17,37	17,82	53,77	23,95

Vierkante warmgevormde buisprofielen (vervolg)

Benaming										Torsiestijfheden	
$h \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O m²/m	O/A l/m	A mm²	I $\times 10^4$	W_{el} $\times 10^3$	W_{pl} $\times 10^3$	i	I_t $\times 10^4$	W_t $\times 10^3$
60 × 60 ×	2,9	DIN	5,14	0,235	359	655	35,46	11,82	13,98	23,27	54,52	18,90
	3,0	DIN	5,31	0,235	347	676	36,48	12,16	14,41	23,22	56,13	19,48
	3,0	BS	5,34	0,234	344	680	36,65	12,22	14,49	23,22	56,66	19,44
	4,0	DIN	6,93	0,233	264	882	45,91	15,30	18,45	22,81	71,18	25,06
	4,0	BS	6,97	0,231	261	888	46,14	15,38	18,57	22,79	71,95	24,95
	5,0	DIN	8,47	0,231	215	1079	54,12	18,04	22,13	22,40	84,54	30,20
	5,0	BS	8,54	0,229	211	1088	54,39	18,13	22,30	22,36	85,45	29,98
	6,0	BS	10,04	0,227	178	1279	61,47	20,49	25,68	21,93	97,17	34,52
	6,3	DIN	10,36	0,229	174	1319	63,14	21,05	26,40	21,88	99,49	36,23
	8,0	DIN	12,63	0,226	141	1609	72,38	24,13	31,15	21,21	115,15	43,04
	8,0	BS	12,82	0,223	136	1633	72,37	24,12	31,43	21,05	115,34	42,15
70 × 70 ×	3,0	BS	6,28	0,274	342	800	59,62	17,03	20,04	27,31	91,82	26,88
	3,2	DIN	6,64	0,275	324	846	62,70	17,91	21,13	27,22	96,28	28,54
	3,6	BS	7,46	0,272	287	950	69,50	19,86	23,58	27,05	107,53	31,64
	4,0	DIN	8,18	0,273	262	1042	75,35	21,53	25,70	26,89	116,33	34,82
	5,0	DIN	10,04	0,271	212	1279	89,62	25,61	31,02	26,48	139,26	42,20
	5,0	BS	10,11	0,269	209	1288	90,08	25,74	31,24	26,45	140,78	41,98
	6,0	BS	11,92	0,267	176	1519	102,78	29,36	36,22	26,01	161,61	48,68
	6,3	DIN	12,33	0,269	171	1571	105,77	30,22	37,33	25,95	165,67	51,02
	8,0	BS	15,33	0,263	135	1953	123,48	35,28	44,96	25,14	196,04	60,39
80 × 80 ×	3,0	BS	7,22	0,314	341	920	90,61	22,65	26,50	31,39	139,13	35,52
	3,2	DIN	7,65	0,315	323	974	95,45	23,86	27,98	31,30	146,15	37,73
	3,6	DIN	8,55	0,314	288	1089	105,55	26,39	31,11	31,13	162,03	42,01
	3,6	BS	8,59	0,312	285	1094	106,03	26,51	31,26	31,13	163,49	41,92
	4,0	DIN	9,44	0,313	260	1202	115,28	28,82	34,15	30,97	177,39	46,18
	4,5	DIN	10,53	0,312	233	1342	126,92	31,73	37,84	30,76	195,88	51,26
	5,0	DIN	11,61	0,311	211	1479	138,00	34,50	41,42	30,55	213,59	56,20
80 × 80 ×	5,0	BS	11,68	0,309	208	1488	138,71	34,68	41,68	30,53	215,85	55,98
	5,6	DIN	12,87	0,310	189	1640	150,58	37,64	45,54	30,30	233,84	61,92
	6,0	BS	13,81	0,307	175	1759	159,35	39,84	48,55	30,10	249,44	65,24
	6,3	DIN	14,31	0,309	170	1823	164,28	41,07	50,14	30,02	256,11	68,33
	7,1	DIN	15,91	0,308	152	2027	178,73	44,68	55,12	29,69	279,80	75,31
	8,0	DIN	17,66	0,306	136	2249	193,49	48,37	60,36	29,33	304,27	82,72
	8,0	BS	17,84	0,303	133	2273	194,28	48,57	60,88	29,23	307,12	81,83
	8,8	DIN	19,15	0,305	125	2440	205,35	51,34	64,73	29,01	324,15	88,93
90 × 90 ×	3,6	DIN	9,68	0,354	287	1233	152,89	33,98	39,84	35,21	234,11	53,73
	3,6	BS	9,72	0,352	285	1238	153,53	34,12	40,02	35,23	236,06	53,65
	4,0	DIN	10,69	0,353	259	1362	167,31	37,18	43,80	35,05	256,75	59,14
	4,5	DIN	11,94	0,352	232	1522	184,66	41,04	48,62	34,84	284,14	65,75
	5,0	DIN	13,18	0,351	209	1679	201,28	44,73	53,31	34,63	310,53	72,20
	5,0	BS	13,25	0,349	207	1688	202,28	44,95	53,62	34,62	313,67	71,98
	5,6	DIN	14,63	0,350	188	1864	220,29	48,95	58,75	34,38	340,90	79,71
	6,0	BS	15,69	0,347	174	1999	233,61	51,91	62,68	34,19	364,25	84,20
	6,3	DIN	16,29	0,349	168	2075	241,19	53,60	64,84	34,09	374,57	88,16
	7,1	DIN	18,14	0,348	150	2311	263,48	58,55	71,49	33,77	410,78	97,43
	8,0	DIN	20,17	0,346	135	2569	286,59	63,69	78,57	33,40	448,69	107,36
	8,0	BS	20,36	0,343	132	2593	287,96	63,99	79,21	33,32	453,38	106,47
	8,8	DIN	21,92	0,345	124	2792	305,45	67,88	84,51	33,08	479,93	115,75
100 × 100 ×	3,6	DIN	10,81	0,394	286	1377	212,6	42,5	49,7	39,29	324,9	66,9
	4,0	DIN	11,95	0,393	258	1522	233,0	46,6	54,7	39,13	356,8	73,7
	4,0	BS	12,00	0,391	256	1528	234,0	46,8	54,9	39,13	359,8	73,6
	5,0	DIN	14,75	0,391	208	1879	281,5	56,3	66,7	38,71	433,1	90,2
	5,0	BS	14,82	0,389	206	1888	282,8	56,6	67,1	38,70	437,2	90,0
	6,0	BS	17,57	0,387	173	2239	327,9	65,6	78,6	38,27	509,7	105,6
	6,3	DIN	18,27	0,389	167	2327	339,0	67,8	81,4	38,17	524,8	110,5
	8,0	DIN	22,68	0,386	134	2889	405,7	81,1	99,2	37,47	632,7	135,2
	8,0	BS	22,87	0,383	131	2913	407,7	81,5	99,9	37,41	639,6	134,3
	10,0	DIN	27,59	0,383	109	3514	472,4	94,5	117,9	36,66	742,9	161,6
	10,0	BS	27,88	0,379	107	3552	474,3	94,9	118,9	36,54	749,8	159,8
	12,5	DIN	33,29	0,379	89	4241	539,7	107,9	138,2	35,67	856,3	190,6

Vierkante warmgevormde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$h \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O_1 m²/m	O/A l/m	A mm²	I × 10^4	W_{el} × 10^3	W_{pl} × 10^3	i	I_t × 10^4	W_t × 10^3
110 × 110 ×	4,0	DIN	13,12	0,430	258	1671	310,8	56,5	66,1	43,13	482,5	89,8
	5,0	DIN	16,18	0,428	208	2061	375,6	68,3	80,7	42,68	587,8	110,1
	6,3	DIN	20,03	0,425	166	2552	452,6	82,3	98,5	42,11	715,7	135,1
	8,0	DIN	24,85	0,421	133	3165	541,6	98,5	119,9	41,37	868,0	165,8
	10,0	DIN	30,19	0,416	108	3845	630,6	114,7	142,4	40,50	1025,8	198,6
120 × 120 ×	4,0	DIN	14,38	0,470	257	1831	408,1	68,0	79,3	47,21	631,7	107,6
	4,5	DIN	16,07	0,469	229	2048	452,1	75,3	88,2	46,99	702,5	119,9
	5,0	DIN	17,75	0,468	207	2261	494,6	82,4	97,0	46,77	771,4	132,1
	5,0	BS	17,96	0,469	205	2288	502,6	83,8	98,4	46,87	773,6	132,0
	5,6	DIN	19,74	0,467	186	2514	543,6	90,6	107,2	46,50	851,7	146,3
120 × 120 ×	6,0	BS	21,34	0,467	172	2719	586,4	97,7	115,9	46,44	906,6	155,5
	6,3	DIN	22,01	0,465	166	2804	598,3	99,7	118,7	46,19	942,2	162,5
	7,1	DIN	24,56	0,463	148	3128	657,4	109,6	131,4	45,84	1041,4	180,5
	8,0	DIN	27,36	0,461	132	3485	719,8	120,0	145,0	45,45	1147,6	200,0
	8,0	BS	27,89	0,463	130	3553	738,3	123,1	148,6	45,58	1151,2	199,6
	10,0	DIN	33,33	0,456	107	4245	843,4	140,6	173,1	44,57	1363,6	240,6
	10,0	BS	34,16	0,459	105	4352	870,3	145,1	178,4	44,72	1367,2	239,8
	12,5	DIN	40,30	0,450	88	5134	970,9	161,8	203,9	43,49	1595,5	286,2
	12,5	BS	41,60	0,453	86	5300	1009,0	168,2	211,8	43,63	1597,3	284,7
140 × 140 ×	5,0	DIN	20,89	0,548	206	2661	803,0	114,7	134,1	54,93	1245,7	182,1
	5,0	BS	21,10	0,549	204	2688	814,2	116,3	135,8	55,04	1248,9	182,0
	5,6	DIN	23,25	0,547	185	2962	885,1	126,4	148,5	54,66	1378,4	202,1
	5,6	BS	23,51	0,548	183	2995	899,0	128,4	150,6	54,78	1382,2	201,9
	6,0	BS	25,11	0,547	171	3199	954,0	136,3	160,3	54,61	1469,1	215,0
	6,3	DIN	25,97	0,545	165	3308	977,3	139,6	164,9	54,35	1528,9	224,9
	7,1	DIN	29,02	0,543	147	3696	1077,9	154,0	183,0	54,00	1695,0	250,3
	8,0	DIN	32,38	0,541	131	4125	1185,4	169,3	202,6	53,61	1874,5	278,1
	8,0	BS	32,92	0,543	129	4193	1211,6	173,1	206,8	53,75	1880,3	277,7
	8,8	DIN	35,31	0,539	120	4499	1275,8	182,3	219,4	53,25	2027,5	302,0
	10,0	DIN	39,61	0,536	106	5045	1402,8	200,4	243,6	52,73	2245,7	336,6
	10,0	BS	40,44	0,539	105	5152	1441,4	205,9	249,9	52,89	2252,5	335,8
	12,5	DIN	48,15	0,530	86	6134	1635,5	233,6	289,6	51,64	2656,9	403,7
	12,5	BS	49,45	0,533	85	6300	1691,2	241,6	299,2	51,81	2663,1	402,2
150 × 150 ×	5,0	DIN	22,26	0,583	206	2836	982,1	130,9	153,0	58,85	1551,8	209,8
	5,0	BS	22,67	0,589	204	2888	1009,4	134,6	156,8	59,12	1546,1	210,0
	6,0	BS	26,99	0,587	171	3439	1184,6	158,0	185,3	58,70	1821,5	248,4
	6,3	DIN	27,62	0,578	164	3519	1193,0	159,1	187,7	58,23	1909,5	259,2
	8,0	DIN	34,38	0,573	131	4379	1443,0	192,4	230,1	57,40	2347,8	320,6
	8,0	BS	35,43	0,583	129	4513	1509,8	201,3	239,6	57,84	2338,5	321,5
	10,0	DIN	41,94	0,566	106	5342	1701,2	226,8	275,7	56,43	2819,9	388,1
	10,0	BS	43,58	0,579	104	5552	1802,5	240,3	290,2	56,98	2810,6	389,8
	12,5	DIN	50,81	0,557	86	6473	1972,4	263,0	326,2	55,20	3342,2	465,1
	12,5	BS	53,38	0,573	84	6800	2124,8	283,3	348,5	55,90	3337,9	468,4
	16,0	BS	66,35	0,566	67	8452	2499,5	333,3	421,0	54,38	3959,7	565,7
160 × 160 ×	5,6	DIN	26,52	0,621	184	3378	1325,7	165,7	194,0	62,65	2099,8	266,3
	6,3	DIN	29,60	0,618	164	3771	1464,1	183,0	215,3	62,31	2334,3	296,7
	8,0	DIN	36,89	0,613	130	4699	1776,7	222,1	264,6	61,49	2876,9	367,7
	10,0	DIN	45,08	0,606	105	5742	2103,1	262,9	317,9	60,52	3466,1	446,1
	12,5	DIN	54,74	0,597	86	6973	2451,4	306,4	377,7	59,29	4125,9	536,4
180 × 180 ×	6,0	BS	32,65	0,707	170	4159	2093,2	232,6	270,9	70,95	3206,0	362,8
	6,3	DIN	33,56	0,698	163	4275	2123,5	235,9	276,2	70,48	3363,5	379,2
	8,0	DIN	41,91	0,693	130	5339	2590,7	287,9	340,7	69,66	4161,4	471,4
	8,0	BS	42,96	0,703	128	5473	2688,9	298,8	352,1	70,09	4144,7	472,2

Vierkante warmgevormde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$b \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O m²/m	O/A l/m	A mm²	I × 10^4	W_{el} × 10^3	W_{pl} × 10^3	i	I_t × 10^4	W_t × 10^3
180 × 180 ×	8,8	DIN	45,74	0,690	118	5827	2796,0	310,7	369,6	69,27	4520,3	513,2
	10,0	DIN	51,36	0,686	105	6542	3086,9	343,0	411,3	68,69	5038,4	574,1
	10,0	BS	53,00	0,699	103	6752	3236,5	359,6	429,0	69,24	5018,7	575,8
	12,5	DIN	62,59	0,677	85	7973	3629,4	403,3	491,8	67,47	6038,7	693,9
	12,5	BS	65,15	0,693	84	8300	3855,9	428,4	518,9	68,16	6020,3	697,2
	16,0	BS	81,42	0,686	66	10372	4607,3	511,9	633,7	66,65	7254,0	851,8
200 × 200 ×	6,0	BS	36,41	0,787	170	4639	2903,2	290,3	336,9	79,11	4438,0	451,2
	6,3	DIN	37,52	0,778	163	4779	2955,8	295,6	344,6	78,64	4657,4	471,8
	7,1	DIN	41,99	0,776	145	5349	3275,8	327,6	383,7	78,26	5192,7	527,0
	8,0	DIN	46,94	0,773	129	5979	3621,6	362,2	426,4	77,83	5779,4	587,6
	8,0	BS	47,99	0,783	128	6113	3744,1	374,4	439,2	78,26	5756,8	588,7
	10,0	DIN	57,64	0,766	104	7342	4337,6	433,8	516,7	76,86	7023,8	718,1
	10,0	BS	59,28	0,779	103	7552	4524,7	452,5	536,5	77,41	6995,6	719,8
	12,5	DIN	70,44	0,757	84	8973	5134,5	513,4	620,9	75,65	8462,1	871,4
	12,5	BS	73,00	0,773	83	9300	5418,5	541,9	651,3	76,33	8431,8	874,7
	16,0	DIN	87,27	0,745	67	11117	6076,4	607,6	750,6	73,93	10252	1067,6
	16,0	BS	91,47	0,766	66	11652	6523,5	652,4	799,5	74,82	10234	1074,5
220 × 220 ×	6,3	DIN	41,47	0,858	162	5283	3981,4	361,9	420,6	86,81	6246,2	574,4
	7,1	DIN	46,44	0,856	145	5917	4419,5	401,8	468,8	86,43	6971,8	642,3
	8,0	DIN	51,96	0,853	129	6619	4895,0	445,0	521,7	86,00	7769,4	717,1
	8,8	DIN	56,70	0,850	117	7235	5302,4	482,0	567,5	85,61	8461,7	782,4
	10,0	DIN	63,92	0,846	104	8142	5887,2	535,2	634,2	85,03	9470,4	878,1
	12,5	DIN	78,29	0,837	84	9973	7006,4	636,9	765,0	83,82	11456	1068,9
	14,2	DIN	87,69	0,831	74	11170	7693,5	699,4	847,8	82,99	12716	1191,8
	16,0	DIN	97,31	0,825	67	12397	8358,2	759,8	930,3	82,11	13968	1315,9
250 × 250 ×	6,0	BS	45,83	0,987	169	5839	5783,6	462,7	533,6	99,53	8809,2	714,0
	6,3	DIN	47,41	0,978	162	6039	5926,2	474,1	548,7	99,06	9248,6	747,3
	8,0	DIN	59,50	0,973	128	7579	7315,7	585,3	682,7	98,35	11536	935,0
	8,0	BS	60,55	0,983	127	7713	7510,5	600,8	698,8	98,68	11495	935,9
	10,0	DIN	73,34	0,966	103	9342	8841,9	707,3	832,8	97,28	14110	1148,1
	10,0	BS	74,98	0,979	102	9552	9140,8	731,3	857,8	97,83	14055	1149,8
	12,5	DIN	90,06	0,957	83	11473	10590	847,2	1009,2	96,08	17148	1402,6
	12,5	BS	92,63	0,973	82	11800	11047	883,7	1047,8	96,76	17079	1405,9
	16,0	DIN	112,39	0,945	66	14317	12751	1020,1	1235,8	94,37	21059	1736,4
	16,0	BS	116,59	0,966	65	14852	13476	1078,1	1298,0	95,25	20986	1743,3
260 × 260 ×	7,1	DIN	55,36	1,016	144	7053	7447,4	572,9	664,6	102,76	11660	906,8
	8,8	DIN	67,85	1,010	117	8643	8982,3	690,9	807,7	101,95	14203	1108,0
	10,0	DIN	76,48	1,006	103	9742	10011	770,1	905,0	101,37	15939	1246,1
	11,0	BS	83,56	1,002	94	10644	10834	833,4	983,8	100,89	17348	1358,9
	14,2	DIN	105,52	0,991	74	13442	13265	1020,4	1222,2	99,34	21621	1704,8
	16,0	DIN	117,41	0,985	66	14957	14500	1115,4	1347,2	98,46	23866	1889,3
300 × 300 ×	8,0	BS	73,11	1,183	127	9313	13209	880,6	1018,4	119,09	20152	1363,1
300 × 300 ×	10,0	BS	90,68	1,179	102	11552	16151	1076,7	1254,1	118,24	24738	1679,8
	12,5	BS	112,25	1,173	82	14300	19634	1308,9	1538,1	117,18	30217	2062,2
	16,0	BS	141,71	1,166	65	18052	24157	1610,5	1916,5	115,68	7416	2572,1
350 × 350 ×	8,0	BS	85,67	1,383	127	10913	21240	1213,7	1398,1	139,51	32328	1870,3
	10,0	BS	106,38	1,379	102	13552	26055	1488,9	1725,4	138,66	39795	2309,8
	12,5	BS	131,88	1,373	82	16800	31806	1817,5	2122,2	137,60	48783	2843,4
	16,0	DIN	162,63	1,345	65	20717	37886	2164,9	2566,0	135,23	60969	3554,0
	16,0	BS	166,83	1,366	64	21252	39367	2249,5	2655,0	136,10	60723	3560,9
400 × 400 ×	10,0	BS	122,08	1,579	102	15552	39353	1967,6	2271,7	159,07	59977	3039,8
	12,5	BS	151,50	1,573	82	19300	48187	2409,3	2800,0	158,01	73716	3749,7
	16,0	BS	191,95	1,566	64	24452	59905	2995,3	3513,5	156,52	92109	4709,7
	20,0	BS	237,12	1,557	52	30207	72395	3619,7	4292,0	154,81	111929	5758,6

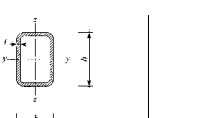
Vierkante warmgevormde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$b \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O_1 m²/m	O/A l/m	A mm²	I $\times 10^4$	W_{el} $\times 10^3$	W_{pl} $\times 10^3$	i	I_t $\times 10^4$	W_t $\times 10^3$
350 × 350 ×	19,0	DIN	190,18	1,335	55	24226	43358	2477,6	2966,5	133,78	70639	4136,8
	22,0	DIN	216,80	1,324	48	27618	48355	2763,1	3342,6	132,32	79732	4692,6
	25,0	DIN	242,49	1,314	43	30890	52893	3022,5	3694,6	130,85	88240	5220,9
400 × 400 ×	22,0	DIN	251,34	1,524	48	32018	74707	3735,4	4476,4	152,75	121838	6245,8
	25,0	DIN	281,74	1,514	42	35890	82151	4107,6	4966,9	151,29	135393	6970,9
450 × 450 ×	12,0	DIN	162,13	1,759	85	20653	65433	2908,1	3371,5	177,99	102346	4597,6
	16,0	DIN	212,87	1,745	64	27117	84067	3736,3	4376,2	176,07	133272	6011,6
	19,0	DIN	249,84	1,735	55	31826	97055	4313,6	5091,8	174,63	155390	7032,4
	22,0	DIN	285,88	1,724	47	36418	109220	4854,2	5775,1	173,18	176573	8019,0
	25,0	DIN	320,99	1,714	42	40890	120583	5359,3	6426,7	171,72	196811	8970,9
	28,0	DIN	355,17	1,704	38	45245	131166	5829,6	7046,9	170,27	216092	9887,9
	32,0	DIN	399,31	1,690	33	50867	144099	6404,4	7825,7	168,31	240293	11056
500 × 500 ×	12,0	DIN	180,97	1,959	85	23053	90752	3630,1	4195,6	198,41	141370	5708,8
	16,0	DIN	237,99	1,945	64	30317	117050	4682,0	5461,4	196,49	184571	7480,4
	19,0	DIN	279,67	1,935	54	35626	135538	5421,5	6368,1	195,05	215653	8765,2
	22,0	DIN	320,42	1,924	47	40818	152993	6119,7	7238,8	193,60	245589	10012
	25,0	DIN	360,24	1,914	42	45890	169439	6777,6	8073,9	192,15	274367	11221
	28,0	DIN	399,13	1,904	37	50845	184900	7396,0	8873,8	190,70	301976	12391
	32,0	DIN	449,55	1,890	33	57267	204023	8160,9	9886,1	188,75	336946	13891
	36,0	DIN	498,31	1,876	30	63479	221491	8859,6	10838	186,79	369788	15321
550 × 550 ×	16,0	DIN	263,11	2,145	64	33517	157695	5734,4	6666,5	216,91	247569	9109,2
	19,0	DIN	309,50	2,135	54	39426	183044	6656,1	7787,0	215,47	289740	10688
	22,0	DIN	354,96	2,124	47	45218	207126	7531,9	8867,6	214,02	330534	12225
	25,0	DIN	399,49	2,114	42	50890	229968	8362,5	9908,7	212,58	369937	13721
	28,0	DIN	443,09	2,104	37	56445	251597	9149,0	10911	211,13	407936	15174
	32,0	DIN	499,79	2,090	33	63667	278592	10131	12187	209,18	456393	17046
	36,0	DIN	554,83	2,076	29	70679	303537	11038	13395	207,23	502298	18842
	40,0	DIN	608,22	2,063	27	77480	326492	11872	14536	205,28	545622	20561
600 × 600 ×	25,0	DIN	438,74	2,314	41	55890	303422	10114	11931	233,00	485396	16471
	28,0	DIN	487,05	2,304	37	62045	332658	11089	13158	231,55	536073	18238
	32,0	DIN	550,03	2,290	33	70067	369408	12314	14727	229,61	601034	20521
	36,0	DIN	611,35	2,276	29	77879	403671	13456	16222	227,67	662982	22723
	40,0	DIN	671,02	2,263	26	85480	435511	14517	17643	225,72	721884	24841

2.15 Rechthoekige warmgevormde buisprofielen

DIN afmetingennorm DIN59410 mei 1974
afrondingsstraal $h \leq 100$ $r_a = 1{,}00 \times t$ $r_i = r_a - t$
$100 < h \leq 140$ $r_a = 1{,}40 \times t$ $r_i = r_a - t$
$h > 140$ $r_a = 2{,}00 \times t$ $r_i = r_a - t$

BS afmetingennorm BS4848.Part 2:1991
afrondingsstraal uitwendig $r_a = 1{,}25 \times t$
inwending $r_a = 1{,}00 \times t$



Benaming							Sterke as y-y				Zwakke as z-z				Torsiestijfheden	
$h \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O_u m²/m	O/A l/m	A mm²	I_y × 10^4	$W_{el}y_1$ × 10^3	$W_{el}y_2$ × 10^3	i_y	I_z × 10^4	$W_{el}z_1$ × 10^3	$W_{el}z_2$ × 10^3	i_z	I_t × 10^4	W_t × 10^3
50 × 30 ×	2,5	BS	2,92	0,155	416	372	12,03	4,81	6,01	17,98	5,30	3,53	4,16	11,93	11,63	6,50
	2,9	DIN	3,32	0,155	366	423	13,41	5,36	6,75	17,80	5,88	3,92	4,68	11,79	12,92	7,39
	3,0	BS	3,45	0,154	349	440	13,86	5,54	7,01	17,75	6,04	4,03	4,83	11,72	13,38	7,56
	3,6	DIN	4,41	0,153	272	562	16,87	6,75	8,72	17,32	7,25	4,83	5,97	11,35	16,19	9,34
	4,0	BS	4,46	0,151	266	568	17,00	6,80	8,81	17,29	7,25	4,83	6,01	11,29	16,31	9,43
	5,0	BS	5,40	0,149	217	688	19,48	7,79	10,36	16,83	8,53	5,42	6,98	10,87	18,49	10,98
60 × 40 ×	2,9	DIN	4,23	0,195	362	539	26,00	8,67	10,67	21,96	13,66	6,83	8,01	15,92	27,95	12,28
	3,0	DIN	4,37	0,195	350	556	26,72	8,91	10,99	21,92	14,02	7,01	8,24	15,88	28,73	12,64
	3,0	BS	4,39	0,194	346	560	26,89	8,96	11,07	21,92	14,08	7,04	8,29	15,86	29,02	12,60
	4,0	DIN	5,67	0,193	267	722	33,34	11,11	13,97	21,49	17,30	8,65	10,43	15,48	35,89	16,10
	4,0	BS	5,72	0,191	263	728	33,58	11,19	14,09	21,47	17,35	8,67	10,49	15,43	36,26	15,99
	5,0	DIN	6,90	0,191	218	879	38,96	12,99	16,63	21,06	19,98	9,99	12,34	15,08	41,94	19,20
	5,0	BS	6,97	0,189	213	888	39,23	13,08	16,80	21,02	20,00	10,00	12,42	15,01	42,29	18,98
	6,0	BS	8,15	0,187	180	1039	43,90	14,63	19,20	20,56	22,09	11,04	14,10	14,58	47,13	21,56
	6,3	DIN	8,38	0,189	177	1067	44,89	14,96	19,64	20,51	22,69	11,35	14,47	14,58	48,26	22,69
70 × 40 ×	2,9	DIN	4,69	0,215	360	597	38,07	10,88	13,51	25,25	15,66	7,83	9,09	16,20	34,86	14,43
	4,0	DIN	6,30	0,213	266	802	49,18	14,05	17,78	24,76	19,90	9,95	11,87	15,75	44,91	18,98
	5,0	DIN	7,68	0,211	216	979	57,87	16,53	21,27	24,32	23,07	11,53	14,09	15,35	52,64	22,70
80 × 40 ×	2,9	DIN	5,14	0,235	359	655	53,12	13,28	16,64	28,48	17,66	8,83	10,16	16,42	41,96	16,58
	3,0	DIN	5,31	0,235	347	676	54,66	13,66	17,15	28,43	18,14	9,07	10,46	16,38	43,15	17,08
	3,0	BS	5,34	0,234	344	680	55,02	13,76	17,26	28,45	18,19	9,10	10,51	16,36	43,53	17,04
	4,0	DIN	6,93	0,233	264	882	69,03	17,26	21,99	27,97	22,50	11,25	13,31	15,97	54,17	21,86
	4,0	BS	6,97	0,231	261	888	69,58	17,40	22,18	27,99	22,55	11,28	13,37	15,93	54,68	21,75
	5,0	DIN	8,47	0,231	215	1079	81,67	20,42	26,42	27,52	26,15	13,07	15,84	15,57	63,63	26,20
	5,0	BS	8,54	0,229	211	1088	82,38	20,60	26,68	27,52	26,17	13,08	15,92	15,51	64,17	25,98
	6,0	BS	10,04	0,227	178	1279	93,50	23,37	30,79	27,04	29,10	14,55	18,18	15,08	72,03	29,72
	6,3	DIN	10,36	0,229	174	1319	95,68	23,92	31,57	26,93	29,93	14,97	18,72	15,06	73,73	31,19
	8,0	BS	12,82	0,223	136	1633	110,99	27,75	37,84	26,07	33,14	16,57	21,82	14,25	82,98	35,75
90 × 50 ×	3,0	BS	6,28	0,274	342	800	85,39	18,98	23,42	32,68	33,77	13,51	15,47	20,55	76,15	24,48
	3,2	DIN	6,64	0,275	324	846	89,74	19,94	24,68	32,56	35,49	14,20	16,31	20,48	79,79	25,98
	3,6	BS	7,46	0,272	287	950	99,75	22,17	27,58	32,41	39,12	15,65	18,14	20,29	88,85	28,76
	4,0	DIN	8,18	0,273	262	1042	108,10	24,02	30,04	32,20	42,32	16,93	19,76	20,15	95,93	31,62
	5,0	DIN	10,04	0,271	212	1279	128,95	28,66	36,31	31,76	49,86	19,94	23,74	19,75	114,11	38,20
	5,0	BS	10,11	0,269	209	1288	129,95	28,88	36,62	31,76	49,98	19,99	23,86	19,70	115,23	37,98
	6,0	BS	11,92	0,267	176	1519	148,79	33,06	42,52	31,30	56,41	22,57	27,51	19,27	131,31	43,88
	6,3	DIN	12,33	0,269	171	1571	152,76	33,95	43,75	31,18	58,11	23,24	28,38	19,23	134,56	45,98
	7,1	DIN	13,68	0,268	154	1743	165,66	36,81	47,95	30,83	62,39	24,95	30,95	18,92	145,42	50,35
	8,0	BS	15,33	0,263	135	1953	180,03	40,01	52,97	30,36	66,32	26,53	33,75	18,43	156,69	53,99
100 × 50	3,0	BS	6,75	0,294	341	860	110,9	22,2	27,6	35,91	37,1	14,8	16,9	20,77	88,0	27,3
	3,6	DIN	7,98	0,294	289	1017	128,9	25,8	32,3	35,61	42,9	17,2	19,7	20,53	101,9	32,2
	4,0	DIN	8,81	0,293	261	1122	140,8	28,2	35,5	35,42	46,6	18,6	21,6	20,37	111,0	35,3
	4,0	BS	8,86	0,291	258	1128	141,8	28,4	35,7	35,45	46,7	18,7	21,7	20,34	112,0	35,2
100 × 50 ×	4,5	DIN	9,83	0,292	234	1252	155,0	31,0	39,3	35,19	50,9	20,4	23,8	20,17	121,9	39,1
	5,0	DIN	10,82	0,291	211	1379	168,5	33,7	43,0	34,97	54,9	22,0	26,0	19,96	132,2	42,7
	5,0	BS	10,90	0,289	208	1388	169,9	34,0	43,3	34,98	55,1	22,0	26,1	19,92	133,5	42,5
	5,6	DIN	11,99	0,290	190	1528	183,9	36,8	47,2	34,69	59,4	23,8	28,4	19,72	143,8	46,9
	6,0	BS	12,86	0,287	175	1639	195,2	39,0	50,4	34,52	62,3	24,9	30,2	19,49	152,3	49,2
	6,3	DIN	13,32	0,289	170	1697	200,5	40,1	51,9	34,37	64,2	25,7	31,1	19,44	156,2	51,5
	7,1	DIN	14,80	0,288	153	1885	218,1	43,6	57,0	34,01	69,0	27,6	34,0	19,13	169,0	56,4
	8,0	DIN	16,40	0,286	137	2089	236,0	47,2	62,4	33,61	73,7	29,5	36,9	18,78	181,7	61,6
	8,0	BS	16,59	0,283	134	2113	238,0	47,6	63,1	33,56	73,5	29,4	37,1	18,64	182,4	60,7

Rechthoekige warmgevormde buisprofielen (vervolg)

Benaming						Sterke as y-y				Zwakke as z-z				Torsiestijfheden	
$b \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O_o m^2/m	O/A 1/m	A mm^2	I_y $\times 10^4$	$W_{el}y$ $\times 10^3$	$W_{pl}y$ $\times 10^3$	i_y	I_z $\times 10^4$	$W_{el}z$ $\times 10^3$	$W_{pl}z$ $\times 10^3$	i_z	I_t $\times 10^4$	W_t $\times 10^3$
100 × 60 ×	3,0	BS	7,22	0,314	341	920	125,0	25,0	30,5	36,86	56,2	18,7	21,3	24,71	121,0	33,1
	3,6	DIN	8,55	0,314	288	1089	145,7	29,1	35,8	36,57	65,2	21,7	25,0	24,47	140,6	39,1
	3,6	BS	8,59	0,312	285	1094	146,5	29,3	36,0	36,60	65,4	21,8	25,1	24,46	141,8	39,0
	4,5	DIN	10,53	0,312	233	1342	175,6	35,1	43,6	36,17	77,9	26,0	30,3	24,10	169,1	47,7
	5,0	DIN	11,61	0,311	211	1479	191,1	38,2	47,7	35,95	84,5	28,2	33,1	23,90	184,3	52,2
	5,0	BS	11,68	0,309	208	1488	192,5	38,5	48,1	35,96	84,7	28,2	33,3	23,86	186,1	52,0
	5,6	DIN	12,87	0,310	189	1640	208,8	41,8	52,5	35,69	91,8	30,6	36,4	23,66	201,2	57,4
	6,0	BS	13,81	0,307	175	1759	221,8	44,4	56,1	35,51	96,6	32,2	38,6	23,44	214,1	60,4
	6,3	DIN	14,31	0,309	170	1823	228,2	45,6	57,8	35,38	99,6	33,2	39,9	23,38	219,7	63,3
	7,1	DIN	15,91	0,308	152	2027	248,8	49,8	63,6	35,03	107,8	35,9	43,8	23,06	239,2	69,6
	8,0	DIN	17,66	0,306	136	2249	269,9	54,0	69,7	34,64	116,0	38,7	47,8	22,71	259,0	76,3
	8,0	BS	17,84	0,303	133	2273	272,0	54,4	70,5	34,59	116,0	38,7	48,1	22,59	261,0	75,4
110 × 60 ×	3,6	DIN	9,04	0,331	288	1152	181,6	33,0	40,9	39,70	70,2	23,4	26,8	24,68	161,5	43,1
	4,5	DIN	11,13	0,329	232	1418	218,5	39,7	49,8	39,26	83,7	27,9	32,4	24,30	194,9	52,6
	5,6	DIN	13,58	0,327	189	1730	259,4	47,2	59,8	38,72	98,3	32,8	38,8	23,84	232,1	63,4
	7,1	DIN	16,76	0,323	151	2134	307,8	56,0	72,3	37,98	115,1	38,4	46,6	23,22	276,3	76,8
120 × 60 ×	3,6	DIN	9,61	0,351	287	1224	225,5	37,6	46,9	42,92	75,9	25,3	28,8	24,91	182,0	47,2
	3,6	BS	9,72	0,352	285	1238	229,9	38,3	47,6	43,09	75,6	25,2	29,2	24,92	182,5	47,2
	4,0	DIN	10,61	0,350	259	1351	246,6	41,1	51,5	42,72	82,7	27,6	31,6	24,74	199,2	51,9
	5,0	DIN	13,04	0,348	209	1661	296,1	49,3	62,5	42,21	98,2	32,7	38,1	24,31	239,5	63,1
	5,0	BS	13,25	0,349	207	1688	304,1	50,7	63,9	42,45	99,9	33,3	38,8	24,33	240,1	63,0
	5,6	DIN	15,69	0,347	174	1999	352,3	58,7	74,8	41,98	114,2	38,1	45,1	23,90	276,8	73,4
	6,3	DIN	16,08	0,345	168	2048	353,7	58,9	75,7	41,56	115,7	38,6	45,9	23,77	286,4	76,6
	7,1	DIN	17,87	0,343	151	2276	385,5	64,3	83,3	41,15	125,1	41,7	50,3	23,44	312,2	84,3
	8,0	DIN	19,82	0,341	135	2525	418,2	69,7	91,3	40,70	134,4	44,8	54,9	23,07	338,8	92,5
	8,0	BS	20,36	0,343	132	2593	436,7	72,8	94,8	41,04	137,8	45,9	56,4	23,05	339,0	92,1
	10,0	DIN	23,91	0,336	110	3045	479,4	79,9	107,1	39,68	150,9	50,3	63,7	22,26	387,3	108,6
120 × 80 ×	4,0	DIN	11,86	0,390	258	1511	300,4	50,1	60,7	44,59	159,9	40,0	45,9	32,52	328,3	70,4
	5,0	DIN	14,61	0,388	208	1861	362,2	60,4	74,0	44,11	191,8	47,9	55,8	32,10	398,0	86,1
	5,0	BS	14,82	0,389	206	1888	370,3	61,7	75,4	44,29	195,0	48,8	56,7	32,14	399,2	86,0
	6,0	BS	17,57	0,387	173	2239	430,3	71,7	88,5	43,84	225,2	56,3	66,3	31,72	464,4	100,8
	6,3	DIN	18,05	0,385	167	2300	435,2	72,5	90,1	43,50	228,9	57,2	67,7	31,55	481,5	105,2
	8,0	DIN	22,33	0,381	134	2845	518,7	86,5	109,2	42,70	270,5	67,6	81,7	30,83	578,7	128,3
	8,0	BS	22,87	0,383	131	2913	537,3	89,5	112,7	42,95	277,6	69,4	83,9	30,87	580,1	127,9
	10,0	DIN	27,05	0,376	109	3445	600,8	100,1	129,1	41,76	310,2	77,5	96,2	30,00	675,9	152,6
	10,0	BS	27,88	0,379	107	3552	627,6	104,6	134,4	42,04	320,0	80,0	99,4	30,02	676,6	151,8
140 × 70 ×	4,0	DIN	12,49	0,410	258	1591	400,6	57,2	71,2	50,17	135,1	38,6	43,8	29,14	323,2	71,7
	5,0	DIN	15,40	0,408	208	1961	483,9	69,1	86,8	49,67	161,8	46,2	53,2	28,72	391,0	87,6
	6,3	DIN	19,04	0,405	167	2426	582,8	83,3	105,9	49,02	192,5	55,0	64,5	28,17	471,6	107,0
	7,1	DIN	21,21	0,403	149	2702	638,6	91,2	116,9	48,61	209,4	59,8	71,0	27,84	517,0	118,2
	8,0	DIN	23,59	0,401	133	3005	696,9	99,6	128,7	48,16	226,6	64,8	77,8	27,46	564,4	130,2
	10,0	DIN	28,62	0,396	109	3645	810,1	115,7	152,6	47,14	258,8	73,9	91,5	26,64	655,7	154,6
140 × 80 ×	4,0	DIN	13,12	0,430	258	1671	437,6	62,5	76,7	51,17	183,0	45,7	52,0	33,09	408,2	82,6
	5,0	DIN	16,18	0,428	208	2061	529,5	75,6	93,6	50,68	219,9	55,0	63,3	32,66	495,6	101,1
	6,3	DIN	20,03	0,425	166	2552	639,2	91,3	114,3	50,05	262,2	65,8	77,0	32,11	600,7	123,8
	7,1	DIN	22,33	0,423	149	2844	701,4	100,2	126,4	49,66	287,3	71,8	84,9	31,78	660,6	137,1
	8,0	DIN	24,85	0,421	133	3165	766,7	109,5	139,3	49,22	312,1	78,0	93,3	31,40	723,7	151,4
	8,8	DIN	27,02	0,419	122	3443	820,7	117,2	150,2	48,82	332,3	83,1	100,3	31,07	776,2	163,5
	10,0	DIN	30,19	0,416	108	3845	894,8	127,8	165,6	48,24	359,5	89,9	110,2	30,58	848,3	180,6
150 × 100 ×	5,0	DIN	18,33	0,483	207	2336	719,2	95,9	116,7	55,49	384,0	76,8	88,3	40,55	806,7	137,3
	5,0	BS	18,75	0,489	205	2388	746,5	99,5	120,5	55,91	395,7	79,1	90,8	40,71	803,7	137,5
	6,0	BS	22,28	0,487	172	2839	873,4	116,5	142,1	55,47	460,6	92,1	106,8	40,28	941,4	162,0
	6,3	DIN	22,68	0,478	166	2889	867,6	115,7	142,5	54,80	461,2	92,2	107,6	39,96	985,0	168,7
	8,0	DIN	28,10	0,473	132	3579	1039,3	138,6	173,3	53,89	549,5	109,9	130,6	39,18	1197,7	207,0
	8,0	BS	29,15	0,483	130	3713	1106,1	147,5	182,8	54,58	577,4	115,5	136,7	39,43	1194,0	207,9
	10,0	DIN	34,09	0,466	107	4342	1210,4	161,4	205,7	52,79	635,9	127,2	154,6	38,27	1417,9	248,1
	10,0	BS	35,73	0,479	105	4552	1311,7	174,9	220,2	53,68	677,6	135,5	163,9	38,58	1416,3	249,8
	12,5	DIN	41,00	0,457	88	5223	1380,0	184,0	240,3	51,40	719,8	144,0	180,0	37,12	1646,4	293,2
	12,5	BS	43,56	0,473	85	5550	1532,3	204,3	262,6	52,55	781,3	156,3	194,1	37,52	1651,9	296,5

Rechthoekige warmgevormde buisprofielen (vervolg)

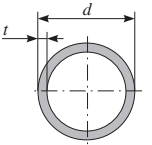
Benaming						Sterke as y-y				Zwakke as z-z				Torsiestijfheden	
$h \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O_o m^2/m	O/A l/m	A mm^2	I_y $\times 10^4$	$W_{el}y_0$ $\times 10^3$	$W_{pl}y_0$ $\times 10^3$	i_y	I_z $\times 10^4$	$W_{el}z_0$ $\times 10^3$	$W_{pl}y_0$ $\times 10^3$	i_z	I_t $\times 10^4$	W_t $\times 10^3$
160 × 80 ×	4,5	DIN	15,91	0,465	229	2027	660,9	82,6	103,2	57,10	224,3	56,1	63,7	33,27	547,2	105,3
	5,0	DIN	17,55	0,463	207	2236	721,7	90,2	113,2	56,82	244,1	61,0	69,7	33,04	599,5	115,8
	6,0	DIN	17,96	0,469	205	2288	752,9	94,1	117,2	57,37	251,4	62,8	71,7	33,15	597,4	116,0
	5,6	DIN	19,48	0,461	186	2482	791,4	98,9	124,8	56,47	266,6	66,7	76,8	32,78	660,0	128,0
	6,0	BS	21,34	0,467	172	2719	830,3	110,0	138,1	56,91	291,1	72,8	84,1	32,72	696,5	136,3
	6,3	DIN	21,69	0,458	166	2763	868,5	108,6	137,8	56,06	291,2	72,8	84,6	32,46	727,3	141,8
	7,1	DIN	24,15	0,456	148	3077	950,9	118,9	152,1	55,60	317,2	79,3	93,2	32,11	800,1	156,9
	8,0	DIN	26,84	0,453	132	3419	1036,7	129,6	167,3	55,06	343,8	85,9	102,2	31,71	876,6	173,1
	8,0	BS	27,89	0,463	130	3553	1113,3	139,2	177,4	55,98	360,8	90,2	107,0	31,87	874,8	174,0
	10,0	DIN	32,52	0,446	108	4142	1201,7	150,2	197,9	53,86	393,5	98,4	120,2	30,82	1025,8	206,1
	10,0	BS	34,16	0,459	105	4352	1318,1	164,8	213,5	55,04	418,7	104,7	127,4	31,02	1026,7	207,8
	12,5	DIN	39,04	0,437	88	4973	1360,9	170,1	230,2	52,32	439,0	109,8	138,8	29,71	1171,5	241,4
	12,5	BS	41,60	0,453	86	5300	1536,4	192,0	254,1	53,84	475,6	118,9	149,6	29,96	1179,9	244,7
160 × 90 ×	4,5	DIN	16,62	0,485	229	2117	715,3	89,4	110,2	58,13	293,1	65,1	74,0	37,21	672,4	119,3
	5,0	DIN	18,33	0,483	207	2336	781,8	97,7	120,9	57,85	319,5	71,0	81,2	36,99	737,8	131,3
	5,6	DIN	20,36	0,481	185	2594	858,2	107,3	133,4	57,52	349,7	77,7	89,5	36,72	813,6	145,3
	6,0	DIN	22,68	0,478	166	2889	942,9	117,9	147,5	57,13	382,9	85,1	98,8	36,40	898,7	161,1
	7,1	DIN	25,27	0,476	148	3219	1034,0	129,2	163,0	56,68	418,2	92,9	108,9	36,04	991,2	178,6
	8,0	DIN	28,10	0,473	132	3579	1129,2	141,1	179,4	56,17	454,6	101,0	119,7	35,64	1089,2	197,4
	10,0	DIN	34,09	0,466	107	4342	1314,4	164,3	212,9	55,02	524,2	116,5	141,4	34,74	1284,1	236,1
180 × 100 ×	5,0	DIN	20,69	0,543	206	2636	1124,2	124,9	154,0	65,31	451,8	90,4	102,6	41,40	1042,6	165,8
	5,6	DIN	23,00	0,541	185	2930	1237,0	137,4	170,3	64,98	495,7	99,1	113,3	41,13	1151,9	183,7
	6,3	DIN	25,65	0,538	165	3267	1362,8	151,4	188,6	64,59	544,3	108,9	125,3	40,82	1275,2	204,1
	7,1	DIN	28,61	0,536	147	3645	1499,2	166,6	208,8	64,14	596,6	119,3	138,5	40,46	1410,2	226,7
	8,0	DIN	31,86	0,533	131	4059	1643,4	182,6	230,6	63,65	651,3	130,3	152,7	40,06	1554,6	251,2
	8,8	DIN	34,69	0,530	120	4419	1763,4	195,9	249,1	63,17	696,4	139,3	164,7	39,70	1676,3	272,2
	10,0	DIN	38,80	0,526	106	4942	1929,6	214,4	275,3	62,48	757,9	151,6	181,6	39,16	1847,0	302,1
	12,5	DIN	46,89	0,517	87	5973	2224,0	247,1	324,3	61,02	864,3	172,9	212,9	38,04	2156,2	358,9
200 × 100 ×	5,0	DIN	22,67	0,589	204	2888	1508,7	150,9	186,5	72,28	508,6	101,7	114,6	41,97	1199,9	185,0
	5,6	DIN	24,76	0,581	184	3154	1607,1	160,8	200,7	71,39	545,7	109,1	123,9	41,59	1330,7	204,9
	6,0	BS	26,99	0,587	171	3439	1773,8	177,4	220,5	71,82	593,4	118,7	135,0	41,54	1408,0	218,4
	6,3	DIN	27,62	0,578	164	3519	1773,8	177,4	222,6	70,99	599,7	119,9	137,1	41,28	1473,6	227,7
	7,1	DIN	30,84	0,576	147	3929	1954,3	195,4	246,7	70,53	658,0	131,6	151,4	40,93	1630,5	253,1
	8,0	DIN	34,38	0,573	131	4379	2146,2	214,6	272,8	70,01	719,2	143,8	167,4	40,53	1798,6	280,6
	8,0	BS	35,43	0,583	129	4513	2268,7	226,9	285,6	70,90	747,1	149,4	173,5	40,69	1792,8	281,5
	8,8	DIN	37,45	0,570	119	4771	2307,0	230,7	295,0	69,54	769,8	154,0	180,7	40,17	1940,5	304,3
	10,0	DIN	41,94	0,566	106	5342	2531,0	253,1	326,7	68,83	839,3	167,9	199,6	39,64	2140,1	338,1
	10,0	BS	43,58	0,579	104	5552	2710,8	271,8	346,5	69,97	881,0	176,2	208,9	39,84	2135,9	339,8
	12,5	DIN	50,81	0,557	86	6473	2913,9	291,4	386,5	67,33	960,6	192,1	234,7	38,52	2594,3	402,6
	12,5	BS	53,38	0,573	84	6800	3218,0	321,8	416,9	68,79	1022,1	204,4	248,8	38,77	2506,6	405,9
200 × 120 ×	6,3	DIN	29,60	0,618	164	3771	2010,0	201,0	247,0	73,01	910,0	151,7	173,6	49,12	2027,8	276,5
	7,1	DIN	33,07	0,616	146	4213	2218,6	221,9	274,1	72,57	1001,7	167,0	192,4	48,76	2250,1	307,9
	8,0	DIN	36,89	0,613	130	4699	2441,3	244,1	303,5	72,08	1098,9	183,2	212,8	48,36	2490,3	342,1
	10,0	DIN	45,08	0,606	105	5742	2898,2	289,8	364,7	70,97	1293,2	215,5	255,0	47,46	2986,7	414,1
	12,5	DIN	54,74	0,597	86	6973	3374,0	337,4	433,4	69,56	1496,5	249,4	302,0	46,33	3533,5	496,4
220 × 120 ×	6,3	DIN	31,58	0,658	164	4023	2542,5	231,1	285,9	79,50	991,6	165,3	187,9	49,65	2115,1	305,2
	7,1	DIN	35,30	0,656	146	4497	2809,8	255,4	317,6	79,05	1092,3	182,1	208,5	49,29	2369,9	339,9
	8,0	DIN	39,40	0,653	130	5019	3096,4	281,5	352,1	78,54	1199,4	199,9	230,7	48,88	2845,6	377,9
	10,0	DIN	48,22	0,646	105	6142	3680,5	334,6	424,2	77,41	1414,6	235,8	277,0	47,99	3417,0	458,1
	12,5	DIN	58,66	0,637	85	7473	4312,2	392,0	505,6	75,96	1641,6	273,6	328,8	46,87	4049,8	550,1
250 × 150 ×	6,3	DIN	36,41	0,787	170	4639	3997,1	319,8	387,2	92,83	1807,1	240,9	271,7	62,42	3867,4	421,2
	6,3	DIN	37,52	0,778	163	4779	4055,0	324,4	395,2	92,11	1843,9	245,9	278,3	62,02	4206,2	440,3
	8,0	DIN	46,94	0,773	129	5979	4972,2	397,8	489,1	91,19	2250,4	300,1	343,7	61,35	5019,7	547,8
	8,0	BS	47,99	0,783	128	6113	5158,0	413,4	505,2	91,94	2317,2	309,0	353,2	61,57	5019,7	548,7
	10,0	DIN	57,64	0,766	104	7342	5960,2	476,8	592,8	90,10	2682,9	357,7	415,7	60,45	6079,8	668,1
	10,0	BS	59,28	0,779	103	7552	6259,1	500,7	617,8	91,04	2784,2	371,2	430,2	60,72	6057,5	669,8
	12,5	DIN	70,44	0,757	84	8973	7061,3	564,9	712,4	88,71	3157,3	421,0	498,1	59,32	7291,7	808,9
	12,5	BS	73,00	0,773	83	9300	7517,9	601,4	751,0	89,91	3309,7	441,3	520,4	59,66	7269,8	812,2
	16,0	BS	91,47	0,766	66	11652	9088,8	727,1	923,6	88,32	3942,8	525,7	635,4	58,17	8766,6	994,5
260 × 140 ×	6,3	DIN	37,52	0,778	163	4779	4259,4	327,6	403,4	94,41	1633,9	233,4	263,1	58,47	3804,9	426,4
	7,1	DIN	41,99	0,776	145	5349	4722,0	363,2	449,2	93,96	1806,2	258,0	292,6	58,11	4234,2	475,9
	8,0	DIN	46,94	0,773	129	5979	5222,3	401,7	499,2	93,46	1991,3	284,5	324,8	57,71	4702,3	530,2
	8,8	DIN	51,27	0,770	118	6531	5649,2	434,6	542,4	93,01	2148,1	306,9	352,5	57,35	5105,2	577,4
	10,0	DIN	57,64	0,766	104	7342	6258,8	481,4	605,0	92,33	2370,1	338,6	392,5	56,81	5686,0	646,1
	12,5	DIN	70,44	0,757	84	8973	7413,1	570,2	726,9	90,90	2783,4	397,6	469,8	55,70	6804,3	781,4

Rechthoekige warmgevormde buisprofielen (vervolg)

Benaming							Sterke as y-y				>Zwakke as z-z				Torsiestijfheden	
$h \times b \times$ mm mm	t mm	NORM afm	M kg/m	O_s m²/m	O/A 1/m	A mm²	I_y $\times 10^4$	$W_{el}y_o$ $\times 10^3$	$W_{pl}y_o$ $\times 10^3$	i_y	I_z $\times 10^4$	$W_{el}z_o$ $\times 10^3$	$W_{pl}z_o$ $\times 10^3$	i_z	I_t $\times 10^4$	W_t $\times 10^3$
260 × 180 ×	6,3	DIN	41,47	0,858	162	5283	5070,6	390,0	467,3	97,97	2884,1	320,5	363,7	73,89	5815,5	554,3
	8,0	DIN	51,96	0,853	129	6619	6238,7	479,9	579,8	97,08	3538,1	393,1	450,8	73,11	7224,6	691,5
	10,0	DIN	63,92	0,846	104	8142	7509,5	577,7	705,0	96,03	4244,3	471,6	547,3	72,20	8792,8	846,1
	12,5	DIN	78,29	0,837	84	9973	8945,8	688,1	850,7	94,71	5034,9	559,4	659,3	71,05	10615	1029
300 × 200 ×	6,0	BS	45,83	0,987	169	5839	7532,3	502,2	598,9	113,6	4032,6	403,3	453,3	83,11	8084,5	684,0
	6,3	DIN	47,41	0,978	162	6039	7701,5	513,4	615,0	112,9	4138,1	413,8	466,6	82,78	8485,4	715,8
	8,0	DIN	59,50	0,973	128	7579	9513,7	634,2	765,3	112,0	5097,0	509,7	580,0	82,01	10570	895,0
	8,0	BS	60,55	0,983	127	7713	9797,6	653,2	784,8	112,7	5219,5	521,9	592,8	82,26	10533	895,9
	10,0	DIN	73,34	0,966	103	9342	11507	767,1	933,9	111,0	6144,3	614,4	706,7	81,10	12908	1098
	10,0	BS	74,98	0,979	102	9552	11944	796,3	964,1	111,8	6331,3	633,1	726,5	81,42	12859	1100
	12,5	DIN	90,06	0,957	83	11473	13795	919,6	1132,0	109,7	7335,0	733,5	855,2	79,96	15654	1340
	12,5	BS	92,63	0,973	82	11800	14465	964,3	1178,8	110,7	7619,0	761,9	885,7	80,36	15594	1343
	16,0	DIN	112,39	0,945	66	14317	16629	1108,6	1386,5	107,8	8791,7	879,2	1045,0	78,36	19163	1656
	16,0	BS	116,59	0,966	65	14852	17698	1179,9	1462,1	109,2	9238,8	923,9	1093,9	78,87	19104	1663
400 × 200 ×	10,0	BS	90,68	1,179	102	11552	24140	1207,0	1491,7	144,6	8138,0	813,8	916,5	83,93	19198	1480
	12,5	BS	112,25	1,173	82	14300	29411	1470,5	1831,2	143,4	9819,6	982,0	1120,0	82,87	23335	1812
	16,0	BS	141,71	1,166	65	18052	36299	1814,9	2284,7	141,8	11954	1195,4	1388,3	81,38	28685	2252
450 × 250 ×	10,0	BS	106,38	1,379	102	13552	37182	1652,5	2013,0	165,6	14904	1192,3	1337,8	104,9	33202	2110
	12,5	BS	131,88	1,373	82	16800	45470	2020,9	2477,8	164,5	18104	1448,3	1641,6	103,8	40582	2593
	16,0	BS	166,83	1,366	64	21252	56421	2507,6	3103,2	162,9	22251	1780,1	2046,8	102,3	50300	3241
500 × 300 ×	10,0	BS	122,08	1,579	102	15552	54118	2164,7	2609,3	186,5	24564	1637,6	1834,1	125,7	52344	2840
	12,5	BS	151,50	1,573	82	19300	66363	2654,5	3218,1	185,4	29972	1998,2	2256,9	124,6	64214	3500
	16,0	BS	191,95	1,566	64	24452	82673	3306,9	4041,7	183,9	37076	2471,7	2825,3	123,1	80017	4390

2.16 Ronde buisprofielen

DIN afmetingennorm DIN2448 febr 1981
BS afmetingennorm BS4848:Part 2:1991



Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	I $\times 10^4$	W_{el} $\times 10^3$	W_{pl} $\times 10^3$	i	$I_t = 2I$ I_t $\times 10^4$	$W_t = 2W$ W_t $\times 10^3$
13,5 ×	1,8	DIN	0,52	0,042	641	66	0,12	0,17	0,25	4,19	0,23	0,34
	2,6	DIN	0,70		476	89	0,14	0,21	0,31	3,96	0,28	0,41
	3,6	DIN	0,88		379	112	0,16	0,23	0,37	3,72	0,31	0,46
16,0 ×	1,8	DIN	0,63	0,050	626	80	0,21	0,26	0,36	5,06	0,41	0,51
	2,6	DIN	0,86		459	109	0,25	0,32	0,47	4,83	0,51	0,64
	2,9	DIN	0,94		421	119	0,27	0,34	0,51	4,74	0,54	0,67
	3,6	DIN	1,10		358	140	0,29	0,37	0,57	4,57	0,58	0,73
	4,0	DIN	1,18		333	151	0,30	0,38	0,60	4,47	0,60	0,75
17,2 ×	2,6	DIN	0,94	0,054	453	119	0,33	0,38	0,56	5,24	0,66	0,76
	2,9	DIN	1,02		415	130	0,35	0,40	0,60	5,16	0,69	0,81
	3,6	DIN	1,21		351	154	0,38	0,44	0,68	4,97	0,76	0,88
	4,0	DIN	1,30		326	166	0,39	0,46	0,72	4,88	0,79	0,92
	4,5	DIN	1,41		301	180	0,41	0,47	0,76	4,76	0,81	0,95
20,0 ×	2,0	DIN	0,89	0,063	556	113	0,46	0,46	0,65	6,40	0,93	0,93
	2,6	DIN	1,12		442	142	0,55	0,55	0,79	6,22	1,10	1,10
	2,9	DIN	1,22		403	156	0,59	0,59	0,86	6,13	1,17	1,17
	3,6	DIN	1,46		339	185	0,65	0,65	0,98	5,94	1,31	1,31
	4,0	DIN	1,58		313	201	0,68	0,68	1,05	5,83	1,37	1,37
	5,0	DIN	1,85		267	236	0,74	0,74	1,17	5,59	1,47	1,47

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
21,3 ×	2,0	DIN	0,95	0,067	552	121	0,57	0,54	0,75	6,86	1,14	1,07
	2,6	DIN	1,20		438	153	0,68	0,64	0,92	6,68	1,36	1,28
	2,9	DIN	1,32		399	168	0,73	0,68	0,99	6,59	1,45	1,37
	3,6	DIN	1,57		334	200	0,82	0,77	1,14	6,39	1,63	1,53
	4,0	DIN	1,71		308	217	0,86	0,80	1,22	6,28	1,71	1,61
	5,0	DIN	2,01		261	256	0,93	0,87	1,37	6,03	1,86	1,75
24,0 ×	2,0	DIN	1,09	0,075	545	138	0,84	0,70	0,97	7,81	1,69	1,41
	2,9	DIN	1,51		392	192	1,09	0,91	1,30	7,53	2,18	1,82
	4,0	DIN	1,97		300	251	1,31	1,09	1,62	7,21	2,61	2,18
	5,0	DIN	2,34		253	298	1,44	1,20	1,85	6,95	2,88	2,40
25,0 ×	2,0	DIN	1,13	0,079	543	145	0,96	0,77	1,06	8,16	1,93	1,54
	2,6	DIN	1,44		429	183	1,16	0,93	1,31	7,97	2,33	1,86
	2,9	DIN	1,58		390	201	1,25	1,00	1,42	7,88	2,50	2,00
	3,6	DIN	1,90		325	242	1,42	1,14	1,66	7,67	2,85	2,28
	4,0	DIN	2,07		298	264	1,51	1,21	1,79	7,56	3,01	2,41
	5,0	DIN	2,47		250	314	1,67	1,34	2,04	7,29	3,34	2,67
	6,3	DIN	2,91		212	370	1,80	1,44	2,29	6,98	3,60	2,88
26,9 ×	2,3	DIN	1,40	0,085	475	178	1,36	1,01	1,40	8,74	2,71	2,02
	2,6	DIN	1,56		426	198	1,48	1,10	1,54	8,64	2,96	2,20
	2,9	DIN	1,72		386	219	1,60	1,19	1,68	8,55	3,19	2,38
	3,2	DIN	1,87		355	238	1,70	1,27	1,81	8,46	3,41	2,53
	4,0	DIN	2,26		294	288	1,94	1,45	2,12	8,22	3,89	2,89
	5,0	DIN	2,70		246	344	2,17	1,61	2,44	7,94	4,34	3,23
	6,3	DIN	3,20		207	408	2,37	1,76	2,76	7,62	4,73	3,52
28,0 ×	2,3	DIN	1,46	0,088	474	186	1,55	1,10	1,52	9,12	3,09	2,21
	2,9	DIN	1,80		385	229	1,82	1,30	1,84	8,93	3,65	2,61
	4,0	DIN	2,37		292	302	2,23	1,59	2,33	8,60	4,46	3,19
	5,0	DIN	2,84		243	361	2,50	1,79	2,69	8,32	5,00	3,57
30,0 ×	2,6	DIN	1,76	0,094	421	224	2,12	1,41	1,96	9,73	4,24	2,83
	2,9	DIN	1,94		382	247	2,29	1,53	2,14	9,64	4,59	3,06
	3,2	DIN	2,11		350	269	2,45	1,64	2,31	9,54	4,91	3,27
	4,0	DIN	2,56		288	327	2,83	1,88	2,73	9,30	5,65	3,77
	5,0	DIN	3,08		240	393	3,19	2,13	3,17	9,01	6,38	4,25
	6,3	DIN	3,68		201	469	3,53	2,35	3,62	8,67	7,05	4,70
	7,1	DIN	4,01		185	511	3,67	2,45	3,84	8,48	7,34	4,89
	8,0	DIN	4,34		170	553	3,79	2,53	4,04	8,28	7,58	5,05
31,8 ×	2,6	DIN	1,87	0,100	419	239	2,56	1,61	2,22	10,36	5,12	3,22
	2,9	DIN	2,07		379	263	2,78	1,75	2,43	10,27	5,55	3,49
	3,6	DIN	2,50		313	319	3,22	2,03	2,88	10,05	6,44	4,05
	4,0	DIN	2,74		286	349	3,44	2,17	3,11	9,93	6,89	4,33
	4,5	DIN	3,03		259	386	3,69	2,32	3,38	9,78	7,39	4,65
	5,0	DIN	3,30		237	421	3,91	2,46	3,63	9,64	7,82	4,92
	5,6	DIN	3,62		217	461	4,14	2,60	3,90	9,47	8,27	5,20
	6,3	DIN	3,96		198	505	4,35	2,74	4,18	9,29	8,71	5,48
	7,1	DIN	4,32		181	551	4,55	2,86	4,45	9,09	9,10	5,72
	8,0	DIN	4,70		167	598	4,71	2,96	4,70	8,88	9,43	5,93
33,7 ×	2,6	DIN	1,99	0,106	417	254	3,09	1,84	2,52	11,03	6,19	3,67
	4,0	DIN	2,93		284	373	4,19	2,49	3,55	10,60	8,38	4,97
	5,0	DIN	3,54		235	451	4,78	2,84	4,16	10,30	9,57	5,68

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
35,0 ×	2,6	DIN	2,08	0,110	415	265	3,50	2,00	2,74	11,49	6,99	3,99
	2,9	DIN	2,30		376	292	3,80	2,17	3,00	11,40	7,60	4,34
	4,0	DIN	3,06		282	390	4,76	2,72	3,87	11,05	9,51	5,44
	4,5	DIN	3,38		255	431	5,12	2,93	4,22	10,90	10,25	5,85
	5,0	DIN	3,70		233	471	5,45	3,11	4,54	10,75	10,90	6,23
	5,6	DIN	4,06		213	517	5,79	3,31	4,90	10,58	11,58	6,62
	6,3	DIN	4,46		194	568	6,13	3,50	5,27	10,39	12,26	7,01
	7,1	DIN	4,89		177	622	6,45	3,68	5,65	10,18	12,89	7,37
	8,0	DIN	5,33		162	679	6,73	3,84	6,00	9,96	13,45	7,69
	10,0	DIN	6,17		140	785	7,12	4,07	6,58	9,52	14,24	8,13
38,0 ×	2,6	DIN	2,27	0,119	413	289	4,55	2,40	3,26	12,55	9,11	4,79
	2,9	DIN	2,51		373	320	4,96	2,61	3,58	12,45	9,92	5,22
	3,2	DIN	2,75		341	350	5,34	2,81	3,89	12,36	10,68	5,62
	3,6	DIN	3,05		307	389	5,82	3,06	4,28	12,23	11,64	6,12
	4,0	DIN	3,35		279	427	6,26	3,29	4,65	12,10	12,52	6,59
	5,0	DIN	4,07		230	518	7,22	3,80	5,49	11,80	14,44	7,60
	6,3	DIN	4,93		190	627	8,19	4,31	6,41	11,43	16,38	8,62
	7,1	DIN	5,41		173	689	8,66	4,56	6,90	11,21	17,32	9,12
	8,0	DIN	5,92		158	754	9,09	4,78	7,37	10,98	18,17	9,56
	10,0	DIN	6,91		136	880	9,72	5,12	8,17	10,51	19,44	10,23
42,4 ×	2,6	DIN	2,55	0,133	410	325	6,46	3,05	4,12	14,10	12,93	6,10
	2,6	BS	2,55		410	325	6,46	3,05	4,12	14,10	12,93	6,10
	3,2	BS	3,09		338	394	7,62	3,59	4,93	13,91	15,24	7,19
	4,0	DIN	3,79		276	483	8,99	4,24	5,92	13,65	17,98	8,48
	4,0	BS	3,79		276	483	8,99	4,24	5,92	13,65	17,98	8,48
	5,0	DIN	4,61		227	587	10,46	4,93	7,04	13,34	20,91	9,86
	5,6	DIN	5,08		206	647	11,21	5,29	7,64	13,16	22,43	10,58
	6,3	DIN	5,61		186	714	11,99	5,66	8,29	12,96	23,99	11,31
	7,1	DIN	6,18		169	787	12,76	6,02	8,97	12,73	25,52	12,04
	8,0	DIN	6,79		154	865	13,48	6,36	9,64	12,49	26,96	12,72
	8,8	DIN	7,29		143	929	14,01	6,61	10,16	12,28	28,02	13,22
	10,0	DIN	7,99		131	1018	14,63	6,90	10,83	11,99	29,26	13,80
44,5 ×	2,6	DIN	2,69	0,140	408	342	7,54	3,39	4,57	14,84	15,08	6,78
	2,9	DIN	2,98		369	379	8,24	3,70	5,03	14,74	16,48	7,41
	4,0	DIN	4,00		275	509	10,54	4,74	6,58	14,39	21,07	9,47
	5,0	DIN	4,87		225	620	12,29	5,53	7,84	14,08	24,59	11,05
	6,3	DIN	5,94		185	756	14,17	6,37	9,28	13,69	28,33	12,73
	7,1	DIN	6,55		168	834	15,11	6,79	10,05	13,46	30,22	13,58
	8,0	DIN	7,20		152	917	16,01	7,20	10,83	13,21	32,02	14,39
	10,0	DIN	8,51		129	1084	17,48	7,86	12,24	12,70	34,96	15,71
	11,0	DIN	9,09		121	1158	17,99	8,09	12,79	12,47	35,98	16,17
	12,5	DIN	9,86		111	1257	18,54	8,33	13,45	12,15	37,08	16,66
48,3 ×	2,6	DIN	2,93	0,152	406	373	9,78	4,05	5,44	16,18	19,55	8,10
	3,2	BS	3,56	0,152	335	453	11,59	4,80	6,52	15,99	23,17	9,59
	4,0	DIN	4,37		273	557	13,77	5,70	7,87	15,73	27,54	11,40
	4,0	BS	4,37		273	557	13,77	5,70	7,87	15,73	27,54	11,40
	4,5	DIN	4,86		245	619	15,01	6,21	8,66	15,57	30,01	12,43
	5,0	DIN	5,34		223	680	16,15	6,69	9,42	15,41	32,31	13,38
	5,0	BS	5,34		223	680	16,15	6,69	9,42	15,41	32,31	13,38
	6,3	DIN	6,53		183	831	18,74	7,76	11,20	15,02	37,48	15,52
	7,1	DIN	7,21		165	919	20,08	8,31	12,17	14,78	40,16	16,63
	8,0	DIN	7,95		150	1013	21,37	8,85	13,16	14,53	42,74	17,70
	10,0	DIN	9,45		126	1203	23,57	9,76	15,00	14,00	47,13	19,52
	12,5	DIN	11,04		108	1406	25,27	10,46	16,67	13,41	50,54	20,93

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
51,0 ×	2,6	DIN	3,10	0,160	405	395	11,61	4,55	6,10	17,14	23,22	9,11
	2,9	DIN	3,44		366	438	12,72	4,99	6,72	17,04	25,44	9,98
	4,0	DIN	4,64		271	591	16,43	6,44	8,86	16,68	32,85	12,88
	5,0	DIN	5,67		222	723	19,34	7,58	10,62	16,36	38,68	15,17
	6,3	DIN	6,94		181	885	22,54	8,84	12,67	15,96	45,07	17,67
	7,1	DIN	7,69		164	979	24,21	9,49	13,80	15,72	48,41	18,99
	8,0	DIN	8,48		148	1081	25,84	10,13	14,96	15,46	51,68	20,27
	8,8	DIN	9,16		137	1167	27,10	10,63	15,90	15,24	54,20	21,25
	10,0	DIN	10,11		124	1288	28,68	11,25	17,14	14,92	57,35	22,49
	12,5	DIN	11,87		106	1512	30,97	12,14	19,18	14,31	61,93	24,29
	14,2	DIN	12,89		98	1642	31,93	12,52	20,18	13,95	63,86	25,04
54,0 ×	2,6	DIN	3,30	0,170	404	420	13,90	5,15	6,87	18,20	27,80	10,30
	2,9	DIN	3,65		364	466	15,24	5,65	7,58	18,10	30,49	11,29
	3,6	DIN	4,47		298	570	18,19	6,74	9,16	17,86	36,38	13,48
	4,0	DIN	4,93		270	628	19,76	7,32	10,02	17,73	39,52	14,64
	5,0	DIN	6,04		220	770	23,34	8,64	12,05	17,41	46,68	17,29
	6,3	DIN	7,41		180	944	27,32	10,12	14,42	17,01	54,64	20,24
	7,1	DIN	8,21		162	1046	29,42	10,90	15,74	16,77	58,84	21,79
	8,0	DIN	9,08		147	1156	31,50	11,67	17,10	16,51	63,01	23,34
	10,0	DIN	10,85		123	1382	35,18	13,03	19,69	15,95	70,36	26,06
	12,5	DIN	12,79		104	1630	38,27	14,17	22,18	15,32	76,53	28,35
	14,2	DIN	13,94		96	1776	39,63	14,68	23,45	14,94	79,26	29,36
57,0 ×	2,9	DIN	3,87	0,179	363	493	18,08	6,35	8,50	19,15	36,17	12,69
	3,6	DIN	4,74		297	604	21,62	7,59	10,28	18,92	43,25	15,18
	4,0	DIN	5,23		269	666	23,52	8,25	11,26	18,79	47,04	16,50
	5,0	DIN	6,41		219	817	27,86	9,78	13,56	18,47	55,73	19,55
	6,3	DIN	7,88		178	1003	32,74	11,49	16,28	18,06	65,48	22,98
	7,1	DIN	8,74		161	1113	35,34	12,40	17,80	17,82	70,69	24,80
	8,0	DIN	9,67		145	1232	37,95	13,31	19,38	17,55	75,89	26,63
	8,8	DIN	10,46		134	1333	39,99	14,03	20,67	17,32	79,97	28,06
	10,0	DIN	11,59		121	1477	42,62	14,95	22,42	16,99	85,23	29,91
	12,5	DIN	13,72		102	1748	46,67	16,38	25,40	16,34	93,34	32,75
	14,2	DIN	14,99		94	1909	48,53	17,03	26,97	15,94	97,06	34,06
	16,0	DIN	16,18		87	2061	49,90	17,51	28,26	15,56	99,80	35,02
60,3 ×	2,9	DIN	4,11	0,189	362	523	21,59	7,16	9,56	20,32	43,18	14,32
	3,2	BS	4,51	0,189	330	574	23,47	7,78	10,44	20,22	46,94	15,57
	3,6	DIN	5,03		295	641	25,87	8,58	11,59	20,09	51,75	17,16
	4,0	DIN	5,55		268	707	28,17	9,34	12,70	19,96	56,35	18,69
	4,0	BS	5,55		268	707	28,17	9,34	12,70	19,96	56,35	18,69
	4,5	DIN	6,19		240	789	30,90	10,25	14,04	19,79	61,80	20,50
	5,0	DIN	6,82		218	869	33,48	11,10	15,33	19,63	66,95	22,21
	5,0	BS	6,82		218	869	33,48	11,10	15,33	19,63	66,95	22,21
	5,6	DIN	7,55		197	962	36,37	12,06	16,81	19,44	72,74	24,13
	6,3	DIN	8,39		177	1069	39,49	13,10	18,45	19,22	78,97	26,19
	7,1	DIN	9,32		160	1187	42,73	14,17	20,21	18,98	85,46	28,34
	8,0	DIN	10,32		144	1314	45,99	15,25	22,05	18,71	91,99	30,51
	8,8	DIN	11,18		133	1424	48,58	16,11	23,57	18,47	97,16	32,23
	10,0	DIN	12,40		120	1580	51,95	17,23	25,63	18,13	103,90	34,46
	12,5	DIN	14,74		101	1877	57,28	19,00	29,21	17,47	114,55	37,99
	14,2	DIN	16,14		92	2057	59,82	19,84	31,13	17,05	119,63	39,68
	16,0	DIN	17,48		85	2227	61,75	20,48	32,77	16,65	123,50	40,96

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming												Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
63,5 ×	2,9	DIN	4,33	0,199	361	552	25,40	8,00	10,66	21,45	50,80	16,00
	4,0	DIN	5,87		267	748	33,24	10,47	14,18	21,08	66,48	20,94
	5,0	DIN	7,21		217	919	39,60	12,47	17,15	20,76	79,19	24,94
	6,3	DIN	8,89		176	1132	46,86	14,76	20,70	20,35	93,72	29,52
	7,1	DIN	9,88		159	1258	50,81	16,00	22,70	20,10	101,63	32,01
	8,0	DIN	10,95		143	1395	54,82	17,27	24,81	19,83	109,65	34,53
	8,8	DIN	11,87		132	1512	58,02	18,28	26,56	19,59	116,05	36,55
	10,0	DIN	13,19		119	1681	62,24	19,60	28,96	19,24	124,47	39,20
	12,5	DIN	15,72		100	2003	69,03	21,74	33,16	18,56	138,05	43,48
	14,2	DIN	17,26		91	2199	72,36	22,79	35,47	18,14	144,72	45,58
	16,0	DIN	18,74		84	2388	74,98	23,62	37,47	17,72	149,96	47,23
70,0 ×	2,9	DIN	4,80	0,220	360	611	34,47	9,85	13,07	23,75	68,94	19,70
	3,6	DIN	5,90		293	751	41,51	11,86	15,89	23,51	83,02	23,72
	4,0	DIN	6,51		265	829	45,33	12,95	17,45	23,38	90,65	25,90
	4,5	DIN	7,27		257	926	49,89	14,26	19,34	23,21	99,79	28,51
	5,0	DIN	8,01		215	1021	54,24	15,50	21,17	23,05	108,48	31,00
	6,3	DIN	9,90		174	1261	64,57	18,45	25,65	22,63	129,14	36,90
	7,1	DIN	11,01		157	1403	70,27	20,08	28,21	22,38	140,54	40,15
	8,0	DIN	12,23		141	1558	76,12	21,75	30,92	22,10	152,24	43,50
	8,8	DIN	13,28		130	1692	80,85	23,10	33,19	21,86	161,70	46,20
	10,0	DIN	14,80		117	1885	87,18	24,91	36,33	21,51	174,36	49,82
	12,5	DIN	17,73		97	2258	97,73	27,92	41,98	20,80	195,46	55,85
	14,2	DIN	19,54		88	2489	103,16	29,47	45,17	20,36	206,32	58,95
	16,0	DIN	21,31		81	2714	107,62	30,75	48,02	19,91	215,25	61,50
	17,5	DIN	22,66		76	2886	110,49	31,57	50,02	19,57	220,99	63,14
76,1 ×	2,9	DIN	5,24	0,239	358	667	44,74	11,76	15,55	25,90	89,48	23,52
	3,2	BS	5,75	0,239	326	733	48,78	12,82	17,02	25,80	97,56	25,64
	4,0	DIN	7,11		264	906	59,06	15,52	20,81	25,53	118,11	31,04
	4,0	BS	7,11		264	906	59,06	15,52	20,81	25,53	118,11	31,04
	4,5	DIN	7,95		236	1012	65,12	17,11	23,10	25,36	130,24	34,23
	5,0	DIN	8,77		214	1117	70,92	18,64	25,32	25,20	141,84	37,28
	5,0	BS	8,77		214	1117	70,92	18,64	25,32	25,20	141,84	37,28
	6,3	DIN	10,84		173	1381	84,82	22,29	30,78	24,78	169,64	44,58
	7,1	DIN	12,08		155	1539	92,56	24,33	33,92	24,52	185,13	48,65
	8,0	DIN	13,44		140	1712	100,59	26,44	37,27	24,24	201,17	52,87
	8,8	DIN	14,61		128	1861	107,14	28,16	40,08	24,00	214,28	56,32
	10,0	DIN	16,30		115	2077	116,01	30,49	44,03	23,64	232,02	60,98
	12,5	DIN	19,61		96	2498	131,16	34,47	51,21	22,92	262,32	68,94
	14,2	DIN	21,68		87	2761	139,22	36,59	55,36	22,45	278,44	73,18
	16,0	DIN	23,71		79	3021	146,06	38,39	59,16	21,99	292,13	76,77
	17,5	DIN	25,29		74	3222	150,62	39,59	61,88	21,62	301,25	79,17
	20,0	DIN	27,67		68	3525	156,29	41,08	65,61	21,06	312,59	82,15
82,5 ×	3,2	DIN	6,26	0,259	325	797	62,77	15,22	20,13	28,06	125,54	30,43
	4,0	DIN	7,74		263	986	76,18	18,47	24,67	27,79	152,36	36,94
	5,0	DIN	9,56		213	1217	91,78	22,25	30,07	27,46	183,56	44,50
	6,3	DIN	11,84		172	1508	110,21	26,72	36,66	27,03	220,42	53,44
	7,1	DIN	13,20		154	1682	120,58	29,23	40,48	26,78	241,15	58,46
	8,0	DIN	14,70		138	1872	131,40	31,85	44,57	26,49	262,80	63,71
	8,8	DIN	15,99		127	2038	140,31	34,01	48,03	26,24	280,62	68,03
	10,0	DIN	17,88		114	2278	152,50	36,97	52,90	25,88	304,99	73,94
	12,5	DIN	21,58		94	2749	173,74	42,12	61,90	25,14	347,48	84,24
	14,2	DIN	23,92		85	3047	185,35	44,93	67,20	24,66	370,70	89,87
	16,0	DIN	26,24		78	3343	195,47	47,39	72,12	24,18	390,94	94,77
	17,5	DIN	28,05		73	3574	202,41	49,07	75,72	23,80	404,82	98,14
	20,0	DIN	30,83		66	3927	211,38	51,24	80,79	23,20	422,77	102,49

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming							Torsiestijfheden					
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ / $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ / $W_t \times 10^3$
88,9 ×	3,2	DIN	6,76	0,279	324	862	79,21	17,82	23,51	30,32	158,41	35,64
	3,2	BS	6,76		324	862	79,21	17,82	23,51	30,32	158,41	35,64
	4,0	DIN	8,38		262	1067	96,34	21,67	28,85	30,05	192,68	43,35
	4,0	BS	8,38		262	1067	96,34	21,67	28,85	30,05	192,68	43,35
	4,5	DIN	9,37		234	1193	106,54	23,97	32,09	29,88	213,09	47,94
	4,5	BS	9,37		234	1193	106,54	23,97	32,09	29,88	213,09	47,94
	5,0	DIN	10,35		212	1318	116,37	26,18	35,24	29,72	232,75	52,36
	5,6	DIN	11,50		191	1465	127,69	28,73	38,92	29,52	255,37	57,45
	6,3	DIN	12,83		171	1635	140,34	31,55	43,07	29,29	280,47	63,10
	7,1	DIN	14,32		153	1825	153,76	34,59	47,63	29,03	307,52	69,18
	8,0	DIN	15,96		137	2033	167,97	37,79	52,53	28,74	335,93	75,58
	8,8	DIN	17,38		126	2214	179,74	40,44	56,69	28,49	359,48	80,87
	10,0	DIN	19,46		113	2479	195,98	44,09	62,59	28,12	391,96	88,18
	12,5	DIN	23,55		93	3000	224,76	50,57	73,61	27,37	449,52	101,13
	14,2	DIN	26,16		84	3332	240,84	54,18	80,19	26,88	481,68	108,36
	16,0	DIN	28,77		76	3664	255,15	57,40	86,40	26,39	510,30	114,80
	17,5	DIN	30,81		71	3925	265,17	59,66	91,00	25,99	530,34	119,31
	20,0	DIN	33,98		65	4329	278,54	62,66	97,61	25,37	557,07	125,33
	22,2	DIN	36,52		60	4652	287,35	64,65	102,41	24,85	574,71	129,29
95,0 ×	3,6	DIN	8,11	0,298	289	1034	108,11	22,76	30,09	32,34	216,22	45,52
	5,0	DIN	11,10		211	1414	143,58	30,23	40,54	31,87	287,16	60,45
	6,3	DIN	13,78		170	1756	173,52	36,53	49,65	31,44	347,05	73,06
	7,1	DIN	15,39		152	1961	190,59	40,13	54,98	31,18	381,19	80,25
	8,0	DIN	17,16		136	2187	208,62	43,92	60,72	30,89	417,25	87,84
	8,8	DIN	18,71		125	2383	223,65	47,08	65,62	30,63	447,30	94,17
	10,0	DIN	20,96		112	2670	244,50	51,47	72,58	30,26	489,01	102,95
	12,5	DIN	25,43		92	3240	281,96	59,36	85,73	29,50	563,92	118,72
	14,2	DIN	28,30		83	3605	303,24	63,84	93,66	29,00	606,49	127,68
	16,0	DIN	31,17		75	3971	322,49	67,89	101,22	28,50	644,99	135,79
	17,5	DIN	33,45		70	4261	336,20	70,78	106,90	28,09	672,41	141,56
	20,0	DIN	36,99		63	4712	354,90	74,72	115,17	27,44	709,80	149,43
	25,0	DIN	43,16		54	5498	379,69	79,93	127,71	26,28	759,38	159,87
101,6 ×	3,6	DIN	8,70	0,319	288	1108	133,2	26,2	34,6	34,67	266,5	52,5
	4,0	DIN	9,63		260	1226	146,3	28,8	38,1	34,54	292,6	57,6
	5,0	DIN	11,91		210	1517	177,5	34,9	46,7	34,20	354,9	69,9
	6,3	DIN	14,81		169	1886	215,1	42,3	57,3	33,77	430,1	84,7
	7,1	DIN	16,55		151	2108	236,6	46,6	63,5	33,50	473,2	93,2
	8,0	DIN	18,47		136	2352	259,5	51,1	70,3	33,21	519,0	102,2
	8,8	DIN	20,14		124	2566	278,7	54,9	76,0	32,96	557,3	109,7
	10,0	DIN	22,59		111	2878	305,4	60,1	84,2	32,58	610,8	120,2
	11,0	DIN	24,58		102	3131	326,0	64,2	90,7	32,27	652,0	128,3
	12,5	DIN	27,47		91	3499	354,1	69,7	99,9	31,81	708,1	139,4
	14,2	DIN	30,61		82	3899	382,1	75,2	109,4	31,31	764,2	150,4
	16,0	DIN	33,78		74	4303	407,9	80,3	118,6	30,79	815,7	160,6
	17,5	DIN	36,30		69	4624	426,5	84,0	125,6	30,37	853,0	167,9
	20,0	DIN	40,25		62	5127	452,4	89,0	135,8	29,70	904,7	178,1
	22,2	DIN	43,47		58	5538	470,5	92,6	143,6	29,15	941,0	185,2
	25,0	DIN	47,23		53	6016	488,3	96,1	151,9	28,49	976,5	192,2
108,0 ×	3,6	DIN	9,27	0,339	287	1181	161,1	29,8	39,3	36,93	322,1	59,7
	5,0	DIN	12,70		210	1618	215,1	39,8	53,1	36,46	430,1	79,7
	6,3	DIN	15,80		169	2013	261,2	48,4	65,2	36,03	522,5	96,8
	7,1	DIN	17,67		151	2251	287,8	53,3	72,4	35,76	575,7	106,6
	8,0	DIN	19,73		135	2513	316,2	58,5	80,2	35,47	632,3	117,1
	8,8	DIN	21,53		124	2742	340,0	63,0	86,8	35,21	680,0	125,9

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
108,0 ×	10,0	DIN	24,17		110	3079	373,5	69,2	96,4	34,83	746,9	138,3
	12,5	DIN	29,44		90	3750	434,9	80,5	114,7	34,05	869,7	161,1
	14,2	DIN	32,85		81	4184	470,8	87,2	125,9	33,54	941,5	174,4
	16,0	DIN	36,30		73	4624	504,1	93,3	136,8	33,02	1008,1	186,7
	17,5	DIN	39,06		68	4975	528,4	97,9	145,1	32,59	1056,9	195,7
	20,0	DIN	43,40		61	5529	562,9	104,2	157,5	31,91	1125,7	208,5
	25,0	DIN	51,17		52	6519	612,3	113,4	177,4	30,65	1224,6	226,8
	30,0	DIN	57,71		46	7351	641,8	118,8	191,5	29,55	1283,5	237,7
114,3 ×	3,6	DIN	9,83	0,359	287	1252	192,0	33,6	44,1	39,16	384,0	67,2
	3,6	BS	9,83		287	1252	192,0	33,6	44,1	39,16	384,0	67,2
	4,0	DIN	10,88		259	1386	211,1	36,9	48,7	39,02	422,1	73,9
	5,0	DIN	13,48		209	1717	256,9	45,0	59,8	38,68	513,8	89,9
	5,0	BS	13,48		209	1717	256,9	45,0	59,8	38,68	513,8	89,9
	5,6	DIN	15,01		188	1912	283,2	49,6	66,2	38,48	566,4	99,1
	6,3	DIN	16,78		168	2138	312,7	54,7	73,6	38,25	625,4	109,4
	6,3	BS	16,78		168	2138	312,7	54,7	73,6	38,25	625,4	109,4
	7,1	DIN	18,77		150	2391	345,0	60,4	81,7	37,98	690,0	120,7
	8,0	DIN	20,97		134	2672	379,5	66,4	90,6	37,69	759,0	132,8
	10,0	DIN	25,72		110	3277	449,7	78,7	109,1	37,04	899,3	157,4
	12,5	DIN	31,38		90	3998	525,7	92,0	130,2	36,26	1051,3	184,0
	14,2	DIN	35,05		80	4466	570,6	99,8	143,2	35,75	1141,1	199,7
	16,0	DIN	38,79		73	4941	612,6	107,2	156,0	35,21	1225,3	214,4
	17,5	DIN	41,78		67	5322	643,7	112,6	165,8	34,78	1287,4	225,3
	20,0	DIN	46,51		61	5925	688,2	120,4	180,5	34,08	1376,5	240,9
	25,0	DIN	55,06		51	7014	753,9	131,9	204,6	32,79	1507,8	263,8
	28,0	DIN	59,59		47	7591	781,1	136,7	215,9	32,08	1562,2	273,4
	30,0	DIN	62,37		45	7945	795,2	139,1	222,2	31,64	1590,3	278,3
121,0 ×	4,0	DIN	11,54	0,380	259	1470	251,9	41,6	54,8	41,39	503,7	83,3
	5,0	DIN	14,30		209	1822	307,1	50,8	67,3	41,05	614,1	101,5
	5,6	DIN	15,94		187	2030	338,8	56,0	74,6	40,85	677,5	112,0
	6,3	DIN	17,82		167	2270	374,5	61,9	83,0	40,61	748,9	123,8
	7,1	DIN	19,94		150	2541	413,6	68,4	92,2	40,35	827,2	136,7
	8,0	DIN	22,29		134	2840	455,6	75,3	102,3	40,05	911,1	150,6
	8,8	DIN	24,35		123	3102	491,1	81,2	111,0	39,79	982,2	162,4
	10,0	DIN	27,37		109	3487	541,4	89,5	123,5	39,40	1082,9	179,0
	12,5	DIN	33,45		89	4261	635,3	105,0	147,8	38,61	1270,6	210,0
	14,2	DIN	37,40		80	4764	691,3	114,3	162,9	38,09	1382,6	228,5
	17,5	DIN	44,67		67	5690	783,7	129,5	189,3	37,11	1567,4	259,1
	20,0	DIN	49,82		60	6346	840,9	139,0	206,7	36,40	1681,9	278,0
	22,2	DIN	54,09		55	6891	883,2	146,0	220,4	35,80	1766,5	292,0
	25,0	DIN	59,19		50	7540	927,5	153,3	235,6	35,07	1855,0	306,6
	30,0	DIN	67,33		44	8577	984,3	162,7	257,4	33,88	1968,5	325,4
127,0 ×	4,0	DIN	12,13	0,399	258	1546	292,6	46,1	60,5	43,51	585,2	92,2
	5,0	DIN	15,04		208	1916	357,1	56,2	74,5	43,17	714,3	112,5
	6,3	DIN	18,75		167	2389	436,2	68,7	91,9	42,73	872,4	137,4
	7,1	DIN	20,99		149	2674	482,3	75,9	102,2	42,47	964,6	151,9
	8,0	DIN	23,48		133	2991	531,8	83,7	113,5	42,17	1063,6	167,5
	8,8	DIN	25,65		122	3268	573,8	90,4	123,2	41,91	1147,7	180,7
	10,0	DIN	28,85		109	3676	633,5	99,8	137,2	41,52	1267,1	199,5
	12,5	DIN	35,30		89	4496	745,6	117,4	164,5	40,72	1491,3	234,8
	14,2	DIN	39,50		79	5032	813,0	128,0	181,6	40,20	1626,1	256,1
	16,0	DIN	43,80		72	5579	877,2	138,1	198,5	39,65	1754,3	276,3
	17,5	DIN	47,26		66	6020	925,3	145,7	211,6	39,21	1850,6	291,4
	20,0	DIN	52,78		59	6723	995,8	156,8	231,6	38,49	1991,5	313,6
	25,0	DIN	62,89		50	8011	1104,4	173,9	265,3	37,13	2208,8	347,9
	30,0	DIN	71,76		44	9142	1178,1	185,5	291,3	35,90	2356,1	371,0
	36,0	DIN	80,79		39	10292	1232,1	194,0	313,7	34,60	2464,1	388,1

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
133,0 ×	4,0	DIN	12,73	0,418	258	1621	337,5	50,8	66,6	45,63	675,1	101,5
	5,0	DIN	15,78		208	2011	412,4	62,0	82,0	45,29	824,8	124,0
	6,3	DIN	19,69		167	2508	504,4	75,9	101,2	44,85	1008,9	151,7
	7,1	DIN	22,04		149	2808	558,2	83,9	112,7	44,58	1116,4	167,9
	8,0	DIN	24,66		133	3142	616,1	92,6	125,2	44,28	1232,2	185,3
	8,8	DIN	26,95		122	3434	665,4	100,1	136,0	44,02	1330,8	200,1
	10,0	DIN	30,33		108	3864	735,6	110,6	151,6	43,63	1471,2	221,2
	11,0	DIN	33,10		99	4216	790,8	118,9	164,2	43,31	1581,5	237,8
	12,5	DIN	37,15		88	4732	868,1	130,5	182,2	42,83	1736,2	261,1
	14,2	DIN	41,60		79	5300	948,3	142,6	201,4	42,30	1896,7	285,2
	16,0	DIN	46,17		71	5881	1025,1	154,2	220,4	41,75	2050,3	308,3
	17,5	DIN	49,85		66	6350	1083,2	162,9	235,2	41,30	2166,4	325,8
	20,0	DIN	55,73		59	7100	1168,7	175,8	258,0	40,57	2337,5	351,5
	25,0	DIN	66,59		49	8482	1303,0	195,9	296,8	39,19	2606,0	391,9
	30,0	DIN	76,20		43	9708	1396,5	210,0	327,3	37,93	2793,1	420,0
	36,0	DIN	86,12		38	10970	1468,0	220,7	354,3	36,58	2936,0	441,5
139,7 ×	4,0	DIN	13,39	0,439	257	1705	392,9	56,2	73,7	48,00	785,7	112,5
	5,0	DIN	16,61		207	2116	480,5	68,8	90,8	47,66	961,1	137,6
	5,0	BS	16,61		207	2116	480,5	68,8	90,8	47,66	961,1	137,6
	5,6	DIN	18,52		186	2359	531,2	76,1	100,8	47,45	1062,5	152,1
	6,3	DIN	20,73		166	2640	588,6	84,3	112,2	47,22	1177,2	168,5
	6,3	BS	20,73		166	2640	588,6	84,3	112,2	47,22	1177,2	168,5
	7,1	DIN	23,22		148	2958	651,9	93,3	125,0	46,95	1303,8	186,7
	8,0	DIN	25,98		133	3310	720,3	103,1	138,9	46,65	1440,6	206,2
	8,0	BS	25,98		133	3310	720,3	103,1	138,9	46,65	1440,6	206,2
	8,8	DIN	28,41		121	3619	778,6	111,5	151,0	46,38	1557,2	222,9
	10,0	DIN	31,99		108	4075	861,9	123,4	168,6	45,99	1723,8	246,8
	10,0	BS	31,99		108	4075	861,9	123,4	168,6	45,99	1723,8	246,8
	11,0	DIN	34,91		99	4448	927,6	132,8	182,6	45,67	1855,2	265,6
	12,5	DIN	39,21		88	4995	1020,0	146,0	202,9	45,19	2040,0	292,1
	14,2	DIN	43,95		78	5599	1116,4	159,8	224,6	44,65	2232,7	319,6
	16,0	DIN	48,81		71	6218	1209,2	173,1	246,2	44,10	2418,4	346,2
	17,5	DIN	52,74		65	6718	1279,8	183,2	263,1	43,65	2559,5	366,4
	20,0	DIN	59,04		58	7521	1384,6	198,2	289,2	42,91	2769,2	396,5
	25,0	DIN	70,72		49	9009	1551,8	222,2	334,1	41,50	3103,7	444,3
	30,0	DIN	81,16		42	10339	1671,6	239,3	370,0	40,21	3343,1	478,6
	36,0	DIN	92,07		37	11728	1766,5	252,9	402,7	38,81	3533,0	505,8
146,0 ×	4,5	DIN	15,70	0,459	229	2000	501,2	68,7	90,1	50,05	1002,3	137,3
	5,6	DIN	19,39		186	2470	609,6	83,5	110,4	49,68	1219,2	167,0
	7,1	DIN	24,32		148	3098	749,1	102,6	137,1	49,17	1498,3	205,2
	8,0	DIN	27,23		132	3468	828,4	113,5	152,5	48,87	1656,8	227,0
	10,0	DIN	33,54		107	4273	993,2	136,0	185,3	48,21	1986,3	272,1
	12,5	DIN	41,15		87	5243	1178,2	161,4	223,4	47,41	2356,3	322,8
	14,2	DIN	46,16		78	5880	1291,5	176,9	247,6	46,87	2583,1	353,8
	16,0	DIN	51,30		70	6535	1401,3	192,0	271,8	46,31	2802,7	383,9
	20,0	DIN	62,15		58	7917	1610,7	220,6	320,2	45,11	3221,4	441,3
	25,0	DIN	74,60		48	9503	1813,5	248,4	371,2	43,68	3626,9	496,8
	30,0	DIN	85,82		42	10933	1961,9	268,8	412,7	42,36	3923,8	537,5
	36,0	DIN	97,66		37	12441	2083,2	285,4	451,2	40,92	4166,4	570,7
152,4 ×	4,5	DIN	16,41	0,479	229	2091	572,2	75,1	98,5	52,31	1144,5	150,2
	6,3	DIN	22,70		166	2892	773,0	101,4	134,6	51,70	1545,9	202,9
	7,1	DIN	25,44		148	3241	857,3	112,5	150,0	51,43	1714,7	225,0
	8,0	DIN	28,49		132	3629	948,8	124,5	167,0	51,13	1897,6	249,0
	10,0	DIN	35,12		107	4474	1139,5	149,5	203,1	50,47	2279,1	299,1

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming							Torsiestijfheden					
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
152,4 ×	12,5	DIN	43,13		87	5494	1354,8	177,8	245,3	49,66	2709,6	355,6
	14,2	DIN	48,40		78	6165	1487,4	195,2	272,2	49,12	2974,8	390,4
	16,0	DIN	53,82		70	6856	1616,4	212,1	299,0	48,56	3232,9	424,3
	17,5	DIN	58,22		65	7417	1715,5	225,1	320,3	48,09	3430,9	450,3
	20,0	DIN	65,30		58	8319	1864,5	244,7	353,3	47,34	3728,9	489,4
	25,0	DIN	78,55		48	10006	2108,2	276,7	411,0	45,90	4216,5	553,3
	30,0	DIN	90,56		42	11536	2290,1	300,5	458,5	44,56	4580,3	601,1
	36,0	DIN	103,34		36	13165	2442,8	320,6	503,3	43,08	4885,7	641,2
	40,0	DIN	110,88		34	14125	2513,1	329,8	526,7	42,18	5026,2	659,6
159,0 ×	4,5	DIN	17,15	0,500	229	2184	652,3	82,0	107,4	54,65	1304,5	164,1
	5,6	DIN	21,19		185	2699	794,9	100,0	131,8	54,27	1589,8	200,0
	6,3	DIN	23,72		165	3022	882,4	111,0	147,0	54,03	1764,8	222,0
	7,1	DIN	26,60		147	3388	979,4	123,2	163,9	53,76	1958,7	246,4
	8,0	DIN	29,79		132	3795	1084,7	136,4	182,6	53,46	2169,3	272,9
	8,8	DIN	32,60		120	4152	1175,0	147,8	198,8	53,19	2350,0	295,6
	10,0	DIN	36,75		107	4681	1304,9	164,1	222,3	52,80	2609,8	328,3
	12,5	DIN	45,16		87	5753	1554,7	195,6	268,9	51,98	3109,3	391,1
	14,2	DIN	50,71		77	6460	1709,3	215,0	298,7	51,44	3418,5	430,0
	16,0	DIN	56,43		69	7188	1860,3	234,0	328,5	50,87	3720,7	468,0
	17,5	DIN	61,07		64	7779	1976,8	248,7	352,2	50,41	3953,6	497,3
	20,0	DIN	68,56		57	8734	2152,9	270,8	389,1	49,65	4305,9	541,6
	22,2	DIN	74,90		52	9541	2290,7	288,1	419,1	49,00	4581,3	576,3
	25,0	DIN	82,62		47	10524	2444,4	307,5	454,1	48,19	4888,8	614,9
	30,0	DIN	95,44		41	12158	2665,8	335,3	508,2	46,83	5331,6	670,6
	32,0	DIN	100,22		39	12767	2737,5	344,3	527,1	46,30	5475,0	688,7
	36,0	DIN	109,20		36	13911	2856,1	359,3	560,2	45,31	5712,2	718,5
	40,0	DIN	117,39		33	14954	2946,1	370,6	587,8	44,39	5892,2	741,2
165,1 ×	4,5	DIN	17,82	0,519	228	2270	732,6	88,7	116,1	56,80	1465,1	177,5
	8,8	DIN	33,92		120	4321	1323,7	160,4	215,2	55,35	2647,4	320,7
168,3 ×	4,5	DIN	18,18	0,529	228	2316	777,2	92,4	120,8	57,93	1554,4	184,7
	5,0	BS	20,14	0,529	206	2565	855,8	101,7	133,4	57,76	1711,7	203,4
	5,6	DIN	22,47		185	2862	948,3	112,7	148,3	57,56	1896,5	225,4
	6,3	DIN	25,17		165	3206	1053,4	125,2	165,4	57,32	2106,8	250,4
	6,3	BS	25,17		165	3206	1053,4	125,2	165,4	57,32	2106,8	250,4
	7,1	DIN	28,23		147	3596	1170,2	139,1	184,6	57,05	2340,4	278,1
	8,0	DIN	31,63		131	4029	1297,3	154,2	205,7	56,75	2594,5	308,3
	8,0	BS	31,63		131	4029	1297,3	154,2	205,7	56,75	2594,5	308,3
	8,8	DIN	34,61		120	4410	1406,5	167,1	224,1	56,48	2813,0	334,3
	10,0	DIN	39,04		106	4973	1564,0	185,9	250,9	56,08	3128,0	371,7
	10,0	BS	39,04		106	4973	1564,0	185,9	250,9	56,08	3128,0	371,7
	12,5	DIN	48,03		86	6118	1868,4	222,0	304,1	55,26	3736,7	444,1
	14,2	DIN	53,96		77	6874	2057,9	244,6	338,2	54,71	4115,8	489,1
	16,0	DIN	60,10		69	7655	2244,1	266,7	372,5	54,14	4488,2	533,4
	17,5	DIN	65,08		64	8291	2388,4	283,8	399,7	53,67	4776,8	567,7
	20,0	DIN	73,15		57	9318	2608,2	309,9	442,5	52,91	5216,4	619,9
	22,2	DIN	79,99		52	10190	2781,5	330,5	477,5	52,25	5563,0	661,1
	25,0	DIN	88,35		47	11255	2976,9	353,8	518,6	51,43	5953,7	707,5
	30,0	DIN	102,32		41	13034	3263,0	387,8	582,8	50,03	6526,0	775,5
	36,0	DIN	117,46		35	14963	3516,1	417,8	645,7	48,48	7032,2	835,7
	40,0	DIN	126,56		33	16123	3639,9	432,5	679,8	47,51	7279,7	865,1
171,0 ×	12,5	DIN	48,86	0,537	86	6224	1966,8	230,0	314,7	56,21	3933,5	460,1
	17,5	DIN	66,25		64	8439	2517,9	294,5	414,1	54,62	5035,7	589,0
177,8 ×	5,0	DIN	21,31	0,559	206	2714	1014,0	114,1	149,3	61,12	2027,9	228,1
	6,3	DIN	26,65		165	3394	1249,6	140,6	185,4	60,68	2499,2	281,1
	7,1	DIN	29,89		147	3808	1389,2	156,3	207,0	60,40	2778,4	312,5
	8,0	DIN	33,50		131	4268	1541,4	173,4	230,8	60,10	3082,9	346,8
	8,8	DIN	36,68		120	4672	1672,5	188,1	251,6	59,83	3345,1	376,3

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
177,8 ×	10,0	DIN	41,38		106	5272	1862,0	209,4	281,9	59,43	3724,0	418,9
	12,5	DIN	50,96		86	6491	2229,8	250,8	342,2	58,61	4459,6	501,6
	14,2	DIN	57,29		77	7298	2460,1	276,7	381,0	58,06	4920,3	553,5
	16,0	DIN	63,84		69	8133	2687,5	302,3	420,2	57,48	5374,9	604,6
	17,5	DIN	69,18		63	8813	2864,5	322,2	451,5	57,01	5728,9	644,4
	20,0	DIN	77,83		56	9915	3135,7	352,7	500,7	56,24	6271,4	705,4
	22,2	DIN	85,19		51	10852	3351,1	377,0	541,1	55,57	6702,3	753,9
	25,0	DIN	94,21		47	12001	3596,2	404,5	588,9	54,74	7192,4	809,0
	30,0	DIN	109,35		40	13930	3960,4	445,5	664,3	53,32	7920,8	891,0
	36,0	DIN	125,89		35	16037	4290,6	482,6	739,4	51,72	8581,2	965,3
193,7 ×	5,0	BS	23,27		205	2964	1320,2	136,3	178,1	66,74	2640,5	272,6
	5,6	DIN	25,98		184	3309	1464,9	151,3	198,2	66,53	2929,7	302,5
	6,3	DIN	29,12		164	3709	1630,0	168,3	221,3	66,29	3260,1	336,6
	6,3	BS	29,12		164	3709	1630,0	168,3	221,3	66,29	3260,1	336,6
	7,1	DIN	32,67		146	4162	1814,2	187,3	247,3	66,02	3628,4	374,6
	8,0	DIN	36,64		130	4667	2015,5	208,1	276,0	65,72	4031,1	416,2
	8,0	BS	36,64		130	4667	2015,5	208,1	276,0	65,72	4031,1	416,2
	8,8	DIN	40,13		119	5112	2189,5	226,1	301,1	65,45	4378,9	452,1
	10,0	DIN	45,30		105	5771	2441,6	252,1	337,8	65,04	4883,2	504,2
	10,0	BS	45,30		105	5771	2441,6	252,1	337,8	65,04	4883,2	504,2
	12,5	DIN	55,86		86	7116	2934,3	303,0	411,1	64,22	5868,6	605,9
	12,5	BS	55,86		86	7116	2934,3	303,0	411,1	64,22	5868,6	605,9
	14,2	DIN	62,86		76	8008	3245,3	335,1	458,5	63,66	6490,5	670,2
	16,0	DIN	70,12		68	8932	3554,3	367,0	506,6	63,08	7108,5	734,0
	16,0	BS	70,12		68	8932	3554,3	367,0	506,6	63,08	7108,5	734,0
	17,5	DIN	76,04		63	9687	3796,5	392,0	545,1	62,60	7592,9	784,0
	20,0	DIN	85,67		56	10914	4170,7	430,6	606,1	61,82	8341,4	861,2
	22,2	DIN	93,89		51	11961	4471,2	461,7	656,6	61,14	8942,4	923,3
	25,0	DIN	104,01		46	13250	4817,0	497,4	716,7	60,30	9634,1	994,7
	30,0	DIN	121,11		39	15428	5341,6	551,5	812,9	58,84	10683	1103,1
	36,0	DIN	140,01		34	17835	5833,4	602,3	910,8	57,19	11667	1204,6
	40,0	DIN	151,62		32	19315	6089,8	628,8	966,3	56,15	12180	1257,6
	50,0	DIN	177,19		27	22572	6531,8	674,4	1074,2	53,79	13064	1348,8
203,0 ×	5,6	DIN	27,26	0,638	184	3473	1692,9	166,8	218,3	69,82	3385,9	333,6
	7,1	DIN	34,30		146	4370	2098,9	206,8	272,6	69,31	4197,8	413,6
	8,0	DIN	38,47		130	4901	2333,4	229,9	304,4	69,00	4666,7	459,8
	10,0	DIN	47,60		105	6063	2830,7	278,9	372,8	68,33	5661,4	557,8
	12,5	DIN	58,73		85	7481	3408,2	335,8	454,3	67,50	6816,3	671,6
	14,2	DIN	66,12		76	8422	3774,0	371,8	507,1	66,94	7548,0	743,6
	16,0	DIN	73,79		68	9400	4138,8	407,8	560,9	66,36	8277,6	815,5
	20,0	DIN	90,26		55	11498	4870,8	479,9	672,4	65,09	9741,6	959,8
	22,2	DIN	98,99		51	12610	5230,1	515,3	729,3	64,40	10460	1030,6
	25,0	DIN	109,74		46	13980	5646,0	556,3	797,3	63,55	11292	1112,5
	30,0	DIN	127,99		39	16305	6283,3	619,0	906,9	62,08	12567	1238,1
	36,0	DIN	148,26		34	18887	6890,3	678,8	1019,6	60,40	13781	1357,7
	40,0	DIN	160,79		31	20483	7212,4	710,6	1084,1	59,34	14425	1421,2
	50,0	DIN	188,66		27	24033	7783,4	766,8	1212,1	56,91	15567	1533,7
219,1 ×	6,3	DIN	33,06	0,688	163	4212	2386,1	217,8	285,4	75,27	4772,3	435,6
	8,0	DIN	41,65		130	5306	2959,6	270,2	356,7	74,69	5919,3	540,3
	8,8	DIN	45,64		118	5814	3219,7	293,9	389,4	74,42	6439,5	587,8
	10,0	DIN	51,57		105	6569	3598,4	328,5	437,6	74,01	7196,9	656,9
	12,5	DIN	63,69		85	8113	4344,6	396,6	534,2	73,18	8689,2	793,2
	14,2	DIN	71,75		75	9141	4820,1	440,0	597,1	72,62	9640,2	880,0
	16,0	DIN	80,14		67	10209	5296,6	483,5	661,4	72,03	10593	967,0
	17,5	DIN	87,01		62	11084	5673,2	517,9	713,0	71,54	11346	1035,7
	20,0	DIN	98,20		55	12510	6261,3	571,5	795,5	70,75	12523	1143,1

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
219,1 ×	25,0	DIN	119,67		45	15245	7298,3	666,2	947,1	69,19	14597	1332,4
	28,0	DIN	131,96		41	16810	7838,4	715,5	1029,9	68,29	15677	1431,0
	30,0	DIN	139,90		39	17822	8166,8	745,5	1081,8	67,69	16334	1491,0
	36,0	DIN	162,56		33	20708	9013,6	822,8	1222,5	65,98	18027	1645,6
	40,0	DIN	176,68		31	22506	9474,3	864,8	1304,4	64,88	18949	1729,7
	45,0	DIN	193,21		28	24613	9948,4	908,1	1394,4	63,58	19897	1816,2
	50,0	DIN	208,51		26	26562	10324	942,4	1471,4	62,34	20649	1884,9
229,0 ×	6,5	DIN	35,67	0,719	158	4544	2814,1	245,8	321,9	78,70	5628,1	491,5
	8,0	DIN	43,60		130	5554	3395,4	296,5	390,9	78,19	6790,9	593,1
	10,0	DIN	54,01		105	6880	4133,3	361,0	479,9	77,51	8266,6	722,0
	12,5	DIN	66,74		85	8502	4997,9	436,5	586,6	76,67	9995,8	873,0
	16,0	DIN	84,05		67	10707	6106,1	533,3	727,3	75,52	12212	1066,6
	17,5	DIN	91,28		62	11628	6546,2	571,7	784,6	75,03	13092	1143,4
	20,0	DIN	103,09		55	13132	7235,8	631,9	876,3	74,23	14472	1263,9
	22,2	DIN	113,22		50	14423	7799,0	681,1	953,1	73,53	15598	1362,3
	25,0	DIN	125,77		45	16022	8459,9	738,9	1045,6	72,66	16920	1477,7
	30,0	DIN	147,23		38	18755	9495,1	829,3	1197,0	71,15	18990	1658,5
	36,0	DIN	171,35		33	21828	10517	918,5	1356,5	69,41	21034	1837,0
	40,0	DIN	186,44		30	23750	11080	967,7	1450,2	68,30	22160	1935,3
244,5 ×	6,3	DIN	37,01	0,768	163	4714	3346,0	273,7	357,5	84,25	6692,1	547,4
	8,0	DIN	46,66		129	5944	4160,4	340,3	447,6	83,66	8320,9	680,6
	10,0	DIN	57,83		104	7367	5073,1	415,0	550,2	82,98	10146	830,0
	12,5	DIN	71,52		84	9111	6147,4	502,9	673,5	82,14	12295	1005,7
	14,2	DIN	80,65		75	10274	6837,2	559,3	754,1	81,58	13674	1118,6
	16,0	DIN	90,16		67	11486	7532,9	616,2	836,8	80,98	15066	1232,4
	20,0	DIN	110,73		54	14106	8957,2	732,7	1010,7	79,69	17914	1465,4
	25,0	DIN	135,33		45	17239	10517	860,3	1209,7	78,11	21034	1720,6
	30,0	DIN	158,70		38	20216	11854	969,7	1389,3	76,58	23709	1939,4
	36,0	DIN	185,11		33	23581	13196	1079,4	1580,6	74,81	26392	2158,8
	40,0	DIN	201,73		30	25698	13948	1140,9	1694,1	73,67	27896	2281,8
	45,0	DIN	221,40		27	28204	14745	1206,2	1821,4	72,31	29491	2412,3
254,0 ×	6,5	DIN	39,67	0,798	158	5054	3872,6	304,9	398,3	87,53	7745,1	609,9
	8,0	DIN	48,53		129	6183	4681,8	368,6	484,3	87,02	9363,6	737,3
	10,0	DIN	60,17		104	7665	5714,2	449,9	595,7	86,34	11428	899,9
	12,5	DIN	74,45		84	9484	6932,4	545,9	729,7	85,50	13865	1091,7
	16,0	DIN	93,91		67	11963	8508,8	670,0	907,7	84,34	17018	1340,0
	20,0	DIN	115,42		54	14703	10137	798,2	1097,8	83,03	20273	1596,3
	22,2	DIN	126,91		49	16167	10958	862,8	1196,5	82,33	21915	1725,6
	25,0	DIN	141,19		44	17986	11930	939,4	1316,2	81,44	23861	1878,8
	30,0	DIN	165,73		38	21112	13479	1061,3	1514,3	79,90	26957	2122,6
	36,0	DIN	193,54		32	24655	15046	1184,7	1726,4	78,12	30092	2369,4
	40,0	DIN	211,10		30	26892	15932	1254,5	1853,2	76,97	31864	2509,0
	50,0	DIN	251,55		25	32044	17671	1391,4	2122,5	74,26	35342	2782,8
	60,0	DIN	287,06		22	36568	18849	1484,2	2330,2	71,79	37698	2968,4
267,0 ×	6,3	DIN	40,50	0,839	163	5160	4386,1	328,5	428,3	92,20	8772,2	657,1
	7,1	DIN	45,51		145	5797	4898,5	366,9	479,7	91,92	9797,0	733,9
	8,0	DIN	51,10		129	6509	5463,4	409,2	536,8	91,61	10927	818,5
	10,0	DIN	63,38		104	8074	6676,0	500,1	660,8	90,93	13352	1000,1
	12,5	DIN	78,45		84	9994	8111,1	607,6	810,3	90,09	16222	1215,1
	14,2	DIN	88,53		74	11278	9037,5	677,0	908,4	89,52	18075	1353,9
	16,0	DIN	99,04		66	12617	9976,1	747,3	1009,4	88,92	19952	1494,6
	17,5	DIN	107,68		61	13717	10726	803,5	1091,2	88,43	21452	1606,9
	20,0	DIN	121,83		54	15519	11913	892,4	1222,8	87,61	23826	1784,7
	22,2	DIN	134,02		49	17073	12894	965,9	1334,0	86,91	25789	1931,8
	25,0	DIN	149,20		44	19007	14062	1053,4	1469,3	86,02	28125	2106,7

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming										Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t \times 10^4$	$W_t \times 10^3$
267,0 ×	30,0	DIN	175,34		38	22337	15934	1193,6	1694,1	84,46	31868	2387,1
	32,0	DIN	185,45		36	23625	16611	1244,3	1778,1	83,85	33222	2488,5
	36,0	DIN	205,09		32	26125	17849	1337,0	1936,5	82,66	35699	2674,0
	40,0	DIN	223,93		29	28526	18944	1419,0	2082,5	81,49	37888	2838,1
	50,0	DIN	267,58		25	34086	21129	1582,7	2396,1	78,73	42258	3165,4
	60,0	DIN	306,30		21	39019	22655	1697,0	2642,9	76,20	45309	3394,0
273,0 ×	6,3	DIN	41,44	0,858	162	5279	4695,8	344,0	448,2	94,32	9391,6	688,0
	8,0	DIN	52,28		129	6660	5851,7	428,7	562,0	93,73	11703	857,4
	10,0	DIN	64,86		104	8262	7154,1	524,1	692,0	93,05	14308	1048,2
	12,5	DIN	80,30		84	10230	8697,4	637,2	848,9	92,21	17395	1274,4
	14,2	DIN	90,63		74	11545	9695,0	710,3	952,0	91,64	19390	1420,5
	16,0	DIN	101,41		66	12918	10707	784,4	1058,1	91,04	21414	1568,8
	20,0	DIN	124,79		54	15896	12798	937,6	1282,8	89,73	25597	1875,2
	25,0	DIN	152,90		44	19478	15127	1108,2	1542,8	88,13	30254	2216,4
	30,0	DIN	179,78		37	22902	17162	1257,3	1780,5	86,57	34324	2514,6
	36,0	DIN	210,41		32	26804	19254	1410,5	2037,6	84,75	38507	2821,1
	40,0	DIN	229,85		29	29280	20455	1498,5	2192,9	83,58	40910	2997,1
	50,0	DIN	274,98		24	35029	22869	1675,4	2528,1	80,80	45738	3350,8
	60,0	DIN	315,17		21	40150	24576	1800,4	2794,1	78,24	49152	3600,9
279,0 ×	10,0	DIN	66,34	0,877	104	8451	7654,5	548,7	723,9	95,17	15309	1097,4
	12,5	DIN	82,15		84	10465	9311,4	667,5	888,4	94,33	18623	1335,0
	16,0	DIN	103,78		66	13220	11472	822,4	1108,1	93,16	22945	1644,8
	20,0	DIN	127,75		54	16273	13727	984,0	1344,3	91,84	27454	1968,0
	25,0	DIN	156,60		44	19949	16244	1164,4	1618,1	90,24	32488	2328,9
	30,0	DIN	184,22		37	23468	18452	1322,7	1869,0	88,67	36904	2645,4
	36,0	DIN	215,74		32	27483	20731	1486,1	2141,3	86,85	41461	2972,1
	40,0	DIN	235,76		29	30034	22045	1580,3	2306,2	85,67	44090	3160,6
292,0 ×	7,5	DIN	52,62	0,917	137	6703	6786,9	464,9	607,2	100,62	13574	929,7
	10,0	DIN	69,55		104	8859	8817,7	603,9	795,6	99,76	17635	1207,9
	12,5	DIN	86,16		84	10976	10739	735,6	977,2	98,92	21479	1471,2
	16,0	DIN	108,91		66	13873	13255	907,8	1220,2	97,74	26509	1815,7
	20,0	DIN	134,16		54	17090	15891	1088,4	1482,3	96,43	31781	2176,8
	25,0	DIN	164,62		44	20970	18851	1291,1	1787,4	94,81	37701	2582,3
	30,0	DIN	193,84		37	24693	21466	1470,2	2068,3	93,24	42931	2940,5
	36,0	DIN	227,28		32	28953	24187	1656,7	2374,8	91,40	48375	3313,3
	40,0	DIN	248,59		29	31667	25771	1765,1	2561,5	90,21	51542	3530,2
298,5 ×	7,1	DIN	51,02	0,938	144	6500	6903,1	462,5	603,0	103,06	13806	925,0
	8,0	DIN	57,31		128	7301	7707,6	516,4	675,3	102,75	15415	1032,8
	10,0	DIN	71,15		103	9063	9441,0	632,6	832,7	102,06	18882	1265,1
	12,5	DIN	88,16		83	11231	11505	770,9	1023,1	101,21	23011	1541,7
	16,0	DIN	111,47		66	14200	14211	952,2	1278,3	100,04	28422	1904,3
	20,0	DIN	137,36		54	17499	17053	1142,6	1553,9	98,72	34106	2285,2
	25,0	DIN	168,62		44	21481	20253	1357,0	1875,3	97,10	40506	2713,9
	30,0	DIN	198,65		37	25306	23069	1547,0	2171,8	95,52	46178	3094,0
	40,0	DIN	255,00		29	32484	27783	1861,5	2694,2	92,48	55566	3723,0
	50,0	DIN	306,42		24	39034	31351	2100,5	3129,3	89,62	62701	4201,1
	60,0	DIN	352,91		21	44956	33988	2277,3	3484,9	86,95	67976	4554,5
	70,0	DIN	394,46		19	50250	35873	2403,6	3769,2	84,49	71747	4807,2
	80,0	DIN	431,08		17	54915	37165	2490,1	3990,0	82,27	74331	4980,3
	90,0	DIN	462,77		16	58952	38004	2546,3	4155,5	80,29	76007	5092,6
305,0 ×	7,5	DIN	55,03	0,958	137	7010	7759,9	508,8	663,9	105,22	15520	1017,7
	10,0	DIN	72,75		103	9268	10093	661,8	870,6	104,36	20186	1323,7
	12,5	DIN	90,17		83	11486	12307	807,0	1070,1	103,51	24613	1614,0
	16,0	DIN	114,03		66	14527	15213	997,5	1337,7	102,33	30425	1995,1
	20,0	DIN	140,57		54	17907	18271	1198,1	1622,2	101,01	36542	2396,2
	25,0	DIN	172,63		44	21991	21723	1424,5	1965,2	99,39	43446	2848,9

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
305,0 ×	30,0	DIN	203,46		37	25918	24792	1625,7	2277,8	97,80	49585	3251,5
	36,0	DIN	238,82		31	30423	28011	1836,8	2620,5	95,95	56022	3673,6
	40,0	DIN	261,41		29	33301	29898	1960,5	2830,3	94,75	59796	3921,0
318,0 ×	7,5	DIN	57,43	0,999	137	7316	8821,8	554,8	723,2	109,81	17644	1109,7
	10,0	DIN	75,96		103	9676	11486	722,4	949,0	108,95	22972	1444,8
	12,5	DIN	94,18		83	11997	14019	881,7	1167,3	108,10	28039	1763,4
	16,0	DIN	119,16		66	15180	17355	1091,5	1460,6	106,92	34709	2183,0
	20,0	DIN	146,98		53	18724	20878	1313,1	1778,7	105,60	41756	2626,2
	25,0	DIN	180,65		43	23012	24874	1564,4	2151,4	103,97	49749	3128,9
	30,0	DIN	213,08		37	27143	28448	1789,2	2497,3	102,37	56895	3578,3
	45,0	DIN	302,97		26	38594	36932	2322,8	3384,2	97,82	73864	4645,5
323,9 ×	7,1	DIN	55,47	1,018	144	7066	8869,4	547,7	712,7	112,03	17739	1095,3
	8,0	DIN	62,32		128	7939	9910,1	611,9	798,5	111,72	19820	1223,8
	10,0	DIN	77,41		103	9861	12158	750,7	985,7	111,04	24317	1501,5
	12,5	DIN	95,99		83	12229	14847	916,7	1212,8	110,19	29693	1833,5
	14,2	DIN	108,45		74	13816	16599	1025,0	1362,9	109,61	33198	2049,9
	16,0	DIN	121,49		66	15477	18390	1135,5	1518,2	109,01	36780	2271,1
	20,0	DIN	149,89		53	19095	22139	1367,0	1849,8	107,68	44278	2734,1
	25,0	DIN	184,28		43	23476	26400	1630,1	2238,7	106,05	52800	3260,3
	30,0	DIN	217,44		37	27699	30219	1866,0	2600,3	104,45	60438	3731,9
	36,0	DIN	255,60		31	32561	34263	2115,7	2999,5	102,58	68526	4231,3
	40,0	DIN	280,06		29	35676	36657	2263,5	3245,3	101,37	73313	4526,9
	45,0	DIN	309,51		26	39429	39335	2428,8	3530,7	99,88	78670	4857,7
	50,0	DIN	337,74		24	43024	41691	2574,3	3792,7	98,44	83382	5148,6
	60,0	DIN	390,49		20	49744	45543	2812,1	4250,6	95,68	91085	5624,3
	70,0	DIN	438,31		18	55836	48413	2989,4	4626,9	93,12	96826	5978,8
	80,0	DIN	481,20		17	61299	50485	3117,3	4929,6	90,75	100970	6234,6
	90,0	DIN	519,15		15	66134	51923	3206,1	5166,8	88,61	103845	6412,2
343,0 ×	10,0	DIN	82,12	1,078	103	10462	14514	846,3	1109,2	117,79	29028	1692,6
	16,0	DIN	129,03		66	16437	22022	1284,1	1712,2	115,75	44044	2568,2
	20,0	DIN	159,31		53	20295	26568	1549,2	2089,2	114,42	53136	3098,3
	22,2	DIN	175,63		48	22374	28919	1686,3	2288,3	113,69	57839	3372,5
	25,0	DIN	196,06		43	24976	31766	1852,2	2533,3	112,78	63531	3704,4
	30,0	DIN	231,57		37	29500	36457	2125,8	2948,1	111,17	72915	4251,6
	36,0	DIN	272,56		31	34721	41468	2417,9	3408,5	109,28	82935	4835,9
	45,0	DIN	330,71		26	42129	47831	2789,0	4026,6	106,55	95663	5578,0
355,6 ×	8,0	DIN	68,58	1,117	128	8736	13201	742,5	966,8	122,93	26403	1485,0
	10,0	DIN	85,23		103	10857	16223	912,5	1194,7	122,24	32447	1824,9
	12,5	DIN	105,77		83	13474	19852	1116,5	1472,1	121,38	39704	2233,1
	14,2	DIN	119,56		73	15230	22227	1250,1	1656,0	120,81	44455	2500,3
	16,0	DIN	134,00		65	17070	24663	1387,1	1846,6	120,20	49326	2774,2
	17,5	DIN	145,92		60	18588	26631	1497,8	2002,2	119,70	53263	2995,7
	20,0	DIN	165,53		53	21086	29792	1675,6	2255,2	118,86	59583	3351,1
	25,0	DIN	203,83		43	25965	35677	2006,6	2737,6	117,22	71353	4013,1
	28,0	DIN	226,22		39	28817	38941	2190,2	3012,3	116,25	77883	4380,4
	30,0	DIN	240,89		36	30687	41011	2306,6	3189,5	115,60	82023	4613,2
	36,0	DIN	283,75		31	36146	46737	2628,6	3692,7	113,71	93473	5257,2
	40,0	DIN	311,33		28	39659	50171	2821,8	4005,5	112,47	100342	5643,5
	45,0	DIN	344,69		25	43910	54063	3040,7	4371,6	110,96	108126	6081,3
	50,0	DIN	376,83		23	48004	57539	3236,2	4711,2	109,48	115078	6472,3
	60,0	DIN	437,40		20	55719	63366	3563,9	5314,8	106,64	126733	7127,8
	70,0	DIN	493,03		18	62807	67884	3818,0	5824,0	103,96	135768	7636,0
	80,0	DIN	543,74		16	69266	71305	4010,4	6247,1	101,46	142610	8020,8
	90,0	DIN	589,51		15	75097	73823	4152,0	6591,9	99,15	147646	8304,1

Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
368,0 ×	8,0	DIN	71,03	1,156	128	9048	14665	797,0	1037,0	127,31	29329	1594,0
	10,0	DIN	88,29		103	11247	18032	980,0	1282,0	126,62	36064	1960,0
	12,5	DIN	109,59		83	13960	22081	1200,1	1580,4	125,77	44163	2400,1
	16,0	DIN	138,89		65	17693	27460	1492,4	1983,8	124,58	54920	2984,8
	20,0	DIN	171,64		53	21865	33209	1804,9	2424,7	123,24	66419	3609,7
	25,0	DIN	211,47		43	26939	39828	2164,5	2946,4	121,59	79655	4329,1
	30,0	DIN	250,07		36	31856	45850	2491,8	3436,3	119,97	91700	4983,7
	36,0	DIN	294,15		31	37548	52342	2844,7	3983,6	118,07	104685	5689,4
	40,0	DIN	323,56		28	41218	56254	3057,3	4324,7	116,82	112508	6114,6
	45,0	DIN	358,45		25	45663	60706	3299,2	4725,2	115,30	121411	6598,4
	50,0	DIN	392,12		23	49951	64702	3516,4	5097,9	113,81	129404	7032,8
	60,0	DIN	455,74		20	58057	71456	3883,5	5763,8	110,94	142912	7767,0
	70,0	DIN	514,44		18	65534	76760	4171,7	6330,6	108,23	153519	8343,4
	80,0	DIN	568,20		16	72382	80837	4393,3	6806,2	105,68	161673	8786,6
	90,0	DIN	617,03		15	78603	83893	4559,4	7198,6	103,31	167785	9118,8
394,0 ×	12,5	DIN	117,60	1,238	83	14981	27285	1385,0	1819,9	134,95	54569	2770,0
	16,0	DIN	149,15		65	19000	33996	1725,7	2287,5	133,76	67993	3451,4
	20,0	DIN	184,47		53	23499	41205	2091,6	2800,2	132,42	82409	4183,2
	25,0	DIN	227,50		43	28981	49553	2515,4	3409,2	130,76	99106	5030,7
	30,0	DIN	269,30		36	34306	57204	2903,7	3983,9	129,13	114408	5807,5
406,4 ×	8,8	DIN	86,29	1,277	116	10992	21732	1069,5	1391,4	140,61	43463	2139,0
	10,0	DIN	97,76		103	12453	24476	1204,5	1571,7	140,19	48952	2409,0
	12,5	DIN	121,43		83	15468	30031	1477,9	1940,1	139,33	60061	2955,8
	14,2	DIN	137,35		73	17496	33685	1657,7	2185,2	138,75	67371	3315,5
	16,0	DIN	154,05		65	19624	37449	1843,0	2440,0	138,14	74898	3685,9
	20,0	DIN	190,58		53	24278	45432	2235,8	2998,8	136,80	90864	4471,7
	25,0	DIN	235,15		43	29955	54702	2692,0	3641,9	135,13	109404	5384,1
	30,0	DIN	278,48		36	35475	63224	3111,4	4259,3	133,50	126447	6222,8
	36,0	DIN	328,85		30	41891	72520	3568,9	4954,6	131,57	145040	7137,8
	40,0	DIN	361,44		28	46043	78186	3847,8	5391,3	130,31	156373	7695,5
	45,0	DIN	401,07		25	51092	84707	4168,6	5907,8	128,76	169414	8337,3
	50,0	DIN	439,47		23	55983	90637	4460,5	6392,7	127,24	181275	8921,0
	60,0	DIN	512,56		20	65295	100875	4964,3	7271,6	124,29	201750	9928,6
	70,0	DIN	580,73		17	73978	109178	5372,9	8035,9	121,48	218356	10746
	80,0	DIN	643,96		16	82033	115807	5699,2	8693,6	118,82	231615	11398
	90,0	DIN	702,26		14	89460	121005	5955,0	9252,8	116,30	242009	11910
419,0 ×	10,0	DIN	100,87	1,316	102	12849	26884	1283,2	1673,1	144,65	53767	2566,5
	12,5	DIN	125,31		82	15963	33004	1575,4	2066,2	143,79	66007	3150,7
	16,0	DIN	159,02		65	20257	41189	1966,1	2599,9	142,59	82378	3932,1
	20,0	DIN	196,80		53	25070	50015	2387,3	3186,7	141,24	100030	4774,7
	25,0	DIN	242,92		43	30945	60288	2877,7	3886,1	139,58	120577	5755,5
	28,0	DIN	269,99		38	34394	66065	3153,4	4288,0	138,59	132129	6306,9
	30,0	DIN	287,80		36	36662	69760	3329,8	4548,6	137,94	139520	6659,6
	40,0	DIN	373,87		28	47627	86467	4127,3	5767,0	134,74	172933	8254,6
	45,0	DIN	455,00		23	57962	100464	4795,4	6849,7	131,65	200928	9590,8
	60,0	DIN	531,21		19	67670	112062	5349,0	7804,9	128,69	224124	10698
	70,0	DIN	602,48		17	76749	121552	5802,0	8640,4	125,85	243105	11604
445,0 ×	10,0	DIN	107,28	1,398	102	13666	32341	1453,5	1892,6	153,84	64683	2907,1
	14,2	DIN	150,86		73	19218	44632	2005,9	2636,3	152,39	89264	4011,9
	20,0	DIN	209,62		52	26704	60425	2715,7	3615,2	150,43	120850	5431,5
	25,0	DIN	258,95		42	32987	72993	3280,6	4415,2	148,76	145987	6561,2
	30,0	DIN	307,04		36	39113	84643	3804,2	5175,8	147,11	169285	7608,3
	36,0	DIN	363,12		30	46257	97473	4380,8	6037,7	145,16	194946	8761,6
	50,0	DIN	487,06		23	62046	122949	5525,8	7842,9	140,77	245898	11052

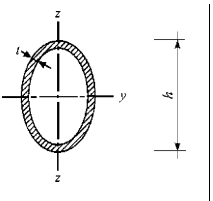
Ronde buisprofielen (vervolg)

Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
457,0 ×	10,0	DIN	110,24	1,436	102	14043	35091	1535,7	1998,4	158,08	70183	3071,5
	12,5	DIN	137,03		82	17455	43145	1888,2	2470,4	157,22	86290	3776,4
	16,0	DIN	174,01		65	22167	53959	2361,5	3113,1	156,02	107919	4722,9
	20,0	DIN	215,54		52	27458	65681	2874,5	3822,0	154,66	131363	5748,9
	25,0	DIN	266,34		42	33929	79415	3475,5	4670,8	152,99	158830	6951,0
	30,0	DIN	315,91		36	40244	92173	4033,8	5478,9	151,34	184346	8067,6
	36,0	DIN	373,77		30	47614	106261	4650,4	6396,2	149,39	212521	9300,7
	40,0	DIN	411,35		27	52402	114949	5030,6	6976,9	148,11	229898	10061
	50,0	DIN	501,86		22	63931	134375	5880,7	8324,1	144,98	268750	11761
	60,0	DIN	587,44		19	74833	150796	6599,4	9528,5	141,95	301593	13199
457,2 ×	25,0	DIN	266,47	1,436	42	33945	79525	3478,8	4675,1	153,06	159050	6957,6
470,0 ×	10,5	DIN	118,99	1,477	97	15157	40025	1703,2	2217,4	162,50	80050	3406,4
	16,0	DIN	179,14		65	22821	58869	2505,1	3299,2	160,61	117738	5010,1
	20,0	DIN	221,95		52	28274	71711	3051,5	4052,7	159,26	143422	6103,0
	25,0	DIN	274,36		42	34950	86786	3693,0	4955,8	157,58	173572	7386,0
	28,0	DIN	305,21		38	38880	95329	4056,5	5477,5	156,58	190658	8113,1
	30,0	DIN	325,53		36	41469	100822	4290,3	5817,0	155,92	201643	8580,6
	36,0	DIN	385,31		30	49084	116362	4951,6	6796,4	153,97	232723	9903,1
495,0 ×	11,0	DIN	131,30	1,555	93	16726	49002	1979,9	2577,3	171,16	98004	3959,7
	16,0	DIN	189,01		65	24077	69131	2793,2	3672,4	169,45	138261	5586,3
508,0 ×	11,0	DIN	134,82	1,596	93	17175	53056	2088,8	2717,5	175,76	106112	4177,6
	12,5	DIN	152,75		82	19458	59755	2352,6	3069,7	175,24	119511	4705,1
	14,2	DIN	172,93		72	22029	67199	2645,6	3463,5	174,66	134397	5291,2
	16,0	DIN	194,14		65	24731	74909	2949,2	3874,4	174,04	149818	5898,3
	20,0	DIN	240,70		52	30662	91428	3599,5	4765,5	172,68	182856	7199,0
	25,0	DIN	297,79		42	37935	110918	4366,9	5837,4	170,99	221837	8733,7
	30,0	DIN	353,65		35	45050	129173	5085,6	6863,5	169,33	258346	10171
	36,0	DIN	419,05		30	53382	149523	5886,7	8035,8	167,36	299046	11773
	40,0	DIN	461,66		27	58811	162188	6385,4	8782,3	166,07	324376	12771
	50,0	DIN	564,75		22	71942	190885	7515,2	10530	162,89	381770	15030
	60,0	DIN	662,90		19	84446	215658	8490,5	12114	159,81	431316	16981
	70,0	DIN	756,12		17	96321	236883	9326,1	13543	156,82	473766	18652
	80,0	DIN	844,41		15	107568	254915	10036	14825	153,94	509830	20072
	90,0	DIN	927,77		14	118187	270092	10634	15968	151,17	540184	21267
	100	DIN	1006,19		12	128177	282733	11131	16980	148,52	565466	22262
521,0 ×	11,5	DIN	144,50	1,637	89	18407	59760	2294,1	2985,8	180,18	119520	4588,1
	14,2	DIN	177,48		72	22609	72644	2788,6	3648,2	179,25	145288	5577,3
	17,5	DIN	217,30		59	27681	87826	3371,4	4438,3	178,12	175651	6742,8
	20,0	DIN	247,11		52	31479	98922	3797,4	5022,7	177,27	197845	7594,8
	25,0	DIN	305,80		42	38956	120101	4610,4	6155,6	175,59	240202	9220,8
	30,0	DIN	363,26		35	46276	139973	5373,2	7241,4	173,92	279946	10746
	36,0	DIN	430,59		30	54852	162171	6225,4	8483,7	171,95	324342	12451
	40,0	DIN	474,49		27	60444	176014	6756,8	9275,8	170,65	352029	13514
559,0 ×	12,5	DIN	168,47	1,756	82	21461	80162	2868,0	3733,9	193,27	160324	5736,1
	20,0	DIN	265,85		52	33866	123155	4406,3	5813,1	190,70	246311	8812,6
	25,0	DIN	329,23		42	41940	149822	5360,3	7134,1	189,00	299643	10721
	30,0	DIN	391,38		35	49857	174962	6259,8	8404,2	187,33	349923	12520
	40,0	DIN	511,97		27	65219	220899	7903,4	10796	184,04	441798	15807
	50,0	DIN	627,64		22	79954	261429	9353,5	12996	180,82	522858	18707
610,0 ×	25,0	DIN	360,67	1,916	42	45946	196906	6455,9	8560,8	207,02	393813	12912
	40,0	DIN	562,28		27	71628	292333	9584,7	13017	202,02	584666	19169
	50,0	DIN	690,52		22	87965	347570	11396	15722	198,78	695140	22791

Ronde buisprofielen (vervolg)

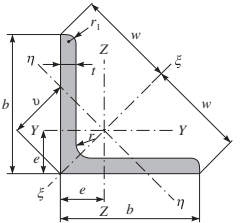
Benaming											Torsiestijfheden	
$d \times$ mm	t mm	NORM afm	M kg/m^1	O m^2/m^1	O/A 1/m	A mm^2	$I \times 10^4$	$W_{el} \times 10^3$	$W_{pl} \times 10^3$	i	$I_t = 2I$ $I_t \times 10^4$	$W_t = 2W$ $W_t \times 10^3$
610,0 ×	60,0	DIN	813,83		18	103673	396677	13006	18222	195,61	793354	26012
	70,0	DIN	932,20		16	118752	440125	14430	20526	192,52	880251	28861
	80,0	DIN	1045,65		14	133204	478367	15684	22643	189,51	956734	31368
	90,0	DIN	1154,16		13	147027	511836	16782	24579	186,58	1023672	33563
	100	DIN	1257,74		12	160221	540947	17736	26343	183,75	1081894	35472

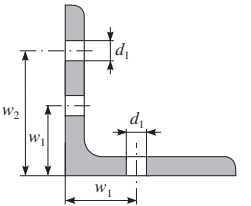
2.17 Ellipsvormige warmgevormde buisprofielen



Benaming				M kg/m	O m^2/m	O/A 1/m	A mm^2	Sterke as y-y				Zwakke as z-z				Torsiestijfheden	
$h \times$ mm	$b \times$ mm	t mm	NORM afm					$I_y \times 10^4$	$W_{el}y_1 \times 10^3$	$W_{el}y_2 \times 10^3$	i_y	$I_z \times 10^4$	$W_{el}z_1 \times 10^3$	$W_{el}z_2 \times 10^3$	i_z	$I_t \times 10^4$	$W_t \times 10^3$
100 ×	50 ×	4,0		7,00	0,236	264	892	84,9	17,0	24,1	30,85	27,9	11,2	14,6	17,68	98,6	22,3
		5,0		8,63	0,236	214	1100	102,3	20,5	29,3	30,50	33,1	13,2	17,7	17,35	115,9	26,5
		6,0		10,21	0,236	181	1301	118,3	23,7	34,3	30,16	37,7	15,1	20,5	17,02	130,8	30,1
		7,0		11,74	0,236	158	1495	133,0	26,6	39,0	29,83	41,7	16,7	23,1	16,69	143,6	33,3
		8,0		13,22	0,236	140	1684	146,5	29,3	43,3	29,50	45,2	18,1	25,5	16,38	154,4	36,1
		10,0		16,03	0,236	115	2042	170,0	34,0	51,3	28,86	50,8	20,3	29,7	15,77	170,9	40,6
120 ×	60 ×	5,0		10,48	0,283	212	1335	182,3	30,4	43,2	36,95	59,7	19,9	26,2	21,15	210,8	39,8
		6,0		12,43	0,283	179	1583	212,1	35,4	50,7	36,60	68,6	22,9	30,5	20,82	240,4	45,7
		7,0		14,33	0,283	155	1825	240,0	40,0	57,9	36,26	76,6	25,5	34,6	20,48	266,5	51,1
		8,0		16,18	0,283	137	2061	266,0	44,3	64,7	35,93	83,7	27,9	38,4	20,16	289,4	55,8
		10,0		19,73	0,283	113	2513	312,6	52,1	77,3	35,27	95,8	31,9	45,3	19,53	326,7	63,9
		12,0		23,08	0,283	96	2941	352,6	58,8	88,7	34,63	105,2	35,1	51,3	18,92	354,4	70,2
150 ×	75 ×	5,0		13,26	0,353	209	1689	367,0	48,9	68,9	46,62	121,9	32,5	42,0	26,87	433,2	65,0
		6,0		15,76	0,353	176	2007	429,8	57,3	81,3	46,27	141,2	37,7	49,3	26,53	499,1	75,3
		7,0		18,21	0,353	152	2320	489,3	65,2	93,2	45,92	159,1	42,4	56,3	26,19	559,0	84,9
		8,0		20,62	0,353	135	2626	545,7	72,8	104,7	45,58	175,5	46,8	62,9	25,85	613,3	93,6
		10,0		25,28	0,353	110	3220	649,4	86,6	126,3	44,91	204,5	54,5	75,1	25,20	706,5	109,0
		12,0		29,74	0,353	93	3789	741,7	98,9	146,3	44,25	228,6	61,0	86,0	24,56	781,5	121,9
180 ×	90 ×	5,0		16,03	0,424	208	2042	647,2	71,9	100,7	56,30	216,9	48,2	61,7	32,59	774,4	96,4
		6,0		19,09	0,424	174	2432	761,0	84,6	119,1	55,94	252,8	56,2	72,6	32,24	898,3	112,3
		7,0		22,10	0,424	151	2815	870,0	96,7	137,0	55,59	286,4	63,6	83,2	31,90	1013,1	127,3
		8,0		25,06	0,424	133	3192	974,2	108,2	154,3	55,25	317,9	70,6	93,3	31,56	1119,1	141,3
		10,0		30,83	0,424	108	3927	1169,1	129,9	187,3	54,56	374,7	83,3	112,3	30,89	1306,9	166,5
		12,0		36,40	0,424	91	4637	1346,5	149,6	218,3	53,89	424,0	94,2	129,7	30,24	1465,1	188,4
220 ×	110 ×	6,0		23,53	0,518	173	2997	1420,5	129,1	180,7	68,85	476,4	86,6	110,7	39,87	1701,9	173,2
		7,0		27,28	0,518	149	3475	1630,0	148,2	208,4	68,49	542,7	98,7	127,3	39,52	1931,3	197,4
		8,0		30,97	0,518	131	3946	1832,2	166,6	235,3	68,14	605,6	110,1	143,2	39,18	2146,8	220,2
		10,0		38,23	0,518	106	4869	2215,2	201,4	287,3	67,45	721,7	131,2	173,7	38,50	2538,4	262,4
		12,0		45,28	0,518	90	5768	2570,9	233,7	336,7	66,76	825,4	150,1	202,1	37,83	2881,1	300,2
250 ×	125 ×	6,0		26,86	0,589	172	3421	2109,5	168,8	235,3	78,52	711,1	113,8	144,5	45,59	2547,6	227,6
		7,0		31,16	0,589	148	3969	2425,5	194,0	271,7	78,17	812,5	130,0	166,4	45,24	2900,7	260,0
		8,0		35,41	0,589	131	4511	2731,8	218,5	307,3	77,82	909,3	145,5	187,7	44,90	3235,3	291,0
		10,0		43,77	0,589	106	5576	3316,3	265,3	376,3	77,12	1089,9	174,4	228,4	44,21	3851,3	348,8
		12,0		51,94	0,589	89	6616	3864,5	309,2	442,3	76,43	1253,9	200,6	266,8	43,53	4400,8	401,2

2.18 Gelijkzijdige hoekstalen





Profiel no.	Afmetingen				Zwaartelijnafstanden			Krasmaten					Y-Y = Z-Z as			ξ-ξ as		η-η as		
	b	*t*	*r*	r_1	*e*	*w*	*v*	d_1 [1)2)]	w_1 [2)]	w_2	*M* [kg/m']	*O* [m²/m']	*A* [mm²]	$I_y = I_z$	$W_y = W_z$	$i_y = i_z$	I_ξ	i_ξ	I_η	W_η	i_η
														× 10^4	× 10^3		× 10^4		× 10^4	× 10^3	
20 × 20 × 3	20	3	3,5	2	6	14,1	8,5	4,3	12		0,88	0,007	112	0,39	0,28	5,9	0,62	7,4	0,15	0,18	3,7
4		4			6,4		9				1,14		145	0,48	0,35	5,8	0,77	7,3	0,19	0,21	3,6
25 × 25 × 3	25	3	3,5	2	7,3	17,7	10,3	6,4	15		1,12	0,097	142	0,79	0,45	7,5	1,27	9,5	0,31	0,3	4,7
4		4			7,6		10,8				1,45		185	1,01	0,58	7,4	1,61	9,3	0,4	0,37	4,7
5		5			8		11,3				1,77		226	1,18	0,69	7,2	1,87	9,1	0,5	0,44	4,7
30 × 30 × 3	30	3	5	2,5	8,4	21,2	11,8	8,4	17		1,36	0,116	174	1,41	0,65	9	2,24	11,4	0,57	0,48	5,7
4		4			8,9		12,4				1,78		227	1,81	0,86	8,9	2,85	11,2	0,76	0,61	5,8
5		5			9,2		13				2,18		278	2,16	1,04	8,8	3,41	11,1	0,91	0,7	5,7
35 × 35 × 3	35	3	5	2,5	9,6	24,7	13,6	11	18		1,6	0,136	204	2,29	0,9	10,6	3,63	13,4	0,95	0,7	6,8
4		4			10		14,1				2,1		267	2,96	1,18	10,5	4,68	13,3	1,24	0,88	6,8
5		5			10,4		14,7				2,57		328	3,56	1,45	10,4	5,63	13,1	1,49	1,1	6,7
6		6			10,8		15,3				3,04		387	4,14	1,71	10,4	6,5	13	1,77	1,16	6,8
40 × 40 × 4	40	4	6	3	11,2	28,3	15,8	11	22		2,42	0,155	308	4,48	1,56	12,1	7,09	15,2	1,86	1,18	7,8
5		5			11,6		16,4				2,97		379	5,43	1,91	12	8,64	15,1	2,22	1,35	7,7
6		6			12		17				3,52		448	6,63	2,26	11,9	9,98	14,9	2,67	1,57	7,7
45 × 45 × 5	45	5	7	3,5	12,8	31,8	18,1	13	25		3,38	0,174	430	7,83	2,43	13,5	12,4	17	3,25	1,8	8,7
6		6			13,2		18,7				4		509	9,16	2,88	13,4	14,5	16,9	3,83	2,05	8,7
7		7			13,6		19,2				4,6		586	10,4	3,31	13,3	16,4	16,7	4,39	2,29	8,7
50 × 50 × 5	50	5	7	3,5	14	35,4	19,8	13	30		3,77	0,194	480	11	3,05	15,1	17,4	19	4,59	2,32	9,8
6		6			14,5		20,4				4,47		569	12,8	3,61	15	20,4	18,9	5,24	2,57	9,6
7		7			14,9		21,1				5,15		656	14,6	4,15	14,9	23,1	18,8	6,02	2,85	9,6
8		8			15,2		21,6				5,82		741	16,3	4,68	14,8	25,7	18,6	6,87	3,19	9,6
9		9			15,6		22,1				6,47		824	17,9	5,2	14,7	28,1	18,5	7,67	3,47	9,7

Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

voorkeur.

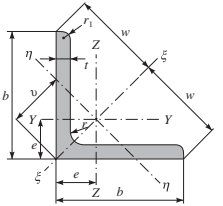
Gelijkzijdige hoekstalen (vervolg)

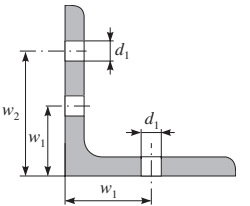
Profiel no.	M [kg/m']	O [m^2/m']	A [mm^2]	Y-Y = Z-Z as			ζ-ζ as		η-η as			Afmetingen				Zwaartelijnafstanden			Krasmaten		
				$I_y = I_z$	$W_y = W_z$	$i_y = i_z$	I_ζ	i_ζ	I_η	W_η	i_η	b	t	r	r_1	e	w	v	d_1 [1)2)]	w_1 [2)]	w_2
				× 10^4	× 10^3		× 10^4		× 10^4	× 10^3											
55 × 55 × 6	4,95	0,213	631	17,3	4,4	16,6	27,4	20,8	7,24	3,28	10,7	55	6	8	4	15,6	38,9	22,1	17	30	
7	5,71		728	19,7	5,06	16,5	31,2	20,7	8,22	3,62	10,6		7			16		22,7			
8	6,46		823	22,1	5,72	16,4	34,8	20,6	9,35	4,03	10,7		8			16,4		23,2			
60 × 60 × 6	5,42	0,233	691	22,8	5,29	18,2	36,1	22,9	9,43	3,95	11,7	60	6	8	4	16,9	42,4	23,9	17	35	
7	6,26		798	26,1	6,1	18,1	41,3	22,7	10,8	4,42	11,6		7			17,3		24,4			
8	7,09		903	29,1	6,88	18	46,1	22,6	12,1	4,84	11,6		8			17,7		25			
10	8,69		1110	34,9	8,41	17,8	55,1	22,3	14,6	5,57	11,5		10			18,5		26,2			
65 × 65 × 6	5,91	0,252	753	29,2	6,21	19,7	46,3	24,8	12,1	4,74	12,7	65	6	9	4,5	18	46	25,5	21	35	
7	6,83		870	33,4	7,18	19,6	53	24,7	13,8	5,27	12,6		7			18,5		26,2			
8	7,73		985	37,5	8,13	19,5	59,4	24,6	15,6	5,84	12,6		8			18,9		26,7			
9	8,62		1100	41,3	9,04	19,4	65,4	24,4	17,2	6,3	12,5		9			19,3		27,3			
70 × 70 × 7	7,38	0,272	940	42,4	8,43	21,2	67,1	26,7	17,6	6,31	13,7	70	7	9	4,5	19,7	49,5	27,9	21	40	
8	8,63		1060	47,5	9,52	21,1	75,3	26,6	19,7	6,92	13,6		8			20,1		28,5			
10	10,3		1390	56,9	11,6	20,8	91	26,3	24	8,04	13,6		10			21,1		29,8			
75 × 75 × 6	6,87	0,291	875	45,6	8,35	22,8	72,2	28,7	18,9	6,54	14,7	75	6	10	5	20,4	53	28,9	23	40	
7	7,94		1010	52,4	9,67	22,8	83,6	28,8	21,1	7,15	14,5		7			20,9		29,5			
8	9,03		1150	58,9	11	22,6	93,3	28,5	24,4	8,11	14,6		8			21,3		30,1			
10	11,1		1410	71,4	13,5	22,5	113	28,3	29,8	9,55	14,5		10			22,1		31,2			
12	13,1		1670	82,4	15,8	22,2	130	27,9	34,7	10,7	14,4		12			22,9		32,4			
80 × 80 × 8	9,66	0,311	1230	72,3	12,6	24,2	115	30,6	29,6	9,25	15,5	80	8	10	5	22,6	56,6	32	23	45	
10	11,9		1510	87,5	15,5	24,1	139	30,3	35,9	10,9	15,4		10			23,4		33,1			
12	14,1		1790	102	18,2	23,9	161	30	43	12,6	15,3		12			24,1		34,1			
90 × 90 × 8	10,9	0,351	1390	104	16,1	27,4	165	34,5	43,5	12,3	17,7	90	8	11	5,5	25	63,6	35,3	25	50	
9	12,2		1550	116	18	27,4	184	34,5	47,8	13,3	17,6		9			25,4		35,9			
10	13,4		1710	125	19,5	27,2	201	34,3	52,6	14,4	17,5		10			25,8		36,5			
12	15,9		2030	148	23,1	27	234	34	61,7	16,4	17,4		12			26,6		37,6			
100 × 100 × 8	12,2	0,390	1550	145	19,9	30,6	230	38,5	59,9	15,5	19,6	100	8	12	6	27,4	70,7	38,7	25	55	
10	15,1		1920	177	24,7	30,4	280	38,2	73,3	18,4	19,5		10			28,2		39,9			
12	17,8		2270	207	29,2	30,2	328	38	86,2	21	19,5		12			29		41			
15	21,9		2790	249	35,6	29,8	393	37,5	104	24,4	19,3		15			30,2		42,7			
110 × 110 × 10	16,6	0,430	2120	239	30,1	33,6	379	42,3	98,6	22,7	21,6	110	10	12	6	30,7	77,8	43,4	25	45	70
12	19,7		2510	280	35,7	33,4	444	42,1	116	26,1	21,5		12			31,5		44,5			
14	22,8		2900	319	41	33,2	505	41,8	133	29,3	21,4		14			32,1		45,4			
120 × 120 × 10	18,2	0,469	2380	313	36,1	36,7	497	46,3	129	27,4	23,6	120	10	13	6,5	33,2	84,9	46,9	25	50	80
12	21,6		2750	367	42,9	36,4	585	46	151	31,4	23,5		12			34		48			
15	26,6		3390	446	52,5	36,3	705	45,6	186	37,5	23,4		15			35,1		49,6			

Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

voorkeur.

Gelijkzijdige hoekstalen (vervolg)



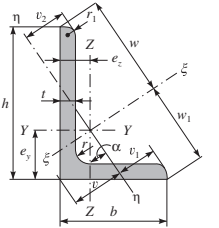


Profiel no.	Afmetingen				Zwaartelijnafstanden			Krasmaten			M	O	A	Y-Y = Z-Z as			ζ-ζ as		η-η as		
	b	t	r	r_1	e	w	v	d_1 [1)2)]	w_1 [2)]	w_2	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]	$I_y = I_z$	$W_y = W_z$	$i_y = i_z$	I_ζ	i_ζ	I_η	W_η	i_η
														× 10⁴	× 10³		× 10⁴		× 10⁴	× 10³	
130 × 130 × 12	130	12	14	7	36,4	91,9	51,5	25	50	90	23,6	0,508	3000	472	50,4	39,7	750	50	194	37,7	25,4
14		14			37,2		52,6				27,2		3470	540	58,2	39,4	857	49,7	223	42,4	25,3
16		16			38		53,7				30,9		3930	605	65,8	39,2	959	49,4	251	46,7	25,2
140 × 140 × 13	140	13	15	7,5	39,2	99	55,4	28	55	95	27,5	0,547	3500	638	63,3	42,7	1010	53,8	262	47,3	27,4
15		15			40		56,6				31,4		4000	723	72,3	42,5	1150	53,6	298	52,7	27,3
150 × 150 × 12	150	12	16	8	41,2	106	58,3	28	60	105	27,3	0,586	3480	737	67,7	46	1170	58	303	52	29,5
14		14			42,1		59,5				31,6		4030	845	78,2	45,8	1340	57,7	347	58,3	29,4
15		15			42,5		60,1				33,8		4300	898	83,5	45,7	1430	57,6	370	61,6	29,3
18		18			43,6		61,7				40,1		5100	1050	99,3	45,4	1670	57	438	71	29,3
160 × 160 × 15	160	15	17	8,5	44,9	113	63,5	28	60	105	36,2	0,625	4610	1100	95,6	48,8	1750	61,5	453	71,3	31,4
17		17			45,7		64,6				40,7		5180	1230	108	48,6	1950	61,3	506	78,3	31,3
180 × 150 × 15	180	15	18	9	49,8	127	70,5	28	60/65	135	40,9	0,705	5210	1590	122	55,2	2520	69,6	653	92,6	35,4
18		18			51		72,2				48,6		6190	1870	145	54,9	2970	69,3	757	105	34,9
200 × 200 × 16	200	16	18	9	55,2	141	78	28	65	150	48,5	0,785	6180	2340	162	61,5	3740	77,8	943	121	39,1
18		18			56		79,2				54,3		6910	2600	181	61,3	4150	77,5	1050	133	39
20		20			56,8		80,4				59,9		7640	2850	199	61,1	4540	77,2	1160	144	38,9
24		24			58,4		82,6				71,1		9060	3330	235	60,6	5280	76,4	1380	167	39

Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

voorkeur.

2.19 Ongelijkzijdige hoekstalen

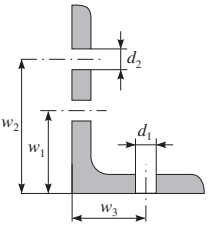


Profiel no.	Afmetingen					Zwaartelijnafstanden							tan α	Krasmaten				
	h	*b*	*t*	*r*	r_1	e_y	e_z	*w*	w_1	*v*	v_1	v_2		d_1 [1)]	d_1 [1)2)]	w_1	w_2	w_3 [3)]
30 × 20 × 3	30	20	3	3,5	2	9,9	5	20,4	15,1	8,6	10,4	5,6	0,431	8,4	4,3	17		12
4			4			10,3	5,4	20,2	15,2	9,1	10,3	5,8	0,423					
40 × 20 × 3	40	20	3	3,5	2	14,3	4,4	26,1	17,7	7,9	11,9	4,6	0,259	11	4,3	22		12
4			4			14,7	4,8	25,7	18	8,3	11,8	5	0,252					
40 × 25 × 4	40	25	4	5	2,5	13,7	6,2	28	19,4	10,7	13,5	6,6	0,381	11	6,4	22		15
5			5			14	6,6	27,7	19,1	10,8	13,5	6,8	0,380					
45 × 30 × 4	45	30	4	4	2	14,8	7,4	30,7	22,6	12,7	15,8	8,3	0,436	13	8,4	25		17
5			5			15,2	7,8	30,5	22,7	13,2	15,8	8,5	0,430					
50 × 30 × 5	50	30	5	5	2,5	17,3	7,4	33,3	23,9	12,8	16,5	7,8	0,352	13	8,4	30		17
6			6			17,7	7,8	33,1	24	13,2	16,5	8,3	0,347					
50 × 40 × 4	50	40	4	4	2	15,2	10,3	35	28,5	16,7	18,4	12,6	0,629	13	11	30		22
5			5			15,6	10,7	34,9	28,8	17,3	18,4	12,7	0,625					
6			6			15,9	11	35	28,5	17,4	18,7	12,7	0,618					

Symbolen eenheden en voetnoten bij krasmaten zie pag. E2/3.

voorkeur.

Ongelijkzijdige hoekstalen (vervolg)



Profiel no.	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]	Y-Y as			Z-Z as			ξ-ξ as		η-η as	
				I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z	I_ξ	i_ξ	I_η	i_η
				$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$		$\times 10^4$	
30 × 20 × 3	1,11	0,097	142	1,25	0,62	9,4	0,44	0,29	5,6	1,43	10	0,25	4,2
4	1,45		185	1,59	0,81	9,3	0,55	0,38	5,5	1,81	9,9	0,33	4,2
40 × 20 × 3	1,35	0,117	172	2,79	1,08	12,7	0,47	0,30	5,2	2,96	13,1	0,30	4,2
4	1,77		225	3,59	1,42	12,6	0,60	0,39	5,2	3,79	13	0,39	4,2
40 × 25 × 4	1,93	0,127	245	3,88	1,49	12,7	1,16	0,64	7	4,35	13,4	0,7	5,4
5	2,37		302	4,5	1,73	12.3	1,41	0,76	6,9	5,16	13,1	0,75	4,7
45 × 30 × 4	2,25	0,146	287	5,78	1,91	14,2	2,05	0,91	8,5	6,65	15,2	1,18	6,4
5	2,77		353	6,99	2,35	14,1	2,47	1,11	8,4	8,02	15,1	1,44	6,4
50 × 30 × 5	2,96	0,156	378	9,36	2,86	15,7	2,51	1,11	8,1	10,3	16,5	1,54	6,4
6	3,51		447	10,9	3,88	15,6	2,91	1,31	8,1	12	16,4	1,81	6,4
50 × 40 × 4	2,71	0,177	346	8,54	2,47	15,7	4,86	1,64	11,9	10,9	17,8	2,46	84
5	3,35		427	10,4	3,02	15,6	5,89	2,01	11,8	13,3	17,6	3,02	8,4
6	3,98		507	12,1	3,54	15,5	6,81	2,35	11,6	15,3	17,4	3,56	8,4

Ongelijkzijdige hoekstalen (vervolg)

Profiel no.	Afmetingen					Zwaartelijnafstanden							tan α	Krasmaten				
	h	b	t	r	r_1	e_y	e_z	w	w_1	v	v_1	v_2		d_1 [1)]	d_1 [1)2)]	w_1	w_2	w_3 [3)]
60 × 30 × 5	60	30	5	6	3	21,5	6,8	39	26,7	12	17,7	7,2	0,256	17	8,4	35		17
6			6			22	7,2	38,7	27	12,4	17,5	7,5	0,252					
7			7			22,4	7,6	38,3	27,2	12,8	17,3	7,8	0,248					
60 × 40 × 5	60	40	5	6	3	19,6	9,7	40,8	30,1	16,8	20,9	11	0,437	17	11	35		22
6			6			20	10,1	40,6	30,2	17,2	20,8	11,2	0,433					
7			7			20,4	10,5	40,4	30,3	17,7	20,7	11,4	0,429					
65 × 50 × 5	65	50	5	6,5	3,5	19,9	12,5	45,2	36,1	20,8	23,8	15	0,583	21	13	35		30
6			6			20,3	12,9	45,1	36,1	21,3	23,8	15	0,579					
7			7			20,7	13,3	45	36,2	21,9	23,7	15,2	0,574					
8			8			21	13,6	44,9	36,2	22,3	23,7	15,5	0,571					
75 × 50 × 6	75	50	6	6,5	3,5	24,4	12,1	51,2	37,5	20,8	26,3	13,5	0,435	23	13	40		30
7			7			24,7	12,4	51	37,7	21,3	26,3	13,8	0,433					
8			8			25,1	12,8	50,8	37,8	21,8	26,2	14,1	0,430					
9			9			25,6	13,2	50,6	38	22,2	26,2	14,4	0,427					
75 × 55 × 5	75	55	5	7	3,5	23,1	13,3	51,9	40	22,7	27,1	15,8	0,530	23	17	40		30
7			7			24	14,1	51,6	40,2	23,7	27	16,2	0,525					
75 × 65 × 6	75	65	6	8	4	21,9	17	52,8	46	26,8	27,5	21,1	0,740	23	21	40		35
8			8			22,8	17,8	52,6	46,2	27,9	27,8	21,4	0,736					
10			10			23,5	18,6	52,3	46,4	28,9	27,9	22	0,732					
80 × 40 × 6	80	40	6	7	3,5	28,5	8,8	52,1	35,3	15,5	24,2	8,9	0,259	23	11	45		22
8			8			29,4	9,5	51,5	35,7	16,5	23,8	10,4	0,253					
80 × 60 × 6	80	60	6	8	4	24,7	14,8	55,7	43,3	25,4	29,2	17,7	0,548	23	17	45		35
7			7			25,1	15,2	55,5	43,5	25,4	29,2	17,7	0,546					
8			8			25,5	15,6	55,3	43,7	25,4	29,2	17,7	0,544					

Symbolen eenheden en voetnoten bij krasmaten zie pag. E2/3.

voorkeur

Ongelijkzijdige hoekstalen (vervolg)

Profiel no.	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]	Y-Y as			Z-Z as			ξ-ξ as		η-η as	
				I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z	I_ζ	i_ζ	I_η	i_η
				$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$		$\times 10^4$	
60 × 30 × 5	3,37	0,175	429	15,6	4,04	19	2,60	1,12	7,8	16,5	19,6	1,69	6,3
6	3,99		508	18,2	4,77	18,9	3,01	1,32	7,7	19,2	19,4	1,99	6,2
7	4,59		585	20,7	5,50	18,8	3,41	1,52	7,6	21,8	19,3	2,28	6,2
60 × 40 × 5	3,76	0,195	479	17,2	4,25	18,9	6,11	2,02	11,3	19,8	20,3	3,50	8,6
6	4,46		568	20,1	5,03	18,8	7,12	2,38	11,2	23,1	20,2	4,12	8,5
7	5,14		655	23	5,79	18,7	8,07	2,74	11,1	26,3	20	4,73	8,5
65 × 50 × 5	4,35	0,224	718	23,1	5,11	20,4	11,9	3,18	14,7	28,8	22,8	6,21	10,6
6	5,16		657	27,1	6,05	20,3	13,9	3,75	14,5	33,6	22,6	7,39	10,5
7	5,97		760	31	6,99	20,2	15,8	4,31	14,4	38,4	22,5	8,37	10,5
8	6,75		860	34	7,73	19,9	17,5	4,82	14,3	42,2	22,2	9,35	10,4
75 × 50 × 6	5,64	0,244	718	40,65	8,01	23,8	13,44	3,81	14,2	45,58	25,5	8,48	10,8
7	6,54		833	46,3	9,24	23,6	16,4	4,39	14,1	53,1	25,3	9,58	10,7
8	7,25		943	51,9	10,42	23,5	18,38	4,94	14	59,35	25,1	10,96	10,7
9	8,24		1050	57,2	11,60	23,4	20,1	5,49	13,9	65,4	25	11,9	10,7
75 × 55 × 5	4,95	0,254	630	35,5	6,84	23,7	16,2	3,89	16	43,1	26,1	8,68	11,7
7	6,8		866	47,9	9,39	23,5	21,8	5,32	15,9	57,9	25,9	11,8	11,7
75 × 65 × 6	6,37	0,273	811	44	8,3	23,3	30,7	6,39	19,4	60,2	27,3	14,4	13,4
8	8,34		1060	56,7	10,9	23,1	39,4	8,34	19,2	77,3	27	18,8	13,3
10	10,3		1310	68,4	13,3	22,9	47,3	10,2	19	92,7	26,6	23	13,3
80 × 40 × 6	5,41	0,234	689	44,9	8,73	25,5	7,59	2,44	10,5	47,6	26,3	4,9	8,4
8	7,07		901	57,6	11,4	25,3	9,68	3,18	10,4	60,9	26	6,41	8,4
80 × 60 × 6	6,37	0,280	811	51,4	9,29	25,2	24,8	5,49	17,5	62,8	27,8	13,4	12,9
7	7,36		938	59	10,7	25,1	28,4	6,34	17,4	72	27,7	15,4	12,8
8	8,34		1060	66,3	12,2	25	31,8	7,16	17,3	80,8	27,6	17,3	12,7

Ongelijkzijdige hoekstalen (vervolg)

Profiel no.	Afmetingen					Zwaartelijnafstanden							tan α	Krasmaten				
	h	b	t	r	r_1	e_y	e_z	w	w_1	v	v_1	v_2		d_1 [1)]	d_1 [1)2)]	w_1	w_2	w_3 [3)]
90 × 65 × 6	90	65	6	8,5	4,5	27,9	15,6	62,4	47	26,7	32,7	18,5	0,510	25	17	50		35
7			7			28,3	16	62,2	47,5	27,1	32,6	18,6	0,509					
8			8			28,8	16,4	62	47	27,6	32,6	18	0,507					
10			10			29,6	17,2	61,7	47,4	28,3	32,6	20	0,503					
90 × 75 × 8	90	75	8	8,5	4,5	27,3	19,8	63	53,2	31,3	33,6	24,3	0,681	25	23	50		40
10			10			27,8	20,4	63	53,1	32	33,7	23,7	0,674					
100 × 50 × 6	100	50	6	9	4,5	34,9	10,4	65	43,9	19,1	29,8	11,5	0,263	25	13	55		30
7			7			35,4	10,8	64,9	44,2	19,5	29,7	11,6	0,260					
8			8			35,9	11,3	64,8	44,4	20	29,5	11,8	0,258					
10			10			36,7	12	64,3	44,9	20,8	29,1	12,2	0,252					
100 × 65 × 7	100	65	7	10	5	32,3	15,1	68,3	49,1	26,6	34,8	17,3	0,415	25	21/17	55		35
8			8			32,7	15,5	68,1	49,2	26,9	34,7	17,2	0,414					
10			10			33,6	16,3	67,6	49,5	27,9	34,5	17,8	0,410					
100 × 75 × 8	100	75	8	10	5	31	18,7	69,5	54,2	31,3	36,5	21,9	0,547	25	23/21	55		40
10			10			31,9	19,5	69,2	54,5	32,4	36,5	22,4	0,544					
12			12			32,7	20,3	68,8	54,1	33,3	36,6	23,2	0,540					
120 × 80 × 8	120	80	8	11	5,5	38,3	18,7	82,3	59,9	32,7	42	21,6	0,441	25	23	50	80	45
10			10			39,2	19,5	81,8	60,3	33,7	41,9	21,9	0,438					
12			12			40	20,3	81,4	60,6	34,6	41,8	22,5	0,433					
130 × 65 × 8	130	65	8	11	5,5	45,6	13,7	85	57,1	24,9	38,6	14,7	0,263	25	21	50	90	35
10			10			46,5	14,5	84,3	57,6	25,8	38,2	15,4	0,259	25	21/17	50	90	35/36
12			12			47,4	15,3	83,7	58,1	26,6	38	16	0,255					

Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

voorkeur

Ongelijkzijdige hoekstalen (vervolg)

Profiel no.	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]	Y-Y as			Z-Z as			ξ-ξ as		η-η as	
				I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z	I_ξ	i_ξ	I_η	i_η
				$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$		$\times 10^4$	
90 × 65 × 6	7,07	0,295	901	73,4	11,8	28,5	23,3	6,53	18,9	87,9	31,2	17,8	14,1
7	8,19		1040	84,3	13,7	28,4	37	7,55	18,8	101	31,1	20,4	14
8	9,29		1180	94,9	15,5	28,3	41,5	8,54	18,7	113	31	23	13,9
10	11,4		1460	115	19	28,1	49,9	10,4	18,5	137	30,7	27,9	13,8
90 × 75 × 8	9,22	0,322	1270	99,7	15,9	28	63,1	11,4	22,4	131	32,2	31,4	15,8
10	12,2		1560	120	19,2	27,8	74,9	13,7	21,9	157	31,8	37,8	15,6
100 × 50 × 6	6,85	0,292	873	89,7	13,8	32	15,3	3,86	13,2	95,2	33	9,78	10,6
7	7,93		1010	103	15,9	31,9	17,4	4,46	13,1	106,3	32,9	11,2	10,5
8	8,99		1150	116	18	31,8	19,5	5,04	13,1	123	32,8	12,6	10,5
10	11,1		1410	141	22,2	31,6	23,4	6,17	12,9	149	32,5	15,5	10,4
100 × 65 × 7	8,77	0,321	1120	113	16,6	31,7	37,6	7,53	18,3	128	33,9	22	14
8	9,94		1270	127	18,9	31,6	42,2	8,54	18,3	144	33,7	24,8	14
10	12,3		1560	154	23,2	31,4	51	10,5	18,1	175	33,5	30,1	13,9
100 × 75 × 8	10,6	0,341	1350	133	19,3	31,4	64,1	11,4	21,8	162	34,7	34,6	16
10	13		1660	162	23,8	31,2	77,6	14	21,6	197	34,5	42,2	15,9
12	15,4		1970	189	28,1	31	89,3	16,3	21,3	230	34,2	48,4	15,8
120 × 80 × 8	12,2	0,391	1550	226	27,6	38,2	80,8	13,2	22,9	261	41	45,8	17,2
10	15		1910	276	34,1	38	98,1	16,2	22,7	318	40,7	56,1	17,1
12	17,8		2270	323	40,4	37,7	114	19,1	22,5	371	40,4	66,1	17,1
130 × 65 × 8	11,9	0,381	1510	263	31,1	41,7	44,8	8,72	17,2	280	43,1	28,6	13,8
10	14,6		1860	321	38,4	41,5	54,2	10,7	17,1	340	42,7	35	13,7
12	17,3		2210	376	45,5	41,2	63	12,7	16,9	397	42,4	41,2	13,7

Ongelijkzijdige hoekstalen (vervolg)

Profiel no.	Afmetingen					Zwaartelijnafstanden							tan α	Krasmaten				
	h	b	t	r	r_1	e_y	e_z	w	w_1	v	v_1	v_2		d_1 [1)]	d_1 [1)2)]	w_1	w_2	w_3 [3)]
130 × 75 × 8	130	75	8	10,5	5,5	43,6	16,5	87,3	60,1	29,9	42,6	18,3	0,339	25	23	50	90	40
10			10			44,5	17,3	86,6	60,5	30,8	42,4	18,8	0,336					
12			12			45,3	18,1	86,1	60,9	31,8	42,1	19,5	0,332					
130 × 90 × 10	130	90	10	12	6	41,5	21,8	89,2	66,9	37,5	46,2	25,1	0,472	25	25	50	90	50
12			12			42,4	22,6	88,8	67,2	38,5	46	25,6	0,468					
150 × 75 × 9	150	75	9	11	5,5	52,8	15,7	97,9	66,2	29	44,6	17,2	0,265	28	23	60	105	40
10			10			53,2	16,1	97,7	66,4	29,1	44,8	17,3	0,262					
11			11			53,7	16,5	97,3	66,6	29,7	44,4	17,7	0,261	28	23/21	60	105	40
12			12			54,1	16,9	97	66,9	30,1	44,3	18,1	0,260					
150 × 90 × 10	150	90	10	12	6	49,9	20,3	101	70,5	36	50,2	22,4	0,360	28	25	55	110	50
12			12			50,8	21,1	101	71	37	50	23	0,358					
15			15			52,1	22,3	99,8	71,6	38,4	49,8	–	0,354					
150 × 100 × 10	150	100	10	13	6,5	48	23,4	103	75	41	52,5	26,8	0,442	28	25	60	105	55
12			12			48,9	24,2	102	75,3	41,9	52,4	27,3	0,439					
14			14			49,7	25	102	75,6	42,8	52,3	27,7	0,435					
160 × 80 × 10	160	80	10	13	6,5	56,3	16,9	105	70,6	30,7	47,6	18,2	0,263	28	23	60	115	45
12			12			57,2	17,7	104	71	31,5	47,5	18,9	0,259					
14			14			58,1	18,5	103	71,6	32,3	47,2	19,5	0,256					
200 × 100 × 10	200	100	10	15	7,5	69,3	20,1	132	87,6	37,5	59,8	22,2	0,266	28	25	65	150	55
12			12			70,3	21	131	88,2	38,4	59,5	22,6	0,264					
15			15			71,6	22,2	130	–	–	59,5	–	0,260					
250 × 90 × 10	250	90	10	15	7,5	94,5	15,6	156	105	29,8	59,6	17,1	0,154	28	25	60	200	50

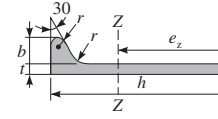
Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie pag. E2/3.

voorkeur.

Ongelijkzijdige hoekstalen (vervolg)

Profiel no.	M [kg/m′]	O [m^2/m′]	A [mm^2]	Y-Y as			Z-Z as			ξ-ξ as		η-η as	
				I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z	I_ξ	i_ξ	I_η	i_η
				$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$		$\times 10^4$	
130 × 75 × 8	12,5	0,401	1590	276	31,9	41,7	68,3	11,7	20,8	303	43,7	41,3	16,1
10	15,4		1960	337	39,4	41,4	82,9	14,4	20,6	369	43,4	50,6	16,1
12	18,3		2330	395	46,6	41,2	96,5	17	20,4	432	43,1	59,6	16
130 × 90 × 10	16,6	0,430	2120	358	40,5	41,1	141	20,6	25,8	420	44,6	78,5	19,3
12	19,7		2510	420	48	40,9	165	24,4	25,6	492	44,3	92,6	19,2
150 × 75 × 9	15,3	0,441	1950	455	46.8	48,3	78,3	13,2	20	484	49,8	50	16
10	17		2160	501	51,8	48,1	85,8	14,6	19,9	531	49,6	55,3	16
11	18,6		2360	545	56,6	48	93	15,9	19,8	578	49,5	59,8	15,9
12	20,2		2570	589	61,4	47,9	99,7	17,2	19,7	623	49,3	64,6	15,9
150 × 90 × 10	18,2	0,469	2320	532	53,1	47,8	145	20,9	25,1	589	50,5	88	19,5
12	21,6		2750	626	63,1	47,7	170	24,7	24,9	693	50,2	103	19,4
15	26,6		3390	761	77,7	47,4	205	30,4	24,6	841	49,8	126	19,3
150 × 100 × 10	19	0,489	2420	552	54,1	47,8	198	25,8	28,6	637	51,3	112	21,5
12	22,6		2870	650	64,2	4,76	232	30,6	28,4	749	51	132	21,5
14	26,1		3320	744	74,1	47,3	264	35,2	28,2	856	50,7	152	21,4
160 × 80 × 10	18,2	0,469	2320	611	58,9	51,4	104	16,5	21,2	648	52,9	67	17
12	21,6		2750	720	70	51,1	122	19,6	21	763	52,6	78,9	16,9
14	25		3180	823	80,7	50,9	139	22,5	20,9	871	52,3	90,5	16,9
200 × 100 × 10	23	0,587	2920	1220	93,2	64,6	210	26,3	26,8	1300	66,6	133	21,4
12	27,3		3480	1440	111	64,3	247	31,3	26,7	1530	66,6	158	21,3
15	33,7		4300	1760	137	64	299	38,4	26,4	1860	65,8	194	21,2
250 × 90 × 10	26,1	0,669	3320	2170	140	80,8	161	21,7	22	2220	81,7	112	18,4

2.20 Platbulbstaal (Hollandprofiel)

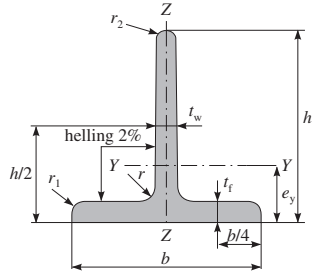


Profiel no.	Afmetingen					M	O	A	Z-Z	
	h	t	b	r	e_z	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]	I_z	W_z
									$\times 10^4$	$\times 10^3$
80 × 5	80	5	14	4	48,9	4,24	0,190	540	33,8	6,91
6	80	6	14	4	47,8	4,87	0,192	620	39	8,15
7	80	7	14	4	46,9	5,50	0,194	700	43,3	9,24
100 × 6	100	6	15,5	4,5	59,8	6,08	0,234	774	76,1	12,7
7	100	7	15,5	4,5	58,7	6,86	0,236	874	85,3	14,5
8	100	8	15,5	4,5	57,8	7,65	0,238	974	94,3	16,3
120 × 6	120	6	17	5	72,0	7,31	0,276	931	133	18,4
7	120	7	17	5	70,7	8,25	0,278	1050	148	21
8	120	8	17	5	69,6	9,19	0,280	1170	164	23,6
140 × 7	140	7	19	5,5	83,1	9,74	0,320	1260	241	29
8	140	8	19	5,5	81,8	10,80	0,322	1380	206	32,5
9	140	9	19	5,5	80,7	11,90	0,324	1520	291	36
160 × 7	160	7	22	6	96,6	11,4	0,365	1460	373	38,6
8	160	8	22	6	94,9	12,7	0,367	1620	411	43,3
9	160	9	22	6	93,6	14,0	0,369	1780	448	47,9
180 × 8	180	8	25	7	109	14,8	0,411	1890	609	55,9
9	180	9	25	7	107	16,2	0,413	2070	633	61,8
10	180	10	25	7	106	17,6	0,415	2250	717	67,8
200 × 9	200	9	28	8	121	18,5	0,457	2360	941	77,7
10	200	10	28	8	119	20,1	0,459	2560	1020	85
12	200	12	28	8	117	23,2	0,463	2960	1160	99,6

Platbulbstaal (Hollandprofiel) (vervolg)

Profiel no.	Afmetingen					M	O	A	Z-Z	
	h	t	b	r	e_z	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]	I_z	W_z
									$\times 10^4$	$\times 10^3$
220 × 10	220	10	31	9	134	22,8	0,503	2900	1400	105
12	220	12	31	9	130	26,2	0,507	3340	1590	122
240 × 10	240	10	34	10	147	25,4	0,547	3240	1860	126
12	240	12	34	10	144	29,3	0,551	3730	2130	148
260 × 11	260	11	37	11	160	30,3	0,593	3870	2610	162
12	260	12	37	11	158	32,4	0,595	4130	2770	175
13	260	13	37	11	156	34,5	0,597	4390	2940	188
280 × 11	280	11	40	12	174	33,5	0,637	4260	3330	191
12	280	12	40	12	172	35,7	0,639	4550	3550	206
13	280	13	40	12	170	37,9	0,641	4830	3760	221
300 × 12	300	12	43	13	187	39,0	0,683	4970	4460	239
14	300	14	43	13	183	43,8	0,687	5580	4980	273
320 × 12	320	12	46	14	201	42,5	0,728	5420	5530	274
14	320	14	46	14	199	45,0	0,730	5740	5850	294
340 × 13	340	13	49	15	213	48,8	0,774	6220	7160	335
15	340	15	49	15	209	54,0	0,776	6890	7920	399
370 × 13	370	13	53,5	16,5	235	54,6	0,840	6960	9740	402
15	370	15	53,5	16,5	230	60,5	0,844	7700	10490	455

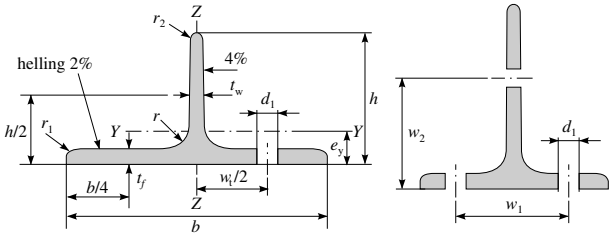
2.21 T-stalen



Profiel no.	Afmetingen						Krasmaten		
	b	h	$t_w = t_f = r$	r_1	r_2	e_y	d_1 [1)2)]	w_1	w_2
gelijkzijdige T-stalen ($b = h$)									
20	20		3	1,5	1	5,8	3,2	–	–
25	25		3,5	2	1	7,3	3,2	15	14
30	30		3	2	1	8,0	4,3	17	17
30	30		4	2	1	8,5			
35	35		4,5	2,5	1	9,9	4,3	19	19
40	40		4	2,5	1	10,8	6,4	21	22
40	40		5	2,5	1	11,2			
45	45		5,5	3	1,5	12,6	6,4	24	25
50	50		5	3	1,5	13,4	6,4	30	30
50	50		6	3	1,5	13,9			
60	60		7	3,5	2	16,6	8,4	34	35
70	70		8	4	2	19,4	11	38	40
80	80		9	4,5	2	22,2	11	45	45
90	90		10	5	2,5	24,8	13	60	60
100	100		11	5,5	3	27,4			
120	120		13	6,5	3	32,8	17	70	70
140	140		15	7,5	4	38,0	21	80	75
ongelijkzijdige T-stalen ($b = 2h$)									
30	60	30	5,5	3	1,5	6,7	8,4	34	
35	70	35	6	3	1,5	7,7	11	37	
40	80	40	7	3,5	2	8,8	11	45	
50	100	50	8,5	4,5	2	10,9	14	55	
60	120	60	10	5	2,5	13	17	65	

Symbolen, eenheden en voetnoten bij krasmaten, zie. pag. E2/3.

T-stalen (vervolg)



Profiel no.	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]	Y-Y as			Z-Z as		
				I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
				× 10⁴	× 10³		× 10⁴	× 10³	
20	0,88	0,075	112	0,38	0,27	5,8	0,2	0,2	4,2
25	1,29	0,094	164	0,87	0,49	7,3	0,43	0,34	5,1
30	1,69	0,114	171	1,33	0,6	8,8	0,68	0,48	6,3
30	1,77	0,114	226	1,72	0,8	8,7	0,87	0,58	6,2
35	2,33	0,133	297	3,1	1,23	10,4	1,57	0,9	7,3
40	2,35	0,153	305	4,33	1,49	11,9	2,2	1,2	8,8
40	2,96	0,153	377	5,28	1,84	11,8	2,58	1,29	8,3
45	3,67	0,171	467	8,13	2,51	13,2	4,01	1,78	9,3
50	3,7	0,191	470	10,3	2,8	14,7	5,2	2,1	10,8
50	4,44	0,191	566	12,1	3,36	14,6	6,06	2,42	10,3
60	6,23	0,229	794	23,8	5,48	17,3	12,2	4,07	12,4
70	8,32	0,268	1060	44,5	8,79	20,5	22,1	6,32	14,4
80	10,7	0,307	1360	73,7	12,8	23,3	37	9,25	16,5
90	13,4	0,345	1710	119	18,2	26,4	58,5	13	18,5
100	16,4	0,383	2090	179	24,6	29,2	88,3	17,7	20,5
120	23,2	0,459	2960	366	42	35,1	178	29,7	24,5
140	31,3	0,537	3990	660	64,7	40,7	330	42,2	28,8
30	3,64	0,171	464	2,58	1,11	7,5	8,62	2,87	13,6
35	4,66	0,201	594	4,49	1,65	8,7	15,1	4,31	15,9
40	6,21	0,233	791	7,81	2,5	9,9	28,5	7,13	19
50	9,42	0,287	1200	18,7	4,78	12,5	67,7	13,5	22,8
60	13,4	0,345	1700	38	8,09	14,9	137	22,8	28,4

2.22 Rondstaal

d [mm]	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]	$I \times 10^4$	$W \times 10^3$	i
6	0,222	0,019	28,3	0,0063	0,021	1,5
8	0,395	0,025	50,3	0,0201	0,050	2
10	0,617	0,031	78,5	0,0490	0,098	2,5
12	0,888	0,038	113	0,1017	0,169	3
13	1,044	0,041	133	0,1401	0,215	3,25
14	1,208	0,044	154	0,1885	0,269	3,5
15	1,387	0,047	177	0,2485	0,331	3,75
16	1,578	0,050	201	0,3216	0,402	4
19	2,226	0,060	284	0,6397	0,673	4,75
20	2,466	0,063	314	0,7853	0,785	5
22	2,984	0,069	380	1,1499	1,045	5,5
25	3,853	0,079	491	1,9174	1,533	6,25
28	4,834	0,088	616	3,0171	2,155	7
30	5,55	0,094	707	3,9760	2,650	7,5
32	6,31	0,100	804	5,1471	3,216	8
35	7,55	0,110	962	7,3661	4,209	8,75
38	8,90	0,119	1134	10,2353	5,387	9,5
40	9,86	0,126	1257	12,5663	6,283	10
45	12,5	0,141	1590	20,1288	8,946	11,25
50	15,4	0,157	1963	30,6796	12,271	12,5
55	18,7	0,173	2376	44,9180	16,333	13,75
60	22,2	0,189	2827	63,6172	21,205	15
65	26	0,204	3318	87,6240	26,961	16,25
70	30,2	0,220	3848	117,8588	33,673	17,5
75	34,7	0,236	4418	155,3155	41,417	18,75
80	39,5	0,251	5027	201,0619	50,265	20
85	44,5	0,267	5675	256,2392	60,291	21,25
90	49,9	0,283	6362	322,0623	71,569	22,5
95	55,7	0,298	7090	399,8198	84,172	23,75
100	61,7	0,314	7850	490,8738	98,174	25

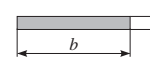
Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

2.23 Vierkantstaal

d [mm]	M [kg/m′]	O [m^2/m′]	A [mm^2]	$I \times 10^4$	$W \times 10^3$	i
6	0,283	0,024	36	0,0108	0,036	1,73
8	0,502	0,32	64	0,0341	0,085	2,31
10	0,785	0,040	100	0,0833	0,166	2,89
12	1,13	0,048	144	0,1728	0,288	3,46
13	1,33	0,052	169	0,2380	0,366	3,75
14	1,54	0,056	196	0,3201	0,457	4,04
16	2,01	0,064	256	0,5461	0,682	4,62
19	2,83	0,076	361	1,0860	1,143	5,48
20	3,14	0,080	400	1,3333	1,333	5,77
22	3,80	0,088	484	1,9521	1,774	6,35
25	4,91	0,100	625	3,2552	2,604	7,22
28	6,15	0,112	784	5,1221	3,658	8,08
30	7,07	0,120	900	6,7500	4,500	8,66
32	8,04	0,128	1024	8,7381	5,461	9,24
35	9,62	0,140	1225	12,5052	7,145	10,10
38	11,3	0,152	1444	17,3761	9,145	10,97
40	12,6	0,16	1600	21,3333	10,666	11,55
45	15,9	0,18	2025	34,1718	15,187	12,99
50	19,6	0,20	2500	52,0833	20,833	14,43
55	23,7	0,22	3025	76,2552	27,729	15,88
60	28,3	0,24	3600	108,0000	36,000	17,32
70	38,5	0,28	4900	200,0833	57,166	20,21
80	50,2	0,32	6400	341,3333	85,333	23,09
90	63,6	0,36	8100	546,7500	121,500	25,98
100	78,5	0,40	10000	833,3333	166,666	28,87
120	113	0,48	14400	1728,0000	288,000	34,64
130	133	0,52	16900	2380,0833	366,166	37,53

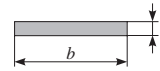
Symbolen en eenheden zie pag. E2/3.

2.24 Platstaal



$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
10 × 3	0,236	0,026	30
12	0,283	0,030	36
16	0,377	0,038	48
20	0,471	0,046	60
25	0,589	0,056	75
30	0,707	0,066	90
35	0,826	0,076	105
40	0,94	0,086	120
50	1,18	0,106	150
65	1,53	0,136	195
75	1,79	0,156	225
100	2,36	0,206	300
125	2,95	0,256	375
12 × 4	0,377	0,032	48
16	0,502	0,040	64
20	0,628	0,048	80
25	0,785	0,058	100
30	0,942	0,068	120
35	1,10	0,078	140
40	1,26	0,088	160
45	1,41	0,098	180
50	1,57	0,108	200
60	1,88	0,128	240
65	2,04	0,138	260
70	2,20	0,148	280
75	2,36	0,158	300
12 × 5	0,471	0,034	60
16	0,628	0,042	80
20	0,785	0,05	100
25	0,981	0,06	125
30	1,18	0,07	150
35	1,37	0,08	175
40	1,57	0,09	200
45	1,77	0,10	220
50	1,96	0,11	250
55	2,16	0,12	275
60	2,36	0,13	300
65	2,55	0,14	325
70 × 5	2,75	0,15	350
75	2,94	0,16	375
80	3,14	0,17	400
90	3,53	0,19	450
100	3,93	0,21	500
130	5,10	0,27	650
150	5,89	0,31	750
12 × 6	0,565	0,036	72
16	0,754	0,044	96
20	0,942	0,052	120
25	1,18	0,062	150
30	1,41	0,072	180
35	1,65	0,082	210
40	1,88	0,092	240
45	2,12	0,102	270
50	2,36	0,112	300
55	2,59	0,122	330
60	2,83	0,132	360
65	3,06	0,142	390
70	3,30	0,152	420
75	3,53	0,162	450
80	3,77	0,172	480
90	4,24	0,192	540
100	4,71	0,212	600
110	5,18	0,232	660
120	5,65	0,252	720
130	6,12	0,272	780
150	7,07	0,312	900
12 × 8	0,754	0,040	96
16	1,00	0,048	128
20	1,26	0,056	160
25	1,57	0,066	200
30	1,88	0,076	240
35	2,20	0,086	280
40	2,51	0,096	320
45	2,83	0,106	360

Platstaal (vervolg)

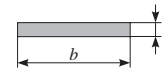


$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
50 × 8	3,14	0,116	400
50	3,45	0,126	440
60	3,77	0,136	480
65	4,08	0,146	520
70	4,4	0,156	560
75	4,71	0,166	600
80	5,02	0,176	640
90	5,65	0,196	720
100	6,28	0,216	800
110	6,91	0,236	880
120	7,54	0,256	960
130	8,16	0,276	1040
140	8,79	0,296	1120
150	9,42	0,316	1200
16 × 10	1,26	0,042	160
20	1,57	0,06	200
25	1,96	0,07	250
30	2,36	0,08	300
35	2,75	0,09	350
40	3,14	0,10	400
45	3,53	0,11	450
50	3,93	0,12	500
55	4,32	0,13	550
60	4,71	0,14	600
65	5,1	0,15	650
70	5,5	0,16	700
75	5,89	0,17	750
80	6,28	0,18	800
90	7,07	0,20	900
100	7,85	0,22	1000
110	8,64	0,24	1100
120	9,42	0,26	1200
130	10,2	0,28	1300
140	11	0,30	1400
150	11,8	0,32	1500

$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
20 × 12	1,88	0,064	240
25	2,36	0,074	300
30	2,83	0,084	360
35	3,3	0,094	420
40	3,77	0,104	480
45	4,24	0,114	540
50	4,71	0,124	600
55	5,18	0,134	660
60	5,65	0,144	720
65	6,12	0,154	780
70	6,59	0,164	840
75	7,07	0,174	900
80	7,54	0,184	960
90	8,48	0,204	1080
100	9,42	0,224	1200
110	10,4	0,244	1320
120	11,3	0,264	1440
130	12,2	0,284	1560
140	13,2	0,304	1680
150	14,1	0,324	1800
20 × 15	2,36	0,07	300
25	2,94	0,08	375
30	3,53	0,09	450
35	4,12	0,10	525
40	4,71	0,11	600
45	5,3	0,12	675
50	5,89	0,13	750
55	6,48	0,14	825
60	7,07	0,15	900
65	7,65	0,16	975
70	8,24	0,17	1050
75	8,83	0,18	1125
80	9,42	0,19	1200
90	10,6	0,21	1350
100	11,8	0,23	1500
110	13	0,25	1650

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

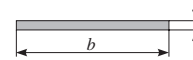
Platstaal (vervolg)



$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
120 × 15	14,1	0,27	1800
130	15,3	0,29	1950
140	16,5	0,31	2100
150	17,7	0,33	2250
30 × 20	4,71	0,10	600
35	5,5	0,11	700
40	6,28	0,12	800
45	7,07	0,13	900
50	7,85	0,14	1000
55	8,64	0,15	1100
60	9,42	0,16	1200
65	10,2	0,17	1300
70	11	0,18	1400
75	11,8	0,19	1500
80	12,6	0,20	1600
90	14,1	0,22	1800
100	15,7	0,24	2000
110	17,3	0,26	2200
120	18,8	0,28	2400
130	20,4	0,30	2600
140	22	0,32	2800
150	23,6	0,34	3000
35 × 25	6,87	0,12	875
40	7,85	0,13	1000
45	8,83	0,14	1125
50	9,81	0,15	1250
55	10,8	0,16	1375
60	11,8	0,17	1500
65	12,8	0,18	1625
70	13,7	0,19	1750
75	14,7	0,20	1800
80	15,7	0,21	2000
90	17,7	0,23	2250
100	19,6	0,25	2500
110	21,6	0,27	2750

$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
120 × 25	23,6	0,29	3000
130	25,5	0,31	3250
140	27,5	0,33	3500
150	29,4	0,35	3750
50 × 30	11,8	0,16	1500
60	14,1	0,18	1800
65	15,3	0,19	1950
70	16,5	0,20	2100
75	17,7	0,21	2250
80	18,8	0,22	2400
90	21,2	0,24	2700
100	23,6	0,26	3000
110	26	0,28	3300
120	28,3	0,30	3600
130	30,6	0,32	3900
140	33	0,34	4200
150	35,3	0,36	4500
60 × 40	18,8	0,20	2400
65	20,4	0,21	2600
70	22	0,22	2800
75	23,6	0,23	3000
80	25,1	0,24	3200
90	28,3	0,26	3600
100	31,4	0,28	4000
110	34,6	0,30	4400
120	37,7	0,32	4800
130	40,8	0,34	5200
150	47,1	0,38	6000
70 × 50	27,5	0,24	3500
75	29,4	0,25	3750
90	35,3	0,28	4500
100	39,3	0,30	5000
120	47,2	0,34	6000
130	51	0,36	6500
150	58,9	0,40	7500

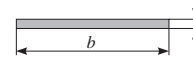
2.25 Strip



$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
165 × 5	6,5	0,34	825
180	7,1	0,37	900
200	7,9	0,41	1000
230	9,1	0,47	1150
250	9,9	0,51	1250
280	11	0,57	1400
300	11,8	0,61	1500
400	15,7	0,81	2000
165 × 6	7,8	0,342	990
180	8,5	0,372	1080
200	9,5	0,412	1200
230	10,9	0,472	1380
250	11,8	0,512	1500
280	13,2	0,572	1680
300	14,2	0,612	1800
350	16,5	0,712	2100
400	18,9	0,812	2400
450	21,2	0,912	2700
500	23,6	1,012	3000
165 × 7	9,24	0,344	1155
180	10,1	0,374	1260
200	11,2	0,414	1400
250	14	0,514	1750
300	16,8	0,614	2100
400	22,4	0,814	2800
500	28	1,014	3500
165 × 8	10,4	0,346	1320
180	11,3	0,376	1440
200	12,6	0,416	1600
230	14,5	0,476	1840
250	15,7	0,516	2000
280	17,6	0,576	2240
300	18,9	0,616	2400
350	22	0,716	2800
400	25,2	0,816	3200
450	28,3	0,916	3600
500	31,4	1,016	4000

$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
165 × 10	13	0,35	1650
180	14,2	0,38	1800
200	15,7	0,42	2000
230	18,1	0,48	2300
250	19,7	0,52	2500
280	22	0,58	2800
300	23,6	0,62	3000
350	27,5	0,72	3500
400	31,4	0,82	4000
450	35,4	0,92	4500
500	39,3	1,02	5000
165 × 12	15,6	0,354	1980
180	17	0,384	2160
200	18,9	0,424	2400
230	21,7	0,484	2760
250	23,6	0,524	3000
280	26,4	0,584	3360
300	28,3	0,624	3600
350	33	0,724	4200
400	37,7	0,824	4800
450	42,4	0,924	5400
500	47,1	1,024	6000
165 × 15	19,5	0,36	2475
180	21,2	0,39	2700
200	23,6	0,43	3000
230	27,1	0,49	3450
250	29,5	0,53	3750
300	35,4	0,63	4500
350	41,3	0,73	5250
400	47,1	0,83	6000
450	53	0,93	6750

Strip (vervolg)



$b \times t$	M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
200 × 18	28,3	0,436	3600
250	35,4	0,536	4500
165 × 20	26	0,37	3300
180	28,3	0,40	3600
200	31,4	0,44	4000
230	36,2	0,50	4600
250	39,3	0,54	5000
300	47,1	0,64	6000
350	55	0,74	7000
400	62,8	0,84	8000
450	70,7	0,94	9000
165 × 25	32,4	0,38	4125
180	35,4	0,41	4500
200	39,3	0,45	5000
230	45,2	0,51	5750
250	49,1	0,55	6250
300	58,9	0,65	7500
350	68,7	0,75	8750
180 × 30	42,4	0,42	5400
200	47,1	0,46	6000
250	58,9	0,56	7500
300	70,7	0,66	9000
180 × 40	56,6	0,44	7200
200	62,8	0,48	8000
250	78,5	0,58	10000
180 × 50	70,7	0,46	9000
200	78,5	0,50	10000

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

2.26 Plaatstaal

Dunne platen onder 3 mm

Dikte	M [kg/m^2]	Massa per plaat in kg (afgerond) in formaat:	
		2000 × 1000	2500 × 1250
2,95	23,5	47	74
2,75	22	44	69
2,50	20	40	63
2,25	18	36	56
2	16	32	50
1,75	14	28	44
1,50	12	24	38
1,25	10	20	31,5
1	8	16	25
0,875	7	14	22
0,75	6	12	19
0,625	5	10	16
0,562	4,5	9	14
0,50	4	8	12,5

Leverbaar in zwarte, blanke, gegalvaniseerde en elektrolytisch verzinkte uitvoering.

Platen 3 mm en dikker

Afmetingen	Massa per plaat in kg (afgerond) voor dikten:																									
	3	4	5	6	7	8	10	12	15	18	20	22	25	28	30	32	35	38	40	45	50	60	70	80	90	100
2000 × 1000	48	64	80	96	112	128	160	192	240	288	320	352	400	448	480	512	560	608	640	720	800	960	1120	1280	1440	1600
2500 × 1250	75	100	125	150	–	200	250	325	375	–	500	–	625	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3000 × 1500	108	144	180	216	–	288	360	432	540	–	720	–	900	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5000 × 1000	120	160	200	240	280	320	400	480	600	720	800	880	1000	1120	1200	1280	1400	1520	1600	1800	2000	2400	2800	3200	3600	4000
1250	150	200	250	300	350	400	500	600	750	900	1000	1100	1250	1400	1500	1600	1750	1900	2000	2250	2500	3000	3500	4000	4500	5000
1500	180	240	300	360	420	480	600	720	900	1080	1200	1320	1500	1680	1800	1920	2100	2280	2400	2700	3000	3600	4200	4800	5400	6000
1800	216	288	360	432	504	576	720	864	1080	1296	1440	1584	1800	2016	2160	2304	2520	2736	2880	3240	3600	4320	5040	5760	6480	7200
2000	–	–	400	480	560	640	800	960	1200	1440	1600	1760	2000	2240	2400	2560	2800	3040	3200	3600	4000	4800	5600	6400	7200	8000
6000 × 1000	144	192	240	288	336	384	480	576	720	864	960	1056	1200	1344	1440	1536	1680	1824	1920	2160	2400	2880	3360	3840	4320	4800
1250	180	240	300	360	420	480	600	720	900	1080	1200	1320	1500	1680	1800	1920	2100	2280	2400	2700	3000	3600	4200	4800	5400	6000
1500	216	288	360	432	504	576	720	864	1080	1296	1440	1584	1800	2016	2160	2304	2520	2736	2880	3240	3600	4320	5040	5760	6480	7200
1800	259	346	432	518	605	691	864	1037	1296	1555	1728	1901	2160	2419	2592	2765	3024	3283	3456	3888	4320	5184	6048	6912	7776	8640
2000	–	–	480	576	672	768	960	1152	1440	1728	1920	2112	2400	2688	2880	3072	3360	3648	3840	4320	4800	5760	6720	7680	8640	9600
2250	–	–	540	648	756	864	1080	1296	1590	1945	2160	2376	2700	3024	3240	3456	3780	4104	4320	4860	5400	6480	7560	8640	9720	10800

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

2.27 Geruite platen

Ruitprofiel 50 × 25 mm (dikte gemeten zonder de rib)

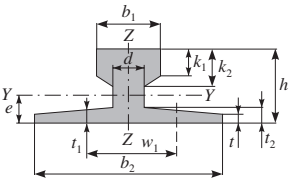
Afmetingen	Massa per plaat [kg]	Afmetingen	Massa per plaat [kg]
2000 × 1000 × 3	60	6000 × 1000 × 5	276
4	76	6000 × 1250 × 5	345
5	92	6000 × 1500 × 5	414
6	108		
8	140	5000 × 1000 × 6	270
10	172	5000 × 1250 × 6	337
		5000 × 1500 × 6	405
5000 × 1000 × 3	150		
5000 × 1250 × 3	187	6000 × 1000 × 6	324
5000 × 1500 × 3	225	6000 × 1250 × 6	405
		6000 × 1500 × 6	476
6000 × 1000 × 4	190		
5000 × 1250 × 4	237	5000 × 1200 × 8	350
5000 × 1500 × 4	305	5000 × 1250 × 8	437
		5000 × 1500 × 8	527
5000 × 1000 × 4	228		
5000 × 1250 × 4	285	5000 × 1000 × 10	430
6000 × 1500 × 4	342	5000 × 1250 × 10	537
		5000 × 1500 × 12	645
6000 × 1000 × 5	230		
6000 × 1250 × 5	287	5000 × 1500 × 12	510
5000 × 1500 × 5	345	5000 × 1250 × 12	637

Tranenplaten (dikte gemeten zonder tranen)

Afmetingen	Massa per plaat [kg]	Afmetingen	Massa per plaat [kg]
2000 × 1000 × 4	72	6000 × 1250 × 5	330
5	88	6000 × 1500 × 5	396
6	104		
8	136	5000 × 1000 × 6	260
		5000 × 1250 × 6	325
5000 × 1000 × 4	180	5000 × 1500 × 6	390
5000 × 1250 × 4	225	6000 × 1000 × 6	312
6000 × 1000 × 4	216	6000 × 1250 × 6	385
6000 × 1250 × 4	270	6000 × 1500 × 6	452
6000 × 1500 × 4	324		
		5000 × 1250 × 8	425
5000 × 1000 × 5	220	5000 × 1500 × 8	510
5000 × 1250 × 5	275	6000 × 1000 × 8	408
5000 × 1500 × 5	330	6000 × 1250 × 8	510
6000 × 1000 × 5	264	6000 × 1500 × 8	612

2.28 Kraanrails

Lengten 4 ÷ 12 m

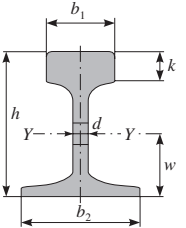


Aanduiding		Afmetingen												M	O	A	I_y	W_y	I_z	W_z
		b_1	r	h	b_2	d	k	k_1	t	t_1	w_1	t_2	e	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]				
																	× 10^4	× 10^3	× 10^4	× 10^3
A	45	45	4	55	125	24	20	24	8	11	54	14,5	21,9	22,2	0,377	2830	91	27,5	169	27
A	55	55	5	65	150	31	25	28,5	9	12,5	66	17,5	26,2	32	0,449	4070	182	46,9	339	44,9
A	65	65	6	75	175	38	30	34	10	14	78	20	30,6	43,5	0,516	5540	327	73,7	609	69,6
A	75	75	8	85	200	45	35	39,5	11	15,4	90	22	35	56,6	0,586	7210	545	109	1010	101
A	100	100	10	95	200	60	40	45,5	12	16,5	100	23	42,9	75,2	0,612	9560	888	170	1360	136
A	120	120	10	105	220	72	47,5	55,5	14	20	120	30	48	101,3	0,688	12900	1420	249	2370	215

Symbolen en eenheden zie pag. E2/3.

2.29 Spoorstaven

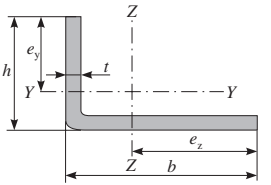
De met een ∗ gemerkte profielen worden niet meer gewalst maar zijn nog wel herbruikbaar.



Profiel no. Gangbare aanduidingen	Afmetingen						M [kg/m′]	I_y	W_y
	h	b_1	b_2	d	k	w			
								$\times 10^4$	$\times 10^3$
S 7 en 65/6,75*	65	25	50	5	12,5	29,4	6,75	51,6	15,2
S 10 en 70/10	70	32	58	6	17,3	30	10	85,7	24,4
S 12 en 80/12*	80	34	65	7	17,8	35,3	12	141	33,9
S 14 en 80/14	80	38	70	9	17,3	35,8	14	154	36,9
S 18 en 93/18,3	93	43	82	10	20	41,4	18,3	278	58,1
S 20 en 100/19,84	100	44	82	10	21,5	44,6	19,84	346	66,8
S 24 en Pruisen V	115	53	90	10	23,88	50,5	24,4	568,6	98
Type 32,25*	125	57	105	12			32,25	883,2	143,6
S33 en Pruisen VI	134	58	105	11	31,75	57	33,4	1036,6	154
Holland N.P. 38*	134	64	110	12,5			38,38	1180	174,8
S41	138	67	125	12	31,83	59,5	40,95	1337	196
Pruisen VIII	138	72	110	14			41,38	1351,6	193,1
Holland N.P. 42*	138	68	110	13,5			41,52	1360	196
Type 46,3	145	62	134	15			46,3	1587,9	204
Holland N.P. 46	142	72	120	14			46,55	1605	224
S49	148	67	125	14	38,83	62,5	49,43	1819	240
Type 50	151	72	140	15			50	2030	253
S36 en U36	153	65	140	15,5			50,57	2018	248
Type 54	159	70	140	16			54,43	2346	279,2
S64	172	74	150	16	43	74,5	64,65	3256	357,8

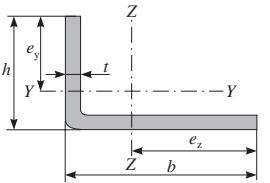
3 Koudgevormde profielen

3.1 Gelijkzijdige hoekstalen



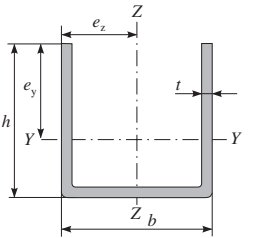
Profiel no.	Afmetingen							*Y-Y* as			Z-Z as		
	b	*t*	e_y	e_z	*M* [kg/m′]	*O* [m²/m′]	*A* [mm²]	I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
								$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$	
15 × 15 × 2	15	2	10,3	10,3	0,42	0,046	53	0,11	0,11	4,6	0,11	0,11	4,6
20 × 20 × 2	20	2	14,1	14,1	0,58	0,069	73	0,28	0,20	6,2	0,28	0,20	6,2
25 × 25 × 2	25	2	17,8	17,8	0,74	0,089	93	0,57	0,32	7,8	0,57	0,32	7,8
3		3	17,4	17,4	1,07	0,089	135	0,79	0,46	7,6	0,79	0,46	7,6
30 × 30 × 2	30	2	21,6	21,6	0,89	0,109	113	1,01	0,47	9,4	1,01	0,47	9,4
3		3	21,1	21,1	1,3	0,109	165	1,42	0,67	9,8	1,42	0,67	9,3
35 × 35 × 2	35	2	25,3	25,3	1,02	0,127	133	1,62	0,64	11	1,62	0,64	11
40 × 40 × 2	40	2	29,1	29,1	1,2	0,147	153	2,45	0,84	12,6	2,45	0,84	12,6
3		3	28,6	28,6	1,77	0,147	225	3,51	1,23	12,5	3,51	1,23	12,5
4		4	28,2	28,2	2,31	0,147	294	4,49	1,59	12,4	4,49	1,59	12,4
50 × 50 × 3	50	3	36,1	36,1	2,24	0,183	285	7,04	1,95	15,7	7,04	1,95	15,7
4		4	35,7	35,7	2,89	0,183	374	9,08	2,55	15,6	9,08	2,55	15,6
5		5	35,2	35,2	3,6	0,183	459	10,97	3,12	15,5	10,97	3,12	15,5
60 × 60 × 4	60	4	43,2	43,2	3,56	0,220	454	16,12	3,73	18,9	16,12	3,73	18,9

3.2 Ongelijkzijdige hoekstalen



Profiel no.	Afmetingen								Y-Y as			Z-Z as		
	b	h	t	e_y	e_z	M [kg/m']	O [m^2/m']	A [mm^2]	I_z	W_z	i_y	I_z	W_z	i_z
									$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$	
13 × 10 × 1,5	13	10	1,5	7,2	8,5	0,24	0,044	31	0,03	0,04	2,9	0,05	0,06	3,9
20 × 15 × 2	20	15	2	10,9	13,1	0,5	0,059	63	0,12	0,11	4,4	0,24	0,18	6,1
25 × 15 × 2	25	15	2	11,3	16,2	0,58	0,069	73	0,13	0,12	4,2	0,47	0,29	8
30 × 15 × 3	30	15	3	11,2	18,3	0,94	0,073	120	0,19	0,17	4	1,07	0,58	9,4
30 × 20 × 2	30	20	2	15,1	20	0,74	0,089	93	0,32	0,21	5,8	0,86	0,43	9,6
40 × 20 × 2	40	20	2	15,8	25,6	0,89	0,109	113	0,34	0,22	5,5	1,92	0,75	13
3	40	20	3	15,4	25	1,29	0,109	165	0,45	0,29	5,2	2,67	1,07	12,7
40 × 25 × 3	40	25	2	19,3	26,6	0,97	0,119	123	0,66	0,34	7,3	2,07	0,77	13
3	40	25	3	19	26,1	1,42	0,119	180	0,94	0,49	7,2	2,96	1,13	12,8
50 × 25 × 3	50	25	3	19,6	31,7	1,64	0,133	210	0,98	0,50	6,8	5,48	1,73	16,1
50 × 30 × 3	50	30	3	23,1	32,8	1,77	0,143	225	1,66	0,72	8,6	5,88	1,79	16,1
60 × 30 × 3	60	30	3	22,8	38,8	2	0,159	255	1,76	0,74	8,3	9,95	2,56	19,7
60 × 40 × 3	60	40	3	30,7	40,4	2,23	0,183	285	3,99	1,30	11,8	10,71	2,65	19,4
4	60	40	4	30,3	40	2,9	0,183	375	5,11	1,69	11,7	13,90	3,48	19,3
80 × 40 × 4	80	40	4	31,6	51,2	3,54	0,218	454	5,52	1,75	11	30,64	5,99	26
80 × 50 × 3	80	50	3	39,4	53,9	2,94	0,243	375	8,36	2,12	14,9	25,52	4,74	26,1
90 × 40 × 3	90	40	3	32,6	57,2	2,94	0,243	375	4,41	1,35	10,8	32,52	5,69	29,5
100 × 50 × 4	100	50	4	40	64,5	4,45	0,280	574	11,09	2,78	13,9	61,18	9,48	32,6

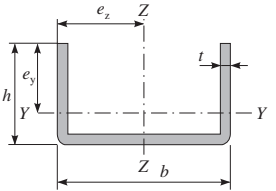
3.3 Gelijkzijdig U-staal

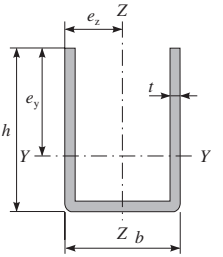


Profiel no.	Afmetingen								Y-Y as			Z-Z as		
	b	h	t	e_y	e_z	M [kg/m']	O [m^2/m']	A [mm^2]	I_y	W_e	i_y	I_z	W_e	i_z
									$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$	
12 × 12 × 2	12	12	2	6,9	6	0,47	0,048	59	0,08	0,11	3,6	0,11	0,19	4,4
15 × 15 × 1,5	15	15	1,5	9,2	7,5	0,48	0,068	60	0,13	0,15	4,9	0,21	0,28	5,9
2	15	15	2	8,9	7,5	0,61	0,068	77	0,17	0,19	4,6	0,25	0,34	5,7
20 × 20 × 1,5	20	20	1,5	12,5	10	0,65	0,098	83	0,34	0,27	6,4	0,55	0,55	8,1
2	20	20	2	12,2	10	0,85	0,098	107	0,43	0,35	6,3	0,67	0,67	7,9
23 × 23 × 1,5	23	23	1,5	14,5	11,5	0,76	0,118	96	0,53	0,36	7,4	0,86	0,75	9,5
25 × 25 × 1,5	25	25	1,5	15,9	12,5	0,83	0,130	105	0,69	0,43	8,1	1,13	0,90	10,4
2	25	25	2	15,6	12,5	1,08	0,130	137	0,87	0,56	8	1,41	1,12	10,1
30 × 30 × 1,5	30	30	1,5	19,2	15	1,01	0,160	128	1,21	0,63	9,8	2,01	1,34	12,6
2	30	30	2	18,9	15	1,31	0,160	167	1,56	0,82	9,6	2,54	1,69	12,3
3	30	30	3	18,4	15	1,9	0,160	240	2,16	1,18	9,5	3,40	2,27	11,9
32 × 32 × 2	32	32	2	20,2	16	1,4	0,170	179	1,90	0,94	10,3	3,12	1,95	13,2
36 × 36 × 2	36	36	2	22,9	18	1,6	0,190	203	2,75	1,20	11,6	4,55	2,53	15
40 × 40 × 2	40	40	2	25,6	20	1,78	0,214	227	3,83	1,50	13	6,36	3,18	16,7
3	40	40	3	25	20	2,6	0,214	330	5,42	2,17	12,8	8,78	4,39	16,3
4	40	40	4	25,1	20	3,57	0,214	437	7,34	2,93	13	11,50	5,75	16,3
50 × 50 × 3	50	50	3	31,7	25	3,3	0,260	420	10,97	3,46	16,2	18,03	7,21	20,7
4	50	50	4	31,2	25	4,3	0,260	547	13,97	4,49	16	22,47	8,99	20,2
60 × 60 × 4	60	60	4	37,8	30	5,24	0,309	667	24,83	6,57	19,3	40,55	13,52	24,7
70 × 70 × 4	70	70	4	44,5	35	6,2	0,369	787	40,45	9,09	22,7	60,50	19,29	29,1

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

3.4 Ongelijkzijdig U-staal





Profiel no.	Afmetingen								*Y-Y* as			*Z-Z* as		
	b	*h*	*t*	e_y	e_z	*M* [kg/m']	*O* [m²/m']	*A* [mm²]	I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
									× 10^4	× 10^3		× 10^4	× 10^3	
20 × 15 × 2	20	15	2	9,5	10	0,68	0,076	87	0,19	0,20	4,8	0,61	0,61	8,4
25 × 15 × 2	25	15	2	9,9	12,5	0,76	0,087	97	0,21	0,21	4,6	0,88	0,70	9,5
27 × 28,5 × 1,5	27	28,5	1,5	18	13,5	0,99	0,160	119	1,01	0,56	9,2	1,51	1,12	11,3
30 × 15 × 2	30	15	2	10,3	15	0,85	0,096	107	0,22	0,22	4,6	1,36	0,91	11,3
3	30	15	3	9,8	15	1,19	0,096	150	0,30	0,31	4,5	1,75	1,17	10,8
30 × 20 × 2	30	20	2	13,5	15	1	0,116	132	0,52	0,39	6,3	1,86	1,24	11,9
30 × 50 × 3	30	50	3	28,9	15	2,83	0,220	360	8,99	3,11	15,8	5,60	3,73	12,5
33 × 50 × 4	33	50	4	28,8	16,5	3,76	0,245	479	11,80	4,09	15,7	8,48	5,14	13,3
37 × 50 × 3	37	50	3	30	18,5	3,01	0,258	381	9,76	3,25	16	9,06	4,90	15,4
40 × 15 × 2	40	15	2	10,9	20	1	0,130	127	0,25	0,23	4,4	2,75	1,38	14,7
40 × 20 × 2	40	20	2	14,1	20	1,17	0,150	147	0,54	0,38	6,1	3,47	1,73	15,4
40 × 25 × 3	40	25	3	16,6	20	1,89	0,164	240	1,46	0,88	7,9	5,70	2,85	15,4
40 × 30 × 2	40	30	2	20	20	1,48	0,173	187	1,74	0,87	9,6	4,93	2,46	16,2
3	40	30	2	20	20	2,13	0,173	267	2,57	1,29	9,3	7,16	3,58	16,4
44 × 32 × 3	44	32	3	21	22	2,32	0,179	295	3,03	1,44	10,2	8,92	4,05	17,4
45 × 20 × 4	45	20	4	13,5	22,5	2,26	0,164	288	0,99	0,74	5,9	7,48	3,32	16,1
45 × 40 × 2	45	40	2	26,2	22,5	1,86	0,220	237	4,01	1,54	13	8,31	3,71	18,8
50 × 25 × 3	50	25	3	17,4	25	2,13	0,185	270	1,59	0,91	7,7	9,74	3,89	19
50 × 30 × 3	50	30	3	20,4	25	2,37	0,181	300	2,65	1,30	9,4	11,39	4,56	19,5
50 × 40 × 3	50	40	3	26,1	25	2,83	0,221	360	5,92	2,27	12,8	14,71	5,88	20,2
4	50	40	4	25,3	25	3,61	0,221	464	7,87	3,10	13,1	19,30	7,72	20,2
60 × 30 × 3	60	30	3	21,1	30	2,6	0,203	330	2,83	1,34	9,2	17,57	5,85	23
60 × 40 × 3	60	40	3	27,1	30	3,07	0,241	390	6,36	2,35	12,8	22,50	7,50	24
4	60	40	4	26,6	30	3,95	0,241	508	8,06	3,03	12,6	28,06	9,35	23,5
65 × 40 × 5	65	40	5	26,5	32,5	5,13	0,264	643	9,90	3,74	12,4	39,82	12,25	24,9
65 × 42,5 × 4	65	42,5	4	28,5	32,5	4,37	0,248	548	9,86	3,46	13,4	36,53	11,40	25,9

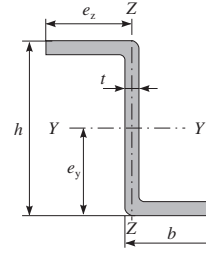
Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

Ongelijkzijdig U-staal (vervolg)

Profiel no.	Afmetingen								*Y-Y* as			*Z-Z* as		
	b	*h*	*t*	e_y	e_z	*M* [kg/m']	*O* [m^2/m']	*A* [mm^2]	I_y	W_z	i_y	I_z	W_z	i_z
									$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$	
65 × 42, 5 × 5	65	42,5	5	28	32,5	5,19	0,248	650	11,64	4,16	13,4	40,67	12,50	25
70 × 30 × 3	70	30	3	21,7	35	2,82	0,223	360	3,56	1,64	10	25,40	7,26	26,6
70 × 40 × 3	70	40	3	27,1	35	3,30	0,261	420	5,86	2,16	11,8	32,22	9,20	27,7
4	70	40	4	27,4	35	4,31	0,261	548	8,48	3,09	12,5	40,22	11,55	27,2
70 × 50 × 4	70	50	4	33,3	35	4,93	0,287	627	15,96	4,79	15,9	47,54	13,58	27,5
80 × 30 × 3	80	50	3	22,2	40	3,07	0,241	390	3,09	1,34	8,9	35,02	8,76	30
80 × 40 × 3	80	40	3	28,6	40	3,56	0,281	450	7,02	2,46	12,5	43,91	10,98	31,3
4	80	40	4	28,2	40	4,63	0,281	588	8,99	3,19	12,4	55,52	13,88	30,7
80 × 45 × 4	80	45	4	31,2	40	4,95	0,293	627	13,5	4,33	14,7	61,30	15,30	31,3
5	80	45	5	31,2	40	6,04	0,293	800	15,5	4,97	14	77,87	19,40	31,2
6	80	45	6	30,2	40	7,30	0,293	902	17,2	5,71	13,8	82,81	20,70	30,2
80 × 50 × 3	80	50	3	34,6	40	4	0,321	510	12,97	3,74	15,9	53,09	14,27	32,3
4	80	50	4	34,2	40	5,26	0,321	668	16,81	4,92	15,9	67,10	16,77	31,6
5	80	50	5	33,7	40	6,44	0,321	818	20,17	5,99	15,7	79,80	19,95	31,2
6	80	50	6	33,2	40	7,50	0,321	962	23,33	7,03	15,5	91,05	22,76	30,8
90 × 30 × 3	90	30	3	22,6	45	3,28	0,265	420	3,19	1,41	8,7	46,60	10,36	33,2
90 × 40 × 3	90	40	3	29,2	45	3,77	0,305	480	7,26	2,49	12,3	58,16	12,92	34,8
100 × 30 × 3	100	30	3	23	50	3,54	0,281	450	3,29	1,43	8,5	60,30	12,06	36,6
100 × 40 × 4	100	40	4	29,3	50	5,24	0,309	667	9,59	3,27	12	94,73	18,95	33,2
100 × 50 × 3	100	50	3	36,1	50	4,48	0,397	570	14,01	3,90	15,7	88,58	17,72	39,4
4	100	50	4	35,7	50	5,87	0,397	748	18,15	5,08	15,6	113,18	22,64	38,8
5	100	50	5	35,2	50	7,20	0,397	918	21,94	6,23	15,4	135,53	27,11	38,4
6	100	50	6	34,7	50	8,51	0,397	1082	25,33	7,30	15,3	155,50	31,10	37,9
100 × 60 × 5	100	60	5	41,2	50	8	0,414	1018	36,80	8,87	18,9	158,13	31,63	39,5
6	100	60	6	40,8	50	9,43	0,414	1202	42,52	10,43	18,9	182,27	36,45	38,8
110 × 50 × 4	110	50	4	36,3	55	6,19	0,369	788	18,73	5,16	15,4	141,75	25,77	42,4
120 × 50 × 3	120	50	3	37,3	60	4,93	0,388	630	14,93	4	15,4	135,73	22,62	46,4
4	120	50	4	36,9	60	6,52	0,388	828	19,25	5,22	15,3	174,26	29,04	45,8
120 × 55 × 6	120	55	6	39,6	60	10,27	0,419	1260	36,45	9,19	16,7	277,61	46,27	46,5
120 × 60 × 4	120	60	4	43,2	60	7,14	0,429	908	32,11	7,44	18,8	201,21	33,54	47
6	120	60	6	42,2	60	10,38	0,429	1322	45,43	10,77	18,5	281,07	46,85	46,1
140 × 50 × 4	140	50	4	37,8	70	7,10	0,459	907	20,18	5,33	14,9	251,84	35,97	52,6
140 × 60 × 4	140	60	4	44,4	70	7,76	0,468	988	33,73	7,60	18,5	288,96	41,28	54,2
6	140	60	6	43,5	70	11,33	0,468	1442	47,85	11,01	18,2	406,30	58,04	53,1
140 × 65 × 6	140	65	6	47,2	70	12,16	0,509	1488	61,36	13	20,3	455,30	65,04	55,4
160 × 65 × 6	160	65	6	47,8	80	12,73	0,549	1622	62,91	13,16	19,7	594,84	74,36	60,6
160 × 70 × 5	160	70	5	51,4	80	11,14	0,574	1418	66,02	12,84	21,6	541,31	67,66	61,8
180 × 60 × 4	180	60	4	46,3	90	9,07	0,574	1148	36,32	7,86	17,8	524,97	58,33	61,9
5	180	60	5	45,8	90	11,14	0,574	1418	44,24	9,65	17,7	638,67	70,64	67,2

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

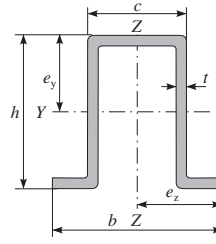
3.5 Z-Profielen



Profiel no.	Afmetingen					M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
	b	h	t	e_y	e_z			
30 × 20 × 2	20	30	2	15	19	1,03	0,122	127
40 × 20 × 3	20	40	3	20	18,5	1,70	0,142	210
40 × 30 × 3	30	40	3	20	28,5	2,20	0,173	270
50 × 30 × 3	30	50	3	25	28,5	2,44	0,193	300
80 × 40 × 3	40	80	3	40	38,5	3,63	0,293	450
100 × 50 × 4	50	100	4	50	48	6	0,363	747

Profiel no.	*Y-Y* as			*Z-Z* as		
	I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
	× 10^4	× 10^3		× 10^4	× 10^3	
30 × 20 × 2	1,75	1,17	11,7	0,92	0,48	8,5
40 × 20 × 3	3,98	1,99	13,7	1,28	0,69	7,8
40 × 20 × 3	6,72	3,36	15,8	4,64	1,63	13,1
50 × 30 × 3	11,39	4,55	19,5	4,64	1,63	12,4
80 × 40 × 3	43,92	10,98	31,2	11,43	2,97	16
100 × 50 × 4	113,01	22,60	39,2	29,24	6,09	19,8

3.6 Omega-profielen

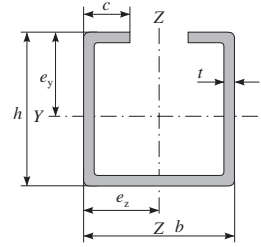


Profiel no.	Afmetingen						M	O	A
	b	h	c	t	e_y	e_z	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]
45 × 20 × 20 × 2	45	20	20	2	11,1	22,5	1,20	0,133	152
45 × 40 × 24,5 × 2	45	40	24,5	2	20	22,5	1,81	0,213	232
50 × 35 × 25 × 2	50	35	25	2	18,1	25	1,73	0,203	222
55 × 47 × 30 × 2	55	47	30	2	23,3	27,5	2,18	0,261	280
55 × 50 × 35 × 3	55	50	35	3	23,5	27,5	3,30	0,269	424
65 × 38 × 38 × 2,25	65	38	38	2,25	18,1	32,5	2,31	0,241	294
65 × 40 × 30 × 2,5	65	40	30	2,5	21,4	32,5	2,6	0,244	334
70 × 40 × 30 × 2	70	40	30	2	21,9	35	3,2	0,263	282
75 × 60 × 37 × 3	75	60	37	3	31,1	37,5	4,2	0,335	544
85 × 25 × 40 × 2,5	85	25	40	2,5	13,4	42,5	2,4	0,224	309

Profiel no.	*Y-Y* as			*Z-Z* as		
	I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
	× 10^4	× 10^3		× 10^4	× 10^3	
45 × 20 × 20 × 2	0,82	0,74	7,4	2,02	0,90	11,5
45 × 40 × 24,5 × 2	4,69	2,35	14,2	3,32	1,47	12
50 × 35 × 25 × 2	3,62	2	12,8	3,69	1,48	12,9
55 × 47 × 30 × 2	8,08	3,41	17	6,10	2,22	14,8
55 × 50 × 35 × 3	12,90	4,87	17,4	10,81	3,94	16
65 × 38 × 38 × 2,25	5,94	2,94	14,2	9,87	3,04	18,3
65 × 40 × 30 × 2,5	7,27	3,40	14,8	8,96	2,76	16,4
70 × 40 × 30 × 2	6,41	2,92	15,1	8,50	2,42	17,4
75 × 60 × 37 × 3	25,56	8,22	21,7	19,79	5,28	19,1
85 × 25 × 40 × 2,5	2,93	2,19	9,7	16,19	3,81	22,9

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

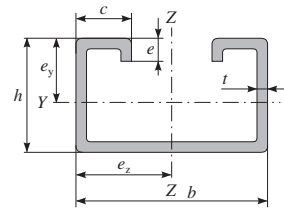
3.7 Doosprofielen



Profiel no.	Afmetingen						M [kg/m′]	O [m²/m′]	A [mm²]
	b	h	c	t	e_y	e_z			
30 × 30 × 11 × 2	30	30	11	2	16,1	15	1,53	0,098	198
80 × 40 × 16 × 2	80	40	16	2	25,1	40	2,82	0,358	358

Profiel no.	*Y-Y* as			*Z-Z* as		
	I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
	× 10^4	× 10^3		× 10^4	× 10^3	
30 × 30 × 11 × 2	2,38	1,48	11	2,71	1,81	11,7
80 × 40 × 16 × 2	8,32	3,31	15,3	35,50	8,88	31,6

3.8 Railprofielen



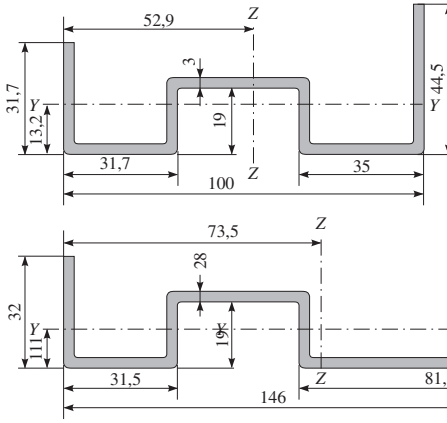
Profiel 50 × 30 × 14 × 6 × 3

Afmetingen									
b	*h*	*c*	*e*	*t*	e_y	e_z	*M* [kg/m′]	*O* [m^2/m′]	*A* [mm^2]
50	30	14	6	3	17,4	25	2,95	0,238	361

Y-Y as			*Z-Z* as		
I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
× 10^4	× 10^3		× 10^4	× 10^3	
4,24	2,44	10,8	12,69	5,08	18,8

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

3.9 Trailerprofielen



Profiel no.	Afmetingen			*M*	*O*	*A*	*Y-Y* as			*Z-Z* as		
	profiel-breedte	e_y	e_z	[kg/m′]	[m²/m′]	[mm²]	I_y	W_y	i_y	I_z	W_z	i_z
							$\times 10^4$	$\times 10^3$		$\times 10^4$	$\times 10^3$	
100	100	13,2	52,9	4,6	0,390	590	7,10	2,27	11	74,27	14,05	35,4
146	146	11,1	73,5	5,3	0,485	684	8,25	2,47	10,9	177,72	24,18	50,9

3.10 Plaatstaal

Koudgewalste blanke platen

Dikte [mm]	M [kg/m^2]	Massa [kg] van een plaat in formaat:					
		2000 × 1000	2500 × 1000	3000 × 1000	2500 × 1250	3000 × 1250	3000 × 1500
0,35	2,8	5,6	–	–	–	–	–
0,40	3,2	6,4	–	–	–	–	–
0,50	4	8	–	–	12,5	–	–
0,56	4,5	9	–	–	–	–	–
0,60	4,8	9,6	–	–	–	–	–
0,63	5	10	–	–	–	–	–
0,70	5,6	11,2	–	–	–	–	–
0,75	6	12	–	–	18,8	–	–
0,80	6,4	12,8	16	–	20	–	–
0,90	7,2	14,4	–	–	22,5	–	–
1	8	16	20	24	25	30	36
1,20	9,6	19,2	–	–	–	–	–
1,25	10	20	–	30	31,3	37,5	–
1,50	12	24	30	36	37,5	–	54
1,60	12,5	25	–	–	–	–	–
1,75	14	28	–	–	44	–	–
1,80	14,5	29	–	–	45	–	–
2	16	32	40	48	50	60	72
2,25	18	36	–	–	–	–	–
2,50	20	40	–	–	62,5	75	90
2,75	22	44	–	–	69	–	–
3	24	48	60	72	75	90	108

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

Koudgewalste thermisch verzinkte platen[1)]

Dikte [mm]	M [kg/m^2]	Massa [kg] van een plaat in formaat:				
		2000 × 1000	2500 × 1000	2500 × 1250	3000 × 1000	3000 × 1500
3	24	48	–	75	–	–
2,5	20	40	–	–	–	–
2	16	32	–	50	–	72
1,75	14	28	–	–	–	–
1,50	12	24	–	37,5	36	54
1,25	10	20	–	35	–	–
1	8	16	–	25	24	36
0,87	7	14	–	22	–	–
0,80	6,4	12,8	–	–	–	–
0,75	6	12	15	18,8	–	–
0,63	5	10	–	–	–	–
0,50	4	8	–	–	–	–

[1)]Verkrijgbaar in gebloemde en gematteerde uitvoering.

Symbolen en eenheden, zie pag. E2/3.

Landmeten F1

1 Instrumenten en kaarten
- 1.1 Overzicht meetinstrumenten
- 1.2 Waterpasinstrumenten
- 1.3 Theodoliet
- 1.4 Overige meetinstrumenten
- 1.5 Kaarten in Nederland

2 Metingen
- 2.1 Meetmethoden
- 2.2 Lengtemeting
- 2.3 Hoogtemetingen
- 2.4 Waterpassing
- 2.5 Hoekmetingen
- 2.6 Tachymetrie
- 2.7 Deformatiemetingen
- 2.8 Berekeningen

3 Uitzetten van bogen
- 3.1 Cirkelboog
- 3.2 Overgangsbogen

4 Luchtkartering
- 4.1 Fotogrammetrie (luchtkartering)
- 4.2 Beeldenparen-fotogrammetrie
- 4.3 Centrale Luchtfoto Catalogus van Nederland

5 Kaartprojecties

6 Astronomische plaatsbepaling

1 Instrumenten en kaarten

1.1 Overzicht meetinstrumenten

Tabel 1.1 Meetinstrumenten ingedeeld naar meetmethode

meetmethode	meetinstrument	meetbereik		nauwkeurigheid
lengtemeting	duimstok	0–2(5) m		1–3 mm
	rolmaat	0–3(5) m		1–3 mm
	meetlat, bouwlat	0–5 m		1–5 mm
	meetveer	10–50 m		10–15 mm/30 m
	elektro-optische afstandmeter/tachymeter	0–3 km		2–5 mm + 2–5 mm/km
	minder toegepast:			
	schaallat, liniaal	0–1000 mm		0,1 mm
	meetklok	0–25 mm		0,01 mm
	schuif-dieptemaat	0–1000 mm		0,05–0,2 mm
	meetwiel	0–9999,99 m		afh. van omstandigheden
	draden-, dubbelbeeld-afstandmeter	5–100 m		20–100 mm/100 m
	theodoliet + basisbaak	5–100 m		25 mm/100 m
	optische tachymeter	5–100 m		20–50 mm/100 m
uitlijnen	jalons:			
	vooruitbakenen	10–300 m		10 mm/60 m
	tussenbakenen	10–300 m		10–15 mm/60 m
	achteruitbakenen	10–300 m		20–50 mm/60 m
	evt. in combinatie met verrekijker, waterpas-instrument, of theodoliet			10 mm/60 m
		100–1000 m		20 mm/500 m
	draad	0–50 m		1 mm
	waterpasinstrument, theodoliet in combinatie met signaal	>5 m		1–10 mm/60 m
	optische aligneerapparatuur	0–100 m		0,1 mm/20 m
waterpassen		*hor.*	*vert.*	
	timmermanswaterpas	0–2 m	–	1–5 mm/2 m
	rei met niveau	2–5 m	–	1–5 mm/5 m
	optisch waterpas-instrument	3–100 m	0–5 m	1–3 mm/60 m
	hydrostatische waterpasuitrusting	0–10 km		0,5–2 mm/10 km
	roterende laser	0–300 m		1–3 mm/60 m
	waterpasslang	0–20 m	0–250 mm	1–5 mm

Tabel 1.1 (vervolg)

meetmethode	meetinstrument	meetbereik	nauwkeurigheid
op- resp. afloden	oliebak	0–10 m	1–2 mm/2m
	schietlood	0–5 m	2–5 mm/5m
	zwaar schietlood	0–20 m	10–20 mm/30 m
	timmermanswaterpas (met rei)	0–2m	2–5 mm/2 m
	theodoliet, evt. in combinatie met oculairprisma of		1 mm/10 m
	gebroken oculair theodoliet met	5–100 m	2 mm/30 m
	doorboorde eerste as waterpasinstrument of theodoliet met	5–60 m	10 mm/60 m
	90° prisma optisch loodinstrument	5–200 m	2 mm/100 m
	eerste orde	2–200 m	2 mm/100 m
	tweede orde	2–100 m	2–5 mm/50 m
	derde orde	2–30 m	3 mm/15 m
hoekmeting	*Uitzetten van rechte hoeken*		
	meetveer (3–4–5 steek)	0–30 m	10 mm/15 m
	bouwhaak prisma van Bauernfeind met puntlood	0–2 m	1–3 mm
	of op prismastok	0–30 m	10–20 mm/30 m
	dubbel pentagoonprisma	0–30 m	10 mm/30 m
	minder toegepast:		
	5–12–13 steek	0–30 m	10 mm/15 m
	haakskijker	1–30 m	6 mm/30 m
	prismakruis	0–30 m	10–20 mm/30 m
	Uitzetten van willekeurige hoeken		
	waterpasinstrument met horizontale rand theodoliet:	75 m	10 mm/60 m
	eerste orde	>5 m	1 mm/100 m
	tweede orde	>5 m	5 mm/100 m
	minder toegepast:		
	lodingssextant vaste opstelling	>5 m	10 mm/60 m
	lodingssextant vrije opstelling	>5 m	100 mm/60 m

Tabel 1.1 (vervolg)

meetmethode	meetinstrument	meetbereik	nauwkeurigheid
	Verzekering van punten:		
	houten plankje met zaagsnede of draadnagel		
	haarspeld in beton met zaagsnede		
	krasmaat + menie		
	smetlijn		
	ijzeren of stalen draadnagel		
	verzonken markering in beton		
	bout, merksteen		
	jalon		
	houten piket met menie en draadnagel		
	houten piket in beton		
	kunststofpiket		
	betonnen piket		
	plastic of ijzeren buis		
	draineerbuis		
	heipaal met grond- of vloerplaat		

Bron: Cursus Maatvoering van Opleidingen Bouwcentrum.

1.2 Waterpasinstrumenten

Regelingseisen diverse typen instrumenten:

1 Richtlijn buisniveau loodrecht op verticale as.
2 Richtvlak doosniveau loodrecht op verticale as.
3 Richtlijn niveau evenwijdig aan vizierlijn kijker (hoofdvoorwaarde bij belinstrumenten).
4 Vizierlijn kijker moet bij vrijhangend mechanisme horizontaal zijn (hoofdvoorwaarde bij automaten).

Controle op de hoofdvoorwaarde:

– meet het juiste hoogteverschil van twee punten door opstelling van het instrument midden tussen beide punten;
– meet daarna het hoogteverschil nogmaals met een opstelling van het instrument zo dicht mogelijk nabij één van de beide punten. Dit moet hetzelfde resultaat geven.

Tabel 1.2 Typen instrumenten

volgorde regelingseisen	type instrument	
1, 2, 3	'alles vast'	
2, 3	'met hellingsschroef'	belinstrument
2, 3	'met reversieniveau'	
2, 4	'automaat'	

Opstellingseis van het instrument:
– verticale as moet verticaal staan.

Insteleisen van het instrument:
– kruisdraden scherpstellen (met oculair);
– baakbeeld scherpstellen (parallax = verschilzicht verwijderen met centrale instellens);
– alleen aflezen bij inspelende bel en zoveel mogelijk uit het midden waterpassen.

1.3 Theodoliet

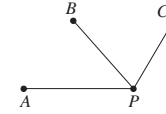
Regelingseisen:
1 Vizierlijn loodrecht op de tweede as (horizontale as).
2 Tweede as loodrecht op de eerste as (verticale as).
3 Richtlijn buisniveau loodrecht op eerste as.

Opstellingseisen van het instrument:
– statief stevig opstellen;
– eerste as verticaal stellen (niveau inspelen);
– eerste as loodrecht boven opstelpunt (centrering).

Insteleisen van het instrument:
– kruisdraden scherpstellen (met oculair);
– beeld parallax vrij op de kruisdraden instellen.

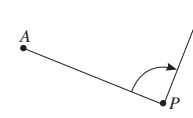
Reïteratiemethode (richtingsmeting volgens Bessel):
– richten op verste punt (*A*);

- rand met randverdraaiingsknop $\sim$ op nul draaien en aflezen;
- op punten B en C richten en rand aflezen;
- rand ~ 50 gon draaien en C aflezen;
- op punten B en A richten en aflezen;
- kijker doorslaan en rand ~ 50 gon draaien;
- tweede dubbelserie meten;
- gemiddelde hoekwaarde bepalen.



Figuur 1.1
Reïteratiemethode

Repetitiemethode:
- richten op beginpunt (A);
- horizontale rand op nul draaien;
- rand koppelen aan onderstel en richten op B;
- rand aflezen;
- bovenstel met gekoppelde rand terugdraaien naar A;
- alhidade met rand gekoppeld aan onderstel draaien naar B;
- hoek is nu $2\times$ gemeten (niet aflezen);
- kijker doorslaan en hoek opnieuw $2\times$ meten;
- rand aflezen en waarde door 4 delen.



Figuur 1.2
Repetitiemethode

1.4 Overige meetinstrumenten

Elektronische afstandmeters
- Afstandmeter d.m.v. *lichtgolven* (instrument en reflector).

Voortplantingssnelheid van elektromagnetische golven in vacuüm:

$$c = 2999\,792.458\ \mathrm{km/sec}\ (\approx 3\cdot 10^8\ \mathrm{m/sec})$$

Snelheid in lucht: $v = \dfrac{c}{n}$

waarin:

$n =$ brekingsindex, afhankelijk van dampspanning, luchtdruk en temperatuur

Instrumenten voor satellietplaatsbepaling (GPS)

Er zijn 24–30 satellieten in zes cirkelvormige baanvlakken met een hoogte van 20.000 km en een hellingshoek met de evenaar van 55 graden. (Satellieten komen maximaal tot 55° noorder- en zuiderbreedte).
De satellieten zenden op de volgende frequenties uit:

L1 = 154 × 10,23 Mhz = 1575,42 Mhz
L2 = 120 × 10,23 Mhz = 1227,60 Mhz

Op de L1 zijn gemoduleerd de:

- P1- Code = Preciese militaire code (bitlengte 30 meter), versleuteld tot Y1-Code
- C/A = (Course Acquisition) (bit lengte 300 meter)
- Klok- en satellietbaangegevens (50 bit/sec)

Op de L2 zijn gemoduleerd:

- P2-Code = Preciese militaire code (bit lengte 30 meter), versleuteld tot Y2-Code
- Satellietbaangegevens (50 bit/sec)

Standaard GPS voor civiel gebruik werkt met de C/A code. De aankomsttijden van de satellietsignalen worden gemeten. Voor de bepaling van de positie zijn vier satellieten nodig om de *X, Y, Z* en tijd te bepalen. Als de hoogte van de GPS ontvanger bekend is, dan zijn drie satellieten voldoende.

DOP = Dillution of Precision (Nauwkeurigheid)
GDOP = Geometrisch (*X, Y, Z*, Tijd)
PDOP = Positie (*X, Y, Z*)
HDOP = Horizontaal (*X, Y*)

Nauwkeurigheid = afstand meetnauwkeurigheid × DOP waarde.
DGPS: op een bekende locatie staat een referentie GPS ontvanger. De afstandfouten naar de satellieten worden gemeten en doorgezonden

WADGPS: door gebruik van een netwerk van referentiestations met onderlinge afstanden van 1000 km kan binnen het netwerk een positienauwkeurigheid van 30 cm (L1-Code) verkregen worden.

Correctiesignalen worden per communicatie satelliet naar gebruiker gestuurd. Met behulp van L1/L2-Code + draaggolf kan een nauwkeurigheid van 10 cm behaald worden.

Vanaf 2004 zal in Europa het EGNOS systeem operationeel zijn (2–5 meter naukeurig).

GPS: statisch meten. Door het opslaan van draaggolf metingen in twee GPS ontvangers gedurende 8–15 minuten tot 1 uur kan met behulp van verwerkings software centimeter nauwkeurigheid behaald worden.

Real Time Kinematisch (RTK): door gebruikmaking van de draaggolven op de L1 en de L2 en een referentiestation kan tot een afstand van $< 10-40$ km en het overzenden van correctiesignalen met een mobiele bewegende ontvanger continue een positie nauwkeurigheid in de orde van centimeters worden bereikt. Opstarttijd < 2 minuten.

Netwerk RTK: in een driehoeksnet met maximale zijden van 70 km worden draaggolf correcties berekend. Correcties worden via GSM verstuurd.

Tabel 1.1 Satellietplaatsbepaling

methode	bereik	nauwkeurigheid
GPS	wereldwijd	3–6 meter (midden breedten) 10–20 meter (tropen)
DGPS	radiobaken, zee 200 km radiobaken, land 100 km FM Radio bereik 60 km VHF Radio bereik 4/3 van de zicht horizon UHF Radio maximum bereik in Nederland met 1 Watt zendt vermogen 10 km. GSM	25 cm + 10 cm/100 km horizontaal 50 cm + 20 cm/100 km verticaal
WADGPS L1 C/A	netwerk	30 cm midden breedten 5–10 m tropen
WADGPS L1 + L1	netwerk	1 m tropen
WADGPS L1 + L2 fase	<800 km Netwerk	10–20 cm
GPS Statisch L1	<2000 km	0.5 cm + 0.5 cm/100 km horizontaal 0.5 cm + 2 cm/100 km verticaal
GPS Statisch L1/L2	<2000 km	1 cm + 1 cm/100 km
NRTK en RTK L/L2	<20 km	1 cm + 1 cm/10 km horizontaal 2 cm + 2 cm/10 km verticaal

Optische tachymeter

Afstand D volgt bij hellende vizierlijn α en aflezingsverschil h op de verticale baak uit:

$$D = A \cdot h \cdot \cos^2 \alpha + B \cdot \cos \alpha$$

waarin:
A = vermenigvuldigingsconstante (moderne kijkers: 100)
B = optelconstante (moderne kijkers: 0)
h = verschil tussen boven- en onderdraad $(b - o)$

Het hoogteverschil H is:

$$H = D \cdot \tan \alpha + i - m$$

waarin:
i = instrumenthoogte
m = aflezing middendraad

Sextant

Correctie indexfout plus spiegelparallax: d/L radialen te bepalen door het meten van de hoek nul.
Constante van de spiegelparallax $\rightarrow S = d \cdot 206\ 265''$
dus correctie $\varphi = S/L$.

Kartering

Driehoeken, schaallat, transversaalschaal met steekpasser, detail-coördinatograaf, kartameter, roltransporteur, poolcoördinatograaf.

Methoden oppervlakteberekening

- numerieke;
- grafische m.b.v. planimeters;
- grafisch-numerieke.

1.5 Kaarten in Nederland

Tabel 1.3 Overzicht kaarten in Nederland

uitgave/verkoopadres	kaartbenaming	schaal
Topografische Dienst Bendienplein 5, Postbus 115 7800 AC Emmen tel. kaartverkoop (0591) 69 68 88 Fototheek 69 63 40 Bibliotheek 69 62 30 Diverse kaarte wi kels in Nederland	topografische kaart hoogtekaart gemeentenkaart luchtfoto's	1: 10 000, 1: 25 000, 1: 50 000, 1: 100 000, 1: 250 000. 1: 10 000. 1: 400 000. 1: 18 000.
Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat Kaarten te bestellen bij[1]: Kanaalweg 3b, Postbus 5023 2600 GA Delft tel. (015) 269 11 11	technische kaarten • rijkswegen- en -kanalen • rivieren kaarte met peilmerken van het NAP met bijbehorende lijsten	variabel (gedigitaliseerd) 1: 25 000.
Fotogrammetrische Dienst van het kadaster afd. Reproductie Waltersingel 1, Postbus 9046 7300 GH Apeldoorn tel. (055) 528 51 11	kadastrale kaarten[2] grootschalige basiskaart[2] luchtfoto's	variabel (gedigitaliseerd) 1: 500, 1: 1 000. 1: 2 000. 1: 3 000 → 1:10 000.
NITG NITG-TNO Schoemakerstraat 97, Postbus 6012 2600 JA DELFT tel. (015) 269 74 58 e-mail: verkoop@nitg.tno.nl	geologische kaart met toelichting	1: 50 000, 1: 600 000.
Dienst der Hydrografie Badhuisweg 167, Postbus 90 704 2509 LS Den Haag tel. (070) 316 28 02	zee- en visserijkaarten stroomkaarten en atlassen kaarte voor zeil- en moter-jachten	diversen

Tabel 1.3 (vervolg)

uitgave/verkoopadres	kaartbenaming	schaal
Stichting voor bodemkartering Kaarten te bestellen bij: PUDOC Postbus 4 6700 AA Wageningen tel. (0317) 48 44 40	bodemkaart geomorfologische kaart geologische kaart	1: 50 000, 1: 200 000. 1: 50 000. 1: 50 000.
Waterhuishouding en -beweging van de Rijkswaterstaat afd. Waterstaatscartografie Koningskade 4 2596 AA Den Haag Kaarten te bestellen bij: Staatsdrukkerij Cristoffel Plantijnstraat 2 2515 TZ Den Haag tel. (070) 378 99 11	waterstaatskaart provinciale beschrijvingen bij WS-kaart met over- zichtskaarten overlegkaarten v.d.: • hydrologische waar- nemingspunten • watervoorzienings- eenheden	1: 50 000. 1: 100 000. 1: 50 000. 1: 50 000.
Instituut voor grondwater en geo-energie TNO/IGG Schoenakerstraat 97 2628 VK Delft tel. (015) 269 71 44	grondwaterkaart van Nederland	1: 50 000.

[1] Technische kaarten zijn auteursrechtelijk eigendom van de regionale directies van Rijkswaterstaat die in elke provinciehoofdstad is gevestigd (m.u.v. Zuid Holland: Rotterdam).
[2] Samenstelling d.m.v. 'Catalogus van kaarten', Topografische Dienst 1995.

2 Metingen

2.1 Meetmethoden

Bepaling meetkundige grondslag:
- driehoeksmeting (*triangulatie*);
- veelhoeksmeting (*polygonering*);
- achterwaartse snijding (*snelliusmeting*);
- voorwaartse snijding;
- kringnetmeting;
- statische GPS metingen.

Detailmeting (eerst terrein verkennen, daarna vaststellen):
- lijnenverband;
- orthogonale meting (coördinaten);
- combinatie lijnenverband en coördinaten;
- voerstraalmethode;
- RTK GPS.

2.2 Lengtemeting

- Directe lengtemeting (meetbanden, pennen, jalons etc.).
- Indirecte lengtemeting (elektronische afstandmeters, met gebruik van licht- of geluidsgolven of via satelliet plaatsbepaling).

Correctieformules bij metingen met stalen meetband

Hellingscorrectie (toepasbaar bij kleinere metingen en flauwe hellingen):

$$\Delta l = \frac{h^2}{2 \cdot l_s}$$

waarin:
Δl = correctie
h = hoogteverschil
l_s = gemeten lengte

Spankrachtcorrectie (bij metingen zonder spanningsmeter):

$$\Delta l = \frac{(P - P_0) \cdot l}{A \cdot E}$$

waarin:
Δl = correctie
ΔP_0 = ijkspankracht van 5 N
P = toegepaste spankracht
l = lengte
A = dwarsdoorsnede meetband
E = elasticiteitsmodulus van staal (20 kN/mm^2)

Tabel 2.1 Compensatie spankracht-afwijkingn [mm]

spankracht [N]	*l* [m]					
	ondersteund			vrijhangend		
	10	20	30	10	20	30
5,0	0	0	0	−0,7	−5,6	−18,8
7,5	+0,5	+0,9	+1,4	+0,2	−1,6	− 6,9
10,0	+0,9	+1,8	+2,7	+0,7	+0,4	− 3,0
12,5	+1.4	+2,7	+4,1	+1,3	+1,8	− 1,1
15,0	+1,8	+3,7	+5,5	+1,7	+3,1	+ 3,4

\+ afstand te groot uitgezet; − afstand te klein uitgezet.

Doorbuigingscorrectie:

$$\Delta l = \frac{8}{3} \cdot \frac{d^2}{l}$$

waarin:
Δl = correctie
d = doorbuiging [mm]
l = gemeten lengte [m]

Benadering doorbuiging d:

$$d = \frac{g \cdot l^2}{8\,p}$$

waarin:
g = gewicht van de band per m′ [N/m]
p = spankracht [N]

Temperatuurcorrectie (uitzetting per 1 °C per 100 m = 1,2 mm t.o.v. ijktemperatuur):

$$c = \frac{l}{100} \times 1,2 \times (t^\circ - t^\circ_y)$$

waarin:
c = correctie [mm]
l = gemeten lengte [m]
t° = buitentemperatuur
t°_y = ijktemperatuur

2.3 Hoogtemetingen

Peilen

Nederland : NAP (Normaal Amsterdams Peil)
FZP (Fries Zomer Peil) = NAP − 0,66 m
WP (Winschoter Peil) = NAP + 0,62 m
Duitsland : NN (Normal Null) ≈ NAP[1)]
België : TAW (Tweede Algemene Waterpassing)
= NAP − 2,31m[2)]

Aardkromming

$$a = \frac{l^2}{2R}$$

waarin:
a = correctie
l = afstand standplaats tot baak
R = aardstraal (gemiddeld ≈ 6370 km)

Invloed bij l = 100 m ≈ 1 mm; l = 200 m ≈ 3 mm

2.4 Waterpassing

Terreinwaterpassing:
- normale methode;
- ruitennetmethode;
- raaienmethode;
- voerstraalmethode (tachymetrie met horizontale vizierlijn).

[1)] Als gevolg van tussentijdse vereffeningen is er een kleine afwijking ontstaan tussen NAP en NN. Zo is:
- bij Nieuwe Schans NN = NAP + 0,018;
- bij Babberich (Elten) NN = NAP + 0,027;
- bij Vaals NN = NAP + 0,021.

[2)] In elk studieboek staat TAW = NAP − 2,31 m. Op de topografische kaarten, uitgegeven door Topografische Dienst, Oostende peil = NAP − 2.34 m. De officiëie benaming voor het TAW is 'Zero du dépt de la Guerre'.

Doorgaande waterpassin:
- waterpassing tussen twee bekende punten;
- kringwaterpassing.

Profielwaterpassin:
- lengteprofielen;
- dwarsprofielen.

Zettingsmetingen:
- periodiek waterpassen van een aantal hoogtemerken om eventuele verticale verplaatsingen te kunnen constateren.

Nauwkeurigheid bij doorgaande waterpassingen

Volgens normen RWS mag het verschil in resultaat per sectie van heen- en terugmeting niet meer bedragen dan:

- primaire waterpassing $2\frac{1}{2}\sqrt{L}$
- secundaire waterpassing $3\sqrt{L}$ (L = sectielengte [km])
- tertiaire waterpassing $6\sqrt{L}$

Standaardafwijking of middelbare fout per km waterpassing:

$$u = \sqrt{\frac{1}{2n}\sum\frac{v^2}{L}}$$

waarin:
u = standaardafwijking per km enkele waterpassing [mm]
n = aantal secties
v = sluitfout per sectie [mm]
L = sectielengte [km]

Standaardafwijking per km heen- en terugwaterpassing:

$$m = \sqrt{\frac{u^2}{2}}$$

2.5 Hoekmetingen

Puntsbepaling door insnijding m.b.v. minstens twee voorwaartse of drie achterwaartse richtingen.

Afleesmiddelenz:

– Indexstreep met nonius $x = \dfrac{(n-1)\cdot a}{n} = a - \dfrac{a}{n}$

waarin:
a/n = noniuseenheid
a = randdeel
n = noniusdeel

– Optische micrometer.
– Afleesmicroscopen:
  - schaalmicroscoop;
  - optische micrometer-microscoop;
  - coïncidentiemicroscoop.

Standaardafwijking in de enkele waarneming:

$$m = \sqrt{\frac{[vv]}{(s-1)(r-1)}} \qquad v = q - \frac{[q]}{r}$$

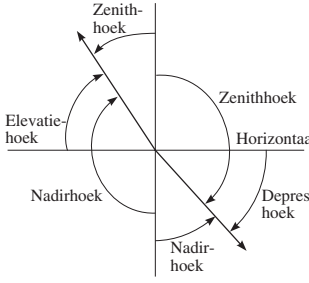
Standaardafwijking in de gemiddelde richting:

$$M = \frac{m}{\sqrt{s}} = \sqrt{\frac{[vv]}{s(s-1)}}\,(r-1)$$

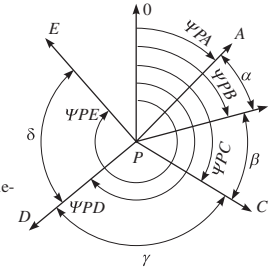
waarin:
m = standaardafwijking in de enkele waarneming
M = standaardafwijking in de gemiddelde richting
q = verschil t.o.v. het gemiddelde (per richting)
= gemiddelde herleide richting – herleide richting
r = aantal richtingen
s = aantal series
v = verschil van q en corr (q − corr)
vv = kwadraat van v (v^2)

Eisen:
- 35% van de v-waarden mag groter zijn dan 1 maal de standaardafwijking
- 5% van de v-waarden mag groter zijn dan 2 maal de standaardafwijking.

Hoeken en richtingen:



Figuur 2.1 Hoeken in het verticale vlak

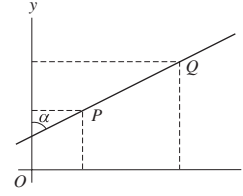


Figuur 2.2 Hoeken en richtingen in het horizontale vlak

2.6 Tachymetrie

Puntsbepaling door berekening met argument en afstand.
Uitgaande van een bekende standplaats P in een rechthoekig coördinatenstelsel worden de te bepalen punten Q bepaald m.b.v. argument en afstand:

$$X_Q = X_P + PQ \sin\alpha$$
$$Y_Q = Y_P + PQ \cos\alpha$$



Figuur 2.3 Tachymetrie

Uitgaande van de gemeten horizontale lengte PQ zal bij de berekening een correctie moeten worden toegepast volgens de *stereografische projectie*:

$$l = -9,2 + \frac{(X-155)^2 + (Y-463)^2}{1629}$$

waarin:
l = correctie per hm [mm]
$X,\ Y$ = coördinaten in RD-stelsel (Rijksdriehoeksmeting) [km] (verschoven nulpunt)

2.7 Deformatiemetingen

Periodiek meten van een aantal punten waarvan de veronderstelling is dat ze een verplaatsing ondergaan ten opzichte van elkaar.

Deformatiebepaling door:
- meting van directe afstanden tussen de punten;
- meting van afstanden in een netwerk waarbij de verplaatsing wordt berekend met netvereffeningsprogrammatuur;
- meting van hoeken en afstanden in een netwerk waarbij de verplaatsing wordt berekend met netvereffeningsprogrammatuur;

De nauwkeurigheid van de meting hangt af van de te verwachten deformatie in de periode tussen twee opeenvolgende metingen. De nauwkeurigheid kan variëren van 1 mm bij directe lengtemeting tot enkele centimeters bij berekeningen in een netwerk, afhankelijk van de netconstructie en de gebruikte apparatuur.

2.8 Berekeningen

Radiaal

$$1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} = \frac{400}{2\pi} \text{ gon} = 206\,265'' = 63\,662 \text{ mgon}$$

Tabel 1.2 Decimale en sexagesimale hoekstelsels

decimaal	sexagesimaal aanduidingen		
100 gon	$= 90^\circ$		
10 gon	$= 9^\circ$		
1 gon	$= 0{,}9^\circ = 54'$		
0,1 gon	$= 5{,}4' = 5'\ 24''$	dg (decigraad)	−dgon (decigon)
0,01 gon	$= 32{,}4''$	cg (centigraad)	−cgon (centigon)
0,001 gon	$= 3{,}24''$	mg (milligraad)	−mgon (milligon)
0,0001 gon	$= 0{,}324''$	dmg (decimilligraad)	-10^{-1} mgon ($^1/_{10}$ milligon)

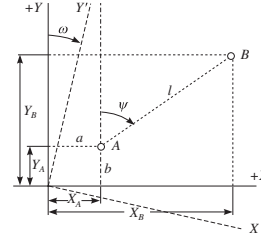
Coördinaten

ψ = argument uit:

$$\tan \bar{AB} = \frac{X_B - X_A}{Y_B - Y_A}$$

Afstand $AB = l$ uit:

$$l = \frac{X_B - X_A}{\sin \bar{AB}} = \frac{Y_B - Y_A}{\cos \text{AB}} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}$$



Figuur 2.4
Aanduiding coördinaten

Transformatieformules:

$$X' = a + \lambda(X \cos \omega - Y \sin \omega)$$

$$Y' = b + \lambda(X \sin \omega + Y \cos \omega)$$

waarin:
λ = schaalvergroting
ω = draaiingshoek (rechtsom: positief)
a = verschuiving in X-richting
b = verschuiving in Y-richting

Driehoeksmeting

Voorwaarden:
- som van de hoeken per driehoek is (180°) 200 gon;
- som van de hoeken om een centraal punt is (360°) 400 gon;
- som log.sin. rechter omtrekshoeken = som log.sin. linker omtrekshoeken.

Veelhoeksmeting

Sluittermen:

$$f\alpha = \varphi_0 - \varphi_n + \sum \alpha - k\pi$$
$$fx = x_1 - x_n + \sum l \sin \varphi$$
$$fy = y_1 - y_n + \sum l \cos \varphi$$

waarin:
φ_o = argument afsluitrichting in beginpunt 1
φ_n = argument afsluitrichting in eindpunt n
α = gemeten hoek
l = gemeten lengte
φ = argument in het betrokken lijnstuk

Oppervlakteberekening

Driehoek: $\frac{1}{2} \cdot b \cdot h$ of $\sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$
Gesloten veelhoek: indelen in driehoeken of transformeren tot een driehoek.
Idem m.b.v. coördinaten:

$$2\,O = \sum x_n(y_{n-1} - y_{n+1})$$

of

$$2\,O = \sum y_n(x_{n+1} - x_{n+1})$$

Oppervlakte van een figuur met de planimeter bepaald:

$O = A \cdot U$ (pool buiten de figuur)

$O = A \cdot U + B$ (pool binnen de figuur)

waarin:
A = vermenigvuldigingsconstante, afhankelijk van armlengte a
B = optelconstante
U = afwikkeling van het rolletje uitgedrukt in omwentelingen

Invloed van rek en krimp op de oppervlaktebepaling:

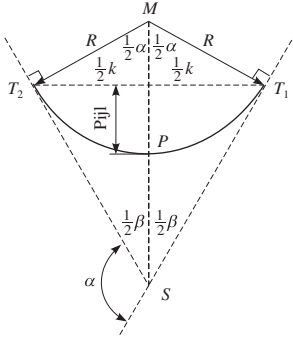
$$O = a^2 - \frac{p+q}{100} \cdot a^2 = a^2\left(1 - \frac{p+q}{100}\right)$$

waarin:
a = bepaald oppervlak
p, q = percentage krimp resp. rek in twee loodrechte richtingen

3 Uitzetten van bogen

3.1 Cirkelboog

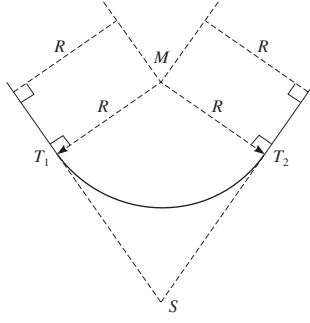
Schema en benamingen



Hoofdpunten: S, M, T_1, T_2 en P
Hoofdmaten: R, ST_1 en ST_2
$ST_1 = ST_2 = R \cdot \tan \frac{1}{2}\alpha$
$\frac{1}{2}k = R \cdot \sin \frac{1}{2}\alpha$
Pijl $= R \cdot (1 - \cos \frac{1}{2}\alpha)$
$\alpha = 180^\circ - \beta$

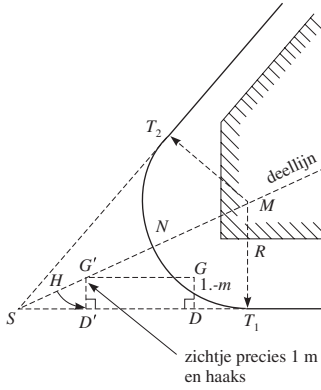
Figuur 3.1 Schema en benamingen bij cirkelboog

Bogen met R >20 m



M en R bekend:
- verleng de rechtstanden en bepaal snijpunt S;
- zet vanuit S de tangentlengten ST_1 en ST_2 uit;
- richt in T_1 en T_2 loodlijnen op, gelijk aan R. Bepaald is nu M;
- cirkel vanuit M de boog om.

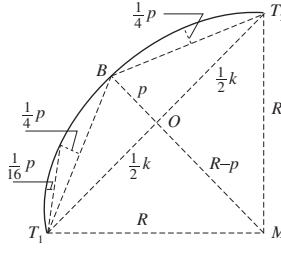
Figuur 3.2 Bogen met $R < 20$ m (M en R bekend)



M onbereikbaar:
- verleng de rechtstanden en bepaal snijpunt S;
- bepaal deellijn (bissectrice);
- zet loodrecht op ST_1 GD uit;
- verschuif GD naar $G'D'$;
- meet SD' $ST_1 = ST_2 = R \cdot SD'$;
- bepaal H ($G'H = G'D' = 1$ m);
- $SN = R \cdot SH$.

Figuur 3.3 Bogen met $R < 20$ m (M onbereikbaar)

Bogen met $R < 100$ m (kwarten)

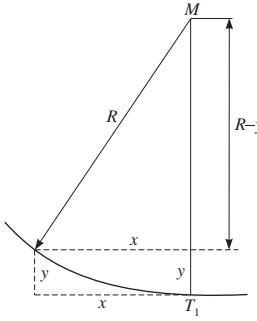


Kwartpijlmethode:
- meet T_1 T_2 en bepaal O;
- zet OB uit met lengte p;

$$p = R - \sqrt{R^2 - \tfrac{1}{4}k^2}$$

- meet T_1B en bepaal het midden van dit lijnstuk;
- richt een loodlijn op ter lengte van $\frac{1}{4}p$;
- herhaal deze handeling, waarbij de lengte van de loodlijn steeds $\frac{1}{4}$ gedeelte van de vorige pijl wordt.

Figuur 3.4 Bogen met $R < 100$ m (kwarten)



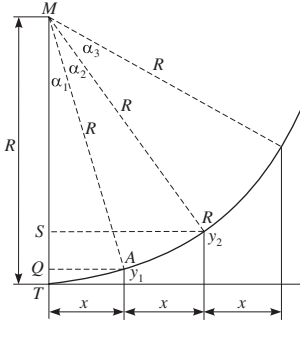
Benaderingsformule:
- verleng de rechtstand;
- zet een afstand x (abscis) uit
- bereken y (ordinaat) en zet deze uit:

$$y = \frac{x^2}{2R}$$

Figuur 3.5 Benaderingsformule bij bogen met $R < 100$ m

Bogen met $R < 100$ m m.b.v. bogenboekje

Gelijke abscisverschillen:

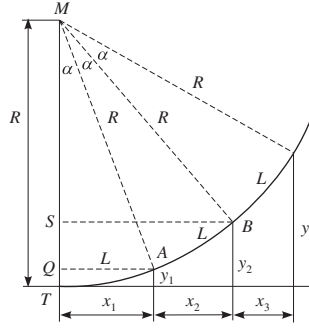


Gegeven:
R en x: vaste maat.

$$y_1 = QT = R - QM$$
$$QM = \sqrt{(R^2 - x^2)}$$
$$y_1 = R - \sqrt{(R^2 - x^2)}$$
$$y_1 = R - \sqrt{(R - x)(R + x)}$$
$$y_2 = R - \sqrt{(R - 2x)(R + 2x)}$$

Figuur 3.6 Bogen met $R > 100$ m (gelijke abscisverschillen)

Gelijke booglengten:



Gegeven:
R en boogdelen
$QM = R - y_1$

$$\cos\alpha = \frac{QM}{R} = \frac{R - y_1}{R}$$

$$y_1 = R - R \cdot \cos\alpha$$
$$= R(1 - \cos\alpha)$$
$$y_2 = R(1 - \cos 2\alpha)$$

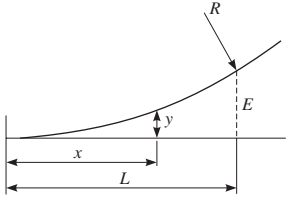
$$\sin\alpha = \frac{x_1}{R} \rightarrow x_1 = R \cdot \sin\alpha$$
$$x_2 = R \cdot \sin 2\alpha$$
$$x_3 = R \cdot \sin 3\alpha$$

Figuur 3.7 Bogen met $R > 100$ m (gelijke booglengten)

3.2 Overgangsbogen

Overgangsbogen worden hoofdzakelijk toegepast bij cirkelbogen met stralen < 2500 m.

Kubische (= derdegraads) parabool: $y = p \cdot x^3$



waarin:
$p =$ constante, afhankelijk van de straal R van de cirkelboog en de abscis L van het eindpunt van de overgangs-boog

$$p \approx \frac{1}{6 \cdot R \cdot L}$$

Figuur 3.8 Kubische parabool

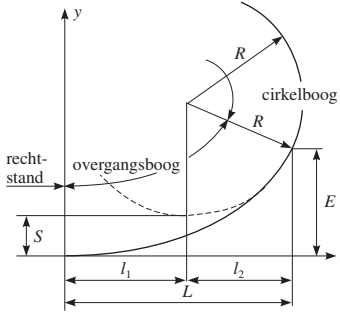
Coördinaten eindpunt overgangsboog zijn:

$$x = L \quad y = \frac{L_3}{6 \cdot R \cdot L} = \frac{L^2}{6 \cdot R} \quad (= E)$$

Voor stralen > 750 m wordt de zgn. *eenheidsparabool* toegepast, waarvoor geldt: $R \cdot L = 100\,000$. Zie tabel 3.1.

Tabel 3.1 Coördinaten eindpunt overgangsboog voor stralen > 750 m *(toelichting: zie tekst)*

x [m]	y [m]	x [m]	y [m]
5	0,00	60	0,36
10	0,00	70	0,57
15	0,00	80	0,85
20	0,01	90	1,22
25	0,02	100	1,67
30	0,04	110	2,22
35	0,07	120	2,88
40	0,11	130	3,66
45	0,15	140	4,57
50	0,21	150	5,63



$E =$ eindordinaat bij overgang op de cirkelboog
$S =$ binnenwaartse verschuiving van de cirkelboog ('Shift')

Bij benadering:

$$S = \tfrac{1}{4}E = \frac{L^2}{24 \cdot R}$$

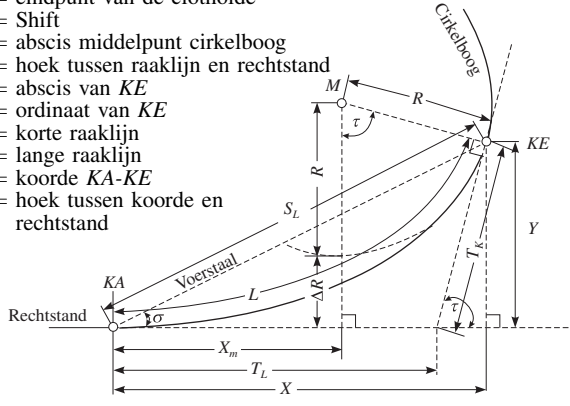
Figuur 3.9

Voor stralen < 750 m gebruikt men andere parabolen, uitgaande van de abscis van het eindpunt volgens:

$$L = \sqrt{24(R - 13)}$$

Clothoïde (spiraal van Cornu)

A = parameter
M = middelpunt cirkelboog
R = straal van de cirkelboog
KA = beginpunt van de clothoïde
KE = eindpunt van de clothoïde
δR = Shift
X_m = abscis middelpunt cirkelboog
τ = hoek tussen raaklijn en rechtstand
X = abscis van KE
Y = ordinaat van KE
T_K = korte raaklijn
T_L = lange raaklijn
S_L = koorde KA-KE
σ = hoek tussen koorde en rechtstand



Figuur 3.10 Elementen van de clothoïde

Algemene formule:

$$R \times L = A^2$$

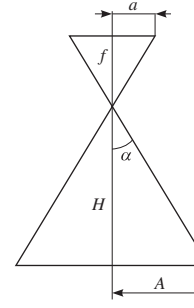
waarin:
L = lengte van de clothoïdeboog
R = straal van de aansluitende cirkelboog
A = parameter en is een coinstante (bij het ontwerpen van wegen wordt wel toegepast: $A = 1/3 \cdot R$

Tabellen voor de clothoïden in bijv.: Krenz-Osterloh, *Klotoiden Taschenbuch*.

4 Luchtkartering

4.1 Fotogrammetrie (luchtkartering)

a = halve zijde negatief
A = halve zijde in terrein
α = halve openingshoek
B = opnamebasis
B/H = basis/hoogte-verhouding
d = onderlinge afstand vlieglijnen bij meer dan één opnamestrook
f = brandpuntafstand
H = vlieghoogte
p = langsoverlap
q = dwarsoverlap
s = schaalgetal
S = schaal van de opname



Figuur 4.1

Vliegplan

$$S = \frac{f}{H} = \frac{a}{A}; s = \frac{H}{f}$$

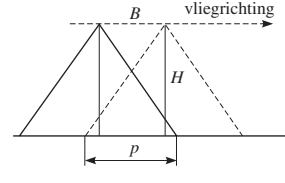
$$2A = 2a \cdot s$$

$$B = 2A\left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

$$b = 2a\left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

$$d = 2A\left(1 - \frac{q}{100}\right)$$

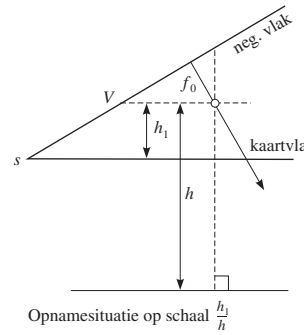
$$\tan \alpha = \frac{a}{f}$$



Figuur 4.2

Ontschranking

$f_a = f$ ontschrankingsapparaat
$f_o = f$ opname
i = hellingopname
V = vluchtpunt
A = snijpunt optische as apparaat met beeldvlak
H = snijpunt optische as opname met negatiefvlak
S = gemeenschappelijke snijlijn beeldvlak, kaartvlak en lensvlak



Figuur 4.3 Ontschranking

Voorwaarden

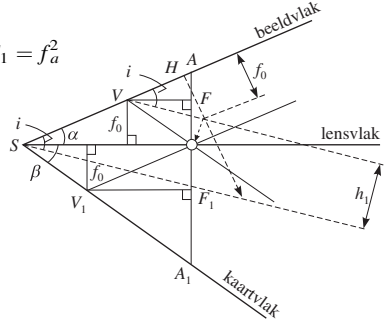
- S = gemeenschappelijke snijlijn van de drie vlakken (Scheimpflug-voorwaarde);
- $a \cdot a' = f_a^2$ waarin $a = v - f$ en $a' = b - f$ (lenzenformule Newton).

Uitwerksituatie: $AF \cdot A_1F_1 = f_a^2$

$$\sin \alpha = \frac{f_a}{h_1} \sin i$$

$$\sin \beta = \frac{f_a}{h_0} \sin i$$

$$HA = f_0 \cot i - f_a \frac{\cot \beta}{\cot \alpha}$$



Figuur 4.4

Verplaatsing door hoogteverschillen in het terrein:

$$\Delta d = \frac{d}{H}\Delta h$$

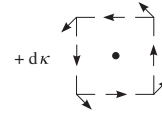
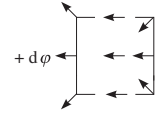
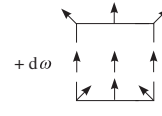
$$\Delta h_{\max} = \frac{f}{a\sqrt{2}}\,\Delta d_{\max} s_k$$

waarin d = afstand uit nadirpunt van de foto
(uitwerksituatie: $AF \cdot A_1 \cdot F_1 = f_a^2$)

4.2 *Beeldenparen-fotogrammetrie*

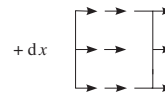
Parallaxformule: $\dfrac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}p} = \dfrac{H}{B}s$ (terreinhoogte-verschillen)

Relatieve oriëntering
Zes elementen: 3 draaiingen + 3 verschuivingen:

Drie draaiingen:		*veroorzaken dwarsparallax of y-parallax:*
om z-as		$+x \cdot \mathrm{d}k$
om y-as langshelling		$-\dfrac{xy}{h}\mathrm{d}\varphi$
om x-as dwarshelling		$+\left(\dfrac{1+y^2}{z^2}\right)h \cdot \mathrm{d}\omega$

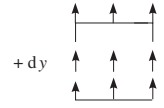
Drie verschuivingen:

langs x-as



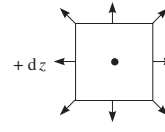
0

langs y-as



$+ \mathrm{d}y$

langs z-as



$+\frac{y}{h}\,\mathrm{d}z$

Opmerking: in plaats van h wordt ook de letter z gebruikt.

Algemene parallaxformule

$$P_y = x\mathrm{d}\kappa_1 + (x-b)\ \mathrm{d}\kappa_2 + \frac{xy}{z}\mathrm{d}\varphi_1 + \frac{(x-b)y}{z}\mathrm{d}\varphi_2 + \\ - \left(1+\frac{y^2}{z^2}\right)h\cdot d\omega_1 + \left(1+\frac{y^2}{z^2}\right)h\cdot \mathrm{d}\omega_2 - \mathrm{d}y_1 + \\ + \mathrm{d}y_2 - \frac{y}{z}\mathrm{d}z_1 + \frac{y}{z}\mathrm{d}z_2$$

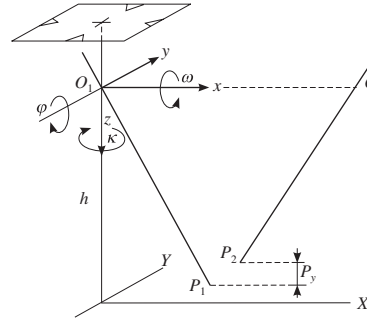
Bij onafhankelijke beeldenparen:

$$P_y = -x\mathrm{d}\kappa_1 + (x-b)\mathrm{d}\kappa_2 + \frac{xy}{z}\mathrm{d}\varphi_1 - \frac{(x-b)y}{z}\mathrm{d}\varphi_2 + \\ + \left(1+\frac{y^2}{z^2}\right)h\cdot \mathrm{d}\omega_2$$

Bij volgbeeldaansluiting:

$$P_y = +(x-b)\ \mathrm{d}k_2 - \frac{(x-b)y}{z}\mathrm{d}\varphi_2 + \left(1+\frac{y^2}{z^2}\right)h\cdot \mathrm{d}\omega_2 + \\ + \mathrm{d}y_2 + \frac{y}{z}\mathrm{d}z_2$$

Opmerking: in plaats van h wordt ook de letter z gebruikt



Figuur 4.5

4.3 Centrale Luchtfoto Catalogus van Nederland (CLC)

De Topografische Dienst te Emmen heeft de bijhouding van de CLC gestaakt. Het opgebouwde overzicht blijft behouden en ligt ter inzage bij de Fototheek van de Topografische Dienst.

Beschrijving CLC

Losbladig, bladformaat A3, schaal 1:100.000.
Bladindeling komt overeen met de 1:50.000 kaartserie.
Vermelde opnamegegevens:

- opnamedatum;
- schaal;
- cameraconstante;
- fotoformaat;
- soort opname;
- opnamemaatschappij;
- vaak opdrachtgever

Bestellen van luchtfoto's

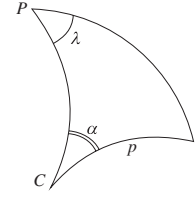
Voor afdrukken, vergrotingen enz. contact opnemen met de opdrachtgever of opnamemaatschappij. De Topografische Dienst verleent geen bemiddeling.

5 Kaartprojecties

Op de globe

$$\cos p = \cos PC \cos PS + \\ + \sin PC \sin PS \cos \lambda$$

$$\sin \alpha = \frac{\sin \lambda \sin PS}{\sin p}$$

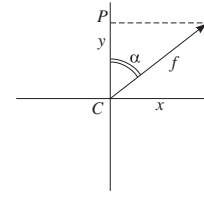


Figuur 5.1 Globe

Azimuthale projecties

In de kaart bij:

Centrale azim. proj.	$f = R \tan p$
Conforme[1)] azim. proj.	$f = 2R \tan \frac{1}{2} p$
Orthografische azim. proj.	$f = R \sin p$
Equidistante azim. proj.	$f = \text{bg } p$
Equivalente azim. proj.	$f = 2R \sin \frac{1}{2} p$
In rechth. coö:	$x = f \sin \alpha$
	$y = f \cos \alpha$
Bij poolprojecties: (φ is de breedtegraad van de parallel)	$p = 90^\circ - \varphi$

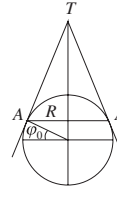


Figuur 5.2 Kaart

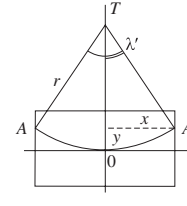
[1)] Of stereografische projectie.

Kegelprojecties

Algemeen:
$\lambda' = \lambda \sin \varphi_0$
Straal raakparallel:
$r_0 = TA = R \cot \varphi_0$



Figuur 5.3 Globe



Figuur 5.4 Kaart

Straal willekeurige parallel. Kegelprojectie met equidistante middenparallel en equidistante meridianen:

$r = R\cot\varphi_0 - \mathrm{bg}(\varphi - \varphi_0)$

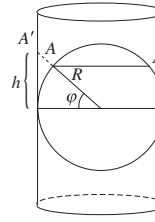
Conforme kegelprojectie van Lambert-Gauss:

$$r = R\,\cot\varphi_0 \left(\frac{\tan(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi)}{\tan(45^\circ - \frac{1}{2}\varphi)}\right)^{\sin\varphi_0}$$

In de kaart:

$x = r\sin\lambda'$

$y = r\,(1 - \cos\lambda')$



Figuur 5.5

De wereld kent een groot aantal coördinaatsystemen. Elk land heeft een eigen 'datum' (= ellipsoïde, oorsprong, schaal, rotaties en kaartprojectie). Lengte en Breedte in een stelsel kunnen <1000 meter variëren met coördinaten in een andere 'datum'.

WGS'84 = Wereld Geodetisch Systeem 1984 gebruikt voor GPS.
ITRS = Internationaal Terrestisch Referentie Stelsel. Meet contant beweging van aarde. Realisaties ITRF'97 en ITRF'2000 (Afwijking WGS 84 < 30 cm).
ETRS'89 = Europees Terrestisch Referentie System (=ITRS'89). (Afwijking WGS'84 < 10 cm). Stelsel, die het Europees continent vast veronderstelt.
RD = Rijksdriehoeksnet.

Van breedte (φ) en lengte (λ), hoogte (h) naar *X, Y, Z* coördinaten ten opzichte van het middelpunt van de aarde.

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi)}}$$

$X = (N + h) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\lambda)$
$Y = (N + h) \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\lambda)$
$Z = (N \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin(\varphi)$

waarin:

a = half lange as $a = 6.378.137$ meter voor WGS'84
$a = 6.377.397{,}155$ voor RD (Bessel)

e^2 = eerste excentriciteit ellips $e^2 = 0{,}066.943.80$ voor WGS'84
$e^2 = 0,\ 066.737.2$ voor WGS'84

Van *X, Y, Z* coordinaten in wereldstelsel naar breedte (φ) en lengte (λ), hoogte (h)
$\lambda = \arctan\ (Y/X)$
$\mathrm{R} = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$
Iteratie

$$N_i = a\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(\varphi_\mathrm{i})}$$

$$\varphi_{\mathrm{I+1}} = \arctan\left(\frac{Z + e^2 \cdot N_\mathrm{i} \cdot \sin(\varphi_i)}{R_\mathrm{i}}\right)$$

totdat $\|\varphi_{\mathrm{i+1}} - \varphi_\mathrm{i}\| < 10^{-10}$ rad
Transformatie van ITRF naar ETRF'89

$$X_{\mathrm{ETRF'98}} = X_{\mathrm{ITRF}} + \mathrm{s} \cdot X_{\mathrm{ITRF}} + \gamma \cdot Y_{\mathrm{ITRF}} - \beta \cdot Z_{\mathrm{ITRF}} + T_\mathrm{x}$$
$$Y_{\mathrm{ETRF'89}} = Y_{\mathrm{ITRF}} - \gamma \cdot X_{\mathrm{ITRF}} + \mathrm{s} \cdot Y_{\mathrm{ITRF}} + \alpha \cdot Z_{\mathrm{ITRF}} + T_\mathrm{y}$$
$$Z_{\mathrm{ETRF'89}} = Y_{\mathrm{ITRF}} + \beta \cdot X_{\mathrm{ITRF}} + \alpha \cdot Y_{\mathrm{ITRF}} + \mathrm{s} \cdot Z_{\mathrm{ITRF}} + T_\mathrm{z}$$

waarin:
α = rotatie om de x-as
β = rotatie om de y-as
γ = rotatie om de z-as
T_x = translatie x-as
T_y = translatie y-as
T_z = translatie z-as
s = schaalfactor

Transformatie van ETRF'89 naar RD(Bessel)

$$X_{\mathrm{RD}} = X_{\mathrm{ETRF'89}} - 4,0772 \cdot 10^{-6} \cdot X_{\mathrm{ETRF'89}} + 9,0587 \cdot 10^{-6} \cdot Y_{\mathrm{ETRF'89}} + 1,7439 \cdot 10^{-6} \cdot Z_{\mathrm{ETRF'89}} + 565,040$$

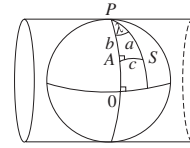
$$Y_{\mathrm{RD}} = Y_{\mathrm{ETRF'89}} - 9,0587 \cdot 10^{-6} \cdot X_{\mathrm{ETRF'89}} + 4,0772 \cdot 10^{-6} \cdot Y_{\mathrm{ETRF'89}} + 1,9848 \cdot 10^{-6} \cdot Z_{\mathrm{ETRF'89}} + 49,910$$

$$Z_{\mathrm{RD}} = Z_{\mathrm{ETRF'89}} - 1,7439 \cdot 10^{-6} \cdot X_{\mathrm{ETRF'89}} - 1,9848 \cdot 10^{-6} \cdot Y_{\mathrm{ETRF'89}} + 4,0772 \cdot 10^{-6} \cdot Z_{\mathrm{ETRF'89}} + 465,840$$

De transformatie van lengte, breedte, hoogte naar *x-rd, y-rd, h-rd*

Cilinderprojecties

Normale
Kwadr. platkaart: $h = \text{bg}\,\varphi$
Mercatorprojectie:
$h = R \log \tan (45^\circ + \frac{1}{2}\varphi)\ 2,3026$
Equivalente proj.(Lambert):
$h = R \sin \varphi$



Figuur 5.6

Transversale
Op de globe:
$\sin c = \sin P \sin a$
$\tan b = \cos P \tan a$
$P = \lambda_0 - \lambda_s$

In de kaart
Transversale Platkaart: $x = \text{bg}\ c$
$y = \text{bg}\ AO = \text{bg}\ (90^\circ - b)$
Equivalente projectie (Lambert): $x = R \sin c$
$y = AO = \text{bg}\ (90^\circ - b)$
Mercatorprojectie: $x = R \log \tan (45^\circ + \frac{1}{2}\ c)\ 2,3026$
$y = AO = \text{bg}\ (90^\circ - b)$

N.B. In het voorgaande is de afwijking van de bolvorm niet in rekening gebracht.

6 Astronomische plaatsbepaling

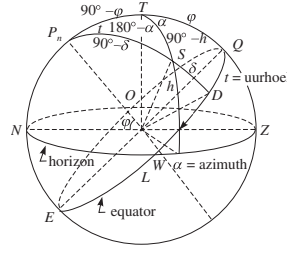
Tijd/lengtebepaling

$\angle t = \angle TP_nS =$ uurhoek
$LD =$ r.k. $= a$
$QL =$ Pl.S.T. $= \Theta$
$\Theta = a + t$
Pl.S.T $=$ G.S.T. $\pm\ \lambda$
Pl.W.T $=$ G.W.T. $\pm\ \lambda$

$$\cos t = \frac{\sin h - \sin \delta \sin \varphi}{\cos \delta \cos \varphi}$$

In elongatiestand:

$$\cos\ t = \frac{\tan \varphi}{\tan \delta}$$



Figuur 6.1

In 1ste verticaal:

$$\cos t = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$$

Breedtebepaling in de meridiaan

$$\varphi = \delta \pm z$$

Simultane lengte- en breedtebepaling:
$\sin h = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t$

Hoogtebepaling

Uit φ, δ, t en Az:

$$\tan h = \frac{\cos AZ}{\tan(M - \varphi)}; \quad \tan M = \frac{\tan \delta}{\cos t}$$

Bij grootste elongatie: $\sin h = \dfrac{\sin \varphi}{\sin \delta}$

In 1ste verticaal: $\sin h = \dfrac{\sin \delta}{\sin \varphi}$

Azimuthbepaling

Uit φ, t en δ:

$$\tan Az = \frac{\tan t \cos M}{\sin(M - \varphi)}; \tan M = \frac{\tan \delta}{\cos t}$$

$$\cos Az = \frac{\tan \delta \cos \varphi - \sin \varphi \cos t}{\sin t};$$

Uit δ, φ en h:

$$\cos Az = \frac{\sin \delta - \sin h \sin \varphi}{\cos h \cos \varphi}$$

$$\text{of } \tan^2 \left(\tfrac{1}{2} A_z\right) = \frac{\sin (s - z) \sin(s - \bar{\varphi})}{\sin s \sin (s - p)}$$

waarin:

$$z = 90^\circ - h; \quad \bar{\varphi} = 90^\circ - \varphi; \quad p = 90^\circ - \delta;$$
$$s = \tfrac{1}{2}(z + \bar{\varphi} + p)$$

Bij grootste elongatie: $\sin Az = \dfrac{\cos \delta}{\cos \varphi}$

Hoogtecorrecties

$$H = h - K - R + P \pm \tfrac{1}{2} d$$

warrin:
K $= \sqrt{3,2\, h_w}$ [minuten] (h_w in meter)
R $\approx \cot h$
P $= H_p \cos h$
H_p = horizontale parallel
k = kimduiking (alleen bij sextantwaarneming op schijnbare horizon)

Literatuur

- Alberda, J.E.
  Inleiding Landmeetkunde
  Delft, Delftse Uitgeversmaatschappij.
- Hooijberg, M.
  Practical Geodesy: using computers
  Springer, Berlin 1997.
- Husti, G.J.
  Global Positioning System
  Delft University Press, 2000.
- Jonkers, R.
  Praktisch landmeten
  Delft, Waltman.
- *Landmeten*
  Stichting Beroepsopleidingen Weg- en waterbouw,
  Postbus 279, 2800 AG Gouda.
- *Maatvoering*
  Cursus Opleidingen Bouwcentrum
- *Meten en uitzetten*
  Stichting Beroepsopleidingen Weg- en waterbouw,
  Postbus 279, 2800 AG Gouda.

- Muller, J.A., A. Scheffer
  Landmeten en waterpassen
  Culemborg, Stam Technische Boeken
- Polman, J. en Salzmann, M.A. (red.)
  Handleiding voor de technische werkzoomheden van het kadaster
  Apeldoorn, Kadaster, 1996.
- Wagenaar, K.
  Bouwmeten–Maatvoeren en uitzetten op de bouwplaats
  Stichting Wetenschappelijke Revolutie ’80
  Secr. Zijldiep 16, 3313 VG Dordrecht.

Civiele techniek F2

1 Grondmechanica
- 1.1 Laboratoriumonderzoek grondparameters
- 1.2 Grondmechanische berekeningen
- 1.3 Damwandberekeningen

2 Funderingen
- 2.1 Algemeen
- 2.2 Funderingen op staal
- 2.3 Funderingen op palen

3 Grondwerken
- 3.1 Gegevens diverse grondsoorten
- 3.2 Ontgraving en vervoer
- 3.3 Enkele berekeningen

4 Bemaling van ontgravingen
- 4.1 Algemeen
- 4.2 Berekening debiet bemaling
- 4.3 Brontypen
- 4.4 Aanvullende berekeningen

5 Cultuurtechniek
- 5.1 Grondsoortenindeling
- 5.2 Neerslaggegevens en waterbalans
- 5.3 Drooglegginsmaten
- 5.4 Beregening
- 5.5 Grondwaterstroming en terreinontwatering

6 Rioleringen
- 6.1 Binnenhuis-rioleringen
- 6.2 Stedelijke rioleringsstelsels
- 6.3 Afvoer bij stedelijke rioleringen
- 6.4 Berekening stedelijke rioolleidingen

7 Wegenbouw
7.1 Begrippen
7.2 Ondergrond en aardebaan
7.3 Verharding
7.4 Asfaltconstructies
7.5 Verticale bogen

8 Baggerwerken
8.1 Grondsoorten
8.2 Hydraulische formules

1 Grondmechanica

1.1 Laboratoriumonderzoek grondparameters

Tabel 1.1 Fractie-indeling naar korrelafmeting (NEN 5104)

fractie	korrelafmetingen
lutum	$< 2\ \mu$m
silt	2 μm–63 μm
zand	63 μm–2000 μm
grind	2 mm–63 mm
stenen	63 mm–200 mm
keien	200 mm–630 mm
blokken	> 630 mm

Specifieke oppervlakte van de gezamenlijke korrels – *U*-cijfer
Het *U-cijfer* is de verhouding van het gezamenlijk oppervlak van een bepaalde gewichtshoeveelheid korrels, en het gezamenlijk oppervlak van een zelfde hoeveelheid korrels met een uniforme diameter van 10 mm.

$$U = \frac{4,34}{\log(d_2/d_1)}\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)$$

waarin:
$d_1 = d_{\min}$ subfractie [mm]
$d_2 = d_{\max}$ subfractie [mm]

Tabel 1.2 Zandclassificatie

naam	*U*-cijfer
zeer fijn zand	160–120
fijn zand	120– 80
matig fijn zand	80– 50
matig grof zand	50– 30
grof zand	30– 20
zeer grof zand	20– 10

Tabel 1.3 U-cijfers voor verschillende fracties

fractie (zeven conform NEN 2560) [mm]	*U*-cijfer
0,045–0,063	189
0,063–0,090	133
0,090–0,125	95
0,125–0,180	67
0,180–0,250	47
0,250–0,355	34
0,355–0,500	24
0,50 –0,71	17
0,71 –1,00	12
1,0 –1,4	8

Door de fractiepercentages van het grondmonster (bepaald d.m.v. zeven) te vermenigvuldigen met de daarbijbehorende *U*-cijfers, is na sommatie en deling door 100 het totale *U*-cijfer te bepalen.

Korrelstructuur en volumiek gewicht

De meeste grondsoorten in Nederland bestaan uit een skelet van korrels met daar tussen in poriën, die met water gevuld kunnen zijn.Veen is vezelig van structuur. In formule:

$$V_g = V_k + V_w + V_l \quad [m^3]$$

$$W_g = W_k + W_w \quad [kN]$$

waarin: V = volume; W = gewicht
indices: g = grond; k = korrels; w = water; l = lucht

Met de specifieke volumieke massa's (ρ) kunnen de meetbare gewichten van het grondmonster, de korrels apart en het water, omgerekend worden naar volumedelen: $V = W/(\rho \times g)$ (g = zwaartekrachtversnelling $\approx 10\ m/s^2$.

Volumieke massa:
- water: $\rho_w = 1000\ kg/m^3$
- korrelmateriaal (zand, silt e.d.): $\rho_k = 2650\ kg/m^3$

Voor klei en humus(veen)-houdende monsters is de specifieke volumieke massa met een pyknometer te bepalen volgens norm NEN 5111.

Nat volumiek gewicht: $\gamma_n = W_g/V_g$
Droog volumiek gewicht: $\gamma_d = W_k/V_g$

Tabel 1.4 Gemiddelde waarden voor γ_{sat}, γ_d en γ' (onder water) voor verschillende *grondsoorten in Nederland* [kN/m^3]

grondsoort	γ_{sat}	γ_d	γ'
veen	10	2	0
slappe klei	14	7	4
vaste klei	18	13	8
kleihoudend zand	18	13	8
losgepakt zand	17	13	7
vastgepakt zand	20	16	10

Index sat = poriën verzadigd met water.

Poriëngehalte n

Het *poriëngehalte* n van een grondsoort is de verhouding tussen het volume van de poriën in procenten van het totale volume:

$$n = \frac{V_g - V_k}{V_g} \times 100\%$$

of: $n = \left(1 - \frac{1}{V_g} \cdot \frac{W_g - W_w}{\rho_k \times g}\right) \times 100\%$

Poriëngetal e

Uit het poriëngehalte n is het *poriëngetal* af te leiden: $e = \frac{n}{100 - n}$

Tabel 1.5 Gemiddelde waarde van n en e voor enige grondsoorten

grondsoort	poriëngehalte n (%)	poriëngetal
veen	60–85	1,5–5,6
slappe klei	50–70	1,0–2,3
vaste klei	35–50	0,54–1,0
zandige klei	20–50	0,25–1,0
zeer fijn zand	30–40	0,43–0,67
mengsel van fijn en grof zand	30–45	0,43–0,82
grof zand	20–35	0,25–0,54

Pakkingsdichtheid (niet cohesieve grondsoorten)

$$D = R_n = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$$

waarin:
n_{max} = poriëngehalte n bij droog en los gestort zand
n_{min} = poriëngehalte n bij aardvochtig en verdicht zand

Zeer losgepakt	: $D < 0{,}15$	$q_c < 4$
Losgepakt	: $D = 0{,}15-0{,}3$	$q_c = 4-7{,}5$
Matig vastgepakt	: $D = 0{,}3-0{,}5$	$q_c = 7{,}5-15$
Vastegpakt	: $D > 0{,}5$	$q_c > 15$

q_c = gemeten conusweerstand bij een sondering [MN/m^2]

Vochtinvloed

Watergehalte in volumeprocenten:

$$W_v = \frac{V_w}{V_g} \times 100\% = \left(\frac{1}{V_g} \cdot \frac{W_w}{\rho_w \cdot g}\right) \times 100\%$$

Veelal ook in gewichtsprocenten: $w_w = \dfrac{W_w}{W_k} \times 100\%$

Verzadigingsgraad S is het percentage van de poriën dat met water gevuld is in plaats van met lucht:

$$S = \frac{V_w}{V_g - V_k} \times 100\% = \frac{W_w/(\rho_w \cdot g)}{V_g - W_k/(\rho_k \cdot g)} \times 100\%$$

waarin: $\rho_w = 1000\,\text{kg/m}^3$
$\rho_k = 2650\,\text{kg/m}^3$

Capillaire opstijging h_c boven de vrije grondwaterspiegel

$$h_c = 4{,}82 \cdot \frac{100 - n}{n} U \quad [\text{mm}]$$

waarin: n = poriëngehalte (zie tabel 1.5)
U = specifieke korreloppervlakte (zie tabel 1.2)

Tabel 1.6 Capillaire opstijging

grondsoort	h_c [mm]
grof zand	120– 150
matig grof zand	400– 500
fijn zand	800–1100
zeer fijn zand	1100–1500
klei	> 2000

Doorlatendheidscoëfficiënt k

Formule van Hooghoudt voor zanden, afhankelijk van de viscositeit van water. Voor Nederlands grondwater ($t = 10\,^\circ\text{C}$) geldt bij $\eta = 1{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{N} \cdot \text{s/m}^3$:

$$k = \frac{3,7.10^{-4}}{\eta} \cdot \frac{n^3}{(100-n)^2} \cdot \frac{1}{U_2} [\mathrm{m/s}] \qquad \text{(zie tabel 4.1)}$$

Inwendige wrijvingshoek φ en cohesie c
Beide parameters zijn met o.a. de *celproef* en de *triaxiaalproef* in het laboratorium te bepalen. Bij slecht doorlatende gronden zoals klei en veen, spelen de waterspanningen een grote rol. Er kan hier onderscheid worden gemaakt tussen gedraineerde en niet gedraineerde proeven, en ook tussen de verschillende mogelijkheden van consolidatie.

Tabel 1.7 Enkele waarden voor φ en c ter oriëntatie

grondsoort	niet geconsolideerd aanvangsstadium		geconsolideerd eindstadium	
	φ [graden]	c [kN/m^2]	φ [graden]	c [kN/m^2]
losgepakt zand	27–30	0	27–30	0
vastgepakt zand	30–33	0	30–33	0
klei/veenhoudend zand	18–22	3–6	20–25	0
slappe klei	0–2	5–10	15–19	1–4
vaste klei	2–5	15–25	20–28	3–6
veen	0–2	10–20	12–18	2–5

Consistentiegrenzen (cohesieve gronden)
De *consistentie* of *plasticiteit* van een cohesieve grondsoort is sterk afhankelijk van het watergehalte. De overgangen tussen de drie fasen (vast, plastisch en vloeibaar) worden de consistentie-grenzen genoemd. Men onderscheidt:
- Vloeigrens: w_L [%], waarbij een in de grond getrokken groef in het toestel van *Casagrande* bij 25 slagen net dichtvloeit.
- *Uitrolgrans:* w_P [%], waarbij de grond nog net tot ongebroken draden van 3 mm dikte uit te rollen is.
- *Plasticiteitsindex:* $I_p = w_L - w_p$
- *Consistentie-index:* $I_c = (w_L - w)/I_P$
  zacht: $0,50 < I_c \leqslant 0,75$
  stijf: $0,75 < I_c \leqslant 1,00$
  hard: $I_c > 1,00$

Cohesieve grond met een watergehalte groter of gelijk aan de vloeigrens is slap en moeilijk te verwerken, terwijl bij een

afnemend vochtgehalte de cohesie toeneemt en de grond bij de uitrolgrens bijna vast wordt.

Samendrukkingsparameters C_p, C_s, C_c, C_α, c_y, m_v

Met samendrukkingsproeven op ongeroerde monsters (hoogte = 20 mm) kunnen de *samendrukkingsparameters* voor een zettingsberekening en het verloop met de tijd t worden bepaald.

C_p = dimensieloze samendrukkingsconstante voor $t = 1$ dag (direct effect) [-]
C_s = samendrukkingsconstante voor het seculaire c.q. secundaire effect [-]
C_c = primaire samendrukkingsindex [-]
C_α = secundaire samendrukkingsindex [-]
C_v = consolidatiecoëfficiënt ter bepaling van het tijdzettings- verloop van het directe effect [m^2/s]
m_v = samendrukkingscoëfficiënt [m^2/N]

Uit c_v en m_v kan de verticale doorlatendheidscoëfficiënt k_v [m/s] berekend worden volgens:

$$k_v = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$$

Tabel 1.8 Enkele samendrukkingsparameters

grondsoort	$\frac{1}{C_p}$	$\frac{1}{C_s}$	c_v [m^2/s]	m_v [m^2/N]	C_c [−]	C_c [−]
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$		$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
zand	2–20	0	0,01–0,1	0,01–0,1	2–21	0
zandige klei	5–12	3–8	10^{-6}–10^{-4}	0,1–0,4	50–750	4–9
veen	50–250	10–60	$5 \cdot 10^{-8}$–$10 \cdot 10^{-8}$	0,5–2,5	900–7500	16–23
venige klei	25–100	5–25	$3 \cdot 10^{-8}$– $8 \cdot 10^{-8}$	0,3–1,5	400–1700	12–15
klei	14–50	3–10	$1 \cdot 10^{-8}$– $5 \cdot 10^{-8}$	0,2–1,0	125–1350	4–13

Hydrodynamische periode t_e

Bij belasting van met water verzadigde slecht doorlatende gronden wordt deze in het begin volledig door het poriënwater opgenomen. De tijd die voor het afvloeien van dit overspannen water nodig is wordt de *hydrodynamische periode* genoemd. Als praktisch einde wordt het tijdstip met 93% aanpassing (consolidatie) aangenomen. Verband tussen tijdstip t en mate van consolidatie:

$$t = \frac{h^2 \cdot T}{4c_v} \text{ [s]}$$

waarin:
h = laagdikte samendrukbare laag bij afstromingsmogelijkheid van het overspannen water naar twee zijden;anders h verdubbelen [m]
c_v = consolidatiecoëfficiënt [m_2/s]
T = dimensieloze hulpgrootheid (naar *Terzaghi*); bij tijdstip t_e [s]: $T = 1$

Tabel 1.9 Samendrukkingsproces (U = consolidatiepercentage = 100 voor de eindzakking)

T	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1	2
U (%)	35	50	61	70	81	89	93	99

1.2 Grondmechanische berekeningen

In NEN 6740 *Geotechniek – Basiseisen en belasting* zijn partiële materiaalfactoren voor grondeigenschappen aangegeven (γ). Bij de beschouwing van de grenstoestand moeten deze factoren in rekening worden gebracht op de karakteristieke c.q. representatieve waarde van de betreffende parameters. Zie tabel 1.10. Voor de te beschouwen grenstoestanden en de classificatie van geotechnische constructies, zie par. 2.1.

Tabel 1.10 Partiële materiaalfactor γ voor grondeigenschappen (uiterste *grenstoestand*)

grondeigenschap	materiaalfactor γ [1)]
volumieke massa	1,1
tangent hoek inwendige wrijving	1,15
cohesie (bij stabiliteit en gronddrukken)	1,5
samendrukkingscontante	1,3
elasticiteitsmodules	1,3

[1)] Wanneer een verhoging van de waarde van de betreflende parameter tot een ongunstiger resultaat leidt, of wanneer de bruikbaarheidsgrenstoestand wordt beschouwd; $\gamma = 1{,}0$

Spanningen in de bodem

Hoofdwet:

$$\sigma = \sigma' + u \quad \text{of} \quad \sigma' = \sigma - u$$

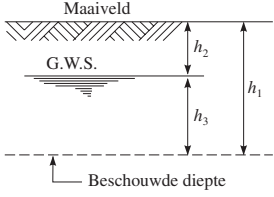
waarin:
σ = verticale grondspanning [kN/m^2]
σ' = verticale korrelspanning [kN/m^2]
u = alzijdige waterspanning [kN/m^2]

De verticale spanningen op een willekeurige diepte zijn te berekenen met de volumieke gewichten γ (zie tabel 1.4) van de bovengelegen lagen:

$$\sigma(h_1) = (\gamma_d \text{à} \gamma_{sat}) \cdot h_2 + \gamma_{sat} \cdot h_3$$

$$\sigma'(h_1) = (\gamma_d \text{à} \gamma_{sat}) \cdot h_2 + \gamma' \cdot h_3$$

Boven de grondwaterspiegel kan voor het volumegewicht van zand circa 1,2 × γ_d aangehouden worden en voor klei (die veel capillair water bevat) 0,8 × γ_{sat} á 1,0 × γ_{sat}



γ_d = volumieke gewicht droge grond [kN/m^3]
γ_{sat} = volumiede gewicht verzadigde grond [kN/m^3]
γ' = volumieke gewicht grond onder water [kN/m^3]

Figuur 1.1 Hoogten bij verticale spanningen

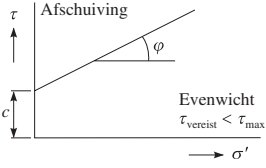
Evenwichtsvoorwaarde in de bodem

Met de *formule van Coulomb* kan het evenwicht van een willekeurig gericht grondmootje worden beschouwd. Er is *evenwicht* mogelijk wanneer vereist $\tau_{vereis} \leq \tau_{max}$.

$$\tau_f = c + \sigma' \cdot \tan\varphi$$

waarin:

τ_f = schuifspanning langs een vlakje
c = cohesie van de grond
σ' = korrelspanning loodrecht op het beschouwde vlakje
φ = hoek van inwendige wrijving



Figuur 1.2 Afschuiving

Bij de berekening van schuifspanningen kan men altijd uitgaan van de aanwezige korrelspanningen loodrecht op het beschouwde vlak. Deze zijn met de hoofdwet $\sigma' = \sigma - u$ te berekenen. Hierbij an u sterk afwijken van het hydrostatische verloop door:
– stroming van het poriënwater;
– bovenbelasting op slappe lagen.

Exacte waterspanningen zijn met waterspanningsmeters te meten.

Zettingsberekeningen

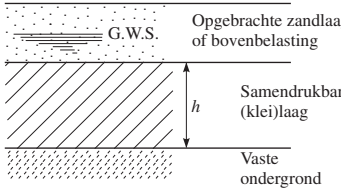
Traditionele methode

$$z = h \cdot \left[\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \cdot \log t\right] \cdot \ln \frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'} \qquad \left[\frac{1}{C_\infty} = \frac{1}{C_p} + \frac{4}{C_s}\right]$$

waarin:
z = zetting [m]
h = laagdikte van de samendrukbare laag [m]
σ' = oorspronkelijke korrelspanning in het midden van de laag [kN/m^2]
$\Delta\sigma'$ = korrelspanningsverhoging door ophoging of bovenbelasting of grondwaterstandsverlaging [kN/m^2]

t = tijdsduur [dagen]
C_ε = dimensieloze samendrukkingsconstante (zie tabel 1.11)
C_p en C_s = dimensieloze samendrukkingsconstanten (zie tabel 1.8)

Bij dikkere veenlagen worden met deze formule veelal te hoge zettingswaarden berekend.



Figuur 1.3 Zettin

Tabel 1.11 Richtwaarden samendrukkingsconstanten voor beperkt voorbelaste grond

grondsoort	C_ε	grondsoort	C_ε
zand	50–500	klei	10–25
zandige klei	25– 50	venige klei	5–15
leem/slit	30– 40	veen	2–10

Nieuwe methode

$$\frac{z}{H} = \frac{C_c}{1 + e_o} \cdot \log \frac{\sigma_n}{\sigma_o} + C_\alpha \cdot \log \frac{\Delta t}{\Delta t_1} \quad \text{(NEN 5118 / NEN 6744)}$$

waarin:
z = totale zakking [m]
H = dikte van de laag [m]
C_c = primaire samendrukkingsindex [-]

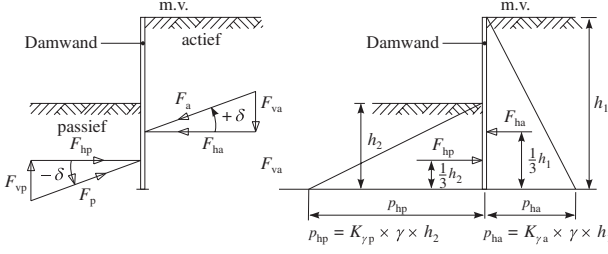
C_α = secundaire samendrukkingsindex [-]
e_o = oorspronkelijke poriëngetal
σ_o = initiële korrelspanning [kN/m^2]
σ_n = nieuwe korrelspanning [kN/m^2]
Δt = tijdsduur van de belasting [dagen]
Δt_1 = tijdsduur van één dag (= 1,0 dag)

Ook een grondwaterstandsverlaging is als een fictieve boven-belasting te rekenen, omdat door de afname van u in de samen-drukbare lagen σ' toeneemt ($-\Delta u = \Delta\sigma'$).

1.3 Damwandberekeningen

Actieve en passieve gronddruk

δ = hoek van wandwrijving



Figuur 1.4 Actieve en passieve gronddruk

Algemene formule voor de effectieve horizontale gronddruk p_h:

$$p_h = (\gamma - u) \cdot K_\gamma + c \cdot K_c$$

waarin:
γ = volumiek gewicht grond
u = waterdruk

K_γ = gronddrukcëfficiënt m.b.t. volumieke gewicht (zie tabel 1.12)
c = cohesie
K_c = gronddrukcëfficiënt m.b.t. cohesie (zie tabel 1.12)

Tabel 1.12 Gronddrukcoëfficiënten bij horizontaal maaiveld en verticale damwand

φ [graden]	$K_{\gamma a}$				$K_{\gamma p}$							
					rechte glijdvlakken[1] (NEN 6740)				gebogen glijdvlakken[1]			
	$\delta = 0$	$\delta = \frac{1}{3}\varphi$	$\delta = \frac{2}{3}\varphi$	$\delta = \varphi$	$\delta = 0$	$\delta = \frac{1}{3}\varphi$	$\delta = \frac{2}{3}\varphi$	$\delta = \varphi$	$\delta = 0$	$\delta = \frac{1}{3}\varphi$	$\delta = \frac{2}{3}\varphi$	$\delta = \varphi$
10,0	0,70	0,67	0,65	0,63	1,42	1,51	1,61	1,73	1,42	1,48	1,59	1,71
12,5	0,64	0,61	0,58	0,56	1,55	1,68	1,79	1,95	1,52	1,64	1,77	1,89
15,0	0,59	0,55	0,52	0,50	1,70	1,89	2,08	2,32	1,67	1,84	2,03	2,17
17,5	0,54	0,50	0,47	0,45	1,86	2,12	2,37	2,76	1,83	2,06	2,26	2,56
20,0	0,49	0,46	0,43	0,40	2,04	2,38	2,80	3,32	2,02	2,31	2,60	2,95
22,5	0,45	0,41	0,39	0,36	2,24	2,72	3,28	4,06	2,22	2,64	2,98	3,49
25,0	0,41	0,37	0,35	0,32	2,46	3,10	3,91	5,09	2,46	3,01	3,51	4,09
27,5	0,37	0,34	0,32	0,29	2,72	3,56	4,70	6,54	2,71	3,46	4,11	4,86
30,0	0,33	0,30	0,28	0,26	3,00	4,08	5,74	8,74	3,00	3,98	4,81	5,76
32,5	0,30	0,27	0,25	0,23	3,32	4,76	7,18	12,35	3,31	4,56	5,71	6,87
35,0	0,27	0,25	0,23	0,21	3,69	5,58	9,17	18,8	3,68	5,34	6,81	8,21

φ [graden]	K_{ca}				K_{cp}			
	$\delta = 0$	$\delta = \frac{1}{3}\varphi$	$\delta = \frac{2}{3}\varphi$	$\delta = \varphi$	$\delta = 0$	$\delta = \frac{1}{3}\varphi$	$\delta = \frac{2}{3}\varphi$	$\delta = \varphi$
10,0	1,68	1,60	1,52	1,45	2,38	2,56	2,74	2,95
12,5	1,61	1,51	1,43	1,34	2,49	2,73	3,00	3,30
15,0	1,53	1,43	1,34	1,24	2,61	2,92	3,30	3,73
17,5	1,47	1,36	1,26	1,16	2,73	3,14	3,64	4,27
20,0	1,40	1,29	1,18	1,08	2,86	3,39	4,06	4,94
22,5	1,34	1,22	1,11	1,00	2,99	3,66	4,56	5,83
25,0	1,27	1,16	1,04	0,93	3,14	3,98	5,18	7,02
27,5	1,21	1,10	0,98	0,87	3,30	4,35	5,96	8,70
30,0	1,15	1,04	0,92	0,80	3,46	4,78	6,96	11,20
32,5	1,10	0,98	0,87	0,75	3,65	5,28	8,28	15,18
35,0	1,04	0,93	0,81	0,69	3,84	5,89	10,10	22,25

[1] Bij grote φ-waarden horen grote vervormingen (20 à 40 mm) en zijn rechte glijdvlakken zonder meer te gunstig.

Niet-cohesieve gronden:
- actieve gronddruk : $F_{ha} = \frac{1}{2}\gamma \cdot h_1^2 \cdot K_{\gamma a}$
- passieve gronddruk: $F_{hp} = \frac{1}{2}\gamma \cdot h_2^2 \cdot K_{\gamma p}$

Cohesieve gronden:
- actieve gronddruk : $F_{ha} = \frac{1}{2}\gamma \cdot h_1^2 \cdot K_{\gamma a} - h_1 \cdot c \cdot K_{ca}$
- passieve gronddruk: $F_{ha} = \frac{1}{2}\gamma \cdot h_2^2 \cdot K_{\gamma p} + h_2 \cdot c \cdot K_{cp}$

Neutrale gronddruk

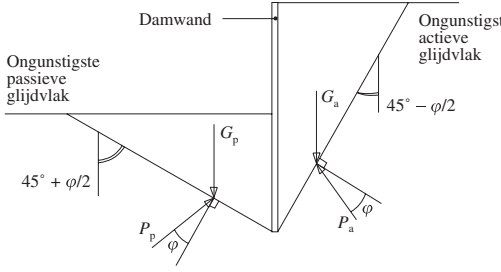
Indien de wand dermate star is dat deze geen verplaatsing ondergaat moet gerekend worden met de neutrale gronddrukcoëfficië K_0:

$$K_0 = 1 - \sin\varphi$$

Het eventuele cohesie-aandeel mag niet in rekening worden gebracht.

Grondbreukvorm bij damwanden (glijdvlakken)

De vorm en de helling van glijdvlakken is zodanig dat er een minimale weerstand tegen afschuiven wordt geboden.Bij rechte glijdvlakken is het gevaarlijkste glijdvlak grafisch met de *methode* van *Culmann* te vinden.Voor het meest voorkomende geval met horizontaal maaiveld,zijn deze in figuur 1.5 aangegeven.

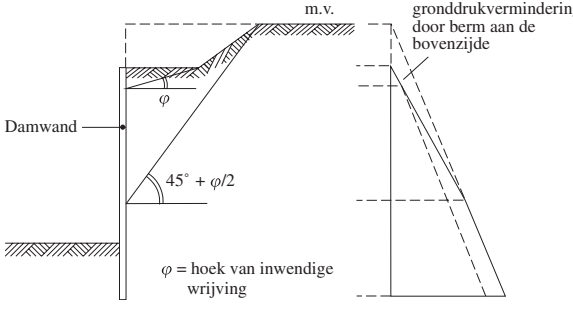


Figuur 1.5 Glijdvlakken (horizontaal maaiveld)

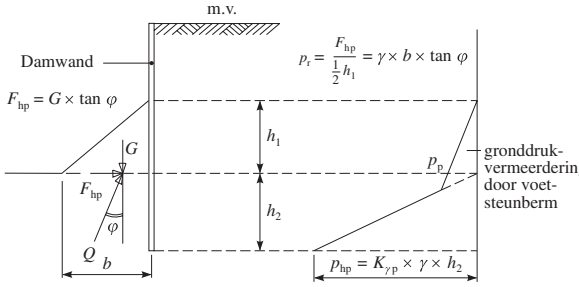
Bij de bepaling van het evenwicht van de afschuivende moten grond kunnen zowel de wandwrijving langs de damwand als de cohesie in de grond langs het glijdvlak meegerekend worden.

Gronddrukverdeling bij gelaagdheid, bovenbelasting e.d.

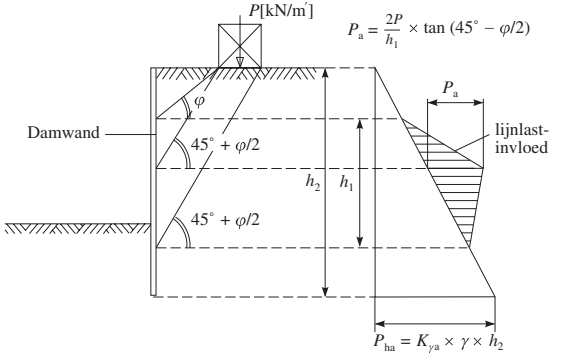
Bij gelaagde grond en voor grond onder water is voor elke laag de horizontale gronddruk te bepalen door de verticale korreldruk met de bijbehorende K-waarde te vermenigvuldigen. De bovenbelasting op het terrein is als gronddrukverhoging in verticale richting te nemen.Afhankelijk van de mate van consolidatie worden hierdoor de water-en korrelspanningen verhoogd.
Voor de gronddrukcoëfficiënt bij bovenbelastingen K_{sur} sur kan worden aangehouden: $K_{sur} = K_{\gamma}$ (maaiveld horizontaal, dam-wand verticaal).



Figuur 1.6 Berminvloed



Figuur 1.7 Voet-steunberm, geldig indien bij de ontgraving de berm in stand gehouden wordt. Bij het achteraf aanbrengen van een berm de nodige voorzichtigheid betrachten in de berekeningen.



Figuur 1.8 Plaatselijke bovenbelasting bij $\delta = 0$. Bij $\delta = \frac{2}{3}\varphi$ kan 75% van de aldus berekende P_a in rekenin worden gebracht.

Tabel 1.13 Azobé-hout damwandprofielen met schuine groef en messin ($\rho = 1050$ kg/m^3, $E = 17000$ N/mm^2; alle grootheden hebben betrekkin op een strekkende meter damwand)

plankdikte [mm]	weerstandsmoment [mm^3]	EI [N · mm^2]
	$\times 10^6$	$\times 10^6$
40	0,27	225
60	0,60	510
80	1,07	905
100	1,67	1420

Tabel 1.14 Grootheden damwandprofielen (alle grootheden hebben betrekking op een strekkende meter damwand)

profieltype	weerstands-moment [mm^3]	massa per m^2 [kg]	wanddikte van de planken [mm]	samen-gestelde wandhoogte [mm]	werkende breedte per plank [mm]	traagheids-moment [mm^4]
	$\times 10^3$					$\times 10^6$
LARSSEN van Duits fabrikaat (HOESCH)						
20	600	79	7,0	220	500	66
21	700	95	8,2	220	500	77
22	1250	122	10,0	340	500	212
23	2000	155	11,5	420	500	420
24	2500	175	15,6	420	500	525
25	3040	206	20,0	420	500	638
31	460	100	9,5	150	450	34
32	850	122	10.5	250	450	106
43	1660	166	12,0	420	500	349
430	6450	235	12,0	750	708	2419
600	510	94	9,5	150	600	38,4
601	745	77	7,5	310	600	115
602	830	89	8,2	310	600	129
603	1200	108	9,7	310	600	186
604	1620	124	10,5	380	600	308
605	2020	139	12,5	420	600	424
606	2500	157	15,6	435	600	544
607	3200	191	21,5	435	600	696
703	1210	97	9,5	400	700	242
703K	1300	103	10	400	700	260
LARSSEN van Frans fabrikaat (UNIMETAL)						
31	460	100	9,5	150	450	34
II N	1100	122	9,5	270	400	148
III N	1600	155	13,0	290	400	232
VI	4200	290	23,5	438	420	920
II S	1600	139	12,3	340	500	272
III S	2000	158	14,1	380	500	380
IV S	2500	176	15,5	440	500	550
VS	3200	212	20,6	450	500	720
VI	4200	290	23,5	438	420	920
LARSSEN van Luxemburgs fabrikaat (ARBED)						
PU6	600	75	7,5	226	600	68
PU8	830	91	8,0	280	600	116
PU12	1200	110	9,8	360	600	216
PU16	1600	124	12,0	380	600	304
PU20	2000	141	12,4	400	600	400
PU25	2500	157	14,2	452	600	565

Tabel 1.14 (vervolg)

profieltype	weerstands-moment [mm^3]	massa per m^2 [kg]	wanddikte van de planken [mm]	samen-gestelde wandhoogte [mm]	werkende breedte per plank [mm]	traagheids-moment [mm^4]
	$\times 10^3$					$\times 10^6$
PU32	3200	191	19,5	452	600	723
LIIS	1600	139	12,3	340	500	272
LIIIS	2000	158	14,1	400	500	400
LIVS	2500	172	15,5	440	500	550
JSP 2	874	120	10,5	200	400	87
JSP 3	1340	150	13,0	250	400	168
BZ7	760	93	8,0	190	550	72
BZ32	3200	208	19,0	352	500	563
BZ37	3650	234	20,0	350	500	639
BZ42	4200	271	24,0	354	500	743
AZ13	1300	107	9,5	303	670	197
AZ18	1800	118	9,5	380	630	342
AZ26	2600	155	13,0	427	630	555
AZ36	3600	194	18,0	460	630	828
HOESCH						
12	1140	107	9,5	260	575	148
18	1800	116	9,5	380	675	342
95	750	95	8,0	190	525	71
116	1200	116	9,3	250	525	150
122	940	122	11,0	190	525	89
134	1700	134	10,0	300	525	255
155	2000	155	12,8	300	525	300
175	2600	175	14,0	340	525	442
215	3150	215	18,8	340	525	535
1200	1140	107	9,5	260	575	148
1700	1720	116	10,0	350	575	301
1700K	1700	117	9,5	350	575	298
2500K	2540	155	12,8	350	575	444
2500	2480	152	12,5	350	575	434
3600	3560	192	16	415	575	739
BRITISH STEEL						
LX8	830	91	8,2	310	600	128
LX12	1208	106	9,7	310	600	187
LX16	1641	124	10,5	380	600	311
LX20	2022	139	12,5	430	600	434
LX25	2525	157	15,6	450	600	564
LX32	3201	190	21,5	450	600	720

Tabel 1.14 (vervolg)

profieltype	weerstands-moment [mm^3]	massa per m^2 [kg]	wanddikte van de planken [mm]	samen-gestelde wandhoogte [mm]	werkende breedte per plank [mm]	traagheids-moment [mm^4]
	$\times 10^3$					$\times 10^6$
KOUDGEWALSTE PROFIELEN						
DWU 4300	111	29,7	3	89	660	5,0
DWU 4400	146	39,3	4	90	660	6,7
DWU 4500	178	48,3	5	91	660	8,3
DWU 3400	263	44,2	4	126	711	16,6
DWU 3500	320	54,7	5	127	711	20,6
DWU 3600 B1	402	68,3	6	127	719	27,1
DWU 5400	414	51,8	4	189	739	39,3
DWU 5500	514	64,4	5	190	739	49,1
DWU 5600	610	76,9	6	191	739	58,6
DWU M5-48-4	404	42,3	4	252	922	51,0
DWU M5-48-5	504	52,9	5	253	921	63,6
DWU M5-48-6	600	63,3	6	254	921	76,2
DWU M5-60-4	536	48,0	4	293	813	78,9
DWU M5-60-5	668	59,9	5	294	813	98,6
DWU M5-60-6	801	71,7	6	295	813	116,8
PAV 2240	404	42,3	4	252	921	51,0
PAV 2250	504	52,8	5	253	921	63,6
PAV 2260	600	63,3	6	254	921	76,2
PAV 2440	537	48,0	4	293	813	79,0
PAV 2450	669	59,9	5	294	813	98,6
PAV 2460	801	71,8	6	295	813	118,1
PAV 2760	803	75,1	6	295	804	120,6
PAV 2770	934	87,5	7	296	804	140,3
PAV 2780	1063	99,8	8	297	804	160,0
DWZ 145/6	755	68,9	6	270	655	102,3
DWZ 145/7	875	80,1	7	271	655	118,9
DWZ 145/8	995	91,2	8	272	655	135,4
DWZ 145/9	1110	102,4	9	273	655	151,8
DWZ 135/6	965	74,4	6	312	606	150,9
DWZ 135/7	1120	86,4	7	313	606	175,4
DWZ 135/8	1270	98,5	8	314	606	199,7
DWZ 135/9	1420	110,5	9	315	606	223,7

Tabel 1.14 (vervolg)

profieltype	weerstands-moment [mm^3]	massa per m^2 [kg]	wanddikte van de planken [mm]	samen-gestelde wandhoogte [mm]	werkende breedte per plank [mm]	traagheids-moment [mm^4]
	$\times 10^3$					$\times 10^6$
DWZ 125/6	1190	81,7	6	346	552	206,0
DWZ 125/7	1380	94,9	7	347	552	239,4
DWZ 125/8	1565	108,1	8	348	552	272,6
DWZ 125/9	1750	121,4	9	349	552	305,5
DWZ 245/6	965	66,8	6	351	807	170,1
DWZ 245/7	1120	77,6	7	352	807	197,7
DWZ 245/8	1275	88,5	8	353	807	225,2
DWZ 245/9	1425	99,4	9	354	807	252,5
DWZ 235/6	1230	72,5	6	407	744	250,7
DWZ 235/7	1430	84,2	7	408	744	291,6
DWZ 235/8	1625	96,0	8	409	744	332,1
DWZ 235/9	1815	107,8	9	410	744	372,3
DWZ 225/6	1520	80,2	6	451	672	343,3
DWZ 225/7	1765	93,3	7	452	672	399,3
DWZ 225/8	2010	106,3	8	453	672	454,7
DWZ 225/9	2245	119,4	9	454	672	509,8
DWZ 345/5	612	52,0	5	269	725	82,4
DWZ 345/6	730	62,2	6	270	725	98,9
DWZ 345/7	846	72,3	7	271	725	115,3
DWZ 335/5	772	55,8	5	312	676	120,6
DWZ 335/6	922	66,7	6	313	676	144,4
DWZ 335/7	1069	77,8	7	314	676	168,1
DWZ 325/5	940	60,7	5	347	621	163,1
DWZ 325/6	1122	72,6	6	348	621	195,4
DWZ 325/7	1302	84,4	7	349	621	227,5

2 Funderingen

2.1 Algemeen

Normen

NEN 6724 Voorschriften Beton – In de grond gevormde funderingselementen van beton of mortel.
NEN 6740 Geotechniek – Basiseisen en belastingen.
NEN 6741 Geotechniek – Het uitvoeren van houten paalfunderingen.
NEN 6742 Geotechniek – Het uitvoeren van funderingen met geprefabriceerde betonnen palen.
NEN 6743 Geotechniek – Berekeningmethode voor funderingen op palen. Drukpalen.
NEN 6744 Geotechniek – Berekeningsmethode voor funderingen op staal.
NEN 6745 Geotechniek – Uitvoering schroefpalen.
NEN 6746 Geotechniek – Uitvoering funderingen op staal.

In deze normen is uitgebreide informatie opgenomen. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut te* Delft.

Soorten funderingen

Fundering op staal. Hiervan is sprake wanneer de gronddekking (niveauverschil tussen maaiveld en onderkant fundering) ten hoogste 5 × de breedte van het fundament bedraagt. Funderingen op staal kunnen bestaan uit poeren, stroken, platen en putten. In de regel kunnen ook keermuren als fundering op staal worden aangemerkt.
Fundering op palen. Hier worden de belastingen vanuit de bovenbouwslechts plaatselijk, puntvormig, naar de dieper gelegen vaste grondslag overgedragen.

Grenstoestanden

1A Uiterste grenstoestand, waarbij een bezwijkmechanisme optreedt in de grond of op het grensvlak tussen constructie en grond.

1B Uiterste grenstoestand, waarbij zodanige vervormingen in de constructie optreden dat niet meer is voldaan aan de eis van veiligheid.
2 Bruikbaarheidsgrenstoestand waarbij door vervormingen, verlies aan bruikbaarheid, schade, of hoge onderhoudskosten ontstaan.

Tabel 2.1 Materiaalfactoren voor grondeigenschappen[1)]

grondeigenschap	grenstoestand		
	1A	1B	2
volumieke massa	1,1	1,1	1,0
draagvermogen palen (uit sonderingen)	1,25	1,25	1,0
tangent hoek van inwendige wrijving (tan φ)	1,15	1,15	1,0
cohesie:			
– draagvermogen	1,6	1,6	1,0
– stabiliteit/gronddruk	1,5	1,5	1,0
samendrukkingsconstante	1,3	1,3	1,0
elasticiteitsmodules	1,3	1,3	1,0

[1)] Wanneer een verhoging van de waarde van de betreffende parameter tot een ongunstiger resultaat leidt: materiaalfactor= 1,0.

Materiaalfactoren

Tabel 2.1 geeft de te hanteren *materiaalfactoren* voor grondeigenschappen bij verschillende grenstoestanden. Getoetst moet worden of voldaan is aan de volgende vergelijkingen.

Grenstoestand 1A:

$$\gamma_f \cdot F_{s,rep} \leqslant F_{r,d}$$

waarin:
γ_f = belastingfactor
$F_{s,rep}$ = representatieve kracht t.g.v. de belasting
$F_{r,d}$ = rekenkracht van de weerstand

Grenstoestand 1B en 2:

$$w_d \leqslant w_{req}$$

waarin:
w_d = rekenwaarde van de verplaatsing
w_{req} = maximale zakking; door de constructeur vast te stellen

Voorts moet worden voldaan aan eisen m.b.t. de maximale rotatie aan de bovenkant van de funderingselementen. Over het algemeen:

1B : 1 : 100
2 : 1 : 300

Classificatie geotechnische constructies
Geotechnische constructies worden geclassificeerd aan de hand van de eisen die worden gesteld aan onder meer het geotechnisch onderzoek, het ontwerp en de uitvoeringscontrole. Deze classificatie vindt plaats op basis van de eigen constructie, de naburige constructies en de aard van de belasting. Men onderscheidt Geotechnische Categorie 1,2 of 3.

G.C. 1 voor:
– lichte bebouwing;
– grondkerende wanden met kleine grondkering;
– beperkte ophogingen en ontgravingen.
G.C. 3 voor grote en bijzondere constructies, zoals:
– diepe parkeerkelders;
– vliegvelden;
– hoge torens, windmolens, schoorstenen.
G.C. 2: overige constructies.

2.2 *Fundering op staal*

Berekening draagvermogen
Het *draagvermogen* van een fundering op *staal* is afhankelijk van:
– bodemeigenschappen (hoek van inwendige wrijving φ, volumiek gewicht γ en cohesie c);
– afmentingen fundament;
– gronddekking d;
– grondwaterstand;
– eventuele bovenbelasting.

Voor de rekenwaarde van de funderingsdruk geldt (zie ook opmerkingen hierna):

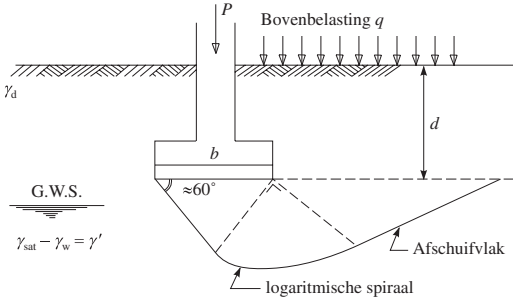
$$\sigma_{\max,\mathrm{d}} = c_\mathrm{d} \cdot N_\mathrm{c} + \sigma'_{\mathrm{v,d}} \cdot N_\mathrm{q} + 0,5 \cdot \gamma'_\mathrm{d} \cdot b \cdot N_\gamma$$

waarin:

$\sigma_{\max.\mathrm{d}}$ = rekenwaarde funderingsdruk [kN/m^2]
c_d = rekenwaarde cohesie [kN/m^2]
$\sigma'_{\mathrm{v,d}}$ = rekenwaarde verticale korrelspanning op aanlegniveau [kN/m^2]
γ'_d = rekenwaarde effectief volumiek gewicht van de grond onder aanlegniveau [kN/m^3]
b = effectieve breedte fundament [m]
$N_\mathrm{c}, N_\mathrm{q}, N_\gamma$ = draagkrachtfactoren [–], afhankelijk van φ_d (zie tabel 2.2)
φ_d = rekenwaarde hoek van inwendige wrijving

Toepassing formule voor rekenwaarde funderingsdruk:

- De formule is geldig voor een gedraineerde stituatie (geen wateroverspanning).
- Bij een gelaagde grondslag moeten voor de parameters c, γ en φ gewogen, gemiddelde waarden worden ingevoerd; voor de invloedsdiepte kan 1,5 × b worden aangehouden.
- Indien geen doorgaande stroken, maar poeren worden toegepast, moeten *vormfactoren* in rekening worden gebracht, respectievelijk s_c, s_q en s_γ. Zie tabel 2.3.
- Bij excentrische belastingen dient de breedte b zodanig te worden gereduceerd dat de verticale belastingcomponent het midden van b' vormt. Een momentbelasting moet eveneens als een excentrisch aangrijpende verticale belasting in rekening worden gebracht.
- Bij horizontale belastingen moeten de zogenaamde *hellingfactoren* i_c, i_q en i_γ worden toegepast. Zie tabel 2.4.
- In het geval van een hellend maaiveld: extra reductiefactor (zie norm NEN 6744).



Figuur 2.1 Funderingsstrook

Tabel 2.2 Draagkrachtfactoren N_c, N_q en N_γ

ϕ'_d [graden]	N_c	N_q	N_γ
0	5,0	1,0	0
5	6,5	1,5	0
10	8,5	2,5	1
15	11,0	4,0	2,0
20	15,0	6,5	4,0
22,5	17,5	8,0	6,0
25	20,5	10,5	9,0
26	22,0	12,0	10,5
27	24,0	13,0	12,5
28	26,0	15,0	14,5
29	28,0	16,5	17,0
30	30,0	18,0	20,0
32,5	37,0	25,0	30,0
35	46,0	33,0	46,0

Tabel 2.3 Indicatie vormfactoren s_c, s_q en s_γ

poer	s_c	s_q	s_γ
vierkante poer	1,50	1,45	0,70
rechthoekige poer ($L = 2b$)	1,25	1,25	0,85

Tabel 2.4 Indicatie hellingfactoren i_c, i_q en i_γ

$(F_{s,h,d}/F_{s,v,d}) \times 100\%$ [1)]	i_c	i_q	i_γ
2%	0,95	0,95	0,95
5%	0,90	0,90	0,85
10%	0,80	0,80	0,75
20%	0,60	0,60	0,50

[1)] $F_{s,h,d}$ en $F_{s,v,d}$: rekenwaarde van respectievelijk de horizontale en de verticale belastingcomponent.

Zettingen

Met name bij een *zettinsgevoelige* grondslag kan de grenstoestand met betrekking tot vervormingen maatgevend zijn (grenstoestand 1B,2). De zettingen onder de fundering kunnen worden berekend met de zettingsformules volgens par.1 *Grondmechanica*. Hier zijn alleen de *korrel* spanningensverhogingen onder de funderingsstrook van belang. De extra aangebrachte belasting mag in verband met de drukverdeling,onder de funderingsstrook met een helling van 2:1 (vert.:hor.) worden gespreid. De diepte volgt uit de praktische invloedsbegrenzing van de zettingsgevoelige laag tot dàt punt waar de korrelspanningsverhogingen nog maar 10% zijn van de oorpronkelijke waarde.

Aanlegniveau

In verband met de indringing van vorst in de grond en de mogelijke werkzaamheden aan kabels en leidingen, moet voor de fundering van buitenwanden een *aanlegdiepte* worden aangehouden van 0,8 m.

2.3 Fundering op palen

Maximale draagkracht van palen

Rekenwaarde maximale *grondmechanische draagkracht:*

$$F_{r,\max,d}\ \frac{\xi \cdot (F_{r,\max,\text{punt}} + F_{r,\max,\text{schacht}})}{\gamma_b}$$

waarin:

$F_{r,max,d}$ = rekenwaarde maximale grondmechanische draagkracht van een paal [kN] (grenstoestand 1A)

$F_{r,max,punt}$ = maximale draagkracht paalpunt [kN]

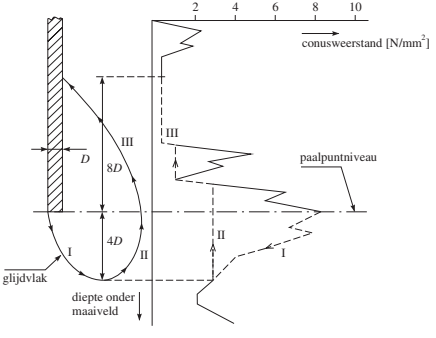
$F_{r,max,schacht}$ = maximale schachtwrijvingskracht [kN]

γ_b = materiaalfactor (= 2,25 bij berekening op basis van sonderingen [–])

ξ = reductiefactor, afhankelijk van het aantal palen en sonderingen ter plaatste van een constructiedeel alsmede van de stijfheid van het betreffende deel; deze ligt tussen 0,75 (weinig palen en sonderingen, constructie relatief slap) en 0,90 (relatief veel palen en sonderingen,stijve constructie) [–]

Draagkracht paalpunt

Op basis van proefbelastingen is de in Nederland gangbare *4D/8D-methode* ontwikkeld om de *draagkracht* van *palen* te berekenen aan de hand van sondeergrafieken. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat zich rondom de paalpunt bij bezwijken schuifvlakken ontwikkelen tot maximaal $4 \times D$ onder de paalpunt en $8 \times D$ boven de punt. D is de equivalente paalmiddellijn; bij vierkante palen geldt: $D = 1{,}13 \times$ schachtafmeting. In het schuifvlak worden de trajecten I, II en III onderscheiden (zie figuur 2.2).



Figuur 2.2 Berekening draagkracht paalpunt (4D/8D-methode)

Maximale draagkracht paalpunt:

$$F_{r,\max,\text{punt}} = \tfrac{1}{2} \cdot \alpha_p \cdot \left(\frac{q_{c,I} + q_{c,II}}{2} + q_{c,III} \right) \cdot A_{\text{punt}}$$

waarin:

$q_{c,I}$ = gemiddelde van de conusweerstanden over traject I, dat loopt vanaf het paalpuntniveau tot 0,7 D à 4D dieper; de diepte van dit traject zodanig kiezen dat de laagste waarde voor de draagkracht wordt verkregen [kN/m^2]

$q_{c,II}$ = gemiddelde van de conusweerstanden over traject II, beginnend bij de onderkant van I,waarbij de in rekening te brengen waarde voor q_c niet hoger mag zijn dan de eronder liggende waarde [kN/m^2]

$q_{c,III}$ = gemiddelde van de conusweerstanden van traject III, beginnend met de laagste waarde van II en doorlopend tot 8D boven de punt,waarbij de in rekening te brengen waarde voor q_c niet hoger mag zijn dan de eronder liggende waarde [kN/m^2]

A_{punt} = oppervlakte van de paalpunt [m^2]

α_p = paalklassefactor (zie tabel 2.5)[–]

Opmerkingen:

- Wanneer de middellijn van de paalvoet veel groter is dan die van de schacht moet in de regel een reductiefactor worden ingevoerd (zie norm NEN 6743).
- Paalpuntspanning limiteren tot 15 000 kN/m^2.

Tabel 2.5 Paalklassefactoren (zand)

paalklasse/type	α_p	α_s	α_t
grondverdringend, geheid:			
– geprefabriceerde betonpalen	1,0	0,010	0,007
– houten palen	1,0	0,012	0
– in de grond gevormde palen	1,0	0,012–0,014	0,010–0,012
grondverdringend, geschroefd			
– in de grond gevormde palen	0,9	0,012–0,014	0,009
grondverwijderend:			
– avegaarpalen[1)]	0,8	0,006	0,0045
– boorpalen	0,5	0,006	0,0045
– pulspalen	0,5	0,005	–

[1)] $q_{c,III} \leqslant 2000$ kN/m^2

Schachtwrijvingskracht

Rekenwaarde voor de maximale schachtwrijvingskracht:

$$F_{r,\max,\text{schacht}} = \alpha_s \cdot q_c \cdot O \cdot \Delta l$$

waarin:

α_s = paalklassefactor (zie tabel 2.5) [–]
q_c = conusweerstand, gelimiteerd tot 15 000 kN/m^2, bij dunne lagen tot 12 000 kN/m^2
O = omtrek paalschacht [m^1]
Δl = deel paalschacht (vanaf paalpunt) dat zich in het zand bevindt [m^1]

Opmerkingen:

- Bij grind en zeer grof zand moet op de berekende schachtwrijvingskracht een reductiefactor van respectievelijk 0,50 en 0,75 worden toegepast.
- Bij kleefpalen, zie tabel 2.6.

Tabel 2.6 Maximale waarden α_s bij klei, silt en veen

grondsoort	conusweerstand	relatieve diepte z/D[1)]	α_s
klei/silt	$\leq$ 1 MPa	$5 < z/D < 20$	0,025
klei/silt	$\leq$ 1 MPa	$z/D \geq 20$	0,055
klei/silt	$>$ 1 MPa	n.v.t.	0,035
veen		n.v.t.	0

z = beschouwde diepte
D = diameter paalschacht

Negatieve kleef

Negatieve kleef veroorzaakt een neerwaartse belasting op een paal. Deze kan ontstaan wanneer de grond rond een paal nog aan zettingen onderhevig is als gevolg van terreinophogingen of grondwaterstandsverlagingen. De maximale negatieve kleef wordt bereikt bij een maaiveldzakking groter dan 0,1 m. De maximale negatieve kleef voor een alleenstaande paal kan als volgt worden berekend (*slipmethode*):

$$F_{s,\text{neg. kl.}} = O \cdot h \cdot K_o \cdot \tan\delta \cdot \sigma'_v$$

waarin:

O = paalomstrek [m^1]

h = hoogte samendrukbare laag en de eventuele laag erboven (zakkende lagen) [m]
K_0 = neutrale gronddrukcoëffciënt = $1 - \sin \varphi$ [–]
δ = wruvingshoek tussen de paalschacht en de grond
beton: $\delta = 0{,}75\ \varphi$
staal: $\delta = 0{,}5\ \varphi$
hout: $\delta = 0{,}5\ \varphi$
σ'_v = gemiddelde effectieve verticale gronddruk in de beschouwde laag [kN/m^2]

Tabel 2.7 geeft de in rekening te brengen partiële belastingsfactoren.

Tabel 2.7 Belastingsfactoren negatieve kleef

grenstoestand	belastingsfactor
1A	0
1B	1,4[1)]
2	1,0

[1)] Indien er in de berekening van wordt uitgegaan dat de grond over de volledige hoogte van de paal boven de funderingszandlaag langs de paal slipt, mag voor grenstoestand 1B eveneens een belastingsfactor van 1,0 worden aangehouden.

Op trek belaste palen

Volgens richtlijnen AR-publicatie 98-9 "Ontwerpregels voor trekpalen":

$$F_{r;trek;max} = q_{c;2} \cdot f_1 f_2 \cdot \alpha_t \cdot O \cdot L$$

$F_{r;trek;max}$ = maximale houdkracht van een paal in een groep
q_c = conuswaarde sondering
f_1 = effect installatie
f_2 = effect van de trekbelasting
α_t = paalklassefactor voortrek; zie tabel 2.5
O = gemiddelde paalomtrek
L = lengte waarover schachtwrijving wordt berekend

Paalafmetingen

Tabel 2.8 geeft de gestandaardiseerde *paalafmeting* en leverbare lengten voor voorgespannen geprefabriceerde betonpalen. Palen met alleen zachtstaalwapening worden in de regel alleen op speciale aanvraag geleverd.

Tabel 2.8 Gestandaardiseerde paalafmeting en leverbare lengten voor voorgespannen geprefabriceerde betonpalen

afmetingen [mm]	maximale lengte[1)] [m]
180 × 180	16,0
220 × 220	19,0–20,0
250 × 250	22,0–23,0
290 × 290	24,0–26,0
320 × 320	26,0–28,5
350 × 350	28,0–30,0
380 × 380	29,0–32,0
400 × 400	29,0–33,0
420 × 420	30,0–34,0
450 × 450	31,0–36,0
500 × 500	33,0–36,0
380 × 450[2)]	29,0–36,0
450 × 500	31,0–36,0
450 × 550	31,0
500 × 550	33,0–36,0
500 × 600	33,0–36,0

[1)] Leverbare lengten verschillende per fabrikant.
[2)] Rechthoekige palen worden niet standaard door elke fabrikant geleverd.

*Tabel 2.9 Overzicht gegevens **diesel**heiblokken*

fabrikaat	en type	energie per min.	slag [N · m] max.[1)]	slaggewicht zuiger [kN]
Delmag	D5[2)]		12 500	5
Delmag	D6-32	8 700	14 500	6
Robot	R500		16 000	5
ICE	180		17 360	7,8
Hera	800		22 000	8
Delmag	D8-22	13 000	24 000	8
Robot	R800		25 600	8
Delmag	D12[2)]		31 200	12
Hera	1250		34 375	12,5
Hera	H30[2)]		35 000	12,5
Delmag	D15[2)]		37 500	15
Kobe	K13		37 700	13
Hera	1500		41 250	15
Delmag	D12-32	21 230	42 460	12
ICE	422		42 500	18
Hera	1900		51 400	19
Delmag	D16-32	25 585	53 370	16
Delmag	D19-32	28 800	57 585	19
ICE	520		60 820	23
Delmag	D22[2)]		67 000	22
Hera	2500		68 750	25
Kobe	K25		72 500	25
ICE	640		76 520	27,3
Hera	2800		77 000	28
Delmag	D25-32	39 975	78 970	25
Delmag	D30-32	47 970	94 765	30
Hera	3500		96 250	35
Kobe	K35		101 500	35
Delmag	D36-32	55 450	113 720	36
Hera	55[2)]		125 000	45
Kobe	K45		130 450	45
Hera	5000		137 500	50
Kobe	KB45		138 450	45
ICE	1070		144 010	45,4
Delmag	D46-32	70 850	145 305	46
Hera	5700		156 750	57
Hera	6200[2)]		170 500	62

Tabel 2.9 (vervolg)

fabrikaat	en type	energie per min.	slag [N · m] max.[1)]	slaggewicht zuiger [kN]
Kobe	KB60		174 000	60
Hera	7500		206 250	75
Delmag	D62-22	107 050	218 960	62
Kobe	KB80		232 000	80
Hera	8800		242 000	88
Delmag	D80-23	171 085	266 830	80

[1)] Dit is de afgegeven energie bij 100% rendement; in de praktijk veelal 60 à 80%haalbaar.
[2)] Bloktype wordt niet meer geproduceerd.

*Tabel 2.10 Overzicht gegevens **hydraulische** heiblokken*

fabrikaat	type	max. slagenergie [kNm]	slaggewicht zuiger [kN]
BSP	HH3	36	30
	LD5	60	50
	LD6	71	60
	HH8	96	80
	HH11	130	110
	HH14	170	140
	HH20	240	200
	HA30	360	300
	HA40	480	400
HYDRAQUIP	HQ0,25	1,5	2,5
	HQ0,50	3	5
	HQ0,80	4,8	8
	HQ1,0	6	10
	HQ1,5	18	15
	HQ2	24	20
	HQ2,5	30	25
	HQ3	36	30
	HQ4	48	40
	HQ5	60	50
	HQ7	84	70
	HQ9	108	90
	HQ10	120	100
	HQ12	144	120
	HQ15	180	150

Tabel 2.10 (vervolg)

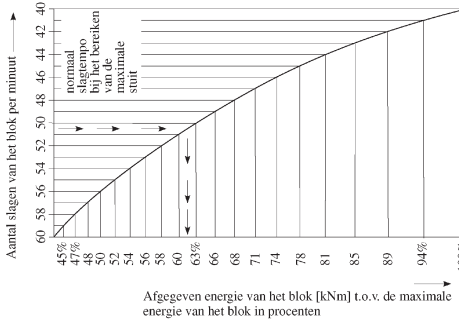
fabrikaat	type	max. slagenergie [k Nm]	slaggewicht zuiger [kN]
HYDRORAM	B 2500	33	27
	B 3000	40	33
	B 4000	52	43
	B 4500	59	48
	B 5000	65	53
	B 7000	88	73
	B 10000	130	106
JUNTTAN	HH2	10	20
	HH3	30	30
	HH4	40	40
	HHK-4	48	40
	HH5	50	50
	HHK-5	60	50
	HH6	60	60
	HH8	64	80
	HHK-6	72	60
	HH10	80	100
	HHK-7	84	70
	HHK-10	120	100
	HHK-14	168	140
IHC	S-35	35	30
HYDROHAMMER	S-60	60	60
	S-70	70	35
	S-90	90	45
	S-120	120	60
	S-200	200	100
	S-280	280	135
	S-400	400	200
	S-500	500	250
	S-1800	1800	750
	S-2300	2300	1150
	SC-30	30	17
	SC-50	50	33
	SC-75	75	57
	SC-110	110	79
	SC-150	150	110
	SC-200	200	136

Tabel 2.10 (vervolg)

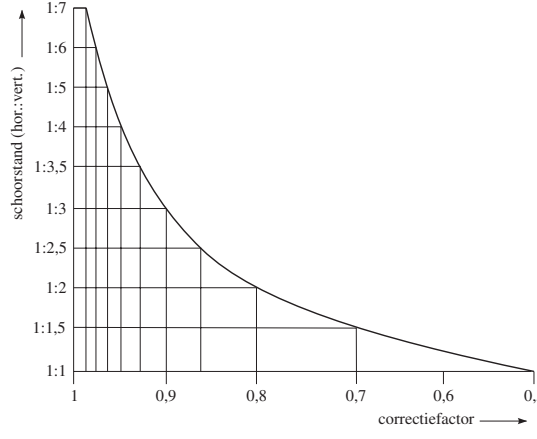
fabrikaat	type	max. slagenergie [k Nm]	slaggewicht zuiger [kN]
MENCK	MHF 3-4	40	40
	MHF 3-5	50	50
	MHF 3-7	70	70
	MHF 5-8	80	80
	MHF 5-10	100	100
	MHF 5-12	120	120
	MHF 10-15	150	150
	MHF 10-20	200	200
PVE-PILEMER	DKH 3L	36	30
	DKH 4L	48	40
	DKH 5L	60	50
	DKH 7L	84	70
	DKH 10L	120	100
	DKH 13L	156	130
	DKH 16L	192	160
	DKH 20L	240	200

Uitvoering

Tabel 2.9 en 2.10 geven gegevens van respectievelijk diesel- en hydraulische heiblokken. Perslucht heiblokken (Demag, Brons en Menck) vinden in de praktijk weinig toepassing.
Tijdens het heie van een paal wordt het aantal benodigde slagen van het heiblok per 0,25 m indringing in de bodem geteld (*kalenderen*). Door deze waarden uit te zetten tegen de diepte wordt een slagdiagram verkregen. Dit slagdiagram moet worden gecorreleerd aan de sondeergrafiek van een dichtbij gemaakte sondering. Omdat er een zekere relatie bestaat tusse de door het heiblok afgegeven energie en het paaldraagvermogen, kan met de kalenderwaarde een indicatie worden verkrege van de bereikte draagkracht van de palen, die zich tussen de sondeerlokaties bevinden.
De energie-afgifte wordt in grote mate bepaald door het aantal slagen van het heiblok per minuut, zie figuur 2.3.
Heipalen kunnen worden aangebracht onder een schoorstand van maximaal 1:1, afhankelijk van het type heiblok, de toegepaste heistelling en de heirichting (‘voorover’ of ‘achterover’). Als gevolg van een schoorstand moet rekening worden gehouden met minder energie-afgifte van het heiblok aan de paal. Voor met name



Figuur 2.3 Afgegeven energie van een dieselheiblok in relatie tot het aantal slagen per minuut



Figuur 2.4 Correctiefactoren m.b.t. afgegeven energie heiblokken bij schoorstand

dieselblokken kunnen de correctiefactoren worden aangehouden volgens Tabel 2.4.

3 Grondwerken

3.1 Gegevens diverse grondsoorten

Tabel 3.1 Globale volumegewichten in ontgraven toestand [kN/m^3][1)]

grondsoort	los in vervoermiddel	ingeklonken	sterk verdicht
duinzand	12,5	14,5	16
rivierzand	14	16	17,5
klei en leem	11,5	14	17

[1)] In natuurlijke toestand zie par. 8, tabel 8.8

Tabel 3.2 Uitlevering grond (gemiddelde waarden)

grondsoort	van	naar ongeroerd	naar geroerd	naar verdicht
klei en leem	ongeroerd	1,00	1,20	0,95
	geroerd	0,83	1,00	0,79
	verdicht	1,05	1,26	1,00
gemengde grond	ongeroerd	1,00	1,15	0,90
	geroerd	0,87	1,00	0,78
	verdicht	1,11	1,28	1,00
zand	ongeroerd	1,00	1,10	0,93
	geroerd	0,91	1,00	0,85
	verdicht	1,08	1,18	1,00

Inklinken

Overhoogte i.v.m. inklinken ophoging:

- Veengrond – 1/3 à 1/4
- Kleigrond – 1/6 à 1/8
- Zand – 1/10

} van de hoogte van de ophoging

Bij verdichting ophoging 25 à 50% minder; zand 50 à 75% minder.

3.2 Ontgraving en vervoer

Dragline

Vuistregel voor verzet:

aantal m^3 per dag = inhoud bak [liter] (in profiel gemeten)

Hydraulische graafmachine (dieplepel)

Verzet: 750-liter-bak globaal 1000 m^3 per dag (in profiel gemeten).

Tabel 3.3 Gemiddelde productie slootgraven van profiel-vleugelbak 7001 (in profiel gemeten) [m^3/uur]

slootgraven inh. [m^3/m′]	overslaan op kant		
	zonder schotten	met schotten	laden op auto's
1	63	46	55
2	74	61	65
4	83	74	72

Bulldozer

Tabel 3.4 Gemiddeld bruto grondverzet bulldozer (in profiel gemeten) [m^3/uur]

transportafstand [m]	motorvermogen [kW]		
	50	100	150
20	57	152	
40	39	102	165
60	29	77	125
100	19	51	83

Dumper

Tabel 3.5 Grondtransport zelfrijdende dumper (bij graven waterloop; inhoud dumper 10 m^3; *H.G.M.* 750l*)*

transport-afstand [m]	grond-transport [m^3/uur]	transport-afstand [m]	grond-transport [m^3/uur]
100	52	1000	23
300	41	2000	15
500	34		

Bron: *Cultuurtechnisch vademecum.*

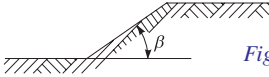
Tabel 3.6 Vul- of stortmassa's

product	massa [kg/m^3]
aardappelen in silo's of gorren	650– 700
aardappelmeel in silo's	700
aarde: nat	1600–1800
droog	tot 2100
as, verbrandingsas van brandstof	600– 900
bauxiet	2550
beendermeel	700–1100
beetwortelen op gorren	ca. 820
cement	1200–2000
chilisalpeter	1000–1250
hout, in blokken	
beuken	400
eiken	420
vuren	320
spaanders	ca. 200
houtwol	50
kalk, gebrand	775–1000
als kalkbrei	1150–2000
als stof	500
kalksteen op gorren	1550–2000
kiezel	1350–2000
koks	350– 600
meel van granen	400– 500
mergel	2300–2600
pijpaarde (kaolien) droog	1800–2000
pyriet	2300–2600
sneeuw, vers gevallen	80– 190
nat	200– 800
steenkool	720– 850
suiker in silo's e.d.	850– 900
superfosfaat	1000–1200
steenzout, ruw mineraal	1220–1350
thomasmeel	1900–2000
zand, droog	1600
zwavel	1930–2070

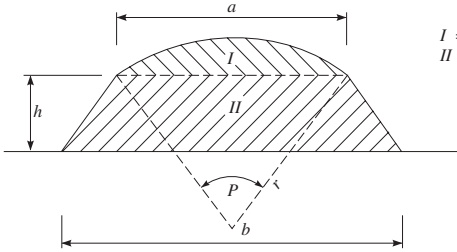
3.3 Enkele berekeningen

Oppervlakte dwarsprofielen

$$A_{\mathrm{I}} + A_{\mathrm{II}} = \left[\frac{p}{360}\pi r^2 - \tfrac{1}{2}a\sqrt{r^2 - (\tfrac{1}{2}a)^2}\right] + \frac{a+b}{2}\cdot h$$

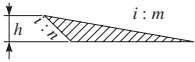


Figuur 3.1 Ingraving



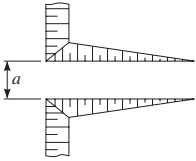
Figuur 3.2 Ophoging

Inhoud oprit



$$V = \frac{h^2}{6}\left[3a + 2h\cdot p\left(1 - \frac{n}{m}\right)\right]\cdot(m-n)$$

Wanneer de oprit tegen een verticale wand steunt, geldt:



$$V = \frac{h^2}{6}(3a + 2h\cdot p)\cdot m$$

Figuur 3.3 Oprit (helling tallud 1 : p)

Scheepsmaten

- Volumegewicht van zeewater = 1,026 (A.V.).
- 1 scheepston (S.T.) is als inhoudsmaat 1 m^3.
- 1 registerton = 2,83 m^3.

4 Bemaling van ontgravingen

4.1 Algemeen

Symbolen en eenheden

A = equivalente straal bouwput [m]
c = hydraulische weerstand slechtdoorlatende laag [etmaal]
D = dikte watervoerend pakket met (semi-) spanningswater [m]
d_x = korreldiameter bij x% zeefdoorgang [mm]
F = lengte filter [m]
H = natuurlijke freatische grondwaterstand t.o.v. ondoorlaten-de basis [m]
h_r = freatische grondwaterstand t.o.v. ondoorlatende basis op afstand r van pompput [m]
i = verhang, gradiët drukhoogte [–]
k = doorlatendheidscoëfficiënt [m/etmaal]
kD = doorlatvermogen watervoerend pakket [m^2/etmaal]
n = effectieve porositeit [–]
n_1 = aantal bronnen ($n_1 = Q/q$)
Q = totaal debiet bemaling [m^3/etmaal]
q = debiet per bron [m^3/etmaal]
R = reikwijdte bemaling in freatisch watervoerend pakket [m]
r_0 = straal pompput [m]
U_o = ongelijkvormigheidsfactor = d_{60}/d_{10} [–]
v = filtersnelheid of specifiek debiet [m/etmaal]
v_w = werkelijke snelheid waterdeeltje [m/etmaal]
W = opwaartse waterdruk aan onderzijde slechtdoorlatende laag [kN/m^2]
φ_A = vereiste verlaging grondwaterstand/-stijghoogte in bouw-put of sleuf
φ_r = verlaging grondwaterstand/-stijghoogte op afstand r van pompput
j = (nat) volumiek gewicht grondlaag [kN/m^3]
λ = kwellengte, lekfactor of karakteristieke lengte watervoerend pakket met semi-spanningswater; $\lambda = \sqrt{kD \cdot c}$ [m]

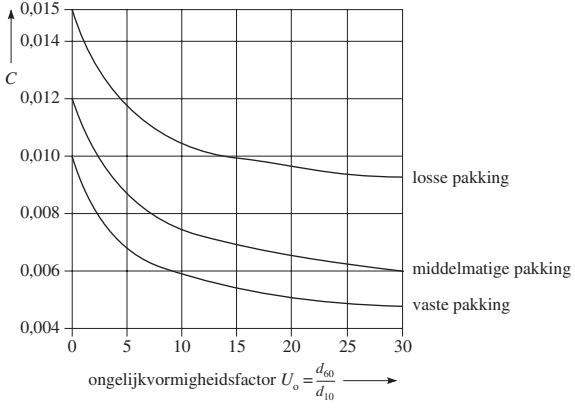
Doorlatendheidscoëfficiënt k

Darcy: $v = k \cdot i$
$v_w = v/n$

Tabel 4.1 Waarden van k

grondsoort	k [m/etmaal]	k [m/s]
grind	> 1000	$> 1 \cdot 10^{-2}$
grof zand met fijn grind	1000–100	10^{-2}–10^{-3}
grof zand	100–10	10^{-3}–10^{-4}
fijn zand	10–1	10^{-4}–10^{-5}
zeer fijn zand	1–0,1	10^{-5}–10^{-6}
sterk leemhoudend zand	0,1–0,01	10^{-6}–10^{-7}
zandige klei	0,01–0,0001	10^{-7}–10^{-8}
klei	<0,001	$<10^{-8}$

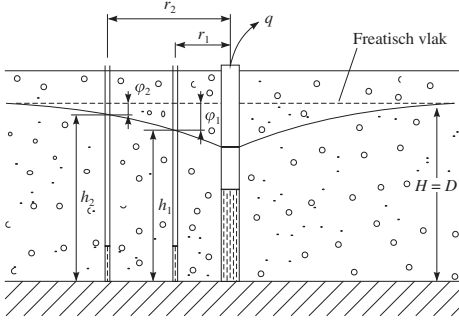
Bepaling k-waarde uit korrelverdelingsdiagram:
- Volgens *Hazen*: $k = 0{,}0116\ d_{10}^2$ [m/s].
- Volgens *Seelheim*: $k = 0{,}00357\ d_{50}^2$ [m/s]
- Volgens *Beyer*: $k = C \times d_{10}^2$ [m/s], waarbij C afhankelijk is van de *ongelijkheidsfactor* U_o en van de pakking van de zandlaag, daarbij $[d_x] = [\text{mm/sec}]$ (volgt uit een sondering). Zie ook figuur 4.1.



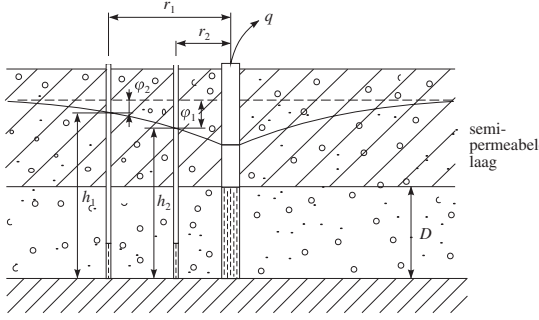
Figuur 4.1 Coëffciënt C volgens Beyer

Geohydrologische schema's

Figuur 4.2a en b geven eenvoudige *geohydrologische schema's* voor Nederlandse omstandigheden. N.B.: in geval van een ondoorlatende afdekkende laag is er sprake van (volkomen-) spanningswater.



Figuur 4.2a Geohydrologisch schema voor watervoerend pakket met freatisch grondwater



Figuur 4.2b Geohydrologisch schema voor watervoerend pakket met semi-spanningswater

Reikwijdte bemaling freatisch pakket

Voor bronnen is empirisch bepaald: $R = 3000\,\varphi_A\sqrt{k}$

Voor langdurige bemalingen: $R = 1{,}5\sqrt{kD \cdot t/n}$

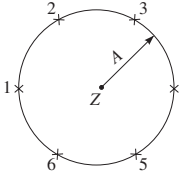
waarin: $t =$ tijdsduur bemaling [etmaal]

Voor drains: $R = 1500$ à $2000\,\varphi_A\sqrt{k}$ (emprisch).

Voor de empirische formules moet k in m/s worden ingevuld.

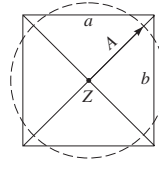
Equivalente straal A bouwput

ronde bouwput



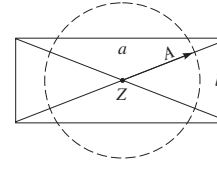
1 t/m 6: bronnen

vierkante bouwput of rechthoekige bouwput met $a \approx b$



$$A = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{a^2}{\pi} + \frac{2a}{\pi}}\right)$$

rechthoekige bouwput $a \gg b$



$$A = \frac{a+b}{\pi}$$

Figuur 4.3 Equivalente straal A van bouwputten

Vereiste verlagingen grondwater in bouwput

Voor een freatisch watervoerend pakket:

- 'Droge voeten': 0,3 m beneden het ontgravingsniveau.
- Bij grondverbetering: 0,5 m beneden het te verdichten ontgravingsniveau.

Voor een pakket met semi-spanningswater: 'opbarstcriterium' aan de onderkant van een slecht-doorlatende laag (NEN 6740).

Voor n grote bouwput: $W < P_2/1{,}05 \quad [\mathrm{kN/m^2}]$

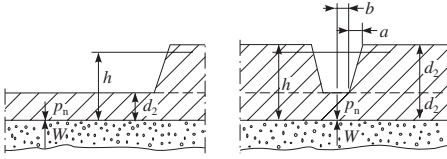
Voor sleuven: $W < P_n/1{,}05 \quad [\mathrm{kN/m^2}]$

waarin:

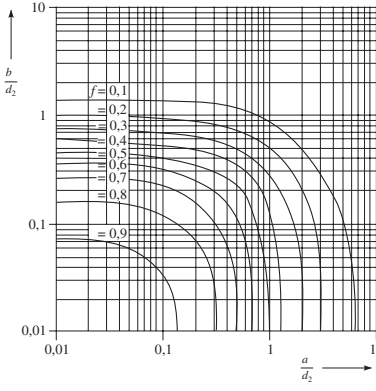
$$\left.\begin{aligned} P_n &= f \cdot P_1 + P_2 \\ P_1 &= \gamma_1 \cdot d_1 \\ P_2 &= \gamma_2 \cdot d_2 \end{aligned}\right\} [\mathrm{kN/m^2}]$$

$$f = \frac{2}{\pi}\left\{\left(1+\frac{b}{a}\right)\cdot \arctan\left(\frac{d_2}{a+b}\right) - \left(\frac{b}{a}\right)\cdot \arctan\left(\frac{d_2}{b}\right)\right\}$$

(zie ook figuur 4.5).



Figuur 4.4 Gevaar voor opbarsten van de bouwputbodem



Figuur 4.5 Coëffciënt voor spreiding van belasting onder een sleuf

De vereiste (maximale) verlaging van de grondwaterstijghoogte φ_A[m] is gelijk aan $(W_0 - W)/10$, waarbij W_0 de natuurlijke (maximale) grondwaterstijghoogte is.

4.2 Berekening debiet bemaling

Freatisch watervoerend pakket; stationair (figuur 4.6)

$$Q = \frac{\pi k(H^2 - h^2)}{\ln R - \ln A} = \frac{\pi k(h_2^2 - h_1^2)}{\ln r_2 - \ln r_1}$$

$$R = 3000\,\varphi_A\sqrt{k} \qquad \text{(zie par. 4.1)}$$

$$q = 2\pi r_0 \cdot F\sqrt{k}/15 \quad \text{(zie par. 4.4)}$$

Watervoerend pakket met semi-spanningswater; stationair
Algemene formule ($\gamma > 3D$):

$$\varphi = \frac{Q}{2\pi kD}\frac{K_0(r/\lambda)}{(r_0/\lambda)\cdot K_1(r_0/\lambda)} \qquad \text{(De Glee)}$$

Voor bouwput:

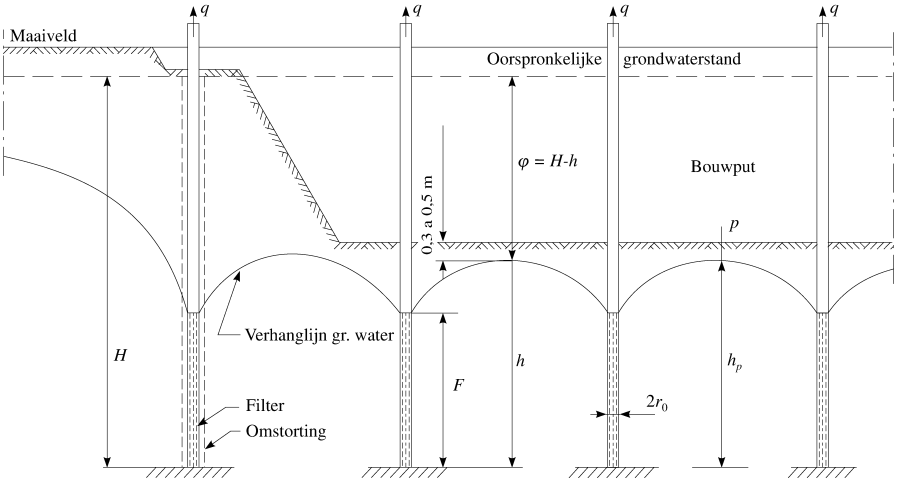
$$\varphi_A = \frac{Q}{2\pi kD}\frac{K_0(A/\lambda)}{(A/\lambda)\cdot K_1(A/\lambda)}$$

Voor $A/\gamma < 0{,}2$ geldt:

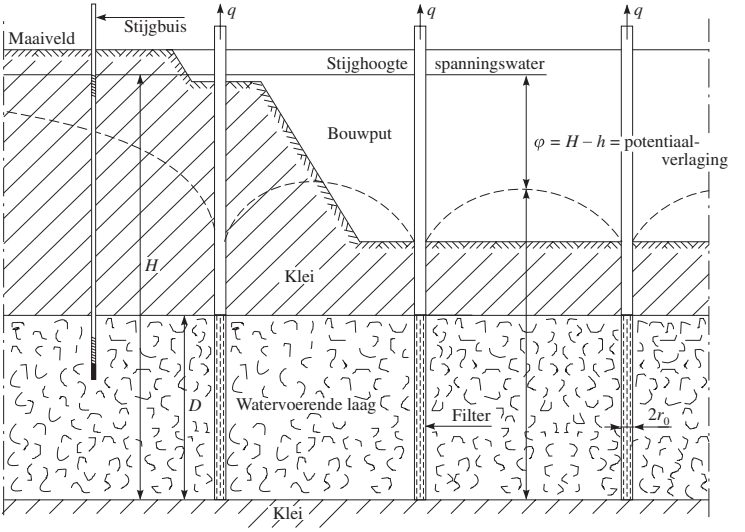
$$\varphi_A = \frac{Q}{2\pi kD}K_0\ (A/\lambda)$$

K_0 en K_1 zijn gemodificeerde Besselfuncties volgens tabel 4.2. Benadering Besselfunctie voor $A/\gamma < 0{,}33$ (fout maximaal 5%):

$$K_0(A/\lambda) = \ln(1{,}123\cdot\lambda/A)$$



Figuur 4.6 Bemaling freatisch watervoerend zandpakket



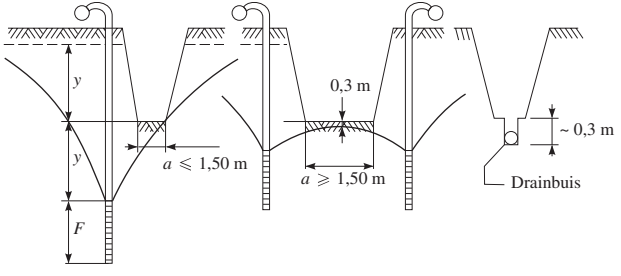
Figuur 4.7 Bemaling watervoerend pakket met semi-spanningswater

Tabel 4.2 Waarde voor K_0 en K_1

x	$K_0(x)$	$K_1(x)$	x	$K_0(x)$	$K_1(x)$	x	$K_0(x)$	$K_1(x)$
0,01	4,72	99,97	0,16	1,97	6,05	1,00	0,42	0,61
0,02	4,03	49,95	0,17	1,91	5,68	1,10	0,36	0,51
0,03	3,62	33,27	0,18	1,85	5,34	1,20	0,32	0,43
0,04	3,34	24,92	0,19	1,80	5,04	1,30	0,28	0,37
0,05	3,11	19,91	0,20	1,75	4,77	1,40	0,24	0,32
0,06	2,93	16,56	0,25	1,54	3,75	1,50	0,21	0,28
0,07	2,78	14,17	0,30	1,37	3,06	1,60	0,19	0,24
0,08	2,65	12,37	0,35	1,23	2,56	1,70	0,17	0,21
0,09	2,53	10,97	0,40	1,11	2,18	1,80	0,15	0,18
0,10	2,43	9,85	0,45	1,01	1,89	1,90	0,13	0,16
0,11	2,33	8,95	0,50	0,92	1,66	2,00	0,11	0,14
0,12	2,25	8,17	0,60	0,77	1,30	2,50	0,06	0,07
0,13	2,17	7,52	0,70	0,66	1,05	3,00	0,03	0,04
0,14	2,10	6,96	0,80	0,56	0,86	3,50	0,02	0,02
0,15	2,03	6,48	0,90	0,49	0,72	4,00	0,01	0,01

Vacuümbemaling

Voor de debietberekening van een *vacuümbemaling* kan de volgende benaderingsformule worden gebruikt (zie ook figuur 4.8):



Figuur 4.8 Sleufbemaling en horizontale bemaling (in de praktijk)

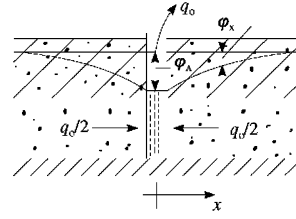
$$Q = \frac{\pi k(H + h_A)}{\ln R - \ln A}(H - h_A + z);\quad z = \frac{p_0 - p}{\gamma_w}$$

waarin:
$p_0 - p$ = onderdruk in filter t.o.v. atmosferische druk [kN/m^3]
γ_w = volumiek gewicht water = 10 kN/m^3

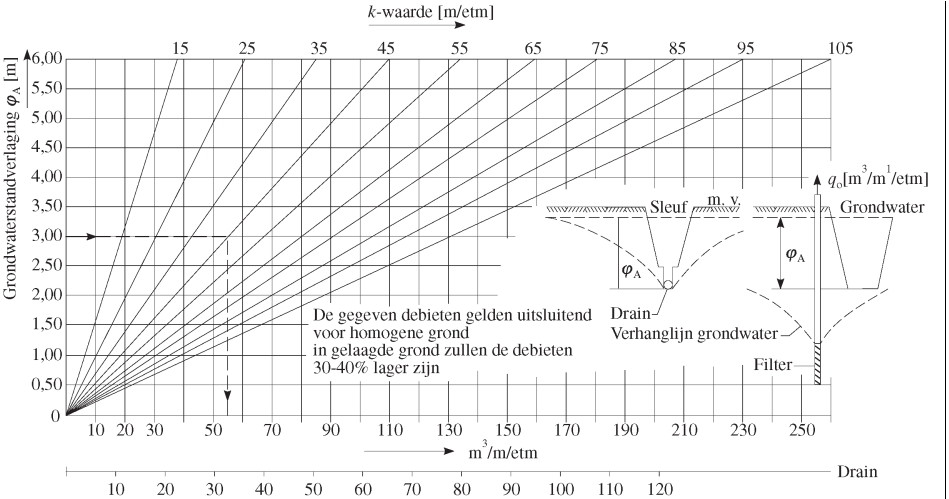
Sleufbemaling en horizontale bemaling

- Debiet voor freatisch watervoerend pakket: zie figuur 4.10 op de pagina hierna.
- Pakket met semi-spanningswater: zie figuur 4.9.

$q_o = 2 \cdot \varphi_A \cdot kD/\lambda$
[m^3/etmaal per m^1]
$\varphi_x = \varphi_A \cdot e^{-x/\lambda}$ [m]
waarin:
φ_A = verciste verlaging
grondwaterstijghoogte in sleuf [m]

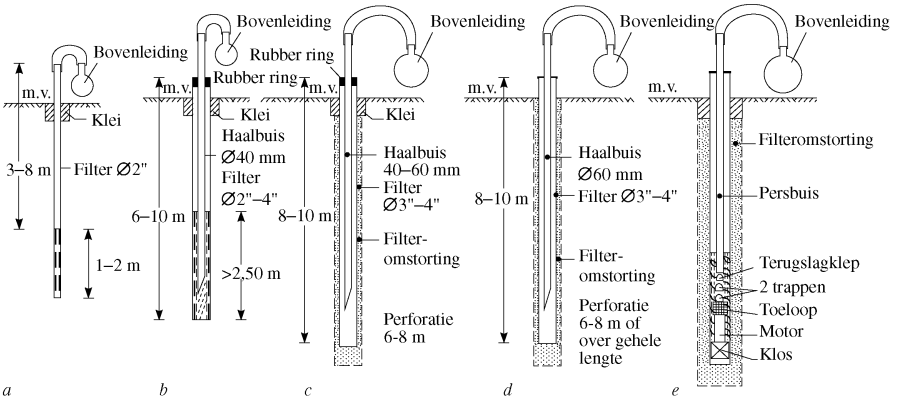


Figuur 4.9 Sleufbemaling van pakket met semi-spanningswater



Figuur 4.10 Het debiet van een sleufbemaling

4.3 Brontypen

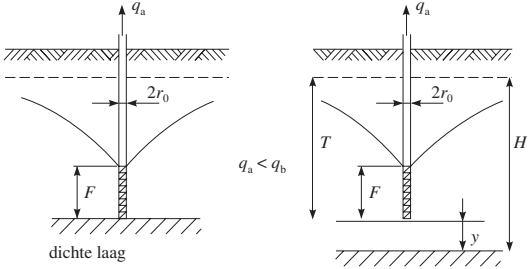


a, *b*, *c*: bij, slechtdoorlatende bodem vacuümbemaling (afdichten met klei)
c : bij gelaagde bodem; grotere bronopbrengst dan *a* en *b* (ca. 2 ×)
d : (zwaartekracht-)bemaling bij gelaagde bodem
e : onderwaterpomp

Figuur 4.11 In Nederland toe gepaste brontypen

4.4 Aanvullende berekeningen

Volkomen bron en onvolkomen bron



a volkomen b onvolkomen

Figuur 4.12 Volkomen en onvolkomen bron

Werkwijze:
- eerst debiet q_a berekenen met volkomen bron;
- daarna toeslag uit tabel 4.3 in rekening brengen (dit is een empirische benadering).

Tabel 4.3 Factor α; $q_b = \alpha \cdot q_a$

T/H	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
q_b	q_a	0,97 q_a	0,94 q_a	0,89 q_a	0,84 q_a	0,78 q_a	0,71 q_a	0,63 q_a

Filtersnelheid

Instroomsnelheid v_i van een bemalingsbron voor $r = r_0$

Bemalingsbron: $v_i = \dfrac{\sqrt{k}}{15}$

Productiebron (koel-en drinkwater): $v_i = \dfrac{\sqrt{k}}{30}$

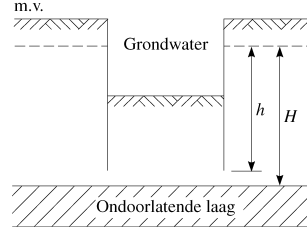
(met v_i en k in m/s)

Debiet per bron: $q = 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot v_i \cdot F$

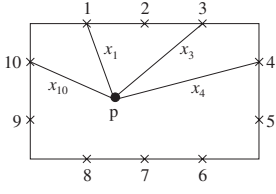
Reductie van het debiet voor bouwkuip

Tabel 4.4 Reductie debiet bij toenemen verhouding h/H

h/H	reductie %	h/H	reductie %
0,1	5	0,6	32
0,2	10	0,7	39
0,3	15	0,8	49
0,4	20	0,9	64
0,5	26	1,0	100



Verhanglijn grondwater in punt p



Figuur 4.13 Verhanglijn

Freatisch water:

$$H^2 - h_p^2 = \frac{Q}{\pi k}\left\{\ln R - \frac{1}{10}\ln(x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdots x_{10})\right\}$$

Semi-spanningswater:

$$\varphi = H - h_p = \frac{q}{2\pi kD}\left\{K_0\left(\frac{x_1}{\lambda}\right) + K_0\left(\frac{x_2}{\lambda}\right) + \ldots K_0\left(\frac{x_{10}}{\lambda}\right)\right\}$$

Snelheid in buizenstelsel

$v = 1,25$ à $1,50$ m/s

Te installeren vermogen bemalingsinstallatie

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{man}}}{1000 \cdot \eta} \text{ [kW]}$$

waarin:
$\rho \cdot g$ = gewicht vloeistof (= 10^4 N/m^3)
Q = debiet [m^3/s]
H_{man} = manometrische opvoerdruk [m]
H_{man} = zuigdruk + persdruk + wrijvingsverlies in leidingenstelsel
η = rendement

Constructie pompputten met onderwaterpomp

Tabel 4.5 Gegevens pompputten met onderwaterpomp [mm]

natuurlijke grondslag d_{10}–d_{90}	filtergrind	sleufperforatie
0,1–0,6	0,7–1,2	0,6
0,2–0,8	1,0–1,5	0,8
0,3–1,3	1,5–2,0	1,0
0,4–2,0	2,0–3,0	1,5
0,5–3,0	3,0–4,0	2,0

Bemalingsvergunningen

Voor het uitvoeren van een bemaling is een *vergunning* nodig wanneer een bepaald debiet en/of een bepaalde tijdsduur van een bemaling wordt overschreden. De hiervoor geldende waarden verschillen per provincie en kunnen bij de provincies worden opgevraagd. Wanneer geen bemalingsvergunning noodzakelijk is,moet het voornemen tot onttrekken van grondwater bij de provincies gemeld worden (meldingsplicht). Bij lozingen op rioleringen is vaak een ontheffing van de gemeente nodig; bij lozingen op oppervlaktewater is vaak een lozingsvergunning vereist.

5 Cultuurtechniek

5.1 Grondsoortenindeling

In *Grondmechanica* werd een indeling gemaakt aan de hand van de korrelgrootte. De grondsoortenindeling van het *Staring-centrum* (voorheen *StiBoka, Stichting voor Bodemkartering* en het *Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding*) heeft ook de korrelgrootte als uitgangspunt.

Op basis van zeefresultaten en slibanalyse kunnen kleigronden en zandgronden nader benoemd worden (afslibfractie < 16 μm). Bij zandgronden is het leemgehalte (in gewichts %) maatgevend. Zie tabel 5.2 en 5.3.

Tabel 5.1 Fractiegrenzen bij korrelgrootte-indeling [μm]

leemfractie		zandfractie					grindfractie
		fijn-zand			grof-zand		
lutum	silt	uiterst fijn zand	zeer fijn zand	matig fijn zand	matig grof zand	zeer grof zand	
0–2	2–50	50–105	105–150	150–210	210–420	420–2000	> 2000

Tabel 5.2 Gegevens van kleigronden

kleigrond	gew.% lutum	globaal % afslibbaar
kleiarm zand	0 – 5	0 – 6,5
kleiig zand	5 – 8	6,5–10
zeer lichte zavel	8 –12	10 –16
matig lichte zavel	12 –17,5	16 –23
zware zavel	17,5–25	23 –33
lichte klei	25 –35	33 –45
zware klei	>35	>45

Tabel 5.3 Gegevens zandgronden (vrijwel geen lutum)

zandgrond	gew.% leem
leemarm zand	0 – 10
zwak lemig zand	10 – 17,5
sterk lemig zand	17,5– 32,5
zeer sterk lemig zand	32,5– 50
zandige leem	50 – 85
siltige leem	85 –100

5.2 Neerslaggegevens en waterbalans

Tabel 5.4 Gemiddelde neerslag in Nederland (1961–1990) [mm][1)]

nr.	gebied	per jaar	winter	lente	zomer	herfst
	Nederland	792	192	167	211	222
1	N. N.-Holland en eilanden	780	192	142	184	262
2	Friesland	806	194	162	214	236
3	Groningen en N. Drenthe	787	186	162	219	220
4	Overig N.-Holland	793	191	154	197	251
5	IJsselmeerpolders	794	181	167	226	220
6	Overijssel en Z. Drenthe	777	189	172	216	200
7	Z.-Holland en W. Utrecht	828	200	166	214	248
8	O. Utrecht en W. Gelderland	835	209	185	223	218
9	O. Gelderland	764	189	174	210	191
10	Z. Gelderland en Z.O. Z.-Holland	789	194	175	208	212
11	Zeeland	767	182	157	204	224
12	W. Brabant	796	191	172	215	219
13	O. Brabant	768	191	176	206	196
14	N. Limburg	729	174	173	207	176
15	Z. Limburg	815	198	195	226	197

[1)] Bron: KNMI. Gegevens gebaseerd op ca. 320 regenstations. Neerslaggegevens over specifieke lokaties zijn te verkrijgen bij de Klimatologische Dienst van het KNMI te De Bilt.

Tabel 5.5 Gemiddelde maandneerslag en verdamping in Nederland (1961–1990) [mm][1)]

maand	neerslag	potentiële verdamping	potentieel neerslagoverschot
jan.	63	8	+ 54
febr.	46	16	+ 30
mrt.	58	33	+ 25
apr.	48	56	− 8
mei	55	85	− 30
jun.	65	92	− 28
jul.	70	94	− 23
aug.	68	82	− 14
sep.	68	52	+ 16
okt.	72	29	+ 43
nov.	79	12	+ 68
dec.	75	7	+ 68

[1)] Gegevens gebaseerd op 5 stations. Bron: KNMI.

Waterbalans voor een gebied met bekende oppervlakte

Een sluitende balans voor een bepaald gebied wordt verkregen door de inkomende hoeveelheid water gelijk te stellen aan de uitgaande hoeveelheid per tijdseenheid:

$$N + K + I = V + G + Q$$

waarin:
N = neerslag
K = kwel
I = wateraanvoer
V = verdamping
G = berging van water (oppervlak + grond)
Q = afvoer uit het gebied (zie tabel 5.6)

In kwelgebieden is de afvoer te verhogen met $2/3$ deel van de maximale kwelhoeveelheid.
De kwel bedraagt in normale randgebieden 0,8–1,2 mm/etmaal.

Tabel 5.6 Afvoergegevens

karakterisering van het gebied	afvoer [$m^3/(etmaal \cdot ha)$]
hooggelegen,goed doorlatende zand-en bosgronden	20– 30
hooggelegen gronden met er tussen in cultuurgronden	40– 55
cultuurgronden in beekgebieden	75– 85
vlakke poldergebieden	100–110
poldergebieden met een diesel gemaal	105–115
poldergebieden met een elektrisch gemaal	120–130
hellende gebieden met industrie erbij	130–210
natuurlijk lozende poldergebieden, waarbij de buiten-waterstanden sterk kunnen wisselen	170–200

Maatgevende afvoer

Voor de diverse soorten gebieden kan de *maatgevende afvoer* Q aan de hand van de afvoeren q [$m^3/(etmaal \cdot ha)$] per deelgebied bepaald worden: $Q = \Sigma q$.

Totaal beschouwde oppervlakte:
$A < 10\ 000$ ha: $q = 29 \cdot a$
$A > 10\ 000$ ha: $q = a \cdot (46–4.25 \log A)$
met A in ha en de coëfficiët a volgens tabel 5.7.

Voor sterk samengestelde gebieden wordt de coëfficiët a bepaald uit de gewogen sommatie van de deelwaarden.

Tabel 5.7 Afvoercoëfficiënt per cultuurgebied

karakterisering van het deelgebied	a
woeste hooggelegen gronden	1,0
bosgronden en beekgebieden zonder cultuurgrond	2,0
beekgebieden met cultuurgrond	3,0
de verschillende poldergebieden	4,0

5.3 Drooglegginsmaten

Tabel 5.8 Ontwerpnormen voor drooglegging van bouwland en grasland [m][1)]

bovengrond[2)]	ondergrond	HW[3)] norm-peil	bouwland		grasland	
			N.W.[4)] norm-peil	optimale drain-diepte[5)]	N.W.[4)] norm-peil	optimale drain-diepte[5)]
moerig	moerig (veen)	0,60	1,05	0,95	0,85	0,75
	leemarm zand	0,50	0,95	0,85	0,85	0,75
	zwak lemig zand	0,50	1,00	0,90	0,85	0,75
	sterk lemig zand/löss	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	lichte zavel	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	zware zavel	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	klei	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
zand/ löss	moerig (veen)	0,60	1,05	0,95	0,85	0,75
	leemarm zand	0,50	0,95	0,85	0,85	0,75
	zwak lemig zand	0,50	1,00	0,90	0,85	0,75
	sterk lemig zand/löss	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	lichte zavel	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	zware zavel	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	klei	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
lichte zavel	moerig (veen)	0,60	1,10	1,00	0,85	0,75
	leemarm zand	0,50	0,90	0,80	0,85	0,75
	zwak lemig zand	0,50	1,15	1,05	0,85	0,75
	sterk lemig zand/löss	0,60	1,20	1,10	0,90	0,80
	lichte zavel	0,60	1,30	1,20	0,90	0,80
	zware zavel	0,60	1,25	1,15	0,90	0,80
	klei	0,60	1,20	1,10	0,90	0,80
zware zavel	moerig (veen)	0,60	1,05	0,95	0,85	0,75
	leemarm zand	0,50	0,90	0,80	0,85	0,75
	zwak lemig zand	0,50	1,00	0,90	0,85	0,75
	sterk lemig zand/löss	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	lichte zavel	0,60	1,20	1,10	0,90	0,80
	zware zavel	0,60	1,15	1,05	0,90	0,80
	klei	0,60	1,15	1,05	0,90	0,80
klei	moerig (veen)	0,60	1,00	0,90	0,85	0,75
	leemarm zand	0,50	0,90	0,80	0,85	0,75
	zwak lemig zand	0,50	1,00	0,90	0,85	0,75
	sterk lemig zand/löss	0,60	1,10	1,00	0,90	0,80
	lichte zavel	0,60	1,20	1,10	0,90	0,80
	zware zavel	0,60	1,25	1,15	0,90	0,80
	klei	0,60	1,30	1,20	0,90	0,80
alle	grof zand	0,50	0,80–1,10	n.v.t	0,70–1,00	n.v.t.

[1)] *Drooglegging*: hoogteverschil tussen waterspiegel in een waterloop en het maaiveldpeil.
[2)] *Bovengrond* is de eerste 35 cm beneden maaiveld.
[3)] *Hoog Water normpeil* (gemiddelde overschrijding 1 dag per jaar)
[4)] *Normaal Water normpeil* (gemiddelde overschrijding 10 à 20 dagen per jaar).
[5)] Drains liggen horizontaal;optimale diepte = sleufbodemdiente

5.4 Beregening

Watervoorziening

- Bouwland en grasland zonder wegzijging 0,35 l/(s · ha) of 30 m^3/(etmaal · ha).
- Tuinbouwgronden 0,4–0,7 l/(s · ha) of 35–60 m^3 (etmaal · ha).
- Overige gebieden (met wegzijging) 1,0–1,2 l/(s · ha) of 85–105 m^3/(etmaal · ha).

Berekening beregeningsintensiteit

Rondgaande sproeier:

$$L_{\max.R} = \frac{q.1000}{\pi \cdot W^2}$$

Sectorsproeier:

$$L_{\max.S} = \frac{q.115000}{S \cdot W^2}$$

waarin:

$L_{\max}$ = maximale regenintensiteit [mm/h]
q = wateraanvoer [m^3/h]
W = worpwijdte [m]
S = aantal graden van de cirkelboog die wordt beregend

Tabel 5.9 Maximale regenintensiteit in verband met structuurschade van de grond

grondsoort	maximale intensiteit [mm/h]
slempige gronden	5
zavel-en kleigronden	8–12
zandgronden	12–20

Tabel 5.10 Regenintensiteit van veel gebruikte systemen

beregeningssysteem	regenintensiteit [mm/h]
kleine rondgaande sproeiers	2–6
draaiende boom	7
kleine haspelmachine met 1 sproeier	7–10
middelgrote of grote haspelmachine	12–16

5.5 *Grondwaterstroming en terreinontwatering*

Zie ook hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par. 5.

Grondwaterstroming

Darcy:

$$q = k \cdot \frac{h}{L} \cdot A \text{ of : } \quad q = k \cdot i \cdot A$$

waarin:
q = hoeveelheid doorgestroomd (afgevoerd) water [m^3/etmaal]
k = doorlatendheidscoëfficiët van de grond [m/etmaal]
h = drukhoogteverschil tussen de beschouwde punten [m]
L = lengte van de stroombaan tussen de punten [m]
A = doorsnede stroombaan of beschouwde oppervlakte [m^2]
i = verhang (drukhoogte-verschil per lengte-eenheid)

Waterlopen

Dimensionering van waterlopen met de *formule van Manning:*

$$q = k_m \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{i}$$

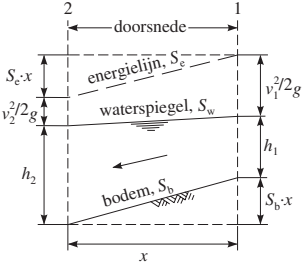
waarin:
q = af te voeren hoeveelheid [m^3/s]
k_m = leidingweerstand [$m^{1/3}$/s]
A = naate oppervlakte [m^2]
R = hydraulische straal = A/O (met O = natteomtrek) [m]
i = verhang waterspiegel [m/m]

Tabel 5.11 Leidingweerstanden

open afvoerleidingtype	k_m [$m^{\frac{1}{3}}$/s]
zeer schone leiding	45–30
schone leiding	35–20
licht begroeide leiding	25–15
matig begroeide leiding	20–10
sterk begroeide leiding	15– 5

Tabel 5.12 Gewenste taludhelling en stroomsnelheid per grondsoort

grondsoort	snelheid	[m/s] taluds
zware gronden (klei, leem, löss)	0,6 –0,8	1:1 –1:2
matig zware gronden en zavel	0,3 –0,6	1:1,5–1:2,5
lichte gronden enfijn zand	0,15–0,3	1:2 –1:4
grof en matig grof zand	0,2 –0,5	1:1,5–1:3
venige klei en vast veen	0,3 –0,6	1:1 –1:2
zeer fijn zand	0,15–0,3	1:1 –1:2
slappe klei en slap veen	0,15–0,3	1:1,5–1:5



$$x = \frac{\Delta h + \Delta\left(\frac{v^2}{2g}\right)}{S_b - s_e}$$

x = lengte stukje verhanglijn [m]
h = waterdiepte t.o.v. bodem [m]
v = gemiddelde snelheid [m/s]
g = zwaartekrachtsversnelling [m/s^2]
S_b = helling bodem [–]
S_e = helling energielijn [–]
$v^2/2g$ = snelheidshoogte [m]

Figuur 5.1 Lengteprofiel over de lengte x

Drainage

Zie tabel 5.13 t/m 5.16. Voor optimale draindiepte, zie tabel 5.8.

Tabel 5.13 Globale drainafstanden [m]

grondsoort	draindiepte [m]			
	0,80	1,00	1,20	1,40
zware klei	5,5– 6,5	6 – 7		
normale klei	6,5– 7	7 – 8		
zandige klei	7 – 8	8 – 9		
kleihoudende leem	8 – 9	9 –10	9,5–11	
leem–löss	9 –10,5	10 –12	11 –13	12 –14,5
zandhoudende leem	10,5–12,5	12 –15	13 –17	14,5–19,5
leemhoudend zand	12,5–15,5	15 –19,5	17 –23	19,5–27
kleihoudend zand	15,5–19	19,5–25	23 –33	27 –40

Tabel 5.14 In de praktijk toegepaste ontwateringsnormen bij verschillende soorten grondgebruik

grondgebruik	afvoer [mm/etmaal]	grondwaterstand-diepte[1)] [m]
grasland	7	0,30
bouwland	7	0,50
vollegrondstuinbouw	7	0,50
bloembollen op klei	7	0,50
bloembollen op zand	10	0,30
fruitteelt	7	0,70
bos	5–7	0,50–0,30
militair oefenterrein	7	0,70
sportvelden, kampeerterreinen, speel-en ligweiden	15	0,50
bouwterreinen	10	0,50
woongebieden (50% verhard)	5	0,70
industrieterreinen	7	0,50

[1)] Hoogste grondwaterstandsdiepte die mag optreden bij betreffende afvoerintensiteit.

Tabel 5.15 Maximaal te ontwateren oppervlakte voor PVC-ribbelbuizen bij een ontwerpafvoer van 7 mm/etmaal *en reductie i.v.m. vervuiling/begroeiing* [ha]

drain-diameter [mm]	gemiddelde hydraulische helling [cm/100 m]									
	4	5	6	8	10	15	20	25	30	40
50/44	0,09	0,11	0,12	0,15	0,18	0,23	0,28	0,32	0,36	0,44
60/54	0,20	0,23	0,26	0,31	0,36	0,48	0,50	0,67	0,75	0,91
65/57	0,24	0,28	0,31	0,38	0,44	0,57	0,69	0,81	0,91	1,10
80/72	0,53	0,61	0,69	0,84	0,97	1,27	1,54	1,79	2,02	2,45
100/92	1,19	1,38	1,56	1,88	2,19	2,87	3,47	4,03	4,55	5,51

Tabel 5.16 Leverbare buisdiameters PV C-ribbeldrains

uitwendige diameter [mm]	inwendige diameter [mm]	rollengte[1)] [m]
50	44	100–200
60	53 of 54[1)]	100–150
65	56 of 57[1)]	100–150
80	72	65–100
100	91 of 92[1)]	100
125	115	75–100
160	148	50
200	182	40

[1]Afhankelijk van ht fabrikaat.

Tabel 5.17 Legenda van de ingedeelde plankaart

symbool	betekenis
	grens van het beschouwde gebied
	grens van de afwaterende onderdelen met aanduiding
	aanduiding leidingvakken
	leidingvak met afvoerrichting en plaats dwarsprofiel
	leidingvak met aanvoerrichting
	specifieke aanvoerleiding
	aanduiding koppelleiding
	aanduiding gesplitste afvoer naar eenzelfde punt van samenkomst
	kunstwerk dat een leidingvak begrenst
	kunstwerk in een leidingvak
	brug of duiker
	afsluitbare duiker of sluis
	te handhaven grondduiker
	te maken of te verbeteren grondduiker, eventueel afsluitbaar
	vaste stuw, vleugels stroomopwaarts
	regelbare stuw
	combinatie brug of duiker met stuw
	te handhaven gemaal, cirkel bepaalt juiste plaats

Te installeren vermogen voor een gemaal

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot q \cdot H_{\text{man}}}{1000\eta}\,[\text{kW}]$$

waarin:
ρ = volumieke massa van de vloeistof (= 1000 kg/m^3)
g = gravitatieversnelling [m/s^2]
q = te verplaatsen debiet [m^3/s]
H_{man} = zuigdruk + persdruk + leidingweerstandn [m] (= drukhoogte)
η = rendement installatie (pomp + aandrijving)

6 Rioleringen

6.1 Binnenhuis-rioleringen

Norm
Voor een overzicht van de normen wordt verwezen naar de 'Leidraad Riolering' (zie literatuur). De NEN-normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* te Delft.

Vervaardiging
Binnenhuis-rioleringen worden tegenwoordig vrijwel uitsluitend in PVC uitgevoerd. De kleur is grijs, eventueel ook in bruin leverbaar. De PVC-buizen worden d.m.v. extruderen bij hoge temperaturen uit het thermoplastisch PVC-uitgangsmateriaal getrokken. Hulpstukken worden d.m.v. spuitgieten vervaardigd. De verbinding van de diverse onderdelen gebeurt met overschuifmoffen met rubber klemringen of PVC-lijm.

Ontwerp

Afvoercapaciteit verzamelleiding:

$$Q_a = 315 \cdot f \cdot c \cdot d^{\frac{5}{2}} \cdot l^{\frac{1}{2}}$$

waarin:
Q_a = afvoercapaciteit [l/s]
d = binnenmiddellijn [m]
l = afschot [m/m]
c = Chézy-coëffciët = 18log (3000d)
f = factor onder invloed van bochten
= 1 bij maximaal gesommeerde richtingsveranderingen volgens tabel 6.1
= 0,85 bij grotere gesommeerde richtingsverandering

Belasting van huishoudelijk afvalwater:

$$Q = 0,5 \cdot \sqrt{\Sigma Q_i} \qquad Q \geqslant Q_{i,max}$$

waarin:
Q = samengestelde afvoer [l/s]
Q_i = basisafvoer per lozingstoestel volgens tabel 6.2 [l/s]

Tabel 6.1 Maximaal gesommeerde richtingsverandering in een verzamelleiding

leidingafschot [mm] > t/m		maximaal gesommeerde richtingsverandering
1:50	1:75	22°30′
1:75	1:100	45°
1:100	1:140	67°30′
1:140	1:180	90°
1:180	1:200	112°30′

Tabel 6.2 Minimale binnenmiddellijn[1] aansluitleidingen en basisafvoer lozingstoestellen

lozingstoestel	basis waarden binnen middellijn aansluitleiding[2] [mm]	gereduceerde binnenmiddellijn voor staande deel[3] [mm]	minimale binnenmiddellijn stankafsluiter [mm]	basisafvoer [l/s]
Mondspoelbak drinkfontein lekwaterafvoer/condensatorwaterafvoer overstorttrechter	34	27	27	0
handwasbak	44	34	27	0,5
wastafel			27	
douche-inrichting zonder opstanden			–	
bidet			27	
wasautomaat	57	44	34	0,75
vaatwasmachine (huish. gebruik)			34	
voetenwasbak			34	
urinoir			34	
vloerput, aansluitmiddellijn 40mm			–	
keukengootsteenbak (enkel en dubbel)				
uitstortgootsteen			34	
			34	
badkuip	57	44	34	1
douche-inrichting met opstanden			34	
spoelbak met inhoud groter dan 30 l			34	
vloerput, aansluitmiddellijn 50 mm			–	
vloerput, aansluitmiddelijn 70mm	69	–	–	1,5
watercloset		84	–	
vloerput, aansluitmiddellijn 100 mm	]– 100	–	–	]– 2
afzuigcloset	100	84	–	2,5

[1] Toegestane tolerantie: 5%
[2] Totale ontwikkelde leidinglengte $\geqslant$ 3,5m.
[3] Slechts één verticaal leidingdeel met een maximale lengte van 1,5 m en muurbuislengte $\geqslant$ 0,5 m.

PVC-buis

- Elasticiteitsmodulus : ca. 2000 N/mm^2.
- Toelaatbare buigspanning : 10 N/mm^2.
- Maximale bedrijfstemperatuur : 60 °C.
- Afmetingen : zie tabel 6.3.

Tabel 6.3 Afmetingen PVC-buis voor binnenhuis-rioleringen

$D_{uit} \times D_{inw}$	wanddikte [mm]	standaardlengten [m]
32 × 25,6[1)]	3,2	4 en 5
40 × 33,6	3,2	4 en 5
50 × 43,6	3,2	4 en 5
75 × 68,6	3,2	4,5 en 10
90 × 83,6	3,2	4,5 en 10
110 × 103,6	3,2	4,5 en 10
125 × 118,6	3,2	4,5 en 10
160 × 152,0	4,0	4,5 en 10

[1)] Geen KOMO-keurmerk (NEN 7045).

6.2 Stedelijke rioleringsstelsels

Norm

Voor een overzicht van de diverse normen wordt verwezen naar de 'Leidraad Riolering' (zie literatuur).
Stedelijke rioleringsstelsels moeten het in woningen en bedrijven vervuilde water zodanig afvoeren, dat er zo weinig mogelijk hinder door ontstaat.Wanneer dit mogelijk is moet het water afgevoerd worden naar een groot en stromend *oppervlaktewater.* Hierin wordt het rioolwater zodanig verdund,dat de natuurlijke *zelfreiniging* niet wordt verstoord en de vervulling van andere essentiële functies niet wordt gehinderd. Meestal zal het rioolwater daartoe opgepompt moeten worden en een zuivering moeten ondergaan. In deze gevallen spreekt men van een *bemalen riolering* en een *rioolwaterzuiveringsinstallatie* (r.w.z.i.).

Bij de aanleg, uitbreiding of verbetering van rioleringsstelsels komen drie systemen in aanmerking. In uitzonderingsgevallen kan worden volstaan met het (niet verbeterde) gemengde stelsel.

Gescheiden stelsel

Het afvalwater van gebouwen wordt door een rioolstelsel afgevoerd; het regenwater door een afzonderlijk riool of bijvoorbeeld bovengronds door goten, naar zakputten of openbaar water.

Neemt men aan dat neerslaghoeveelheden van 1–2 mm geen afvoer via regenwaterriolen naar het oppervlaktewater veroorzaken, dan wordt gemiddeld 100–150 maal per jaar neerslag door het regenwaterriool afgevoerd. Deze lozingen geschieden, anders dan die van een r.w.z.i. weliswaar gespreid maar toch stootsgewijs.

Verbeterd gescheiden stelsel
De neerslag wordt slechts met een beperkte frequentie, bijv. gemiddeld 20 maal per jaar, door de regenwaterriolen naar het oppervlaktewater afgevoerd.

Onder normale weersomstandigheden kan het regenwater in het riool worden opgeslagen, door dit met een extra bergingscapaciteit te ontwerpen. Ook kunnen *bergingsbezinktanks* worden toegepast.

Bij een afvoerfrequentie van 20 maal per jaar en een berging van 6 mm neerslag moet de overcapaciteit van het vuilwaterriool 0,2 mm/uur zijn. Dit houdt in dat bij maximale berging het regenwaterriool in 30 uur via het vuilwaterriool wordt leeggepompt. Het verbeterde gescheiden stelsel gaat de kwalijke gevolgen van valse aansluitingen en van calamiteiten bij het wegtransport van gevaarlijke stoffen zoveel mogelijk tegen.

Verbeterd gemengd stelsel
Hier worden alle af te voeren hoeveelheden door één rioleringsstelsel verwijderd, waarbij de overstortfrequentie echter wordt beperkt tot gemiddeld enkele keren per jaar. De vergroting van de bergingscapaciteit gebeurt meestal door het aanleggen van *bergingsbezinktanks.*

6.3 Afvoer bij stedelijke rioleringen

Droogweerafvoer (d.w.a.)
Dit is het huishoudelijke en het industriële afvalwater samen. Afhankelijk van de aard van de bebouwing rekent men op een persoonlijke afvoer (huishoudelijk gebruik) van 100 à 150 l/dag. Gewoonlijk wordt een gemiddelde waarde aangehouden van 120 l/dag.

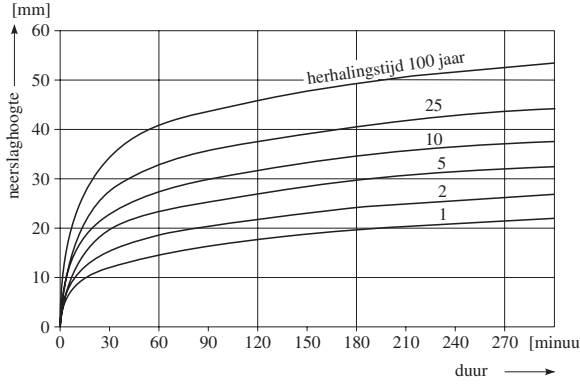
De vereiste afvoercapaciteit per uur is ongeveer $^1/_{10}$ van de dagafvoer: ca. 12 l/inw per uur.

Regenwaterafvoer (r.w.a.)

Deze afvoer is zeer wisselend. Door verdamping, het wegzakken in de bodem en opneming door beplanting, komt slechts een deel van dit water in de riolering terecht.
De relatieve vermindering daardoor ten opzichte van de oorspronkelijke hoeveelheid wordt de *afvloeiingcoëfficiënt* genoemd (zie tabel 6.4).
In de regel wordt gerekend met een intensiteit, variërend van 60 l/s per ha in vlakke gebieden en 90 l/s per ha in hellende gebieden. Zie figuur 6.1. Het gemengde stelsel wordt in het algemeen alleen maar op regenafvoer berekend,omdat de d.w.a. met ca. 0,5 l/s per ha daarbij in het niet valt.
Om op de rioolaanleg te besparen, is het bij het gemengde stelsel gebruikelijk dat op daartoe geschikte punten zgn. *nooduitlaten* worden gemaakt. Er hoeft dan slechts een deel van het opgevangen regenwater door de riolering worden afgevoerd (bijvoorbeeld vijf maal de d.w.a.).

Tabel 6.4 Afvloeiingscoëfficiënt voor verschillende bebouwingstypen en oppervlakken

	aantal inw. per ha	afvloeiingscoëfficiënt
bebouwingstype		
oude stadskernen,zeer dichte bebouwing	350	0,8
nieuwere stadsdelen, gesloten bebouwing	250	0,6
open bebouwing	150	0,4
nieuwere wijken met parken en tuinen	100	0,25
onbebouwde, niet verharde terreinen		0,15
parken		0,05
aard van het oppervlak		
daken		0,9
gesloten wegdek		0,9
klinkerbestrating		0,8
steenslagwegen		0,45
grind- en sintelwegen		0,25



Figuur 6.1 Neerslaghoogte in De Bilt (jaarextremen op basis van een partiële reeks) voor verschillende herhalingstijden

Berekening nooduitlaat

Volkomen overlaat (buitenwater heeft geen invloed op de afvoer):

$$\dot{V} = 0,4b \cdot h\sqrt{2g \cdot h} \approx 1,77b \cdot h\sqrt{h}$$

waarin:
$\dot{V}$ = af te voeren hoeveelheid [m^3/s]
b = breedte van de nooduitlaat [m]
h = hoogte van het water boven de drempel [m]
g = grafitatieversnelling [m/s^2]

Onvolkomen overlaat (peil buitenwater ligt boven de drempel; buitenwater heeft wel invloed op de afvoer):

$$\dot{V} = 1,5b \cdot h_1\sqrt{g \cdot H} \approx 4,4b \cdot h_1\sqrt{H}$$

waarin:
h_1 = hoogteverschil benedenwater-drempel [m]
H = hoogteverschil tussen waterspiegels [m]

Het wordt doorgaans geaccepteerd dat de riolering in uitzonderingsgevallen het regenwater niet direct kan afvoeren. Het hangt geheel van de plaatselijke omstandigheden af hoe vaak deze overbelasting toelaatbaar is en in hoeverre aanvullende maatregelen als de aanleg van *bergingsbezinktanks* nodig zijn.
Een langdurige regenbui is minder intensief dan een kortere bui die even vaak voorkomt. Hierdoor kan voor de berekening van een groot gebied met een kleinere intensiteit worden gerekend dan voor een klein gebied.

Algemeen geldt dat de eind-doorsnede van de riolering berekend wordt voor een bui, die even lang duurt als de langste tijd die het regenwater nodig heeft om dit punt te bereiken.
Voor korte buien tot 15 minuten rekent men op een regenbui van 90 l/s per ha; bij een bui van 2 uur op een intensiteit van 20 l/s per ha.

6.4 Berekening stedelijke rioolleidingen

Zie ook hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par. 5.

Voor de afvoer geldt:

$$\dot{V} = v \cdot A; \quad v = c\sqrt{R_h \cdot i}$$

waarin:
V = afvoer [m^3/s]
v = snelheid [m/s]
A = natte doorsnede [m^2]
i = verhang riool

$$R_h = \text{hydraulische straal} = \frac{\text{natte doorsnede } [m^2]}{\text{natte omtrek } [m]}$$

c = Chézy-coëfficiënt = 18 log (12000 R/k) [$m^{\frac{1}{2}}/s$]
k = wandruwheid (zie tabel 6.5) [mm]

Tabel 6.5 Wandruwheid van verschillende materialen[1)]

materiaal		wandruwheid k [mm]
beton	oud, aangetast	10 –20
	gepleisterd	5
	zeer glad	2
	gecentrifugeerd	1
staal	sterk geroest	1 – 2
	geasfalteerd	0,2– 0,5
gietijzer	geasfalteerd	0,1
	nieuw	0,2
	aangetast	1 – 5
PVC		0,5
polyethyleen		0,1
glas		0,2– 0,5
zink		0,1– 0,2
koper		0,1– 0,2
dakvilt		2 – 5
grind		10 –50

[1)] In Nederland is het gebruikelijk om aan te houden voor: betonbuizen k = 1,5 mm; kunststofbuizen k = 0,4 à 1,0 mm.

Diepteligging wordt bepaald door: vorstvrij houden; bestand tegen verkeerslasten; aanwezigheid andere leidingen; dekking buizen bovenste deel van riool ten minste 1 m.

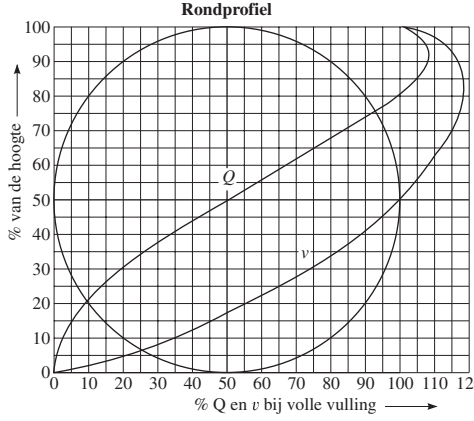
Stroomsnelheid moet niet minder zijn dan 0,6 m/s en niet meer dan 2 m/s; een goede snelheid voor berekeningen is 0,7 m/s.

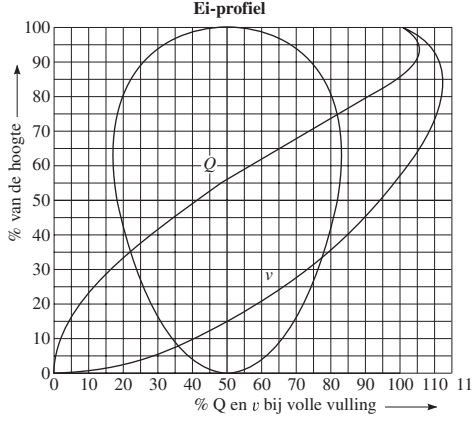
Toegangskokers aanbrengen bij verandering van richting; bij samenkomst met andere riolen en in rechte stukken om de 30 tot 60 m.

Tabel 6.6 Afvoer Q [l/s] en snelheid v [m/s] voor geheel gevulde ronde buizen bij verschillende verhangen (k = 1,5 mm)

middellijn	1:100		1:200		1:300		1:400	
[m]	Q	v	Q	v	Q	v	Q	v
120	9,5	0,77	6,7	0,54	5,4	0,44	4,7	0,38
150	15,5	0,87	10,9	0,62	8,9	0,50	7,7	0,43
200	33,3	1,06	23,5	0,75	19,1	0,61	16,6	0,53
250	60,3	1,23	42,6	0,87	34,7	0,71	30,0	0,61
300	98,0	1,39	69,1	0,98	56,4	0,80	48,7	0,69
400	210	1,67	148	1,18	121	0,96	105	0,83
500	379	1,93	268	1,36	218	1,11	189	0,96
600	613	2,17	433	1,53	353	1,25	306	1,08
700	921	2,39	651	1,69	531	1,38	459	1,19
800	1309	2,60	925	1,84	755	1,50	653	1,30
900	1785	2,81	1261	1,98	1029	1,62	890	1,40
1000	2355	3,00	1664	2,12	1358	1,73	1175	1,50
1200	3803	3,36	2687	2,38	2193	1,94	1898	1,68
1400	5700	3,70	4028	2,62	3287	2,14	2845	1,85
1600	8091	4,02	5717	2,84	4666	2,32	4039	2,01
1800	11017	4,33	7785	3,06	6353	2,50	5500	2,16
2000	14519	4,62	10260	3,27	8373	2,67	7248	2,31

1:500 ·		1:750		1:1000		1:1500		1:2000	
Q	v	Q	v	Q	v	Q	v	Q	v
4,2	0,34	3,4	0,28	2,9	0,24				
6,8	0,39	5,6	0,32	4,8	0,27	3,9	0,22		
14,8	0,47	12,0	0,38	10,4	0,33	8,5	0,27	7,3	0,23
26,8	0,55	21,8	0,44	18,9	0,38	15,3	0,31	13,2	0,27
43,5	0,62	35,5	0,50	30,7	0,43	25,0	0,35	21,5	0,30
93,5	0,74	76,2	0,61	65,8	0,52	53,6	0,43	46,3	0,37
169	0,86	138	0,70	119	0,61	96,9	0,49	83,7	0,43
273	0,97	223	0,79	193	0,68	157	0,56	136	0,48
410	1,07	335	0,87	289	0,75	236	0,61	204	0,53
584	1,16	476	0,95	412	0,82	336	0,67	290	0,58
796	1,25	649	1,02	562	0,88	458	0,72	396	0,62
1050	1,34	857	1,09	751	0,94	604	0,77	523	0,67
1697	1,50	1384	1,22	1197	1,06	976	0,86	845	0,75
2543	1,65	2075	1,35	1795	1,17	1464	0,95	1267	0,82
3611	1,80	2946	1,47	2549	1,27	2079	1,03	1799	0,89
4917	1,93	4012	1,58	3472	1,36	2832	1,11	2450	0,96
6481	2,06	5288	1,68	4576	1,46	3733	1,19	3230	1,03





Figuur 6.2 Verhouding van Q en v bij willekeurige vulhoogte tot Q en v bij volle vulling

Tabel 6.7 Leidingafmetingen gladwandige PVC-buizen (standaardlengte 5 en 10 m)

$D_{uit} \times D_{inw}$ [mm]	wanddikte [mm]	$D_{uit} \times D_{inw}$ [mm]	wanddikte [mm]
110 × 105,6[1)]	2,2	250 × 237,6[1)]	6,2
110 × 103,6	3,2	250 × 235,4[1)]	7,3
125 × 120,0[1)]	2,5	315 × 305,4[1)]	4,8
125 × 118,6	3,2	315 × 302,6	6,2
125 × 117,6	3,7	315 × 299,6	7,7
		315 × 296,6	9,2
160 × 153,6[1)]	3,2		
160 × 152,0	4,0	400 × 384,4[1)]	7,8
160 × 150,6	4,7	400 × 380,4	9,8
		400 × 376,6	11,7
200 × 193,8[1)]	3,1		
200 × 192,2[1)]	3,9	500 × 475,4	12,3
200 × 190,2	4,9	500 × 470,8	14,6
200 × 188,2	5,9		
		630 × 599,2	15,4
250 × 242,4[1)]	3,8	630 × 593,2	18,4
250 × 240,2[1)]	4,9		

[1)] Valt buiten KOMO-normen.

Tabel 6.8 Leidingafmetingen ronde betonbuizen

binnen diameter [mm]	wand-dikte [mm]	mof-diameter [mm]	werkende lengte [mm]	massa per element [kg]
250	50	365	2000	290
300	55	415	2000	345
400	60	525	2000	480
500	65	650	2000	675
600	80	785	2000	1000
700	90	901	2400	1560
800	100	1025	2400	1980
900	110	1137	2000	2040
1000	120	1250	2400	3070
1250	140	1565	2000	3800
1500	170	1875	2000	5500
1800	180	2200	2000	6700

7 Wegenbouw

Voor uitgebreide informatie wordt verwezen naar de Standaard RAW-Bepalingen 2000 (zie literatuurlijst voor deze paragraaf aan het einde van het hoofdstuk).

7.1 Begrippen

Verkeersklassen

Tabel 7.1 geeft een aantal *verkeersklassen* op basis van de gemiddelde totale *verkeersintensiteit* (totaal aantal motorvoertuigen in beide richtingen gezamenlijk). Al naar gelang de klasseindeling worden er eisen gesteld aan de gebruikte materialen en constructie t.b.v. de weg.

Benaming onderdelen wegopbouw (zie ook figuur 7.1)

Natuurlijke ondergrond: de van nature aanwezige grondslag onder de weg die ongeroerd is gelaten.

Verbeterde ondergrond: dat deel van de grondslag waarvan de eigenschappen van de van nature aanwezige ondergrond zijn verbeterd, of waar de natuurlijke ondergrond is vervangen door een ander materiaal.

Tabel 7.1 Verkeersklassen

verkeers-klasse	SAL_{100}	toelichting
2	$<$ 500	licht belaste verhardingen
3	$<$ 4000	intensief belaste verhardingen
4	$>$ 4000	zeer intensief belaste verhardingen
5	$>$ 500	intensief belaste verhardingen met langzaam rijdend en stilstaand zwaar verkeer, bij een rijsnelheid $<$ 15 km/uur

SAL_{100} = equivalent aantal standaardaslasten van 100 kN per etmaal voor de zwaarst belaste rijstrook.

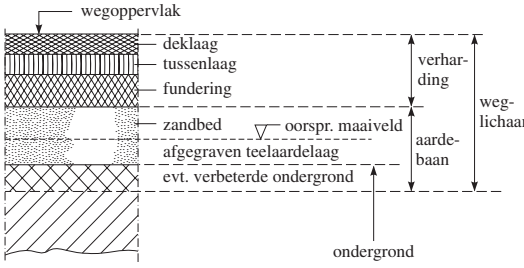
Voor een schatting van het equivalent aantal standaardaslasten kan gebruik worden gemaakt van onderstaande formule en van tabel 7.2.

$$SAL_{100} = I_v \cdot VSF_{100}$$

waarin:
I_v = intensiteit van het vrachtverkeer op de zwaarst belaste rijstrook (werkdagjaargemiddelde in één richting)
VSF_{100} = vrachtwagen-schadefactor in equivalent aantallen aslasten van 100 kN.

Tabel 7.2 Relatie tussen type vrachtverkeer en vrachtwagen schadefactor

type vrachtverkeer		VSF_{100}
licht	(gemiddeld < 2,5 as per vrachtauto)	0,2–0,5
middelzwaar	(gemiddeld 2,5–3,0 as per vrachtauto)	0,5–1,0
zwaar	(gemiddeld > 3,0 as per vrachtauto)	1,0–2,0



Figuur 7.1 Wegopbouw

Zandbed: een in het werk aangebrachte laag zand op de al of niet verbeterde ondergrond om de weg te vrijwaren van vocht- en vorstinvloeden.

Aardebaan: de verbeterde ondergrond en het zandbed tezamen; of een laag ophoogzand (aanvulzand) en het zandbed.

Fundering: de onderste laag van de verharding die het mogelijk maakt de verkeersbelastingen voldoende gespreid naar de aardebaan af te voeren, zodanig dat blijvende vervorming hiervan vermeden wordt. Tevens vormt de fundering een stabiele laag om later de verhardingslagen doelmatig te kunnen aanbrengen.

Tussenlaag: een veelal bij asfaltverhardingen toegepaste laag om een overgang in sterkte-eigenschappen te creëren tussen de fundering en de kwalitatief zeer goede deklaag.

Deklaag: de door het verkeer bereden toplaag van de verharding. Beschermt de onderliggende lagen tegen weersinvloeden en bepaalt in grote mate de rij-eigenschappen van de weg. De deklaag dient in het algemeen zeer vlak te zijn, voldoende stroef, slijtvast, slechts in geringe mate verouderingsgevoelig en dient voldoende weerstand tegen vervorming te bieden.

Slijtlaag: ook wel *dichtingslaag* of *oppervlakbehandeling* genoemd. Wordt toegepast als de oppervlaktekwaliteit van de deklaag onvoldoende geworden is. Voornamelijk toegepast als onderhoudsmaatregel.

Weglichaam: het samenstel van alle onderdelen van aardebaan en verharding dat de weg zijn noodzakelijke draagkracht e.d. verleent.

7.2 Ondergrond en aardebaan

Tabel 7.3 Algemene grondkenmerken van vier hoofdgroepen grond

kenmerk	*matig grofkorrelige gronden* zand, grindzand dekzand, plaatzand	*fijnkorrelige gronden* *leem, zandige klei* *silt, loss*	*zeer fijkorrelige gronden (kleiplaaties)* klei, keileem, zavel, potklei	*organische gronden* veen, humus, teelaarde
draag-vermogen	groot	matig	droog: matig nat: gering	zeer gering
vorst-gevoeligheid	niet	matig of niet	meestal niet	groot
drainerend vermogen	zeer goed tot goed	redelijk	zeer slecht	slecht
verwerkbaar-heid	zeer goed	droog: goed vochtig: slecht	matig	goed
samendruk-baarheid	vrijwel niet	gering	matig	groot
verdichtings-mogelijkheid	goed	matig tot goed	slecht	onmogelijk

Draagkracht

In de wegenbouw zijn diverse methoden in gebruik om de *draagkracht* van de ondergrond, het zandbed en de fundering te bepalen:

- metingen in situ (1 t/m 3 hieronder);
- metingen in het laboratorium (4 en 5).

1 Sonderingen (het meten van de kracht die nodig is om een stalen conus met een geprojecteerde oppervlakte van 1000 mm^2 in de grond weg te drukken). Hiermee wordt de bezwijkweerstand van de grond per diepte gevonden; dit heet de *conusweerstand* q_c [N/mm^2]. Zie ook par. 2 *Funderingen*. Via de benaderingsformule $E_s = a \times q_c$ kan de statische waarde van de elasticiteitsmodulus van de grondslag worden bepaald, zie tabel 7.4 ($E_{dyn} = 2$ à $3\,E_s$).

Tabel 7.4 Waarde van a voor diverse grondsoorten

grondsoort	*a*
veen	0,5
klei	1,0
kleiig zand	2,0
zand	5,0

2 Plaatbelastingsproef op het grondoppervlak. Hierbij wordt de zakking van een stalen plaat (diameter 0,76 m) onder een op-gebrachte belasting gemeten. Hiermee wordt de *beddings-constante k* [N/mm^3] gevonden:

$$k = \frac{F}{\delta \cdot A} = \frac{\sigma}{\delta} \quad \text{waarin: } \sigma = \text{grondtegendruk } [\text{N/mm}^2]$$
$$\delta = \text{plaatakking[mm]}$$
$$A = \text{plaatoppervlakte}$$
$$= 456 \cdot 10^3 \text{mm}^2$$

De dieptewerking is beperkt (ca. 1,0 m). Mogelijk invloedrijke onderliggende lagen blijven buiten beschouwing.

3 California Bearing Ratio (CBR-proef). De CBR-waarde is het quotiët van de indringingsweerstand van een stalen stempel in een proefstuk, èn de indringingsweerstand van een standaard-monster gebroken steenslag. De CBR-waarde wordt vaak uitgedrukt in een percentage en in Nederland veelal bepaald in een laboratorium. Evenals plaatbelastingsproef beperkte dieptewerking. Zie tabel 7.5.

Tabel 7.5 CBR-Waarden voor verschillende materialen

materiaal	CBR [%]
veen	0– 2
klei boven grondwater	4– 8
klei onder grondwater	3– 5
opgespoten zand na verdichting	8–12
fijn dekzand na verdichting	12–18
grindzand na verdichting	15–40

4 Proctor-proef. Door een grondmonster in een stalen mal m.b.v. een vallende stalen stempel op een gestandaardiseerde manier te verdichten (bij wisselende vochtgehaltes), kan de relatie dichtheid-vochtgehalte, en daarmee ook het draagvermogen worden bepaald. Bij een watergehalte van 8–12 gew. % is de dichtheid maximaal. Vergelijking van de in het werk bereikte dichtheid met de maximale Proctor-dichtheid, levert de Proctor-waarde op (in %).

$$\text{Proctor-verdichtingsgraad} = \frac{\rho_m\,(\text{in het werk})}{\rho_m(\text{proef})} \times 100\%$$

waarin: ρ = dichtheid [kg / m^3]

Oorspronkelijk werd voor het ontwerp van wegen met name uitgegaan van de CBR-waarde van de ondergrond en de fundering. Tegenwoordig worden ook vaak *k*-waarden en elasticiteits-moduli gebruikt.

Globaal geldt: E_{dyn} = 10 × CBR [N/mm^2]. CBR-waarden in %. Voor de statische en dynamische *E*-waarden van de ondergrond kunnen globaal de richtwaarden volgens tabel 7.6 worden aangehouden. Tabel 7.7 geeft waarden voor de beddingsconstante.

Tabel 7.6 Richtwaarden voor de statische en dynamische elasticiteitsmodulus bij diverse grondsoorten

grondsoort	volume-gewicht [kN/m^3]	E_{stat} [MPa]	E_{dyn} [Mpa]
slap veen	10–12	0,5– 1	7– 35
veen	12–15	1 – 3	
slappe klei	11–14	1 – 2	20–100
klei	13–17	2 – 4	
leem, zandige klei	16–19	3 – 6	
stijve klei	18–21	4 – 10	
kleiig zand	16–20	10 – 30	70–200
los zand	15–17	20 – 40	
matig vast zand	16–18	30 – 80	
vast zand	18–20	60 –120	
grind	14–20	80 –200	

Tabel 7.7 Beddingsconstante bij diverse grondsoorten [MN/m^3]

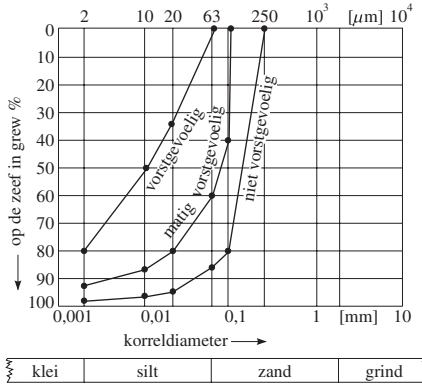
grondsoort	bloklasten	wiellasten
goed verdicht zand (q_c groter dan 10 MPa)	10 –20	50–75
grindhoudend zand	20 –35	40–80
matig vast zand (q_c = 4 à 8 MPa)	5 –15	40–60
leemhoudend zand	4 –10	20–60
kleihoudend zand	3 – 8	15–50
zandhoudend klei	2 – 5	10–40
rivierklei	1 – 2	15–30
veen	0,1– 0,5	4–20

Ontwatering en drainage

Omdat de draagkracht van de ondergrond en het zandbed sterk wordt bepaald door het vochtgehalte, is een goede *ontwatering* van het weglichaam noodzakelijk. Na zetting van de constructie moet de afstand tussen bovenkant asfalt tot de hoogste grondwaterstand 1,2 à 1,3 m bedragen.

Draineerzand ('Standaard 2000'):
- ten minste 50% van de korrels groter dan 250 μm;
- van het gedeelte van de korrels kleiner dan 2 mm mag slechts 5% door zeef 63 μm gaan;
- van het materiaal door zeef 2 mm mag het gloeiverlies ten hoogste 3% bedragen.

Zand voor zandbed ('Standaard 2000'):
- van het gedeelte van de korrels kleiner dan 2 mm mag slechts 15% door zeef 63 μm gaan;
- indien het percentage van de korrels kleiner dan 2 mm door zeef 63 μm 10 à 15% bedraagt, mag het gedeelte door zeef 20 μm van de fractie door 2 mm ten hoogste 3% zijn;
- het moet mineraal materiaal zijn, met een maximaal *gloeiverlies* (door verbranding van aanwezige humus) van 3 gewichts-% van het materiaal door zeef 2 mm.



Figuur 7.2 Korrelverdelings-diagram vorstgevoelige gronden

Vorstgevoeligheid

Het zandbed dient zo droog mogelijk te zijn om *opvriezing* (en daarmee uitzetting) te voorkomen; een diepe ontwatering is dus noodzakelijk. Schade door verlies aan dichtheid van het korrel-skelet bij ontdooiing van ijslenzen (van plaatselijk aanwezig vocht in het zand) kan worden voorkomen door:

- toepassen van een waterdicht wegdek;
- goed gedraineerd (weinig capillaire opstijging) en vorst- ongevoelig zand.

Tabel 7.8 Overzicht verdichtingsmaterieel

type	massa [ton]	te verdichten laagdikte [m]	werksnelheid [km/h]	minimaal benodigd aantal overgangen
kleine trilplaten	0,1– 1	0,2–0,6	1	4
driewielwals (statisch)	4 –10	0,2	3	8
trilwals	1 –12	0,4–1	1– 5	4
getrokken trilrol	2 –10	0,5–1	4	4
zelfrijdende trilwals met aangedreven rol	5 –20	0,5–2	5–10	5
bandenwals	10 –25	0,2–0,5	5–20	8

Verdichting

Maximale *verdichting* van eventueel een deel van de ondergrond (zandaanvulling of ophoging)en het zandbed is noodzakelijk voor het verkrijgen van een goed draagvermogen en een zo gering mogelijke nazakking of naverdichting onder invloed van het verkeer (spoorvorming). Optimale verdichting treedt op bij een vochtgehalte van 8 à 15%. Zie tabel 7.8.

Zand voor aanvulling ('Standaard 2000'):
- mineraal materiaal waarvan de fractie fijner dan 2 μm ten hoogste 8% bedraagt;
- gehalte door zeef 63 μm ten hoogste 50%.

Zand voor zandbed en draineerzand:
- zie hiervoor onder 'Ontwatering en drainage'.

Stabilisatie

Stabiliseren: de draagkracht van het aanwezige zand sterk opvoeren. In Nederland wordt in hoofdzaak gestabiliseerd met cement. Bij de *mix-in-place* methode wordt een 0,15–0,30 m dikke laag zand in het weglichaam intensief met 20–40 kg cement per m^2 vermengd en met water besproeid. Hierna vindt de hoogteafwerking en de verdichting plaats.
Te snelle uitdroging van het zandcement wordt belemmerd door afsproeien met circa 0,7 kg bitumen-emulsie per m^2.

Zandcement ('Standaard 2000'):
- gemiddelde druksterkte van volgens Proctor-methode bereide cilinders 5,0 N/mm^2 (na 28 dagen verharding);
- minimum druksterkte van uit het werk geboorde cilinders 1,5 N/mm^2 (na 28 dagen verharding).

7.3 Verharding

Flexibele funderingen (ongebonden materialen)

Meestal bestaande uit steenmengsels die na verdichting worden ingewassen met zand om de bovenlaag van het korrelskelet te vullen en een minder open oppervlak te verkrijgen. Deze funderingen doen vaak dienst als tijdelijke bouwweg. Zand voor het inwassen van funderingslagen moet voldoen aan de eisen die gesteld zijn aan zand voor zandbed ('Standaard 2000').

*Tabel 7.9 Overzicht **ongebonden** funderingsmaterialen*

type materiaal	volumieke massa na verdichting [kg/m^3]	elasticiteitsmodulus E_{dyn} [N/mm^2]
lava	1750	150–250
mijnsteen	1800	200–300
stol (grindzand)	2100	200–400
silex	1700	1000–1200
gebroken metselwerkpuin	1900	100–250
gebroken betonpuin	2000	300–600
schuimslakken	1400	250–350
steenslag granulaat:	1700	300–400
-metselwerk	2100	200–400
-beton	2100	600–800
-meng	2100	400–600

*Tabel 7.10 Korrelverdeling **ongebonden** steenmengsels voor steenfunderingen* [min. en max. massa-percentage][1)]

op zeef	nominale gradering [mm]	
	0/40	0/20
C45	0–10%	–
C22,4	–	0–10%
C16	10–40%	–
C8	–	15–45%
C4	40–70%	–
2mm	50–80%	45–70%
63 μm	min. 92%	min. 92%

[1)] Indien de fractie op zeef 63 μm 920 à 95% bedraagt, mag het gehalte aan minerale deeltjes door zeef 20 μm ten hoogste 3% bedragen van de fractie kleiner dan 2 mm.

Stijve funderingen (gebonden materialen)

Funderingslagen van gebonden materialen worden *stijve funderingen* genoemd omdat bij de binding van de steenachtige materialen een fundering ontstaat met een sterke plaatwerking. De deklaag moet minimaal 120 mm dik zijn in verband met de verwerkbaarheid, de verdichtbaarheid en scheurvorming in de

*Tabel 7.11 Overzicht **gebonden** funderingsmaterialen*

type materiaal	karakteristiek	elasticiteitsmodulus E_{dyn} [N/mm^2]
zandcement	mogelijkheid van gebruik van ter plaatse aanwezig zand (zie ook par. 7.2 onder Stabilisatie)	8000
hoogovenslakken	verhardt na besproeiing met water door hydraulische werking	400–800 bij aanbrengen 2000–3000 na 90 dagen
zandasfalt	relatief goedkoop, enigszins flexibel	1500–2500 (bij 10 °C)
schuimbeton	zeer licht (vanaf 600 kg/m^3), bij slappe bodem	1500–3000
regeneratieasfalt	recycling oude wegenbouwmaterialen	2500–5000
gebroken puin	met hydraulisch bindmiddel (hergebruik)	1500–3000

afdekkende asfaltverharding. Binding is mogelijk door cement, een toeslag van een hydraulisch bindmiddel of bitumen.
Hoogovenslakzand voor inwassen of als straatlaag (‘Standaard 2000’):

*Tabel 7.12 Korrelverdeling licht **gebonden** steenmengsels voor steenfundering* [min. en max. massa-percentage]

op zeef	nominale gradering [mm]	
	0/40	0/20
C45	0–10%	–
C22,4	–	0–10%
C16	10–40%	–
C8	–	15–45%
C4	40–70%	–
2mm	60–85%	45–70%
63 μm	94–100%	92–100%

- CBR-waarde ten minste 12%;
- fractie op zeef C4 ten hoogste 10%;
- fractie op zeef 63 μm ten minste 90%.

Verhardingstypen

Flexibele verharding (asfalt): kan zakkingen in de ondergrond volgen zonder direct te scheuren (geeft mee). Gefaseerde aanleg is mogelijk.Vraagt wel veel onderhoud.

Stijve verharding (beton): werkt sterk lastspreidend en kan daardoor vaak relatief dun worden uitgevoerd. Weinig onderhoud en een zeer lange levensduur.

Elementverharding (stenen en tegels): eenvoudig in aanleg, gunstig bij onderhoudswerk en kleurvariatie mogelijk. Voor buitenwegen minder geschikt.

Verhardingsdimensionering

De bepaling van de constructiedikte van een *wegverharding* vindt plaats op basis van het te verwachten aantal belastings-herhalingen van met name zwaar vrachtverkeer. Uitgegaan wordt van een equivalent aantal *standaard-aslasten*. Voor een standaard-aslast wordt veelal 100 kN aangehouden, zijnde de maximaal toegestane belasting op een enkele as (deze waarde wordt t.z.t. verhoogd naar 115 kN).

De omrekening naar standaard-aslasten geschiedt met een p^n-*relatie*. Voorbeeld: een 70 kN aslast is equivalent met $(70/100)^n$ standaard-aslasten van 100 kN. Voor zowel asfalt-als betonverhardingen wordt $n = 4$ gebruikt.

Dimensioneringsvoorbeelden weg met matige verkeersintensiteit

Uitgangspunten:

- ontwerplevensduur 20 jaar
- rijstrookbreedte 3,5 m
- totale etmaal-intensiteit 2000 voertuigen
- 10% vrachtwagenverkeer, gemiddeld 3 assen

Dimensionering:

- totaal aantal vrachtauto aslast-passages $4 \cdot 10^6$, door versporing reductie 50%
- globaal 3% van de vrachtauto's heeft aslasten die 140 kN kunnen belopen

Oplossing in asfalt:

– asfaltbetonverharding	0,12 m
– ongebonden fundering	0,20 m
– zandbed (slappe grond)	0,60 m
(goede grond)	0,20 m

Oplossing in beton:

– beton B35 wegdek	0,20 m (slappe grond)
	0,17 m (goede grond)
– zandcementfundering	0,15 m
– zandbed	0,30 m

Oplossing in betonklinkerkeien (in de bebouwde kom)

– stenen	0,10 m
– straatzandlaag	0,05 m
– hoogovenslakken	0,30 m (slappe grond)
	0,15 m (goede grond)
– zandbed	0,40 m

7.4 Asfaltconstructies

Samenstellende materialen

Asfaltbeton wordt samengesteld uit minerale aggregaten en bitumen.

Bitumen wordt vervaardigd uit zware aardoliefracties. Het is een visceus materiaal,waarbij de vervormbaarheid sterk afhangt van zowel het type bitumen, de temperatuur, alsook de belastingstijd. Bij hogere temperaturen is het dun vloeibaar (mengproces). Bij korte belastingstijd gedraagt het zich elastisch, maar bij langdurige belasting visceus (plastisch). Dit verleent het asfalt-beton zijn flexibele karakter.

Veel toegepast worden de typen 80/100 en 45/60; hierbij geven de getallen grenswaarden aan voor de indringingsmaat in 0,1 mm van een 100 g zware naald in het bitumen bij 25 °C.

Tabel 7.13 Onderverdeling van mineraal aggregaat

soort	korrelafmeting	typering functie
steen	$>$ 2 mm	grind of steenslag vormt het skelet in asfaltbeton om de belasting te kunnen dragen
zand	$>$ 63 μm en $\leqslant$ 2 mm	vult de holle ruimten tussen grindkorrels op en kan bij hoekige korrelvorm dit versterken
vulstof	$\leqslant$ 63 μm	vormt samen met bitumen het hechtmiddel om het skelet bijeen te houden verbetert het visceuze gedrag van bitumen

Materiaalspecificaties ('Standaard 2000')

Tabel 7.14 Korrelverdeling van grind en fosforslak voor asfaltverhardingen [massa-percentage]

op zeef	4/16		4/32		16/32	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
C31,5	–	–	0,0	2,0	0,0	5,0
C22,4	0,0	2,0	–	–	10,0	60,0
C16	0,0	10,0	10,0	65,0	60,0	100,0
C11,2	–	–	–	–	90,0	100,0
C8	30,0	70,0	30,0	85,0	–	–
C4	80,0	100,0	90,0	100,0	–	–

Tabel 7.15 Korrelverdeling zand (fractie 2mm–63 μm*) voor bitumineuze mengsels*[1] [massa-percentage]

door zeef	op zeef	zandsoort[2]	
		A	B
2 mm	500 μm	10–50%	$>$ 10%
500 μm	180 μm	30–60%	–
180 μm	63 μm	20–45%	$<$ 40%

[1] Bij *controle* van aangebracht asfalt (specie-analyse, boorkern onderzoek) mogen de percentages maximaal 10% afwijken van de in het vooronderzoek vastgelegde waarden.

[2] *Zand* A: natuurlijk zand of een mengsel van natuurlijke zanden.
Zand B: mengsel van 1 massadeel natuurlijk zand en 3 massadelen brekerzand.

Tabel 7.16 Korrelverdeling zand voor verschillende bitumineuze mengsels [max. massa-percentage]

bitumineuis mengsel	op zeef 2 mm		door zeef 63 μm van het materiaal door zeef 2 mm
	zand of zand A[1)]	brekerzand of zand B[1)]	
open asfaltbeton dicht asfaltbeton zeer open asfaltbeton	5%[2)]	15%	3%
grindasfalt betongietasfalt koudasfalt steenasfaltbeton zandasfalt	15%	15%	5%

[1)] Zie voor verklaring zand A en B, tabel 7.15 (noot 2).
[2)] Deze eis geldt tevens voor de fractie van natuurlijk zand in zand B.

Mengselsamenstelling

Voor een aantal veel toegepste asfaltbetontypen gelden de volgende eisen ('Standaard 2000') t.a.v. korrelverdeling van de totale minerale gradering.

Grindasfaltbeton: mengsel van grind 4/32, zand, zwakke vulstof en bitumen 45/60. Gebruikt als onderlaag of als uitvullaag.

Open asfaltbeton: mengsel van steenslag, zand, zwakke of middelsoort vulstof en bitumen 80/100 of 45/60. Wordt gebruikt als binder tussen de onderlaag en de deklaag. Kan als tijdelijke deklaag dienen.

Dicht asfaltbeton: mengsel van steenslag, zand A of B (zie tabel 7.15, noot 2), zwakke of middelsoort vulstof en bitumen 80/100 of 45/60. Door hoge stabiliteit en lage percentage holle ruimte toegepast als deklaag of toplaag.

Tabel 7.17 Samenstelling van grindasfaltbeton [massa-percentage]

op zeef	grindasfaltbeton 0/16						grindasfaltbeton 0/32		
	type 1			type 2					
	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.
C31,5	–	–	–	–	–	–	–	0,0	6,0
C16	–	0,0	6,0	–	0,0	6,0	–	5,0	40,0
C8	–	15,0	40,0	–	15,0	45,0	–	–	–
2mm	50,0	47,0	53,0	57,0	54,0	60,0	57,0	54,0	60,0
63 µm	94,0	92,0	94,0	94,0	92,0	94,0	94,0	92,0	94,0
bitume gehalte (op 100% mineraal aggregaat):									
– verkeersklasse 2	–	4,5	5,5	–	4,5	5,5	–	4,5	5,5
– verkeersklasse 3	–	4,0	5,0	–	4,0	5,0	–	4,0	5,0

*Tabel 7.18 Samenstelling van **open** asfaltbeton* [massa-percetage]

op zeef	open asfaltbeto 0/11			open asfaltbeton 0/16			open asfaltbeton 0/16			open asfaltbeton 0/22		
				type 2			type 3					
	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.
C22,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,0	6,0
C16	–	–	–	–	0,0	6,0	–	0,0	6,0	–	–	–
C11,2	–	0,0	8,0	–	–	–	–	10,0	20,0	–	30,0	40,0
C8	–	–	–	–	35,0	50,0	–	–	–	–	–	–
C5, 6	–	45,0	60,0	–	–	–	–	35,0	50,0	–	–	–
2mm	72,0	69,0	75,0	72,0	69,0	75,0	67,0	64,0	70,0	72,0	69,0	75,0
63 µm	95,0	94,0	96,0	95,0	94,0	96,0	94,0	93,0	95,0	95,0	94,0	96,0
bitumengehalte (op 100% mineraal aggregaat):												
– verkeersklasse 2 en 3	5,0	4,6	5,4	5,0	4,6	5,4	5,4	5,0	5,8	4,6	4,2	5,0
– verkeersklasse 4 en 5	5,0	4,6	5,4	5,0	4,4	5,4	5,4	4,8	5,8	4,6	4,0	5,0

*Tabel 7.19 Samenstelling van **dicht** asfaltbeton* [massa-percentage]

op zeef	dicht asfaltbeton 0/8			dicht asfaltbeto 0/11			dicht asfaltbeto 0/16		
	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.
C16	–	–	–	–	–	–	–	0,0	6,0
C11,2	–	–	–	–	0,0	6,0	–	5,0	25,0
C8	–	0,0	6,0	–	5,0	25,0	–	–	–
C5,6	–	10,0	30,0	–	25,0	50,0	–	30,0	55,0
2mm	55,0	52,0	58,0	55,0	52,0	58,0	60,0	57,0	63,0
63 µm	x[1)]	$x-0,5$	$x+1,0$	y[2)]	$y-0,5$	$y+1,0$	y[2)]	$y-0,5$	$y+1,0$
bitumengehalte (op 100% mineraal aggregaat):									
– verkeersklasse 2 en 3	–	6,6	7,0	–	6,4	6,8	–	6,2	6,6
– verkeersklasse 4	–	–	–	–	6,2	6,6	–	6,0	6,4
– verkeersklasse 4 e 5	–	–	–	–	–	–	–	6,0	6,4

[1)] $x = 100 - 8 \cdot \frac{\text{dichtheid vulstof}}{2700}$

[1)] $y = 100 - 7 \cdot \frac{\text{dichtheid vulstof}}{2700}$

*Tabel 7.20 Samenstelling van **zeer open** asfaltbeton (ZOAB)* [massa-percentage]

op zeef	zeer open asfaltbeton 0/11			zeer open asfaltbeton 0/16		
	gewenst	min.	max.	gewenst	min.	max.
C16	–	–	–	–	0,0	7,0
C11,2	–	0,0	9,0	–	15,0	30,0
C8	–	60,0	85,0	–	50,0	65,0
C5,6	–	75,0	85,0	–	70,0	85,0
2mm	85,0	–	–	85,0	–	–
63 μm	95,0	–	–	95,5	–	–
bitumengehalte (op 100% mineraal aggregaat)	4,5	–	–	4,5	–	–

Tabel 7.21 Invloed bitumengehalte en korrelskelet op eigenschappen van asfaltbeton[1)]

karakteristieke mengseleigenschap	bitumengehalte	korrelskelet
grote stabiliteit (sterkte)	laag	dicht
grote breuktreksterkte	hoog	dicht
goede verwerkbaarheid en weinig verdichtingsenergie	hoog	open
veel flexibiliteit	hoog	open
grote duurzaamheid	hoog	dicht
slechte waterdoorlatendheid	hoog	dicht
goede oppervlak-stroefheid	laag	open

[1)] Afhankelijk van het toepassingsgebied moet er vanwege tegenstrijdigheid in het optimale bitumengehalte voor de gewenste eigenschappen, een compromis worden gezocht. Er zijn dan ook in de 'Standaard 1995' zowel aan het bitumengehalte als aan het korrelskelet (verdichtingsgraad en holle-ruimte-%) maxima en minima aangegeven.

Mengselbegrippen asfaltbeton

Marshall-stabiliteit: maximaal opneembare kracht van een Marshall-proeftablet asfaltbeton onder een hydraulische pers; F [N].

Marshall-vloei: bij beproeving opgetreden zijdelingse blijvende vervorming; Δl [mm].

Marshall-quotiënt: stijfheid van de tablet; $Q = F/\Delta l$ [N/mm].

Proefstukdichtheid: volumieke massa van het materiaal met ingesloten lucht, bijvoorbeeld boorkern, Marshall-proefstuk of tegel; a [kg/m^3].

Verdichtingsgraad: verhouding in dichtheid van een boorkern uit het werk en de dichtheid van een proeftablet van eenzelfde asfaltmengsel, uitgedrukt in %.

Dichtheid mengsel: op grond van de bekende massaverdeling van de samenstellende materialen van een mengsel berekende dichtheid zonder holle ruimte; m [kg/m^3]. Bij boorkernen na oplossing van het bitumen, van de mineralen te bepalen met een pyknometer.

Holle ruimte: volume poriën in verdicht asfaltmengsel [%].

$$HR = \frac{m - a}{m} \times 100\%$$

Vullinsgraad (HR''): deel van de holle ruimten in het mineraal-aggregaat dat met bitumen is gevuld.

$$HR'' = \frac{B'}{B' + HR} \times 100\% \quad B' = \frac{a \cdot gb}{b}$$

gb = bitumengehalte [massa %]
b = volumieke massa bitumen [kg/m^3]

Karakteristieken asfaltbeton

Tabel 7.22 Eigenschappeng rindasfaltbeton

verkeersklasse		2		3	
		min.	max.	min.	max.
Marshall-stabiliteit P_m	[N]	4500	–	5000	–
Marshall-vloei F_m	[mm]	1,5	3,0	1,5	3,0
Marshall-quotiët Q_m	[N/mm]	2000	–	2500	–
holle ruimte	[vol.-%]	–	7,0	–	7,0
vullingsgraad	[vol.-%]	50	75	50	72

*Tabel 7.23 Eigenschappen van **open** asfaltbeton*

verkeersklasse		2		3		4		5	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Marshall-stabiliteit P_m	[N]	5500	–	6500	–	7000	–	7500	–
Marshall-vloei F_m	[mm]	2,0	4,0	2,0	4,0	2,0	4,0	2,0	4,0
Marshall-quotiënt Q_m	[N/mm]	2000	–	2500	–	3000	–	3000	–
holle ruimte[1)]	[vol.-%]	–	7,0	–	7,0	–	7,0	–	7,0
holle ruimte[2)]	[vol.-%]	–	10,0	–	10,0	–	10,0	–	10,0
vullingsgraad	[vol.-%]	–	77	–	75	–	72	–	70

[1)] Deze eis geldt voor de soort 0/16 type 3.
[2)] Deze eis geldt voor de soorte 0/11 type 2, 0/16 type 2 en 0/22.

*Tabel 7.24 Eigenschappen van **dicht** asfaltbeton*

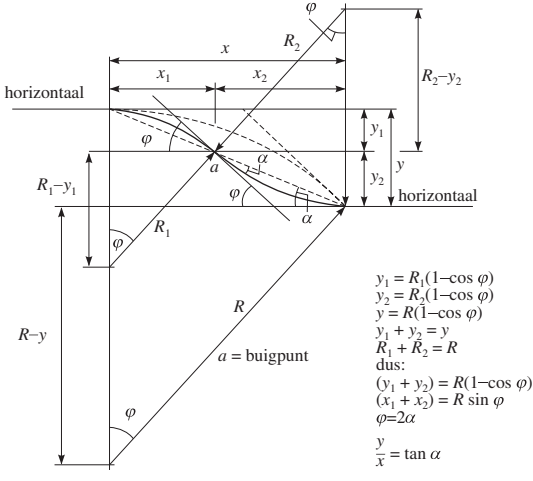
verkeersklasse		2		3		4	
		min.	max.	min.	max.	min.	max.
Marshall-stabiliteit P_m	[N]	6500	–	7000	–	7500	–
Marshall-vloei F_m	[mm]	2,0	5,0	2,0	4,0	2,0	4,0
Marshall-quotiënt Q_m	[N/mm]	2000	–	2500	–	3000	–
holle ruimte	[vol.-%]	–	4,0	–	4,0	–	6,0
vullingsgraad	[vol.-%]	–	87	–	83	–	80

7.5 *Verticale bogen*

Verticale bogen (afrondingen)

- *Topboog:* boog die de bovenafronding van twee rechtstanden in het verticaal alignement vormt.
- *Voetboog:* boog die de benedenafronding vormt.

Eenvoudige asberekening



Figuur 7.3 Eenvoudige asberekening

8 Baggerwerken

8.1 Grondsoorten

Classificatie en identificatie: zie tabel 8.2.

Tabel 8.1 Sterkte en samenstelling van klei[1)]

sterkte	beschrijving	schuifspanning[2)] [kN/m^2]
zeer zacht	gemakkelijk tussen de vingers door te knijpen	< 20
zacht	gemakkelijk tussen de vingers te vervormen	20–40
stevig	met kracht nog tussen de vingers te vervormen	40–75
stijf	niet met de vingers te vervormen; met de duim in te drukken	75–150
hard	met moeite is een indruk te maken met de nagel van de duim	> 150

[1)] Zie ook tabel 8.2.
[1)] Gedefinieerd als de ongedraine (of directe) schuifsterkte bepaald in het terrein of in het laboratorium,volgens de vastgestelde methode.

Terrein- en laboratorium-proeven

Tabel 8.4 geeft de meest gebruikte laboratorium- en terreinproeven voor classificatie van grond. De laboratorium-proeven moeten worden uitgevoerd op ongeroerde grondmonsters. De **vet** gedrukte proeven in de tabel zullen in eerste instantie worden uitgevoerd om de eigenschappen van de grond vast te stellen. De *cursief* gedrukte proeven kunnen, indien ge-wenst, in een tweede fase worden uitgevoerd. De overige (gewoon gedrukte) proeven worden uitgevoerd op een klein aantal representatieve monsters van elke grondsoort.

Tabel 8.5 geeft een overzicht van *testprocedures*. Laboratorium-proeven moeten worden uitgevoerd op ongeroerde grondmonsters. In het ideale geval worden de proeven kort na het monster-

Tabel 8.2 Algemene basis voor identificatie en classificatie van grondsoorten voor baggerdoeleinden

Basis grondsoort	Korrelgrootte [mm] (NEN 5104)	Identificatie	Kenmerken van de korrels Plasticiteit	Sterkte en samenstelling
Keien	> 200	Visueel onderzoek meting[2)]	Vorm van de korrels: – rond – onregelmatig – hoekig – schilferig – langwerpig – schilferig en – langwerpig Aard v.h. oppervlak: – ruw – glad – gepolijst	(niet van toepassing)
Stenen	200–60			
Grind	grof 60–20 midden 20–6 fijn 6–2	Eenvoudig visueel onderzoek.		Het is mogelijk gecementeerde grindlagen aan te treffen, die op een zacht conglomeraat lijken. Dicht- of vastgepakt grind soms met zand gemengd.
Zand[1)]	grof 2–0,6 midden 0,6–0,2 fijn 0,2–0,06	Alle korrels zijn met blote oog zichtbaar. In droge toestand: weinig cohesie.		Afzettingen kunnen in vastheid variëren tussen: los, vastgepakt en gecementeerd. De opbouw kan zowel homogeen als gelaagd zijn. Vermenging met silt of klei kan dicht- of vastgepakt zand vormen.
Silt[1)]	grof 0,06–0,02 midden 0,02–0,006 fijn 0,006–0,002	Korrels zijn niet zichtbaar, behalve de zeer grove fractie. De beste methode is de *dilatantie-proef*[3)] Silt kan enigszins plastisch zijn. Het kan na opdrogen gemaakkelijk van de vingers worden gewreven. Opgedroogde balletjes kunnen gemakkelijk tussen de vingers worden fijn gewreven.	Niet of slechts weinig plastisch.	Veelal niet plastisch. Kenmerken kunnen overeenkomen met die voor zand voor de grove fractie, of voor zandig silt. Fijne silt benadert klei en kan plastische kenmerken hebben. Dikwijls gemengd met zand. Kan zowel homogeen als gelaagd voorkomen. De consistentie kan variëren van vloeibare silt tot stijve silt tot *siltstone*.

Tabel 8.2 (vervolg)

Basis grondsoort	Korrelgrootte [mm] (NEN 5104)	Identificatie	Kenmerken van de korrels Plasticiteit	Sterkte en samenstelling
Klei	Kleiner dan 0,002 mm. Onderscheid tussen klei en silt niet alleen te baseren op korrelgrootte omdat de belangrijkste fysische eigenschappen slechts een indirecte relatie met de korrelgrootte hebben.	Klei heeft sterke cohesieve en plastische eigenschappen, zonder dilatantie. Een vochtig brokje plakt aan de vingers en voelt glad en vettig aan. Droge brokjes verpoederen niet. Tijdens het droogproces vindt krimp en scheurvormig plaats. Klei heeft ini droge toestand hoge sterkte.	Gemiddelde plasticiteit: schrale klei. Hoge plasticiteit: vette klei.	Zie tabel 8.2. Kan voorkomen met breukvlakken of ongestoord, homogeen, gelaagd of verweerd.
Veen en organische grondstoffen	Varieert	Kenmerkend is over het algemeen de zwarte of bruine kleur, dikwijls een sterke organische geur en de aanwezigheid van vezel- of houtachtige materialen.		Kan zowel in stevige als sponsachtige vorm voorkomen. Sterkte en samenstelling kunnen in horizontale en verticale richting variëren. Nota nemen van de aanwezigheid van gassen!

[1] *Zand* en *silt* zijn uitdrukkingen die gekoppeld zijn aan een korrelgrootte (zie ook NEN 5104). Zand behoeft zich niet tot kwartszand te beperken; er kan ook zand zijn van kalksteen, ijzerertsen, enz.

[2] Ofschoon slechts een visueel onderzoek en een zeefproef mogelijk zijn, dient een indruk gegeven te worden over de korrels en de percentages van de verschillende korrelgroottes.

[2] *Dilatantie* is de eigenschap die silt vertoont als een reactie op schudden. Als een vochtig monster in de open hand wordt gelegd en goed wordt geschud, zal water aan de opervlakte verschijnen, dat een glans veroorzakt. Bij een plastische klei, daarentegen, treedt dit verschijnsel niet op.

nemen uitgevoerd. Door praktische en logistieke problemen kan echter vertraging optreden. In dat geval is het van belang om de eenvou-digste terrein-proeven (torvane,pocket-penetrometer) ter plaatse uit te voeren zodat deze later met laboratorium-proeven kunnen worden vergeleken.
De relatieve dichtheid kan in het terrein worden bepaald door o.a. de *Standard Penetration Test* (SPT). Een belangrijke vergelijki gswaarde in de geotechniek is aan de hand van de SPT bepaald, zie tabel 8.3.

Tabel 8.3 Relatieve dichtheid van zand en grind

relatieve dichtheid	*N*-waarde[1)]
zeer los gepakt	0–4
los gepakt	4–10
normaal gepakt	10–30
dicht gepakt	30–50
zeer dicht gepakt	> 50

[1)] *N*-waarde: aantal slagen voor 300 mm penetratie.

Tabel 8.4 Gebruik van terrein- en laboratorium- proeven (toelichting: zie begin par. 8.1)[1)]

voornaamste grondsoort	korrel-grootte verdeling	korrel-vorm	in situ dichtheid	korrel-dichtheid	relatieve dichtheid	natuurlijk water-gehalte	consi-stentie grenzen	schuif-sterkte	kalk-gehalte	gehalte organ. stof
keie[2)] stenen	vis.	vis.	n.v.t.	lab. op fragm.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
grind	**lab.**	*lab.*	n.v.t.	lab.	**ter.**	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	lab.[3)]	n.v.t.
zand	**lab.**	*lab.*	lab.[4)] op ongeroerd monster	lab.	**ter.**	lab.	n.v.t.	n.v.t.	*lab.*	lab.
leem[5)]	**lab.**	lab.	**lab. op ongeroerd monster**	lab.	**ter. of lab. op ongeroerd monster**	*lab.*[6)]	*lab.*	*lab.*	lab.	lab.
klei	lab.[7)]	n.v.t.	**lab. op ongeroerd monster**	n.v.t.	*ter. of lab. op ongeroerd monster*	**lab.**[6)]	**lab.**	**ter.[8)] en/of lab.**	n.v.t.	lab.
veen en organische grondsoorten	n.v.t.	n.v.t.	lab. op ongeroerd monster	n.v.t.	ter.	lab.	lab.	*ter. en/of lab.*	n.v.t.	lab.

[1)] vis. = visuele inspectie; ter. = terreinproef; lab. = laboratorium-proef; n.v.t. = niet van toepassing. De testprocedures staan beschreve in tabel 8.5.

[2)] Worden beproefd op rots.

[3)] Van toepassing op grind voor bouwmaterialen.

[4)] Bepaling van maximum, minimum en droog gewicht wordt ook aanbevolen.

[5)] Leem bevat vaak vrij veel kleideeltjes die een grote invloed hebben. Dan proeven voor leem èn klei uitvoeren.

[6)] De proeven moeten worden uitgevoerd op monsters onder natuurlijke condities en bij voorkeur op ongeroerde monsters.

[7)] Het kan nuttig zijn om een korrelverdeling te maken van eventuele zand/leem-fractie in de klei. Ook de verhouding zand/leem t.o.v. het totale monster moet da worde bepaald.

[8)] Ook de spreiding in de schuifsterkte moet worde bepaald voor represetatieve monsters.

Tabel 8.5 Testprocedures voor terrein- en laboratoriumproeven (toelichting: zie pag. F2/103)

terreinproef	laboratoriumproef (ter plaatse of in laboratorium)	referentie (NEN, British Standard of equivalent)[1)]
korrelverdeling		
n.v.t.	zeefproef op korrelige gronden sedimentatieproef op cohesieve gronden combinatie op samengestelde gronden, zoals zandige klei evaluatie door vergelijking met standaard grondmonsters d.m.v. microscoop of zeefraster	NEN 2560 BS 1377 (1990) part 2, par 9
korrelvorm		
n.v.t.	vergelijking met standaard grondmonsters en foto's	BS 812
in-situ dichtheid		
Nucleaire meetmethode	De dichtheid van grond zoals het ter plaatse wordt aangetroffen is de verhouding tussen de totale massa en het totale volume van de grond.	1/2 BS 1377 (1990) part 9 2 NEN 5110
korreldichtheid		
n.v.t.	de korreldichtheid is de verhouding tussen de massa van de korrels en het korrelvolume	BS 1377 (1990) part 2, par 8
relatieve dichtheid		
hiervoor kunnen diverse terreinproeven worden gebruikt: 1. Standard Penetration Test (SPT) 2. Sondering (CPT) 3. Andere penetratietesten mits gebaseerd op standaard procedures	n.v.t.	1. NEN 5107 BS 1377 (1990) part 9, par 3 2. NEN 5140 BS 1377 (1990) part 9, par 3

Tabel 8.5 (vervolg)

terreinproef	laboratoriumproef (ter plaatse of in laboratorium)	referentie (NEN, British Standard of equivalent)[1)]
vochtgehalte		
Nucleaire meetmethode	Vochtgehaltebepaling	1. BS 1377 (1990), part 9, par 2 2. NEN 5112 BS 1377 (1990) part 2, par 3
plasticiteit		
n.v.t.	bepaling uitrol- en vloeigrens	BS 1377 (1990) part 2, par 5
schuifsterkte hiervoor kunnen diverse proeven worden gebruikt, bijv.: 1. Terrein vinproef 2. Sondering (CPT) 3. Andere penetratieproeven mits gebaseerd op standaard procedures	4. Torvane 5. Pocket penetrometer 6. Samendrukkingsproef 7. Triaxiaalproef 8. Valconus	1. NAN 5106 2. NEN 5140 3. BS 1377 (1990) part 7, par 3, 7 4. Soil Mechanics in Engineering Practise, 2nd edition, Terzaghi & Peck 5. Soil Mechanics in Engineering Practise, 2nd edition, Terzaghi & Peck 6. BS 1377 (1990) part 6, par 3, 5 7. BS 1377 part 7, 8 NEN 5117 8. ETC5-E1. 97
organische stofgehalte		
	bepaling gehalte organische stof	BS 1377 (1990) part 3, par 3

[1)] Andee nationale normen kunnen ook worden gebruikt.

Tabel 8.6 Methoden van monstername en onderzoek van grondsoorten

grondsoort	kernboring[1)]	lepelboor	nemen van monsters onder water (zeebodem)	steken van ongeroerde monsters[3)]	geroerde representatieve monsters[3)]	dynamische penetratietester[2)]	statische penetratietesten (NL-Zweeds)	terreinvinproef	geofysische methoden
rots	beste methode om cilindr. monsters te krijgen voor beproevingen	n.v.t.	braikbaar om cilindr. monsters tot beperkte diepte te verkrijgen	cilindr. monsters gelden als ongeroerde monsters voor de aangetroffen rots	deeltjes in boorspoeling geschikt om lagen te identificeren	alleen gebruikt in zachte of verweerde rots en in korrel	n.v.t.	n.v.t.	
keien stenen	geschikt voor verkrijgen cilindrische monsters	beitels nodig om harde lagen te doorbreken	n.v.t.	stenen dienen als ongeroerd monster	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	braikbaar om de geologische opbouw over een groter gebied te verkennen; kan zowel dienen om de boorputen te bepalen als om de situatie tussen de boorpunten te bestuderen; deze methoden vereisen wel zorgvuldige interpretatie; goed braikbaar in relatief eenvoudige grondopbouw (zachte toplaag op rots); als er geringe verschillen bestaan tussen de lagen wordt de interpretatie moeilijker
grind	n.v.t.	n.v.t.		niet praktisch voor ongeroerd monster, tenzij gecementeerd	worden bij boringen verkregen in bussen of zakken; om representatief te zijn moet dit afkomstig zijn van een enkele laag; belangrijk voor identificatie van diverse lagen	met een conus geeft dit een redelijke schatting van de pakkingsdichtheid	erg moeilijk om door grof grind te komen	n.v.t.	
zand	n.v.t.	methode voor terreinonderzoek en om representatieve en ongeroerde monsters te krijgen voor (terrein-) proeven	diverse apparaten om representatieve monsters te krijgen, hoewel meestal tot beperkte diepte	er zijn monsterstekers, maar steken ongeroerde monsters blijft moeilijk		geeft een schatting van de pakkingsdichtheid op moment van monster-nemen	goed braikbare methode om in het terrein eigenschappen en niveaus van 'harde' lagen te bepalen; in gebieden met een grote variatie in grondsoorten kan hiermee een goede aanvulling op de boorgegevens worden verkregen	n.v.t.	
leem	n.v.t.			voor cohesief silt kunnen monsterstekers voor klei worden gebruikt;		kan wel worden gebruikt, maar moet zorgvuldig worden geïnterpreteerd		gebruikt om schuifsterkte te schatten, mits zorgvuldig geïnterpreteerd	
klei	n.v.t.			diverse monsterstekers beschikbaar				goed braikbaar om schuifsterkte van alluviale klei te bepalen	
veen e.d.	n.v.t.			diverse monsterstekers beschikbaar				gebruikt om schuifsterkte te schatten, mits zorgv. geïnterpr.	

[1)] Gewoonlijk worden 55 mm (mx of gelijkwaardig) boren gebruikt in massieve rots, en minerale 70 mm bij zachte, verweerde of gebrokn rots. Boren van 100-50 mm zullen naar verwachting nog betere resultaten geven.

[2)] Gerefereerd wordt aan de Standaard Penetration Tes (zie tabel 8.3).

[3)] Monster met zorg behandelen en bewaren. Rotsmonsters moeten indien mogelijk, onder zo natuurlijk mogelijke omstandigheden worden bewaard. Ongeroerde en geroerde grondmonsters, met name van cohesieve grondsoorten, moeten hun natuurlijke vochtgehalte behouden. Monsters zorgvuldig van labels voorzien.

Tabel 8.7 Tolerantiewaarden voor baggerwerktuigen in cm *+ en −*

werktuig	grootte v.h. werktuig	grondsoort										toeslagen		
		grind		zand		slib		harde klei		zachte klei		per m′ getij verschil (verticaal)	dwarsstroom 1,5 m/s (horizontaal)	zware golfstroom (verticaal)
		hor	ver	hor	ver	hor	ver	hor	ver	hor	ver			
emmer-batgger-molen	emmer-inhoud [1]													
	50–200	50	20	100	30	75	15	50	10	75	15	5	50	15
	200–500	75	25	150	40	125	25	75	15	125	25	5	75	25
	500–800	100	35	200	50	150	30	100	20	150	30	5	100	35
snijkop-zuiger-	cutter-diameter [m]													
	0,75–1,50	150	50	200	40	150	30	75	15	100	25	5	50	15
	1,50–2,50	225	75	250	50	200	40	100	20	150	40	5	75	25
	2,50–3,50	300	100	300	60	250	50	150	30	200	50	5	100	35
sleep-hooper-zuiger	laadruim-inhoud [m^3]													
	300–1500	1000	30	1000	25	1000	30	1000	20	1000	30	5	250	0
	1500–3000	1500	60	1500	50	1500	40	1500	30	1500	40	5	500	0
	3000–9000	2000	80	2000	75	2000	50	2000	40	2000	50	5	500	0

Tabel 8.8 Indicatieve waarden van in situ dichtheden [kg/m^3]

hoofdnaam	bijmengsel	consistensie/ relatieve dichtheid	dichtheid bij natuurlijk vochtgehalte	dichtheid bij met water verzadigde grond
grind	zwak ziltig	los matig dicht	1700 1800 1900 of 2000	1900 2000 2100–2200
	sterk ziltig	los matig dicht	1800 1900 2000–2100	2000 2100 2200–2250
zand	schoon	los matig dicht	1700 1800 1900 of 2000	1900 2000 2100–2200
	zwak ziltig kleiïg sterk ziltig kleiïg		1800 of 1900 1800 of 1900	2000–2100 2000–2100
leem	zwak zandig	slap matig vast		1900 2000 2100–2200
	sterk zandig			1900-2000
klei	schoon	slap matig vast		1400 1700 1900–2000
	zwak zandig	slap matig vast		1500 1800 2000–2100
	sterk zandig			1800–2000
	organisch	slap matig		1300 1500–1600

Tabel 8.8 (vervolg)

hoofdnaam	bijmengsel	consistensie/ relatieve dichtheid	dichtheid bij natuurlijk vochtgehalte	dichtheid bij met water verzadigde grond
veen	niet voorbelast	slap		1000–1200
	matig voorbelast	matig		1200–1300

Opmerking
De relatieve dichtheid R_n voor zand en grind:

Los	0	$<$	R_n	$<$	0,33
Matig	0,30	$<$	R_n	$<$	0,67
Dicht	0,67	$<$	R_n	$<$	1,00

De consistentie (index) voor leem, klei en veen:

Slap	0	$<$	I_c	$<$	0,5
Matig	0,5	$<$	I_c	$<$	0,75
Vast	0,75	$<$	I_c	$<$	1,00

Relatieve dichtheid:

$$R_n = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$$

waarin:
n_{max} = maximum poriëngehalte
n_{min} = minimum poriëngehalte
n = in situ poriëngehalte

Consistentie:

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_l - w_p}$$

waarin:
w_l = vloeigrens
w_p = uitrolgrens
w = natuurlijk watergehalte van de grond

Tabel 8.9 Natuurlijk talud [graden]

	droog	vochtig	met	water verzadigd	onder water
leem	45	30	25	17	17
klei	40	30	25	20	20
zand	35	40	30	25	25
grind	35	35	30	26	26

Tabel 8.10 Rijpingsklassen van slibrijke depots

rijpingsklasse	benaming	rijpings-factor (n)[1)]	consistentie	kleverigheid
1	ongerijpt	$> 2{,}0$	zeer slap; loopt tussen vingers door	kleeft sterk
2	bijna gerijpt	1,4–2,0	slap; loopt bij knijpen tussen de vingers door	kleeft
3	half gerijpt	0,9–1,4	matig slap; loopt nog goed door de vingers bij knijpen	buitenkant bal kleeft aan vingers
4	bijna gerijpt	0,5–0,9	matig stevig; knijpt moeilijk door vingers	plakt bijna niet
5	gerijpt	$< 0{,}5$	stevig; knijpt niet tussen de vingers door	plakt niet

[1)] Rijpingsfactor (n): de hoeveelheid water in grammen per gram lutum.

8.2 Hydraulische formules

p_m = totale leidingweerstand [Pa]
p_w = schoonwaterweerstand [Pa]
C_t = transportconcentratie
d_m = gemiddelde korreldiameter [μm]
D = diameter leiding [m]
λ = wrijvingscoëfficiënt
v_{gem} = gemiddelde (mengsel)snelheid [m/s]
A = experimentele constante (180)

$\sqrt{C_x}$ = fictieve sleepcoëfficiënt
g = versnelling van de vrije val [m/s^2]
ρ_w = dichtheid water [kg/m^3]
ρ_m = dichtheid mengsel [kg/m^3]

Leidingweerstand

Water:

$$p_w = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \tfrac{1}{2}\, \rho_w \cdot v_{gem}^2$$

Slib en zeer fijn zand ($< 150\ \mu$m):

$$p_m = p_w \cdot \rho_m$$

Zand (150–750 μm):

$$p_m = p_w + \rho_w \cdot g \cdot C_t \cdot (2,59 d_m - 0,37) \cdot \frac{1}{v_{gem}} \text{ (Führböter)}$$

Grof zand ($> 750\ \mu$m) en grind:

$$p_m = p_w + p_w \cdot C_t \cdot A \cdot \left(\frac{g \cdot D}{v_{gem}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{C_x}} \right)^{3/2} \qquad \text{(Durand)}$$

Pompvacuüm

Uit de toepassing van de wet van Bernoulli volgt het *pompvacuüm* (pomp boven of onder water):

$$p_{vac} = \rho_w \cdot g \cdot h_z - \rho_m \cdot (h_z - h_p) \cdot g - \zeta \cdot \rho_m \cdot v_z^2$$

In de praktijk varieert het maximum pompvacuüm tussen 70 en 80 kPa.

waarin:
h_z = zuigdiepte t.o.v. waterniveau [m]
h_p = pomppositie t.o.v. waterniveau (bovenwater −; onderwater +) [m]
ζ = weerstandscoëfficiënt zuigleiding (intredeverliezen + zuigleidingsweerstand)
v_z = snelheid in zuigleiding [m/s]

Statische opvoerhoogte ten opzichte van hart van de pomp

$$p_{stat} = \rho_m \cdot g \cdot (h_o + h_p)$$

waarin: h_o = opvoerhoogte t.o.v. waterniveau [m]

Totale pompdruk

$$p = p_m + p_{vac} + p_{stat}$$

waarin: p = manometrische druk [Pa]

Pompvermogen

$$P = \frac{Q_m \cdot p}{\eta}$$

waarin: P = vermogen [W]
Q_m = mengseldebiet [m^3/s]
η = pomprendement

Leidingproductie op het stort

$$Q_s = C_s \cdot Q_m$$

waarin:
C_s = 'schijnbare concentratie'

$$= \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_k - \rho_w} \cdot \frac{1}{1 - n}$$

Q_s = debiet in situ [m^3/s]
ρ_k = korreldichtheid [kg/m^3]
n = poriëngehalte

Uitlevering

voor met water verzadigde grond

$$B = \frac{\rho_1 - \rho_w}{\rho_2 - \rho_w}$$

waarin:
ρ_1 = in situ dichtheid voor ontgraven [kg/m^3]
ρ_2 = in situ dichtheid op het stort of in beunschip [kg/m^3]

Of:

$$B = \frac{1 - n_1}{1 - n_2}$$

waarin:
n_1 = poriëngehalte voor ontgraven
n_2 = poriëngehalte na ontgraven

Droge stofgehalte

$$\%\ ds = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_k - \rho_w} \cdot \frac{\rho_k}{\rho_m} \cdot 100$$

waarin:

ρ_m = dichtheid van met water verzadigde grond [kg/m^3]
ρ_k = korreldichtheid [kg/m^3]
ρ_w = dichtheid water [kg/m^3]

Literatuur

GRONDMECHANICA (par. 1)
- Lambe T., R. Whitman
  Soil Mechanics, SI Version
  New York, John Wiley & Sons.
- Veen, C.v.d.
  Grondmechanica
  Delft, Waltman.

FUNDERINGEN (par. 2)
- *Geprefabriceerde betonnen heipalen*
  Woerden, Prepal, brochures 1, 2 en 3.
- *SBR-rapport,Handboek Fundering*'s-Gravenhage,
  Ten Hagen & Stam.

GRONDWERKEN (par. 3)
- Beijers, G.M.H.
  (zie onder WEGENBOUW)
- Gillebaard, S.
  Mechanisch groot grondverzet
  Delft, Technische Universiteit.

– SBW
Machines voor de wegenbouw
Gouda, Stichting Bevordering Wegenbouw.
– Span, H.
Verkeersbouwkunde
Delft, Technische Universiteit.

BRONBEMALING (par. 4)

– *Bemaling van bouwputten*
Rotterdam, SBR-publicatie.
– Fraanje, M.J.
Bronbemaling
Amsterdam, Agon Elsevier.
– Herth, W., E. Arndts
Theorie und Praxis der Grundwasserabsenkung
Berlijn, Ernst und Sohn.
– Huisman, L.
Groundwater Recovery
London, MacMillan.
– Kruseman, G.P., N.A. de Ridder
Analysis and evaluation of pumping test data
Wageningen, ILRI.
– Langguth, H.R., R. Voigt
Hydrologische methoden
Heidelberg, Springer-Verlag.
– *Steady flow of Groundwater towards Wells*
's-Gravenhage, TNO, Commissie voor hydrologisch onderzoek.

CULTUURTECHNIEK EN RIOLERINGEN (par. 5 en 6)

– *Cultuurtechnisch vademecum*
Utrecht, Cultuurtechnische Vereniging
– Koot, A.C.J.
Inzameling en transport van rioolwater
Delft, Waltman.
– Kuipers, S.S.
Bodemkunde
Culemborg, Educaboek.
– *Leidraad Riolering*
Alphen a/d Rijn, Samsom H.D. Tjeenk Willink

– Locker, W.P., e.a.
Bodemnatuurkunde
's-Hertogenbosch, Malmberg.
– Nortier, I.W.
Hydraulische berekeningen
Culemborg, Educaboek.
– Scheffer, W.J.H.
Het ontwerpen van sanitaire installaties
Arnhem, Misset
– Segeren, W.A. e.a.
SBR-rapport 9, Bouwrijp maken van terreinen
Deventer, Kluwer.

WEGENBOUW (par. 7)

– Beijers, G.M.H.
Wegenbouw
's-Gravenhage, Nederlandse Vereniging van Wegenbouwers.
– *Bijzondere Asfaltverhardingen*
Breukelen, Vereniging voor Bitumineuze Werken.
– *Standaard 1995 – Standaard RAW Bepalingen*
Ede, Stichting Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Water- en Wegenbouw en de Verkeerstechniek.

BAGGERWERKEN (par. 8)

– Nortier, I.W.
(zie onder CULTUURTECHNIEK)
– Zie verder de in de tekst aangehaalde publikaties.

Berekenen van bouwconstructies F3

1 Algemeen
- 1.1 Normen
- 1.2 Veiligheid en bruikbaarheid bouwconstructies
- 1.3 Belastingen
- 1.4 Vervormingen
- 1.5 Waarden voor de permanente belasting
- 1.6 Waarden voor de veranderlijke belasting
- 1.7 Waarden voor de windbelasting
- 1.8 Sneeuwbelasting op daken

2 Houtconstructies
- 2.1 Lijst van symbolen
- 2.2 Rekenwaarden van materiaaleigenschappen
- 2.3 Berekening m.b.t. uiterste grenstoestand
- 2.4 Berekening m.b.t. bruikbaarheidsgrenstoestand
- 2.5 Verbindingen
- 2.6 Profielgegevens van vierzijdig geschaafd Europees naaldhout

3 Steenconstructies
- 3.1 Algemeen
- 3.2 Draagvermogen van steenconstructies
- 3.3 Belastingen
- 3.4 Materiaaleigenschappen
- 3.5 Krachtsverdeling
- 3.6 Dimensionering (toetsing)
- 3.7 Eenvoudige ontwerpregels

4 Betonconstructies
- 4.1 Lijst van symbolen
- 4.2 Betontechnologie
- 4.3 Voorgeschreven belastingscombinaties

4.4 Gegevens voor de berekening
4.5 Verankeringslengte betonstaal
4.6 Schematisering en opleglengten
4.7 Betondekking
4.8 Dimensionering
4.9 Berekening, liggers, platen en wandliggers

5 Staalconstructies
5.1 Lijst van symbolen
5.2 Materiaalfactor
5.3 Aansluitingen staalconstructies
5.4 Berekeningen volgens elasticiteitsleer
5.5 Verbindingen met schroefbouten in ruime gaten
5.6 Pen-gatverbindingen
5.7 Gelaste verbindingen
5.8 Instabiliteit gedrukte staven
5.9 Stabiliteit platen (plooien)
5.10 Stabiliteit op buiging belaste staven (kip)

1 Algemeen

1.1 Normen

De berekening van *bouwconstructies* dient te worden gebaseerd op normen. **Uitgebreide** gegevens, richtlijnen en voorschriften voor berekeningen zijn vastgelegd in de normen uit de zogenaamde TGB-reeks: *Technische Grondslagen voor Bouwconstructies* 1990 (NEN 6702) Deze normen voldoen aan de uitgangspunten zoals vastgelegd in het *Bouwbesluit*. Normen zijn verkrijgbaar bij het **Nederlands Normalisatie-instituut** te Delft.

Voor de berekening van bouwconstructies zijn vooral de volgende normen in de TGB-reeks van belang:

NEN 6700. Algemene basiseisen. De basiseisen betreffen de betrouwbaarheid en bruikbaarheid voor alle bouwconstructies, ongeacht het materiaal waarvan ze zijn gemaakt. Deze basiseisen zijn uitgewerkt in NEN 6702 (zie hieronder) en in de normen voor diverse constructiematerialen.
NEN 6701. Namen en symbolen voor grootheden.
NEN 6702. Belastingen en vervormingen.
NEN 6706. Brugbelastingen.
NEN 6707. Bevestiging van dakbedekkingen.
NEN 6710. Aluminiumconstructies.
NEN 6740. Geotechniek.
NEN 6741/6742. Uitvoeringsnormen.
NEN 6743/6744. Berekeningsnormen.
NEN 6760. Houtconstructies.
  NPR 6761. Rekenregels.
NEN 6790. Steenconstructies.
  NPR 6791. Rekenregels.
NEN 6720. Betonconstructies.
  NEN 5950. Voorschriften Beton Technologie.
  NEN 6722. Voorschriften Beton Uitvoering.
NEN 6770. Staalconstructies.
  NEN 6771. Stabiliteit.
  NEN 6772. Verbindingen.
NEN 2680. Voorschriften constructies in glas.

Meer informatie is ook te vinden in de modelbladen voor systeemvloeren, certificaten voor voorspanstaal, voorspansystemen, dakplaten, gelijmd-houten constructies, enz. Zie hiervoor de *KOMO-gids* (uitgegeven door de KOMO, Rijswijk).

Uitgangpunten
In de TGB 1990 wordt de betrouwbaarheid van bouwconstructies getoetst volgens de zogenaamde *semi-probabilistische beschouwing*. Dit is een betrouwbaarheidsanalyse die uitgaat van een voorgeschreven basisbelasting met een *belastingfactor* γ_{f} en de sterkte van een constructie met een *materiaalfactor* γ_{m}. Hierbij moet bij de beoordeling van de veiligheid en bruikbaarheid van een bouwconstructie worden aangetoond dat geen der *grenstoestanden* wordt overschreden.
De semi-probabilistische beschouwing vervangt de voorheen gebruikelijke deterministische berekeningsmethode waarbij uitgegaan werd van een bepaalde veiligheidscoëfficiënt γ tot het punt van bezwijken van een bouwconstructie.

1.2 Veiligheid en bruikbaarheid bouwconstructies

Een bouwconstructie moet gedurende een *vooraf vastgestelde referentieperiode* en met een *vooraf vastgestelde mate van betrouwbaarheid* aan de *gestelde eisen ten aanzien van veiligheid en bruikbaarheid* voldoen.
De *cursieve* gedeelten worden hieronder nader toegelicht.

Veiligheidsklassen
Bouwwerken kunnen in verschillende *veiligheidsklassen* worden ingedeeld:
- *Klasse 1.* Tuinbouwkassen, schuren, landbouwloodsen, opslagloodsen en andere vormen van overkappingen of bouwwerken, waarbinnen, waaronder of waarin zich tijdens extreem slechte weersomstandigheden geen personen behoeven op te houden. Bouwwerken tijdens de bouwfase en hulpconstructies.
- *Klasse 2.* Niet in woongebouw gelegen woningen, recreatieverblijven, woonwagens en alle andere bouwwerken die niet in klasse 1 of 3 vallen.

– *Klasse 3.* Alle gebouwen met meer dan twee bouwlagen behalve van niet in woongebouwen gelegen woningen. Alle bouwwerken waarin een toegankelijkheidssector ligt. Alle bouwwerken voor primaire nutsvoorzieningen of een primaire maatschappelijke/culturele functie.

Referentieperiode

De *referentieperiode* is het beoogde tijdsbestek waarin een bouwconstructie moet blijven voldoen aan de gestelde eisen. Er wordt een onderscheid gemaakt in:

– *Bouwfase:* referentieperiode minstens 1 jaar of de duur van de bouwfase.
– *Gebruiksfase:* referentieperiode voor gebouwen in veiligheidsklasse (zie hierna) 1 minimaal 15 jaar, en veiligheidsklasse 2 en 3 minimaal 50 jaar.

Eisen ten aanzien van veiligheid en bruikbaarheid

Een constructie kan in een toestand raken dat niet meer wordt voldaan aan één of meer van de betrouwbaarheidseisen. Al deze toestanden zijn *grenstoestanden* waarbij worden onderscheiden:

– Uiterste grenstoestanden.
– Bruikbaarheidsgrenstoestanden.

Bij deze grenstoestanden zijn de rekenwaarden van een aantal basisvariabelen van belang:

Rekenwaarde voor de *belastingen*:

$$F_{\mathrm{d}} = \gamma_{\mathrm{f}} \cdot F_{\mathrm{rep}}$$

Rekenwaarde voor *materiaaleigenschappen*:

$$M_{\mathrm{d}} = M_{\mathrm{rep}} / \gamma_{\mathrm{m}}$$

Rekenwaarde voor de *geometrie*:

$$GE_{\mathrm{d}} = GE_{\mathrm{nom}} \pm \Delta GE$$

waarin:
F_{rep} = representatieve waarde van belastingen
M_{rep} = representatieve waarde van materiaaleigenschappen
GE_{nom} = nominale waarde geometrische parameters

γ_f = belastingsfactor
γ_m = materiaalfactor
ΔGE = toegevoegde geometrische grootheid

Gezien de gestelde eisen aan een bouwconstructie (zie begin van deze par 1.2) dient voor een grenstoestand te worden voldaan aan:

$$S(F_d, GE_d, M_d) \leqq R(F_d, GE_d, M_d)$$

waarin:
S = belastingsfunctie (solicitation)
R = sterktefunctie (resistance)

1.3 Belastingen

Indeling belastingen

Bij de indeling van *belastingen* worden de volgende categorieën gehanteerd:
- permanent – veranderlijk – bijzonder (zie opmerking hierna);
- plaatsgebonden – vrij;
- statisch – dynamisch.

Soms is noodzakelijk belastingen te onderscheiden in:
- begrensd – niet-begrensd;
- korte duur – lange duur;
- wel of geen vermoeiing veroorzakend.

Veranderlijke en bijzondere belastingen kunnen een exterme waarde hebben of een momentane waarde. Onder de *momentane waarde* van een belasting verstaat men de waarde die men zeer waarschijnlijk op een willekeurig tijdstip zal aantreffen, met een overschrijdingskans van 5% (vergelijk permanent aanwezig deel van de veranderlijke belasting). Het momentane deel wordt in de NEN 6702 met een factor ψ aangegeven.

Rekenwaarde van de belasting

De belasting moet voor de te beschouwen grenstoestand in de berekening zijn ingevoerd via de *rekenwaarde*:

$$F_d = \gamma_{f;i} \cdot F_{rep}$$

waarin:
F_d = rekenwaarde van de belasting
F_{rep} = representatieve waarde van de belasting
$\gamma_{f;i}$ = belastingfactor (zie tabel 1.1),
te onderscheiden in (index i wordt g, q resp. a):
$\gamma_{f;g}$ = rekenwaarde voor *permanente* belasting
$\gamma_{f;q}$ = rekenwaarde voor *veranderlijke* belasting
$\gamma_{f;a}$ = rekenwaarde voor *bijzondere* belasting

Zie tevens par. 3 *Steenconstructies*, par. 3.1.

Tabel 1.1 Belastingfactoren in uiterste grenstoestand en bruikbaarheidsgrenstoestand

combinaties	veiligheids-klasse	permanente belasting $\gamma_{f;g}$		veranderlijke belasting $\gamma_{f;g}$	bijzondere belasting $\gamma_{f;g}$
		normaal	gunstig werkend		
uiterste grenstoestand					
fundamenteel	1	1,2	0,9	1,2	–
	2	1,2	0,9	1,3	–
	3	1,2	0,9	1,5	–
	1,2,3	1,35	0,9	–	–
bijzonder	1,2,3	1,0	1,0	1,0	1,0
bruikbaarheidsgrenstoestand					
incidenteel	1,2,3	1,0	1,0	1,0	–
momentaan	1,2,3	1,0	1,0	1,0	–

1.4 Vervormingen

Onder *vervormingen* worden verstaan: doorbuigingen, opbuigingen, hoekverdraaiingen, krommingen, verlengingen, verkortingen en verplaatsingen van statische of dynamische aard. Vervormingen mogen het aanzien van een bouwwerk en de constructie niet schaden, noch het doelmatig functioneren ervan belemmeren. Tabel 1.2 geeft een overzicht van de gedefinieerde vervormingseffecten en toegestane vervormingswaarden.

Tabel 1.2 Maximaal toegestane vervormingswaarden bij aangegeven belastinggevallen

	bijkomende doorbuiging		doorbuiging in eindtoestand		afschot	trilling
	vloer	dak	vloer	dak	blijvend	
maximaal toegestane vervormingswaarde bij aangegeven (×) belastinggevallen	0,003[1)2)]	0,004[1)]	0,004[1)]	0,004[1)]	–	f[3)]
direct optredende vervorming t.g.v.:						
– *eigen gewicht en rustende* belasting (permanente belasting)			×	×	×	×
– extreme waarden *veranderlijke* belasting (gelijkmatig verdeeld of puntlast)	×	×	×	×	×	
– *momentane* waarden *veranderlijke* belasting (gelijkmatig verdeeld)						×
vertraagd optredende vervorming t.g.v:						
– *eigen gewicht* en *rustende* belasting (permanente belasting)	×	×	×	×	×	×
– permanent aanwezige deel *momentane* belasting (60%)	×	×	×	×	×	×
zeeg (of **toog**)[4)]			×	×	×	

[1)] Van de overspanning (l_{rep}).
[2)] Voor vloeren met gemetselde scheidingswanden 0,002.
[3)] Bij een eigen frequentie van 3 Hz: 10 mm (lopende mensen).
Bij een eigen frequentie van 5 Hz: 28 mm (springende mensen).
Bij weinig of niet belopen vloeren: geen eis.
Bij permanente belasting (gelijkmatig verdeeld) $\geqslant$ 5 kN/m^2 of puntlast $\geqslant$ 150 kN: geen eis.
[4)] Een meestal opwaartse ronding die tijdens de uitvoering met opzet wordt aangebracht.

1.5 Waarden voor de permanente belasting

Constructiedelen en bouwwerkdelen

Eigen gewichten van constructiedelen en gewichten van bouwwerkdelen zijn te berekenen met de gegevens uit hoofdstuk E1 *Materialen*. Zie ook tabel 1.3. Met tabel 1.3 is als volgt het *gewich* te berekenen, bijv. voor een houten vloer met houten balken is het gewicht per oppervlakte 30 kg/m^2 $\times$ 10 m/sec^2 $=$ 300 N/m^2.

Wanden in woonhuizen

De gewichtsverdeling van *wanden in woonhuizen* mag onder bepaalde voorwaarden als volgt in rekening worden gebracht:

– Als het eigen gewicht van de wand minder dan 3 kN/m bedraagt en de vloer zo is geconstrueerd dat voldoende lastspreiding loodrecht op de wand kan optreden, mag van een gelijkmatig verdeelde belasting van 0,5 kN/m^2 over de gehele vloer worden uitgegaan.

Tabel 1.3 Gewicht per oppervlakte voor een aantal samengestelde constructies [kN / m^2]

constructies en afwerkingen	gewicht per oppervlakte [kN/m^2]
houten vloer met houten balken (zonder plafond) bij ten hoogste 4,5 m overspanning	0,30
plafond van gips of cementmortel op riet, steen of metaalgaas met inbegrip van latten en tegels	0,35
idem met plafondhangers bij ten hoogste 4,5 m overspanning	0,40
pannendak met latten, tengels, bebording en gordingen	0,75
pannendak met latten, sporen en gordingen	0,70
leiendak met bebording, sporen en gordingen	0,55
zinken dak met bebording en gordingen	0,30
mastiek-dakbedekking, bestaande uit 2 lagen asfaltbitumenvilt of asfaltteerviltpapier en een laag papier met bebording en balken; niet inbegrepen de afdekking met grind	0,30
gegalvaniseerde golfplaat incl. bevestigingsmiddelen en gordingen	0,15
asbestcementgolfplaat incl. bevestigingsmiddelen en gordingen	0,25

– Wanneer een balk of vloer door een ononderbroken wand wordt belast kan op grond van gewelfwerking voor de berekening van de buigende momenten en de doorbuiging de belasting worden gereduceerd. Hierbij dient niet te worden vergeten dat de eindopleggingen in staat moeten zijn de ten gevolge van de gewelfwerking optredende spatkrachten op te nemen.

1.6 Waarden voor de veranderlijke belasting

Verticale veranderlijke belasting
Zie tabel 1.4.

Horizontale veranderlijke belasting
Voor de *horizontale* veranderlijke belasting geldt het volgende:
– Bij trappen, balkons e.d. (èn hun bevestigingen) moet rekening worden gehouden met de ongunstigste van de onderstaande veranderlijke belastingen, die op de bovenregel van de balustrade of leuning aangrijpen:
  • een horizontale gelijkmatige belasting van 0,5 kN/m;
  • een enkele horizontale puntlast van 1 kN.
– Bij leuningen van bedieningstrappen en -bordessen voor technische installaties moet een horizontale veranderlijke belasting van 0,5 kN/m (aangrijpend op de bovenregel) worden aangehouden.
– In bepaalde gevallen moet men rekening houden met het optreden van een veranderlijke horizontale belasting, bijv. als gevolg van remkrachten. De veranderlijke horizontale belasting die op kan treden door bewegende mensenmassa's (bij tribunes e.d.) moet in twee onderling loodrechte richtingen in rekening worden gebracht. Als indicatie kan 10% van de veranderlijke belasting worden aangehouden. Eigenlijk is een dynamische berekening gewenst.

Tabel 1.4 Gegevens veranderlijke verticale belastingen op vloeren en daken voor verschillende categorieën

	extreem p_{rep} [kN/m^2]	momentaan ψ	geconcentreerd F_{rep} [kN]	extreem p_{rep} [kN/m^2]	momentaan ψ	geconcentreerd F_{rep} [kN]
	vloeren			**ontsluitingswegen**		
vlieringen	0,7	0,7	–	2,0	0,25	3
woningen	1,75	0,4	3	2,0	0,25	3
kantoren e.d.	2,5–3,5	0,5	3	3,0	0,25	3
winkelgebouwen	4,0	0,4	7	4,0	0,25	7
stations e.d.	4,0–5,0	0,25	7	5,0	0,25–1,0	7
tribunes	5,0	0,25	7	5,0	0,25–1,0	7
industriële gebouwen	$\geqq$ 5,0	0,8	$\geqq$ 10	4,0	0,25	7
bibliotheken e.d.		1,0	7	3,0	0,25	3
	balkons e.d			**balustraden**		
vlieringen	2,5	0,25	3	0,5	0	1
woningen	2,5	0,25	3	0,5	0	1
kantoren e.d.	2,5–3,0	0,25	3	0,5	0	1
winkelgebouwen	2,5–4,0	0,25–0,4	3–7	0,5	0	1
stations e.d.	2,5–5,0	0,25–1,0	3–7	3,0	0	1
tribunes	2,5–5,0	0,25–1,0	3–7	3,0	0	1
industriële gebouwen	2,5–5,0	0,25–0,8	3–10			
bibliotheken e.d.	2,5	0,25–1,0	3–7	0,5	0	1
overig				0,8	0	1
	opslagruimten					
winkelgebouwen	5,0	0,5	7			
overig	5,0	1,0	7			
	parkeergarages					
auto's $\leqq$ 2500 kg	2,0	0,7	10			
2500–12000 kg	5,0	0,7	40			
	daken					
personen en materiaal	1,0	0	1,5			

1.7 Waarden voor de windbelasting

Windbelasting

De *windbelasting* is een veranderlijke, vrije belasting. Voor het bepalen van de krachtverdeling in bouwconstructies moet de windbelasting worden beschouwd als een quasi-statische belasting. In belastingscombinaties geldt normaliter voor de windbelasting: $\psi = 0$.

Stuwdruk

Tabel 1.5 geeft waarden voor de door de wind veroorzaakte *stuwdruk* p_w werkend in de windrichting. Hierbij worden de gebieden volgens figuur 1.1 onderscheiden. Bij de grens tussen de gebieden moet lineair worden geïnterpoleerd: van een punt in gebied I (resp. II), 5 km vanaf de grenslijn met gebied II (resp. III), naar de grenslijn zelf.

De ongunstigste combinatie van gelijktijdig optredende (verdeelde) windbelastingen moet in rekening worden gebracht volgens (zie ook figuur 1.2):

$$p_{rep} = C_{dim} \cdot C_i \cdot C_{eq} \cdot \varphi_1 \cdot p_w$$

$$F_i = A \cdot p_{rep}$$

waarin:

p_{rep} = windbelasting door winddruk, -zuiging, -wrijving en over- of onderdruk [kN/m^2]

C_{dim} = factor voor afmetingen bouwwerk (zie ook hierna), te bepalen volgens NEN 6702, art. 8.6.3

C_i = windvormfactoren te onderscheiden (index i wordt vervangen) in:

C_{pe} = windvormfactor voor externe druk of zuiging op vlakken (zie ook figure 1.3 en 1.4)
positief: belasting gericht naar het vlak (druk)
negatief: belasting vanaf het vlak (zuiging)
te bepalen volgens NEN 6702, art 8.6.4.1, 8.6.4.2 en 8.6.4.6

$C_{pe;loc}$ = windvormfactor voor lokale situaties in vlakken, te bepalen volgens NEN 6702, art. 8.6.4.3

C_{pi} = windvormfactor voor interne over- of onderdruk, te bepalen volgens NEN 6702, art. 8.6.4.4

C_f = windvormfactor voor wrijving
gladde oppervlakken: 0,01
oppervlakken met uitsteeksels $\leqslant$ 40 mm: 0,02
oppervlakken met uitsteeksels $>$ 40 mm: 0,04

C_t = windvormfactor voor een combinatie van bovengenoemde factoren en dusdanig dat de totale windbelasting als één geheel wordt beschouwd, te bepalen volgens NEN 6702, art. 8.6.4.2 en 8.6.4.6

C_{eq} = drukvereffeningsfactor, te bepalen volgens NEN 6702, art. 8.6.5

φ_1 = vergrotingsfactor waarmee de dynamische invloed van wind (in de windrichting) in rekening wordt gebracht, te bepalen volgens NEN 6702, art. 8.6.6

Invloed afmetingen bouwwerk

Een bouwwerk met zekere afmetingen zal de invloed van windvlagen niet tegelijkertijd over het gehele oppervlak ondervinden. Voor bouwwerken met een rechthoekige projectie in de windrichting dient de factor C_{dim} (zie ook hiervoor) als volgt te worden bepaald:

$$C_{dim} = \frac{1 + 7 \cdot I(h)/\sqrt{B}}{1 + 7 \cdot I(h)} \qquad C_{dim} \leqq 1{,}0$$

waarin:

B = $1/(0{,}94 + 0{,}021h^{\frac{2}{3}} + 0{,}029b^{\frac{2}{3}})$

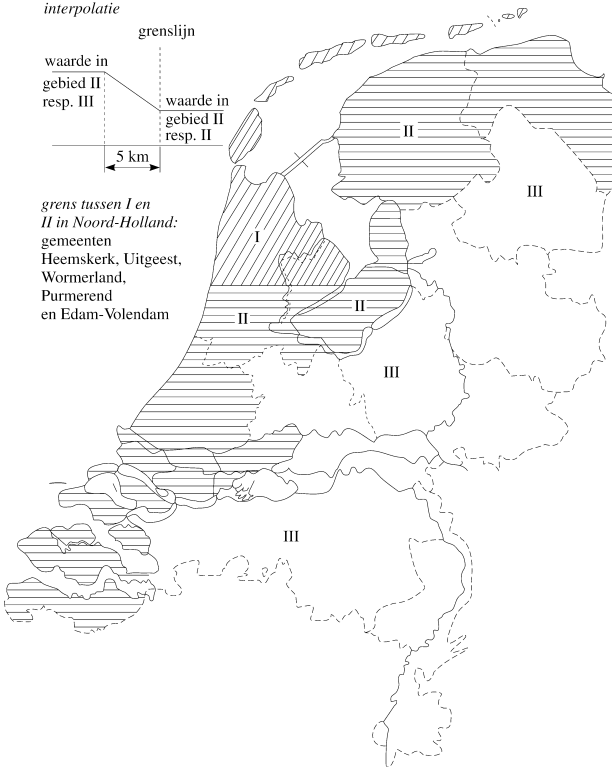
$I(h)$ = $1/\{\ln(h/0{,}2)\}$

h, b = verticale afmeting (h) resp. gemiddelde breedte (b), loodrecht op de windrichting, van dat deel van het bouwwerk dat de belasting afdraagt op het beschouwde constructiedeel [m]

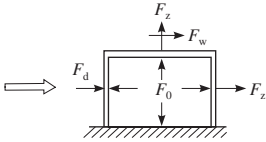
Tabel 1.5 Door de wind op hoogte h veroorzaakte extreme waarde van de stuwdruk p_w [kN/m^2][1)]

h	gebied I		gebied II		gebied III	
[m]	onbebouwd	bebouwd	onbebouwd	bebouwd	onbebouwd	bebouwd
≦ 2	0,64	0,64	0,54	0,54	0,46	0,46
3	0,70	0,64	0,54	0,54	0,46	0,46
4	0,78	0,64	0,62	0,54	0,49	0,46
5	0,84	0,64	0,68	0,54	0,55	0,46
6	0,90	0,64	0,73	0,54	0,59	0,46
7	0,95	0,64	0,78	0,54	0,63	0,46
8	0,99	0,64	0,81	0,54	0,67	0,46
9	1,02	0,64	0,85	0,54	0,70	0,46
10	1,06	0,70	0,88	0,59	0,73	0,50
11	1,09	0,76	0,91	0,64	0,76	0,54
12	1,12	0,81	0,94	0,68	0,78	0,58
13	1,14	0,86	0,96	0,72	0,80	0,61
14	1,17	0,90	0,99	0,76	0,82	0,64
15	1,19	0,94	1,01	0,79	0,84	0,67
16	1,21	0,98	1,03	0,82	0,86	0,70
17	1,23	1,02	1,05	0,85	0,88	0,72
18	1,25	1,05	1,07	0,88	0,90	0,75
19	1,27	1,08	1,09	0,90	0,91	0,77
20	1,29	1,11	1,10	0,93	0,93	0,79
25	1,37	1,23	1,18	1,03	1,00	0,88
30	1,43	1,34	1,24	1,12	1,06	0,95
35	1,49	1,43	1,30	1,20	1,11	1,02
40	1,54	1,50	1,35	1,26	1,15	1,07
45	1,58	1,57	1,39	1,32	1,19	1,12
50	1,62	1,62	1,43	1,37	1,23	1,16
55	1,66	1,66	1,46	1,42	1,26	1,20
60	1,69	1,69	1,50	1,46	1,29	1,24
65	1,73	1,73	1,53	1,50	1,32	1,27
70	1,76	1,76	1,56	1,54	1,34	1,31
75	1,78	1,78	1,58	1,57	1,37	1,33
80	1,81	1,81	1,61	1,60	1,39	1,36
85	1,83	1,83	1,63	1,63	1,41	1,39
90	1,86	1,86	1,65	1,65	1,43	1,41
95	1,88	1,88	1,68	1,68	1,45	1,44
100	1,90	1,90	1,70	1,70	1,47	1,46
110	1,94	1,94	1,74	1,74	1,51	1,50
120	1,98	1,98	1,77	1,77	1,54	1,54
130	2,01	2,01	1,80	1,80	1,57	1,57
140	2,04	2,04	1,83	1,83	1,60	1,60
≧ 150	2,07	2,07	1,86	1,86	1,62	1,62

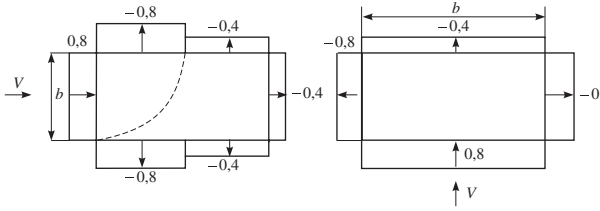
[1)] Voor de gebiedsindeling, zie figuur 1.1
Bij twijfel over bebouwd/onbebouwd, zie NEN 6702, art. 8.6.2.3.



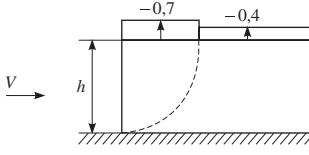
Figuur 1.1 Te onderscheiden stuwdrukgebieden in Nederland



Figuur 1.2 Door de wind veroorzaakte krachten op (onderdelen van) bouwwerken



Figuur 1.3 Windvormfactoren C_{pe} voor gevels van gebouwen met een rechthoekige plattegrond (delen $>$ 10 m^2)



Figuur 1.4 Windvormfactoren C_{pe} voor daken van gebouwen met een rechthoekige plattegrond met een hellingshoek $< 10^\circ$ (delen $>$ 10 m^2)

1.8 Sneeuwbelasting op daken

Sneeuwbelasting

De sneeuwbelasting op een dakoppervlak (verticale projectie op het grondvlak) wordt berekend met:

$$p_{rep} = C_i \cdot p_{sn:rep}$$

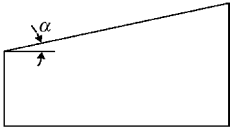
waarin:
P_{rep} = sneeuwbelasting op het dak [kN/m^2];
C_i = vormfactoren [–];
$p_{sn;rep}$ = sneeuwbelasting op de grond [kN/m^2].

Sneeuwbelasting op de grond:

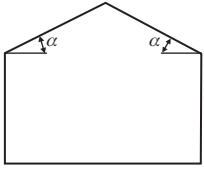
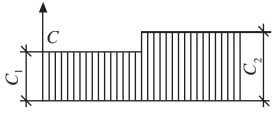
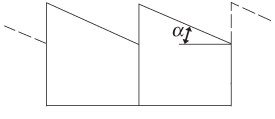
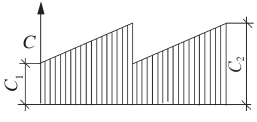
$$p_{sn:rep} = 0{,}7 \cdot \psi = 0$$

Een overzicht van de dakvormfactoren C_1 en C_2 is gegeven in tabel 1.6 (voor een compleet overzicht zie NEN 6702 artikel 8.7.2.).

Tabel 1.6 Bepaling van sneeuwbelasting op daken[1)]

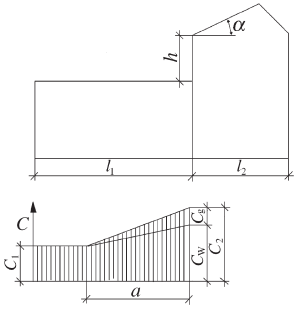
dakvorm + belastingsverloop	dakhoek + vormfactor
1. Platte daken en eenzijdig hellende daken	
	$0° < \alpha \leqslant 30°$ $C_1 = 0{,}8$ $30° < \alpha < 60°$ $C_1 = 0{,}8\left(\frac{60-\alpha}{30}\right)$ $\alpha \geqq 60°$ $C_1 = 0{,}0$

Tabel 1.6 (vervolg)

dakvorm + belastingsverloop	dakhoek + vormfactor
2. Zadeldak	
	$0° < \alpha \leqslant 15°$ $C_1 = C_2 = 0{,}8$
	$15° < \alpha \leqslant 30°$ $C_1 = 0{,}8$
	$C_2 = 0{,}8 + 0{,}4\left(\frac{\alpha - 15}{15}\right)$
	$30° < \alpha < 60°$ $C_1 = 0{,}8\left(\frac{60 - \alpha}{30}\right)$
	$C_2 = 1{,}2\left(\frac{60 - \alpha}{30}\right)$
	$\alpha \geqq 60°$ $C_1 = C_2 = 0$
3. Zaagtandvormige daken	
	$0° < \alpha \leqslant 30°$ $C_1 = 0{,}8$
	$C_2 = 0{,}8\left(\frac{30 + \alpha}{30}\right)$
	$30° < \alpha < 60°$ $C_1 = 0{,}8\left(\frac{60 - \alpha}{30}\right)$
	$C_2 = 1{,}6$
	$\alpha \leqq 60°$ $C_1 = 0$
	$C_2 = 1{,}6$

Tabel 1.6 (vervolg)

dakvorm + belastingsverloop	dakhoek + vormfactor
4. Sneeuwlast door afglijden en opwaaien	



$C_1 = 0{,}8$

$C_2 = C_g + C_w$

$\alpha \leqq 15°$; $C_g = 0$

$\alpha > 15°$; $C_g = 1/2\, C_{max}$

C_g = vormfactor voor extra sneeuwlast door afglijden

C_{max} = vormfactor voor maximale sneeuwlast van het aangrenzende dakvlak

$$C_w = \frac{l_1 + l_2}{2h} \leqq \frac{\gamma_{sn:rep} \cdot h}{P_{sn:rep}}$$

$0{,}8 \leqq C_w \leqq 4{,}0$

$a = 2\,h$; $(5\,\text{m} \leqslant a \leqslant 15\,\text{m})$

waarin:
$\gamma_{sn:rep} = 2{,}0\,\text{kN/m}^3$
$\rho_{sn:rep} = 0{,}7\,\text{kN/m}^2$
h = hoogteverschil [m]

Indien $a \geqq l_1$, moet zijn gerekend met C_2'

$$C_2' = C_1 + \frac{l_1}{a}(C_2 - C_{1)}$$

[1)] De vormfactoren C_1 mogen gereduceerd zijn tot 0,75 C_1, wanner het dak uit alle richtingen ongehinderd door wind kan worden aangeblazen, terwijl op het dak geen grote randen (hoger dan 25 cm) of uitsteeksels aanwezigzijn, waardoor het afwaaien van sneeuw wordt verhinderd.

2 Houtconstructies

De berekening van *houtconstructies* is voornamelijk gebaseerd op het gebruik van normen. **Uitgebreide gegevens**, richtlijnen en voorschriften zijn vastgelegd in met name:

NEN 6760. Technische grondslagen voor bouwconstructies–TGB 1990–Houtconstructies–Basiseisen.
NEN 6763. Gelamineerd hout. Produkteigenschappen en bepalingsmethoden.
NEN 5461 t/m 5485: Kwaliteitseisen voor hout (KVH) voor diverse houtsoorten.
NEN 5498. Gezaagd hout. Sterkteklassen, classificatiemethode en bepalingsmethoden.
NEN 6073. Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen; Houtconstructies.

Zie ook par. 1.1. Normen zijn verkrijgbaar bij het **Nederlands Normalisatie-Instituut** te Delft.

2.1 Lijst van symbolen

a_0 = hart-op-hart afstand tussen twee verbindingsmiddelen, gemeten evenwijdig aan de vezelrichting [mm]
a_{90} = hart-op-hart afstand tussen twee verbindingsmiddelen, gemeten loodrecht op de vezelrichting [mm]
b = breedte doorsnede [mm]
b_{red} = gereduceerde breedte doorsnede [mm]
d_{nom} = nominale middellijn verbindingsmiddel [mm]
E_d = rekenwaarde elasticiteitsmodulus [N/mm^2]
E_{rep} = representatieve waarde elasticiteitsmodulus [N/mm^2]
$E_{0;u;rep}$ = representatieve waarde elasticiteitsmodulus evenwijdig aan vezelrichting m.b.t. uiterste grenstoestand [N/mm^2]
$E_{0;ser;rep}$ = representatieve waarde elasticiteitsmodulus evenwijdig aan vezelrichting m.b.t. bruikbaarheidsgrenstoestand [N/mm^2]
F_d = rekenwaarde geconcentreerde kracht (puntlast) [N]
$F_{t;u;rep}$ = representatieve waarde treksterkte verbindingsmiddel in uiterste grenstoestand [N]
$F_{v;d}$ = rekenwaarde schuifkracht aangrijpend op snede van verbindingsmiddel [N]
$F_{v;u;d}$ = rekenwaarde schuifsterkte van snede van verbindingsmiddel in uiterste grenstoestand [N]

$F_{v;u;rep}$ = representatieve waarde schuifsterkte van snede van verbindingsmiddel in uiterste grenstoestand [N]
$f_{u;d}$ = rekenwaarde sterkte [N/mm^2]
$f_{c;0;u;d}$ = rekenwaarde druksterkte evenwijdig aan vezelrichting [N/mm^2]
$f_{c;0;rep}$ = representatieve waarde druksterkte evenwijdig aan vezelrichting [N/mm^2]
$f_{c;90;u;d}$ = rekenwaarde druksterkte loodrecht op vezelrichting [N/mm^2]
$f_{c;90;rep}$ = representatieve waarde druksterkte loodrecht op vezelrichting [N/mm^2]
$f_{emb;rep}$ = representatieve waarde stuiksterkte verbindingsmiddel [N/mm^2]
$f_{m;d}$ = rekenwaarde buigsterkte [N/mm^2]
$f_{m;rep}$ = representatieve waarde buigsterkte [N/mm^2]
$f_{t;0;u;d}$ = rekenwaarde treksterkte evenwijdig aan vezelrichting [N/mm^2]
$f_{t;0;rep}$ = representatieve waarde treksterkte evenwijdig aan vezelrichting [N/mm^2]
$f_{t;90;u;d}$ = rekenwaarde treksterkte loodrecht op vezelrichting [N/mm^2]
$f_{t;90;rep}$ = representatieve waarde treksterkte loodrecht op vezelrichting [N/mm^2]
$f_{v;u;d}$ = rekenwaarde schuifsterkte [N/mm^2]
$f_{v;rep}$ = representatieve waarde schuifsterkte [N/mm^2]
$G_{ser;rep}$ = representatieve waarde afschuivingsmodulus m.b.t. bruikbaarheidsgrenstoestand [N/mm^2]
h = hoogte doorsnede [mm]
h_e = hoogte einddoorsnede onderdeel [mm]
i = oppervlakte moment arm
k_{cal} = factor, die het ontwikkelen van trekkrachten evenwijdig aan de steel van een stiftvormig verbindingsmiddel in rekening brengt [–]
k_{com} = factor voor het in rekening brengen van stabiliteitseffecten [–]
k_{con} = factor voor drukspanning loodrecht op vezelrichting, afhankelijk van belaste lengte [–]
k_{dis} = factor voor spanningsverdeling [–]
k_{mod} = modificatiefactor, afhankelijk van belastingsduurklasse en klimaatklasse [–]

k_{mom} = factor voor het in rekening brengen van stabiliteitseffecten [–]
k_{tal} = factor voor verbindingen met twee of meer verbin-dingsmiddelen achter elkaar in richting kracht [–]
k_{tor} = factor voor schuifspanningen t.g.v. wringing [–]
k_{vol} = factor voor volume [–]
l = (theoretische) lengte onderdeel [–]
l_{hec} = hechtlengte verbindingsmiddel [mm]
M_u = plastisch vloeimoment [Nmm]
$N_{c;d}$ = rekenwaarde normaaldrukkracht [N]
S = afstand [mm]
$S_{e;b}$ = belaste eindafstand [mm]
$S_{e;o}$ = onbelaste eindafstand [mm]
S_r = randafstand [mm]
$S_{r;b}$ = belaste randafstand [mm]
$S_{r;o}$ = onbelaste randafstand [mm]
T = temperatuur [°C]
t = dikte onderdeel [mm]
t_i = dikte onderdeel i (i = 1, 2, ...) [mm]
t_{amb} = hoogte tand of hiel in ambachtelijke verbinding [mm]
u_d = verschuiving in verbinding [mm]
u_u = verschuiving in uiterste grenstoestand [mm]
V_h = volume hout dat onder trekspanningen staat [m^2]
V_0 = referentievolume [m^2]
W_{ser} = berekende vervorming (doorbuiging) in bruikbaarheidstoestand [mm]
$W_{max;ser}$ = maximaal toelaatbare waarde doorbuiging in bruikbaarheidsgrenstoestand [mm]
α = hoek tussen twee onderdelen [°]
γ_m = materiaalfactor [–]
η = factor [–]
ξ = rekengrootheid of factor [–]
ρ_{rep} = representatieve waarde volumieke massa m.b.t. uiterste grenstoestand [kg/m^3]
$\sigma_{c;0;d}$ = rekenwaarde drukspanning evenwijdig aan vezelrichting [N/mm^2]
$\sigma_{c;90;d}$ = rekenwaarde drukspanning loodrecht op vezelrichting [N/mm^2]
$\sigma_{c;\alpha;d}$ = rekenwaarde drukspanning onder hoek α met vezelrichting [N/mm^2]

$\sigma_{m;d}$ = rekenwaarde buigspanning [N/mm^2]
$\sigma_{t;0;d}$ = rekenwaarde trekspanning evenwijdig aan vezelrichting [N/mm^2]
$\sigma_{t;90;d}$ = rekenwaarde trekspanning loodrecht op vezelrichting [N/mm^2]
$\sigma_{t;\alpha;d}$ = rekenwaarde trekspanning onder hoek α met vezelrichting [N/mm^2]
$\sigma_{v;d}$ = rekenwaarde schuifspanning t.g.v. dwarskracht [N/mm^2]
$\sigma_{tor;d}$ = rekenwaarde schuifspanning t.g.v. wringing [N/mm^2]
ψ_{krp} = kruipfactor [–]
ψ = relatieve vochtigheid [%]
λ = slankheid bij stabiliteitsberekeningen op druk of op druk bij buiging

2.2 Rekenwaarden van materiaaleigenschappen

Voor de rekenwaarde van de *sterkte* geldt:

$$f_{u;d} = \frac{f_{rep}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} \cdot k_h$$

Voor de rekenwaarde van de *elasticiteitsmodulus* geldt:

$$E_d = \frac{E_{rep}}{\gamma_m} \cdot k_{mod}$$

Verder geldt:
- Representatieve waarden voor f_{rep}, E_{rep} en G_{rep} ontlenen aan tabellen 2.1[a] (gezaagd hout) en 2.1[b] (gelamineerd hout).
- Materiaalfactor:
- γ_m =1,2 voor de uiterste grenstoestanden
- γ_m =1,0 voor de bruikbaarheidsgrenstoestanden
- Modificatifactor k_{mod} m.b.t.:
  - de sterkte (uiterste grenstoestand) volgens tabel 2.2 waarbij voor de belastingsduurklasse de kortst durende belasting uit de belastingscombinatie wordt genomen.
  - vervormingen (bruikbaarheidsgrenstoestand) volgens tabel 2.3 waarbij voor de belastingsduurklasse elke belasting in de belastingscombinatie afzonderlijk wordt beschouwd.
- Klimaatklasse volgens tabel 2.4.

Tabel 2.1[a] Representatieve waarden van de materiaaleigenschappen van gezaagd hout

sterkteklasse[2)]		C18	C20	C22	C24	D30	D35	D40	D50	D60
met betrekking tot **uiterste grenstoestanden**[1)]	$f_{m;0;rep}$	18	20	22	24	30	35	40	50	60
	ρ_{rep} [kg/m^3]	300	330	340	350	530	560	590	650	700
	$f_{t;0;rep}$	11	12	13	14	18	21	24	30	36
	$f_{t;90;rep}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	$f_{c;0;rep}$	18	19	20	21	23	25	26	29	32
	$f_{c;90;rep}$	4,4	4,6	4,8	5,0	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5
	$f_{v;0;rep}$	2,0	2,2	2,4	2,54	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3
	$E_{0;u;rep}$	6.000	6.400	6.700	7.400	8.000	8.700	9.400	11.800	14.300
met betrekking tot **bruikbaarheidsgrens-toestanden**	$E_{0;ser;rep}$	9.000	9.500	10.000	11.000	10.000	10.000	11.000	14.000	17.000
	$E_{90;ser;rep}$	300	320	330	370	640	690	750	930	1.130
	$G_{ser;rep}$	560	590	630	690	600	650	700	880	1.060

Er wordt onderscheid gemaakt tussen C-klassen (‘zachthout’) en D-Klassen (‘hardhout’)

[1)] Eenheden: tenzij anders aangegeven N/mm^2.

[2)] Sterkteklasse van elk constructief toegepast element.

Grenen, vuren en larix, Douglas (Europees) wat conform de KVH is ingedeeld in klasse C: sterkteklasse C18.

Grenen, vuren en larix, wat conform de KVH is ingedeeld in klasse B: sterkteklasse C24.

Douglas (Europees), wat conform de KVH is ingedeeld in klasse B: sterkteklasse C22.

Eiken (Midden Europees), wat conform de KVH is ingedeeld in klasse B: sterkteklasse C20.

Meranti (rode): sterkteklasse C20.

Eiken (Pools), Nargusta: C24.

Vitex, Robinia: D30.

Angelim Vermelho, Karri (zuid Afrikaans), Piquia: D35.

Denya: D40.

Bangkirai: D50.

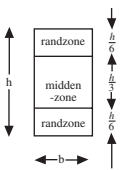
Azobé: Masseranduba, Cumaru,: D60.

Tabel 2.1[b] Representatieve waarden van de materiaaleigenschappen van gelamineerd hout

sterkteklasse[2)]		GL24h	GL28h	GL36h	GL24c	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
met betrekking tot **uiterste grenstoestanden**[1)]	$f_{m;0;rep}$	24	28	32	36	24	28	32	36
	ρ_{rep} [kg/m^3]	380	410	430	450	350	380	410	430
	$f_{t;0;rep}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
	$f_{t;90;rep}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5
	$f_{c;0;rep}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
	$f_{c;90;rep}$	5,4	6,0	6,6	7,2	4,8	5,4	6,0	6,6
	$f_{v;0;rep}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
	$E_{0;u;rep}$	9.400	10.200	11.100	11.900	9.400	10.200	11.100	11.900
met betrekking tot **bruikbaarheidsgrens-toestanden**	$E_{0;ser;rep}$	11.600	12.600	13.700	14.700	11.600	12.600	13.700	14.700
	$E_{90;ser;rep}$	390	420	460	490	320	390	420	460
	$G_{ser;rep}$	720	780	850	910	590	720	780	850
minimale sterkteklasse van de lamellen		C18	C22	C24	C30	C18	C22	C24	C30

Voor voetnoten, zie tabel 2.1[a].

Er wordt onderscheid gemaakt tussen homogeen gelamineerd hout, samengesteld met alle lamellen uit dezelfde sterkteklasse, en gelamineerd hout met gecombinccrde opbouw, waarbij de randzone is samengesteld met lamellen uit hoogstens twee sterkteklassen hoger dan de middenzone.



– K_h is de modificatiefactor voor de hoogte.
In combinatie met $f_{t;0;rep}$ en $f_{m;0;rep}$ geldt:
$K_h = 1{,}3$ als $h < 40\,mm$
$K_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0{,}2}$ als $40 \leqslant h \leqslant 150$

Voor alle overige gevallen geldt: $K_h = 1{,}0$.

*Tabel 2.2 Modificatiefactoren k_{mod} m.b.t. de **sterkte***

belastingsduurklasse[2]		klimaatklasse (volgens tabel 2.4)			
		I en II		III	
I	(lang)	0,70	(0,50)[2]	0,60	(0,40)[2]
II	(middel lang)	0,75	(0,60)[2]	0,65	(0,50)[2]
III	(kort)	0,85	(0,75)[2]	0,70	(0,60)[2]
IV	(zeer kort durend)	1,10	(1,10)[2]	0,95	(0,95)[2]

[1] Volgens NEN 6760, tabel 5.
[2] De tussen ( ) geplaatste waarden gelden voor de treksterkte loodrecht op de vezel.

*Tabel 2.3 Modificatiefactoren k_{mod} m.b.t. de **vervormingen***

sterkteklasse	klimaatklasse		
	I (droog)	II	III (vochtig)
K13 t/m K 37	1,00	0,90	0,80

Tabel 2.4 Klimaatklassen

klimaatklasse	relatieve luchtvochtigheid ψ[%] bij temperatuur T [°C][1]	voorbeelden
I (droog)	$\psi \leqq 0{,}65 + 0{,}003 \cdot (T - 20)$	woningen, kantoren, en andere omsloten ruimten die centraal verwarmd zijn of onverwarmd maar goed geventileerd
II	$\psi \leqq 0{,}80 + 0{,}002 \cdot (T - 20)$	overdekte maar rondom open of gedeeltelijk open ruimten als overdekte loodsen en luifels
III a III b (vochtig)	$\psi \leqq 0{,}90 + 0{,}001 \cdot (T - 20)$ $\psi > 0{,}90 + 0{,}001 \cdot (T - 20)$	vochtige, slecht geventileerde ruimten, niet-overdekte constructies en constructies onder water.

[1] ψ = relatieve vochtigheid die niet meer dan enkele weken per jaar wordt overschreden [%]
T = temperatuur ruimte waarin het hout zich bevindt [°C].

2.3 Berekening m.b.t. uiterste grenstoestand

Ter bepaling van de spanningen in het hout en de krachten in de verbindingsmiddelen geldt:

- De rekenwaarden van de *belastingen* met betrekking tot de uiterste grenstoestand dienen te worden ontleend aan NEN 6702 (TGB 1990, belastingen en vervormingen).
- De rekenwaarden van de *materiaaleigenschappen* dienen te worden ontleend aan tabel 2.1 (zie par. 2.2) en de coëfficiënten k_{xxx}.

Trek

Trek *evenwijdig* aan de vezelrichting:

$$\sigma_{t;0;d} \leq f_{t;0;u}$$

Trek *loodrecht* op de vezelrichting:

$$\sigma_{t;0;d} \leq k_{vol} \cdot k_{dis} \cdot f_{t;90;u;}$$

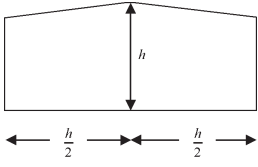
$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V_h}\right)^{0,2} \leq 1{,}0$$

$V_0 = 0{,}02\,m^3$ (referentievolume)

$V_h =$ volume hout dat onder trekspanning staat [m^3]

Voorbeeld: deel uit een op buiging belaste ligger met constant verlopende bovenrand; drukspanningen uit moment aan de verlopende rand.

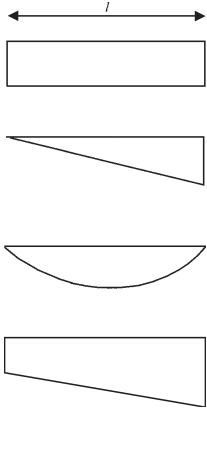
$$V_h = h^2\left[1 - \frac{\tan\alpha}{4}\right]$$



Figuur 2.1 Bepaling van h

k_{dis} is afhankelijk van de spanningsverdeling over de doorsnede. Bij het voorbeeld geldt over het algemeen $k_{dis} = 1{,}4$ aangezien het buigend moment over het balkdeel met lengte h over het algemeen nagenoeg constant zal zijn.

De trekspanningen loodrecht op de vezel in gekromde delen is niet constant over de hoogte. Tevens is het moment, en daardoor eveneens de trekspanning loodrecht op de vezel, niet constant over de lengte. Voor beide richtingen kan een verschillende waarde voor k_{dis} gelden, welke beide bepaald worden en met elkaar worden vermenigvuldigd om de resulterende k_{dis} te bepalen.
In figuur 2.2 worden een aantal waarden voor k_{dis}, afhankelijk van het spanningsverloop, over de lengte evenredig met het momentverloop, gegeven.



Figuur 2.2 Aantal waarden voor k_{dis}, afhankelijk van het spanningsverloop, over de lengte evenredig met het momentverloop

Trek *onder een hoek* α met de vezelrichting:

$$\sigma_{t;\alpha;d} \leqq k_{\text{vol}} \cdot k_{\text{dis}} \cdot f_{t;90;u;d}/\sin^2 \alpha \leqq f_{t;0;u;d}$$

Druk

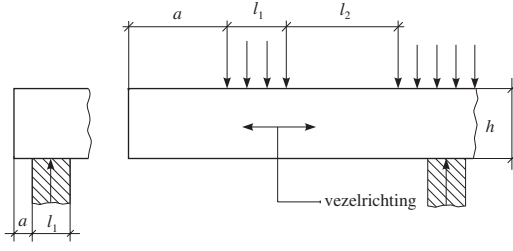
Druk *evenwijdig* aan de vezelrichting:

$$\sigma_{c;0;d} \leqq f_{c;0;u;d} \qquad \text{(slankheid } \lambda < 20\text{)}$$

Druk *loodrecht* op de vezelrichting:

$$\sigma_{c;90;d} \leqq k_{con} \cdot f_{c;0;u;d}$$

- k_{con} is afhankelijk van de belaste lengte l_1 en onbelaste lengte a (zie figuur 2.3 en tabel 2.5).



Figuur 2.3 Drukspanningen loodrecht op de vezelrichting (zie ook tabel 2.5)

Tabel 2.5 Waarden van de factor voor de drukspanning loodrecht op de vezelrichting (k_{con})

	$l_2 < 150$	$l_2 \geqq 150$	
		$a \geqq 100$	$a < 100$
$l_1 \geqq 150$	1	1	1
$15 \leqq l_1 < 150$	1	$4\sqrt{\frac{150}{l_1}}$	$1 + \left(4\sqrt{\frac{150}{l_1}} - 1\right)\frac{a}{100}$
$l_1 < 15$	1	(1,8)	$1 + \frac{a}{125}$

a = afstand tot einddoorsnede [mm]
l_1 = lengte waarover drukspanning werkt [mm]
l_2 = afstand tussen de twee gebieden waarover drukspanningen aanwezig zijn (als in figuur 2.3) [mm]

Druk *onder een hoek* α met de vezelrichting:

$$\sigma_{c;\alpha;d} \leqq f_{c;0;u;d} - (f_{c;0;u;d} - f_{c;90;u;d}) \cdot \sin\alpha \qquad (\alpha < 90°)$$

Op druk belaste elementen met een slankheid $\gamma > 20$ moeten op knikstabiliteit worden gecontroleerd.

Dan geldt: $\dfrac{\sigma_{c;0;d}}{k_{com}} \leq f_{c;0;u;d}$

Voor k_{com} kunnen globaal de waarden in tabel 2.6 worden aangehouden:

Tabel 2.6 Waarden voor de k_{com}

$\lambda = \frac{l_k}{i}$	k_{com}	$\lambda = \frac{l_k}{i}$	k_{com}	$\lambda = \frac{l_k}{i}$	k_{com}
20	1,00	84	0,36	148	0,13
24	0,95	88	0,33	152	0,13
28	0,92	92	0,31	156	0,12
32	0,88	96	0,29	160	0,12
36	0,85	100	0,27	164	0,11
40	0,81	104	0,25	168	0,11
44	0,76	108	0,24	172	0,10
48	0,71	112	0,22	176	0,10
52	0,67	116	0,21	180	0,09
56	0,62	120	0,20	184	0,09
60	0,55	124	0,19	188	0,09
64	0,53	128	0,18	192	0,08
68	0,49	132	0,17	196	0,08
72	0,45	136	0,16	200	0,08
76	0,42	140	0,15	204	0,07
80	0,39	144	0,14		

Buiging

Buigspanningen *evenwijdig* aan de vezelrichting (prismatische staven):

$$\sigma_{m;0;d} \leqq f_{m;0;u;d}$$

Voor de buig***druk***spanningen *niet evenwijdig* aan de vezelrichting (bijv. bij niet-prismatische onderdelen) moet worden aangehouden: $\sigma_{m;\alpha;d} \leq f_{mc;\alpha;u;d}$. Voor de buig***trek***spanningen *niet evenwijdig* aan de vezelrichting moet worden aangehouden:
$\sigma_{m;\alpha;d} \leq f_{mt;\alpha;u;d}$.

De optredende spanningen $\sigma_{m;\alpha;d}$ en de rekenwaarden voor de sterkte $f_{mc;\alpha u;d}$ en $f_{mt;\alpha u;d}$ worden bepaald conform de in NEN 6760 paragraaf 11.9 aangegeven wijze.

Buiging met trek

$$\frac{\sigma_{m;0;d}}{f_{m;0;u;d}} + \frac{\sigma_{t;0;d}}{f_{t;0;u;d}} \leqq 1$$

Buiging met druk

Hier moet onderscheid worden gemaakt tussen gesteunde staven, die zijdelings (plaatselijk) worden gesteund, en ongesteunde staven. Een staaf kan tegelijkertijd gesteund en ongesteund zijn: de totale staaf wordt plaatselijk afgesteund naar bijvoorbeeld een stabiliteitsverband en is daardoor een gesteunde staaf, terwijl de delen tussen de afsteunpunten ongesteunde staven zijn.
Voor gesteunde staven worden de factoren k_{com} en k_{mom} berekend. Voor de factor k_{mom} kan 0,95 worden aangehouden. De factor k_{com} is in tabel 2.7 gegeven. Voor gesteunde staven geldt:

$$\frac{\sigma_{c;0;d}}{k_{com} \cdot f_{c;0;u;d}} + \frac{\sigma_{m;0;d}}{k_{mom} \cdot f_{m;0;u;d}} \leqslant 1{,}0$$

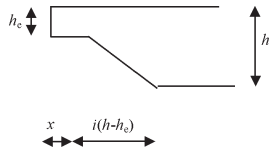
Voor onderdelen belast op buiging en druk, waarbij neiging bestaat tot uitbuiging loodrecht op het vlak van de belasting (ongesteunde staven), dient de berekening te geschieden volgens NEN 6760, hoofdstuk 11 (11.14 en 11.15).

Afschuiving

Voor liggers moet gelden:

$$\sigma_{v;d} \leq f_{v;d}$$

Indien $\frac{1}{i} > \frac{1}{10}$ wordt de schuifspanning veroorzaakt door dwarskracht in geval van uitkepingen als volgt gecontroleerd:



Figuur 2.4 Controle van schnifspanning veroorzaakt door dwarskracht in geval van uitkepingen als $\frac{1}{i} > \frac{1}{10}$

Dan geldt:

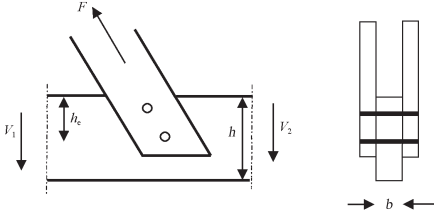
$$V_d \leq \frac{k_v \cdot f_{v;d} \cdot b \cdot h_e}{1,5}$$

waarin:

$$k_v = \frac{k_n\left(1 + \frac{1,1 \cdot i^{1,5}}{\sqrt{h}}\right)}{\sqrt{h}\left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \cdot \frac{x}{h}\sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2}\right)} \leq 1,0$$

$k_n = 5,0$ voor gezaagd hout; $k_n = 6,5$ voor gelamineerd hout.
Voor de dwarskracht bij verbindingen, zie figuur 2.4, geldt:

$$\max(V_1; V_2) \leq 14b\sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \leq \frac{2}{3} f_{v;d} bh$$



Figuur 2.5 Dwarskracht bij verbindingen

Torsie

$\sigma_{tor;d} \leqq k_{tor} \cdot f_{v;0;u;d}$
$k_{tor} = 1{,}2.$

2.4 Berekening m.b.t. bruikbaarheidsgrenstoestand

Doorbuiging

De berekening van vervormingen kan worden beperkt tot de doorbuiging w_{ser} waarbij als representatieve waarde van de elasticiteitsmodulus wordt aangehouden:

$$E_{0;ser;d} = \frac{E_{0;ser;rep}}{\gamma_m} k_{mod}$$

Waarbij de modificatiefactor k_{mod} uitsluitend afhankelijk is van de klimaatklasse en wordt ontleend aan tabel 2.3. Het effect van de belastingsduur wordt in rekening gebracht middels een kruipfactor ψ_{krp}, welke per belastingsduurklasse, en dus per belastingsgeval, verschillend is.
De vervormingen worden berekend door de direct optredende vervormingen en de vervormingen welke in de tijd hier nog bij komen bij elkaar op te tellen, hetgeen in de volgende tabel is weergegeven.

Tabel 2.7 Vervormingen

belasting	vervorming	
	direct	tijdsafhankelijk
permanent	u_p	$\psi_{krp} \cdot u_p$
veranderlijk	u_q	$\psi_{krp} \cdot u_q$

In NEN 6702 zijn de begrippen ‘bijkomende vervorming’ en ‘vervorming in eindtoestand’ geïntroduceerd. Deze worden met tabel 2.7 als volgt vastgesteld:

Bijkomende vervorming: $\psi_{krp} \cdot u_p + (1 - \psi + \psi \cdot \psi_{krp})$
Vervorming in eindtoestand: $(1 + \psi_{krp})u_p + (1 - \psi + \psi \cdot \psi_{krp})$

- $\psi_{krp} = 1{,}0$ voor belastingsduurklasse I (lang: permanente belasting en de momentane waarde van de veranderlijke belasting)

- $\psi_{krp} = 0{,}5$ voor belastingsduurklasse II
- $\psi_{krp} = 0{,}0$ voor belastingsduurklassen III (kort; extreme waarden van de veranderlijke belasting) en IV

Verschuiving bij stalen verbindingsmiddelen

$$u_d = u_{el} + u_{kr} \text{ [mm]}$$

$$u_{el} = \frac{F_{v;d}}{k} \text{ [mm]}$$

Voor bouten: $u_{el} = u_{el} + 1$ [mm]

Tabel 2.8 Waarden voor k_d

Verbindingsmiddel	k_d[N/mm]
Staafdeuvels Passende bouten Schroeven Draadnagels met voorgeboorde gaten	$\frac{\rho_m^{1,5} \cdot d_{nom}}{20}$
Draadnagels zonder voorgeboorde gaten	$\frac{\rho_m^{1,5} \cdot d_{nom}}{25}$
Nieten	$\frac{\rho_m^{1,5} \cdot d_{nom}^{0,8}}{80}$
Plaatdeuvels Ringdeuvels	$\frac{\rho_m \cdot d_c}{2}$
Kramplaten • enkelzijdig	$\frac{\rho_m \cdot d_c}{5}$
• dubbelzijdig	$\frac{\rho_m \cdot d_c}{3}$

Waarin:

d_c = diameter plaatdeuvel, ringdeuvel of kramplaat (bij ronde verbindingsmiddelen). Lengte van de zijde bij vierkante verbindingsmiddelen.
Wortel uit de zijdelengten bij ovale en rechthoekige verbindingsmiddelen.

$\rho_m = 1{,}15 \cdot \rho_{rep}$

$\rho_m = \sqrt{\rho_{m;1} \cdot \rho_{m;2}}$, indien de aan te sluiten delen verschillende volumieke massa's hebben.

$$u_{el} = \frac{F_{v;d}}{k_d} \cdot \psi_{krp}$$

Stuik in ambachtelijke verbindingen

$$u_d = \frac{N_{c;d}}{U_d}(1 + \psi_{krp})$$

$$U_d = \frac{N_{c;u;d}}{u_u}$$

- $u_u = 0{,}001 \cdot h$ met een minimum van 1 mm.

Verschuiving bij deuvelverbindingen

$$u_d = \frac{F_d}{F_{u;rep}} \cdot u_u(1 + \psi_{krp})$$

Voor de eerste belasting tot F_d geldt voor de directe verschuiving:

- $u_u = 2{,}2$ mm voor kramplaten en plaatdeuvels.
- $u_u = 1{,}1$ mm voor ringdeuvels.

Voor de elastische verschuiving moet worden aangehouden:

- $u_u = 0{,}44$ mm voor kramplaten, plaat en ringdeuvels.

2.5 Verbindingen

Algemeen

In deze paragraaf worden alleen de minimale afstanden en de representatieve waarden van de sterkte gegeven. Verbindingen moeten zo zijn gedimensioneerd dat de krachten per snede en per verbindingsmiddel de uiterste grenstoestand niet overschrijden:

$$F_d \leq k_{xxx} \frac{F_{u;rep}}{\gamma_m} k_{mod}$$

waarin:

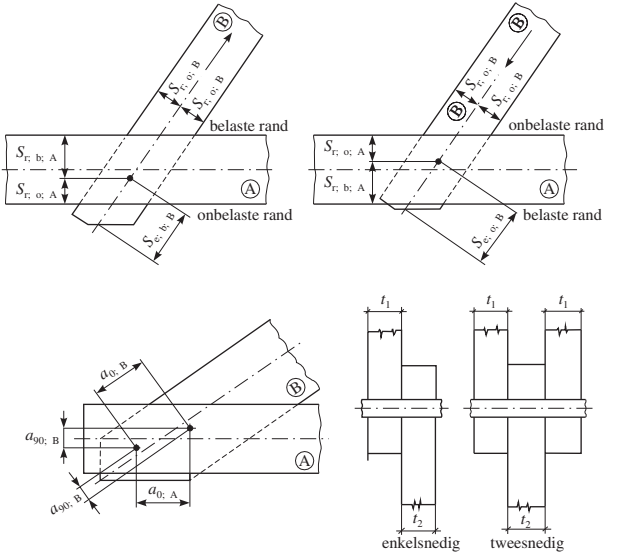
F_d = rekenwaarde van de kracht in de snede van het verbindingsmiddel

K_{xxx} = factor of product van factoren afhankelijk van de beschouwde grenstoestand, het verbindingsmiddel en diverse randvoorwaarden

$F_{u;rep}$ = representatieve waarde van de (schuif- of trek-) sterkte van een snede van een verbindingsmiddel in de uiterste grenstoestand

γ_m = materiaalfactor = 1,2 (voor de bruikbaarheidsgrenstoestand geldt: $\gamma_m = 1{,}0$)

k_{mod} = modificatiefactor, afhankelijk van de belastingsduurklasse en de klimaatklasse (zie tabel 2.2, par. 2.2)



Figuur 2.6 Begrippen bij verbindingen

*Tabel 2.9 Representatieve waarde voor de afschuifsterkte in de uiterste grenstoestand per snede voor op afschuiving belaste **hout-op-hout** verbindingen met draadnagels, nieten, houtschroeven, bouten, stiften en houtdraadbouten*[1)]

$F_{v;u;rep}$ is de **kleinste waarde** van	enkel-snedig	dubbel-snedig
(1) $f_{emb;rep;1} \cdot l_{hec;1} \cdot d_{nom}$	×	×
(2) $f_{emp;rep;1} \cdot l_{hec;2} \cdot \delta \cdot d_{nom} \cdot \xi$	$\xi = 1$	$\xi = 0{,}5$
(3) $\frac{f_{emp;rep;1} \cdot l_{hec;1} \cdot d_{nom}}{1+\delta} \cdot \left[\sqrt{\delta + 2\delta^2(1+\varphi+\varphi^2) + \delta^3 \cdot \varphi^2} - \delta(1+\varphi)\right]$	×	
(4) $\frac{f_{emb;rep;1} \cdot l_{hec;1} \cdot d_{nom}}{2+\delta} \cdot \left[\sqrt{2\delta(1+\delta) + \frac{4\delta(2+\delta)M_u}{f_{emb;rep;1} \cdot l_{hec;1}^2 \cdot d_{nom}}} - \delta\right] + \frac{F_{t;u;rep}}{4}$	×	×
(4a) $\frac{f_{emb;rep;1} \cdot l_{hec;1} \cdot d_{nom}}{1+2\delta} \cdot \left[\sqrt{2\delta^2(1+\delta) + \frac{4\delta(1+2\delta)M_u}{f_{emb;rep;1} \cdot l_{hec;1}^2 \cdot d_{nom}}} - \delta\right] + \frac{F_{t;u;rep}}{4}$	×	
(5) $\sqrt{\frac{4\delta}{1+\delta} \cdot M_u \cdot f_{emb;rep;1} \cdot d_{nom}} + \frac{F_{ax}}{4}$	×	×

[1)] Toelichting symbolen: zie tekst.

Toelichting bij tabel 2.9

$l_{hec;1}$, $l_{hec;2}$ = hechtlengte van het verbindingsmiddel in onderdeel 1 resp. 2 [mm]

$f_{emb;rep;1}$ = representatieve waarde stuiksterkte houtdeel 1 [N/mm^2]

- d_{nom} = nominale diameter verbindingsmiddel [mm]
- φ = $l_{hec;2}/l_{hec;1}$
- M_u = $f_{u;rep} \cdot d^3_{nom}/6$

$$\delta = \frac{f_{emb;rep} \text{ in het houtdeel 2}}{f_{emb;rep} \text{ in het houtdeel 1}}$$

$$M_u = f_{u;rep} \frac{d^3_{nom}}{6} \text{[Nmm]}$$

$f_{u;rep}$ = de vloeispanning bij buiging van het verbindingsmiddel in N/mm^2 (= 0,8 · de vloeispanning bij trek).

*Tabel 2.10 Representatieve waarde voor de afschuifsterkte in de uiterste grenstoestand per snede voor **enkelsnedig** op afschuiving belaste **staal-op-hout** verbindingen met draadnagels, nieten, houtschroeven, bouten, stiften en houtdraadbouten*

$F_{v;u;rep}$ is de **kleinste waarde** van	
Indien de staatlplaatdikte $< 0{,}5\ d_{nom}$	Indien de staalplaatdikte $> d_{nom}$
(1) $0{,}4 \cdot f_{emb;rep} \cdot l_{hec} \cdot d_{nom}$	(1) $f_{emb;rep} \cdot l_{hec} \cdot d_{nom}$
(2) $\sqrt{2M_{u^*} \cdot f_{emb;rep} \cdot d_{nom}} + \frac{F_{ax}}{4}$	(2) $f_{emb;rep} \cdot l_{hec} \cdot d_{nom} \left[\sqrt{\left(2 + \frac{4M_u}{f_{emb;rep} \cdot d_{nom} \cdot l^2_{hec}} \right)} - 1 \right] + \frac{F_{t;u;repx}}{4}$
	(3) $\sqrt{4M_u \cdot f_{emb;rep} \cdot d_{nom}} + \frac{F_{t;u;rep}}{4}$
Voor $0{,}5\ d_{nom} \leq$ staalplaatdikte $\leq d_{nom}$ mag lineair worden geïnterpoleerd	

*Tabel 2.11 Representatieve waarde voor de afschuifsterkte in de uiterste grenstoestand per snede voor **dubbelsnedig** op afschuiving belaste **staal-op-hout** verbindingen met draadnagels, nieten, houtschroeven, bouten, stiften en houtdraadbouten*

$F_{v;u;rep}$ is de **kleinste waarde** van	
Indien de staatlplaatdikte $< 0{,}5\ d_{nom}$	Indien de staalplaatdikte $> d_{nom}$
(1) $f_{emb;rep} \cdot l_{hec} \cdot d_{nom}$	(1) $f_{emb;rep} \cdot l_{hec} \cdot d_{nom}$
(2) $\sqrt{2M_{u^*} \cdot f_{emb;rep} \cdot d_{nom}} + \frac{F_{ax}}{4}$	(2) $\sqrt{4M_u \cdot f_{emb;rep} \cdot d_{nom}} + \frac{F_{t;u;rep}}{4}$

Voor $0{,}5\ d_{nom} \leq$ staalplaatdikte $\leq d_{nom}$ mag lineair worden geïnterpoleerd

Opmerking:
- Over het algemeen betreft het verbindingsmiddelen (meestal bouten) door en door, waarvoor $l_{hec} = 0{,}5 \cdot$ houtdikte.
- Voor staal op houtverbindingen met bouten zal de term $\frac{F_{t;u;rep}}{4}$ de maximale waarde ver overschrijden, zodat de afschuifsterkte 1,25 maal het Johansen deel zal bedragen (zie toelichting bij tabel 2.9).

Het positieve effect als gevolg van de ontwikkelde trekkrachten evenwijdig aan de steel van het verbindingsmiddel wordt in rekening gebracht rekening gebracht door de term $\frac{F_{t;u;rep}}{4}$, waarbij $F_{t;u;rep}$ de uittrekweerstand is. De uittrekweerstand is verbindingsmiddelafhankelijk.

- Gladde nagels: indien de hechtlengte $l_{hec} \geqslant 12 \cdot$ d is de uittrekweerstand $F_{t;u;rep} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{rep}^2 \cdot d \cdot l_{hec}$
- Geprofileerde nagels: indien de hechtlengte $l_{hec} \geqslant$ 8d is de uittrekweerstand $F_{t;u;rep} = f_{t;h;rep} \cdot d \cdot l_{hec}$, waarbij $f_{t;h;rep}$ een merken typeafhankelijke grootheid is die door de fabrikant moet zijn vastgelegd conform NEN 6762.
- Houtschroeven:
  indien voorgeboord $F_{t;u;rep} = 0$.
  indien niet voorgeboord en indien de hechtlengte $l_{hec} \geqslant$ 4d
  $F_{t;u;rep} = (1{,}5 + 0{,}6 \cdot d) \cdot (l_{hec} - d) \cdot \sqrt{\rho_{rep}}$
- Bouten: er mag uitsluitend worden gerekend op de weerstand die de sluitringen via druk loodrecht op de houtvezel kunnen leveren. De minimale sluitringdiameter $> 3 \cdot$ d.

De term $F_{t;u;rep}$ is eveneens in de tabellen 2.10, 2.11 en 2.12 opgenomen. De berekening van de afschuifsterkte valt zo uiteen in twee delen, waarvan het eerste deel het 'Johansen' deel wordt genoemd en het tweede deel de koordwerking. De voor de koordwerking, zijnde $\frac{F_{t;u;rep}}{4}$, in rekening te brengen waarde mag maximaal een bepaald percentage van het 'Johansen' in rekening worden gebracht;

- ronde gladde nagels: 15%
- vierkante gladde nagels: 25%
- geprofileerde nagels: 50%
- schroeven: 100%
- bouten: 25%
- deuvels: 0%

*Tabel 2.12 Representatieve waarde voor de afschuifsterkte in de uiterste grenstoestand per snede per staalplaat voor op afschuiving belaste **staal-in-hout** verbindingen met draadnagels, nieten, houtschroeven, bouten, stiften en houtdraadbouten*

$F_{v;u;rep}$ is de **kleinste waarde** van		
Enkele inwendige staalplaat	Meerdere inwendige staalplaten	
	Buitenste inwendige staalplaat	Overige inwendige staalplaten
$e_1 + e_2$ $f + f$ $g + g$	$e_1 + e_2$ $e_1 + g$ $e_2 + f$ $e_2 + g$ $f + g$ $G + g$	$e_2 + e_2$ $g + g$

Met:

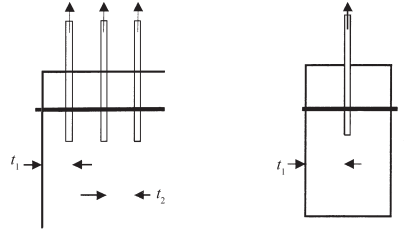
$$f_{emb;rep} \cdot t_1 \cdot d \qquad (e_1)$$

$$\frac{1}{2} f_{emb;rep} \cdot t_2 \cdot d \qquad (e_2)$$

$$f_{emb;rep} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,k}}{f_{h,1,k}\, d {t_1}^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax}}{4} \qquad (f)$$

$$2 \sqrt{M_{y,k} f_{emb;rep}\, d} + \frac{F_{ax}}{4} \qquad (g)$$

t_1 en t_2 zijn gegeven in figuur 2.7



Meerdere inwendige staalplaten Enkele inwendige staalplaat

Figuur 2.7 Verbindingen met inwendige staalplaten

Draadnagelverbindingen
Minimale afstanden; zie tabel 2.13 en figuur 2.8.

Representatieve waarde van de sterkte voor draadnagels op *afschuiving* belast:

$$f_{emb;rep;i} = \eta_1 \cdot \rho_{rep} \cdot d_{nom}^{-0,36} \qquad \text{(gaten niet voorgeboord)}$$
$$f_{emb;rep;i} = \eta_2 \cdot \rho_{rep} \cdot d_{nom}^{-0,36} \qquad \text{(gaten voorgeboord)}$$

waarin:
$\eta_1 = 0{,}09$ en $\eta_2 = 0{,}13$
ρ_{rep}: volgens tabel 2.1
d_{nom} = nominale diameter van de draadnagel [mm]
Representatieve waarde van de sterkte voor gladde draadnagels op *trek* belast, is de *kleinste* van de volgende waarden:

$$F_{t;u;rep} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{rep}^2 \cdot d_{nom} \cdot l_{hec;i}$$
$$F_{t;u;rep} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{rep}^2 \cdot d_{nom} \cdot l_{hec;i} + 300 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{rep}^2 \cdot d_{nom}^2$$

waarin:
$l_{hec;i}$ = totale hechtlengte verminderd met de hechtlengte van de onderdelen die de trekkracht op de nagel veroorzaken
$l_{hec;1}$ = dikte van het houtdeel direct onder de kop van de draadnagel

- $k_{tal} = \dfrac{n^{k_{ef}}}{n}$

met k_{ef} volgens tabel 2.13

Tabel 2.13 Waarden voor k_{ef}

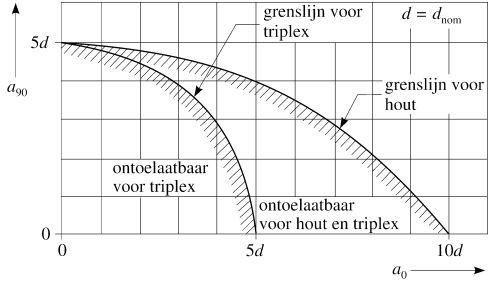
Onderlinge afstand a_1	Niet voorgeboord	Voorgeboord
$a_1 \geq 14d$	1,0	1,0
$a_1 = 10d$	0,85	0,83
$a_1 = 7d$	Niet toegestaan	0,7
$a_1 < 7d$	Niet toegestaan	Niet toegestaan
Voor tussenliggende waarden van a_1 mag lineair worden geïnterpoleerd		

- $k_{cal} = 1{,}1$

Tabel 2.14 Minimale afstanden bij draadnagelverbindingen

	$S_{e;b}$	$S_{e;o}$	$S_{r;b}$	$S_{r;o}$	a_0 [1)]	a_{90} [1)]
hout	$15d_{nom}$	$8d_{nom}$	$\left(5 + \frac{\alpha}{20^\circ}\right)d_{nom}(\alpha < 60^\circ)$	$5d_{nom}$	$10d_{nom}$ $(a_{90} = 0)$	$5d_{nom}$ $(a_0 = 0)$
triplex	$5d_{nom}$	$3d_{nom}$	$8d_{nom}(\alpha \geqq 60^\circ)$	$3d_{nom}$	$5d_{nom}$	$5d_{nom}$

[1)] Voor minimale combinaties van a_0 en a_{90}, zie figuur 2.8.



Figuur 2.8 Minimale afstanden a_0 en a_{90} bij draadnagelverbindingen

Boutverbindingen

Minimale afstanden: zie tabel 2.15 en figuur 2.10.
Representatieve waarde van de sterkte voor bouten op *afschuiving* belast:

$$f_{0;\text{emb;rep}} = 0{,}082 \cdot (1 - 0{,}01 d_{\text{nom}}) \cdot \rho_{\text{rep}}$$
$$f_{90;\text{emb;rep}} = 0{,}036 \cdot (1 - 0{,}01 d_{\text{nom}}) \cdot \rho_{\text{rep}}$$

Voor $0 < \alpha < 90$ geldt:

$$f_{\text{emb;rep}} = \frac{f_{0;\text{emb;rep}}}{k_{90} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)}$$

$k_{90} = 1{,}35 + 0{,}015 \cdot d_{\text{nom}}$ voor hout uit sterkteklassen k13 t/m k30

$k_{90} = 0{,}90 + 0{,}015 \cdot d_{\text{nom}}$ voor hout uit sterkteklassen $>$ k30

- $k_{\text{tal}} = \dfrac{n^{0{,}9}}{n} \cdot \sqrt[4]{\dfrac{a_1}{13\, d_{\text{nom}}}}$

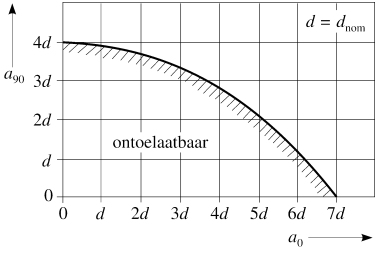
met a_1 = de onderlinge afstand tussen de bouten.

- $k_{\text{cal}} = 1{,}2$

Tabel 2.15 Minimale afstanden bij boutverbindingen

$s_{e;b}$	$s_{e;o}$	$s_{r;b}$	$s_{r;o}$	a_0 [1)]	a_{90} [1)]
$7d_{\text{nom}}$	$4\ d_{\text{nom}}$	$4\ d_{\text{nom}}$	$3\ d_{\text{nom}}$	$7\ d_{\text{nom}}$	$4\ d_{\text{nom}}$

[1)] Voor minimale combinaties van a_0 en a_{90}, zie figuur 2.9



Figuur 2.9 Minimale afstanden a_0 en a_{90} bij boutverbindingen

Kramplaatverbindingen

Minimale afstanden: zie tabel 2.16 en figuur 2.10.
Representatieve waarde van de sterkte voor kramplaten op *afschuiving* belast: gelijk aan de som van die van de bout en die van de kramplaat volgens tabel 2.17.

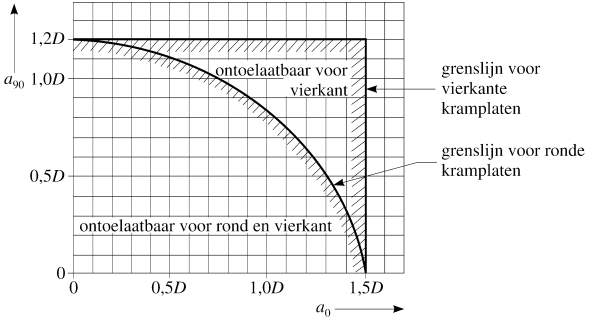
Tabel 2.16 Minimale afstanden bij kramplaatverbindingen

	$s_{e;b}$	$s_{e;0}$	$s_{r;b}$	$s_{r;0}$	a_0	a_{90}	
rond	D						
vierkant	1,2 D	0,6 D	0,75 D	0,65 D	1,5 D [1)]	1,2 D [1)]	kramplaten
	7 d_{nom}	4 d_{nom}	4 d_{nom}	3 d_{nom}	7 d_{nom} [2)]	4 d_{nom} [2)]	bouten

[1)] Zie voor minimlae combinaties van a_0 en a_{90} voor kramplaten figuur 2.10.
[2)] Zie voor minimale combinaties van a_0 en a_{90} voor bouten figuur 2.9.

Tabel 2.17 Representatieve waarde sterkte kramplaat $F_{u;rep}$

	rond					ovaal	vierkant	
D [mm]	50	62	75	95	117	70 × 130	100	130
$F_{u;rep}$ [kN]	4,4	6,6	8,8	12,0	17,6	13,2	15,4	24,2



Figuur 2.10 Minimale afstanden a_0 en a_{90} bij kramplaatverbindingen

Aanvullende informatie is te vinden in NEN 6760, bijlage L.

Ringdeuvelverbindingen

Zie hiervoor NEN 6760, bijlage L.

Houtdraadboutverbindingen

Minimale afstanden: hiervoor gelden dezelfde waarden als bij boutverbindingen (tabel 2.15 en figuur 2.9).

Houtdraadbouten hebben een nominale diameter van: 6 mm $\leq d_{nom} \leq$ 20 mm en worden altijd voorgeboord (gatdiameter: $0{,}65 \cdot d_{nom} \leq d_{gat} \leq 0{,}75\ d_{nom}$).

Representatieve waarde van de sterkte voor houtdraadbouten op afschuiving belast: de kleinste waarde van $F_{v;u;rep}$ bepalen met de formules uit tabel 2.9 (hout-op-hout verbindingen), tabel 2.10 (enkelsnedige staal-op-hout verbindingen), tabel 2.11 (dubbelsnedige staal-op-hout verbindingen) of tabel 2.12 (staal-in-hout verbindingen).

- $k_{tal} = \dfrac{n^{0,9}}{n} \cdot \sqrt[4]{\dfrac{a_1}{13\, d_{nom}}}$

met a_1 = de onderlinge afstand tussen de bouten.

- $k_{cal} = 1{,}2$

Representatieve waarde van de sterkte voor houtdraadbouten op *trek* belast:

$$F_{t;u;rep} = (1{,}5 + 0{,}6\, d_{nom}) \cdot (l_{hec;2} - d_{nom}) \cdot \sqrt{\rho_{rep}}$$

waarin: $l_{hec;2}$ = hechtlengte volgens art. 12.2.3. van NEN 6760

Verbindingen met houtschroeven

Houtschroeven hebben een nominale diameter van: 3 mm $\leq d_{\text{nom}} \leq$ 8 mm. Indien voorgeboord is de gatdiameter: $0{,}65 \cdot d_{\text{nom}} \leq d_{\text{gat}} \leq 0{,}75 d_{\text{nom}}$).

Representatieve waarde van de sterkte voor houtschroeven op afschuiving belast: de kleinste waarde van $F_{\text{v;u;rep}}$ bepalen met de formules uit tabel 2.9 (hout-op-hout verbindingen), tabel 2.10 (enkelsnedige staal-op-hout verbindingen), tabel 2.11 (dubbelsnedige staal-op-hout verbindingen) of tabel 2.12 (staal-in-hout verbindingen).

- $k_{\text{tal}} = \dfrac{n^{k_{\text{ef}}}}{n}$

met k_{ef} volgens tabel 2.13 (zie bij draadnagels)

- $k_{\text{cal}} = 1{,}3$

Tandhiel- en hieltandverbindingen

Minimale afmetingen:

- $t_{\text{amb}} \geqq \frac{1}{5} h$ voor $\alpha > 50°$.
- $t_{\text{amb}} \geqq \frac{1}{4} h$ voor $\alpha > 50°$.

Rekenwaarde van de drukspanning:

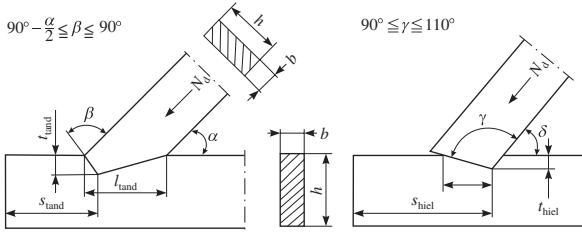
$$\sigma_{\text{c;0;d}} = \frac{N_{\text{c;d}} \cdot \cos \alpha}{t_{\text{amb}} \cdot b} \leqq f_{\text{c;0;d}}$$

$$\sigma_{\text{c;90;d}} = \frac{N_{\text{c;d}} \cdot \sin \alpha}{t_{\text{amb}} \cdot b} \leqq f_{\text{c;90;d}}$$

$$\sigma_{\text{v;d}} = \frac{N_{\text{c;d}} \cdot \cos \alpha}{0{,}8 \cdot s_{\text{amb}} \cdot b} \leqq f_{\text{v;d}}$$

waarin:
$N_{c;d}$ = rekenwaarde van de over te dragen drukkracht
α = hoek tussen de systeemlijnen van de onderdelen
b = breedte van het onderdeel

Index ‘amb’ is respectievelijk ‘tand’,‘hiel’ of ‘hieltand’.



a Tandverbinding
b Hielverbinding
c Hieltandverbinding
d Gecombineerde tand- en hieltandverbinding

Figuur 2.11 Tand-, hiel- en hieltandverbindingen

2.6 Profielgegevens van vierzijdig geschaafd Europees naaldhout

Tabel 2.18 Profielgegevens van vierzijdig geschaafd Europees naaldhout

	b [mm]	h [mm]	A [mm^2]	W_y [mm^3]	I_y [mm^4]	i_y [mm]	W_z [mm^3]	I_z [mm^4]	i_z [mm]
			$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^6$		$\times 10^3$	$\times 10^6$	
H	19	71	1,35	16,0	0,567	20,5	4,27	0,055	5,48
A	19	96	1,82	29,2	1,40	27,7	5,78	0,055	5,48
A	19	121	2,30	46,4	2,80	34,9	7,28	0,069	5,48
A	19	146	2,77	67,5	4,93	42,1	8,78	0,083	5,48
A	19	171	3,25	92,6	7,92	49,4	10,3	0,098	5,48
a	19	196	3,72	121	11,9	56,6	11,8	0,112	5,48
a	19	221	4,20	154	17,1	63,8	13,3	0,126	5,48
a	21	96	2,02	32,3	1,55	27,7	7,06	0,074	6,05
a	21	121	2,54	51,2	3,10	34,9	8,89	0,093	6,06
a	21	146	3,07	74,6	5,45	42,1	10,7	0,113	6,06
H	28	71	1,99	23,5	0,835	20,5	9,28	0,130	8,08
a	28	96	2,69	43,0	2,06	27,7	12,5	0,176	8,08
A	28	121	3,39	68,3	4,13	34,9	15,8	0,221	8,08
A	28	146	4,09	99,5	7,26	42,1	19,1	0,267	8,08
a	28	171	4,79	136	11,7	49,4	22,3	0,313	8,08
A	28	196	5,49	179	17,6	56,6	25,6	0,359	8,08
a	28	221	6,19	227	25,2	63,8	28,9	0,404	8,08

Tabel 2.18 (vervolg)

	b [mm]	h [mm]	A [mm^2]	W_y [mm^3]	I_y [mm^4]	i_y [mm]	W_z [mm^3]	I_z [mm^4]	i_z [mm]
			$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^6$		$\times 10^3$	$\times 10^6$	
H	59	71	4,19	49,6	1,76	20,5	41,2	1,22	17,0
A	59	96	5,66	90,6	4,35	27,7	55,7	1,65	17,0
A	59	121	7,14	143	8,71	34,9	70,2	2,07	17,0
A	59	146	8,61	209	15,3	42,1	84,7	2,50	17,0
A	59	156	9,20	239	18,7	45,0	90,5	2,67	17,0
A	59	171	10,1	287	24,6	49,4	99,2	2,93	17,0
a	59	196	11,6	377	37,0	56,6	113	3,35	17,0
A	71	96	6,82	109	5,23	27,7	80,7	2,86	20,5
A	71	121	8,59	173	10,5	34,9	101	3,61	20,5
A	71	146	10,4	252	18,4	42,1	122	4,35	20,5
A	71	171	12,1	346	29,6	49,4	143	5,10	20,5
A	71	196	13,9	454	44,5	56,6	164	5,85	20,5
A	71	221	15,7	577	63,9	63,8	185	6,59	20,5
a	71	246	17,5	716	88,1	71,0	206	7,34	20,5
a	71	271	19,2	869	117	78,2	227	8,08	20,5
a	96	96	9,22	147	7,08	27,7	147	7,08	27,7
a	96	121	11,6	234	14,2	34,9	185	8,92	27,7
a	96	146	14,0	341	24,9	42,1	224	10,8	27,7
a	96	196	18,8	614	60,2	56,6	301	14,5	27,7

Tabel 2.18 (vervolg)

	b [mm]	h [mm]	A [mm^2]	W_y [mm^3]	I_y [mm^4]	i_y [mm]	W_z [mm^3]	I_z [mm^4]	i_z [mm]
			$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^6$		$\times 10^3$	$\times 10^6$	
H	34	71	2,41	28,6	1,01	20,5	13,7	0,233	9,81
a	34	96	3,26	52,2	2,51	27,7	18,5	0,314	9,81
A	34	121	4,11	83,0	5,02	34,9	23,3	0,396	9,81
A	34	146	4,96	120	8,82	42,1	28,1	0,478	9,81
a	34	171	5,81	165	14,2	49,4	32,9	0,560	9,81
A	34	196	6,66	217	21,3	56,6	37,8	0,642	9,81
A	34	221	7,51	276	30,6	63,8	42,6	0,724	9,81
h	40	71	2,84	33,6	1,19	20,5	18,9	0,379	11,5
a	40	96	3,84	61,4	2,95	27,7	25,6	0,512	11,5
a	40	121	4,84	97,6	5,91	34,9	32,3	0,645	11,5
a	40	146	5,84	142	10,4	42,1	38,9	0,779	11,5
H	46	71	3,27	38,6	1,37	20,5	25,0	0,576	13,3
A	46	96	4,42	70,7	3,39	27,7	33,9	0,779	13,3
A	46	121	5,57	112	6,79	34,9	42,7	0,981	13,3
A	46	136	6,26	141	9,64	39,3	48,0	1,10	13,3
A	46	146	6,72	163	11,9	42,1	51,5	1,18	13,3
a	46	171	7,87	224	19,2	49,4	60,3	1,39	13,3
a	46	196	9,02	294	28,9	56,6	69,1	1,59	13,3

3 Steenconstructies

3.1 Algemeen

Met ingang van 1992 zijn de nieuwe normen van de *Technische Grondslagen voor Bouwconstructies TGB 1990* van kracht geworden. In de voordien geldende TGB 1972 werd bij de berekening van bouwconstructies de veiligheid verkregen door de optredende belastingen met een veiligheidsfactor te vermenigvuldigen. In de nieuwe normen is de beoordeling van constructies gebaseerd op een *betrouwbaarheidsanalyse*, waarin de onzekerheden van wege de spreiding in belastingen en materiaaleigenschappen tot uitdrukking zijn gebracht.

Bij deze nieuwe beoordelingswijze wordt gesteld dat bouwconstructies gedurende een vooraf vastgestelde referentieperiode (meestal 50 jaar) met een vooraf vastgestelde mate van betrouwbaarheid aan de gestelde eisen ten aanzien van de veiligheid en de bruikbaarheid moeten voldoen.

De *betrouwbaarheid* wordt bepaald door de kans dat een grenstoestand wordt overschreden. Als grenstoestanden worden onderscheiden:
- *uiterste grenstoestanden*, waarbij het maximum draagvermogen is bereikt;
- *bruikbaarheidsgrenstoestanden*.

Normen steenconstructies

De nieuwe veiligheidsfilosofie heeft zijn weerslag in de *materiaalnormen*. Voor de berekening en het ontwerp van *steenconstructies* dienen de volgende normen te worden geraadpleegd:
- NEN 6790 Steenconstructies TGB 1990. Basiseisen en bepalingsmethoden.
- NPR 6791. Eenvoudige ontwerpregels gebaseerd op NEN 6790.

Op 1 oktober 1996 verscheen een aanpassing van de norm aan de Ministeriële regelingen van het Bouwbesluit.

Het hierna volgende is bedoeld als *toelichting bij het gebruik van de norm NEN 6790*.

3.2 Draagvermogen van steenconstructies

Het *draagvermogen* van steenconstructies moet worden berekend volgens NEN 6790 TGB 1990–Steenconstructies. Hierin zijn de te gebruiken rekenmethoden, de aan te houden materiaalsterkten en de materiaalfactor aangegeven. De berekening mag worden beperkt tot de *uiterste grenstoestand*. Op basis van NEN 6790 mag worden aangenomen, dat als wordt voldaan aan de eisen m.b.t. de uiterste grenstoestand, ook wordt voldaan aan de eisen m.b.t. de bruikbaarheidgrenstoestand.

3.3 Belastingen

De te gebruiken belastingen en belastingcombinaties moeten worden ontleend aan NEN 6702.

3.4 Materiaaleigenschappen

Algemeen

De rekenwaarden voor de sterkte f_d worden bepaald met:

$$f_d = \frac{f_{rep}}{\gamma_m} \qquad [\text{spanning}]$$

waarin:
f_{rep} is de representatieve sterkte
γ_m is de materiaalfactor

Voor de *materiaalfactor* van steenconstructies geldt:

$$\gamma_m = 1{,}8$$

Druksterkte

Rekenwaarde:

$$f'_{d} = \frac{f'_{rep}}{1{,}8}$$

De representatieve druksterkte f'_{rep} dient te worden afgeleid uit proeven (NEN 6790, bijlage A). Indien geen proeven worden gedaan, mag gebruik worden gemaakt van de tabellen 1 t/m 4 in NEN 6790. Daarin zijn voor baksteen, kalkzandsteen, betonsteen en cellenbeton afzonderlijk de aan te houden representatieve druksterkten aangegeven in relatie tot de toegepaste steen- en mortelsterkten.

Buigtreksterkte

Rekenwaarde:

$$f_{m;d} = \frac{f_{m;rep}}{1{,}8}$$

De beproeving is geregeld in NEN 6790, bijlage B.

Indien niet door proeven bepaald, mag volgens NEN 6790-9.2.3 en NEN 6791-4 voor de representatieve buigtreksterkte worden aangehouden:

- Bij toepassing van lijmmortels die voldoen aan de eisen aan lijmmortels in tabel 5 van NEN 3835:

$$f_{m;\perp;rep} = 1{,}5 \cdot 0{,}4 = 0{,}6\,N/mm^2$$
$$f_{m;//;rep} = 3{,}0 \cdot 0{,}4 = 1{,}2\,N/mm^2$$

- Bij toepassing van overige mortels die voldoen aan de eisen aan morteltypen I en II in tabel 3 van NEN 3835:

$$f_{m;\perp;rep} = 1{,}5 \cdot 0{,}2 = 0{,}3\,N/mm^2$$
$$f_{m;//;rep} = 3{,}0 \cdot 0{,}2 = 0{,}6\,N/mm^2$$

$f_{m;\perp;rep}$ en $f_{m;//;rep}$ zijn de representatieve buigtreksterkten in de richting *loodrecht op* respectievelijk *evenwijdig aan* de lintvoegen.

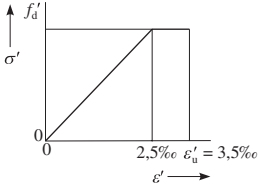
Schuifsterkte
Rekenwaarde:

$$f_{v;d} = \frac{f_{v;rep}}{1{,}8}$$

Voor de representatieve schuifsterkte $f_{v;rep}$ geldt:

$$f_{v;rep} = 0{,}5 f_{m;\perp;rep}$$

Verband tussen σ' en ε'
Hiervoor dient het σ'-ε'-diagram volgens figuur 3.1 te worden aangehouden:



Figuur 3.1 Bilineair σ'-ε'-diagram

3.5 Krachtsverdeling

Theorieën
De berekening van de *krachtsverdeling* in de constructie resulteert in de bepaling van de doorsnedekrachten en momenten. Deze berekening moet plaatsvinden volgens art. 10.2 van NEN 6790. Daarbij moet voor op druk en buiging belaste constructiedelen de invloed van de slankheid op de sterkte in rekening worden gebracht met behulp van een 2e-orde-theorie; hierin zijn de invloed van de uitbuigingen en het niet-lineaire gedrag verdisconteerd. Bij de berekening van de krachtsverdeling mogen de volgende theorieën worden toegepast:

– *Niet-lineaire elasticiteitstheorie* (NLE): hierin wordt uitgegaan van de *gescheurde* doorsnede (hierbij mag dus niet op de

treksterkte worden gerekend) en een *bilineair* σ'-ε-diagram, zoals in Figuur 3.1 is aangegeven.
- *Quasi-lineaire elasticiteitstheorie* (KLE): hierin is een *geschematiseerd verband tussen moment en kromming* vastgelegd (M-κ-*diagram*).
- *Lineaire elasticiteitstheorie* (LE): hierin wordt uitgegaan van de *ongescheurde* doorsnede; de LE mag alleen worden toegepast voor de krachtsverdeling van de *1e-orde*.

Toepassing LE: druk en buiging – vloerdragende wanden en -kolommen en stijve kernen

Voor op druk en buiging belaste constructiedelen mag de 1e-orde krachtsverdeling worden bepaald met behulp van de lineaire elasticiteitstheorie (LE). Voor de *elasticiteitsmodulus* van metselwerk E dient daarbij te worden aangehouden:

$$E = 1000 f'_{\text{rep}}$$

waarin:
f'_{rep} is de representatieve druksterkte van metselwerk

Hieruit volgen de 1e-orde doorsnedekrachten N'_{d} en $M_{\text{o;d}}$.

De berekening wordt vervolgens beperkt tot de maatgevende doorsneden, waarbij het *2e-orde effect* in rekening mag worden gebracht door de invoering van een *toeslagexcentriciteit* e_{c}.

De maatgevende doorsneden moeten worden berekend op de *rekenwaarde* van de optredende *normaaldrukkracht* N'_{d}, in combinatie met een *buigend moment* M_{d}, waarvoor geldt:

$$M_{\text{d}} = N'_{\text{d}} \cdot e_{\text{t}}$$

Hierin is e_{t} de *totale excentriciteit*, waarvoor dient te worden aangehouden:

$$e_{\text{t}} = \xi(e_0 + e_{\text{c}})$$

waarin:
e_0 is de 1e-orde excentriciteit; $e_0 = M_{\text{o;d}}/N'_{\text{d}}$ (volgt uit de krachtsverdeling)

e_c is de toeslagexcentriciteit
ξ is een factor afhankelijk van randvoorwaarden bij opleggingen

De formules voor de bepaling van e_c en ξ zijn in NEN 6790 aangegeven voor de gevallen:
- Wanden in geschoorde raamwerken: art. 10.3.2.2.
- Eenzijdig ingeklemde wanden: art. 10.3.2.3.
- Stabiliteitskernen: art. 10.3.2.4.

Toepassing LE: druk en buiging– niet-vloerdragende gevels

Ook voor niet-vloerdragende gevels mag de lineaire elasticiteitstheorie (LE) worden toegepast. Bij het toetsen van de door-snedecapaciteit mag in dit geval de buigtreksterkte in rekening worden gebracht.

Toepassing LE: dwarskracht

De berekening van de dwarskracht mag eveneens plaatshebben volgens de lineaire elasticiteitstheorie (LE).

Toepassing NLE en KLE

In raamwerken leidt de toepassing van de lineaire elasticiteitstheorie (LE) bij de 1e-orde krachtsverdeling meestal tot *te grote buigende momenten* in de wanden; deze kunnen dan bij de door-snedeberekening, waarbij *niet* op de treksterkte mag worden gerekend, niet worden opgenomen.
Dit is een gevolg van het feit dat de LE geen rekening houdt met scheurvorming en plastische vervorming, die in werkelijkheid (in de uiterste grenstoestand) wel optreden.
De werkelijke stijfheid van de wanden is dus kleiner dan de ingevoerde stijfheid, zodat ook de werkelijk optredende momenten kleiner zijn dan de volgens de LE berekende. Het verschil kan heel groot zijn. De LE is daarom voor raamwerken in het algemeen een veel te grove benadering. De berekening van raamwerken dient daarom in het algemeen plaats te vinden volgens de *niet-lineair elastische* (NLE) of de *kwasi-lineair elastische methode* (KLE). Deze methoden zijn zeer bewerkelijk.

Tabellenmethode

Het bezwaar van dergelijke gecompliceerde berekeningen is in de TGB-Steen voor een groot deel ondervangen door de invoering van een *vereenvoudigde ontwerpmethode met behulp van tabellen*. Deze ontwerptabellen, voor dragende wanden in woongebouwen, zijn opgenomen in NPR 6791. Met behulp hiervan kan, mits is voldaan aan een aantal toepassingsvoorwaarden, de dikte van dragende wanden worden bepaald als functie van de toegepaste metselwerkkwaliteit.
De berekeningen, die aan deze tabellen ten grondslag liggen, zijn gebaseerd op de *niet-lineaire elasticiteitstheorie* (NLE).

3.6 Dimensionering (toetsing)

Algemeen

In het algemeen moet worden voldaan aan de eis dat:

$$\frac{1}{\gamma_M} \cdot F_d \leqq F_{u;d}$$

waarin:

F_d is de rekenwaarde voor de kracht op het constructiedeel of de doorsnede, volgend uit de krachtsverdeling
$F_{u;d}$ is de rekenwaarde van de uiterst opneembare kracht, bepaald volgens NEN 6790, de TGB-Steen
γ_M is de modelfactor

Modelfactor

Voor *eengezinswoningen* en voor *gevels* mag de rekenwaarde van de optredende kracht worden gereduceerd door deling door de factor $\gamma_M = 1{,}3$. Hiermee wordt tot uitdrukking gebracht dat een lager veiligheidsniveau toelaatbaar is dan bij overige constructies, waarvoor geldt $\gamma_M = 1{,}0$. Dit is bij verticaal belaste constructies niet mogelijk met behulp van de klasse-indeling volgens NEN 6702. De toegestane invoering van een lagere belastingsfactor voor de veranderlijke belasting (1,3 voor klasse 2 in plaats van 1,5 voor klasse 3) heeft namelijk praktisch geen invloed vanwege het kleine aandeel van de veranderlijke belasting in de totale belasting bij eengezinswoningen.

Druk en buiging

In iedere doorsnede moet worden voldaan aan de voorwaarde:

$$\frac{1}{\gamma_M} \cdot N'_d \leqq N'_{u;d}$$

waarin:

N'_d is de rekenwaarde optredende normaalkracht
$N'_{u;d}$ is de bij de rekenwaarde van het optredende buigend moment M_d behorende rekenwaarde van de maximaal opneembare normaalkracht
M_d is de rekenwaarde van het optredende buigend moment
γ_M is de modelfactor

De rekenwaarden van de optredende normaalkracht en het optredende buigend moment, N'_d en M_d, volgen uit de berekening van de krachtsverdeling in de constructie (zie par. 3.5).

Bepaling van $N'_{u;d}$

In *het algemeen* dient de rekenwaarde van de maximaal opneembare normaalkracht $N'_{u;d}$ te worden bepaald met behulp van het σ'-ε'-*diagram* (figuur 3.1) en de *rekenwaarde voor de druksterkte* f'_d. Hierbij mag dus geen gebruik worden gemaakt van de treksterkte van metselwerk.

Voor *rechthoekige doorsneden* mag gebruik worden gemaakt van tabel 3.1, en geldt voor $N'_{u;d}$:

$$N'_{u;d} = c_1 \cdot f'_d \cdot b \cdot d$$

waarin:

$N'_{u;d}$ is de rekenwaarde van de maximaal opneembare normaalkracht in de doorsnede bij excentriciteit e_t
f'_d is de rekenwaarde van de druksterkte van het metselwerk
d is de totale hoogte van de doorsnede, gemeten in de buigingsrichting
b is de afmeting van de doorsnede, loodrecht op d gemeten
e_t is de totale excentriciteit

Tabel 3.1 Waarden van c_1 bij rechthoekige doorsneden

e_t/d	c_1	e_t/d	c_1
0,00	1,00	0,30	0,36
0,05	0,86	0,35	0,27
0,10	0,74	0,40	0,18
0,15	0,63	0,45	0,09
0,20	0,54	0,50	0,00
0,25	0,45		

Voor het bijzondere geval van de aan onder- en bovenzijde gesteunde wand met rechthoekige doorsnede en constante 1e-orde excentriciteit e_0 mag de bepaling van $N_{u;d}$ plaatsvinden op basis van e_0 in plaats van e_t volgens tabel 7 in NEN 6790.

Buiging in niet-vloerdragende gevels

Hierbij mag gebruik worden gemaakt van de *buigtreksterkte*. In iedere doorsnede moet worden voldaan aan de voorwaarde:

$$\frac{1}{\gamma_M} \cdot \left(\frac{M_d}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot d^2} - \frac{N'_d}{b \cdot d} \right) \leqq f_{m;d}$$

waarin:

M_d is de rekenwaarde van het optredende buigend moment in de doorsnede
N'_d is de rekenwaarde van de optredende normaaldrukkracht in de doorsnede
b is de breedte van de doorsnede
d is de hoogte van de doorsnede
$f_{m;d}$ rekenwaarde van de buigtreksterkte
γ_M is de modelfactor

Onderscheid wordt gemaakt tussen buiging in horizontale en in verticale doorsneden, waarbij $f_{m;\perp;d}$ en $f_{m;//;d}$ verschillende waarden hebben. In het geval hierboven is de berekening van de horizontale doorsnede bedoeld.

Dwarskracht
In iedere doorsnede geldt de eis:

$$\frac{F_{v;d}}{b \cdot h} \cdot \frac{1}{\gamma_M} \leqq 0{,}20 \cdot \frac{N'_d}{A} + f_{v;d}$$

waarin:

$F_{v;d}$	is de rekenwaarde van de optredende dwarskracht
b en h	zijn respectievelijk de breedte en de hoogte van de effectieve doorsnede (‘lijf’ van profiel)
γ_M	is de modelfactor
A	is de bruto-oppervlakte van de doorsnede
$f_{v;d}$	is de rekenwaarde voor de schuifsterkte

3.7 Eenvoudige ontwerpregels

In de Nederlandse praktijkrichtlijn NPR 6791 zijn eenvoudige ontwerpregels opgenomen voor:
- De bepaling van de dikte van dragende wanden in woningen en woongebouwen.
- Het ontwerp van gevels en stabiliteitswanden.

Bovendien is de representatieve buigtreksterkte van metselwerk gegeven als functie van de hechtsterkte.

4 Betonconstructies

De berekening van *betonconstructies* is voornamelijk gebaseerd op het gebruik van normen. **Uitgebreide gegevens**, richtlijnen en voorschriften zijn vastgelegd in met name NEN 5950, VBT 1986, NEN 6720 en VBC 1990. Zie ook par. 1.1. Normen zijn verkrijgbaar bij het **Nederlands Normalisatie-instituut** te Delft.

4.1 Lijst van symbolen

A_b = oppervlakte betondoorsnede [mm^2]
A_p = oppervlakte doorsnede voorspanstaal [mm^2]
A_s = oppervlakte doorsnede betonstaal [mm^2]
A_{sb} = oppervlakte doorsnede beugels of haarspelden [mm^2]
A_{sv} = oppervlakte doorsnede dwarskracht- c.q. afschuifwapening [mm^2]
a = afstand, afmeting, opleglengte, wapeningsafstand [mm]
a_b = breedte lastvlak [mm]
a_l = lengte lastvlak [mm]
b = breedte betondoorsnede, strookbreedte [mm]
b_w = strookbreedte, rib- of lijfbreedte [mm]
C = rotatieveerconstante [kNm/rad]
c = betondekking [mm]
c_{min} = voorgeschreven betondekking [mm]
D = grootste korrelafmeting [mm]
d = nuttige hoogte betondoorsnede [mm]
E'_b = elasticiteitsmodulus beton [N/mm^2]
E_f = fictieve elasticiteitsmodulus [N/mm^2]
E_s = elasticiteitsmodulus betonstaal [N/mm^2]
E_p = elasticiteitsmodulus voorspanstaal [N/mm^2]
e = excentriciteit [mm]
e_l = beginexcentriciteit [mm]
e_o = (grootste) beginexcentriciteit [mm]
e_c = toeslagexcentriciteit [mm]
e_t = totale excentriciteit [mm]
F_a = bijzondere belasting [kN]

F_d = rekenwaarde geconcentreerde last, ponskracht, oplegkracht [kN]
F_{hd} = rekenwaarde horizontale kracht [kN]
f_b = rekenwaarde treksterkte beton [N/mm^2]
f'_b = rekenwaarde druksterkte beton [N/mm^2]
f_{bm} = gemiddelde treksterkte beton [N/mm^2]
f_{br} = gemiddelde buigsterkte beton [N/mm^2]
f_{brep} = representatieve waarde treksterkte beton [N/mm^2]
f'_{brep} = representatieve waarde druksterkte beton [N/mm^2]
f_{bt} = rekenwaarde treksterkte beton op bepaald tijdstip [N/mm^2]
f'_{bt} = rekenwaarde druksterkte beton op bepaald tijdstip [N/mm^2]
f'_{ck} = karakteristieke kubusdruksterkte [N/mm^2]
f_s = rekenwaarde treksterkte betonstaal [N/mm^2]
f_{srep} = representatieve waarde treksterkte betonstaal [N/mm^2]
G = permanente belasting [kN]
h = totale hoogte betondoorsnede [mm]
h_m = fictieve dikte betondoorsnede [mm]
I = kwadratisch oppervlaktemoment ongescheurd verondersteld doorsnede bij buiging [mm^4]
I_t = geometrisch moment ongescheurd verondersteld doorsnede bij wringing [mm^4]
i = oppervlakte-moment-arm (traagheidsstraal) [mm]
k = coëffciënt, factor, verhouding [–]
k_a = verhouding wapeningsdoorsneden [–]
k_x = verhouding hoogte drukzone en nuttige hoogte [–]
L = dagmaat [m]
l = lengte, theoretische overspanning [m]
l_o = afstand tussen momentennulpunten, overdrachtslengte[m]
l_c = kniklengte [mm]
l_l = laslengte [mm]
l_v = verankeringslengte [mm]
l_{vo} = basisverankeringslengte [mm]
l_{vr} = gereduceerde verankeringslengte [mm]
l_x = overspanning in x-richting [m]
l_y = overspanning in y-richting [m]
M_c = toeslagmoment [kNm]

M_d = rekenwaarde buigend moment in uiterste grenstoestand [kNm]
M_{rep} = buigend moment in bruikbaarheidsgrenstoestand [kNm]
M_r = buigend moment waarbij scheurvorming optreedt (scheurmoment) [kNm]
M_{rt} = scheurmoment bij langerduur-belasting [kNm]
M_u = uiterst opneembaar buigend moment (breukmoment) [kNm]
M_{sd} = rekenwaarde steunpuntsmoment [kNm]
M_{vd} = rekenwaarde veldmoment [kNm]
M_e = buigend moment bij begin plastische vervorming wapening (vloeimoment) [kNm]
m = moment per eenheid van lengte, aantal [kNm]
m^* = wapeningsmoment [kNm]
m_v = veldmoment [kNm]
m_s = steunpuntsmoment [kNm]
N'_b = normaaldrukkracht in betondrukzone [kN]
N'_{cr} = kritieke (Eulerse) knikbelasting [kN]
N_d = rekenwaarde normaalkracht in uiterste grenstoestand [kN]
N'_{vd} = rekenwaarde totale verticale normaalkracht [kN]
N'_u = uiterst opneembare normaaldrukkracht [kN]
n = aantal, Eulerse knikveiligheid [–]
O_b = omtrek betondoorsnede [mm]
p = gelijkmatig verdeelde belasting per oppervlakte, perimeter [kN/m^2]
Q = veranderlijke belasting [kN]
Q_e = extreme veranderlijke belasting [kN]
Q_m = momentane veranderlijke belasting [kN]
q = gelijkmatig verdeelde belasting per lengte [kN/m′]
q_{eg} = gelijkmatig verdeelde belasting eigen gewicht [kN/m′]
q_{rb} = gelijkmatig verdeelde rustende belasting [kN/m′]
q_g = gelijkmatig verdeelde permanente belasting [kN/m′]
q_p = gelijkmatig verdeelde belasting t.g.v. voorspanning [kN/m′]
q_q = gelijkmatig verdeelde veranderlijke belasting [kN/m′]
q_d = rekenwaarde gelijkmatig verdeelde totale belasting [kN/m′]

q_w = gelijkmatig verdeelde windbelasting [kN/m′]
q_h = gelijkmatig verdeelde horizontale belasting [kN/m′]
r = kromtestraal, inklemmingsstraal, ombuigingsstraal [mm]
S = linear oppervlaktemoment (statisch moment) afschuivende deel doorsnede t.o.v. zwaartelijn [mm^3]
s = staafafstand, tussenafstand, randafstand, breedte wapeningsbaan [mm]
T = temperatuur [K]
T_d = rekenwaarde wringend moment [kNm]
T_1 = opneembaar wringend moment zonder wringwapening [kNm]
u_{on} = onmiddellijk optredende doorbuiging [mm]
u_{bij} = bijkomende doorbuiging [mm]
u_{tot} = totale doorbuiging [mm]
u_{eind} = doorbuiging in eindtoestand [mm]
u_{ze} = zeeg [mm]
V_d = rekenwaarde dwarskracht [kN]
V_{Td} = rekenwaarde dwarskracht t.g.v. wringend moment [kN]
V_1 = opneembare dwarskracht zonder dwarskrachtwapening [kN]
v = vellingkant, voegdikte [mm]
W = weerstandsmoment m.b.t. meest getrokken vezels [mm^3]
W_t = weerstandsmoment m.b.t. wringing [mm^3]
w = scheurwijdte [mm]
x = afstand, asrichting [mm]
x_u = hoogte drukzone in uiterste grenstoestand [mm]
y = afstand drukresultante tot meest gedrukte rand, afstand, asrichting [mm]
z = inwendige hefboomsarm [mm]
z_b = afstand zwaartelijn of buigingsas tot meest gedrukte rand [mm]
α = thermische uitzettingscoëfficiënt [K^{-1}]
ε'_r = specifieke krimpverkorting [–]
η = reductiefactor kolomstijfheid [–]
θ = hoek tussen drukdiagonaal en liggeras of afschuifvlak [–]
κ = kromming [–]

κ_m = kromming bij $M = 0{,}8\ M_d$ [–]
κ_r = kromming bij $M = M_r$ [–]
κ_u = kromming bij $M = M_u$ [–]
κ_e = kromming bij $M = M_e$ [–]
λ_h = slankheid [–]
λ_v = dwarskrachtslankheid [–]
μ = factor, wrijvingscoëfficiënt [–]
ν = Poisson-verhouding [–]
ξ = coëfficiënt excentriciteitsverloop, aanhechtingsfactor [–]
ρ = reductiefactor wandlengte, stijfheidsverhouding [–]
σ_b = spanning in het beton [N/mm^2]
σ'_{bmd} = gemiddelde betondrukspanning t.g.v. rekenwaarde normaalkracht incl. voorspanbelasting ($= N'd/A_b$) [N/mm^2]
$\Delta\sigma'_{bm}$ = spanningsverlies t.g.v. belemmering verkorting [N/mm^2]
σ_s = spanning in betonstaal [N/mm^2]
τ_d = rekenwaarde optredende schuifspanning [N/mm^2]
τ_n = aandeel normaalkracht in schuifsterkte [N/mm^2]
τ_s = opneembare schuifspanning door dwarskrachtwapening [N/mm^2]
τ_u = totale uiterst opneembare schuifspanning [N/mm^2]
τ_1 = grenswaarde schuifspanning zonder dwarskrachtwapening [kN/mm^2]
τ_2 = grenswaarde schuifspanning met dwarskrachtwapening [N/mm^2]
ϕ = hoekverandering, kruipcoëfficiënt [–]
$\varnothing_k$ = kenmiddellijn betonstaalstaaf, middellijn voorspandraad of -streng [mm]
$\varnothing_{km}$ = gemiddelde kenmiddellijn [mm]
ψ = verhouding momentane en extreme veranderlijke belasting, vormfactor, reductiefactor momenten in puntvormig ondersteunde platen [–]
ω_o = wapeningspercentage buigtrekwapening beton- en voorspanstaal voor nuttige hoogte = $\omega_{op} + \omega_{os}$ [%]
ω_{op} = wapeningspercentage buigtrekwapening voorspanstaal voor nuttige hoogte [%]
ω_{os} = wapeningspercentage buigtrekwapening betonstaal voor nuttige hoogte [%]

$\bar{\omega}_\circ$ = wapeningspercentage buigtrekwapening beton- en voorspanstaal voor totale hoogte $= \bar{\omega}_{op} + \bar{\omega}_{os}[\%]$
$\bar{\omega}_t$ = wapeningspercentage totale wapening beton- en voorspanstaal voor totale hoogte [%]
$\varnothing$ = middellijn
$'$ = accent, druk
$\not>$ = niet groter dan
$\not<$ = niet kleiner dan

4.2 Betontechnologie

Betonsoorten

- *Lichtbeton* : volumieke massa $\leqslant$ 2000 kg/m^3
- *Beton* : volumieke massa 2000–2800 kg/m^3
- *Zwaarbeton* : volumieke massa $\geqslant$ 2800 kg/m^3

Tabel 4.1 Sterkteklassen beton

sterkteklasse	karakteristieke kubusdruksterkte f'_{ck}[N/mm^2]	keuringscriterium $\bar{x}_{12} - 1{,}53\ s_{12} \geqq f'_{ck}$ [N/mm^2]		
B5	5		eventueel	$\bar{x}_6 \geqslant 12$
B15	15		eventueel	$\bar{x}_6 \geqslant 23$
B25	25		eventueel	$\bar{x}_6 \geqslant 33$
B35	35		eventueel	$\bar{x}_6 \geqslant 43$
B45	45	$\bar{x} \geqslant 45 + 2{,}2s$	voor $s = 3{,}5$	$\bar{x} \geqslant 53$
B55	55	$\bar{x} \geqslant 55 + 2{,}2s$	voor $s = 3{,}5$	$\bar{x} \geqslant 63$

Bij toepassing van de 'eenvoudige' methode geldt bovendien dat de laagste waarde uit een serie van 6 proefkubussen $\geqslant 0{,}9 \cdot f'_{ck}$.

Tabel 4.2 Correctiefactoren kubusafmentingen

ribbe kubus [mm]	factor
100	0,91
150	1,00
200	1,05
300	1,10

Tabel 4.3 Aantal bepalingen van de kubusdruksterkte

sterkteklasse	productie per stortdag [m^3]	bepalingen per stortdag per 40 m^3
B5 en B15	< 40	1
	40–240	1
	> 240	6
B25 en B35	⩽ 40	2
	> 40–240	1
	> 240	6
B45 en B55	< 40	2
	40–240	2
	> 240	12

Het aantal proefkubussen per serie van 12 (6) moet vervaardigd zijn binnen een periode van 20 kalenderdagen

Tabel 4.4 Milieuklassen beton

milieu-klasse	milieu	water-cement-factor		minimaal cement-gehalte [kg/m^3]
1	droog	⩽ 0,65	gewapend beton	280
		⩽ 0,60	voorgespannen beton	
2	vochtig	⩽ 0,55		280–300
3	vochtig in combinatie	⩽ 0,55	met luchtbelvormer	280–300
	met dooizouten	⩽ 0,45	zonder luchtbelvormer	
4	zeewater	⩽ 0,55	met luchtbelvormer	280–300
		⩽ 0,45	zonder luchtbelvormer	280–300
5a	zwak agressief	⩽ 0,55		280–300
5b	matig agressief	⩽ 0,50		300
5c	sterk agressief	⩽ 0,45		300
5d	zeer sterk agressief	⩽ 0,45		300

Tabel 4.5 Aantal bepalingen van de water-cementfactor

milieuklasse	productie per stortdag [m^3]	bepalingen per stortdag per 40 m^3
1 en 2	< 40	1
	40–120	1
	> 120	3
3 t/m 5	⩽ 40	1
	> 40–240	1
	> 240	6

Tabel 4.6 Vereist luchgehalte voor milieuklasse 3 en 4

grootste korrelafmeting D [mm]	vereist luchtgehalte [%(V/V)]	waardering luchtgehalte als gehalte aan effectief fijn materiaal per m^3 [m^3]
8	5,0	0,0030
16	4,0	0,0020
31,5	3,5	0,0015
63	3,0	0,0010

Tabel 4.7 Minimale hoeveelheid fijn materiaal

grootste korrelafmeting D [mm]	minimale hoeveelheid fijn materiaal (< 250 μm) per m^3 beton [m^3]
8	0,140
16	0,125
31,5	0,115

Consistentiegebieden

Tabel 4.8 Consistentiegebieden voor betonspecie met een grootste korrelafmeting (D) van ten hoogste 40 mm

consistentie-gebied	verwerkbaarheid	verdichtings-maat	zetmaat [mm]	schudmaat [mm]
1	aardvochtig	$\geqslant$ 1,26	$\leqslant$ 40	
2	halfplastisch	1,25–1,11	50–90	250–350
3	plastisch	1,10–1,04	100–150	360–480
4[1)]	vloeibaar		$\geqslant$ 160	490–600

Bij twijfel geldende meetmethode.

1) Gebied 4 alleen toegestaan, indien deze consistentie wordt verkregen met een superplastificeerder.

Ontkisten

Tabel 4.9 Tijdstip van ontkisten

bepaald uit sterkte beton		bepaald uit verhardingstijd			
sterkte-klasse	vereiste $\bar{x}_3$ bij ontkisten	cement-klasse	zijbekisting van balken wanden en kolommen	onderbekisting van vloeren en balken	
				met een over-spanning $\leqslant$ 3 m	met een over-spanning $>$ 3 m
B15	18	klasse A	3 dagen	8 dagen	20 dagen
B25	25	klasse B	2 dagen	5 dagen	10 dagen
B35	32	klasse C	1 dag	3 dagen	6 dagen
B45	39				
B55	46	gemiddelde etmaaltemperatuur $>$ 4 °C			

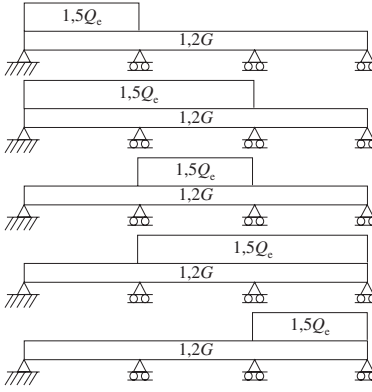
Opmerkingen:

- Indien dit door berekening wordt aangetoond mogen voor $\bar{x}_3$ lagere waarden worden aangehouden met een minimum van:
  - $\bar{x}_3 \geqslant 3{,}5$ N/mm^2 voor niet dragende constructiedelen;
  - $\bar{x}_3 \geqslant 14$ N/mm^2 voor dragende constructiedelen.
- $\bar{x}_3 =$ gemiddelde kubusdruksterkte van 3 achtereenvolgende kubussen.

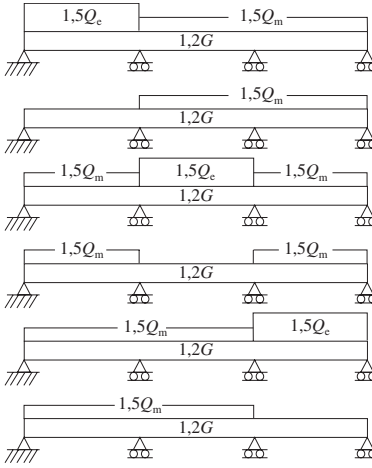
4.3 Voorgeschreven belastingscombinaties

Uitvoeringsstadium:
- Belastingfactor veranderlijke belasting 1,2
- Reductie extreme windbelasting 0,6

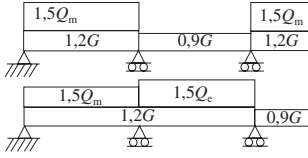
Symbolen:
G = permanente belasting (eigen gewicht + rustende belasting) [kN/m^2]
Q_e = extreme waarde veranderlijke belasting [kN/m^2]
$Q_m = \psi \cdot Q_e$ = momentane waarde veranderlijke belasting [kN/m^2]
P_e = extreme waarde veranderlijke belasting [kN/m^2]



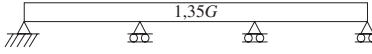
Figuur 4.1a Voorgeschreven belastingscombinaties voor $p_e \geqslant 4{,}0$ kN/m^2



Figuur 4.1b Voorgeschreven belastingscombinaties voor $p_e < 4{,}0$ kN/m^2



Figuur 4.1c Belastingscombinaties bij overstek



Figuur 4.1d Aanvullende belastingscombinatie voor constructies vrijwel uitsluitend belast door permanente belasting

4.4 Gegevens voor de berekening

Tabel 4.10 Grindbeton

sterkte-klasse	f'_{ck} [N/mm^2]	f'_b [N/mm^2]	f_b [N/mm^2]	f_{brep} [N/mm^2]	f_{brep} [N/mm^2]	f_{bm} [N/mm^2]	E'_b [N/mm^2]
B15	15	9	0,90	10,8	1,26	1,8	26 000
B25	25	15	1,15	18,0	1,61	2,3	28 500
B35	35	21	1,40	25,2	1,96	2,8	31 000
B45	45	27	1,65	32,4	2,31	3,3	33 500
B55	55	33	1,90	39,6	2,66	3,8	36 000
B65	65	39	2,15	46,8	3,01	4,3	38 500

$f'_b = 0{,}6\, f'_{ck}$ $\qquad$ $f_{bm} = 2 f_b$

$f'_{brep} = 0{,}72\, f'_{ck}$ $\qquad$ $f_{br} = (1{,}6 - h) \cdot f_{bm} \leqslant f_{bm}(h \text{ in m})$

$f_{brep} = 0{,}7(1{,}05 + 0{,}05\, f'_{ck})$ $\qquad$ $E'_b = (22\,250 + 250\, f'_{ck})$

$f_b = f_{brep}/1{,}4$ $\qquad$ $\varepsilon'_{bu} = 3{,}5\,‰$

Poissonverhouding:

$0{,}1 \leqslant \nu \leqslant 0{,}2$

$\nu = 0$ voor overwegend gescheurde constructies

Thermische uitzettingscoëfficiënt: $\alpha = 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$

Tabel 4.11 Betonstaal

	staalsoort	f_{srep} [N/mm^2]	f_s [N/mm^2]	ε_{su} [%]	E_s [N/mm^2]
staven	FeB 220 HWL	220	190	5	200 000
	FeB 400 HWL, HK	400	350	4	200 000
	FeB 500 HWL, HK	500	435	3,25	200 000
	FeB 500 HKN	500	435	2,75	200 000
gepuntlaste wapenings-netten	FeB 500 HKN, HWN	500	435	2,75	200 000

$f_s = f_{srep}/1{,}15$

Thermische uitzettingscoëfficiënt: $\alpha = 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$

4.5 Verankeringslengte betonstaal

Tabel 4.12a Basisverankeringslengte l_{vo}

sterkte-klasse	$f'_b = 0{,}6 \cdot f'_{ck}$	geribd staal				glad staal	
		FeB 500 $f_s = 435$		FeB 400 $f_s = 350$		FeB 220 $f_s = 190$	
		$\frac{c}{\varnothing_k} = 1$	$\frac{c}{\varnothing_k} = 4$	$\frac{c}{\varnothing_k} = 1$	$\frac{c}{\varnothing_k} = 4$	$\frac{c}{\varnothing_k} = 1$	$\frac{c}{\varnothing_k} = 4$
B15	9	52 $\varnothing_k$	35 $\varnothing_k$	42 $\varnothing_k$	28 $\varnothing_k$	46 $\varnothing_k$	31 $\varnothing_k$
B25	15	40 $\varnothing_k$	27 $\varnothing_k$	32 $\varnothing_k$	22 $\varnothing_k$	36 $\varnothing_k$	24 $\varnothing_k$
B35	21	34 $\varnothing_k$	23 $\varnothing_k$	27 $\varnothing_k$	18 $\varnothing_k$	30 $\varnothing_k$	20 $\varnothing_k$
B45	27	30 $\varnothing_k$	20 $\varnothing_k$	24 $\varnothing_k$	16 $\varnothing_k$	27 $\varnothing_k$	18 $\varnothing_k$
B55	33	27 $\varnothing_k$	18 $\varnothing_k$	22 $\varnothing_k$	15 $\varnothing_k$	24 $\varnothing_k$	16 $\varnothing_k$
B65	39	25 $\varnothing_k$	17 $\varnothing_k$	20 $\varnothing_k$	13 $\varnothing_k$	22 $\varnothing_k$	15 $\varnothing_k$

$$l_{vo} = \alpha_1 \frac{f_s}{\sqrt{f'_b}} \cdot \varnothing_k$$

Geribd staal: $\alpha_1 = 0{,}40\left(1 - 0{,}1\frac{c}{\varnothing_k}\right) \nless 0{,}24$

Glad staal: $\alpha_1 = 0{,}80\left(1 - 0{,}1\frac{c}{\varnothing_k}\right) \nless 0{,}48$

c = dekking op beschouwde staaf $\leqslant 4\,\varnothing_k$
$\varnothing_k$ = kenmiddellijn enkele staaf [mm]

Tabel 4.12b Verankeringslengte l_v (vermenigvuldigingsfactor $\times$ l_{vo})

	$\varnothing_k \leqslant 25$	$\varnothing_k > 25$	onderstaven <200	bovenstaven ⩽200 ⩾200
enkele staven	1,0 l_{vo}	1,25 l_{vo}	1,0 l_{vo}	1,25 l_{vo}
bundels van 2 staven	1,2 l_{vo}	1,50 l_{vo}	1,0 l_{vo}	1,25 l_{vo}
bundels van 3 staven	1,3 l_{vo}	1,60 l_{vo}	1,0 l_{vo}	1,25 l_{vo}

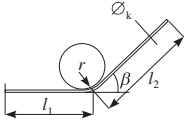
Op trek belaste omgebogen staven

Voor $\varnothing_k \geqslant 16$ en $\beta > 45°$ geldt:

$$l_2 \leqslant \frac{f'_b}{150} \cdot \frac{r}{\varnothing_k} \cdot l_v$$

waarin:

r = buigstraal ombuiging, hiervoor behoeft geen kleinere waarde dan $5\varnothing_k$ te worden aangehouden



Figuur 4.2 Omgebogen staaf

Trekstaven (of getrokken staven)

$$l_v = \text{vermenigvuldigingsfactoren} \times l_{vo}$$

$$l_{vr} = \frac{\sigma_{sd}}{f_s} \cdot l_v \geqslant \frac{l_v}{5} \text{ en } \geqslant 70\,\text{mm}$$

Drukstaven (of gedrukte staven)

Wanneer in de verankeringslengte geen ombuigingen voorkomen geldt:

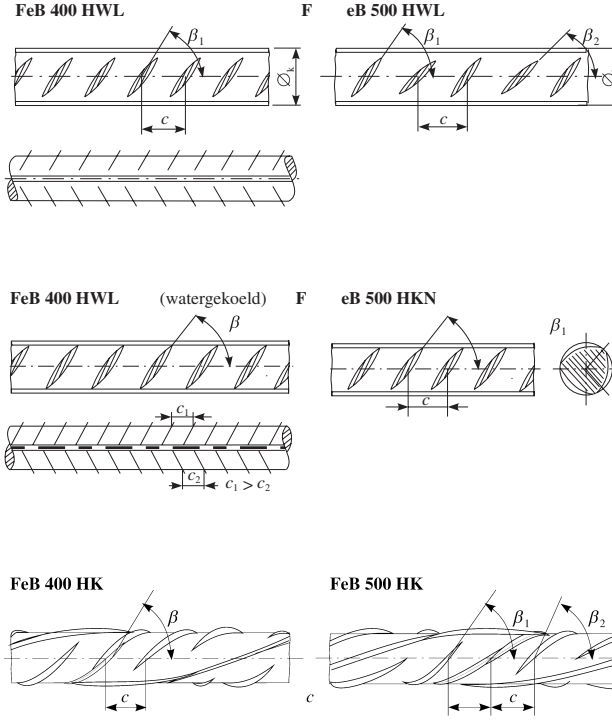
$$l_v = 0{,}7 \cdot \text{vermenigvuldigingsfactoren} \times l_{vo}$$

$$l_{vr} = 0{,}7 \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_s} \cdot l_v \geqslant \frac{l_v}{5} \text{ en } \leqslant 70\,\text{mm}$$

waarin:

σ_{sd} = rekenwaarde spanning in beschouwde staaf (rekening houden met verschoven momentenlijn)

l_{vr} = gereduceerde verankeringslengte



HWL = warmgewalst lasbaar
HWN = wargewalst toegepast in netten

HK = koudvervormd
HKN = koudvervormd toegepast in netten

∅ = FeB 220
∅ = FeB 400
∅̄ = FeB 500

Figuur 4.3 Herkenbaarheid betonstaal (naar soort en leveringstoestand)

Tabel 4.13 Oppervlakte doorsnede betonstaal (A_s) van betonstaalstaven

$\varnothing_k$ [mm]	massa per staaf [kg/m]	aantal staven									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,222	28	57	85	113	141	170	198	226	254	282
8	0,395	50	101	151	201	252	302	352	402	453	503
10	0,617	79	157	236	314	393	471	550	628	706	785
12	0,888	113	226	339	452	565	678	791	904	1017	1130
16	1,578	201	402	603	804	1005	1206	1407	1608	1809	2010
20	2,464	314	628	942	1257	1571	1885	2199	2513	2827	3142
25	3,853	491	982	1473	1963	2454	2945	3436	3927	4418	4909
32	6,313	804	1608	2413	3217	4021	4825	5630	6434	7238	8042
40	9,865	1257	2513	3770	5027	6283	7540	8796	10053	11310	12566

Tabel 4.14 Oppervlakte van de doorsnede betonstaalstaven per meter plaatbreedte

afstand h.o.h. [mm]	aantal staven per m	middelijn $\varnothing_k$ [mm]							
		6	8	10	12	16	20	25	32
70	14,29	404	718	1122	1616	2872	4488	7012	11489
75	13,33	377	670	1047	1508	2681	4189	6545	10723
80	12,50	353	628	982	1414	2513	3927	6136	10053
85	11,76	333	591	924	1331	2365	3696	5775	9462
90	11,11	314	559	873	1257	2234	3491	5454	8936
95	10,53	298	529	827	1190	2116	3307	5167	8466
100	10,00	283	503	785	1131	2011	3142	4909	8042
105	9,52	269	479	748	1077	1915	2992	4675	7660
110	9,09	257	457	714	1028	1828	2856	4462	7311
115	8,70	246	437	683	983	1748	2732	4268	6993
120	8,33	236	419	654	942	1676	2623	4091	6702
125	8,00	226	402	628	905	1608	2513	3927	6434
130	7,69	217	387	604	870	1547	2417	3776	6187
135	7,41	209	372	582	838	1489	2327	3636	5957
140	7,14	202	359	561	808	1436	2244	3506	5745
145	6,90	195	347	542	780	1387	2167	3385	5547
150	6,67	188	335	524	754	1340	2094	3272	5362
155	6,45	182	324	507	730	1297	2027	3167	5189
160	6,25	177	314	491	707	1257	1963	3063	5027
165	6,06	171	305	476	685	1219	1904	2975	4874
170	5,88	166	296	462	665	1183	1848	2837	4731
175	5,71	162	287	449	646	1149	1795	2805	4596
180	5,56	157	279	436	628	1117	1745	2727	4468
185	5,41	153	272	425	611	1087	1689	2653	4347
190	5,26	149	265	413	595	1058	1653	2584	4233
195	5,13	145	258	403	580	1031	1611	2517	4124
200	5,00	141	251	393	565	1005	1571	2454	4021
205	4,88	135	245	383	552	981	1532	2395	3923
210	4,76	135	239	374	539	957	1496	2337	3830
215	4,65	132	234	365	526	935	1461	2283	3741
220	4,55	129	228	357	514	914	1428	2231	3656
225	4,44	126	223	349	503	894	1396	2182	3574
230	4,35	123	219	341	492	874	1366	2134	3496
235	4,26	120	214	334	481	856	1337	2089	3422
240	4,17	118	209	327	471	838	1309	2045	3351
245	4,08	115	205	321	462	821	1282	2004	3283
250	4,00	113	201	314	452	804	1257	1963	3217

Tabel 4.15 Doorsnede gepuntlaste netten per meter plaatbreedte

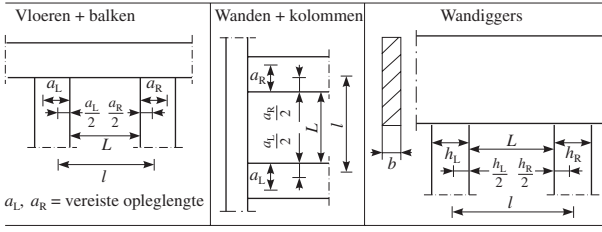
$\varnothing_k$ [mm]	massa per staaf [kg/m]	doorsnede één staaf [mm^2]	doorsnede wapeningsstaven [mm^2] bij staafafstand [mm] per meter plaatbreedte						
			50 100 d	75 150 d	100 200 d	150	200	250	300
4,0	0,099	12,6	252	168	126	84	63	50	42
4,5	0,125	15,9	318	212	159	106	80	64	53
5,5	0,154	19,6	393	262	169	131	98	78	65
5,5	0,187	23,8	475	317	238	158	119	95	79
6,0	0,222	28,3	565	377	282	188	141	113	94
6,5	0,261	33,2	664	443	331	221	165	133	110
7,0	0,302	38,5	770	513	385	257	192	154	128
7,5	0,347	44,2	884	589	442	295	220	177	147
8,0	0,395	50,3	1005	670	503	335	251	201	167
8,5	0,446	56,7	1135	757	567	378	284	227	189
9,0	0,500	63,6	1272	848	636	424	318	254	212
9,5	0,557	70,9	1418	945	790	473	354	283	236
10,0	0,617	78,5	1571	1047	785	524	392	314	261
10,5	0,680	86,6	1732	1155	866	577	433	346	289
11,0	0,747	95,0	1901	1267	950	634	474	380	316
11,5	0,816	103,9	2077	1385	1039	692	519	415	345
12,0	0,888	113,1	2262	1508	1131	754	566	452	376
13,0	1,042	132,7	2655	1770	1327	885	664	531	442
14,0	1,208	153,9	3079	2052	1539	1026	769	616	513

d = dubbelstaven uitsluitend als langsstaven

4.6 Schematisering en opleglengten

Theoretische overspanning

Voor de berekening moet als lengte van de overspanning de theoretische overspanning l worden aangehouden.

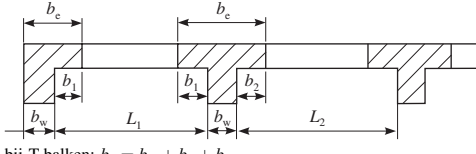


$$l = L + \frac{a_L}{2} + \frac{a_L}{2} \qquad l = L + \frac{a_L}{2} + \frac{a_L}{2} \qquad l \leqslant 1{,}15\ L$$

Figuur 4.4 Theoretische overspanning

Opmerkingen:
- Bij zuivere scharnieren: l = h.o.h.-afstand scharnierpunten.
- Bij raamwerken: l = h.o.h.-afstand staafassen.

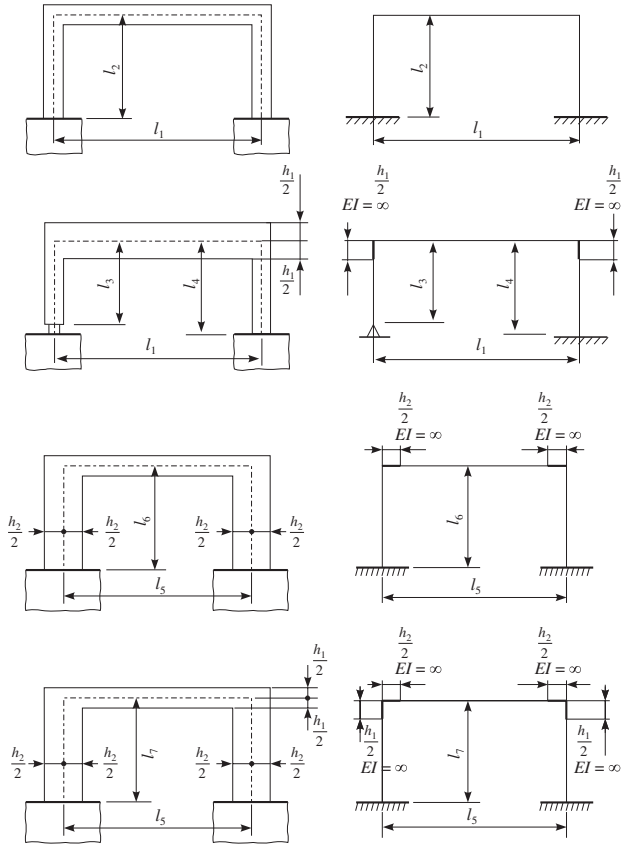
Balken



bij T-balken: $b_e = b_w + b_1 + b_2$
bij L-balken: $b_e = b_w + b_1$
b_w = ribbreedte
b_1 = 0,1 l met een maximum van 0,5 L_1
b_2 = 0,1 l met een maximum van 0,5 L_2
L = theoretische overspanning van de balk of tweemaal de lengte van de uitkraging

Figuur 4.5 Meewerkende breedte b_w

Schematiseren van raamwerken



Figuur 4.6 Schematisering van raamwerken

Opleglengten constructiedelen (uitgezonderd wandliggers)

- *Wandliggers*: zie pag. F3/83.
- Constructiedelen die NIET één geheel vormen met de ondersteunigen: zie tabel 4.16 + 4.17 en figuur 4.7a t/m d.
- Constructiedelen die WEL één geheel vormen met de ondersteuningen: zie tabel 4.18.

Toelichting:

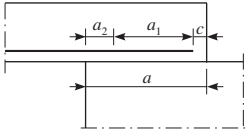
a_2 = $F_{rep}/(\frac{1}{2}f'_b\, a_b)$
a_b = oplegbreedte
c = toegepaste betondekking op de kop van de onderwapening aan het einde van het op te leggen constructiedeel (hierbij hoeft voor platen niet meer dan 15 mm in rekening te worden gebracht)
F_d = rekenwaarde oplegreactie constructiedeel in grenstoestand met betrekking tot bezwijken; inclusief de op het constructiedeel rustende bovenbelasting
f'_b = rekenwaarde druksterkte ondersteuningsmateriaal, of wanneer deze kleiner is, rekenwaarde druksterkte materiaal constructiedeel
$\varnothing_k$ = kenmiddellijn hoofdwapeningsstaven aan kopeinde constructiedeel (bij verschillende kenmiddellijnen: gemiddelde waarde aanhouden)
F_{rep} = representatieve waarde oplegreactie constructiedeel
f'_b = f'_b bij a_1, alleen met dit verschil dat bij metselwerk de blok- of steensterkte (zie NEN 6790) mag worden ingevoerd

Tabel 4.16 Opleglengten constructiedelen (uitgezonderd wandliggers) die NIET één geheel vormen met de ondersteuningen

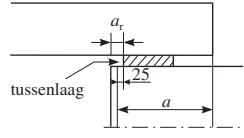
eindondersteuning	tussenondersteuning
$a \geq a + a_2 + c$	$a \geq a_1$
a_1 krijgt de grootste waarde van	
• tabel 4.17 ;of	• tabel 4.17; of
• $F_d/(\frac{2}{3}f'_b \cdot a_b)$; of	• $F_d/(f'_b \cdot a_b)$
• $6\,\varnothing_k$	

Tabel 4.17 Waarden van a_1 (zie ook tabel 4.16)

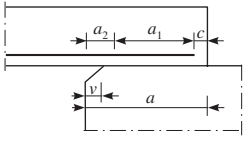
constructiedeel	belasting loodrecht op:	a_1 (L = dagmmat [mm])
dakplaat	vlak	30 + 0,004 L
vloerplaat of wand	vlak	40 + 0,004 L
ligger of kolom	as	50 + 0,004 L



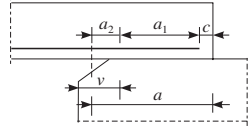
Figuur 4.7a Voor $a_2 \leqslant 25$ mm; oplegging zonder tussenlaag



Figuur 4.7b Voor $a_2 > 25$ mm; oplegging met tussenlaag $a_2 = a_r \not> 25$ mm



Figuur 4.7c Oplegging waarbij lengte vellingkant $v \leqslant \alpha_2$



Figuur 4.7d Oplegging waarbij lengte vellingkant $v > a_2$

Tabel 4.18 Minimum-opleglengten constructiedelen (uitgezonderd wandliggers) die WEL één geheel vormen met de ondersteuningen

constructiedeel	belasting loodrecht op	minimum-opleglengte a
plaat of wand	vlak	0,1 $h \geqslant$ 50 mm
ligger of kolom	as	0,2 $h \geqslant$ 100 mm

Opleglengten wandliggers

Opleglengte van *wandliggers* die *niet één geheel* vormen met de ondersteuningen:

$a \geqslant a_1 + c$ met een minimum van $a = 100$ mm en $a \geqslant$ de wanddikte,

waarin:
$a_1 = F_d/(f'_b \cdot a_b)$
c = toegepaste betondekking op kop onderwapening aan einde wandligger

Bij de oplegging moet een *tussenlaag* worden aangebracht; bijv. rubber, haarvilt, glijdfolie. Deze tussenlaag moet de belastingspreiding bevorderen en vervorming van de wandligger toestaan, zonder dat hierbij grote horizontale krachten optreden.
Bij de afmetingen van de tussenlaag moet rekening worden gehouden met:
- de rekenwaarde voor de sterkte van het toe te passen materiaal;
- de rekenwaarde voor de druksterkte van de materialen van de aansluitende constructiedelen.

4.7 Betondekking

Tabel 4.19 Betondekking op betonstaal in de buitenste wapening

constructie-deel	sterkte-klasse	betondekking c_{min} [mm]			toeslag bij	
		milieuklasse[1)]			voorspan-staal	nabewerkt/ oncontroleer-baar oppervlak
		1	2	3 t/m 5		
plaat/wand	B15	20	30	35	n.v.t.	5
	$\geqslant$ B25	15	25	30	10	5
balk/poer/	B15	30	35	40	n.v.t.	5
console	$\geqslant$ B25	25	30	30	5	5
kolom	B15	35	40	45	n.v.t.	5
	$\geqslant$ B25	30	35	40	5	5

hoofdwapeningsstaven bovedien:
$c_{min} \geqslant \varnothing_k$ indien $\varnothing_k \leqslant 25$ mm
$c_{min} \geqslant 1{,}5\ \varnothing_k$ indien $\varnothing_k > 25$ mm

staafbundels (m staven):
vervangen door denkbeeldige staaf met een gelijk oppervlak.
$\varnothing_k = \varnothing_{ks}\sqrt{m}$

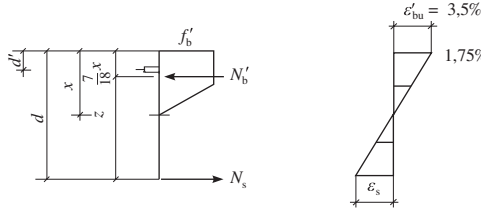
voor vooraf vervaardigde elementen mag de voorgeschreven betondekking c_{min} met 5 mm worden verlaagd wanner de:
- w.c.f. $\leqslant$ 0,5 bij milieuklasse 1 of
  w.c.f. $\leqslant$ 0,45 bij milieuklasse 2 t/m 5;
- $\frac{2}{3}$ maal grootste korrelafmeting toeslagmateriaal $\leqslant$ betondekking c_{min} echter voor balken $c_{min} \geqslant 2$ mm; voor kolommen $c_{min} \geqslant 30$ mm.

bij controle *voor* storten van beton:
max. tolelaatbare maatafwijking $c_{min} = \pm 5$ mm, tenzij op tekening een grote + maat is toegestaan
bij controle *na* storten van beton:
max. tolellaatbare maatafwijking $c_{min} = -5$ mm en $+10$ mm wanneer maatafwijking groter, dan consequenties beoordelen

[1)] De omschrijving van de milieuklasse wordt gegeven in NEN 5950 (art. 4.3).

4.8 Dimensionering

Buiging zonder normaalkracht



Figuur 4.8 Spanning-rek relatie

Bij *buiging zonder normaalkracht* geldt (zie ook figuur 4.8):

$$z = d - \frac{7}{18}x$$

$$N'_b = \frac{3}{4} \cdot b \cdot x \cdot f'_b$$

$$N_s = A_s \cdot f_s \qquad A_s = \frac{\omega_o \cdot b \cdot d}{100}$$

$$k_{x\max} = \frac{500}{500 + f_s}$$

$$x = \frac{9}{7}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{56}{27}\frac{M_d}{f'_b \cdot b \cdot d^2}}\right) \cdot d \leqslant k_{x\max} \cdot d$$

Indien $x \leqslant k_x \cdot d$ dan volgt (zie ook tabel 4.20):

$$\omega_0 = \frac{2700}{28} \cdot \frac{f'_b}{f_s}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{56}{27} \cdot \frac{M_d}{f'_b \cdot b \cdot d^2}}\right)$$

Tabel 4.20 Rekenwaarde treksterkte betonstaal f_s, $k_{x\,max}$ en maximum wapeningspercentage van de buigtrekwapening $W_{o\,max}$

	f_s	k_{xmax}	B15	B25	B35	B45	B55
FeB 220	190	0,725	2,576	4,293	6,010	7,727	9,444
FeB 400	350	0,588	1,134	1,890	2,646	3,402	4,158
FeB 500	435	0,535	0,830	1,384	1,937	2,491	3,044

Indien $x > k_{x\,max} \cdot d$ dan zal drukwapening moeten worden toegepast.

Drukwapening: $A'_s = \dfrac{M_d - M_{d1}}{f'_s(d - d')}$

Trekwapening: $A_s = \dfrac{M_d - M_{d1}}{f_s(d - d')} + \dfrac{\omega_{omax} \cdot b \cdot d}{100}$

Voldaan moet worden aan: $\varepsilon'_s \geqslant \dfrac{f'_s}{E_s}$

waarin:
M_d = totaal op te nemen moment [Nmm]
M_{d1} = moment dat door de balk kan worden opgenomen bij $x_{u\,max}$ in [Nmm]
b, d, d', x : [mm]
f'_b, f'_s, f_s : [N/mm^2]
A'_s, A_s : [mm^2]

Tabel 4.21 Berekening op buiging zonder normaalkracht

$\frac{M_u}{b \cdot d^2}$	ω[%]			k_x	k_z
	FeB 220	FeB 400	FeB 500		
betonkwaliteit B15					
200	0,107	0,058	0,047	0,030	0,988
400	0,216	0,117	0,094	0,061	0,976
600	0,328	0,178	0,143	0,092	0,964
800	0,442	0,240	0,193	0,125	0,952
1000	0,561	0,304	0,245	0,158	0,939

Tabel 4.21 (vervolg)

$\frac{M_u}{b \cdot d^2}$	ω[%]			k_x	k_z
	FeB 220	FeB 400	FeB 500		
1200	0,683	0,371	0,298	0,192	0,925
1400	0,808	0,439	0,353	0,228	0,912
1600	0,939	0,509	0,410	0,264	0,897
1800	1,074	0,583	0,469	0,302	0,882
2000	1,214	0,659	0,530	0,342	0,867
2200	1,361	0,739	0,594	0,383	0,851
2400	1,514	0,822	0,661	0,426	0,834
2600	1,676	0,910	0,732	0,472	0,817
2800	1,847	1,003	0,807	0,520	0,798
3000	2,030	1,102		0,571	0,778
3200	2,227			0,627	0,756
3400	2,443			0,688	0,733
betonkwaliteit B25					
200	0,106	0,058	0,046	0,018	0,993
400	0,214	0,116	0,093	0,036	0,986
600	0,323	0,175	0,141	0,054	0,979
800	0,433	0,235	0,189	0,073	0,972
1000	0,546	0,296	0,238	0,092	0,964
1200	0,660	0,358	0,288	0,112	0,957
1400	0,776	0,421	0,339	0,131	0,949
1600	0,895	0,486	0,391	0,151	0,941
1800	1,015	0,551	0,443	0,171	0,933
2000	1,138	0,618	0,497	0,192	0,925
2200	1,263	0,685	0,551	0,213	0,917
2400	1,390	0,755	0,607	0,235	0,909
2600	1,520	0,825	0,664	0,257	0,900
2800	1,653	0,897	0,722	0,279	0,891
3000	1,789	0,971	0,781	0,302	0,882
3200	1,928	1,047	0,842	0,326	0,873
3400	2,071	1,124	0,905	0,350	0,864
3600	2,218	1,204	0,969	0,375	0,854
3800	2,368	1,286	1,034	0,400	0,844
4000	2,524	1,370	1,102	0,426	0,834
4200	2,683	1,457	1,172	0,453	0,824
4400	2,849	1,547	1,244	0,481	0,813
4600	3,020	1,639	1,319	0,510	0,802
4800	3,198	1,736		0,540	0,790
5000	3,383	1,837		0,571	0,778
5200	3,577			0,604	0,765
5400	3,781			0,639	0,752
5600	3,996			0,675	0,738
5800	4,225			0,714	0,722

Tabel 4.21 (vervolg)

$\frac{M_u}{b \cdot d^2}$	ω[%]			k_x	k_z
	FeB 220	FeB 400	FeB 500		
betonkwaliteit B35					
200	0,106	0,057	0,046	0,013	0,995
400	0,213	0,115	0,093	0,026	0,990
600	0,321	0,174	0,140	0,039	0,985
800	0,430	0,233	0,188	0,052	0,980
1000	0,540	0,293	0,236	0,065	0,975
1200	0,651	0,354	0,285	0,079	0,969
1400	0,764	0,415	0,334	0,092	0,964
1600	0,878	0,477	0,384	0,106	0,959
1800	0,994	0,539	0,434	0,120	0,953
2000	1,110	0,603	0,485	0,134	0,948
2200	1,229	0,667	0,537	0,148	0,942
2400	1,348	0,732	0,589	0,163	0,937
2600	1,470	0,798	0,642	0,177	0,931
2800	1,593	0,865	0,696	0,192	0,925
3000	1,717	0,932	0,750	0,207	0,919
3200	1,844	1,001	0,805	0,222	0,914
3400	1,972	1,070	0,861	0,238	0,907
3600	2,102	1,141	0,918	0,254	0,901
3800	2,234	1,213	0,976	0,270	0,895
4000	2,368	1,286	1,034	0,286	0,889
4200	2,505	1,360	1,094	0,302	0,882
4400	2,644	1,435	1,155	0,319	0,876
4600	2,785	1,512	1,216	0,336	0,869
4800	2,929	1,590	1.279	0,353	0,863
5000	3,075	1,669	1,343	0,371	0,856
5200	3,225	1,751	1,408	0,389	0,849
5400	3,377	1,833	1,475	0,407	0,842
5600	3,533	1,918	1,543	0,426	0,834
5800	3,692	2,004	1,613	0,445	0,827
6000	3,855	2,093	1,684	0,465	0,819
6200	4,022	2,183	1,757	0,485	0,811
6400	4,193	2,276	1,832	0,506	0,803
6600	4,369	2,372	1,908	0,527	0,795
6800	4,550	2,470		0,549	0,787
7000	4,737	2,571		0,571	0,778
7200	4,929			0,595	0,769
7400	5,129			0,619	0,759
7600	5,336			0,644	0,750
7800	5,551			0,670	0,740
8000	5,775			0,697	0,729

[1] M_u in [kN· m]·b en d in [m]
$A_s = \omega_0 \cdot b \cdot d \cdot 10^4; x = k_x \cdot d; z = k_z \cdot d$

Scheurwijdte

Tabel 4.22 Toelaatbare scheurwijdte w, c_{min}, k_1, k_2, k_3

milieu-klasse	soort milieu	w [mm]	B25 c_{min} [mm]		factoren [N/mm^2]		
			vloer	balk	k_1	k_2	k_3
1	droog	0,4	15	25	5000	1000	80 000
2	vochtig	0,3	25	30	3750	750	60 000
3	vochtig in combinatie met dooizouten	0,2	30	35	2500	500	40 000
4	zeewater	0,2	30	35	2500	500	40 000
5	agressief	0,2	30	35	2500	500	40 000

Voor eisen aan betonsamenstelling, zie par. 4.2, tabel 4.4.

Onvolledig ontwikkeld scheurenpatroon indien $\sigma_b < f_{bm}$:

$$\varnothing_{km} \leqslant \frac{k_3 \cdot \xi \cdot f'_{ck}}{\sigma_s^2} \not< \frac{k_1 \cdot \xi}{\sigma_s} \text{ en } \not> 50$$

Volledig ontwikkeld scheurenpatroon indien $\sigma_b > f_{bm}$:

$$\varnothing_{km} \leqslant \frac{k_1 \cdot \xi}{\sigma_s} \qquad \text{[mm]}$$

of: $s \leqslant 100 \left(\frac{k_2 \cdot \xi}{\sigma_s} - 1{,}3 \right)$ [mm]

waarin:

ξ = 1,0 voor geribd betonstaal

$\sigma_s = \frac{M_{rep}}{M_u} \cdot f_s$

s = staafafstand

k_1, k_2, k_3 = factoren volgens tabel 4.22

Dwarskracht

De rekenwaarde van de optredende schuifspanning volgt uit:

$$\tau_d = \frac{V_d}{b \cdot d} \not> \tau_2$$

Dwarskrachtwapening moet worden toegepast als:

$$\tau_d > \tau_1$$

Bij toepassing van beugels loodrecht op de staafas:

$$A_{sv} = \frac{(\tau_d - \tau_1)\, b \cdot y}{0{,}9 f_s}$$

waarin:

A_{sv} = dwarskrachtwapening per lengte y [mm^2]
V_d = rekenwarde dwarskracht in beschouwde doorsnede [N]
τ_d = rekenwaarde schuifspanning [N/mm^2]
f_s = rekenwaarde treksterkte betonstaal
FeB 220: 190; FeB 400: 350; FeB 500: 435 [N/mm^2]
τ_1 = uiterste opneembare dwarskrachtspanning zonder wapening
τ_2 = uiterst opneembare dwarskrachtspanning vanuit de grenswaarde waarin de betondrukdiagonaal bezwijkt

Voor τ_1 geldt (zie ook tabel 4.23):

$$\tau_1 = 0{,}4\, f_b \cdot k_\lambda \cdot k_h \cdot \sqrt[3]{\omega_o} \leqslant 0{,}4\, f_b$$

Buiging met *druk*: $\tau_1 = \tau_1 + 0{,}15\ \sigma'_{bmd}$
Buiging met *trek*: $\tau_1 = \tau_1 - 0{,}5\ \sigma_{bmd}$

waarin:

$$k_\lambda = \frac{12}{g_\lambda} \sqrt[3]{\frac{A_o}{b \cdot d}} \leqslant 1{,}0$$

$$\lambda_v = \frac{M_{d\,max}}{d \cdot V_{d\,max}}$$

$g_\lambda = 1 + \lambda_v^2$ voor $\lambda_v \geq 0{,}6$
$g_\lambda = 2{,}5 - 3\lambda_v \leqslant 1{,}36$ voor $\lambda_v < 0{,}6$
A_o = oppervlakte lastvlak $\geqslant b \cdot d$
$k_h = 1{,}6 - h \leqslant 1{,}0$ (h in m)

$$\omega_o = \frac{100 A_s}{b \cdot d} \geqslant 2{,}0 \text{ en } \leqslant 0{,}7 - 0{,}5\ \lambda_v$$

wapeningspercentage van de buigtrekwapening in de beshouwde doorsnede

σ'_{bmd} = gemiddelde betondrukspanning t.g.v. de rekenwaarde van de normaaldrukkracht

Voor τ_2 geldt (zie ook tabel 4.23):

$$\tau_2 = 0{,}2 f'_b \cdot k_n \cdot k_\theta$$

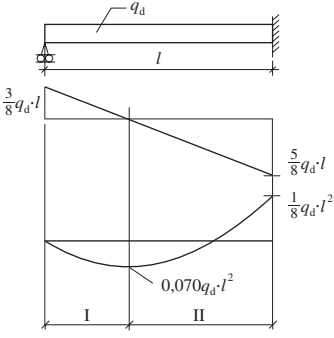
waarin:

$$k_n = \frac{5}{3}\left(1 - \frac{\sigma'_{bmd}}{f'_b}\right) \not> 1{,}0$$

$k_\theta = 1{,}0$ indien geen dwarskrachtwapening wordt toegepast
$k_\theta = 1{,}0$ bij toepassing van beugels $(\alpha = 90^\circ)$

$$k_\theta = 2 \cdot \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot^2\theta} \qquad (45^\circ \leqslant \alpha < 90^\circ)$$

α = hoek tussen dwarskrachtwapening en as constructiedeel
θ = hoek tussen drukdiagonaal en as constructiedeel



voor liggerdeel I: $\lambda_v = \dfrac{0{,}070\, q_d \cdot l^2}{d \cdot \frac{3}{8} q_d \cdot l} = 0{,}187\dfrac{l}{d}$

voor liggerdeel II: $k_\lambda = 1$

Figuur 4.9 Dwarskrachtslankheid

Tabel 4.23 Waarden voor τ_1 en τ_2 ($\sigma'_{bmd} \neq 0$) [N/mm^2]

sterkteklasse	f'_b	f_b	$\tau_1 = 0{,}4 f_b$	$\tau_2 = 0{,}2 f'_b$
B15	9	0,9	0,36	1,8
B25	15	1,15	0,46	3,0
B35	21	1,40	0,56	4,2
B45	27	1,65	0,66	5,4
B55	33	1,90	0,76	6,6
B65	39	2,15	0,86	7,8

Aansluitvlakken samengestelde liggers en platen

De rekenwaarde van de optredende schuifspanning volgt uit:

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S}{b_w \cdot I} \not> \frac{V_d}{b_w \cdot d} \not> \tau_2$$

Verbindingswapening moet worden toegepast als:

$$\tau_d > k_b \cdot f_b$$

Bij toepassing van wapening loodrecht op het aansluitvlak:

$$A_{sv} = \frac{(\tau_d - k_b \cdot f_b) b_w \cdot y}{k_s \cdot f_s}$$

waarin:

A_{sv} = afschuifwapening per lengte y [mm^2]

f_b = kleinste rekenwaarde betontreksterkte samengestelde delen (zie tabel 4.24)

τ_2 = $0{,}2 f'_b$ (zie tabel 4.24)

k_b, k_s = factoren volgens tabel 4.25

f_s = rekenwaarde treksterkte betonstaal
FeB 220: 190; FeB 400: 350; FeB 500: 435 [N/mm^2]

Tabel 4.24 Grenstoestanden

sterkte-klasse	f_b [N/mm^2]	τ_2 [N/mm^2]
B25	1,15	3,00
B35	1,40	4,20
B45	1,65	5,40
B55	1,90	6,60

Tabel 4.25 Factoren k_b en k_s

aard bekistings-oppervlak	k_b	k_s
glad–staal	0,1	0,4
glad–hout	0,2	0,6
stortvlak	0,3	0,8
opgeruwd	0,4	1,0

Pons bij middenkolommen

De rekenwaarde van de optredende schuifspanning volgt in de opeenvolgende periferieën uit:

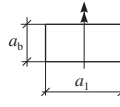
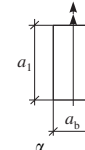
$$\tau_d = \frac{\alpha_e \cdot F_d}{\pi d \cdot (d + a)} \not> \tau^2 \qquad \text{met } a = \frac{2}{\pi}(a_1 + a_b)$$

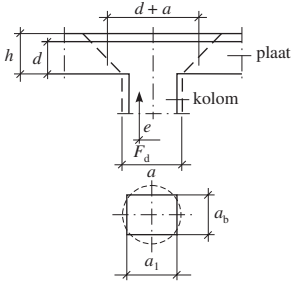
waarin:

$$\alpha_e = 1 + \frac{\alpha_x \cdot e_x + \alpha_y \cdot e_y}{d + a}$$

α_x, α_y = excentriciteitsfactor (zie tabel 4.26 en figuur 4.10)
e_x, e_y = excentriciteit van de ponskracht t.o.v. het zwaartepunt van de kolomdoorsnede (lastvlak) in x-respectievelijk y-richting

Tabel 4.26 Waarden voor α voor een rechthoekige middenkolom

$\frac{a_1 + d}{a_b + d}$	 α_x	 α_y
1,0	2,0	2,0
1,2	2,2	1,8
1,4	2,4	1,6
1,6	2,6	1,4
1,8	2,7	1,3
2,0	2,8	1,2



Figuur 4.10 Ponskegel

Verbindingswapening moet worden toegepast als:

$$\tau_d > \tau_1$$

Bij toepassing van wapening loodrecht op het vlak van de plaat:

$$A_{sv} = \frac{(\tau_d - \tau_1) \cdot \pi(d + a) \cdot d}{0{,}67\, f_s}$$

waarin:
A_{sv} = totale ponswapening per lengte d [mm^2]
τ_1 = uiterst opneembare ponsspanning zonder wapening
τ_2 = uiterst opneembare ponsspanning vanuit de grenswaarde waarin de betondrukdiagonaal bezwijkt
Voor τ_1 geldt (zie ook tabel 4.27):

$$\tau_1 = 0{,}8 f_b \cdot k_d \cdot \sqrt[3]{\omega_o} \leqslant 0{,}8 f_b$$

waarin:
$k_d = 1{,}5 - 0{,}6\, d \leqslant 1{,}0$ (d in m)
$\omega_o = \sqrt{\omega_{ox} \cdot \omega_{oy}} \geqslant 2{,}0$
$\omega_{ox} = \omega_{oy}$ = percentage buigtrekwapening dat in de beschouwde periferie wordt doorsneden

Tabel 4.27 Waarden voor τ_1 en τ_2 [N/mm^2]

sterkteklasse	f'_b	f_b	$\tau_1 = 0{,}8f_b$	$\tau_2 = 0{,}15f'_b$
B15	9	0,90	0,72	1,35
B25	15	1,15	0,92	2,25
B35	21	1,40	1,12	3,15
B45	27	1,65	1,32	4,05
B55	33	1,90	1,52	4,95
B65	39	2,15	1,72	5,00

Buiging met normaalkracht – krachtsverdeling in geschoorde raamwerken

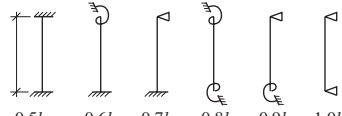
Geen tweede-orde berekening noodzakelijk indien voldaan wordt aan:

$$\lambda_h \leqslant \frac{5}{\sqrt{\alpha_n}} \quad \text{voor} \quad \alpha_n \leqslant 0{,}25$$
$$\lambda_h \leqslant 10 \quad \text{voor} \quad 0{,}25 < \alpha_n \leqslant 0{,}5$$
$$\lambda_h < 15 - 10\alpha_n \quad \text{voor} \quad 0{,}5 < \alpha_n \leqslant 1$$

waarin:

$$\lambda_h = \frac{l_c}{h} = \frac{\text{kniklengte}}{\text{hoogte doorsnede in buigingsrichting}} \text{ (zie figuur 4.11)}$$

$$\alpha_n = \frac{N'_d}{A_b \cdot f'_b + (A_s + A'_s) f_s} = \frac{\text{rekenwaarde normaaldrukkracht}}{\text{breukkracht gewapende doorsnede}}$$



Figuur 4.11 Waarden voor de kniklengte l_c van geschoorde staven

Tweede-orde berekening volgens de e_c-methode (zie ook figuur 4.12):

$$e_t = (e_o + e_c)\xi \nless e_o \text{ en} \nless \frac{h}{10}$$

$$\xi = 0{,}5\left(1 + \frac{e_1}{e_o}\right) \nless 0{,}75$$

Voor $e_o < 0{,}5h$ geldt:

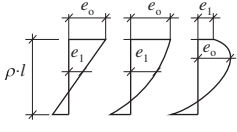
$$e_c = 3\{1{,}5\,h + e_o(4\psi - 3)\}\left(\frac{\varrho \cdot l_c}{100\,h}\right)^2$$

Voor $e_o \geqslant 0{,}5h$ geldt:

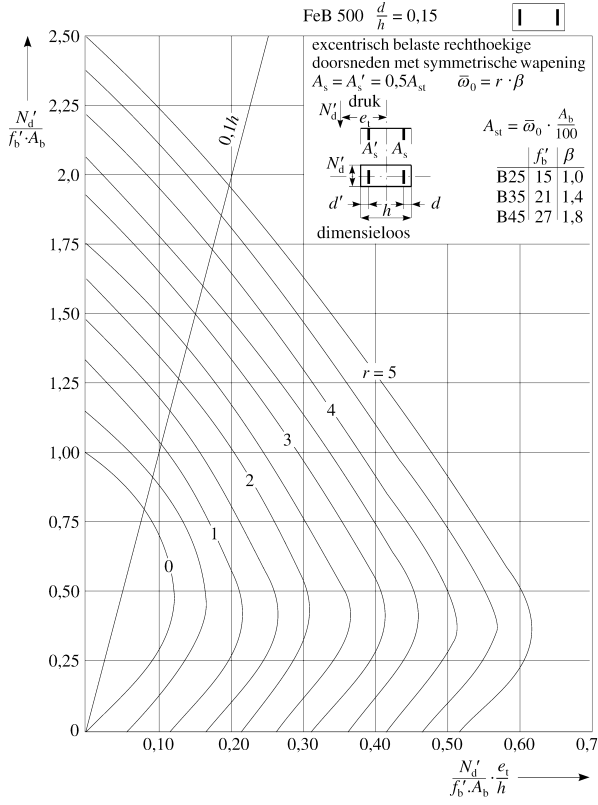
$$e_c = 6\,h \cdot \psi\left(\frac{\varrho \cdot l_c}{100\,h}\right)^2$$

Voor e_o moet minimaal $\frac{l}{300}$ en $\nless 10$ mm worden aangehouden.

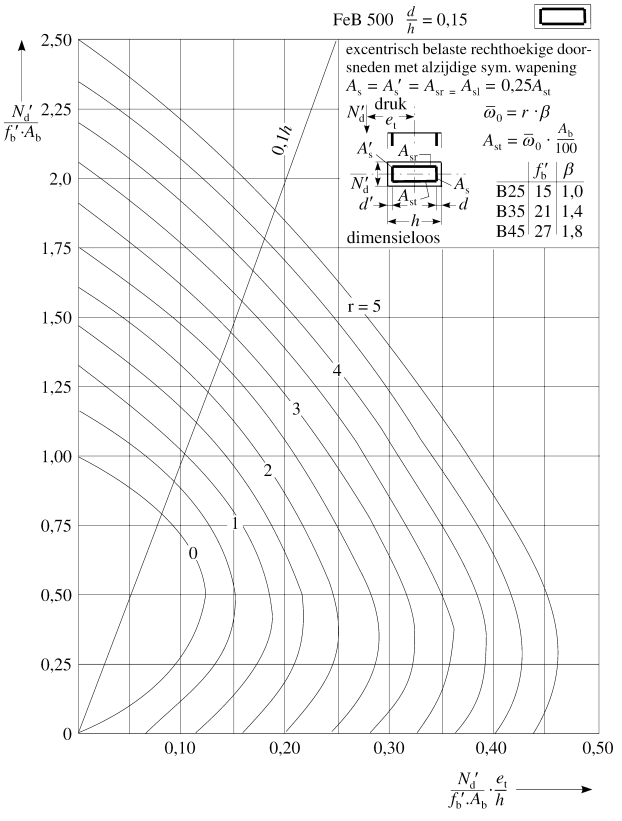
waarin:
e_o = grootste beginexcentriciteit
ψ = 1 voor rechthoekige doorsnede
ψ = 1,31 voor ronde doorsnede
ρ = 1,0 voor tweezijdig gesteunde wanden
l_c = volgens figuur 4.11



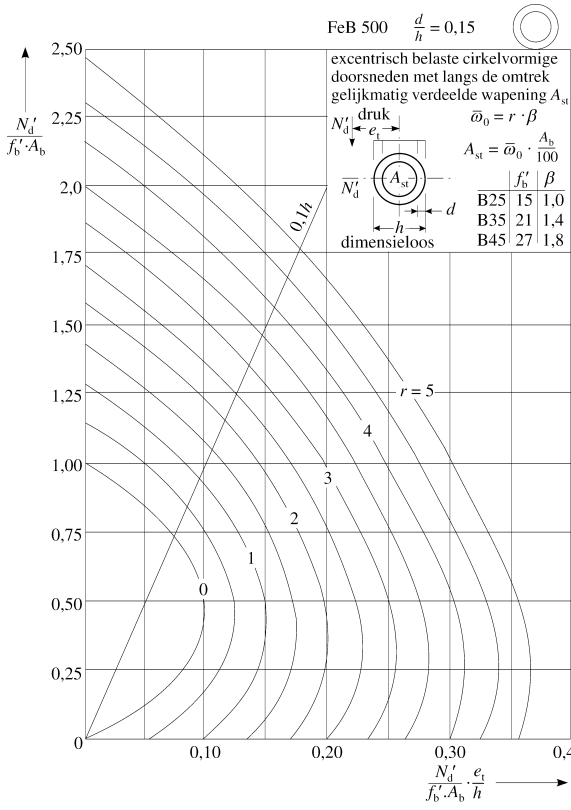
Figuur 4.12 Belastingschema's bij e_c-methode



Figuur 4.13a Buiging met normaalkracht voor excentrisch belaste rechthoekige doorsneden met symmetrische wapening (tweezijdig symmetrische wapening)



Figuur 4.13b Buiging met normaalkracht voor excentrisch belaste rechthoekige doorsneden met symmetrische wapening (alzijdig symmetrische wapening)

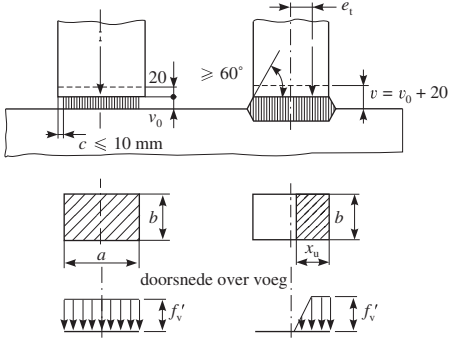


Figuur 4.13c Buiging met normaalkracht voor excentrisch belaste cirkelvormige doorsneden (gelijkmatig verdeelde wapening)

Ongewapende voegverbindingen

Tabel 4.28 Rekenwaarde morteldruksterkte bij ongewapende voegverbindingen

mortelkwaliteit	f'_m [N/mm^2]
M15	9
M25	15
M35	21



Figuur 4.14 Ongewapende voegverbindingen

$$f'_v = k_1 \cdot k_2 \cdot \alpha \cdot f'_b \qquad k_2 = k_3 \frac{5(1-k_3) + k_4^2}{5(1-k_3) + k_3 k_4^2}$$

$$k_3 = \frac{k_5 \cdot f'_m}{x_u \cdot f'_b} \geqslant 1 \qquad k_4 = \frac{b}{v} \text{ of } \frac{x_u}{v}$$

$$x_u = \frac{0{,}5\,a - e_t}{0{,}389} \text{ als } x_u < a$$

waarin:
f'_b = laagste druksterkte aansluitende delen
k_1 = 0,9 bij aangieten
k_1 = 0,7 bij aangieten of ondersabelen
k_1 = 0,3 bij plaatsing in een speciebed
k_5 = 0,5 ($k_5 = 1$, zie hiervoor NEN 6720, toelichting art. 9.17.3)
b en x_u = kleinste afmeting van het gedrukte voegoppervlak
a en b = afmentingen van de voegdoorsnede $b \leqslant a$
e_t = totale excentriciteit

Breukdrukkracht
- Centrische belasting: $N'_{uv} = f'_v \cdot a \cdot b$
- Excentrische belasting: $N'_{uv} = 0,75 \cdot f'_v x_u \cdot b$ (als $x_u < a$)

Opleggingen

Bij betonvlakken die plaatselijk worden belast door een belasting loodrecht op het vlak, mag de rekenwaarde voor de druksterkte van het oppervlak worden verhoogd tot:

$$f'_{bo} = f'_b \cdot \sqrt{\frac{l \cdot b}{a_1 \cdot a_b}}$$

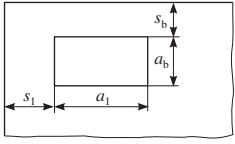
waarin:
a_1, a_b = afmetingen gedrukte zone voetplaat
l = kleinste waarde van (maar $l \not< a_1$):

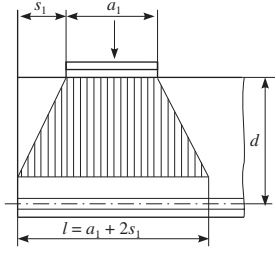
$$a_1 + 2s_1 \qquad a_1 + d$$
$$s_1 \qquad\qquad s_b$$

b = kleinste waarde van (maar $b \not< a_b$):

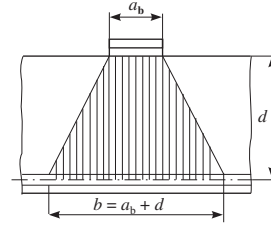
$$a_b + 2s_b \qquad a_b + d$$
$$5\,a_b \qquad\qquad 5\,l$$

Indien $x_u < a_1$, dan $x_u = a_1$ aanhouden.

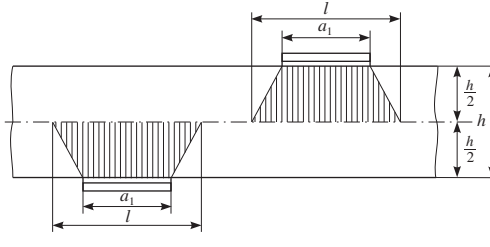




Belasting op een plaat bij een hoek



Belasting op een plaat voldoende verwijderd van de randen



wanneer de dragende constructie niet gelijkmatig is ondersteund, moet voor l resp. b worden aangehouden:
$l = a_1 + \frac{1}{2}h$ resp. $b = a_b + \frac{1}{2}h$

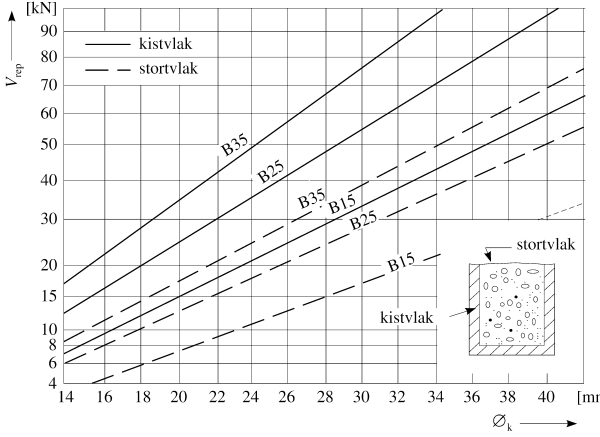
Figuur 4.15 Plaatselijk belaste betonvlakken

Ingestorte ankers

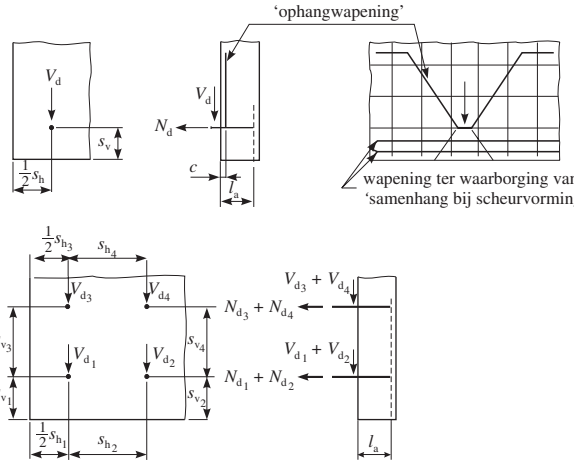
Tabel 4.29 Rekenwaarden betondruk- en treksterkte bij ingestorte ankers

sterkteklasse	f'_b [N/mm^2]	f_b [N/mm^2]
B15	9	0,9
B25	15	1,15
B35	21	1,4

Sterkte ankers: zie hiervoor par. 5.5 *Verbindingen met schroefbouten in ruime gaten*



Figuur 4.16 Dwarskracht in bruikbaarheidsgrenstoestand V_{rep} als functie van uitwendige middellijn $\varnothing_k$ anker of ankerbus



Figuur 4.17 Grootheden voor Splijtformule

Vervorming ankers:

- In kistvlak: $V_{rep} = 4 \varnothing_k^2 \cdot f_b'$
- In stortvlak: $V_{rep} = 2 \varnothing_k^2 \cdot f_b'$

V_{rep} = dwarskracht waarbij $\delta = 0{,}1 \varnothing_k$ t.p.v. betonoppervlak

- Als vervorming $\delta < 0{,}1 \varnothing_k$ is vereist, geldt:

$$V_\delta = \frac{\delta}{0{,}1 \varnothing_k} V_{rep}$$

Verankering:

$$l_{vr} \geqslant \frac{\sqrt{N_d^2 + 0{,}5 V_d^2}}{A_s \cdot f_s} \cdot l_v \measuredangle 70\,\text{mm en} \measuredangle 6 \varnothing_k$$

waarin:
l_v = ankerlengte, volgens par. 4.5
$\varnothing_k$ = middellijn inclusief draad

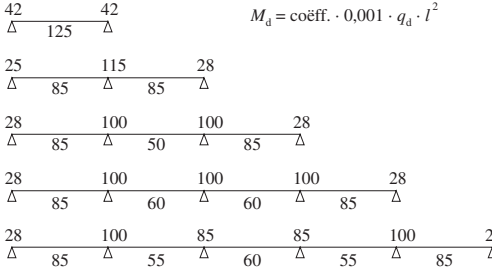
Splijten van beton bij: $N_d \leqslant 2V_d$

Splijtkracht: $N_{spl} = \dfrac{1{,}8 f_b}{\dfrac{1}{l_a^2} + \dfrac{1}{s_v^2} + \dfrac{1}{s_h^2}}$

Splijten beton:
- Zonder wapening bij: $0{,}5\,N_{spl} \geqslant \sqrt{N_d^2 + V_d^2}$
- Met ophangwapening bij: $0{,}5\,N_{spl} < \sqrt{N_d^2 + V_d^2} \leqslant N_{spl}$
- Met extra wapening t.b.v. samenhang bij: $\sqrt{N_d^2 + V_d^2} > N_{spl}$

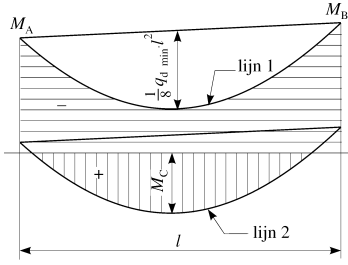
4.9 *Berekening, liggers, platen en wandliggers*

Liggers in geschoorde constructies
Voor toepassingsgebied, zie figuur 4.24



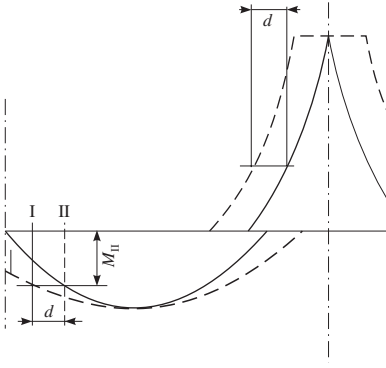
- voor de maatgevende steunpuntsmomenten moet voor $q_d \cdot l^2$ de grootste van de beide aangrenzende velden worden genomen
- voor het maatgevende veldmoment geldt de $q_d \cdot l^2$ van het beschouwde veld

Figuur 4.18 Momentcoëfficiënten liggers

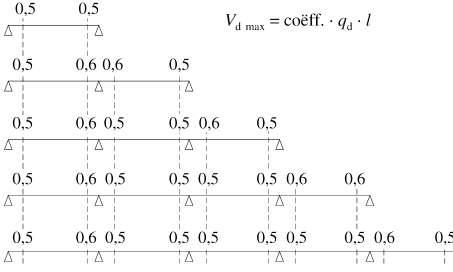


- lijn 1: momentenlijn die behoort bij een veld belast met $q_{d\,min}$ en aan beide uiteinden belast met de maatgevende steunpuntmomenten M_A en M_B
- lijn 2: momentenlijn die evenwijdig loopt aan lijn 1 en die zover verschoven is dat het grootst positieve moment gelijk is aan het maatgevende moment M_C

Figuur 4.19 Extreme momentenlijn



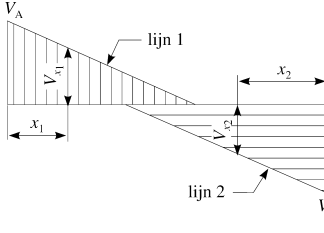
Figuur 4.20 Verschuiving momentenlijn: wanneer $h > 250$ mm moet de momentenlijn over een afstand d in ongunstige zin worden verschoven



$V_{\text{d max}} = \text{coëff.} \cdot q_{\text{d}} \cdot l$

voor de oplegreacties moet de dwarskracht bij het steunpunt resp. de som van de dwarskrachten aan beide zijden van het steunpupnt worden aangehouden

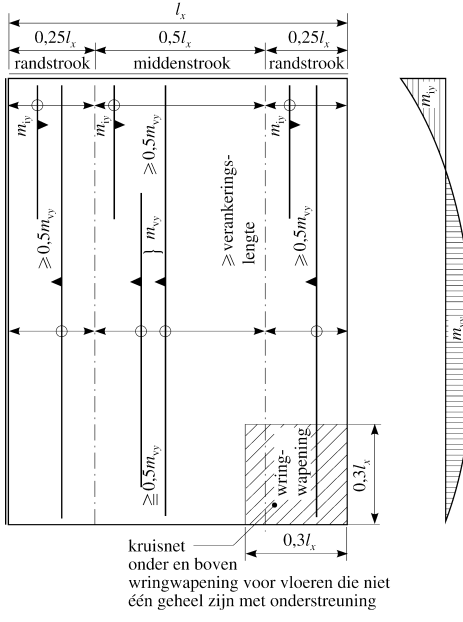
Figuur 4.21 Coëfficiënten voor dwarskrachten



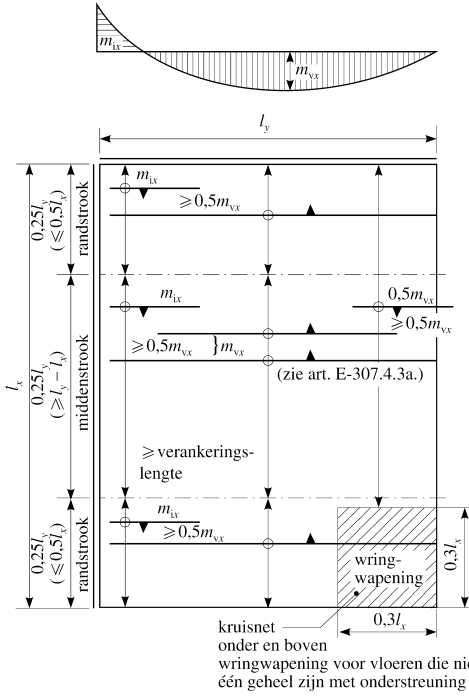
lijn 1: $V_{x_1} = V_A - q_{\text{d}} \cdot x_1$
lijn 2: $V_{x_2} = V_{\text{B}} - q_{\text{d}} \cdot x_2$

Figuur 4.22 Extreme dwarskrachtenlijn

Platen
Zie tabel 4.30 en verder.



Figuur 4.23 Schematische weergave van de ligging van de wapening

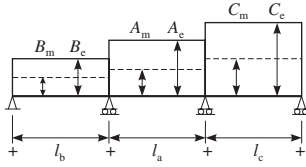


bij vierzijdig opgelegde vloeren

Tabel 4.30 Momentcoëfficiënten platen

		$l_y/l_x \rightarrow$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
I		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	41	54	67	79	87	97	110	117
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	41	35	31	28	26	25	24	23
II		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	18	26	32	36	39	41	42	43
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	18	16	12	10	10	10	10	10
		$m_{ix} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	51	63	72	78	81	82	83	83
		$m_{iy} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	51	54	55	54	54	53	51	49
III		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	25	36	45	53	58	62	67	69
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	25	23	20	19	18	17	17	17
		$m_{ix} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	68	84	97	106	113	117	122	124
		$m_{iy} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	68	74	77	77	77	76	73	71
IVA		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	16	28	42	56	69	80	100	112
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	29	32	32	30	27	24	20	18
		$m_{iy} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	69	85	97	105	110	112	112	112
IVB		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	29	34	38	40	42	42	42	42
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	16	14	13	13	13	13	13	13
		$m_{ix} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	69	76	80	82	83	83	83	83
VA		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	27	41	54	67	78	89	105	115
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	38	37	34	30	27	25	24	23
		$m_{iy} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	91	102	108	111	113	114	114	114
VB		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	38	44	52	58	62	65	68	70
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	27	21	19	18	17	17	17	17
		$m_{ix} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	91	98	107	113	118	120	124	124
VIA		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	18	29	39	47	54	59	66	69
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	23	23	20	17	15	14	13	13
		$m_{ix} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	54	72	88	100	108	114	121	124
		$m_{iy} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	60	69	74	76	76	76	73	71
VIB		$m_{vx} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	23	30	35	38	40	41	42	43
		$m_{vy} = 0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	18	15	14	13	13	13	13	13
		$m_{ix} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	60	70	76	80	82	83	83	83
		$m_{iy} = -0{,}001\, p_d \cdot l_x^2 \times$	54	55	55	54	53	53	51	49

———— = vrij opgelegd ═══ = voledig ingeklemd

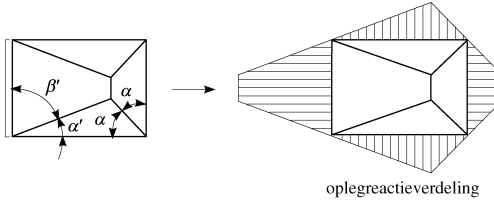


voorwaarden

$l_b \leqslant 0{,}8 l_c$
$B_m \leqslant 0{,}6 C_e$
$B_e \leqslant 0{,}8 C_e$

A_m, B_m, C_m = rekenwaarde permanente en momentaal veranderlijke belasting
A_e, B_e, C_e = rekenwaarde permanente en extreme veranderlijke belasting

Figuur 4.24 Toepassingsgebied



Figuur 4.25 Oplegreacties

Tabel 4.31 Minimum wapening in op buiging belaste rechthoekige doorsnede (FeB 500)

sterkte-klasse	f_{bm} [N/mm^2]	ω_{omin} [%]	sterkte-klasse	f_{bm} [N/mm^2]	ω_{omin} [%]
B15	1,8	0,12	B45	3,3	0,21
B25	2,3	0,15	B55	3,8	0,24
B35	2,8	0,18	B65	4,3	0,27

$$\bar{\omega}_{omin} = 28\frac{f_{bm}}{f_s} \not> 1{,}5 \cdot \omega_o \text{ berekend}$$

Minimum verdeelwapening: $\omega_{omin} \geqslant 20\dfrac{f_{sh}}{f_{sv}}$

waarin:
f_{sh} = rekenwaarde staalspanning hoofdwapening
f_{sv} = rekenwaarde staalspanning verdeelwapening

Tabel 4.32 Minimum kenmiddellijn betonstaal[1] [mm]

constructie-delen	staaf-bestemming	f_{srep} (representatieve waarde treksterkte betonstaal [N/mm^2])		
		<400	$\geqslant 400$	$\geqslant 500$[2]
platen	hoofdwapening	8	6	5
	verdeelwapening	6	5	5
wanden	hoofdwapening en verdeelwapening	8	6	5
balken	hoofdwapening	10	8	6
	flankstaven	8	5	5
	beugels	6	5	5
kolommen	langsstaven	12	10	8
	beugels	6	5	5

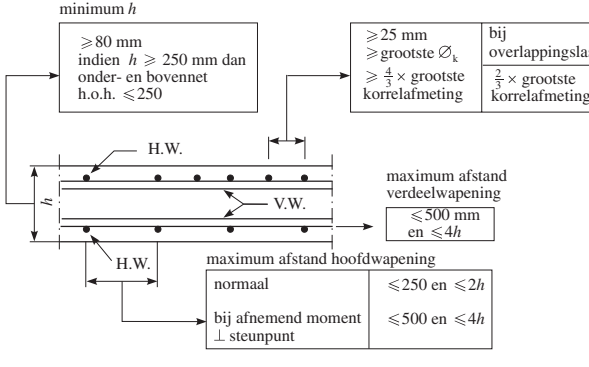
[1] Bij vooraf vervaardigde elementen mag de kenmiddellijn van wapening in platen en wanden worden verminderd tot:
- 6 mm bij $f_{srep} = 220\,\text{N/mm}^2$
- 4 mm bij $f_{srep} = 400\,\text{N/mm}^2$ en $f_{srep} = 500\,\text{N/mm}^2$

[2] Gepuntlaste wapeningsnetten en bijlegstaven.

Detaillering wapening voor ter plaatse gestorte constructies

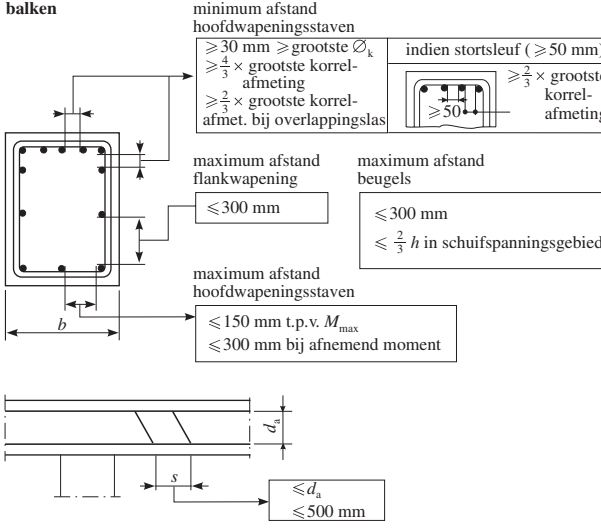
– Vloeren: zie figuur 4.26.
– Balken: zie figuur 4.27.
– Kolommen: zie figuur 4.28 en 4.29.
– Wanden: zie figuur 4.30.

vloeren



wapening bij opleggingen: 25% van de hoofdwapening in het veld moet doorlopen tot ten minste 70 mm voorbij de dag van de oplegging

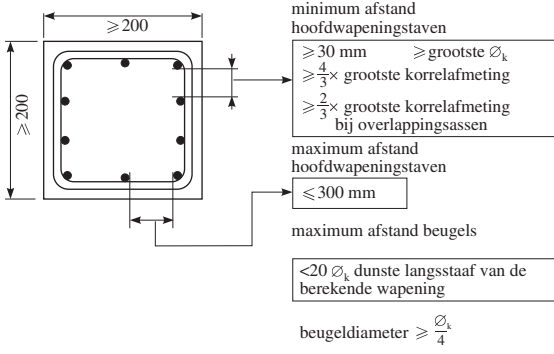
Figuur 4.26 Minimale vloerdikten en eisen t.a.v. afstand wapeningsstaven



wapening bij opleggingen: 25% van de hoofdwapening in het veld moet doorlopen tot ten minste 70 mm voorbij de dag van de oplegging

Figuur 4.27 Eisen t.a.v. afstand wapeningsstaven bij balken

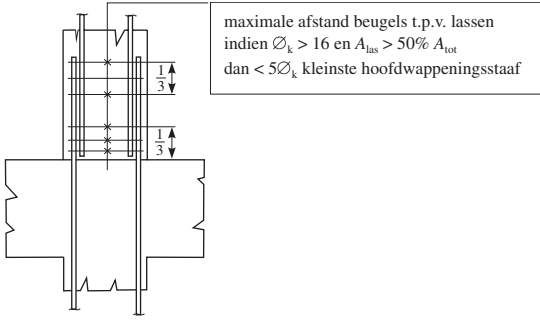
kolommen



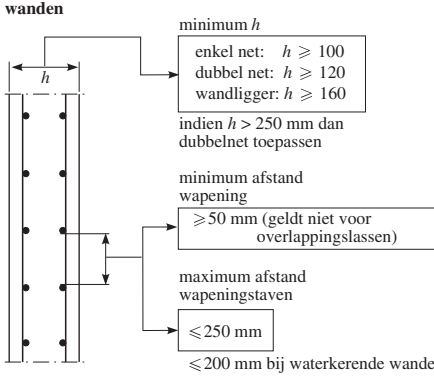
de voor de maatgevnde doorsneden benodigde bewapening moet over de gehele lengte worden aangebacht:

- met overlappingsassen max. ω_o= 4%
- zonder overlappingsassen max. ω_o= 8%

Figuur 4.28 Eisen t.a.v. afstand wapeningsstaven bij kolommen



Figuur 4.29 Maximale afstand beugels ter plekke van lassen



Figuur 4.30 Minimale wanddikten en eisen t.a.v. afstand wapeningsstaven

5 Staalconstructies

De berekening van *staalconstructies* is voornamelijk gebaseerd op het gebruik van normen. **Uitgebreide gegevens**, richtlijnen en voorschriften zijn vastgelegd in de reeks TGB 1990: NEN 6770 Staalconstructies – Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies, NEN 6771 Staalconstructies – Stabiliteit en NEN 6772 Staalconstructies – Verbindingen. Zie ook par. 1.1. Normen zijn verkrijgbaar bij het **Nederlands Normalisatie-instituut** te Delft.

Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 2 *Metalen* en hoofdstuk E2 *Tabellen voor staalconstructies*.

5.1 Lijst van symbolen

Opmerking. Varianten van de hieronder vermelde grootheden en factoren met de volgende algemene indices zijn niet apart in de lijst opgenomen:

$\cdots_{el}$	= elastisch
$\cdots_{pl}$	= plastisch
$\cdots_{ref}$	= referentiewaarde
$\cdots_{rep}$	= representatieve waarde
A_b	= oppervlakte doorsnede schacht bout [mm^2]
$A_{b;s}$	= oppervlakte spanningsdoorsnede bout [mm^2]
A_f	= oppervlakte flensdoorsnede [mm^3]
A_{net}	= oppervlakte nettodoorsnede [mm^3]
b	= breedte (varianten: b_0, b_1)[mm]
b_{ef}	= meewerkende breedte [mm]
c	= lengte waarover kracht wordt uitgeoefend [mm]
d	= buisdiameter, middellijn [mm]
$d_{b;nom}$	= nominale boutmiddellijn [mm]
$d_{g;nom}$	= nominale gatmiddellijn [mm]
E	= elasticiteitsmodulus [N/mm^2]
e_1	= eindafstand [mm]
e_2	= randafstand [mm]

$e_{2;\text{plooi}}$ = randafstand waarbij plooien optreedt [mm]
F = uitwendige kracht [N]
$F_{c;u;d}$ = rekenwaarde stuikkracht m.b.t. capaciteit plaatdeel, per bout, in uiterste grenstoestand [N]
F_p = uitwendige kracht m.b.t. ontstaan mechanisme volgens eerste-orde plasticiteitstheorie [N]
F_s = kracht t.g.v. belasting [N]
$F_{t;s;d}$ = rekenwaarde trekkracht per bout t.g.v. belasting [N]
$F_{t;u;d}$ = rekenwaarde trekkracht m.b.t. capaciteit per bout in uiterste grenstoestand [N]
$F_{v;s;d}$ = rekenwaarde schuifkracht per afschuifvlak en per bout t.g.v. belasting [N]
$F_{v;u;d}$ = rekenwaarde schuifkracht m.b.t. capaciteit per afschuifvlak en per bout in uiterste grenstoestand [N]
$F_{x;E}$ = Euler-knikkracht liggerlijf boven oplegging [N]
f = sterkte [N/mm^2]
f_t = treksterkte [N/mm^2]
$f_{t;b}$ = treksterkte (stalen) schroefbouten [N/mm^2]
$f_{w;u;d}$ = rekenwaarde spanning m.b.t. capaciteit las in uiterste grenstoestand [N/mm^2]
f_y = vloeigrens [N/mm^2]
$f_{y;b;rep}$ = representatieve waarde vloeigrens of 0,2%-rekgrens (stalen) schroefbouten [N/mm^2]
G = afschuivingsmodulus [N/mm^2]
h = hoogte [mm]
I = axiaal kwadratisch oppervlaktemoment [mm^4]
i_y = oppervlaktemomentarm m.b.t. y-as (i_z voor z-as) [mm]
k_p = factor voor bouten met gecontroleerde voorspankracht [$-$]
l = lengte (varianten: l_0, l_1) [mm]
l_{cr} = maximaal *onder*steunde lengte [mm]
l_g = lengte staaf tussen gaffelopleggingen [mm]
l_{max} = grootste *on*gesteunde lengte in nabijheid $M_{y;max;s;d}$ [mm]
l_{sys} = systeemlengte [mm]
$l_{y;buc}$ = kniklengte staaf m.b.t. y-as ($l_{z;buc}$ voor z-as) [mm]
M = buigend moment [N $\cdot$ mm]

$M_{A;s;d}$ = rekenwaarde buigend moment op uiteinde A van staaf t.g.v. belasting ($M_{B;s;d}$ voor uiteinde B) [N · mm]

$M_{el;d}$ = rekenwaarde buigend moment m.b.t. elastische capaciteit [N · mm]

$M_{u;d}$ = rekenwaarde buigend moment m.b.t. capaciteit in uiterste grenstoestand [N · mm]

$M_{y;A;s;d}$ = rekenwaarde buigend moment om y-as op uiteinde A van staaf t.g.v. belasting ($M_{y;B;s;d}$ voor uiteinde B) [N · mm]

$M_{y;equ;s;d}$ = rekenwaarde equivalent buigend moment om y-as t.g.v. belasting [N · mm]

$M_{y;max;s;d}$ = rekenwaarde maximaal buigend moment om y-as t.g.v. belasting [N · mm]

$M_{y;mid;s;d}$ = rekenwaarde buigend moment om y-as halverwege staaf t.g.v. belasting [N · mm]

$M_{y;st;s;d}$ = rekenwaarde buigend moment om y-as op plaats waar weer zijdelingse steun aanwezig is, t.g.v. belasting [N · mm]

$M_{y;u;d}$ = rekenwaarde buigend moment om y-as m.b.t. capaciteit in uiterste grenstoestand [N · mm]

$M_{z;el;d}$ = rekenwaarde buigend moment om z-as m.b.t. elastische capaciteit in uiterste grenstoestand [N · mm]

$M_{z;equ;s;d}$ = rekenwaarde equivalente buigend moment om z-as t.g.v. belasting [N · mm]

$M_{z;u;d}$ = rekenwaarde buigend moment om z-as m.b.t. capaciteit in uiterste grenstoestand [N · mm]

N = normaalkracht [N]

$N_{c;s;d}$ = rekenwaarde druknormaalkracht t.g.v. belasting (varianten: $N_{c;l;s;d}$, $N_{c;2;s;d}$) [N]

$N_{c;u;d}$ = rekenwaarde druknormaalkracht m.b.t. capaciteit in uiterste grenstoestand [N]

$N_{st;s;d}$ = rekenwaarde kracht in starre steun t.g.v. belasting [N]

$N_{V;y;p;d}$ = rekenwaarde normaalkracht m.b.t. plastische capaciteit doorsnede gereduceerd door dwarskracht in y-richting ($N_{V;z;p;d}$ voor z-richting) [N]

$N_{w;u;d}$ = rekenwaarde druknormaalkracht liggerlijf boven oplegging m.b.t. capaciteit in uiterste grenstoestand [N]

$R_{s;d}$ = oplegreactie oplegging t.g.v. rekenwaarde belasting [kN]
r = afrondingsstraal [mm]
s_1 = steek, hart-op-hart (h.o.h.) afstand tussen gaten gemeten in krachtrichting [mm]
$s_{1;plooi}$ = steek waarbij plooien optreedt (variant: $s_{2;plooi}$) [mm]
s_2 = steek, afstand tussen boutrijen gemeten loodrecht op krachtrichting [mm]
t = dikte (varianten: t_1, t_2, t_3) [mm]
t_f = dikte flens [mm]
t_w = dikte lijf [mm]
$W_{y;el}$ = elastisch weerstandsmoment om y-as [mm^3]

α = lineaire uitzettingscoëfficiënt [K^{-1}]
α_c = stuikfactor [−]
$\alpha_{red;1}$ = reductiefactor voor e_2 en s_2 [−]
$\alpha_{red;2}$ = reductiefactor voor gesneden draad [−]
α_3 = factor [−]
β = lasfactor [−]
$\beta_2(\beta_3)$ = reductiefactor voor met 2 (resp. 3) bouten aan één flens aangesloten hoekstalen [−]
γ_M = modelfactor [−]
γ_m = materiaalfactor [−]
ε = rek [−]
ε_u = rek na breuk [−]
λ_e = slankheid staaf waarbij knikspanning volgens Euler juist gelijk is aan $f_{u;d}$ [−]
λ_{re} = relatieve slankheid [−]
λ_y = slankheid staaf m.b.t. knik om y-as (γ_z voor z-as) [−]
ν = Poisson-factor [−]
ξ = factor afhankelijk van aantal velden n_v waarin staaf wordt verdeeld [−]
$\sigma_{f;s;d}$ = rekenwaarde spanning in flens t.g.v. belasting [N/mm^2]
$\sigma_{w;s;d}$ = rekenwaarde gemiddelde spanning in de las t.g.v. belasting, onafhankelijk van de richting van kracht en van las [N/mm^2]
ω_{buc} = knikfactor [−]

ω_{kip} = kipfactor [−]
$\omega_{x;buc}$ = knikfactor voor knikstabiliteit liggerlijf om de x-as liggerprofiel [−]
$\omega_{y;buc}$ = knikfactor m.b.t. y-as ($\omega_{z;buc}$ voor z-as) [−]

5.2 Materiaalfactor

Tabel 5.1 Waarden van de materiaalfactor γ_m

grootheid/factor	γ_m [−]
vloeigrens	1
treksterke	1
elasticiteitsmodulus	1
Poisson-factor	1
lineaire uitzettingscoëfficiënt	1
afschuivingsmodulus	1

5.3 Aansluitingen staalconstructies

De *minimaal vereiste opleglengte* voor staalconstructies op muren volgt uit de uiterste grenstoestand met betrekking tot de oplegspanningen. Voor stalen liggers op metselwerk wordt aanbevolen deze niet minder dan halfsteens te maken. Bij kleine opleggingen dient men ervoor te zorgen dat de plaatsvastheid wordt gewaarborgd.

5.4 Berekeningen volgens elasticiteitsleer

Tabel 5.2 Representatieve waarden materiaalgrootheden

grootheid		representatieve waarde
elasticiteitsmodulus	E_{rep}	210 kN/mm^2
afschuivingsmodulus	G_{rep}	81 kN/mm^2
Poisson-verhouding	ν_{rep}	0,3
lineaire uitzettingscoëfficiënt	α_{rep}	$12 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}
volumieke massa	ρ	7850 kg/m^3

Tabel 5.3 Representatieve waarden[1)] van de vloeigrens voor diktes t/m 40 mm[2)]

staalsoort[3) 4)]	$f_{y;rep}$ [N/mm^2]	$f_{t;rep}$ [N/mm^2]
S235J...	235	360
S275J...	275	430
S355J...	355	510

[1)] Voor het toepassen van andere rekenmodellen dan eerste-orde elastisch is een classificatie naar klasse 1 t/m 4 noodzakelijk (zie NEN 6770, tabel 6).
[2)] Voor diktes $>$ 40 en $<$ 100 mm waarden met ca. 10% verlagen.
[3)] Volgens NEN-EN 10025 (1993).
[4)] Voor niet genoemde soorten geldt: minimum vloeigrens (of 0,2% rekgrens), maar wel hoogstens 80% van de treksterkte; representatieve waarde van de rek na breuk $\varepsilon_{u;rep} \geqslant 15\%$.

5.5 Verbindingen met schroefbouten in ruime gaten

Tabel 5.4 Gegevens boutmateriaal[1)] uit tabel 5.5

sterkteklasse	$f_{y;b;rep}$ [N/mm^2]	$f_{t;b;rep}$ [N/mm^2]
4.6	240	400
5.6	300	500
6.8	480	600
8.8	640	800
10.9	900	1000

[1)] Bouten en moeren moeten voldoen aan NEN-ISO 898-1, resp. NEN-ISO 898-2.

Tabel 5.5 Grenskrachten van bouten $\gamma_M = 1{,}25$

aard van de belasting	grenskracht	bijzonderheden
grens-stuikkracht	$F_{c;u;d} = 2\alpha_c \cdot \alpha_{red;1} \cdot f_{t;d} \cdot d_{b;nom} \cdot t$	
grens-trekkracht	$F_{t;u;d} = 0{,}72\alpha_{red;2} \cdot f_{t;b;d} \cdot A_{b;s}$	
grens-afschuifkracht	$F_{v;u;d} = 0{,}48 f_{t;b;rep} \cdot A_b$	schuifvlak snijdt de schroefdraad niet
	$F_{v;u;d} = 0{,}48\alpha_{red;2} \cdot f_{t;b;d} \cdot A_{b;s}$	schuifvlak snijdt de schroefdraad en $f_{t;b;d} \leqslant 800$ N/mm^2
	$F_{v;u;d} = 0{,}40\alpha_{red;2} \cdot f_{t;b;d} \cdot A_{b;s}$	schuifvlak snijdt de schroefdraad en $f_{t;b;d} > 800$ N/mm^2
trekkracht + schuifkracht	$\frac{F_{v;s;d}}{F_{v;u;d}} + \frac{F_{t;s;d}}{1{,}4F_{t;u;d}} \leqslant 1{,}0$	

	randafstand e_2	steekafstand s_2
$\alpha_{red;1} = 1$	$\geqslant 1{,}5d_{g;nom}$ en	$\geqslant 3d_{g;nom}$
$\alpha_{red;1} = 0{,}67$	$= 1{,}2d_{g;nom}$ en/of	$= 2{,}4d_{g;nom}$

$\alpha_{red;2} = 1$ voor bouten met gerolde draad

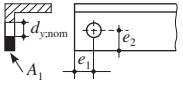
$= 0{,}85$ voor bouten met gesneden draad

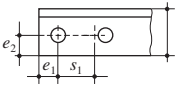
α is de kleinste waarde van: $1{,}0 \frac{e_{1;min}}{3d_{g;nom}}, \frac{s_{1;min}}{3d_{g;nom}} - \frac{1}{4}, \frac{f_{t;b;d}}{f_{t;d}}$

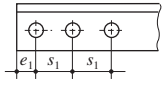
Tabel 5.6 Minimale en maximale eindafstand, randafstand, steek en afstand tussen boutrijen [mm]

	eindafstand e_1	randafstand e_2	steek s_1	afstand tussen boutrijen s_2
minimale maten				
	$\geqslant 1{,}2 d_{g;nom}$	$\geqslant 1{,}5 g_{g;nom}$ of $<1{,}5 d_{g;nom}$ en $\geqslant 1{,}2 d_{g;nom}$ met gereduceerde grensstuikkracht	$\geqslant 2{,}2 d_{g;nom}$	$\geqslant 3 d_{g;nom}$ of $<3 d_{g;nom}$ en $\geqslant 2{,}4 d_{g;nom}$ met gereduceerde grensstuikkracht
maximale maten – corrosief				
druk	$\leqslant 40 + 4t$	$\leqslant 40 + 4t$	$\leqslant s_{1,plooi}$ en $\leqslant 14t$ en $\leqslant 200$	$\leqslant s_{2,plooi}$ en $\leqslant 14t$ en $\leqslant 200$
trek	$\leqslant 40 + 4t$	$\leqslant 40 + 4t$ en $\leqslant e_{2,plooi}$	buitenste houtrij: $\leqslant 14t$ en $\leqslant 200$ binnenste houtrij: $\leqslant 28t$ en $\leqslant 400$	$\leqslant 14t$ en $\leqslant 200$
maximale maten – niet-corrosief				
druk	$\leqslant 150$ en $\leqslant 12t$	$\leqslant e_{2,plooi}$ en $\leqslant 150t$ en $\leqslant 12t$	$\leqslant s_{1,plooi}$ en $\leqslant 14t$en $\leqslant 200$	$\leqslant s_{2,plooi}$ en $\leqslant 14t$en $\leqslant 200$
trek	$\leqslant 150$ en $\leqslant 12t$	$\leqslant 150$ en $\leqslant 12t$	buitenste houtrij: $\leqslant 21t$ en $\leqslant 300$ binnenste houtrij: $\leqslant 42t$ en $\leqslant 600$	$\leqslant 14t$ en $\leqslant 200$

Tabel 5.7 Grenstrekkracht $F_{t;u;d}$ van met één flens aangesloten hoekstalen[1)]







	s_1	β_2	s_1	β_3
A_1 = oppervlakte van de doorsnede naast het gat	$\leqslant 2{,}5d_{g;nom}$ $\geqslant 5d_{g;nom}$	0,4 0,7	$\leqslant 2{,}5d_{g;nom}$ $\geqslant 5d_{g;nom}$	0,5 0,7
$F_{t;u;d} = 1{,}6A_1 \cdot f_{t;d}$ met $A_1 = \left(e_2 - \frac{d_{g;nom}}{2}\right)$	$F_{t;u;d} = 0{,}8\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_{t;d}$ (2 bouten) $F_{t;u;d} = 0{,}8\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_{t;d}$ (3 bouten)			

gelijkzijdig hoekstaal: $A_{net} = (2b - t) \cdot t - d_{g;nom} \cdot t$
ongelijkzindig hoekstaal: bepaal equivalent gelijkzijdig hoekstaal met afmetingen van de zijden gelijk aan die van de kleinste zijde, daarna A_{net} als gelijkzijdig hoekstaal

[1)] Zie voor gatverzwakking bij *strippen* NEN 6770, artikel 13.

Tabel 5.8 Grenstrekkracht voor hoekstalen in stabiliteitsverbanden

hoekstaal				grenstrekkracht bouten [kN]			
				2M16	3M16	2M20	3M20
L	60.	60.	6	77	–	–	–
L	70.	70.	7	107	126	104	–
L	80.	80.	8	–	168	139	–
L	90.	90.	9	–	–	–	210
L	100.	100.	10	–	–	–	263

Uitgangspunten:
- Staalkwaliteit: S235J...
- Boutafstand: $S_1 = 3 \cdot d_{g;nom}$
- Randafstand: $e_1 \geqslant 2{,}25 \cdot d_{g;nom}$
  $e_2 \geqslant 1{,}5 \cdot d_{g;nom}$
- Boutenkwaliteit 8,8 met gerolde draad.

Tabel 5.9 Grenskrachten bouten ($\gamma_M = 1{,}25$)

		M8	M10	M12	M16	M20	M24	M30
A_b	[mm^2]	50,30	78,50	113,00	201,00	314,00	452,00	707,00
$A_{b;s}$	[mm^2]	39,20	58,00	84,30	157,00	245,00	353,00	561,00
boutkwaliteit **4.6; gerolde** draad; $\alpha_{red;2} = 1$; $f_{t;b;rep} = 400\,\text{N/mm}^2$								
$F_{t;u;d}$	[kN]	11,29	16,70	24,28	45,22	70,56	101,66	161,57
$F_{v;u;d}$	[kN]							
– schroefdraad niet		9,66	15,07	21,70	38,59	60,29	86,78	135,74
– schroefdraad wel		7,56	11,19	16,27	30,29	47,28	68,11	108,25
boutkwaliteit **4.6; gesneden** draad; $\alpha_{red;2} = 0,85$; $f_{t;b;rep} = 400\,\text{N/mm}^2$								
$F_{t;u;d}$	[kN]	9,60	14,20	20,64	38,43	59,98	86,41	137,33
$F_{v;u;d}$	[kN]							
– schroefdraad niet		9,66	15,07	21,70	38,59	60,29	86,78	135,74
– schroefdraad wel		6,43	9,51	13,83	25,75	40,18	57,90	92,01
boutkwaliteit **8.8; gerolde** draad; $\alpha_{red;2} = 1$; $f_{t;b;rep} = 800\,\text{N/mm}^2$								
$F_{t;u;d}$	[kN]	22,58	33,41	48,56	90,43	141,12	203,33	323,14
$F_{v;u;d}$	[kN]							
– schroefdraad niet		19,32	30,14	43,39	77,18	120,58	173,57	271,49
– schroefdraad wel		15,13	22,38	32,53	60,59	94,55	136,23	216,50
boutkwaliteit **8.8; gesneden** draad; $\alpha_{red;2} = 0,85$; $f_{t;b;rep} = 800\,\text{N/mm}^2$								
$F_{t;u;d}$	[kN]	19,19	28,40	41,27	76,87	119,95	172,83	274,67
$F_{v;u;d}$	[kN]							
– schroefdraad niet		19,32	30,14	43,39	77,18	120,58	173,57	271,49
– schroefdraad wel		12,86	19,03	27,65	51,50	80,37	115,80	184,03
boutkwaliteit **10.9; gerolde** draad; $\alpha_{red;2} = 1$; $f_{t;b;rep} = 1000\,\text{N/mm}^2$								
$F_{t;u;d}$	[kN]	28,22	41,76	60,70	113,04	176,40	254,16	403,92
$F_{v;u;d}$	[kN]							
– schroefdraad niet		24,14	37,68	54,24	96,48	150,72	216,96	339,36
– schroefdraad wel		15,69	23,22	33,75	62,85	98,08	141,31	224,58
boutkwaliteit **10.9; gesneden** draad; $\alpha_{red;2} = 0,85$; $f_{t;b;rep} = 1000\,\text{N/mm}^2$								
$F_{t;u;d}$	[kN]	23,99	35,50	51,59	96,08	149,94	216,04	343,33
$F_{v;u;d}$	[kN]							
– schroefdraad niet		24,14	37,68	54,24	96,48	150,72	216,96	339,36
– schroefdraad wel		13,34	19,74	28,68	53,42	83,37	120,12	190,89

Tabel 5.10 Grensstuikkrachten bouten ($\gamma_M = 1{,}25$)[1)]

plaat/ bout	8	10	12	16	20	24	30
S235J... $f_{t;rep} = 360\,N/mm^2$							
4	23,04	28,80	34,56	46,80	57,60	69,12	86,40
6	34,56	43,20	51,84	69,12	86,40	103,68	129,60
8	46,08	57,60	69,12	92,16	115,20	138,24	172,80
10	57,60	72,00	86,40	115,20	144,00	172,80	216,00
12	69,12	86,40	103,68	138,24	172,80	204,36	259,20
15	86,40	108,00	129,60	172,80	216,00	259,20	324,00
20	115,20	144,00	172,80	230,40	288,00	345,60	432,00
25	144,00	180,00	216,00	288,00	360,00	432,00	540,00
30	172,80	216,00	259,00	345,60	432,00	518,40	648,00
S275J... $f_{t;rep} = 430\,N/mm^2$							
4	27,52	34,40	41,28	55,04	68,80	82,56	103,20
6	41,28	51,60	61,92	82,56	103,20	123,84	154,80
8	55,04	68,80	82,56	110,08	137,60	165,12	206,40
10	68,80	86,00	103,20	137,60	172,00	206,40	258,00
12	82,56	103,20	123,84	165,12	206,40	247,00	309,60
15	103,20	129,00	154,80	206,40	247,00	309,60	387,00
20	137,60	172,00	206,40	275,20	344,00	412,80	516,00
25	172,00	215,00	258,00	344,00	430,00	516,00	645,00
30	206,40	258,00	309,60	412,80	516,00	619,20	774,00
S355J... $f_{t;rep} = 510\,N/mm^2$							
4	32,64	40,80	48,96	65,28	81,60	97,92	122,40
6	48,96	61,20	73,44	97,92	122,40	146,88	183,60
8	65,28	81,60	97,92	130,56	163,20	195,84	244,80
10	81,60	102,00	122,40	163,20	204,00	244,80	306,00
12	97,92	122,40	146,88	195,84	244,80	293,76	367,20
15	122,40	153,00	183,60	244,80	306,00	367,20	459,00
20	163,20	204,00	244,80	326,40	408,00	489,60	612,00
25	204,00	255,00	306,00	408,00	510,00	612,00	765,00
30	244,80	306,00	367,20	489,60	612,00	734,40	918,00

[1)] Tabelwaarden moeten worden vermenigvuldigd met: $\alpha_{red;2}$ en α_c (zie tabel 5.5).

Schuifkracht, dubbelsnedig, gerolde draad.
Boutkwaliteit 8.8.

Bouten met gecontroleerde voorspankracht
Voor de grenskrachten voor bouten met *gecontroleerde voorspankracht* zie NEN 6772, artikel 11.14.
De afmetingen van gaten moeten voldoen aan NEN-ENV 1090-1: 1996, art. 5.3.10.

De spanningsdoorsnede $A_{b;s}$ voor bouten met mechanische eigenschappen volgens de klassen 8.9 en 10.9 met metrische ISO-schroefdraad, komt overeen met de waarden voor M12 t/m M30 in tabel 5.9.

Voor de *voorspankracht* F_p geldt:

$$F_p = k_p \cdot f_{t;b;rep} \cdot A_{b;s}$$

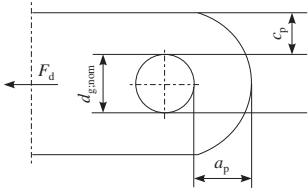
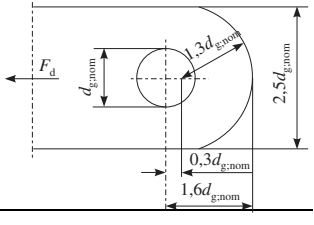
waarin:
$k_p = 0{,}7$ voorspannen volgens moment-hoekmethode
$= 0{,}7$ voorspannen met directe trekkrachtbepaling
$= 0{,}5$ voorspannen door afdraaien van een hulpboutkop
$= 0{,}5$ voorspannen volgens een momentmethode

5.6 *Pen-gatverbindingen*

De afmetingen van de platen in pen-gatverbindingen moeten in overeenstemming zijn met de minimum waarden die daarvoor zijn gegeven in tabel 5.11.

Er mag alleen gebruik gemaakt worden van opdikplaten indien, excentriciteiten niet voorkomen en de afmetingen zodanig zijn dat de belasting door de bruto-doorsnede kan worden opgenomen.

Tabel 5.11 Voorwaarden aan de geometrie van platen bij pengatverbindingen

voorwaarden	geometrie
$a_p \geq \frac{F_d}{2 \cdot t \cdot f_{y;d}} + \frac{2}{3} d_{g;nom}$ $c_p \geq \frac{F_d}{2 \cdot t \cdot f_{y;d}} + \frac{1}{3} d_{g;nom}$	bij gegeven geometrie 
$t \geq 0{,}7\sqrt{\frac{F_d}{f_{y;d}}}$ $d_{g;nom} \geqslant 2{,}5 \cdot t$ waarin $f_{y;d}$ de rekenwaarde voor de vloeispanning van de plaat is	bij gegeven geometrie 

De pen moet op buiging, afschuiving en stuik berekend worden volgens de toetsingsregels van par. 11.1.7.2 van NEN 6772.

5.7 Gelaste verbindingen

Algemeen

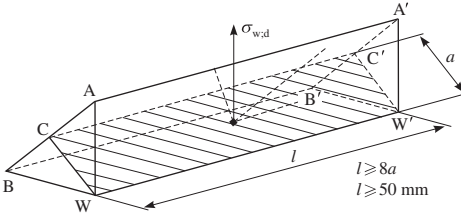
De lasbaarheid van verbindingen hangt van vele andere factoren af. Naast het moedermateriaal, zijn het lasproces, het type elektrode, de dikte, het voorverwarmen, e.d. belangrijke factoren. Een

belangrijke formule hierbij is de uitdrukking van de koolstofequivalent:

$$\text{koolstof-equivalent } CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Hoeklassen

Een *hoeklas* wordt voor de sterkteberekening benaderd door het grootste ingeschreven driezijdige prisma zonder aftrek van kop en krater. Zie figuur 5.1 en 5.2.



a = lasdikte CW = C′W′
l = laslengte WW′
$l \cdot a$ = keeldoorsnede CWW′C′

Figuur 5.1 Sterkteberekening hoeklas

Voor de *lasdikte* geldt (zie ook figuur 5.2):

- In het algemeen $a = CO$ ($a_{min} = 4$ mm).
- Bij onderpoederklassen:
  - $CO \leqslant 10$ mm $\rightarrow a = 1{,}2\ CO$
  - $CO > 10$ mm $\rightarrow a = CO + 2$ mm
  - Een minimaal benodigde lasdikte bij S355J ($\triangleq$ Fe 510) om koudscheuren te voorkomen (indicatie volgens NEN 2062).

Tabel 5.12 Lasfactor β

staalsoort[1)]	$f_{t;d}$[2)] [N/mm^2]	β[3)] [−]
S235J...	360	0,80
S275J...	430	0,85
S355J...	510	0,90

[1)] Volgens NEN-EN 10025 (1993).
[2)] Voor materiaaldikten tussen 40 en 100 mm de waarden met ca. 10% verminderen.
[3)] Bij $f_{t;d}$ tussen 235 en 355 mag β worden bepaald m.b.v. rechtlijnige interpolatie.

Bij de *sterkteberekening* van een enkele las moet de volgende controleregel worden toegepast:

$$\frac{\sigma_{w;s;d}}{f_{w;u;d}} \leqslant 1$$

$$f_{w;u;d} = \frac{f_{t;d}}{\beta \cdot \gamma_M \cdot \sqrt{3}} = 0{,}46\frac{f_{t;d}}{\beta}$$

waarin:
$\sigma_{w;s;d}$ = gemiddelde sterkte in de las, onafhankelijk van de richting

$$\sigma_{w;s;d} = \frac{F_d}{A_{ef}}$$

$f_{t;d}$ = rekenwaarde treksterkte moedermateriaal van het zwakste te verbinden plaatdeel
β = lasfactor volgens tabel 5.12
$\gamma_M = 1{,}25$

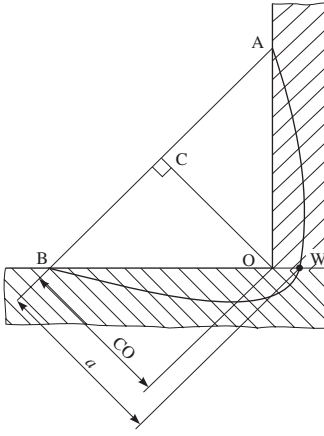
De *meewerkende breedte* b_{ef} voor lassen en moedermateriaal wanneer geen schotjes worden toegepast is de kleinste waarde van (zie ook figuur 5.3):

I-profiel:

$$b_{ef} = b$$

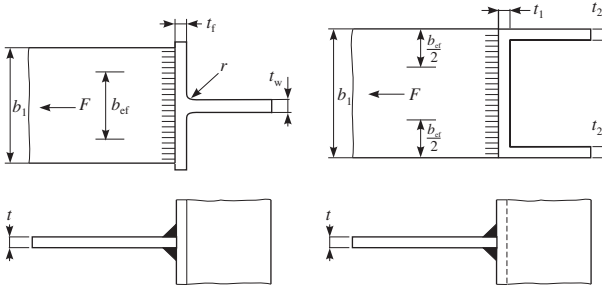
$$b_{ef} = t_w + 2r + 7\frac{f_{y;d(profiel)}}{f_{y;d(plaat)}} \cdot t_f$$

$$b_{ef} = t_w + 2r + 7\frac{f_{y;d(profiel)}}{f_{y;d(plaat)}} \cdot \frac{t_f^2}{t}$$



Figuur 5.2 Lasdikte a

I-profiel **buisprofiel**



Figuur 5.3 Meewerkende breedte b_{ef}

Buisprofiel:

$$b_{\text{ef}} = b$$

$$b_{\text{ef}} = 2t_2 + 5\frac{f_{\text{y;d(profiel)}}}{f_{\text{y;d(plaat)}}} \cdot t_1$$

$$b_{\text{ef}} = 2t_2 + 5\frac{f_{\text{y;d(profiel)}}}{f_{\text{y;d(plaat)}}} \cdot \frac{t_1^2}{t}$$

Indien $b_{\text{ef}} < 0{,}7b$, dan is er voor statisch onbepaalde constructies onvoldoende vervormingscapaciteit en moet de verbinding worden verstijfd.

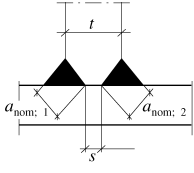
De berekende lasdikte a moet over de volle breedte b_1 worden aangebracht:

$$a_{\min} = \frac{\beta \cdot t}{\sqrt{2}}$$

Stompe lassen met spleet

Enkelzijdig aangebrachte *stompe lassen met spleet* mogen niet worden gebruikt voor het overdragen van:
- loodrecht op de lasrichting werkende trekkrachten;
- buigende momenten om de lengte-as van de las.

Er kan een onderscheid worden gemaakt tussen:
- T-verbindingen met stompe lassen met *kleine* spleet. Zie hiervoor figuur 5.4.



$a_{\text{nom; 1}} + a_{\text{mon; 2}} > t + 2$ mm en
$s \leqslant 3$ mm en $s \leqslant \frac{t}{5}$

Figuur 5.4 T-verbinding met stompe lassen met kleine spleet

– T-verbindingen met stompe lassen met *grote* spleet en stompe verbindingen met stompe lassen met spleet. Voor de toetsing van deze lassen dient de toetsing van de hoeklassen te worden gebruikt. De lasdikte is afhankelijk van de lasnaadvoorbewerking en inbranddiepte. Zie NEN 6770, art. 13.

5.8 *Instabiliteit gedrukte staven*

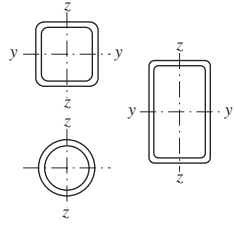
Kolommen in star geschoorde raamwerken

Hieronder komen eenvoudige rekenregels (*eerste-orde elastisch*) aan de orde. Voor gebruikte symbolen, zie tevens par. 5.1.
Voor uitgebreide toetsingsregels, zie NEN 6771 Staalconstructies–stabiliteit (zie ook par. 1.1 en begin par. 5).

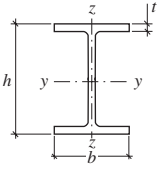
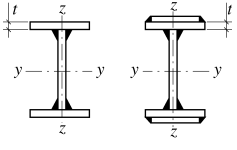
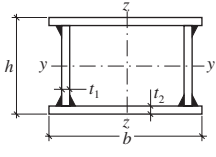
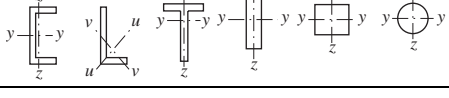
Rekenwaarde normaalkracht m.b.t. vloeien:

$$N_{c;u;d} = A \cdot f_{y;d}$$

Tabel 5.13 Keuze instabiliteitskrommen uit tabel 5.14

profiel[1)]	toelichting[2)]	instabiliteit	
		as	kromme (tabel 5.14)
buis 	warm gewalst	elke	a
	koud gevormd met $f_{y;d}$	elke	b
	koud gevormd met $f_{y;m;d}$	elke	c

Tabel 5.13 (vervolg)

profiel[1]	toelichting[2]	instabiliteit as	instabiliteit kromme (tabel 5.14)
I, gewalst 	$h/b > 1{,}2$; $40 < t \leqslant 40$ mm	y	a
		z	b
	$h/b > 1{,}2$; $40 < t \leqslant 80$ mm en $h/b \leqslant 1{,}2$; $t \leqslant 80$ mm	y	b
		z	c
	$r > 80$ mm	y	d
		z	d
I, gewalst 	$t \leqslant 40$ mm	y	b
		z	c
	$t > 40$ mm	y	c
		z	d
koker, gelast 	algemeen (behalve in geval hierna)	elke	b
	zware lassen en $b/t_2 < 30$	y	c
	$h/t_1 < 30$	z	c
U, L, T en massief 		elke	c

[1] Overige profielen dienen zo goed mogelijk te worden ingepast.

[2] $f_{y;m;d}$ = rekenwaarde gemiddelde vloeigrens profiel *na* koudvervormen. Lassen of gloeien mag de spanningsverhoging door koudvervormen niet teniet doen, anders $f_{y;d}$.

[3] $f_{y;d}$ = rekenwaarde vloeigrens uitgangsmateriaal *voor* koudvervormen.

Tabel 5.14 Waarden van ω_{buc} als functie van de te hanteren instabiliteitskrommen (a t/m d) en de relatieve slankheid λ_{re} (voor keuze kromme a t/m d, zie tabel 5.13)

λ_{re} [1)]	a	b	c	d
0,2	1,00	1,00	1,00	1,00
0,3	0,98	0,96	0,95	0,92
0,4	0,95	0,93	0,90	0,85
0,5	0,92	0,88	0,84	0,78
0,6	0,89	0,84	0,79	0,71
0,7	0,85	0,78	0,72	0,64
0,8	0,80	0,72	0,66	0,58
0,9	0,73	0,66	0,60	0,52
1,0	0,67	0,60	0,54	0,47
1,1	0,60	0,54	0,48	0,42
1,2	0,53	0,48	0,43	0,38
1,3	0,47	0,43	0,39	0,34
1,4	0,42	0,38	0,35	0,31
1,5	0,37	0,34	0,31	0,28
1,6	0,33	0,31	0,28	0,25
1,7	0,30	0,28	0,26	0,23
1,8	0,27	0,25	0,23	0,21
1,9	0,24	0,23	0,21	0,19
2,0	0,22	0,21	0,20	0,18
2,1	0,20	0,19	0,18	0,16
2,2	0,19	0,18	0,17	0,15
2,3	0,17	0,16	0,15	0,14
2,4	0,16	0,15	0,14	0,13
2,5	0,15	0,14	0,13	0,12
2,6	0,14	0,13	0,12	0,11
2,7	0,13	0,12	0,12	0,11
2,8	0,12	0,11	0,11	0,10
2,9	0,11	0,11	0,10	0,09
3,0	0,10	0,10	0,10	0,09

[1)] Voor tussenliggende waarden rechtlijnig interpoleren.

[2)] $\left.\begin{array}{l}\lambda_y = l_{y;buc}/i_y \\ \lambda_e = \pi\sqrt{E_d/f_{f;d}}\end{array}\right\} \lambda_{y;re} = \dfrac{\lambda_y}{\lambda_e}$

Voor de kipfactor ω_{kip} mag de knikfactor volgens tabel 5.14 worden aangehouden (voor walsprofielen de a-kromme, voor gelaste profielen de c-kromme). Er geldt:

$$\lambda_{\text{re}} = \zeta \sqrt{\frac{l_{\text{max}} \cdot h}{b \cdot t_{\text{f}}} \cdot \frac{f_{\text{y;d}}}{E_{\text{d}}}}$$

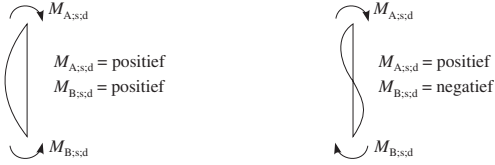
waarin:
$\zeta = 1{,}32 \cdot \zeta_{\text{h}}$ voor profielen doorsnedeklassen 1 en 2
$\zeta = 1{,}23 \cdot \zeta_{\text{h}}$ voor profielen doorsnedeklasse 3
$\zeta_{\text{h}} = 1$ indien de belasting aangrijpt lager dan $0{,}25 \cdot h$ onder de bovenflens
$\zeta_{\text{h}} = 1{,}3$ indien de belasting aangrijpt $0{,}1 \cdot h$ onder de bovenflens
Tussenwaarden van ζ_{h} kunnen worden geïnterpoleerd.

Rekenwaarde buigend moment om de y-as m.b.t. de capaciteit in de uiterste grenstoestand:

$$M_{\text{y;u;d}} = M_{\text{y;el;d}} = f_{\text{y;d}} \cdot W_{\text{y;d}}$$

Rekenwaarde equivalente buigend moment om de y-as, $M_{y;\text{equ;s;d}}$, is de grootste waarde van:

$$\left.\begin{array}{l} |0{,}1(M_{\text{y;B;s:d}} - M_{\text{y;A;s;d}}) + M_{\text{y;mid;s;d}}| \\ \text{en} \\ |0{,}4(M_{\text{y;B;s:d}}| \end{array}\right\} \; l_{\text{y;buc}} = l_{\text{sys}}$$



Figuur 5.5 Momenten bij kolommen

Toetsingsregels voor kolommen in *star geschoorde raamwerken*:

a Op druk en buiging om de *sterke* as (y-as) belaste staaf en niet gevoelig voor torsieknik ($\omega_{kip} = 1$):

$$1{,}1\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc}\,N_{c;u;d}} + 1{,}1\frac{M_{y;equ;s;d}}{M_{y;u;d}} \leqslant 1$$

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{z;buc}\,N_{c;u;d}} \leqslant 1$$

b Op druk en buiging om de *zwakke* as (z-as) belaste staaf:

$$1{,}1\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{z;buc}\,N_{c;u;d}} + 1{,}1\frac{M_{z;equ;s;d}}{M_{z;u;d}} \leqslant 1$$

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc}\,N_{c;u;d}} \leqslant 1$$

Toetsingsregels zijn afhankelijk van:

- Classificatie van de doorsnede (NEN 6770, par. 10.2.4.1): een indeling van de doorsneden in klassen van verschillende rotatiecapaciteit t.b.v. verschillende rekenmodellen (klassen 1 t/m 4).
- Toetsing van de doorsnede (NEN 6770, par. 11): formules aan de hand waarvan kan worden gecontroleerd of de betreffende doorsnede in staat is de normaalkrachten, dwarskrachten en momenten te weerstaan.

Kolommen in ongeschoorde raamwerken

Wanneer wordt afgezien van een nauwkeurige berekening volgens de tweede-orde theorie mag worden volstaan met de volgende toetsingsregels. Voor de gebruikte symbolen, zie hiervóór en par. 1.1.

Toetsingsregels voor kolommen in *ongeschoorde raamwerken*:

a Op druk en buiging om de *sterkste* as belaste staaf in een raamwerk dat in één of twee richtingen ongeschoord is en gevoelig is voor torsieknik ($\omega_{kip} < 1$):

$$1{,}1\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc}\cdot N_{c;u;d}} + 1{,}1\frac{M_{y;equ;s;d}}{\omega_{kip}\cdot M_{y;u;d}} \leqslant 1$$

$$1{,}1\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{z;buc}\cdot N_{c;u;d}} + 1{,}1\frac{M_{y;equ;s;d}}{\omega_{kip}\cdot M_{y;u;d}} \leqslant 1$$

b Op druk en buiging om de *zwakste* as belaste staaf in een raamwerk dat in één of twee richtingen ongeschoord is:

$$1{,}1\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc}\cdot N_{c;u;d}} + 1{,}1\frac{M_{z;equ;s;d}}{M_{z;u;d}} \leqslant 1$$

$$1{,}1\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{z;buc}\cdot N_{c;u;d}} + 1{,}1\frac{M_{z;equ;s;d}}{M_{z;u;d}} \leqslant 1$$

Rekenwaarde equivalente buigend moment om de y-as, $M_{y;equ;s;d}$, is de grootste waarde van:

$$|M_{y;mid;s:d}| \text{ en } |0{,}85M_{y;B;s;d}|$$

Zie ook opmerkingen over toetsingsregels voor kolommen in star geschoorde kolommen.

Grensknikkracht buisprofielen

– *Vierkante* buisprofielen: zie tabel 5.15 (*warmgewalst*) en tabel 5.16 (*koudgewalst*).
– *Ronde* buisprofielen (warmgewalst): zie tabel 5.17.

*Tabel 5.15 Grensknikkracht **warm**gewalste **vierkante** buisprofielen, staalkwaliteit S235J*

afmeting	massa [kg/m^1]	$F_{t;u;d}$ [kN]	maximale drukracht $N_{c;s;d}$ [kN]											
			kniklengte [m]											
			2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9
40 × 40 × 2,9	3,32	99	41	28	20	15	12	9						
4	4,41	132	52	35	25	19	15	12						
50 × 50 × 2,9	4,23	127	75	54	39	30	23	19						
4	5,67	170	97	69	50	38	30	24						
60 × 60 × 2,9	5,14	154	112	87	67	51	40	33						
4	6,92	207	147	114	87	67	52	42						
5	8,48	254	178	136	103	79	62	50						
70 × 70 × 3,2	6,64	199	160	135	109	86	69	56	46	39	33			
4	8,16	244	196	164	131	104	83	67	56	47	40			
5	10,05	301	239	199	158	125	99	81	66	56	47			
80 × 80 × 3,6	8,56	256	219	195	166	136	111	91	76	64	54			
4,5	10,52	315	268	238	201	165	134	110	92	77	66			
5,6	12,87	385	326	288	242	197	160	131	109	91	78			
90 × 90 × 3,6	9,66	289	257	237	211	181	151	126	106	90	77			
4,5	11,93	357	316	291	258	220	184	153	129	109	93			
5,6	14,60	437	386	354	312	266	221	184	154	131	112			
100 × 100 × 4	11,93	357	325	306	281	249	216	184	156	133	115	87	68	54
5	14,76	442	401	377	345	305	263	224	190	162	139	106	82	66
6,3	18,29	548	496	465	424	374	321	272	231	196	169	128	100	80
120 × 120 × 4,5	16,09	482	452	435	413	385	352	314	276	242	211	163	129	104
5,6	19,70	590	553	531	504	469	427	380	334	291	254	196	154	124
6,3	21,98	658	616	591	560	521	473	421	369	322	281	216	170	137

Tabel 5.15 (vervolg)

afmeting	massa [kg/m^1]	$F_{t;u;d}$ [kN]	maximale drukracht $N_{c;s;d}$ [kN]											
			kniklengte [m]											
			2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9
140 × 140 × 5,6	23,24	696	665	646	623	596	562	521	476	429	383	304	243	197
7,1	29,05	870	830	806	777	741	697	645	587	527	470	372	297	241
8,8	35,33	1058	1008	978	941	897	842	777	705	631	561	443	353	286
160 × 160 × 6,3	29,59	886	857	838	815	789	758	720	676	626	574	472	385	316
8	36,90	1105	1067	1043	1014	980	940	892	835	772	705	577	470	385
10	45,06	1349	1302	1271	1235	1192	1141	1079	1008	928	845	688	558	457
180 × 180 × 6,3	33,60	1006	983	964	944	920	894	862	825	782	734	629	528	441
8	41,92	1255	1225	1202	1176	1146	1112	1071	1024	969	907	774	648	540
10	51,34	1537	1499	1469	1437	1399	1356	1305	1244	1175	1097	932	777	646
200 × 200 × 6,3	37,52	1123	1106	1088	1068	1047	1023	996	964	927	885	788	682	582
8	46,94	1405	1382	1360	1335	1308	1277	1242	1201	1155	1101	976	842	717
10	57,62	1725	1695	1667	1636	1602	1564	1520	1468	1409	1341	1185	1019	865
220 × 220 × 6,3	41,45	1241	1228	1211	1192	1172	1150	1126	1098	1066	1030	944	842	736
8	51,97	1556	1539	1517	1494	1468	1440	1409	1373	1332	1286	1175	1046	912
10	63,90	1913	1891	1864	1835	1803	1767	1728	1683	1631	1573	1433	1270	1104
260 × 260 × 7,1	55,34	1657	1654	1635	1616	1595	1573	1549	1522	1494	1461	1386	1292	1182
8,8	67,82	2030	2026	2003	1978	1953	1925	1895	1863	1826	1786	1691	1574	1436
11	83,21	2491	2485	2456	2425	2393	2359	2322	2281	2236	2185	2065	1918	1746
280 × 280 × 8	67,04	2007	2010	1988	1966	1943	1919	1893	1865	1834	1800	1722	1626	1510
10	82,43	2468	2471	2445	2417	2389	2359	2327	2293	2255	2214	2117	1999	1857
12,5	102,05	3055	3057	3024	2989	2953	2915	2874	2830	2782	2729	2604	2450	2267

*Tabel 5.16 Grensknikkracht **koud**gewalste **vierkante** buisprofielen, staalkwaliteit S235J*

afmeting	massa [kg/m^1]	$F_{t;u;d}$ [kN]	maximale drukracht $N_{c;s;d}$ [kN]											
			kniklengte [m]											
			2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9
40 × 40 × 3,2	3,49	105	38	26	19	14	11	9						
4	4,20	126	44	30	22	16	13	10						
50 × 50 × 3,2	4,50	135	70	51	38	29	23	18						
4	5,46	163	83	60	44	34	27	21						
5	6,39	191	91	65	48	37	29	23						
60 × 60 × 3,2	5,50	165	106	83	64	50	39	32						
4	6,71	201	127	99	76	59	47	38						
5	7,93	237	145	111	84	65	52	42						
70 × 70 × 3,2	6,51	195	142	118	95	76	61	50	42	35	30			
4	7,93	237	172	142	114	91	73	60	50	42	36			
5	9,50	284	202	165	131	104	84	68	57	48	41			
80 × 80 × 3,2	7,51	225	178	155	130	108	89	74	62	52	45			
4	9,26	277	218	189	158	130	107	89	75	63	54			
5	11,07	331	258	222	184	151	124	102	86	72	62			
6,3	13,50	404	311	266	220	179	146	121	101	85	73			
90 × 90 × 3,2	8,56	256	214	192	168	144	121	102	86	74	64			
4	10,52	315	262	235	205	174	147	123	104	89	77			
5	12,64	378	312	179	241	204	171	144	121	103	89			
6,3	15,46	463	379	337	290	244	204	171	144	123	105			
100 × 100 × 4	11,78	353	304	179	251	220	190	163	139	120	104	80	63	51
5	14,21	425	365	334	299	261	224	191	163	141	122	93	73	59
6,3	17,51	524	447	408	363	316	270	230	197	169	146	112	88	71
120 × 120 × 4	14,29	428	387	365	340	312	282	251	221	195	171	134	107	87
5	17,35	519	468	441	410	375	337	299	264	231	203	159	126	103
6,3	21,43	642	577	543	504	459	412	364	320	281	246	192	153	124
8,0	26,38	790	707	664	614	557	497	438	384	335	294	229	182	147

Tabel 5.16 (vervolg)

afmeting	massa [kg/m^1]	$F_{tau;d}$ [kN]	maximale drukracht $N_{c;s;d}$ [kN]											
			kniklengte [m]											
			2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9
140 × 140 × 4	16,80	503	469	449	426	401	373	343	312	281	252	203	164	135
5	20,49	613	570	546	518	487	452	414	376	338	303	243	197	161
6,3	25,36	759	704	673	638	599	554	507	459	412	369	295	239	195
8	31,40	940	870	830	786	735	679	619	558	500	447	356	287	235
10	37,44	1121	1032	983	927	863	793	719	645	575	512	406	326	267
150 × 150 × 5	22,06	660	621	597	571	541	508	472	434	395	358	292	238	197
6,3	27,40	820	770	740	706	669	627	581	533	485	438	356	290	239
8	33,91	1015	951	913	870	822	769	711	650	590	532	431	350	288
10	40,58	1215	1133	1086	1032	972	905	833	758	685	615	495	402	330
160 × 160 × 4	19,31	578	550	531	510	487	462	434	404	373	342	284	235	195
5	23,63	707	672	648	622	594	563	528	491	452	414	343	283	235
6,3	29,36	879	833	804	771	736	696	652	605	557	509	420	346	287
8	36,42	1090	1032	994	953	908	857	801	742	681	621	511	420	348
10	43,72	1309	1234	1188	1137	1079	1016	946	872	797	724	592	485	401
180 × 180 × 6,3	33,28	996	960	931	901	867	831	791	748	701	653	557	470	396
8	41,45	1241	1193	1157	1118	1076	1030	979	924	865	804	684	575	484
10	50,00	1497	1436	1391	1343	1290	1232	1168	1099	1026	950	803	673	564
200 × 200 × 6,3	37,29	1116	1088	1060	1031	999	965	929	888	845	799	702	607	521
8	46,47	1391	1354	1319	1282	1242	1199	1152	1100	1045	987	865	745	638
10	56,28	1685	1637	1593	1547	1497	1444	1385	1321	1252	1179	1028	882	753
250 × 250 × 6,3	47,18	1412	1405	1377	1350	1321	1290	1258	1224	1188	1149	1063	969	871
8	59,03	1767	1756	1722	1687	1650	1612	1571	1528	1481	1432	1323	1203	1080
10	71,98	2155	2139	2097	2053	2008	1960	1910	1856	1798	1736	1600	1451	1299
300 × 300 × 8	71,59	2143	2158	2124	2089	2054	2017	1980	1940	1899	1855	1759	1653	1537
10	87,92	2632	2649	2606	2563	2520	2474	2427	2378	2327	2272	2153	2020	1876
12,5	107,55	3220	3238	3186	3133	3079	3023	2965	2904	2840	2772	2624	2460	2280

*Tabel 5.17 Grensknikkracht **warm**gewalste **ronde** buisprofielen, staalkwaliteit S235J*

afmeting	massa [kg/m^1]	$F_{t;u;d}$ [kN]	maximale drukracht $N_{c;s;d}$ [kN]												
			kniklengte [m]												
			1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9
42,4 × 2,6	2,55	76	44	28	19										
3,2	3,09	93	52	33	22										
4	3,79	114	62	39	26										
48,3 × 3,2	3,56	106	71	48	33	24	18								
4	4,37	131	86	58	39	28	21								
5	6,34	160	102	68	46	33	25								
60,3 × 3,2	4,51	135	108	85	62	46	35	27	22						
4	5,55	166	132	103	75	56	42	33	26						
5	6,82	204	161	124	90	66	50	39	31						
76,1 × 3,2	5,75	172	152	135	111	87	68	54	44	36	30	26			
4	7,11	213	187	165	135	106	83	66	53	44	37	31			
5	8,79	163	231	202	165	129	100	80	64	53	44	38			
88,9 × 3,2	6,77	203	185	171	152	127	104	84	69	57	48	41			
4	8,40	251	230	212	187	156	127	103	84	70	59	50			
5	10,36	310	283	260	228	190	154	125	102	84	71	60			
114,3 × 3,6	9,81	294	279	267	252	231	206	178	152	129	110	95	72	56	
5	13,48	403	383	366	344	315	279	240	204	173	148	127	96	75	
6,3	16,78	502	476	455	427	389	343	294	250	212	180	155	117	91	

Tabel 5.17 (vervolg)

afmeting	massa [kg/m^1]	$F_{t;u;d}$ [kN]	maximale drukracht $N_{c;s;d}$ [kN]												
			kniklengte [m]												
			1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9
139,7 × 5	16,61	497	482	467	450	428	401	367	329	291	255	223	173	136	110
6,3	20,72	620	601	582	560	533	497	454	406	358	313	274	212	167	134
8	25,98	778	752	729	701	665	619	564	502	441	385	336	259	204	165
10	31,99	958	925	896	860	814	756	686	609	534	465	405	312	246	198
168,3 × 5	20,14	603	593	579	564	547	526	500	469	434	396	357	287	231	189
6,3	25,20	754	741	724	705	683	656	623	584	539	490	442	354	285	233
8	31,63	947	930	908	884	855	821	779	728	670	608	547	438	352	186
10	39,04	1169	1146	1120	1089	1053	1010	956	892	819	742	666	531	426	347
193,7 × 5	23,24	696	690	677	663	647	629	608	584	554	520	483	406	336	279
6,3	29,12	872	864	848	830	811	788	761	730	692	649	602	505	418	346
8	36,66	1097	1087	1066	1044	1019	990	956	915	867	812	752	628	518	428
10	45,30	1356	1342	1317	1289	1257	1220	1177	1125	1064	994	919	766	630	520
12,5	55,86	1672	1654	1622	1587	1547	1500	1445	1379	1302	1214	1119	928	762	628
16	70,12	2099	2074	2033	1988	1936	1875	1803	1717	1616	1501	1379	1138	930	765

5.9 Stabiliteit platen (plooien)

Zie voor berekening *vlakke rechthoekige platen* op plooi, NEN 6771.

Puntlasten op liggers

Onder bepaalde voorwaarden hoeven lijven van gewalste *I-liggers* of gelaste *plaatliggers* die overeenkomstige hoogte-dikte verhouding hebben, niet te worden verstijfd op de plaats van een geconcentreerde last.

Voorwaarden voor *eindopleggingen*:

$$F_d \leqslant t_w(c+d)\cdot f_{y;d} \quad \text{waarin } c \leqslant d$$

waarin:

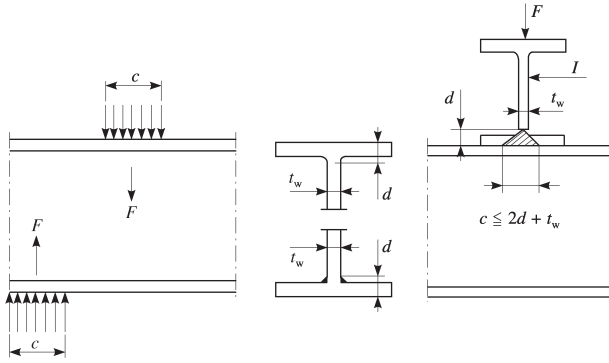
d = afstand buitenzijde van de flens tot het begin van de afrondingsstraal

Voorwaarden in andere gevallen:

$$c \leqslant 3{,}33d \qquad F_d \leqslant t_w(c+5d)\cdot f_{y;d}$$

$$c \leqslant 11{,}67d \qquad F_d \leqslant t_w \cdot c \cdot f_{y;d}$$

$$3{,}33d < c \leqslant 11{,}67d \qquad F_d \leqslant t_w(0{,}4c+7d)\cdot f_{y;d}$$



Figuur 5.6 Puntlasten op liggers

5.10 Stabiliteit op buiging belaste staven (kip)

Zie voor uitgebreide toelichting NEN 6770, art. 12.2

De controle op *kipstabiliteit* hoeft niet te worden uitgevoerd wanneer:
- profielen alleen om de *zwakke* as worden gebogen;
- buisprofielen om de *sterke* as worden gebogen en tevens voldoen aan $h/b < 3$.

De toetsingsregels gelden voor:
- *Dubbelsymmetrische I-vormige doorsneden*, waarbij de belasting niet hoger dan 0,1 maal de hoogte van het profiel boven de bovenflens aangrijpt, en waarvoor tevens geldt:

  òf $h/t_w \leqslant 75$

  òf $\alpha_3 = \dfrac{h \cdot t_f \cdot 10^{12}}{t_w^3 \cdot b \cdot l_g^2} \leqslant 575$
- *Walsprofielen IPE, HEA, HEB en HEM* volgens NEN-EU-19 en NEN-EU-53, waarbij de belasting niet hoger dan 0,1 maal de hoogte van het profiel boven de bovenflens aangrijpt.

Het toetsingsgebied is beperkt tot staven die aan beide zijden zijn begrensd door gaffels of zijn opgelegd met onderflens-inklemmingen, waarbij de verhouding tussen lengte gaffeloplegging en profielhoogte $\geqslant 5$.

Toetsingsregel (kip)
Bij benadering geldt:

$$\frac{M_{y;max;s;d}}{\omega_{kip} \cdot M_{y;u;d}} \leqslant 1$$

waarin (zie ook par. 5.1):
ω_{kip} = kipfactor = knikfactor volgens tabel 5.14 (pag. F3/137) behorende bij de a-kromme voor wals- en buisprofielen en de c-kromme voor gelaste profielen

$$\lambda_{re} = \xi \cdot \sqrt{\frac{l_{max} \cdot h}{b \cdot t_f} \cdot \frac{f_{y;d}}{E_d}}$$

$\zeta = 1{,}32 \cdot \zeta_h$ voor profielen van doorsnedeklassen 1 en 2
$= 1{,}23 \cdot \zeta_h$ voor profielen van doorsnedeklassen 3

Zie ook pag. F3/138.
Voor een meer nauwkeurige en gecompliceerde berekening van ω_{kip}, zie NEN 6771 art. 12.2.2.

Ongesteunde lengte

Staven moeten zijdelings worden gesteund ter plaatse van plastische scharnieren. In het gebied tussen plastische scharnieren en $M_{el;d}$ mag geen grotere *ongesteunde lengte* (l_{cr}) voorkomen dan:

S 235/275J... :

$$l_{cr} = \left(65 - 50\frac{M_{y;st;s;d}}{M_{y;u;d}}\right) i_z$$

$l_{cr} \geqslant 40 i_y$
$l_{cr} \leqslant 65 i_y$

S 355J... :

$$l_{cr} = \left(50 - 40\frac{M_{y;st;s;d}}{M_{y;u;d}}\right) i_z$$

$l_{cr} \geqslant 30 i_y$
$l_{cr} \leqslant 50 i_y$

Onderflens-inklemming

Een *onderflens-inklemming* is gelijk aan een gaffel indien:

$$\frac{R_{s;d}}{\omega_{x;buc} N_{w;u;d}} \leqslant 1$$

waarin (zie ook par. 5.1):
$\omega_{x;buc}$ = knikfactor voor knikstabiliteit liggerlijf om de x-as liggerprofiel volgens knikcurve c (tabel 5.14 pag. F3/137)

Tabel 5.18 Gegevens voor bepaling doorbuiging δ en benodigd axiaal kwadratisch oppervlakte-moment I voor stalen liggers[1)2)]

belastingschema	waarden voor c in				
	$I = \frac{M \cdot l}{c}$			$\delta = \frac{M \cdot l^2}{c \cdot I}$	$\varphi = \frac{M \cdot l}{c \cdot I}$
	$\delta = 8l$	$\delta = 6l$	$\delta = 4l$		
	67,2	50,4	33,6	8,4	6300
	84,0	63,0	42,0	10,5	8400
	50,4	37,8	25,2	6,3	4200
	33,6	25,2	16,8	4,2	2100
	$\delta = 4l$	$\delta = 3l$	$\delta = 2l$		
	80,6	60,5	40,3	20,2	6300
	82,6	62,0	41,3	20,7	c_A =6030
					c_B =6000
	84,0	63,0	42,0	21,0	6720
	101	75,6	50,4	25,2	8400
	67,2	50,4	33,6	16,8	4200
	134	101	47,2	33,6	c_A =12600
					c_B = 6300
	78,9	59,2	39,4	19,7	6300

1) δ = doorbuiging aan de rand van de uitkraging [mm].
φ = hoekverdraaiing aan de rand van de uitkraging [rad].
M = maximaal buigend moment dat bij het getekende belastingschema in de beschouwde belastingtoe-stand optreedt [$N \cdot m$].
2) l in [m], I in [cm^4], $E = 0{,}21 \cdot 10^6$ N/mm^2.

Kipsteunen

Kipsteunen moeten gedimensioneerd worden op:

$$N_{st;s;d} = 0{,}01\, A_f \cdot \sigma_{f;s;d}$$

met $\sigma_{f;s;d} \geqq 0{,}5 f_{y;d}$

De zijdelingse steunen moeten zijn aangebracht op maximaal 1/3 van de profielhoogte van de flens die de grootste zijdelingse verplaatsing zal ondergaan.

Koppeling van dakgordingen

- Doorsnede koppeling: minimaal 100 mm^2.
- Van toepassing is NEN 6770, art. 12.1.4 (starre steun).

Literatuur

Zie de in dit hoofdstuk vermelde normen, met name in par. 1.1.

Bouwfysica F4

1 Algemeen

2 Warmtebeheersing
- 2.1 Algemeen
- 2.2 Warmtetransport
- 2.3 Ventilatie en luchtdoorlatendheid
- 2.4 Energieprestatienormering (EPN)
- 2.5 Warmtecapaciteit; warmte-accumulatie
- 2.6 Contacttemperatuur
- 2.7 Thermische behaaglijkheid

3 Vochtbeheersing
- 3.1 Algemeen
- 3.2 Vochttransport
- 3.3 Berekening hoeveelheid condensaat met methode Glaser
- 3.4 Temperatuur-factor

4 Daglichttoetreding
- 4.1 Algemeen
- 4.2 Berekening daglichttoetreding

5 Geluidbeheersing
- 5.1 Algemeen
- 5.2 A-weging
- 5.3 Luchtgeluidisolatie
- 5.4 Contactgeluidisolatie
- 5.5 Nagalmtijd

6 Brandpreventie
- 6.1 Algemeen
- 6.2 Vuurbelasting
- 6.3 Vlamuitbreiding
- 6.4 Rookproductie van materialen

1 Algemeen

Overheidsvoorschriften

Bouwbesluit en Ministeriële Regelingen noemen prestatie-eisen of verwijzen voor prestatie-eisen en/of bepalingsmethoden naar diverse NEN-normen.

Tabel 1.1 geeft voor bouwfysica de onderwerpen volgens VNG-nummering (Vereniging van Nederlandse Gemeenten, Den Haag).

Tabel 1.1 Bouwfysica-onderwerpen met VNG-nummering

	onderwerpen
1	Veiligheid
1.3	**Brandveiligheid**
1.3.1	Beperking van het ontstaan van een brandgevaarlijke situatie
1.3.2	Beperking van onwikkeling van brand
1.3.3	Beperking van uitbreiding van brand
1.3.4	Beperking van ontstaan van brand
1.3.5	Beperking van verspreiding van rook
1.3.6	Vluchten bij brand
1.3.7	Inrichting van vluchtmogelijkheden
1.3.8	Voorkoming en beperking van ongevallen bij brand
1.3.9	Bestrijding van brand
1.3.10	Brandveiligheid gebouwen hoger dan 70 meter
1.3.11	Samenhang met (andere) brandveiligheidsvoorschriften
2	Gezondheid
2.1	**Bescherming tegen schadelijke of hinderlijke invloeden**
2.1.1	Bescherming tegen geluid van buiten
2.1.2	Bescherming tegen geluid van binnen
2.1.3	Geluidwering tussen ruimten/gebouwen
2.1.4	Beperking van galm
2.1.5	Wering vocht van buiten
2.1.6	Wering vocht van binnen
2.2	**Bescherming tegen schadelijke of hinderlijke stoffen**
2.2.3	Luchtverversing van een verblijfsgebied, verblijfs-, toilet- en badruimte
2.2.4	Luchtverversing van overige ruimten
2.5	**Daglichttoetreding**
2.5.1	Daglicht en uitzicht

Tabel 1.1 (vervolg)

	onderwerpen
3	Bruikbaarheid (geen voorschriften)
4	Energiezuinigheid
4.1	Beperking van warmteverlies
4.1.1	Thermische isolatie
4.1.2	Beperking van luchtdoorlatendheid
4.1.3	Energie Prestatie Coëfficiënt

Aanvullingen en wijzigingen van het Bouwbesluit zijn opgenomen in vijf Ministeriële Regelingen. Wat betreft bouwfysica zijn dit (met laatste jaar van wijziging):

1. Regeling Bouwbesluit nieuwbouw.
2. Regeling Bouwbesluit bestaande bouw.
3. Regeling Bouwbesluit materialen.

De '*VNG-Handleiding Bouwbesluit*' geeft een praktisch bruikbare voorschriften-matrix, met verwijzing naar alle relevante artikelen uit het Bouwbesluit, de Ministeriële Regelingen en de van toepassing zijnde NEN-normen. In deze matrix wordt voor de genoemde bouwfysica-onderwerpen naar de betreffende artikelen en NEN-normen verwezen. Tevens is een zoekmodel op diskette/CD-rom beschikbaar.

2 Warmtebeheersing

2.1 Algemeen

Symbolen

R_c = warmteweerstand[1] van de constructie [m^2·K/W]
T_i = binnentemperatuur [°C]
T_e = buitentemperatuur [°C]
GR = graaduren [K·h]
ρ = soortelijke massa [kg/m^3]
c = soortelijke warmte [J/(kg·K)]
d = dikte [m]
U = warmtedoorgangscoëfficiënt[2] [W/(m^2·K)]
q = warmtestroomdichtheid [W/m^2]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m·K)]

Normen[3]

NEN 1068. Thermische isolatie van gebouwen.
NEN 1087. Ventilatie van woongebouwen.
NPR 1088. Ventilatie van woningen en woongebouwen. Aanwijzingen voor en voorbeelden van de uitvoering van ventilatievoorzieningen.
NEN 1089. Ventilatie van schoolgebouwen.
NEN 2057. Daglichtopeningen in gebouwen.
NEN 2444. Bepaling van de warmteweerstand en/of warmtegeleidingscoëfficiënt van bouw- en isolatiematerialen.
NEN 2580. Oppervlakten en inhouden van gebouwen. Termen, definities en bepalingsmethoden.
NEN 2686. Luchtdoorlatendheid van gebouwen. Meetmethode.

[1] *Warmteweerstand*. De definitie van deze grootheid wijkt hier af van de in het hoofdstuk Natuurkunde gebruikte standaard (ISO-norm). Bij natuurkunde is de warmteweerstand betrokken op de *warmtestroom* [W], in de bouwfysica op de *warmtestroomdichtheid* [W/m^2].

[2] *Warmtedoorgangscoëfficiënt* (ook: *transmissiegetal, k-waarde*). Het symbool voor deze grootheid wijkt af van die in het hoofdstuk *Natuurkunde*. Bij natuurkunde is het symbool *K* toegepast, in de bouwfysica is gebruikelijk *U* (men spreekt dan ook van *U-waarde*).

[3] In de in dit hoofdstuk genoemde normen is *uitgebreide* informatie opgenomen. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* te Delft.

NEN 2687. Luchtdoorlatendheid van gebouwen. Eisen.
NEN 2690 (ontwerp). Luchtdoorlatendheid van gebouwen. Methode voor specifieke luchtvolumestroom tussen kruipruimte en woning.
NEN 2778. Vochtwering in gebouwen.
NPR 2877. Beproevingsmethode voor de waterdichtheid van scheidingsconstructies.
NEN 2916. Energieprestatie van utiliteitsgebouwen. Bepalingsmethode.
NPR 2917/1. Energieprestatie van utiliteitsgebouwen. Rekenprogramma EPU met handleiding.
NPR 2917/2. Energieprestatie van utiliteitsgebouwen. Rekenvoorbeelden.
NEN 3660. Luchtdoorlatendheid, stijfheid en sterkte. Beproevingsmethoden.
NEN 3661. Luchtdoorlatendheid, waterdichtheid, stijfheid en sterkte. Eisen (wordt herzien, ontwerpversie oktober 1995).
NPR 5068. Thermische isolatie van gebouwen. Achtergrondinformatie, toelichtingen, rekenwaarden en rekenvoorbeelden, afgestemd op NEN 1068.
NEN 5128. Energieprestatie van woningen en woongebouwen. Bepalingsmethode.
NPR 5129/1. Energieprestatie van woningen en woongebouwen. Rekenprogramma EPW met handleiding.
NPR 5129/2. Energieprestatie van woningen en woongebouwen. Rekenvoorbeelden.
NEN 7730. Gematigde thermische binnencondities. Bepaling van de PMV- en de PPD-waarde en specificatie van de voorwaarden voor thermische behaaglijkheid.

SBR-publicaties[1)]

nr. 12 Meetmethoden ter bepaling van warmteweerstand, vochtgehalte en vochtverdeling.
nr. 42 Zonwering bij gebouwen.
nr. 58 Vulling van spouwmuren.
nr. 61 Bouwconstructies gezien door een thermo-hygrische bril
nr. 74 Zon en ramen.
nr. 75 Zoninstraling en binnenklimaat.
nr. 85 Ventilatie en energieverlies van woningen.
nr. 96 Energiebesparing/zonne-energie.
nr. 97 Energieverbruik en -besparing in kantoorgebouwen.
nr. 100 Warmte-isolatie en ventilatie van muren en daken.
nr. 118 Een kruipruimte thermisch doorgemeten.
nr. 121 Thermische kwaliteit van woningen; meetmethoden.
nr. 131 Warmteverlies van kelders.
B2–21 Koude-bruggen.

Definities en symbolen

Warmtestroomdichtheid q: de warmtestroom per m^2 [W/m^2].
Warmtegeleidingscoëfficiënt λ: een materiaaleigenschap, die aangeeft hoeveel warmte in W door 1 m^2 van een materiaal zal gaan bij een dikte van 1 m en een temperatuurverschil tussen beide grensvlakken van 1 graad Kelvin [W/(m·K)].
Warmtedoorgangscoëfficiënt U: de hoeveelheid warmte, die onder stationaire condities per seconde, per m^2 en per graad temperatuurverschil tussen de ene en de andere zijde door een constructie wordt doorgelaten [$W/(m^2K)$]. Zie ook noot 2, pag. F4/4.

[1)] *SBR*: Kruisplein 25, 3014 DB Rotterdam.

2.2 Warmtetransport

Algemeen

$$q = q_{\text{geleiding}} + q_{\text{straling}} + q_{\text{convectie}} \ [\text{W/m}^2]$$

Convectie: warmteoverdracht via een stromend medium (bij voorbeeld lucht).
Straling: warmteoverdracht in de vorm van elektromagnetische golven van 4 tot 50 μm.
Geleiding: warmteoverdracht in een materiaal van molecuul op molecuul (in de vaste materie).

Berekening warmtestroomdichtheid

Stationaire situatie:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_c} \ [\text{W/m}^2]$$

waarin:
T_1 = oppervlaktetemperatuur warme zijde constructie
T_2 = oppervlaktetemperatuur koude zijde constructie

Berekening warmteweerstand – onderscheid scheidingsconstructies

De volgende *scheidingsconstruties* worden onderscheiden:
- Raam of deur.
- Geen raam of deur, bestaande uit slechts één sectie.
- Geen raam of deur, bestaande uit meer dan één sectie.

Opmerking. Wanneer de scheidingsconstructie op alle plaatsen dezelfde doorsnede heeft, bestaat deze uit slechts één sectie.

Warmteweerstand scheidingsconstructie–één sectie

Voor de *warmteweerstand* van een uit *één sectie* bestaande constructie geldt (zie ook tabel 2.1):

$$R_c = \sum R_m \qquad [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}]$$

waarin:
R_m = warmteweerstand iedere laag in de constructie

De warmteweerstand R_m is als volgt te berekenen (zie ook tabel 2.2):

$$R_m = \frac{d}{\lambda} \qquad [m^2 \cdot K/W]$$

waarin:
d = dikte materiaallaag [m]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m·K)]

Tabel 2.1 Warmteweerstand R_c ramen en deuren [m^2·K/W]

constructie	R_c
ramen of glasdeuren met enkele beglazing	0,01
ramen of glasdeuren met dubbele beglazing:	
– kozijn + omramingsmateriaal geen hogere λ-waarde dan 0,3 W/(m·K)	0,16
– kozijn + omraming geen van binnen naar buiten doorlopende materialen met λ-waarde hoger dan 0,3 W/(m·K) (thermisch onderbroken profielen)	0,13
– overige gevallen	0,11
deuren zonder lichtdoorlatende delen	0,11

Tabel 2.2 Warmteweerstand R_m constructielagen [m^2·K/W]

constructie	R_m
afdek-of afwerklagen zoals; – een gesloten verlaagd plafond, exclusief de luchtlaag – een flexibele dakbedekking al dan niet voorzien van een grindverzwaring – een dakbedekking van pannen inclusief de luchtlaag tussen pannen en dakbeschot	0,04
niet of zwak geventileerde luchtlaag met een dikte:	
– van ten minste 10 mm	0,17
– kleiner dan 10 mm	0

Warmteweerstand scheidingsconstructie – meer dan één sectie (zonder koudebrug)

Voor de *warmteweerstand* van een constructie bestaande uit *meer dan één sectie* (zonder koudebrug) geldt:

$$R_c = R' - R_o \qquad [m^2 \cdot K/W]$$

waarin:
R' = hulpgrootheid [m^2·K/W]
R_o = grootheid waarin warmteovergangsweerstanden zijn verrekend [m^2·K/W]

De hulpgrootheid R' kan als volgt worden bepaald:

$$R' = \frac{A_{pr}}{A_a/((\Sigma R_m)_a + R_o) + A_b((\Sigma R_m)_b + R_o) + \cdots}$$

waarin:
A_{pr} = geprojecteerde oppervlakte scheidingsconstructie [m^2]
A_a, A_b,... = geprojecteerde oppervlakten secties a, b,... [m^2]
$(\Sigma R_m)_a, (\Sigma R_m)_b, \ldots$ = warmteweerstanden van de secties a, b [m^2. K/W]
R_o = grootheid waarin warmteovergangsweerstanden zijn verrekend (zie ook tabel 2.3) [m^2·K/W]

Tabel 2.3 Waarden voor R_o [m^2·K/W]

constructie	R_o
daken en buitenwanden; vloeren boven buitenlucht	0,17
niet aan buitenlucht grenzende wanden	0,26
vloeren boven kruipruimten of direct op ondergrond	0,26
niet aan buitenlucht grenzende vloeren (warmtestroom naar boven)	0,20
niet aan buitenlucht, kruipruimte of ondergrond grenzende vloeren (warmtestroom naar beneden)	0,40

Warmtedoorgangscoëfficiënt afzonderlijke scheidingsconstructies

Voor de *warmtedoorgangscoëfficiënt* van een afzonderlijke constructie geldt (zie ook tabel 2.4):

$$U_i = \frac{1}{R_{c;i} + R_{o;i}} \qquad [W/(m^2 \cdot K)]$$

waarin:
$R_{c;i}$ = warmteweerstand constructie [m^2·K/W]
$R_{o;i}$ = grootheid waarin de warmteovergangsweerstanden zijn verrekend [m^2·K/W]

Gemiddelde warmtedoorgangscoëfficiënt van alle scheidingsconstructies

Voor de *gemiddelde warmtedoorgangscoëffiënt* van alle constructies geldt:

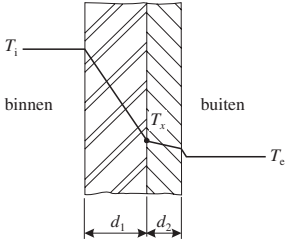
$$\overline{U} = \frac{a_1 \cdot A_1 \cdot U_1 + a_2 \cdot A_2 \cdot U_2 + \ldots}{A} \qquad [\mathrm{W}/(\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K})]$$

waarin:
$U_{1,2,\ldots}$ = warmtedoorgangscoëfficiënten afzonderlijke constructies [W/(m^2·K)]
$A_{1,2\ \ldots}$ = geprojecteerde oppervlakten [m^2]
A = som geprojecteerde oppervlakten $A_{1,2,\ldots}$ [m^2]
$a_{1,1,\ldots}$ = aan de afzonderlijke constructies toe te kennen weegfactoren (zie tabel 2.4)

Tabel 2.4 Weegfactor a bij de bepaling van de gemiddelde warmtedoorgangscoëfficiënt U

constructie die gebouw (gedeelte) afscheidt van	a
buitenlucht	1
niet-verwarmde:	
– met buitenlucht te ventileren ruimte met een ventilatiecapaciteit van ten minste 0,003 m^3/s per m^2 netto-oppervlakte (zoals garages)	1
– overige ruimten	$\frac{2}{U+2}$
waarin: U = warmtedoorgangscoëfficiënt scheidingsconstructie [$W/(m^2 \cdot K)$]	
ondergrond of kruipruimte	$\frac{1}{U+1}$
waarin: U = warmtedoorgangscoëfficiënt scheidingsconstructie [$W/(m^2 \cdot K)$]	
verwarmde, besloten ruimte die geen deel uitmaakt van een verblijfsgebied of van een toilet- of badruimte	$\frac{\overline{T}_i - \overline{T}_i'}{15}$
waarin: $\overline{T}_i$ = over het stookseizoen gemiddelde binnentemperatuur in gebouw (gedeelte)[K] $\overline{T}_i'$ = over het stookseizoen gemiddelde binnentemperatuur in aangrenzende ruimte [K]	
er wordt geen lagere waarde in rekening wordt gebracht dan $a = 0{,}20$	

Berekening temperatuur in een constructie



Figuur 2.1
Temperatuurverloop in een constructie

Laag 1: dikte d_1 [m], warmtegeleidingscoëfficiënt λ_1 [W/(m·K)]
Laag 2: dikte d_2 [m], warmtegeleidingscoëfficiënt λ_2[W/(m·K)]

$$q = \frac{T_i - T_e}{R_1} = \frac{T_i - T_x}{R_i + (d_1/\lambda_1)} \qquad [W/m^2]$$

$$T_x = T_i - \frac{R_i + (d_1/\lambda_1)}{R_1}(T_i - T_e)$$

waarin:

$$R_1 = R_i + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + R_e \quad [m^2 \cdot K/W]$$

$$R_i = \frac{1}{\alpha_i}; \quad R_e = \frac{1}{\alpha_e}$$

2.3 Ventilatie en luchtdoorlatendheid

Ventilatie
De ventilatiecapaciteit van woningen is minimal 0,9 dm^3/s per m^2. Voor de totale woning is de ventilatiecapaciteit minimaal 7 dm^3/s.

Zie voor volumestroom q_v [$dm^3/(s \cdot m^2$] van verblijfsruimten en verblijfsgebieden tabel Va en Vb bij art. 201 van het Bouwbesluit. Voor overige gebouwen is de volumestroom bijvoorbeeld afhankelijk van:
- bezettingsgraad (5 klassen: B1 t/m B5)
- gebouwfunctie (indeling als bij Bouwbesluit)
  - bijeenkomstgebouw;
  - cellengebouw;
  - gezondheidszorggebouw;
  - onderwijsgebouw;
  - sportgebouw;
  - winkelgebouw;
  - horecagebouw;

  en:
  - kantoorgebouw;
  - logiesgebouw.

Luchtdoorlatendheid (infiltratie)
De *luchtdoorlatendheid* wordt uitgedrukt in de q_{v10} -waarde. Dit is de luchtvolumestroom door de gebouwomhulling bij een drukverschil over de omhulling van 10 Pa. De q_{v10}-waarde is maximaal 200 dm^3/s voor woningen en voor utiliteitsbouw per 500 m^3 gebouwinhoud (NEN 2686 en NEN 2687).

Luchtdoorlatendheid begane vloer (NEN 2690)
Voor woningen bedraagt de luchtvolumestroom maximaal 0,02 dm^3/s per m^2 oppervlak in verband met een gezond binnenmilieu.

Luchtdoorlatendheid gevelvulling (NEN 3660 en NEN 3661)
Deze dienen tenminste te voldoen aan de eisen, die worden gesteld in NEN 3661 Gevelvullingen; Luchtdoorlatendheid, waterdichtheid, stijfheid en sterkte; Eisen.

De luchtdoorlatendheid moet van dien aard zijn, dat er niet meer lucht dan 9 $m^3/(m \cdot h)$ door de kieren mag worden doorgelaten. Naden mogen onder dezelfde druk niet meer dan 0,5 $m^3/(m \cdot h)$ doorlaten.

2.4 Energieprestatienormering (EPN)

De *energieprestatienormering* dient voor terugdringen van het energiegebruik en reductie van de CO_2-uitstoot. De energieprestatie van een gebouw is o.m. afhankelijk van:
- het gebouw en de gebouwgebonden installaties;
- de verwarming, koeling, ventilatie, bevochtiging, warmtapwater, pompen, ventilatoren en verlichting (voor zover van toepasing);
- de vorm en grootte van het gebouw;
- de gebouwfunctie.

Energieprestatie-coëfficiënt

De genormaliseerde berekeningsmethode voor de *energieprestatie-coëfficiënt* (EP) van woningen is de NEN 5128, NPR 5129/1, NPR 5129/2 en voor overige gebouwen (w.o. utiliteitsgebouwen) de NEN 2916, NPR 2917/1, NPR 2917/2. Voor utiliteitsbouw wordt de EP gecorrigeerd voor wel/geen toepassing van koeling en voor minimale ventilatiebehoefte per gebouwfunctie.

Voor woningen:

$$\mathrm{EP} = \frac{\text{totaal energiegebruik}}{\text{genormeerd energiegebruik}} = \frac{Q_{\mathrm{pr,\ tot}}}{330 \cdot A_{\mathrm{verw}} + 65 \cdot A_{\mathrm{verl}}}$$

waarin:

EP = energieprestatie-coëfficiënt [-]
$Q_{\mathrm{pr,\ tot}}$ = totale energiegebruik van gebouw [J]
A_{verw} = verwarmd gebruiksoppervlakte van gebouw [m^2]
A_{verl} = verliesoppervlakte van gebouw [m^2]

Voor utiliteitsbouw bestaat een soortgelijke definitie. De definitie van het genormeerde energiegebruik is dan echter minder een-voudig

(diverse correctie- en weegfactoren) en daarom hier niet weergegeven. De EP heeft geen directe relatie met het energiegebruik, de $Q_{pr,\ tot}$ wel.
Tabel 2.6 geeft de energieprestatie-coëfficiënten volgens het Bouwbesluit.

Tabel 2.6 Energieprestatie-coëfficiënten

bestemming en aard van het gebouw	EP-eis, ten hoogste
woning of woongebouw	1,0
kantoorgebouw	1,6
onderwijsgebouw	1,5
logiesgebouw	2,1
cellengebouw	2,3
gezondheidszorggebouw	
– klinisch (beddenhuizen)	4,7
– niet klinisch	2,0
horecagebouw	2,2
winkelgebouw	3,6
bijeenkomstgebouw	3,4
sportgebouw	2,2
industriegebouw	geen eis
stationsgebouw	geen eis

Thermische isolatie

De thermische isolatie R_c van gesloten delen van gevels, daken, beganegrondvloeren en vloeren boven buitenlucht is minimaal 2,5 $m^2 \cdot K/W$, volgens NEN 1068.

Luchtdoorlatendheid

Voor de luchtvolumestroom bij een drukverschil van 10 Pa (q_{v10}) geldt volgens NEN 2686 voor een woning en een utiliteitsgebouw het volgende:

Woning als totaal: $q_{v10} \leqslant 0{,}2\ m^3/s$

Richtwaarden bij EPN-berekeningen:
– Als ongeveer gelijkwaardig rekenwaarde kan worden aangehouden: $q_{v10} = 2{,}5\ dm^3/s$ per m^2 gebruiksoppervlakte;

- Uitgaande van de tegenwoordige kwaliteit van kierdichtingen kan worden uitgegaan van een lagere waarde: $q_{v10} = 1{,}43$ dm^3/s per m^2 (normale, enkele kierdichting);
- In geval van gebalanceerde ventilatie en de dan benodigde verbeterde kierdichting kan worden uitgegaan van: $q_{v10} = 0{,}625$ dm^3/s per m^2 (dubbele kierdichting).

Utiliteitsgebouw: $q_{v10} \leqslant 0{,}2$ m^3/s (per 500 m^3 gebouwinhoud)

Richtwaarden bij EPN-berekeningen:
- Als ongeveer gelijkwaardige rekenwaarde kan worden aangehouden: $q_{v10} = 1{,}6$ dm^3/s per m^2 gebruiksoppervlakte;
- Uitgaande van de tegenwoordige kwaliteit van kierdichtingen kan worden uitgegaan van $q_{v10} = 0{,}5$ dm^3/s per m^2 (normale, enkele kierdichting).
- In geval van volledige mechanische ventilatie en de dan benodigde verbeterde kierdichting kan worden uitgegaan van: $q_{v10} = 0{,}25$ dm^3/s per m^2 (dubbele kierdichting);

2.5 *Warmtecapaciteit; warmte-accumulatie*

Warmtecapaciteit *W* van een materiaal
De *warmtecapaciteit* van een materiaal is de hoeveelheid warmte die nodig is om 1 m^3 materie 1 Kelvin in temperatuur te doen stijgen.

$$W = \rho \cdot c \qquad [\mathrm{J}/(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{K})]$$

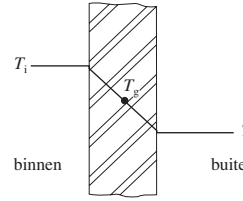
Geaccumuleerde warmte in een homogene constructie in stationaire toestand

Wanneer een ruimte wordt opgewarmd van temperatuur T_e tot temperatuur T_i, zal door de scheidingsconstructie per m^2 oppervlak na het bereiken van de stationaire toestand de volgende hoeveelheid warmte Q zijn opgenomen:

$$Q = \rho \cdot d \cdot c \cdot (T_g - T_e) \quad [J/m^2]$$

waarin:

T_g = de gemiddelde temperatuur van de scheidingsconstructie (voor berekening zie *Homogene constructie* par. 2.2.



Figuur 2.2 Homogene constructie

De tijd τ, nodig om de hoeveelheid warmte Q te leveren voor het opwarmen van de constructie is:

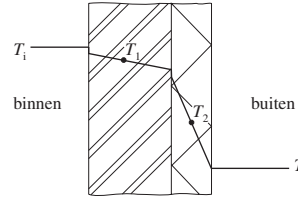
$$\tau = \rho \cdot c \cdot d \cdot (\tfrac{1}{2} R_c + R_e) \quad [s]$$

R_c = warmteweerstand van de homogene constructie $[m^2 \cdot K/W]$

Geaccumuleerde warmte bij meerdere lagen in stationaire situatie

In stationaire toestand is de door de scheidingswand per m^2 oppervlak opgenomen hoeveelheid warmte Q bij verwarming binnen van T_e tot T_i:

$$Q = \rho_1 \cdot d_1 \cdot c_1 \cdot (T_1 - T_e) + \rho_2 \cdot d_2 \cdot c_2 \cdot (T_2 - T_e) \quad [J/m^2]$$



Figuur 2.3 Meerdere lagen

waarin:

$\rho_{1,2}$ = soortelijke massa van materiaal 1,2 $[kg/m^3]$
$c_{1,2}$ = soortelijke warmte van materiaal 1,2 $[J/(kg \cdot K)]$
$d_{1,2}$ = dikte materiaal 1,2 [m]
$T_{1,2}$ = gemiddelde temperatuur van laag 1,2 [K]

De tijd τ, nodig voor het opwarmen van de constructie:

$$\tau = \frac{Q \cdot R_1}{(T_i - T_e)} \quad [s]$$

Temperatuurvereffeningscoëffiënt *a*
De *temperatuurvereffeningscoëfficiënt a* van een materiaal geeft aan hoe snel een warmtegolf door dat materiaal wordt verspreid.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [m^2/s]$$

2.6 Contacttemperatuur

Wanneer twee materialen met elkaar in volledig contact worden gebracht, stelt zich in het contactvlak de zgn. *contacttemperatuur* T_k in.

$$T_k = \frac{b_1 \cdot T_1 + b_2 \cdot T_2}{b_1 + b_2} \quad [°C]$$

waarin:
b = warmtepenetratiegetal van een materiaal

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [J/(m^2 \cdot K \cdot s^{1/2})]$$

T = temperatuur van een materiaal [°C]

2.7 Thermische behaaglijkheid

De thermo-fysiologische balans wordt bepaald door:
- luchttemperatuur [K]
- stralingstemperatuur [K] en stralingsasymmetrie
- relatieve luchtvochtigheid [%]
- luchtsnelheid [m/s], turbulentiegraad en turbulentie-intensiteit
- metabolisme [W]
- kledingweerstand [clo]

Beoordelingsgrootheden volgens Fanger en NEN 7730:
PMV = Predicted Mean Vote (behaaglijkheidsindex)
PPD = Predicted Percentage of Dissatisfied

De subjectieve ervaring van behaaglijkheid door mensen wordt weergegeven door de PMV en PPD (zie hoofdstuk G1 *Klimaatregeling en leidingsystemen*, par. 3.4).

3 Vochtbeheersing

3.1 Algemeen

Symbolen

p = dampspanning [N/m^2]
p_s = maximale dampspanning [N/m^2]
c = waterdampconcentratie [kg/m^3]
c_s = maximale waterdampconcentratie [kg/m^3]
φ = relatieve vochtigheid
g = waterdampstroomdichtheid [kg/(m^2·s)]
Z = diffusieweerstand [m/s] van een materiaallaag; betrokken op dampspanning
Z' = diffusieweerstand van een materiaallaag [s/m], betrokken op concentratie
μ = diffusieweerstandsgetal
δ = waterdampgeleidingscoëfficiënt [s], betrokken op dampspanning
δ_l = waterdampgeleidingscoëfficiënt van lucht [s]
Z_e = overgangsweerstand aan de buitenzijde van de constructie [m/s], afhankelijk van de luchtsnelheid
luchtsnelheid ca. 4 m/s: $Z_e = 7{,}7 \cdot 10^6$ m/s
Z_i = overgangsweerstand aan de binnenzijde van de constructie (ca. $45{,}5 \cdot 10^6$ m/s)
p_i = dampspanning binnen [N/m^2]
p_e = dampspanning buiten [N/m^2]

Normen

NEN 2652. Vochtwering in gebouwen. Wering vocht van buiten, wering vocht van binnen, voorbeelden van bouwkundige details.

NEN 2778. Vochtwering in gebouwen. Bepalingsmethoden.
NEN 2878. Uitwendige scheidingsconstructies van gebouwen, vereenvoudigde berekeningsmethode voor de binnenoppervlaktetemperatuurfactor.

SBR-publicaties

nr. 12 Meetmethoden ter bepaling van warmteweerstand, vochtgehalte en vochtverdeling.
nr. 33 Het vochtgedrag in niet-geventileerde daken van cellenbeton.
nr. 61 Bouwconstructies gezien door een thermo-hygrische bril.
nr.100 Warmte-isolate van muren en daken.
nr.200 Bouwtechnische details voor de energiezuinige woningbouw

Definities en symbolen

Dampspanning p: de druk, die de waterdamp in een waterdamp-lucht-mengsel uitoefent op zijn omgeving [N/m^2].
Waterdampconcentratie c: de massa waterdamp per volume-eenheid lucht [kg/m^3].
Dauwpunt: de temperatuur tot welke de lucht moet worden gekoeld om de verzadigingsdruk juist te bereiken
Absolute vochtigheid: het vochtgehalte van de lucht [kg/m^3 of N/m^2].
Maximale dampspanning p_s: dampspanning, waarbij verzadiging optreedt.
Relatieve vochtigheid φ: de verhouding van de aanwezige dampspanning (of waterdampconcentratie) van de lucht met een bepaalde temperatuur en de maximaal mogelijke dampspanning (of waterdampconcentratie) bij die temperatuur.

$$\varphi = \frac{p}{p_s} = \frac{c}{c_s} \quad \left(\text{in procenten: } \frac{p}{p_s} \cdot 100\% = \frac{c}{c_s} \cdot 100\%\right)$$

Condensatie: het overgaan van waterdamp in water.
Oppervlaktecondensatie: oppervlaktecondensatie ontstaat wanneer de temperatuur van een vlak beneden de dauwpunttemperatuur daalt.
Diffusie: het transport van waterdamp in lucht en in een poreus materiaal als gevolg van concentratieverschillen.

Diffusieweerstandsgetal μ: een materiaalgegeven, dat aangeeft hoeveel moeilijker de waterdamp diffundeert door het materiaal dan door een even dikke laag stilstaande lucht (voor waarden: zie hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 5).

Tabel 3.1 Dampspanningstabel

c_s [g/m^3]	temp [°C]	verzadigde waterdampspanning p_s [Pa]($=$N/m^2)									
		,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
39,56	+35	5627	5657	5688	5720	5752	5784	5816	5848	5880	5912
37,54	34	5323	5352	5381	5412	5443	5472	5503	5533	5564	5595
35,62	33	5033	5061	5090	5118	5146	5176	5205	5234	5364	5293
33,77	32	4757	4785	4812	4838	4866	4893	4921	4949	4977	5005
32,02	31	4496	4521	4546	4573	4598	4625	4650	4677	4704	4730
30,34	30	4245	4270	4294	4319	4344	4369	4393	4418	4443	4469
28,73	29	4007	4031	4054	4078	4102	4125	4149	4173	4197	4221
27,21	28	3782	3803	3826	3848	3871	3893	3915	3939	3962	3984
25,75	27	3567	3588	3610	3630	3651	3674	3695	3716	3738	3760
24,36	26	3363	3383	3403	3423	3443	3463	3484	3504	3530	3546
23,05	25	3169	3188	3207	3226	3246	3264	3284	3303	3323	3343
21,78	24	2985	3003	3022	3040	3058	3076	3095	3114	3132	3151
20,55	23	2811	2828	2844	2861	2879	2896	2915	2932	2949	2967
19,43	22	2645	2661	2677	2693	2710	2727	2744	2760	2778	2793
18,35	21	2488	2504	2518	2535	2549	2565	2581	2597	2613	2629

Tabel 3.1 (vervolg)

c_s [g/m³]	temp [°C]	verzadigde waterdampspanning p_s [Pa](= N/m²)									
		,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
17,28	20	2340	2353	2368	2382	2397	2412	2428	2442	2457	2473
16,30	19	2198	2212	2225	2240	2253	2268	2281	2296	2310	2325
15,37	18	2065	2077	2090	2104	2117	2130	2144	2157	2170	2184
14,47	17	1938	1950	1962	1978	1988	2001	2014	2026	2034	2052
13,65	16	1818	1830	1842	1854	1866	1878	1890	1902	1914	1926
12,85	15	1706	1717	1728	1739	1750	1761	1773	1784	1796	1808
12,07	14	1599	1609	1619	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1696
11,35	13	1498	1507	1518	1527	1538	1547	1558	1569	1578	1589
10,65	12	1403	1413	1422	1431	1441	1450	1459	1469	1478	1489
10,01	11	1313	1321	1331	1339	1349	1358	1366	1375	1385	1394
9,40	10	1229	1237	1245	1253	1262	1270	1278	1287	1295	1305
8,82	9	1148	1156	1164	1172	1179	1187	1195	1203	1212	1220
8,27	8	1072	1080	1087	1095	1103	1110	1118	1126	1132	1140
7,76	7	1002	1008	1016	1023	1030	1036	1044	1051	1059	1066
7,28	6	935	942	948	955	962	968	975	982	988	995
6,83	5	872	879	884	891	898	903	910	916	923	928
6,40	4	814	819	826	831	836	843	848	855	860	867
5,99	3	758	763	768	775	780	786	791	796	802	808
5,59	2	706	711	716	722	727	732	736	742	747	752
5,21	1	657	661	667	671	676	681	685	691	696	701
4,84	+0	611	615	620	624	628	633	637	643	647	652
4,84	−0	611	605	600	596	591	587	581	576	572	567
4,48	−1	563	557	553	548	544	539	535	531	525	521
4,14	−2	517	513	508	504	500	496	492	488	484	480
3,82	−3	476	472	468	464	460	456	452	448	444	440
3,53	−4	437	433	429	425	423	419	415	412	408	404
3,26	−5	401	397	395	391	388	384	381	377	375	371
3,01	−6	368	365	361	359	356	352	349	347	344	340
2,77	−7	337	335	332	329	327	323	320	317	315	312
2,55	−8	309	307	304	301	299	296	293	291	288	285
2,34	−9	283	281	279	276	273	271	269	267	264	261
2,15	−10	260	257	255	252	251	248	245	244	241	240
1,98	−11	237	235	233	231	229	227	225	223	221	219
1,82	−12	217	215	213	211	209	207	205	204	201	200
1,67	−13	199	196	195	193	191	189	188	185	184	183
1,53	−14	181	179	177	176	175	173	171	169	168	167
1,41	−15	165	164	163	160	159	157	156	155	153	152
1,29	−16	151	149	148	147	145	144	143	141	140	139
1,18	−17	137	136	135	133	132	131	129	128	127	125
1,08	−18	124	124	123	121	120	119	117	116	116	115
0,99	−19	113	112	111	111	109	108	107	105	105	104
0,90	−20	103	101	101	100	98,7	98,7	97,4	96,0	94,7	94,7

Klimaatklassen

Tabel 3.2 Klimaatklassenindeling van het binnenklimaat in vertrekken, gedurende de wintermaanden (volgens SBR-publicaties)

klasse	mate van dampproductie	gemiddelde dampdruk over een jaar binnen ($\overline{p}_i$)	type gebouw
I	te verwaarlozen	$1030 < \overline{p}_i < 1080$ Pa	schuren, opslagplaatsen, garages
II	geringe dampproductie	$1080 < \overline{p}_i < 1320$ Pa	woningen, kantoren, winkels
III	geringe luchtbevochtiging of hogere vochtproductie	$1320 < \overline{p}_i < 1430$ Pa	bejaardentehuizen, scholen, verpleeginrichtingen
IV	hoge vochtproductie	$\overline{p}_i > 1430$ Pa	wasserijen, zwembaden, drukkerijen, zuivelfabrieken, textielfabrieken

3.2 Vochttransport

Waterdampstroomdichtheid

In de stationaire situatie is de *waterdampstroomdichtheid g*:

$$g = \frac{p_1 - p_2}{Z} = \frac{c_1 - c_2}{Z'} \quad [\mathrm{kg/(m^2 \cdot s)}]$$

waarin: $Z = 0{,}725 \cdot 10^{-5}\, Z'$

Berekening dampdiffusieweerstand Z (zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 5)

$$Z = \frac{d}{\delta} = \frac{\mu \cdot d}{\delta_1} \quad [\mathrm{m/s}]$$

waarin: $\delta_1 = 0{,}185 \cdot 10^{-9}\,\mathrm{S}$

Dampdiffusieweerstand meerdere lagen, lucht op lucht:

$$Z = Z_e + Z_1 + Z_2 + \ldots + Z_i \ [m/s]$$

waarin: $Z_{1,2}$ = dampdiffusieweerstand laag 1,2

Dampspanningsverloop in een constructie

$$g = \frac{p_i - p_e}{Z_{tot}} = \frac{p_i - p_x}{Z_i + Z_x}$$

$$p_x = p_i - \frac{Z_i + Z_x}{Z_{tot}} \cdot (p_i - p_e)$$

waarin:
p_x = dampspanning op plaats x in de constructie [N/m^2]
Z_{tot} = dampdiffusieweerstand van de constructie, lucht op lucht [m/s]
Z_x = dampdiffusieweerstand van de lagen (inclusief overgangsweerstand) vanaf de binnenzijde van de constructie tot aan de plaats x [m/s]

3.3 Berekening hoeveelheid condensaat met methode Glaser

1 In grafiek wordt het dampspanningsverloop uitgezet tegen de dampdiffusieweerstanden; daarnaast wordt de maximale dampspanningslijn, afhankelijk van de temperatuur ter plaatse, uitgezet.
2 Bepaal het condensatievlak c; in het condensatievlak heerst de maximale dampspanning $p_{max,\,c}$ behorende bij de temperatuur van dat vlak.

De hoeveelheid condensaat bedraagt:

$$g = \frac{p_i - p_{max,c}}{Z_1} - \frac{p_{max,c} - p_e}{Z_2} \quad [kg/(m^2 \cdot s)]$$

waarin:
Z_1 = som diffusieweerstanden *warme* zijde condensatievlak
Z_2 = som diffusieweerstanden *koude* zijde condensatievlak

3.4 Temperatuur-factor

$$f = \frac{T_{oi} - T_e}{T_i - T_e} \quad [-]$$

waarin:
T_{oi} = temperatuur van het binnenoppervlak [K]
T_e = temperatuur van de buitenlucht [K]
T_i = temperatuur van de binnenlucht [K]

Voor woningen is $f \geq 0{,}65$. Bij overige gebouwen is $f \geq 0{,}50$. In de NEN 2878 wordt dit uitgediept.

4 Daglichttoetreding

4.1 Algemeen

Normen
NEN 2057 Daglichtopeningen van gebouwen, verkorte bepalingsmethode voor de equivalente daglichtopperulakte van daglichtopeningen.

Definities en symbolen
Lichtstroom Φ: de totale hoeveelheid licht, die een lichtbron per seconde uitstraalt [lumen].
Lichtsterkte I: de lichtstroom, die per eenheid van ruimtehoek in een bepaalde richting wordt uitgezonden [lumen/steradiaal = candela = cd].
Luminantie L: de lichtsterkte per m^2 schijnbaar oppervlak van een lichtbron of van een verlicht vlak [cd/m^2].

Tabel 4.1 Luminantievoorbeelden [cd/m^2]

zon	$1{,}65 \cdot 10^9$
gloeidraad van een heldere lamp	$7 \cdot 10^6$
pijngrens	10^5
wit papier (reflectiecoëfficiënt 80%; verlichtingssterkte 400 lux)	10^2
gezichtsdrempel	10^{-5}

Tabel 4.2 Reflectiefactoren van enkele oppervlakken bij wit licht

wit pleisterwerk (nieuw, droog)	0,7 – 0,8
wit pleisterwerk (oud)	0,3 – 0,6
beton (nieuw)	0,4 – 0,5
beton (oud)	0,05 – 0,15
baksteen (nieuw)	0,10 – 0,30
baksteen (oud)	0,05 – 0,15
aluminiumverf	0,60 – 0,75

Verlichtingssterkte E: de opvallende lichtstroom per eenheid van oppervlak [lux = lumen/m^2].
Reflectiefactor r: de verhouding van de gereflecteerde lichtstroom en de opvallende lichtstroom.

4.2 Berekening daglichttoetreding

Daglichtfactor

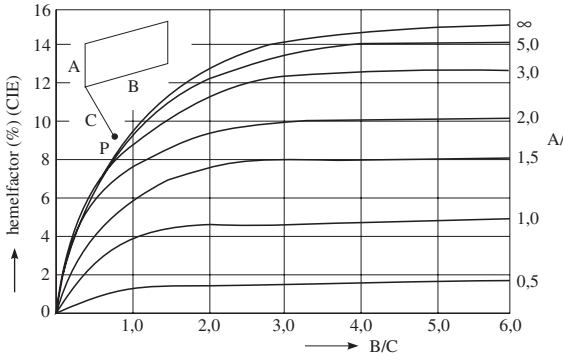
$$\text{Daglichtfactor } d = \frac{\text{optredende verlichtingssterkte binnen}}{\text{verlichtingssterkte op horizontaal vlak in vrije veld}}$$

$$d = h + i + e$$

waarin: h = hemelcomponent
i = interne reflectiecomponent
e = externe reflectiecomponent

Bepaling daglichtfactor

Hemelcomponent = hemelfactor × *LTA* × reductiefactor
LTA-waarde : lichtdoorlaatfactor van het glas
Reductiefactor : bijv. door vervuiling en/of glasroeden
Hemelfactor : zie figuur 4.1



Figuur 4.1 Bepaling hemelfactor (bedekte hemel CIE)

Tabel 4.3 LTA-waarden van enkele glassoorten

glassoort	*LTA*
enkel glas	0,8 – 0,9
dubbel glas	0,7 – 0,8
extra isolerend dubbel glas	0,55 – 0,65
zonwerend dubbel glas	0,1 – 0,7

5 Geluidbeheersing

5.1 Algemeen

Symbolen

G_A = geluidwering [dB(A)]

G_{Ak} = karakteristieke geluidwering [dB(A)]
I_{co} = contactgeluidisolatie-index [dB]
I_{lu} = luchtgeluidisolatie-index [dB]
I_{luk} = karakeristieke luchtgeluidisolatie-index [dB]
L_p = geluiddrukniveau [dB]
p_{eff} = effectieve geluiddruk [N/m^2]
R_m = gemiddelde geluidisolatie [dB]
R_w = gewogen geluidisolatie [dB]
T = nagalmtijd [s]

Normen

NEN 1070. Geluidwering in woongebouwen.
NPR 5070-serie. Geluidwering in woongebouwen. Voorbeelden van . . . (zie hieronder) . . . , afgestemd op NEN 1070:
- NPR 5070 Wand- en vloerconstructies.
- NPR 5071 Beperking van galm en lawaai door slaande deuren.
- NPR 5072 Mechanische luchtafvoersystemen.
- NPR 5073 Liftinstallaties.
- NPR 5074 Centrale verwarmingsinstallaties met radiatoren en convectoren.
- NPR 5075 Sanitaire toestellen en installaties voor de aan- en afvoer van water.
- NPR 5078 Lichte woningscheidende wanden.

NEN 5077. Geluidwering in woongebouwen. Bepalingsmethoden voor de prestatiegrootheden: luchtgeluidisolatie, contactgeluidisolatie, geluidwering uitwendige scheidingsconstructies, geluidniveaus door installaties.
NEN 5078. Geluidwering in woongebouwen. Rekenmethode voor bepaling van geluidabsorptie in ruimten.
NEN 5079. Geluidwering in woongebouwen. Het weergeven in één getal van de geluidisolatie van bouwelementen, gemeten in het laboratorium.

SBR-publicaties

nr. 28 = Voorkomen van geluidlekken in vloeren.
nr. 43 = Van steensmuur tot ankerloze spouwmuur.
nr. 45 = Flankerende geluidoverdracht.
nr.146 = Geluidwering voor buitenlawaai.

Definities en symbolen

Effectieve geluiddruk p_{eff}: de wortel uit het gemiddelde kwadraat van de geluiddrukken in een bepaald tijdinterval.

Geluiddrukniveau L_{p} : $L_{\text{p}} = 20 \log \frac{p_{\text{eff}}}{p_{\text{o}}}$ [dB]. Zie tabel 5.1.

waarin: $p_{\text{o}} = 2 \cdot 10^{-5}$ N/m^2

Nagalmtijd T: de tijd, die verstrijkt tijdens het dalen van het geluiddrukniveau over 60 dB.

Luchtgeluidisolatie-index I_{lu}: een getal, dat de gemeten luchtgeluidisolatie tussen ruimten weergeeft, in relatie tot de normwaarden.

Tabel 5.1 Enige geluiden met globale aanduiding van L_{p}

geluid	geluiddrukniveau [dB]
gehoordrempel	0
bladergeritsel	20
fluisteren 1 m	40
gesprek 1 m	60
luide radio	80
claxon dichtbij	100
pijngrens	140

5.2 A-weging

Hierbij worden isolatiewaarden en geluidniveaus in één waarde gegeven, waarbij rekening wordt gehouden met de hindergevoeligheid van de mens.
De correcties, die op het geluidniveau bij de verschillende middenfrequenties moeten worden toegepast, zijn weergegeven in tabel 5.2.

Tabel 5.2 Correcties bij A-weging

	middenfrequentie [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
correcties in dB	−16	−9	−3	0	+1	+1

5.3 Luchtgeluidisolatie

Luchtgeluidisolatie R scheidingsconstructie
(zonder omweggeluid)

$$R = L_z - L_o + 10\log\frac{S}{A} \quad [\text{dB}]$$

waarin:
S = oppervlakte van de scheidingsconstructie [m^2]
A = totale absorptie in het ontvangvertrek [m^2 'open raam']
L_z = geluiddrukniveau in de zendkamer [dB]
L_o = geluiddrukniveau in de ontvangkamer [dB]

Genormeerde luchtgeluidisolatie D_{nT}:

$$D_{nT} = L_z - L_o + 10\log\frac{T}{0{,}5} \quad [\text{dB}]$$

waarin: T = de nagalmtijd in de ontvangruimte [s]

Luchtgeluidisolatie R samengestelde scheidingsconstructie
Bijv. strook glas in gemetselde wand (zonder omweggeluid).

$$R = R_2 - 10\log\left(\frac{S_1 \cdot 10^{\left(\frac{R_2 - R_1}{10}\right)} + S_2}{S_1 + S_2}\right) \quad [\text{dB}]$$

waarin:
R = effectieve geluidisolatie van de wand [dB]
$R_{1,2}$ = luchtegeluidisolatie van gedeelte van de wand met oppervlakte $S_{1,2}$ [dB]

Tabel 5.3 Normwaarden luchtgeluidisolatie uit NEN 1070

	middenfrequentie [Hz]				
	125	250	500	1000	2000
normwaarde [dB]	34	43	50	53	54

Indien de waarden voor D_{nT} gelijk zijn aan de bijbehorende normwaarden, dan geldt: $I_{lu} = 0$ dB.

Bepaling I_{lu} en I_{luk}

Bepaal de genormeerde geluidisolaties D_{nT} voor de octaafbanden met middenfrequenties 125, 250, 500, 1000 en 2000 Hz.

Tabel 5.4 Voorbeeldberekening I_{lu}

		middenfrequentie [Hz]				
		125	250	500	1000	2000
1	gemeten genormeerde luchtgeluidisolatie D_{nT} [dB]	35	40	52	60	58
2	normwaarde luchtgeluidisolatie [dB]	34	43	50	53	54
3	isolatieverschillen 1–2 [dB]	+1	−3	+2	+7	+4

a $1/5 \cdot (1 - 3 + 2 + 7 + 4) = 2{,}2$; afgerond + 2 (gemiddelde van de isolatieverschillen)
b $1/2 \cdot (+1 - 3) + 2 = +1$ (gemiddelde van de twee algebraïsch kleinste isolatieverschillen, vermeerderd met 2)
c $-3 + 4 = +1$ (het algebraïsch kleinste isolatieverschil, vermeerderd met 4)

isolatie-index voor luchtgeluid: (algebraïsch) kleinste van de drie uitkomsten, dus $I_{lu} = +1$ dB

Karakteristieke luchtgeluidisolatie-index:

$$I_{luk} = I_{lu} - 10 \log\left(\frac{V}{6 \cdot T_0 \cdot S} - 1\right) \quad [\text{dB}]$$

waarin:
V = volume ontvangvertrek [m^3]
S = oppervlakte scheidingswand [m^2]
T_0 = referentiegalmtijd [s] (0,5 of 0,8 s)

Vereiste I_{lu} volgens NEN 1070

Tabel 5.5 Minimale isolatie-index voor luchtgeluid [dB]

beschermde ruimten	geluid afkomstig uit: kamers in dezelfde woning	besloten ruimten van andere woningen	besloten ruimten, met inbegrip van gemeenschappelijke trappenhuizen, gangen, e.d., die geen deel vormen van een woning
kamers	−15[1)]	0	0[2)]
keukens	–	0	0[3)]
andere besloten ruimten binnen een woning	–	−5	–

[1)] Geen eis, wanneer de ene kamer in open verbinding staat met, of door een wand met een deur is gescheiden van de andere kamer en beide kamers bovendien op dezelfde bouwlaag gelegen zijn.
[2)] Geen eis, wanneer het geluid afkomstig is van een besloten galerij.
[3)] Geen eis, wanneer het geluid afkomstig is van een gemeenschappelijke gang of besloten galerij.

Geluidwering gevel (NEN 5077)

$$G_A = R_A + 10\log\left(\frac{V}{6 \cdot T_0 \cdot S_u}\right) - C_r \quad [\mathrm{dB(A)}]$$

waarin:
C_r = herleidingsterm (invloed reflecties, gevelstructuur en geometrie) [dB]
S_u = oppervlakte uitwendige scheidingsconstructie [m^2]

Dit wordt in o.a. de 'Herziening Rekenmethode Geluidwering Gevels' (1989) van het MVROM geformuleerd als:

$$G_A = R_A + 10\log\left(\frac{V}{6 \cdot T_0 \cdot S_u}\right) - 3 + C_g \quad [\mathrm{dB(A)}]$$

waarin:
C_g = gevelstructuur-correctieterm (met andere getalwaarden voor C_g dan voor bovengenoemde C_r)

Karakteristieke geluidwering gevel (NEN 5077)

$$G_{Ak} = G_A - 10\log\left(\frac{V}{6 \cdot T_0 \cdot S_u}\right) \quad [\mathrm{dB(A)}]$$

Luchtgeluidisolatiewaarden R (laboratoriumsituatie) en dB (A)-waarden van enkele constructies (dB(A)-waarden voor het standaardspectrum wegverkeersgeluid).

Tabel 5.6 R-waarden en dB(A)-waarden (voor standaardspectrum wegverkeersgeluid) van enkele constructies

	luchtgeluidisolatie R [dB] bij middenfrequentie [Hz]					
constructie	125	250	500	1000	2000	dB(A)
enkel glas 4 mm	19	23	26	30	32	27
8 mm	23	26	30	32	28	29
dubbel glas						
4–6–4 mm	22	23	23	32	35	26
4–100–4 mm	24	32	40	48	50	36
gasgevuld dubbel glas						
5–9–8 mm	24	22	32	39	39	30
spouwmuur						
spouw 40–65 mm						
160 kg/m^2	36	40	43	50	57	44
400 kg/m^2	41	46	52	59	64	51

5.4 Contactgeluidisolatie

Bepaling contactgeluidniveau L_{nT}
M.b.v. een standaard contactgeluidbron.

$$L_{nT} = L_{co} - 10\log\frac{T}{0{,}5}$$

waarin: L_{co} = geluiddrukniveau in het ontvangvertrek

Bepaling I_{co}

Bepaal het genormeerde contactgeluidniveau L_{nT} voor de octaafbanden met middenfrequenties 125, 250, 500, 1000 en 2000 Hz.

Tabel 5.7 Normwaarden contactgeluidisolatie volgens NEN 1070

	middenfrequentie [Hz]				
	125	250	500	1000	2000
normwaarde [dB]	70	66	66	66	70

Indien de L_{nT}-waarden gelijk zijn aan de normwaarden, dan geldt: $I_{co} = 0$ dB.

Tabel 5.8 Voorbeeldberekening I_{co}

	middenfrequentie [Hz]				
	125	250	500	1000	2000
normwaarden [dB]	70	66	66	66	70
contactgeluid-niveau L_{nT} [dB]	74	73	71	69	58
verschillen	−4	−7	−5	−3	+12

a $1/5 \cdot (-4 - 7 - 5 - 3 + 12) = -1{,}4$, afgerond -1 dB
(het gemiddelde van de berekende verschillen)
b $1/2 \cdot (-7 - 5) + 2 = -4$ dB
(het gemiddelde van de 2 algebraïsch kleinste verschillen, vermeerderd met 2)
c $-7 + 4 = -3$ dB
(het algebraïsch kleinste verschil, vermeerderd met 4)

isolatie-index voor luchtgeluid: (algebraïsch) kleinste van de drie uitkomsten, dus $I_{co} = -4$ dB

Vereiste I_{co} volgens NEN 1070

Tabel 5.9 geeft de minimale isolatie-index voor contactgeluid. De isolatie-index geeft aan in wat voor mate een ruimte is beschermd tegen contactgeluiden. Deze geluiden kunnen ontstaan op een vloer, trap of een ander oppervlak waarop gelopen kan worden.

Dit oppervlak behoeft niet boven de te beschermen ruimte te liggen.

Tabel 5.9 Minimale isolatie-index voor contactgeluid [dB]

beschermde ruimten	geluid afkomstig uit		
	ruimten binnen dezelfde woning	ruimten van andere woningen	niet tot een ruimten woning behorende ruimten
kamers	−15[1)]	0	0
keukens	–	0	–

[1)] Dit is geen eis, wanneer de ruimte in open verbinding staat met of door een deur is gescheiden van de te beschermen kamer op dezelfde bouwlaag.

Aan de gestelde eisen t.a.v. contactgeluidisolatie moet worden voldaan zonder dat de vloerconstructie (of het voor belopen bestemde oppervlak) van een vloerbedekking is voorzien.

5.5 Nagalmtijd

Wet van Sabine

$$T = \frac{1}{6} \cdot \frac{V}{A} \quad [\mathrm{s}]$$

waarin:
V = volume van de ruimte [m^3]
A = totale absorptie in de ruimte [m^2 'open raam']

Bepaling absorptie in m^2 (open raam)

$$A = \sum_{i=1}^{i=n} a_i \cdot S_i$$

waarin:
a_i = absorptiecoëfficiënt van vlak i
S_i = oppervlakte van vlak i

Tabel 5.10 Rekenwaarden van geluidabsorptiecoëfficiënten (a)

materiaal	octaafband met middenfrequenties [Hz]			
	250	500	1000	2000
schoon metselwerk, baksteen of kalkzandsteen	0,03	0,03	0,04	0,05
gepleisterde oppervlakken, grindbeton	0,01	0,02	0,02	0,03
niet-afsluitbare gevelopeningen	1,0	1,0	1,0	1,0
gesloten raam met vensterglas	0,04	0,03	0,02	0,02
op de vloer geplakt linoleum, PVC e.d.	0,03	0,04	0,05	0,05
op de vloer geplakt tapijt (5mm)	0,02	0,04	0,1	0,3
4 mm triplex of hardboard beschieting op 25 mm dikke tengels	0,3	0,1	0,05	0,05
20 mm dikke akoestische tegel met gaatjes of sleufjes, geplakt op harde ondergrond	0,15	0,4	0,6	0,7
25 mm dikke houtwolcement- of houtwolmagnesietplaat, direct op harde ondergrond bevestigd	0,2	0,2	0,5	0,7
idem op 25 mm dikke tengels	0,2	0,7	0,7	0,7
idem op 50 mm dik regelwerk	0,3	0,6	0,5	0,6
houten latten, breed 45 mm, dik 22 mm met onderlinge tussenruimte van 12 mm, bevestigd op 45 mm dik regelwerk. in de spouw minerale wol, voorzien van een folie	0,5	0,9	0,9	0,6

6 Brandpreventie

6.1 Algemeen

Normen

NEN 1014. Bliksemafleiderinstallaties.
NEN 1014. Aanvulling op NEN 1014 – Bliksemafleiderinstallaties.
NEN 1594. Brandweermaterieel – Droge stijgleidingen.
NEN 3122. Richtlijnen brandbeveiliging van gebouwen. Deel 3. Richtlijnen voor garages en herstelinrichtingen voor motorvoertuigen.
NEN 3211. Brandweermateriaal. Vaste slanghaspels met rubberslang en straalpijp.
NEN 3254. Brandvertragende middelen voor hout. Methoden van onderzoek.
NEN 3881. Bepaling de onbrandbaarheid van bouwmaterialen.
NEN 3882. Bepaling van het brandgevaarlijk zijn van daken uitsluitend onder inwerking van vliegvuur.
NEN 3883. Bepaling van de bijdrage tot de brandvoortplanting van bouwmaterialen en hun rookontwikkeling bij brand.
NEN 3885. Bepaling van de brandwerendheid van deuren, luiken en raamconstructies van gebouwen.
NEN 3891. Richtlijnen brandbeveiliging van gebouwen. Deel 1. Algemeen gedeelte.
NEN 3892 (en aanvulling). Brandbeveiliging van gebouwen. Eengezinshuizen en lage woongebouwen.
NEN 3893 (en aanvulling). Brandbeveiliging van gebouwen Hoge woongebouwen
NEN 3894. Brandbeveiliging van gebouwen. Hotels en andere logiesgebouwen.
NEN 3895 (ontwerp). Brandbeveiliging van gebouwen. Kantoorgebouwen.
NEN 3897 (ontwerp). Brandbeveiliging van gebouwen. Gebouwen voor de intramurale gezondheidszorg.
NEN 6061. Bepaling van de weerstand tegen het ontstaan van brand bij stookplaatsen.
NEN 6062. Bepaling van de brandveiligheid van rookafvoervoorzieningen.

NEN 6063 (ontwerp). Bepaling van het brandgevaarlijk zijn van daken.
NEN 6064 (ontwerp). Bepaling van de ontbrandbaarheid van bouwmateriaal (combinaties).
NEN 6065 (ontwerp). Bepaling van de bijdrage tot brandvoortplanting van een bouwmateriaal (combinatie).
NEN 6066 (ontwerp). Bepaling van de rookproductie bij brand van een bouwmateriaal (combinatie).
NEN 6068 (ontwerp). Bepaling van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag tussen ruimten.
NEN 6069 (ontwerp). Experimentele bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen.
NEN 6071 (ontwerp). Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen. Betonconstructies.
NEN 6072 (ontwerp). Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen. Staalconstructies.
NEN 6073 (ontwerp). Rekenkundige bepaling van de brandwerendheid van bouwdelen. Houtconstructies.
NEN 6075 (ontwerp). Bepaling van de weerstand tegen rookdoorgang tussen ruimten.
NEN 6076. Experimentele bepaling van de brandwerendheid van ventilatiekanalen zonder brandkleppen.
NEN 6077. Experimentele bepaling van de brandwerendheid van ventilatiekanalen voorzien van brandkleppen.
NEN 6081. Brandveiligheid van gebouwen. Functionele eisen.
NEN 6082 (ontwerp). Brandveiligheid van gebouwen. Woningen en woongebouwen; prestatie-eisen.
NEN 6083 (ontwerp). Brandveiligheid van gebouwen. Logeerwoningen en logeergebouwen; prestatie-eisen.
NEN 6084 (ontwerp). Brandveiligheid van gebouwen. Kantoorgebouwen; prestatie-eisen.
NEN 6085(ontwerp). Brandveiligheid van gebouwen. Schoolgebouwen; prestatie-eisen.
NEN 6086 (ontwerp). Brandveiligheid van gebouwen. Gezondheidszorggebouwen; prestatie-eisen.
NEN 6087. Bluswaterwinplaatsen en opstelplaatsen voor blusvoertuigen.
NEN 6088. Brandbeveiligingsinstallaties. Veiligheidssignalering. Eigenschappen en bepalingsmethoden.

NEN 6089. Bepaling van de opvangcapaciteit en doorstroomcapaciteit van verkeersruimten.
NEN 6090. Bepaling van de vuurbelasting.
NEN 6091. Brandoverslag door straling.
NEN 6093. Brandbeveiligingsinstallaties. Prestatie-eisen: Rook- en warmteafvoerinstallaties.
NEN 6094. Brandbeveiligingsinstallaties. Classificatie, eisen en bepalingsmethoden: Automatische sprinklerinstallaties.

SBR-publicaties
nr. 91. Een brandveilig gebouw ontwerpen
nr.141. Rookverspreiding in grote ruimte

Definities
Vuurbelasting: de totale hoeveelheid warmte per m^2 vloeroppervlak vrijkomend bij volledige verbranding van de in een ruimte aanwezige brandbare materialen, uitgedrukt in kg vurehout per m^2 vloeroppervlakte.
Brandwerendheid: de tijdsduur gedurende welke een bouwconstructie weerstand biedt aan verhitting bij beproeving volgens NEN 6069.
Brandoverslag: uitbreiding van brand via de lucht.
Branddoorslag: uitbreiding van brand naar een aangrenzende ruimte via een open verbinding of een constructie.
Vlamuitbreiding: de maximale verplaatsing van het vlamfront langs de lengte-as van het direct aan warmtestraling blootgestelde deel van het proefstuk.

6.2 Vuurbelasting

$$\text{Vuurbelasting} = \frac{a \cdot b}{19 \cdot A} \text{ [kg vurenhout/m}^2\text{ vloeroppervlakte]}$$

waarin:
a = hoeveelheid brandbaar materiaal [kg]
b = verbrandingswaarde [MJ/kg]
A = vloeroppervlak [m^2]
19 = verbrandingswaarde van hout [MJ/kg]

6.3 Vlamuitbreiding

Tabel 6.1 Vlamuitbreidingsklassen volgens NEN 3883

klasse van vlam-uitbreiding	vlamuitbreiding [mm]			
	gedurende de eerste $1\frac{1}{2}$ minuut		gedurende de eerste 10 minuten	
	klasse-grens	max. over-schrijding 1 proefstuk	klasse-grens	max. over-schrijding 1 proefstuk
1	175	25	175	25
2	250	50	550	50
3	350	50	750	100
4	500	50	indien niet behorend tot klasse 1 t/m 3	
5	indien niet behorend tot klasse 1 t/m 4			

Tabel 6.2 Gemiddelde verbrandingswaarde enkele stoffen

stof	[MJ/kg]	stof	[MJ/kg]
aluminium	29	polyetheen	43
huisbrandolie	42	polystyreen	40
hout: vuren	19	polyurethaan	28
eiken	17	papier (karton)	17
houtwolcement	0,8–2	rubber	38
katoen	17	stro	15
kurkplaten	20	wol	21

6.4 Rookproductie van materialen

Rookproductie

Dit begrip wordt omschreven in de norm NEN 6066- "Bepaling van de rookproductie bij brand van bouwmateriaal (combinaties)".

$$D_{L;max} = \frac{1}{L} \cdot D_{max} = \frac{1}{L} \cdot \log \frac{100\%}{T_{min}}$$

met:

$D_{L;max}$ = de maximale rookdichtheid [m^{-1}]
D_{max} = de hoogste waarde van de optische dichtheid per proef [-]
L = de door de lichtbundel door de rook afgelegde afstand [m]
T_{min} = de laagste tijdens de proef gevonden waarde van de lichttransmissie (T), uitgedrukt als percentage van de bij aanvang van de proef gemeten lichtstroomdichtheid

Het Bouwbesluit stelt eisen aan de rookproductie $D_{L;max}$ (artikel 233)

Literatuur

Zie de bij de verschillende paragrafen genoemde publicaties.

Klimaatregeling en leidingsystemen

G1

1 Centrale verwarming (CV)
- 1.1 Warmteverliesberekening
- 1.2 Warmteopwekking (ketels)
- 1.3 Warmteopwekking (warmtepompen)
- 1.4 Warmteoverdracht
- 1.5 Verwarmingslichamen
- 1.6 Leidingen
- 1.7 Pompen
- 1.8 Gesloten expansievat
- 1.9 Schoorsteenberekeningen
- 1.10 Ventilatie en veiligheid ketelhuizen

2 Gegevens centrale verwarming
- 2.1 Overzicht
- 2.2 Tabellen en grafieken

3 Klimaatregeling algemeen
- 3.1 Ventilatie
- 3.2 Koellastberekening
- 3.3 Mollier-of *h*-*X*-diagram
- 3.4 Behaaglijkheid

4 Klimaatinstallaties
- 4.1 Luchthoeveelheden
- 4.2 Manier van lucht inblazen
- 4.3 Luchttransport door ventilatoren
- 4.4 Kleppen
- 4.5 Luchtfilters
- 4.6 Verwarmingselementen
- 4.7 Koelers
- 4.8 Luchtbevochtigers
- 4.9 Luchtkanalen-berekening

5 Akoestiek in klimaatinstallaties
5.1 Geluidsniveaus
5.2 Geluidsbronnen
5.3 Demping
5.4 Voorbeeld demperbepaling

6 Leidingsystemen
6.1 Stoom- en condensleidingen
6.2 Persluchtleidingen
6.3 Aardgasleidingen
6.4 Koud- en warmtapwaterleidingen
6.5 Handelsdiameters leidingen en afsluiters

Opmerking. Sommige van de in dit hoofdstuk gebruikte symbolen wijken af van de SI-symbolen, maar zijn omwille van de herkenbaarheid gehandhaafd. Hier wordt bijvoorbeeld voor de *warmtedoorgangscoëfficiënt* het in dit vakgebied gebruikelijke symbool *U* gebruikt (men spreekt ook van: *transmissiegetal* of *U-waarde*). Dit wijkt af van het in hoofdstuk A4 Natuurkunde – conform de ISO-norm – toegepaste symbool *K*.

1 Centrale verwarming (CV)

1.1 Warmteverliesberekening[1)]

De bepaling van het benodigde vermogen van de verwarmingsinstallatie moet worden berekend volgens NEN-EN 12831. Warmteverlies voor gebouwen (toegelicht in ISSO-publicatie Nr. September 2000). Het in het vertrek op te stellen vermogen bestaat uit drie bijdragen, te weten:
- het transmissieverlies;
- het warmteverlies ten gevolge van ventilatie;
- het vermogen voor opwarming na nachtverlaging of bedrijfsbeperking.

Het voorgaande geldt voor normale gebouwen. Voor afwijkende gebouwen zoals bijzonder hoge- of gebouwen met een zeer zware constructie of incidenteel verwarmde gebouwen geldt een afwijkend berekeningsmethodiek.

Warmteverlies door transmissie

Warmteverlies Q_t door een vlak, niet zijnde de begane grondvloer:

$$Q_t = A \cdot U \cdot (t_i - t_u) \quad [W]$$

waarin:
A = resulterend oppervlak [m^2]
U = warmtedoorgangscoëfficiënt [$W/(m^2 \cdot K)$]
t_i = ontwerpbinnentemperatuur [°C] (zie tabel 2.3)
t_u = ontwerpbuitentemperatuur -10°C of temperatuur aangrenzende ruimte.

Voor aangrenzende ruimte in naastgelegen woningen met individuele verwarming rekenen op 10°. Voor aangrenzende ruimte in naastgelegen woningen met stadsverwarming rekenen op 15°. Voor onverwarmde vertrekken te rekenen op 5°.

[1)] In deze paragraaf wordt verwezen naar de verzamelde tabellen en figuren in par. 2.

Voor moderne wandconstructies is $R_c = 2{,}5\ \mathrm{m^2 \cdot K/W}$, dus:

$$U = \frac{1}{R_i + R_u + R_c} = \frac{1}{0{,}13 + 0{,}04 + 2{,}5} = 0{,}38\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

De warmtedoorgangscoëfficiënt voor glas:

$U_{\text{enkel glas}} = 5{,}8\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$;
$U_{\text{thermopane}} = 3{,}4\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$;
$U_{\text{thermoplus glas}} = 1{,}7\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$;
$U_{\text{HR}^{++}\text{ glas}} = 0{,}9 - 1{,}1\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$.

Warmtestroom door de begane grondvloer

Wanneer de warmtestroomdichtheid q_{vl} door de begane grondvloer bekend is, geldt:

$$Q_t = 1{,}45 \cdot f_{g2} \cdot G_W \Sigma_k (A_k \cdot U_{e,k})$$

waarin:
A_k = oppervlak van vlak k, dat in contact is met de grond
$U_{e,k}$ = equivalente warmtedoorgangscoëfficiënt
G_w = grondwaterfactor
f_{g2} = correctiefactor voor afwijkend temperatuurverschil tussen ontwerpbinnen- en ontwerpbuitentemperatuur

Voor de grondwaterfactor G_w geldt:

$G_w = 1$ als de grondwaterspiegel meer dan 1 m onder het vloerniveau ligt
$G_w = 3$ als de grondwaterspiegel tegen de vloer komt
$G_w = 1{,}15$ voor alle overige gevallen

Voor de correctiefactor f_{g2} geldt:

$f_{g2} = 0$ bij wand- of vloerverwarming voor het betreffende vertrekdeel

$$f_{g2} = \frac{(t_i + \Delta t_2) - t_{mu}}{t_i - t_u}$$ voor de overige gevallen

Warmteverlies ten gevolge van ventilatie

De ventilatie kan plaatsvinden door middel van natuurlijke of mechanische ventilatietoevoer gecombineerd met natuurlijke of

mechanische afvoer. Bij woningen moet de ventilatie voldoen aan de NEN 1087 en Bouwbesluit 1991.

$$Q_v = 1200 \cdot q_i \cdot z \cdot f_v$$

waarin:
q_i = infiltratieluchtdebiet [m^3/s] (zie tabel 1.1 en 1.2)
z = fractie in rekening te brengen infiltratie (zie tabel 1.3)

Voor f_v geldt:

$$f_v = \frac{t_i + \Delta t_v - t_u}{t_i - t_u}$$

waarin:
Δt_v = temperatuurcorrectie (−1,5 voor vloer- of wandverwarming; 0 in alle overige gevallen)

Tabel 1.1 q_i in m^3/s per m^2 buitenoppervlak afhankelijk van $q_{v,10}$ voor woningen die voldoen aan nieuwbouwwoningen volgens Bouwbesluit

ventilatiesysteem	$q_{v,10}$				
	30	50	100	150	200
natuurlijke toe-en afvoer	–	–	$17 \cdot 10^{-5}$	$26 \cdot 10^{-5}$	$39 \cdot 10^{-5}$
natuurlijke toevoer en mechanische afvoer	–	–	$16 \cdot 10^{-5}$	$23 \cdot 10^{-5}$	$34 \cdot 10^{-5}$
mechanische toevoer en natuurlijke afvoer	$11 \cdot 10^{-5}$	$14 \cdot 10^{-5}$	$21 \cdot 10^{-5}$	$33 \cdot 10^{-5}$	$45 \cdot 10^{-5}$
gebalanceerde mechanische ventilatie	$10 \cdot 10^{-5}$	$12 \cdot 10^{-5}$	$19 \cdot 10^{-5}$	–	–

Tabel 1.2 q_i in m^3/s per m^2 buitenoppervlak voor woningen die niet voldoen aan nieuwbouwwoningen volgens Bouwbesluit

$q_{v,10}$	$\leqslant 200$	>200
q_i	$90 \cdot 10^{-5}$	$190 \cdot 10^{-5}$

Tabel 1.3 q_i in m^3/s per m^2 buitenoppervlak voor woningen die niet voldoen aan de nieuwbouwwoningen volgens Bouwbesluit

type gebouw	fractie z
woning met één buitengevel	1
eengezinswoning	0,7
galerijwoning	0,5
portiekwoning	0,5
bejaardenwoning	0,5
verzorgingstehuis	0,5

Vermogen voor opwarming na nachtverlaging of bedrijfsbeperking

$$Q_0 = 3 \cdot P \cdot A_a$$

waarin:
Q_0 = *opwarmtoeslag [W]*
P = opwarmtoeslag per m^2 accumulerende oppervlakte [W/m^2] (zie tabel 2.7)
A_a = accumulerende oppervlakte begrenzende wandopper-vlakken [m^2]

Toelichting. Aanbevolen wordt om een opwarmtijd van 1 uur en een opwarmtemperatuurverschil van 3 K te hanteren.

Het te installeren vermogen wordt per lokaal bepaald door de drie deelvermogens (Q_t, Q_v en Q_o) te sommeren.

1.2 Warmteopwekking (ketels)

Centrale verwarmingsketels

Centrale verwarmingsketels (tot max. 110 °C) zijn te onder-scheiden in:

- gasgestookte ketels;
- oliegestookte ketels;
- ketels voor vaste brandstoffen (kolen of hout).

Gasgestookte ketels

- Atmosferische ketels.
- Ketels met voorzetbrander (onder- en overdrukketels).

Toepassingen:

- Vermogensbereik 0–60 kW: atmosferische ledenketels en/of gaswandketels. Toepassingsgebied: woonhuizen en kleine gebouwen.
- Vermogensbereik 100–1000 kW: atmosferische ledenketels en onder- en overdrukketels met voorzetbrander. Toepassingsgebieden: kantoren, winkels, scholen enz.
- Vermogensbereik 1000 kW en groter: cilindrische vuurgang vlampijp ketels met voorzetbrander(s).

Voorschriften. Alle gasgestookte ketels moeten voorzien zijn van een GIVEG keurmerk. Ketels met een belasting groter dan 600 kW vallen onder de VISA voorschriften.

Stoomketels

Lage-druk stoomketels (tot 0,5 bar overdruk):

- atmosferische ledenketels voorzien van stoomvat;
- ledenketels met voorzetbrander voorzien van stoomvat;
- cilindrische ketels.

Toepassingsgebieden: processen, bevochtiging van lucht, kookketels.

Hoge-druk stoomketels (0,5 tot 12 bar overdruk): cilindrische ketels.
Toepassingsgebieden:

- industrie t.b.v. stoomproductie;
- stoom voor bevochtiging van lucht, sterilisatie van apparatuur en/of koken van voedsel, bijv. in ziekenhuizen.

Heetwaterketels (110–180 °C)

- Cilindrische ketels met voorzetbrander tot ca. 10 MW.
- Waterpijpketels boven 10 MW.

Toepassingsgebieden:
- industrie,verhitting van producten;
- daar waar grote vermogens over grote afstanden getransporteerd moeten worden, bijv. stads- of wijkverwarming of in ziekenhuizen.

Thermische olieketels (150–350 °C)

Toepassingsgebieden: in de industrie waar bijv. hoge temperaturen nodig zijn voor koken en/of drogen van producten.

Stooktechnisch ketelrendement η_s

$$\eta_s = \frac{\dot{Q}_s}{H \cdot \dot{V}}$$

waarin:
$\dot{Q}_s$ = opgewekte warmte minus schoorsteenverlies [kJ/s]
H = verbrandingswaarde gas
= toegevoerde warmte via het gas [kJ/m^3]
$\dot{V}$ = volumestroom [m^3/s]

Waterzijdig ketelrendement η_w

$$\eta_w = \frac{\dot{Q}_w}{H \cdot \dot{V}}$$

waarin:
$\dot{Q}_w$ = hoeveelheid warmte afgegeven aan het CV-water
= $\dot{Q}_w$ – warmteverlies ketel aan omgeving [kW]

Jaarrendement ketel η_j

Dit is de hoeveelheid warmte afgegeven aan het water, gedeeld door de hoeveelheid toegevoerde warmte, gebaseerd op een stookseizoen van een jaar.
Het stooktechnisch- en het waterzijdigrendement hebben alleen betrekking op de ketel; het *jaarrendement* heeft betrekking op de totale bedrijfswijze van de installatie.

$$\eta_j = \frac{\dot{Q}_j}{H \cdot V}$$

waarin:
Q_j = jaarverbruik ketel [kJ/s]
H = verbrandingswaarde aardgas
= toegevoerde warmte via het gas [kJ/m^3]
V = volumestroom [m^3/s]

Het is gebruikelijk om het rendement van gasgestookte installatie op te geven t.o.v. de bovenwaarde (H_b) van aardgas. Tabel 1.2 geeft bij benadering enkele rendementen (H_o = onderwaarde aardgas).

Tabel 1.2 Rendementen ketels

	η_w t.o.v. H_o	η_w t.o.v. H_b	η_j t.o.v. H_b
atmosferische ketel oud	85%	76%	68%
atmosferische ketel nieuw	90%	81%	73%
atmosferische ketel H.R.	>100%	90%	85%
overdruk H.R.	>100%	90%	75%
overdrukketel oud	90%	81%	73%
overdrukketel nieuw	95%	85%	78%

1.3 Warmteopwekking (warmtepompen)

Warmteproductie: niveau 50–40 °C

Toepassing in:
LTV (= lage temperatuur verwarming) installaties, watertemperatuur 55–40°C:
- vloerverwarming;
- luchtverwarming;
- radiatorverwarming (laag niveau).

Bronnen:
- bronwater;
- afzuiglucht;
- buitenlucht.

Rendement η heeft een *COP-factor* (coëfficient of performance) tot 3 à 4.

1.4 Warmteoverdracht

Warmteoverdrachtscoëfficiënt

Deze coëfficiënt (α) bestaat uit drie componenten: straling (α_s), convectie (α_c)en verdamping (α_d). In de verwarmingstechniek speelt de verdamping geen rol en bij de voorkomende temperaturen kan met voldoende nauwkeurigheid worden gebruikt:

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_c$$

Warmteoverdrachtscoëfficiënt door straling

$$\alpha_s = C \cdot \frac{(T_1)^4 - (T_2)^4}{t_1 - t_2}$$

waarin:
C = resulterende stralingsconstante [W/(m$^2 \cdot$ K^4)]

$$T = \frac{\text{absolute temp.}}{100}\,[\text{K}]$$

t = temperatuur [°C]

Indien t_1 en t_2 niet te veel verschillen, mag gebruikt worden:

$$\alpha_s = 0,04 \cdot C \cdot (\theta_m)^3$$

waarin: θ_m = gemiddelde temperatuur

$$\theta_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Resulterende stralingsconstante

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_z}\right)$$

waarin:
C_1 = stralingsconstante warme oppervlak (A_1) [W/(m$^2 \cdot$ K^4)]
C_2 = idem koude oppervlak (A_2)
C_z = idem absolute zwarte straler
A = oppervlakte [m^2]

De C-waarde kan ontleend worden aan tabel 2.10. Wanneer A_2 veel groter is dan A_1 (bijv. voorzijde van een radiator ten opzichte van het vertrek), nadert $A_1 : A_2$ tot 0 en wordt $C = C_1$.

Indien $A_1 = A_2$ (bijv. achterzijde radiator ten opzichte van wand achter radiator), wordt:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_z}$$

Berekening warmteoverdrachtscoëfficiënt door convectie
Dit is niet mogelijk met een algemeen geldende formule; er moet bovendien onderscheid gemaakt worden tussen natuurlijke en gedwongen convectie.

Voor **natuurlijke convectie** kunnen de formules van *Nusselt* toegepast worden (luchttemperatuur ongeveer 20 °C):

- Voor verticale vlakken (cilindrisch en vlak):
  $\alpha_c = 2,6 \cdot \sqrt[4]{t_w - t_1} \quad W/(m^2 \cdot K)$
- Voor temperatuurverschillen kleiner dan 15 °C geldt:
  $\alpha_c = 3,5 + 0,09 \cdot (t_w - t_1) \quad W/(m^2 \cdot K)$

waarin:
t_w = wandtemperatuur [°C]
t_1 = luchttemperatuur [°C]

Beide formules gelden eveneens wanneer t_1 groter is dan t_w; het temperatuurverschil dient dan als $(t_1 - t_w)$ geschreven te worden.

Voor horizontale warme vlakken (lucht stijgt van het vlak op):

$$\alpha_c = 3,3 \cdot \sqrt[4]{t_w - t_1} \quad W/(m^2 \cdot K)$$

Voor warme pijpen in rustige lucht geeft *Wamsler* de formule:

$$\alpha_c = 1{,}11 \cdot \frac{(t_w - t_1)^{0{,}233}}{D^{0{,}3}} \quad \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

waarin: D = diameter pijp [m]

Voor **gedwongen convectie** geeft *Jürgess* voor platte vlakken de volgende benaderingsformules:

- Voor een lucht(wind)snelheid $\leqslant 5$ m/s:
  $\alpha_{glad} = 5{,}6 + 4{,}0 \cdot v \quad \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$
  $\alpha_{ruw} = 6{,}2 + 4{,}2 \cdot v \quad \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$
- Voor een snelheid >5 m/s:
  $\alpha_{glad} = 7{,}12 \cdot v^{0{,}78} \quad \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$
  $\alpha_{ruw} = 7{,}53 \cdot v^{0{,}78} \quad \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$

waarin: v = luchtsnelheid [m/s]

Voor pijpen geeft *Schack* de formule (luchtstromen loodrecht op de pijp):

$$\alpha_c = [4{,}7 + 0{,}0035 \cdot (t_w - t_1)] \cdot \frac{v^{0{,}61}}{D^{0{,}39}} \quad \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

Warmtedoorgangscoëfficiënt

Warmtedoorgangscoëfficiënt voor *vlakke* wanden k:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_u}$$

waarin:
k = Warmtedoorgangscoëfficiënt [W/(m^2 K)]
α = Warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/(m^2 K)]
(voor enkele veel voorkomende gevallen kan deze waarde ontleend worden aan tabel 2.6; voor de overige gevallen moet deze waarde berekend worden, zie hiervoor)

δ = wanddikte [m]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt van de wand [W/(m · K)] (zie tabel 2.7).

Warmtetransmissiescoëfficiënt voor *cilindrische* vlakken k_r:

$$\frac{1}{k_r} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i \cdot D_i} + \sum \frac{\ln(D_u/D_i)}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha_u \cdot D_u} \right)$$

waarin:
k_r = Warmtetransmissiecoëfficiënt voor cilindrische vlakken [W/(m · K)]
D_i = diameter gebogen vlak (intrede)[m]
D_u = diameter gebogen vlak (uittrede)[m]

Het *warmteverlies* bedraagt dan:
– Voor een vlakke wand:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (t_i - t_u)$$

– Voor een cilindrische wand:

$$\dot{Q} = k_r \cdot A \cdot (t_i - t_u)$$

waarin:
$\dot{Q}$ = warmteverlies via het vlak [W]
A = oppervlakte van de wand [m^2]
L = lengte van het cilindrische vlak [m]
t_i = hoogste begrenzingstemperatuur van het vlak [°C]
t_u = laagste begrenzingstemperatuur van het vlak [°C]

Verwarmend oppervlak (A) warmtewisselaar:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t_m$$

waarin:
$\dot{Q}$ = warmtebehoefte [W]
k = warmtedoorgangscoëfficiënt [W/(m^2 · K)]
Δt_m = gemiddeld temperatuurverschil [°C]

Het *gemiddeld temperatuurverschil* is afhankelijk van de toepassing van het tegenstroom- of gelijkstroomprincipe.

Tegenstroom:

$$\Delta t_{\mathrm{m}} = \frac{(t_{\mathrm{li}} - t_{2\mathrm{u}}) - (t_{\mathrm{lu}} - t_{2\mathrm{i}})}{\ln \dfrac{t_{\mathrm{li}} - t_{2\mathrm{u}}}{t_{1\mathrm{u}} - t_{2\mathrm{i}}}}$$

waarin:
t_1 = temperatuur verwarmend medium [°C]
t_2 = temperatuur te verwarmen medium [°C]
(index i: intrede; index u: uittrede)

Gelijkstroom:

$$\Delta t_{\mathrm{m}} = \frac{(t_{\mathrm{li}} - t_{2\mathrm{i}}) - (t_{\mathrm{lu}} - t_{2\mathrm{u}})}{\ln \dfrac{t_{\mathrm{li}} - t_{2\mathrm{i}}}{t_{1\mathrm{u}} - t_{2\mathrm{u}}}}$$

Vereenvoudigde berekening. Indien het getal waarvan in de twee bovenstaande uitdrukkingen de logaritme moet worden genomen, groter dan 0,6 is geldt:

$$\Delta t_{\mathrm{m}} = \frac{t_{\mathrm{li}} + t_{1\mathrm{u}}}{2} - \frac{t_{2\mathrm{i}} - t_{2\mathrm{u}}}{2}$$

Enkele overdrachtscoëfficiënten [W/(m$^2 \cdot$K)]:

- Gedwongen laminaire luchtstroming in buis:
  $\alpha = 5,15 \cdot \lambda / d$
- Gedwongen turbulente luchtstroming in buis:
  $\alpha = 4,4 v^{0,75}\ d^{-0,25}$
- Gedwongen waterstroom in buis voor $15 < d < 100$ mm:
  $\alpha = 3373\ v^{0,85}\ (1 + 0,014t)$

Tabel 1.3 Warmteoverdrachtscoëfficiënten

medium	α [W/(m$^2 \cdot$ K)]
water in rust	350–580
water, geforceerde stroming	580–2300
lucht in rust	8
lucht in beweging	30
condenserend water	11600
condenserend ammoniak	9300
condenserend R12, R22	2300

1.5 Verwarmingslichamen

Warmteverlies bij radiatoren:

$$\dot{Q} = \alpha_r \cdot f \cdot A \cdot t_0$$

waarin:
$\dot{Q}$ = warmteverlies van de ruimte (zonder toeslag voor afkoeling van het leidingnet)[W]
α_r = warmteoverdrachtsgetal van de radiator bij een over-temperatuur van 60°C [W/(m$^2 \cdot$ K)]
f = correctiefactor voor werkelijke over-temperatuur
A = oppervlakte [m^2]
t_0 = over-temperatuur [°C]
= verschil gemiddelde radiatortemperatuur en ruimte-temperatuur
= (hier, vaste waarde) 60°C

Correctiefactor bij globale berekeningen:

$$f = 0,02 \cdot t_0 - 0,2$$

waarin:
t_0 = hier werkelijke over-temperatuur [°C]

1.6 Leidingen

Afkoeling warme leidingen (leidingverlies)

Berekening van het *leidingverlies:*

$$\Delta t = \frac{k_r \cdot L \cdot (t_i - t_u)}{G \cdot c}$$

waarin:
Δt = afkoeling van het beschouwde leidingdeel [°C]
k_r = k-cijfer van het cilindrische vlak (berekening zie par. 1.3)
L = lengte van het beschouwde leidingdeel [m]
t_i = gemiddelde temperatuur in leidingdeel [°C] (met voldoende nauwkeurigheid kan hiervoor de begintemperatuur genomen worden)
t_u = temperatuur van de omgeving [°C]
G = hoeveelheid doorstromend water [kg/s]
c = soortelijke warmte [J/(kg · K)]

In leidingberekeningen wordt meestal gebruik gemaakt van de vergelijking:

$$\Delta t = \frac{fk \cdot L \cdot (t_i - t_u)}{G \cdot c}$$

waarin:
fk = waarde afhankelijk van diameter en temperatuur, zie tabel 2.8 [W/(m · K)]

Voor afkoeling van appendages, zie tabel 2.9.

Leidingberekening warmwaterverwarming

Met figuur 2.1 kan op basis van watersnelheid en diameter de weerstand per meter worden bepaald. Ook moeten de plaatselijke weerstanden in rekening worden gebracht. Voor weer-standsgetallen, zie tabel 2.11.

Met behulp van figuur 2.2 en de uit figuur 2.1 af te lezen snelheid (pag. G1/31 e.v.) kan het drukverlies worden bepaald.

1.7 Pompen

Opvoerhoogte

De *opvoerhoogte* (H_{man}) bestaat uit een geometrische opvoerhoogte (H_g) en een weerstandshoogte (H_w). Bij circulatiepompen is $H_{max} = H_w$ en bepaald door de som van plaatselijke- en wrijvingsweerstanden.

Debiet circulatiepompen

$$q_m = \frac{\dot{Q}}{c \cdot \Delta t}$$

waarin:
q_m = debiet [kg/s]
$\dot{Q}$ = warmtetransport in het leidingstelsel [W]
c = soortelijke warmte van de transportvloeistof [J/(kg · K)]
Δt = temperatuurverschil waarmee het systeem werkt [K] of [°C]

Asvermogen

$$P_p = \frac{q_v \cdot H}{\eta_p}$$

waarin:
P_p = vermogen [W]
q_v = debiet [m^3/s]
H = manometrische opvoerhoogte [Pa]
η_p = rendement van de pomp (tussen 30% en 80%, voor globale berekeningen aan te houden op 60%)

Motorvermogen

$$P_e = \frac{P_p}{\eta_e}$$

waarin:
P_e = motorvermogen [W]
η_e = rendement van de elektromotor

Verhouding toerental/debiet/opvoerhoogte en vermogen

$$\frac{q_{m1}}{q_{m2}} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

1.8 Gesloten expansievat

Bij het warmer worden van het water in de centrale verwarmingsinstallatie zal dit water uitzetten. Deze uitzetting wordt opgevangen in zgn. expansievaten. Er zijn:
- open expansievaten;
- gesloten expansievaten.

Berekening open vat

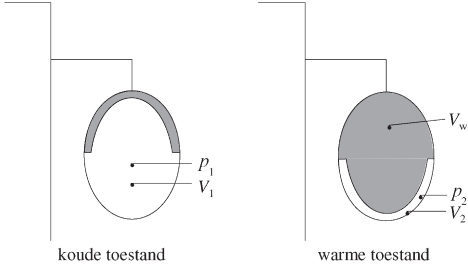
Bij een open expansievat moet het vat zich op het hoogste punt van de installatie bevinden. De inhoud moet groter zijn dan de maximale uitzetting van het CV-water in de installatie.

Berekening gesloten vat

Een gesloten vat is gescheiden middels een membraan, waarbij zich aan de ene zijde CV-water bevindt en aan de andere zijde lucht of stikstof (zie figuur 1.1). Bepaling van het vat volgens:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

waarin:
p_1 = absolute druk in koude toestand [bar]
V_1 = volume vat in koude toestand [m^3]
p_2 = absolute druk in warme toestand [bar]
V_2 = luchtvolume vat in warme toestand [m^3]



Figuur 1.1 Gesloten expansievat, koude (1) en warme toestand (2).

Het totale volume van het gesloten expansievat is:

$$V_1 = \frac{p_2}{p_2 - p_1} \cdot V_w \quad V_{tot} = 1{,}2 \cdot V_1 \quad [m^3]$$

waarin:

p_1 = statische hoogte tot het hoogste punt van de installatie + voordruk [min. 0,5 bar (0)]

V_w = max. uitzetting van water inhoud [90°] – inhoud [20°]

1.9 Schoorsteenberekeningen

Schoorstenen zijn onder te verdelen in afvoerkanalen en afvoerleidingen (zie NEN 1078 Voorschriften voor aardgasinstallaties). De kanalen en leidingen verbinden de stookruimte met de buitenlucht en zorgen zo voor de natuurlijke afvoer van verbrandingsgassen.
De afmetingen van de kanalen en leidingen zijn te vinden in de NEN 1078 en zijn afhankelijk van de belasting van de toestellen en de hoogte van de schoorsteen.

Schoorsteenmaterialen

Naast speciale schoorsteenelementen (Plewa, Chamotte) past men de volgende materialen toe voor:

- *Gasgestookte installaties:* corrosievast staal, roestvrij staal, aluminium.
- *Oliegestookte installaties*: roestvrij staal.

Voor kanalen kunnen ook bouwkundige schoorsteenelementen worden toegepast.

Schoorstenen voor grote vermogens

Bij schoorstenen voor grote vermogens t.b.v. olie- en/of gasgestookte installaties waarbij ketels met gesloten verbrandingsruimten worden toegepast, geldt:

- Gebruikelijke rookgassnelheden 5 tot 15 m/s.
- Begintemperatuur (is uittrede-temperatuur vuurhaard) 200 tot 250 °C.
- Rookgashoeveelheden ca. $10 \times \dot{V}$ aardgas $[m_n^3/s]$.
- Bij gasmotoren ca. $15 \times \dot{V}$ aardgas $[m_n^3/s]$.

De *schoorsteentrek* moet zo groot zijn dat de weerstandsverliezen overwonnen kunnen worden.

Afkoeling
Bij oliegestookte installaties en in mindere mate bij gasgestookte, mag de rookgastemperatuur aan het einde van de schoorsteen niet te laag worden. Dit in verband met condensatie en de corrosie die daardoor kan ontstaan. Bij oliegestookte installaties moet de rookgastemperatuur meer dan 165 °C zijn. Daarom moet de schoorsteen worden geïsoleerd.

1.10 Ventilatie en veiligheid ketelhuizen

De NEN 3028 Veiligheidseisen voor centrale verwarmings-installaties, onderscheidt:
- *Stookruimten*: geschikt voor het opstellen van installaties met een vermogen van *meer* dan 130 kW (fabrieken, kantoren, utiliteitsbouw).
- *Opstellingsruimten*: geschikt voor het opstellen van installaties met een vermogen van *minder* dan 130 kW of installaties in werkplaatsen (woningen e.d.).

De NEN 3028 behandelt in hoofdzaak de ventilatie, brandtechnische zaken, vluchtwegen,elektrotechnische richtlijnen, schoorstenen en opslag van brandstoffen. Met de grafieken uit deze norm kunnen ventilatie-luchthoeveelheden worden bepaald.
De ventilatie in een ketelhuis dient om:
- voldoende verbrandingslucht toe te voeren;
- de temperatuur in de ruimte niet te hoog te laten worden (30–35 °C);
- het ketelrendement hoog te houden.

Verder geldt voor gasgestookte installaties de NPR 3036 Voorschriften voor aardgasinstallaties.
De *geluidsdemping* in een ketelruimte moet zo zijn dat men er in de rest van het gebouw geen overlast van ondervindt. Geluidsniveaus:
- woonkamer 30 dB(A);
- kantoren 35 dB(A).

De *geluidsuitstraling* naar buiten via de schoorsteen en/of ventilatieroosters moet zo worden begrensd, dat aan de milieuwet wordt voldaan.

2 Gegevens centrale verwarming

2.1 Overzicht

Tabel 2.1 Ventilatie-eisen volgens NEN 1087
Tabel 2.2 Richtwaarden voor de ontwerp-binnentemperatuur
Tabel 2.3 Ventilatievoud (binnenland)
Tabel 2.4 Verbrandingswaarden brandstoffen
Tabel 2.5 Stralingsconstanten
Tabel 2.6 Warmteoverdrachtscoëfficiënten
Tabel 2.7 Geleidingscoëfficiënten luchtspouwen
Tabel 2.8 *fk*-waarden van ongeïsoleerde leidingen
Tabel 2.9 Afkoeling appendages
Tabel 2.10 Dichtheid water
Tabel 2.11 Weerstandsgetallen water en stoom

Figuur 2.1 Leidingweerstands-grafiek
Figuur 2.2 Plaatselijke weerstanden water

2.2 Tabellen en grafieken

Tabel 2.1 Ventilatie-eisen volgens NEN 1087 (1986)

ruimte	volumestroom min. q_v [m^3/s]
woonkamer	0,001 per m^2 vloeroppervlakte min. 0,021 max. 0,042
keuken keuken in open verbinding met 'andere ruimten'	0,021 0,021 + ventilatie-eisen van de 'andere ruimten' max. 0,042 voor de gecombineerde ruimte
slaapkamer, hobbykamer	0,001 per m^2 vloeroppervlakte min. 0,007
badkamer, wasruimte, droogruimte	0,014
toilet	0,007
zolder of bergruimte met vloer-oppervlak $\geq$ 1,5 m^2 en hoogte $>$ 2m	0,001 per m^2 vloeroppervlakte min. 0,007
garage	0,003 per m^2 vloeroppervlakte

Tabel 2.2 Richtwaarden voor de ontwerp-binnentemperatuur (= operatieve temperatuur)

vertrek	t_i [°C]	vertrek	t_i [°C]
Woningen		*Ziekenhuizen, verpleegtehuizen*	
– verblijfsruimte	20	– verpleegkamers, behandelings-, spreeken onderzoeksruimten	22
– verblijfsgebied	20		
– badruimte	22	– verblijfplaatsen personeel	20
– verkeersruimte	15	– gangen	18
– toiletruimte	15	– toiletten patiënten	18
– technische ruimte (niet zijnde stookruimte)	10	– toiletten personeel	15
– onbenoemde ruimte	10		
– bergruimte	10	*Scholen*	
		– klaslokalen	20
Kantoren		– gymnastieklokalen:	
– kantoorvertrekken en andere ruimten waar personeel verblijft	20	• alleen gymnastiek	15
		• met functioneel karakter	20
– gangen, archiefruimten	15	– docentenkamers	20
– toiletten	10	– bergruimten voor leermiddelen	12
		– gangen	15
Bejaardenwoningen en verzorgingstehuizen		– toiletten	10
– verblijfsruimte	22	*Fabrieken*	
– verblijfsgebied	22	– werkplaatsen voor fijn en/of zittend werk	20
– badkamer	25	– personeelsruimten	20
– toilet	18	– toiletten	10
– verkeersruimte	18		

Tabel 2.3 Richtwaarden voor de specifieke opwarmtoeslag in W/m^2 bij een opwarmtijd van 1,2, 3 of 4 uur

	afkoeling bij 8-urige nachtverlaging [K]				
opwarmtijd	1 K	1,5 K	2 K	2,5 K	3 K
1 uur	2,5	3,7	5	7,5	10
2 uur	1,2	1,7	2,5	3,7	5
3 uur	1	1,5	2	3	3,5
4 uur	0,5	1	1,5	2,3	3

Tabel 2.4 Verbrandingswaarden H van diverse brandstoffen

brandstof	dichtheid [kg/m^3]	verbrandings-waarde H_0 [MJ/kg]
steenkool	700–900[1] (1250–1400)[2]	30–32
bruinkool	600–800[1] (1050–1250)[2]	15–20
turf: droog	320–400[1] (160–200)[2]	11–14
geperst	(200–400)[2]	15–17
hout: vers		10,5
luchtdroog		15
beukenhout		20
zaagsel		9,5–14.5
papier		13,5
olie: dieselolie	835	42,5
lichte olie	880	42
middel-zwaar	920	41
zware olie	970	40
benzine	725	43
aardgas (Slocht.)	0,781	32 MJ/m$_n^3$*

[1] Volumegewicht (stortgewicht).
[2] Massagewicht.
*$m_n^3 = m_0^3$ = normaal m^3

Tabel 2.5 Stralingsconstanten C [W/(m$^2 \cdot$ K^4)]

materiaal	C	materiaal	C
absoluut zwart lichaam	5,67	metalen, gepolijst,	
aluminium, ruw	0,45	edel	0,23
aluminiumverf	2,21	niet-edel	0,29
asbest-cement	5,58	papier	5,47
baksteen, rood, ruw	5,41	plaatijzer,	
emaillelak, wit	5,23	rood verroest	3,95
gips	5,23	ruw	4,48
glas	5,47	verzinkt	1,45
hout, geschaafd	5,12	pleisterwerk	5,23
koper, geoxideerd	4,54	radiatorlak	5,35
		stucwerk	5,23
		tegels, geglazuurd	5,00

Tabel 2.6 Warmteoverdrachtscoëfficiënten α [W/(m$^2 \cdot$ K)]

	α
warmteverliesberekeningen	
wanden:	
– binnenzijde	8
– buitenzijde	23
vloeren en plafonds:	
– warmtetransport naar boven	8
– warmtetransport naar beneden	6
warmtewisselaars	
overgang:	
– metaal-lucht	$2{,}5 + 11{,}5 \cdot \sqrt{v}$
– metaal-water	$350 + 2100 \cdot \sqrt{v}$
– metaal-condenserende stoom	7000

$v =$ snelheid water of lucht [m/s]

Tabel 2.7 Equivalente λ*-waarde voor luchtspouwen* [W/(m $\cdot$ k)]

	dikte van de laag [cm]						
	1	2	4	8	10	15	20
horizontaal:							
– warme zijde boven	0,064	0,106	0,187	0,350	0,430	0,632	0,837
– warme zijde onder	0,066	0,131	0,252	0,492	0,616	0,913	1,210
verticaal	0,065	0,115	0,221	0,448	0,564	0,861	1,163

Tabel 2.8 fk-waarden van ongeïsoleerde leidingen [W/(m · K)]

diameter	over-temperatuur [°C]					
	10–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–100
[inch]	**draadpijp**					
3/8″	0,64	0,68	0,71	0,73	0,77	0,77
1/2″	0,87	0,92	0,95	1,00	1,05	1,05
3/4″	1,05	1,11	1,15	1,21	1,24	1,24
1″	1,34	1,40	1,45	1,51	1,59	1,59
$1\frac{1}{4}$″	1,42	1,49	1,57	1,65	1,72	1,81
$1\frac{1}{2}$″	1,59	1,68	1,77	1,85	1,94	2,02
2″	1,92	2,02	2,13	2,27	2,35	2,48
[mm]	**vlampijp**					
51	1,75	1,95	2,06	2,16	2,16	2,16
57	1,93	2,16	2,28	2,40	2,40	2,40
64	2,18	2,43	2,56	2,69	2,69	2,69
70	2,35	2,63	2,77	2,91	2,91	2,91
76	2,59	2,90	3,05	3,20	3,20	3,20
82	2,76	3,08	3,25	3,41	3,41	3,41
88	2,93	3,28	3,45	3,62	3,62	3,62
94	2,98	3,35	3,54	3,72	3,72	3,72
100	3,14	3,54	3,73	3,93	3,93	3,93
106	3,32	3,72	3,93	3,93	3,94	3,94
113	3,54	3,98	4,20	4,20	4,20	4,20
119	3,70	4,16	4,40	4,40	4,40	4,40
125	3,88	4,37	4,62	4,62	4,62	4,62
131	4,08	4,59	4,85	4,85	4,85	4,85
143	4,42	4,98	5,23	5,23	5,23	5,23
150	4,61	5,18	5,46	5,46	5,46	5,46
162	4,99	5,29	5,61	5,61	5,61	5,61
180	5,55	5,90	5,90	5,90	5,90	5,90
203	6,28	6,69	6,69	6,69	6,69	6,69
228	7,04	7,47	7,47	7,47	7,47	7,47
253	7,79	8,26	8,26	8,26	8,26	8,26

Tabel 2.9 Toeslag voor afkoeling appendages

appendage	rekenen met
niet geïsoleerde flens	3 m geïsoleerde leiding
wel geïsoleerde flens	1 m geïsoleerde leiding
niet geïsoleerde afsluiter	7 m geïsoleerde leiding
wel geïsoleerde afsluiter	3 m geïsoleerde leiding
voor ophangbeugels enz.	10% totale leidinglengte

Tabel 2.10 Dichtheid water ρ [kg/m^3]

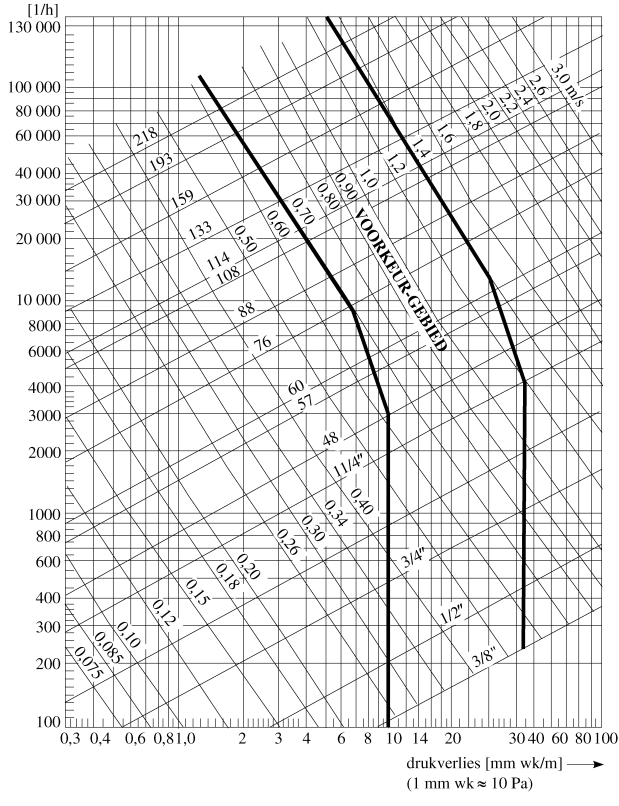
°C	ρ	°C	ρ	°C	ρ	°C	ρ	°C	ρ
0	999,87	20	998,23	40	992,24	60	983,24	80	971,83
1	999,93	21	998,02	41	991,86	61	982,72	81	971,21
2	999,97	22	997,80	42	991,47	62	982,20	82	970,57
3	999,99	23	997,57	43	991,07	63	981,67	83	969,96
4	1000,–	24	997,33	44	990,66	64	981,13	84	969,30
5	999,99	25	997,07	45	990,25	65	980,59	85	968,65
6	999,97	26	996,81	46	989,82	66	980,05	86	968,–
7	999,93	27	996,54	47	989,40	67	979,50	87	967,34
8	999,88	28	996,26	48	988,96	68	978,94	88	966,68
9	999,81	29	995,97	49	988,52	69	978,38	89	966,01
10	999,73	30	995,68	50	988,07	70	977,81	90	965,34
11	999,63	31	995,37	51	987,62	71	977,23	91	964,67
12	999,52	32	995,05	52	987,15	72	976,66	92	963,99
13	999,40	33	994,73	53	986,69	73	976,06	93	963,30
14	999,27	34	994,40	54	986,21	74	975,48	94	962,61
15	999,13	35	994,06	55	985,73	75	974,89	95	961,92
16	998,97	36	993,71	56	985,25	76	974,29	96	961,22
17	998,80	37	993,36	57	984,75	77	973,68	97	960,51
18	998,63	38	992,99	58	984,25	78	973,07	98	959,81
19	998,43	39	992,62	59	983,75	79	972,45	99	959,09
20	998,23	40	992,24	60	983,24	80	971,83	100	958,38

Tabel 2.11 Weerstandsgetallen[1)] *(warmwater en lagedrukstroom)*

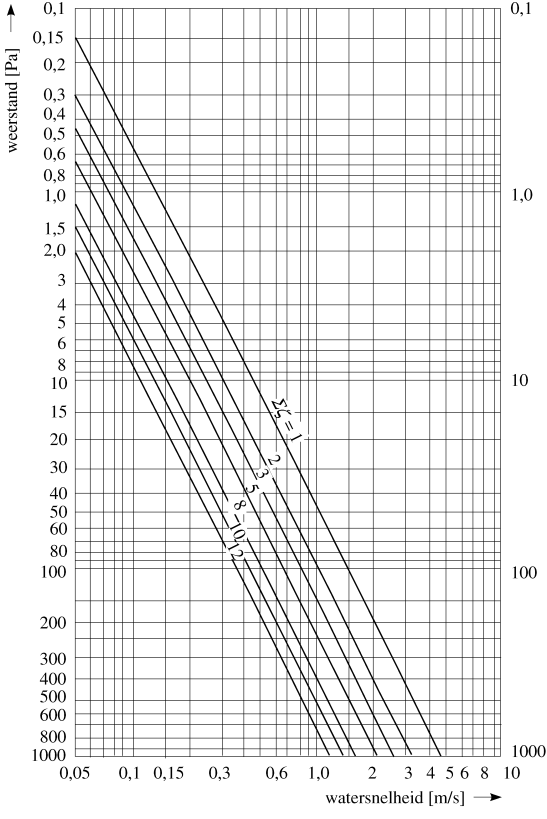
sok	0	verwijding	1
dubbelbocht (5-D)	1	vernauwing	0,5
dubbelbocht (3-D)	2	radiator grote waterinhoud	2
T-doorgang	1	radiator grotere waterinhoud	2
T-aftakking	1,5	ketel	2,5
T-tegenstroom	3	kortsluitstuk éénpijp	1
broekstuk	1,5		

diameter [″]: 3/8 ÷ 1/2	3/4 ÷ 1	$1\frac{1}{4} \div 1\frac{1}{2}$	≥2
knie	2	1,5	1	1
bocht 90°	1,5	1	0,5	0,5
schuifafsluiter	1	0,5	0,3	0,3
vrijstroomafsl.	3	3	2,5	2
zittingafsl.	16	12	9	7
radiatorkraan				
recht	1,5	1	1	
haaks	4	2	3	
radiatorventiel				
recht	8,5	6	7	
haaks	4	2	3,5	

[1)] Ook *weerstandscoëfficiënt of verliesfactor.*



Figuur 2.1 Leidingweerstands-grafiek voor bepaling van leidingdiameter voor CV-leidingen bij pompcirculatie (stalen buis)



Figuur 2.2 Globale bepaling van de weerstand Z voor verschillende weerstandscoëfficiënten ξ

3 Klimaatregeling algemeen[1)]

3.1 Ventilatie

Ventilatievoud: aantal verse-lucht wisselingen per uur.
Circulatievoud: aantal luchtwisselingen per uur.

Woongebouwen

De NEN 1087 Ventilatie van woongebouwen,met de daarbij behorende NPR 1088 Nederlandse Praktijk Richtlijnen, behandelt de ventilatie-eisen voor woningen, bejaardentehuizen enz. In principe zijn vier systemen mogelijk:

- Natuurlijke ventilatie, hierbij wordt de lucht ververst via natuurlijke trek en/of winddrukken. Dit is toegestaan voor vrijstaande woningen en voor gestapelde laagb1ouw tot een hoogte van 13 meter (systeem A).
- Mechanische toevoer en natuurlijke afvoer. Toegestaan voor dezelfde omstandigheden als bij natuurlijke ventilatie (systeem B).
- Mechanische afvoer en natuurlijke toevoer (systeem C).
- Mechanische toe-en afvoer (systeem D).

Ventilatie-luchthoeveelheden [m^3/h]:

- Woonkamer minimaal 75 en maximaal 150.
- Keuken 75; open keuken ca. 150 uitsluitend mechanisch.
- W.C. 25.
- Douche/badkamer 50.
- Woonhuis gemiddeld: maximaal 225 en minimaal 150.

Opmerking: volledig mechanische systemen hebben het voordeel dat warmteterugwinning mogelijk is.

Andere gebouwen

Voor kantoren geldt een minimale ventilatie-luchthoeveelheid van 35 m^3/h per persoon, gemiddeld 50 m^3/h per persoon (zie ook Bouwbesluit). Tabel 3.1 geeft voor verschillende ruimten enige *richtwaarden* die niet als absolute getallen gehanteerd mogen worden.

[1)] Zie ook hoofdstuk F4 *Bouwfysica*.

Verder te hanteren richtlijnen zijn bijvoorbeeld de:
- horecawet voor restaurants, café's enz.;
- veiligheidsrichtlijnen van de arbeidsinspectie voor werkplaatsen, parkeergarages, laboratoria, enz.;
- scholen (zie NPR 1090).

Tabel 3.1 Richtwaarden voor ventilatie en circulatie

soort ruimte	circulatievoud	ventilatievoud c.q. ventilatieluchthoeveelheid
kantoren	3–4	1,5–2
badkamer	5–8	50–100 m^3/h
bibliotheek	3–6	35 m^3/h per persoon
winkels	4–8	
laboratoria	8–15	4–15
zwembad	3–6	minimaal 3
warenhuizen	4–6	
werkplaatsen	4–6	
restaurant	6–8	minimaal 3

De luchthoeveelheid moet bepaald worden op basis van:
- de minimale benodigde ventilatie van de af en/of toe te voeren hoeveelheid warmte;of
- de luchthoeveelheden nodig voor puntafzuigen, zuurkasten, lascabines enz.

3.2 Koellastberekening

De hieronder beschreven *koellastberekening* is sterk vereenvoudigd. *Uitgebreidere* methodes zijn:
- NEN 5067 (koellastberekening voor gebouwen);
- VDI (Kühlastberechnung);
- VABI–VA 102 (computerprogramma).

Om een luchtbehandelingsinstallatie te dimensioneren is het nodig te berekenen hoeveel warmte moet worden afgevoerd.

Deze warmtehoeveelheid is als volgt op te splitsen:
- Externe warmtelast $\dot{Q}_E$ die bestaat uit:
  - directe zoninstraling door vensters $\dot{Q}_Z$;
  - binnenkomende warmte door wanden, daken enz. $\dot{Q}_{TR}$
- Interne warmtelast $\dot{Q}_I$.

Zoninstraling

$$\dot{Q}_Z = A \cdot b \cdot I \cdot d$$

waarin:
A = beschenen oppervlakte [m^2]
b = schaduwfactor (zie tabel 3.2)
I = binnentredende zonnewarmte op een bepaald tijdstip door enkel glas (zie tabel 3.3) [W/m^2]
d = dempingsfactor afhankelijk van gebouwmassa en bedrijfstijd (zie tabel 3.4)

Wanneer het raam beschaduwd is of niet door de zon wordt beschenen geldt:

$$\dot{Q}_Z = A \cdot b \cdot I_{diff.} \cdot d$$

waarin:
$I_{diff.}$ = zonistraling t.g.v. de diffuse straling (neem hiervoor de zoninstraling op de noordgevel op het beschouwde tijdstip)

Warmtetoetreding door transmissie

$$\dot{Q}_{TR} = A \cdot k \cdot (t_{fict} - t_i)$$

waarin:
A = oppervlakte [m^2]
k = warmtetransmissiecoëfficiënt [$W/(m^2 \cdot K)$]
t_{fict} = fictieve oppervlaktetemperatuur ten gevolge van de opvallende zonnestraling. Hierbij geldt voor een:
  - donker aangestraald vlak $t_{fict} = t_u + 15\,^\circ C$
  - licht aangestraald vlak $t_{fict} = t_u + 10\,^\circ C$
  - niet aangestraald vlak $t_{fict} = t_u$

t_u = buitentemperatuur
t_i = binnentemperatuur [°C] (stel voor niet geconditioneerde ruimten de binnentemperatuur 5 °C hoger dan de ruimtetemperatuur in het geconditioneerde vertrek)

Interne warmtelast

$$\dot{Q}_I = \dot{Q}_P + \dot{Q}_v + \dot{Q}_a$$

waarin:
$\dot{Q}_P$ = warmteafgifte door personen; bij een omgevingstemperatuur van 24 °C gelden per persoon de volgende warmteafgiftes:
- bij zittend werk 75 W voelbaar ('voelbaar': zonder verdamping)
- bij middelzwaar werk 110 W

$\dot{Q}_v$ = warmteafgifte door verlichting [W](bij afgezogen verlichting ca. de helft in rekening brengen)
$\dot{Q}_a$ = warmteafgifte door apparatuur [W]

$$Q_{tot(voelbaar)} = Q_z + Q_{TV} + Q_i$$

waarin:
Q_z = warmteafgifte door de zon [W]
Q_{tv} = warmteafgifte door transmissie [W]
Q_i = interne warmteafgifte [W]

Tabel 3.2 Schaduwfactor b bij verschillende glassoorten en zonweringen

soort		*b*
enkel glas		1
dubbel glas		0,9
absorptie glas	– enkel	0,7
	– dubbel met buitenschijf absorptie	0,6
buiten aangebrachte absorptieschijf en luchtspouw 5 cm		0,5
reflectie glas	– enkel (metaaloxide buiten)	0,6
	– dubbel (met metaaloxide)	0,5
	– dubbel (met edel metaal)	0,4
buitenzonwering	– jaloezieën	0,15
	– markiezen	0,3
tussenglasschijven	– jaloezieën (niet geventileerd)	0,5
	– jaloezieën (geventileerd)	0,15
binnenzonwering	– jaloezieën	0,7
	– voorhang kelder unit	0,5
	– kunststof folieën	0,7

Tabel 3.3 Zoninstraling I op het aangegeven tijdstip door enkel glas (afgeleid van VDI2078) [W/m^2]

		zonnetijd												
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18 h
20 febr	NO		33	85	52	65	72	77	72	65	51	29	2	
$T = 3,0$	O		76	341	414	348	185	77	72	65	51	29	2	
	ZO		72	377	572	654	607	494	352	134	51	29	2	
	Z		21	198	398	561	662	694	662	561	398	198	21	
	ZW		2	29	51	134	352	494	606	654	572	377	72	
	W		2	29	51	65	72	77	185	348	414	341	76	
	NW		2	29	51	65	72	77	72	65	52	85	33	
	N		2	29	51	65	72	77	72	65	51	29	2	
	Horiz		4	62	172	279	350	378	350	279	172	62	3	
22 maart	NO		209	193	102	87	95	98	95	87	73	56	33	
$T = 3,3$	O		363	516	520	409	221	98	95	87	73	56	33	
	ZO		311	523	641	669	612	483	278	118	73	56	33	
	Z		65	223	399	546	636	666	636	546	399	223	65	
	ZW		33	56	73	118	278	483	612	669	641	523	311	
	W		33	56	73	87	95	98	221	409	520	516	363	
	NW		33	56	73	87	95	98	95	87	102	193	209	
	N		33	56	73	87	95	98	95	87	56	33	33	
	Horiz		74	194	334	459	543	556	543	459	334	194	74	
20 april	NO	243	335	297	172	104	111	114	111	104	92	76	54	30
$T = 3,6$	O	298	497	591	558	427	235	114	111	104	92	76	54	30
	ZO	188	382	539	618	619	551	408	226	105	92	76	54	30
	Z	30	61	166	325	463	546	580	546	463	325	166	61	30
	ZW	30	54	76	92	105	226	408	551	619	618	538	381	188
	W	30	54	76	92	104	111	114	235	427	541	590	564	379
	NW	30	54	76	92	104	111	114	111	104	172	297	335	243
	N	42	54	76	92	104	111	114	111	104	92	76	53	42
	Horiz	63	171	335	487	593	664	695	664	593	487	335	171	63
21 mei	NO	336	420	351	220	122	127	128	127	119	107	90	70	47
en	O	379	564	590	541	413	252	128	127	119	107	90	70	47
23 juli	ZO	209	391	497	555	541	469	337	177	119	107	90	70	47
$T = 4,0$	Z	47	70	126	245	393	435	471	435	393	245	126	70	47
	ZW	47	70	90	107	119	178	337	469	541	555	497	392	209
	W	47	70	90	107	119	127	128	252	413	541	590	564	379
	NZ	47	70	90	107	119	127	128	127	122	220	351	420	336
	N	92	72	90	107	119	127	128	127	119	107	90	72	92
	Horiz	123	279	421	570	682	746	766	746	682	570	421	279	123

T = vertroebelingsfactor(in grote stad 3–4)
N.B.Waarden gelden voor instraling op verticale vlakken.

Tabel 3.3 (vervolg)

		zonnetijd												
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18 h
21 juni	NO	380	436	375	247	134	127	129	127	121	108	93	74	55
$T = 4{,}0$	O	415	556	594	544	415	235	129	127	121	108	93	74	55
	ZO	215	368	480	528	514	437	307	177	121	108	93	74	55
	Z	55	74	112	209	322	398	429	398	322	209	112	74	55
	ZW	55	74	93	108	121	171	307	437	514	528	480	368	215
	W	55	74	93	108	121	127	129	235	415	544	594	556	415
	NW	55	74	93	108	121	127	129	127	132	247	375	436	380
	N	122	86	93	108	121	127	129	127	121	108	93	86	122
	Horiz	161	302	463	592	710	769	787	769	710	592	463	302	161
24 aug.	NO	216	313	284	169	105	112	115	112	105	93	76	55	30
$T = 3{,}9$	O	265	459	559	534	412	230	115	112	105	93	76	55	30
	ZO	169	355	509	602	594	531	397	221	115	93	76	55	30
	Z	30	61	162	313	447	530	561	530	447	313	162	61	30
	ZW	30	55	76	93	115	221	397	532	594	602	509	355	169
	W	30	55	76	93	105	112	115	230	412	534	559	459	265
	NW	30	55	76	93	105	112	115	112	105	169	284	313	216
	N	41	55	76	93	105	112	115	112	105	93	76	55	41
	Horiz	61	165	323	471	575	644	675	644	575	471	323	165	61
22 sept.	NO		184	175	101	88	97	99	97	88	74	57	33	
$T = 3{,}7$	O		313	485	484	387	214	99	97	88	74	57	33	
	ZO		269	455	594	628	578	457	266	116	74	57	33	
	Z		61	200	372	513	600	630	600	513	372	200	61	
	ZW		33	57	74	116	266	457	578	628	594	455	269	
	W		33	57	74	88	97	99	214	387	484	485	313	
	NW		33	57	74	88	97	99	97	88	101	175	184	
	N		33	57	74	88	97	99	97	88	74	57	33	
	Horiz		72	183	318	439	519	531	519	439	318	183	72	
23 okt.	NO		22	78	54	66	76	78	76	66	52	30	2	
$T = 3{,}4$	O		52	294	376	325	179	78	76	66	52	30	2	
	ZO		50	326	518	592	569	464	334	128	52	30	2	
	Z		15	173	362	518	619	648	619	518	362	173	15	
	ZW		2	30	52	128	334	464	569	592	518	326	50	
	W		2	30	52	66	76	78	179	324	376	294	52	
	NW		2	30	52	66	76	78	76	66	54	78	22	
	N		2	30	52	66	76	78	76	66	52	30	2	
	Horiz		3	61	165	266	335	362	335	266	165	61	3	

Tabel 3.4 Dempingfactor d voor een licht gebouw (VDI 2078)

juli		zonnetijd																	
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22h
geen zonwering of buiten-zonwering	NO	0,19	0,45	0,61	0,62	0,49	0,38	0,34	0,32	0,31	0,30	0,28	0,24	0,21	0,16	0,11	0,06	0,04	0,03
	O	0,09	0,32	0,51	0,64	0,67	0,59	0,43	0,31	0,27	0,24	0,21	0,18	0,16	0,12	0,09	0,05	0,04	0,03
	ZO	0,03	0,17	0,35	0,53	0,65	0,71	0,67	0,55	0,39	0,31	0,26	0,22	0,18	0,14	0,10	0,06	0,04	0,03
	Z	0,03	0,07	0,10	0,15	0,26	0,43	0,57	0,68	0,69	0,63	0,49	0,35	0,25	0,19	0,13	0,13	0,05	0,04
	ZW	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,33	0,50	0,64	0,70	0,70	0,60	0,45	0,25	0,14	0,09	0,07
	W	0,03	0,06	0,09	0,12	0,14	0,16	0,18	0,19	0,23	0,40	0,56	0,67	0,68	0,58	0,38	0,18	0,12	0,08
	NW	0,03	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,26	0,27	0,28	0,28	0,34	0,52	0,66	0,66	0,49	0,24	0,14	0,09
	N	0,02	0,32	0,34	0,44	0,53	0,62	0,67	0,71	0,73	0,72	0,67	0,61	0,51	0,46	0,46	0,22	0,12	0,07
binnen-zonwering	NO	0,31	0,64	0,79	0,72	0,50	0,36	0,35	0,34	0,34	0,32	0,29	0,25	0,20	0,15	0,08	0,03	0,02	0,02
	O	0,16	0,27	0,69	0,81	0,78	0,62	0,39	0,28	0,25	0,23	0,21	0,18	0,14	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01
	ZO	0,04	0,26	0,49	0,69	0,80	0,83	0,74	0,54	0,34	0,28	0,24	0,20	0,16	0,12	0,07	0,03	0,02	0,02
	Z	0,04	0,09	0,13	0,20	0,35	0,57	0,73	0,83	0,79	0,68	0,48	0,30	0,22	0,15	0,09	0,04	0,03	0,02
	ZW	0,04	0,08	0,12	0,15	0,18	0,21	0,25	0,43	0,65	0,80	0,83	0,78	0,62	0,41	0,15	0,08	0,05	0,04
	W	0,03	0,07	0,11	0,14	0,17	0,19	0,21	0,21	0,29	0,52	0,72	0,83	0,78	0,61	0,31	0,10	0,06	0,04
	NW	0,04	0,10	0,16	0,21	0,25	0,29	0,31	0,32	0,32	0,31	0,42	0,67	0,82	0,76	0,47	0,13	0,07	0,05
	N	0,36	0,41	0,44	0,56	0,67	0,77	0,83	0,85	0,85	0,82	0,75	0,65	0,53	0,49	0,50	0,13	0,07	0,03

Tabel 3.4 (vervolg)

September		zonnetijd																	
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22h
geen zonwering of buiten-zonwering	NO	0,0	0,0	0,42	0,52	0,45	0,42	0,45	0,47	0,46	0,44	0,40	0,33	0,24	0,11	0,05	0,03	0,01	0,0
	O	0,0	0,01	0,27	0,52	0,63	0,59	0,41	0,29	0,24	0,21	0,18	0,15	0,11	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01
	ZO	0,01	0,01	0,17	0,39	0,56	0,66	0,68	0,60	0,44	0,29	0,22	0,16	0,12	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02
	Z	0,02	0,02	0,04	0,14	0,29	0,46	0,60	0,69	0,71	0,65	0,54	0,38	0,23	0,14	0,09	0,06	0,05	0,04
	ZW	0,01	0,01	0,04	0,06	0,09	0,11	0,21	0,39	0,55	0,66	0,69	0,62	0,47	0,22	0,14	0,09	0,06	0,05
	W	0,01	0,01	0,03	0,07	0,10	0,13	0,15	0,16	0,21	0,41	0,60	0,66	0,57	0,27	0,15	0,09	0,06	0,04
	NW	0,0	0,0	0,06	0,17	0,26	0,33	0,40	0,43	0,44	0,43	0,42	0,55	0,67	0,31	0,15	0,08	0,04	0,02
	N	0,0	0,0	0,08	0,24	0,38	0,50	0,59	0,65	0,67	0,65	0,59	0,49	0,35	0,14	0,07	0,02	0,0	0,0
binnen-zonwering	NO	0	0,02	0,68	0,67	0,51	0,50	0,54	0,56	0,54	0,50	0,45	0,35	0,22	0,06	0,03	0,01	0,01	0,0
	O	0,0	0,02	0,44	0,72	0,80	0,65	0,38	0,26	0,23	0,20	0,18	0,14	0,09	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
	ZO	0,01	0,01	0,28	0,55	0,74	0,82	0,78	0,64	0,41	0,24	0,18	0,13	0,09	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01
	Z	0,01	0,01	0,06	0,20	0,41	0,60	0,76	0,83	0,82	0,70	0,54	0,33	0,16	0,07	0,05	0,03	0,03	0,02
	ZW	0,01	0,01	0,05	0,08	0,11	0,14	0,28	0,52	0,71	0,82	0,81	0,68	0,44	0,12	0,07	0,05	0,03	0,02
	W	0,0	0,0	0,05	0,10	0,13	0,16	0,18	0,19	0,27	0,56	0,78	0,80	0,60	0,16	0,08	0,05	0,03	0,02
	NW	0,0	0,0	0,12	0,26	0,37	0,44	0,50	0,54	0,53	0,50	0,49	0,69	0,82	0,19	0,07	0,04	0,02	0,01
	N	0,0	0,0	0,19	0,40	0,56	0,68	0,76	0,82	0,80	0,76	0,66	0,53	0,33	0,08	0,03	0,01	0,0	0,0

3.3 Mollier- of h-X-diagram

Mollier-diagram voor vochtige lucht

Het *Mollier-diagram* is een belangrijk hulpmiddel bij het berekenen van de grootheden voor luchtbehandelingsinstallaties (zie figuur 3.1).

Het geeft voor één kg lucht de relaties weer tussen:
- de warmte-inhoud h van de lucht;
- het vochtigheidsgehalte X van de lucht;
- de temperatuur en relatieve vochtigheid bij een atmosferische druk van 1013 mbar.

Begrippen

Droge-bol temperatuur: de luchttemperatuur gemeten met een thermometer.

Natte-bol temperatuur: de temperatuur gemeten met de natte-bol-thermometer, ofwel die temperatuur die ontstaat na een maximale bevochtiging van de lucht met water van omgevingstemperatuur.

Dauwpunts-temperatuur: de temperatuur van de afgekoelde lucht zonder toe- of uittreding van vocht tot die waarde waarbij condensatie optreedt.

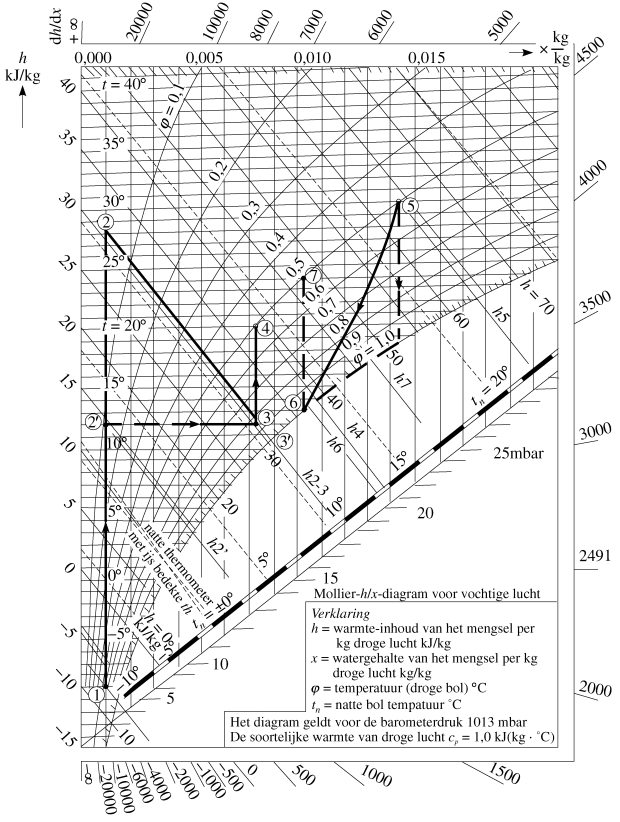
Soortelijke enthalpie: warmte-inhoud van de lucht [kJ/kg].

Absolute vochtigheid: vochtgehalte van de lucht in kg per kg lucht.

Relatieve vochtigheid (*R.V.*): verhouding van de optredende par-tiële dampspanning en de maximale dampspanning bij een bepaalde temperatuur.
Of in de praktijk: de verhouding van de heersende absolute vochtigheid en de maximale hoeveelheid vocht per kg lucht bij een bepaalde temperatuur.

Randschaal: $\Delta h/\Delta X$, deze verhouding geeft de richting van een bepaald proces weer.

Verzadigingslijn: de grens in het *h-X* diagram tussen de gebieden waar water als waterdamp en waar water als water (nevel) aanwezig is.



Figuur 3.1 Mollier-diagram voor vochtige lucht

Luchtbehandelingsproces in *h-X* diagram (voorbeeld)

Gegeven:

- Een luchtbehandelingskast is in de richting van de lucht-stroom opgebouwd uit een klep, een filter, een voorverwar-mer, een sproeibevochtiger, een koeler, een na-verwarmer en een ventilator.
- Optredende buitencondities: winter – 10 °C (60%R.V.); zomer 30 °C (50% R.V.).
- Gewenste ruimtecondities: winter 20 °C (50%R.V.); zomer 24 °C (50% R.V.).
- Luchthoeveelheid 10 kg/s; dichtheid = 1,2 kg/m^3.

Gevraagd: de vermogens van de diverse componenten.

Oplossing winter:

- Voorverwarmen: proces 1 → 2 (zie figuur 3.1).

  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = 10 \cdot (30{,}2 - -7{,}5) = 377\,\text{kJ/s} = 377\,\text{kW}$

  luchtuittrede-temperatuur = 28 °C

- Bevochtigen: proces 2 → 3.
  intrede-conditie: 28 °C en 1 gram abs. vochtigheid
  uittrede-conditie: 12 °C en 7,2 gram abs. vochtigheid
  proces verloopt adiabatisch, dus $h_2 = h_3$

  bevochtiger-rendement $\dfrac{\varphi_{\text{lijn}}2 - 3}{\varphi_{\text{lijn}}2 - 3'} \times 100\% = 92\%$

  waterverbruik $\dot{m} \cdot (X_3 - X_2) = 10 \cdot (0{,}0072 - 0{,}001)$
  $= 0{,}062\,\text{kg/s} = 2331/\text{h}$

- Alternatief.
  stoombevochtiger: proces van 2′ → 3 (isotherm)
  capaciteit voorverwarmer: proces 1 → 2′
  $\dot{m} \cdot (h'_2 - h_1) = 10 \cdot (14{,}7 - -7{,}5) = 222\,\text{kW}$
  stoomverbruik 10 · (0,0072– 0,001) = 0,062 kg/s

- Naverwarming: proces 3 → 4.
  intrede-condensor 12 °C/83% R.V.
  uittrede-condensor 20 °C/50% R.V.

  $P = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3) = 10 \cdot (39 - 30{,}2) = 88\,\text{kW}$

Oplossing zomer:
Proces: $5 \rightarrow 6$.
De lucht wordt in de koeler afgekoeld en ontvochtigd.
Koelvermogen $P = \dot{m} \cdot (h_5 - h_6) + 10 \cdot (64 - 37) = 270\,\text{kW}$.
De richting van het koelproces wordt bepaald door de temperatuur van het gekoelde water.
De lucht wordt de ruimte ingeblazen met een temperatuur van 13,5 °C (alleen mogelijk bij hoge industrie van de toevoerlucht)en verlaat de ruimte met 24 °C. De af te voeren warmte uit de ruimte oftewel de voelbare koellast bedraagt dan:

$$P_k = \dot{m} \cdot (h_7 - h_6) = 10 \cdot (48 - 37) = 110\,\text{kW}$$

3.4 Behaaglijkheid

Er kan onderscheid gemaakt worden in:
- thermische behaaglijkheid;
- akoestische behaaglijkheid;
- eisen betreffende luchtzuiverheid.

De *thermische* behaaglijkheid wordt bepaald door de volgende parameters:
- luchttemperatuur;
- stralingstemperatuur;
- luchtsnelheid;
- relatieve vochtigheid;

Verder door aan de mens gerelateerde factoren als:
- de warmteweerstand en dampweerstand van de kleding (zie tabel 3.6);
- de stofwisselingsgraad of het *metabolisme* bij bepaalde activiteiten (zie tabel 3.7).

Fanger heeft uit zijn onderzoek naar het thermisch gevoel van de mens een *behaaglijkheidsvergelijking* geformuleerd. Uit de index *predicted mean vote (PMV)* is direct het percentage mensen af te leiden dat een situatie als onbehaaglijk ervaart (*predicted percentage dissatisfied, PPD*). Tabel 3.5 geeft enkele waarden.

Tabel 3.5 Waarden van PMV en PPD

PMV	PPD
− 3: cold	
− 2: cool	76,4%
− 1: slightly cool	26,8%
0: neutral	5 %
+ 1: slightly warm	36,4%
+ 2: warm	75,7%
+ 3: hot	

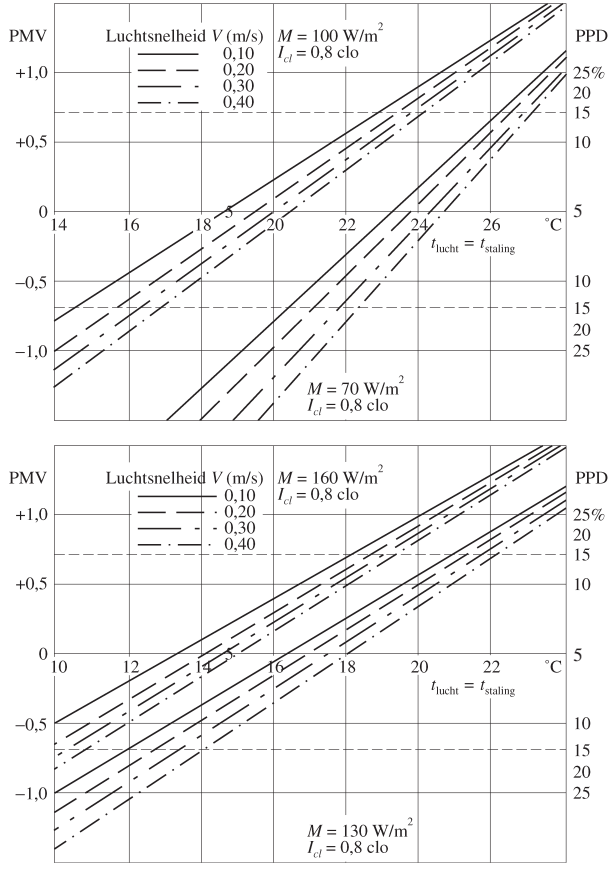
Het onderzoek van Fanger is gebaseerd op een evenwichtstoe-stand die optreedt na een verblijf van circa 1 uur. De parameters, berekend volgens Fanger moeten begrensd worden:

– relatieve vochtigheid min. 30% en max. 70% (deze waarden worden ook in de DIN gehanteerd);
– de luchtsnelheid max. 0,35 m/s.

Uit figuur 3.2 is het percentage ontevredenen af te lezen als functie van de luchttemperatuur, bij verschillende metabolismen en luchtsnelheden. Als kledingweerstand is hierbij 0,8 aangehou-den, en de stralingstemperatuur is gelijk aan de luchttemperatuur. Wordt de methodiek van Fanger toegepast op de norm-waarden van de NEN 7730 dan blijken marges van 10% ontevredenen toelaatbaar. Met dit gegeven kunnen met figuur 3.2 de toelaatbare ontwerptemperaturen worden bepaald.

Tabel 3.6 Warmteweerstand kleding (clo)

	clo
naakte mens	0
lichte werkkleding (bestaande uit: wollen sokken, katoenen shirt, werkbroek en loshangende blouse)	0,6
standaard werkkleding, als lichte werkkleding met schort (verpleging)	0,8
typisch zakenkostuum	1
traditioneel kostuum met vest	1,5



Figuur 3.2 Klimaatparameters en behaaglijkheidsscore

Tabel 3.7 Overzicht metabolismen [W/m^2]

rust:	
– zitten	60
– staan	70
licht administratief laboratoriumwerk	70
typen (40 woorden per minuut)	70
lopen:	
– 3,2 km/uur	120
– 4,0 km/uur	140
licht machinaal werk	130
kar duwen (57 kg; 4,5 km/uur)	150
machinebankwerken	160

Tabel 3.8 Massa, vochtgehalte en warmte-inhoud van lucht bij 1000 mbar *barometerstand*

temp. [°C]	massa droge lucht [kg/m^3]	water-damp max. [g/kg]	verzadi-gings-druk waterdamp [kPa]	warmte-inhoud van 1 kg droge lucht en bijbeh. waterinhoud [kJ/kg]	benodigde verdampings-warmte ver-zadigde lucht [kJ/kg]
−10	1,32	1,62	0,260	−6,0	2837
−9	1,32	1,77	0,283	−4,6	2836
−8	1,31	1,93	0,309	−3,2	2836
−7	1,31	2,11	0,337	−1,8	2836
−6	1,30	2,30	0,368	−0,3	2836
−5	1,30	2,50	0,401	+1,2	2835
−4	1,29	2,73	0,437	+2,8	2835
−3	1,29	2,97	0,476	+4,4	2835
−2	1,28	3,23	0,517	+6,0	2834
−1	1,28	3,52	0,563	+7,8	2834
0	1,27	3,82	0,611	9,5	2500
1	1,27	4,11	0,657	11,3	2498
2	1,26	4,42	0,706	13,1	2496
3	1,26	4,75	0,758	14,9	2493
4	1,25	5,10	0,814	16,8	2491
5	1,25	5,47	0,872	18,7	2489
6	1,24	5,87	0,935	20,7	2486
7	1,24	6,29	1,002	22,8	2484
8	1,23	6,74	1,072	25,0	2481
9	1,23	7,22	1,148	27,2	2479
10	1,22	7,73	1,229	29,5	2477
11	1,22	8,27	1,313	31,9	2475
12	1,21	8,84	1,403	34,4	2472

Tabel 3.8 (vervolg)

temp. [°C]	massa droge lucht [kg/m^3]	water-damp max. [g/kg]	verzadi-gings-druk waterdamp [kPa]	warmte-inhoud van 1 kg droge lucht en bijbeh. waterinhoud [kJ/kg]	benodigde verdampings-warmte ver-zadigde lucht [kJ/kg]
13	1,21	9,45	1,498	37,0	2470
14	1,21	10,10	1,599	39,7	2468
15	1,20	10,78	1,706	42,3	2465
16	1,20	11,51	1,818	45,2	2463
17	1,19	12,28	1,938	48,2	2460
18	1,19	13,10	2,065	51,3	2458
19	1,18	13,97	2,198	54,5	2456
20	1,18	14,88	2,340	57,9	2453
21	1,17	15,85	2,488	61,4	2451
22	1,17	16,88	2,645	65,0	2448
23	1,16	17,97	2,811	68,8	2446
24	1,16	19,12	2,985	72,8	2444
25	1,15	20,34	3,169	76,9	2441
26	1,15	21,63	3,363	81,3	2439
27	1,14	22,99	3,567	85,8	2437
28	1,14	24,42	3,782	90,5	2434
29	1,14	25,94	4,007	95,4	2432
30	1,13	27,52	4,245	100,5	2430
31	1,13	29,25	4,496	106,0	2427
32	1,12	31,07	4,757	111,7	2425
33	1,12	32,94	5,033	117,6	2420
34	1,11	34,94	5,323	123,7	2418
35	1,11	37,05	5,627	130,2	2415
36	1,10	39,28	5,940	137,0	2413
37	1,10	41,64	6,274	144,2	2411
38	1,09	44,12	6,624	151,6	2408
39	1,08	46,75	6,991	159,5	2406
40	1,08	49,52	7,375	167,7	2403
41	1,08	52,45	7,777	176,4	2401
42	1,07	55,54	8,198	185,5	2398
43	1,07	58,82	8,639	195,0	2396
44	1,06	62,26	9,100	205,0	2394
45	1,05	65,92	9,582	218,6	2391
46	1,05	69,76	10,085	226,7	2389
47	1,04	73,84	10,612	238,4	2386
48	1,04	78,15	11,162	250,7	2384
49	1,03	82,70	11,736	263,6	2382
50	1,03	87,52	12,335	277,3	

4 Klimaatinstallaties

4.1 Luchthoeveelheden

De luchthoeveelheid wordt bepaald op basis van:
- de minimale vereiste hoeveelheid;
- hoeveelheid af te voeren warmte (koellast);
- hoeveelheid toe te voeren warmte (transmissie).

Bepaling luchthoeveelheid t.g.v. koellast

$$\dot{Q}_k = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t$$

waarin:
$\dot{Q}_k$ = koellast voelbare koellast [W]
$\dot{m}$ = massastroom lucht [kg/s]
c = soortelijke warmte lucht (ca. 1000 J/(kg · K))
$\Delta t = t_r - t_i$ [°C]
(t_r = ruimtetemperatuur; t_i = inblaastemperatuur)

Enkele waarden:
- Buitenluchtconditie 30 °C/50% R.V.
- Binnentemperatuur bij conditionering: buitenluchttemperatuur −5 °C.
- R.V. ca. 40–60%.
- Inblaastemperatuur 10 °C beneden ruimte temperatuur.

Bepaling luchthoeveelheid door transmissieverlies

$$\dot{Q}_{tr} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t$$

$\dot{Q}_{tr}$ = transmissieverlies [W]

$\Delta t = t_i - t_r$

Enkele waarden:
- $t_r = 20$ °C.
- t_i = 15–30 °C hoger dan t_r.
- Δt is afhankelijk van de manier van inblazen en afzuigen:
  - bij hoog in de ruimte inblazen en afzuigen < 15 °C;
  - bij hoog inblazen en laag afzuigen en een gerichte luchtstroom max. 30 °C.

4.2 Manier van lucht inblazen

De lucht moet zo in de ruimte worden gebracht dat dit niet hinderlijk is. Enkele criteria hiervoor zijn:

- de gemiddelde eindsnelheid bij personen: minder dan 0,25 m/s (bij voorkeur minder dan 0,15 m/s);
- het gemiddeld temperatuurverschil met de omgeving minder dan 10 °C (ondertemperatuur), afhankelijk van de mate van inductie en de afstand van het toevoerpunt tot de verblijfszone.

Bij *isotherme luchtstroming* geldt:

$$\frac{V_x}{V} = K \cdot \frac{\sqrt{A}}{x \cdot \sqrt{u} \cdot r}$$

waarin:

x = worplengte [m] (de worp is de afstand vanaf het rooster, waar de luchtsnelheid V_x m/s is)
V = beginsnelheid in het rooster [m/s]
K = rooster-constante (zie tabel 4.1)
A = oppervlakte uitblaasrooster [m^2]
μ = contractiefactor (0,6–1)
r = verhouding netto/bruto doorlaat

Tabel 4.1 Roosterconstanten K

	K
straalpijp	6,0–7,0
rechthoekige vrije doorlaat	5.0–6,0
sleuf L: B = 1:20	4,0–5,0
rooster horizontale lamellen	5,5
rooster verticale lamellen	
recht	4,0–5,5
divergerend 40°	3,5
divergerend 60°	2,5
divergerend 90°	2,0

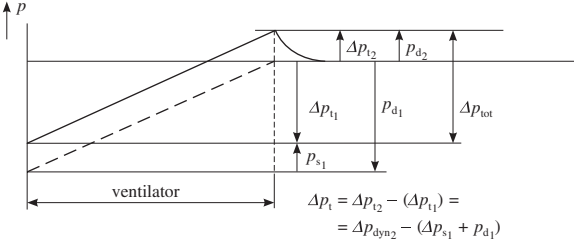
Tabel 4.2 Overzicht inblaasmogelijkheden

soort rooster	circulatievoud	$\Delta t = t_r - t_i$	toepassingsgebied
wandroosters	6–8	8	kantoor, winkel, verpleeghuizen
anemostaten	10–12	10	kantoor, restaurant, ziekenhuizen
spleten plafonds ($V_i = 3$ m/s)	10–12	10	kantoren, etc.
geperforeerd plafond	20 en hoger	–	speciale operatiekamers, verfspuitcabines, computerruimten
vloerroosters	20 en hoger	5	idem, computerruimten industrie
speciaal anemostaten hoge ruimten	6–10	10	hoge hallen, sportzalen

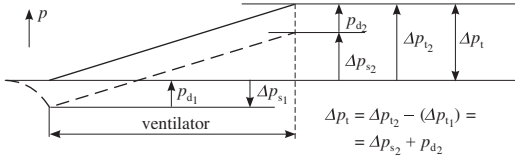
4.3 Luchttransport door ventilatoren

De figuren 4.1, 4.2 en 4.3 lichten voor verschillende bedrijfswijzen de volgende begrippen toe:

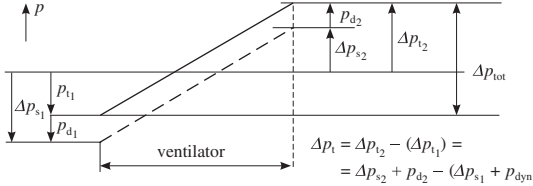
- statische druk (p_s);
- dynamische druk (p_d);
- totaaldruk (p_t).



Figuur 4.1 Alleen aanzuiging via kanaal en vrije wegblaas



Figuur 4.2 Vrije aanzuiging en alleen perszijdig bedrijf



Figuur 4.3 Aanzuigkanaal en perskanaal

Ventilatorwetten

$n_1 : n_2 = \dot{V}_1 : \dot{V}_2$

$n_1^2 : n_2^2 = p_1 : p_2$

$n_1^3 : n_2^3 = P_1 : P_2$

waarin:
n = toerental ventilator [omw/sec]
$\dot{V}$ = debiet [m^3/s]
p = opvoerhoogte [Pa]
P = vermogen [W]

Vermogen

$$P = \frac{\dot{V} \cdot p}{\eta_v \cdot \eta_e}$$

waarin:
η_v = rendement ventilatoren (gem. 70%)
η_e = rendement elektromotoren (gem. 95%)

Tabel 4.3 Indeling ventilatoren

soorten		toepassingsgebied
centrifugaal vent.	direct aangedreven indirect aangedreven	luchtbehandeling algemeen
centrifugaal vent.	voorover gebogen schoepen	luchtbehandelings-kasten (lage drukken)
	rechte schoepen	transport van stoffen
	achterover gebogen schoepen	luchtbehandelings-kasten (hoge drukken)
axiaal ventilatoren	ringventilatoren	stallen, wandventilatoren, lage drukken
	buisschroefventilatoren	kanaalinbouw en in grote luchttransport systemen
	tunnelventilatoren	tunnels, parkeergarages

4.4 Kleppen

Bediening *kleppen:*

- Handbediening voor *eenmalige instellingen*.
- Motorbediening met pneumatische of elektrische aandrijving voor toepassingen als *regelklep* (letten op voldoende autoriteit, zie hoofdstuk B2 *Regel- en besturingstechniek*, par. 2.5.

Tabel 4.4 Overzicht kleppen

soorten	toepassingsgebied
contra-roterende kleppen	regel en/of afsluitorgaan in luchtbehandelings-kasten en in hoofdtakken
gelijkroterende kleppen	luchtbehandelingskasten
vlinderkleppen	inregelkleppen in secundaire luchtkanalen

Tabel 4.5 Overzicht luchtfilters

soorten	toepassingsgebied
grof-filters	bescherming apparatuur
middelfijn-filters	zorgen voor voldoende leefbaarheid in bijv. kantoren
fijn-filters	reine kamers, bijv. klimaatkamers
absoluutfilters	operatiekamers en andere steriele ruimten

4.5 Luchtfilters

Luchtfilters kunnen er voor zorgen dat de lucht is ontdaan van vuil. Filters kunnen op verschillende manieren worden ingedeeld; tabel 4.5 geeft een indeling naar fijnheid.

Uitvoering

Grof-filters worden uitgevoerd als:

- *Rolbandfilters*. Hier wordt na een drukverschil-indicatie het filter d.m.v. doorrollen vervangen door schoon materiaal;
- *Plaatfilters* en *cassettefilters*. Dit zijn platen van bijv. glaswol, tussen gaas in een raamwerk die vervangen worden wanneer ze te vuil zijn.

Middelfijn-filters en *fijn-filters* zijn vaak uitgevoerd als zakken-filters met aanstroomoppervlakken van 60 × 60 cm en zak-lengtes tussen 30 en 60 cm. Ze zijn gemonteerd in een frame en op die manier uitneembaar.
Deze filters hebben als voordeel dat ze zeer lange standtijden hebben. Dit komt door het grote filter-oppervlak per m^2 aanstroom-opening en de daardoor lage luchtweerstand.

Absoluutfilters worden geleverd in een cassette en gemonteerd in een luchtbehandelingskast of luchtkanaal.

Speciale filters

- *Elektrostatische filters*. Hier worden stofdeeltjes elektrisch geladen en op die manier aangetrokken en opgevangen door platen die een tegengestelde lading hebben (toegepast bij grote luchtbehandelingssystemen).
- *Vetvang-filters* in keukens, restaurants e.d. Ze bestaan uit glaswol of keramiek, en zijn meestal een aantal malen uitwasbaar.
- *Actiefkool-filters*, bestaande uit actiefkoolplaten in luchtbehandelingskasten of uit regenereerbare stukken in filterpotten. Het filter wordt gebruikt voor het verwijderen van reuk en in een isotopenlab voor het verwijderen van radio-actief materiaal.

4.6 Verwarmingselementen

Voor de *verwarmingselementen* in luchtbehandelingskasten en -kanalen gelden:
- gebruikelijke luchtsnelheden 2,5–4 m/s;
- gebruikelijke luchtweerstanden 20–80 Pa.

Capaciteit:

$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t$

waarin:
$\dot{Q}$ = warmtestroom [kW]
$\dot{m}$ = massastroom lucht [kg/s]
c = s.w. lucht $\approx$ 1 kJ/(kg · K)
Δt = temperatuursverschil [°C]

Debiet volgens:

$\dot{Q} = m \cdot c \cdot \Delta\, t$

waarin:
$\dot{Q}$ = vermogen verhitter [kW]
c = s.w. water $\approx$ 4,2 kJ/(kg · K)
Δt = waterintrede- minus wateruittrede-temperatuur [°C]

4.7 Koelers

Voor *koelers* in luchtbehandelingskasten of kanalen geldt:
- gebruikelijke luchtsnelheden 2,5 m/s/;
- gebruikelijke luchtweerstanden 40–150 Pa (afhankelijk van de dikte).

Achter de koeler moeten druppelvangers worden geplaatst.

Capaciteit:

$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t$
of
$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta\, h$

waarin:
$\dot{m}$ = massastroom lucht [kg/s]
c = s.w. lucht [kJ/(kg · K)]
$\Delta t = t_u - t_i$
Δh = enthalpieverschil per kg lucht [kJ/kg]

Debiet koelmedium volgens:

$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t$ waarin:

$\dot{m}$ = debiet koelmedium [kg/s]

c = s.w. koelmedium [kJ/(kg · K)]

$\Delta t = t_u - t_i$

Gebruikelijke watertemperatuur:

– $t_i = 6\,^{\circ}C$; $t_u = 13\,^{\circ}C$ bij natte koeling;
– $t_i = 12\,^{\circ}C$; $t_u = 17\,^{\circ}C$ bij droge koeling.

4.8 Luchtbevochtigers

Uit het oogpunt van behaaglijkheid is een bepaald *vochtgehalte* van de lucht wenselijk. Uit onderzoekingen blijkt dat een ondergrens van 30% en een bovengrens van 70% R.V. wenselijk is. Andere maatstaven gelden voor bepaalde productieprocessen en papieropslagruimten, waar om productie-technische redenen hogere vochtigheden nodig zijn.

De belangrijkste soorten bevochtigers in de luchtbehande-lingstechniek zijn:
– waterbevochtigers;
– stoombevochtigers;
– ultrasoonbevochtigers.

Waterbevochtigers

Uitvoering in luchtbehandelingskasten meestal als sproeibevochtiger (lucht-wasser). Het water wordt fijn verneveld en in contact gebracht met de langsbewegende lucht. Hierbij wordt de waternevel omgezet in waterdamp. De benodigde verdampingswarmte wordt onttrokken aan de lucht, wat resulteert in een lagere temperatuur. Voor het proces zie het *h-X* diagram (figuur 3.1, par. 3.3). De bevochtigers komen voor als één-rijige bevochtigers (rendement ca. 70%) of twee-rijige bevochtigers (rendement ca. 90 à 95%).

Vernevelaars worden vaak in de ruimte zelf toegepast. Hier wordt het water via een draaiende schijf versproeid.

Stoombevochtigers

Bij dit type bevochtiger wordt water in dampvorm, als stoom, in de luchtstroom gebracht.Het proces heeft een isotherm karakter (zie *h-X* diagram, figuur 3.1, par.3.3).

Uitvoeringsvormen: de luchtbevochtiger kan opgenomen worden in de luchtbehandelingskast of het kanaal. De stoom wordt in de luchtstroom gedoseerd en geregeld op basis van bijv. R.V. in de ruimte en komt uit een stoomketel, stoomvormer of elektrische stoomgenerator. Voor kleinere systemen wordt ook gebruik ge-maakt van elektrische stoomopwekkers met een bijbehorende sproeier.

Ultrasoonbevochtigers

Speciale waterbevochtigers, waarbij het water via hoogfrequente trillingen verneveld wordt.

Eigenschappen:

- zeer goed regelbaar;
- vers water.

Nodig: demi water.

Tabel 4.6 Vochtigheidswaarden

	temperatuur [°C]	vochtigheid R.V. [%]
chemie folievervaardiging	22	55–60
drukkerijen		
foto	22	30–60
zeefdruk	22	30–60
rotatie	20	60
hout antiekopslag	22	45–50
levensmiddelen		
brood deeg	25	65
verkoop	20	50–60
kaas opslag	2–15	75–85
leer schoenenopslag	10–20	50–65
papier	20	50–60
tabak		
opslag grondst.	22–25	70–80
sigaretten, sigaren		70
textiel		
katoen	20–25	50–60
wol		45–65
synthetische vezels		60–70
operatiekamers	18–24	55–65
rekencentrum	20–24	55

4.9 *Luchtkanalen-berekening*[1)]

Het totale drukverlies in een *kanalensysteem* bestaat uit:
- de wrijvingsverliezen in de rechte kanaalstukken;
- de som van de wrijvingsverliezen in bochten, aftakkingen enz.

Weerstand in rechte kanaalstukken

$$R = \frac{\lambda}{d_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \text{ (zie figuur 4.4)}$$

waarin:
R = drukverlies per meter [Pa/m]
λ = constante
(afhankelijk van kanaalruwheid en kengetal van Reynold)
d_h = hydraulische diameter [m]
ρ = dichtheid lucht $\approx$ 1,2 kg/m^3
v = snelheid van de lucht [m/s]

Opmerkingen:
- Voor ronde kanalen geldt d_h = diameter.
- Rechthoekige kanalen met afmetingen doorsnede $a \times b$:

$$d_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}$$

Weerstand in bochten, aftakkingen enz.

$$Z = \zeta \cdot \tfrac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \qquad [\text{Pa}]$$

waarin:
ζ = weerstandscoëfficiënt of verliesfactor, eigen aan de soort plaatselijke weerstand (zie tabel 4.7)

Het totale drukverlies van het kanalensysteem wordt verkregen door de weerstanden te sommeren.

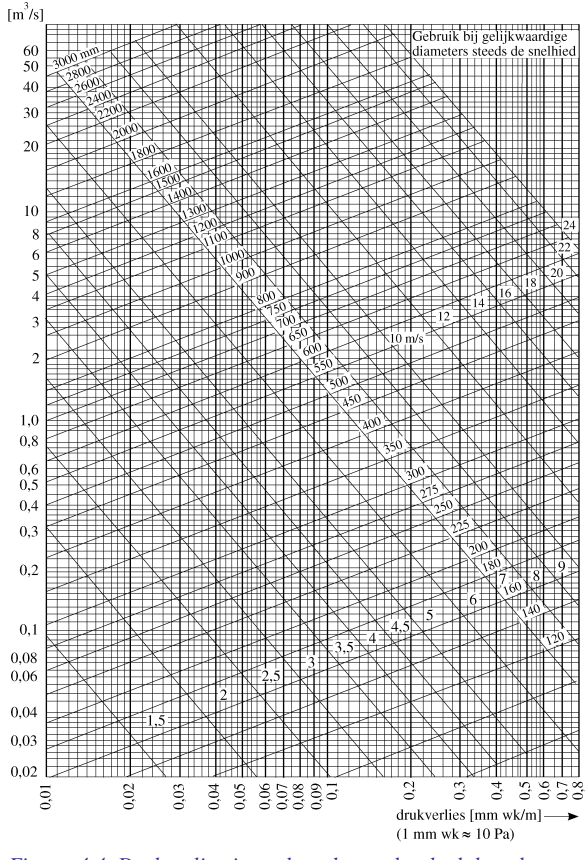
Aan te houden luchtsnelheden

In luchtverwarmingssystemen voor *woonuizen* geldt (zie ook tabel 4.8):
- in hoofdkanalen 3–4 m/s;
- in aftakkingen 2 m/s.

Materialen

- Plaatstaal.
- Kunststof.
- Metselwerk of beton.

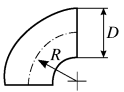
[1)] Zie ook hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par.5.



Figuur 4.4 Drukverlies in rechte plaatstalen luchtkanalen (lucht: 20°C)

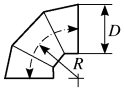
Tabel 4.7 Weerstandscoëfficiënten bij luchtstroming

Bochten — 1



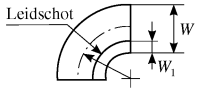
□ R/D	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	3
ζ	1,2	0,5	0,25	0,15	0,1	0,1

2



○ R/D		0,5	0,75	1,0	1,5	2
3 Segm.	ζ	1,4	1,0	0,85	0,65	0,55
5 Segm.	ζ	1,0	0,5	0,3	0,2	0,2

3

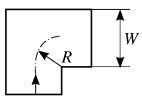


□ R/W		0,5	0,75	1	2
$W_1/W = 0,25$	ζ	0,6	0,25	0,2	0,1

Knie — 4

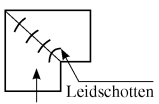
α	10°	30°	45°	60°	90°
○ζ	0,05	0,15	0,.3	0,5	1,2
□ζ	0,05	0,2	0,4	0,65	1,4

5



R/W	0,	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
□ζ	1,4	1,0	0,8	0,9	1,1	1,2

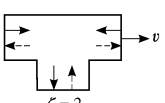
6



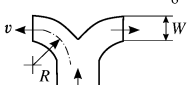
$\zeta = 0,35$

Indien goed aangebracht $\zeta = 0,15$

T-stuk — 7

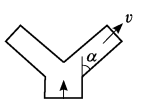


8



R/W	0,5	0,75	1,0	1,5	2
○ζ	1,1	0,4	0,3	0,2	0,15
□ζ	1,0	0,5	0,25	0,15	0,1

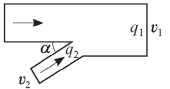
9



α	10°	30°	45°	60°	90°
ζ	0,1	0,3	0,6	1,1	2

Tabel 4.7 (vervolg)

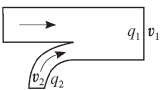
Aftakkingen/splitsingen 10



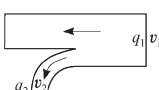
ζ_1	α / q_2/q_1	15°	30°	45°	60°	90°
	0,1	0	0,1	0,1	0,15	0,2
	0,2	0	0,1	0,2	0,2	0,4
	0,5	0,4	0,4	0,6	0,7	1,1

ζ_2	α / q_2/q_1	15°	30°	45°	60°	90°
	0,1	0	0	0,05	0,1	0,1
	0,2	0	0,05	0,2	0,2	0,4
	0,5	0	0,2	0,3	0,6	1,2

11

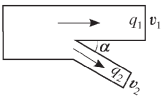


q_2/q_1	0,1	0,25	0,5
ζ_1	0,1	0,2	0,4
ζ_2	0,3	0,2	0,1



q_2/q_1	0,1	0,25	0,5
ζ_1	0,05	0,1	0,15
ζ_2	0,5	0,4	0,3

12

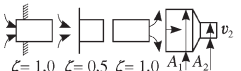


ζ_2	α / q_2/q_1	15°	30°	45°	60°	90°
	0,2	0,65	0,7	0,75	0,8	1,0
	0,6	0,2	0,3	0,4	0,55	1,0
	1,0	0,05	0,1	0,25	0,35	1,0

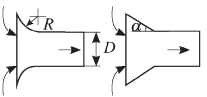
q_2/q_1	0,5	1,0
ζ_1	0,08	0,15

Tabel 4.7 (vervolg)

13

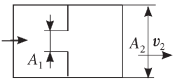


14



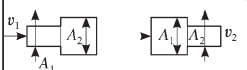
R/*D*		0,025	0,05	0,1	1,0
○□ζ		0,4	0,3	0,15	0,05
α	15°	30°	45°	60°	90°
○□ζ	0,2	0,15	0,15	0,15	0,5

15



$A_1/A_2 = 0{,}9$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
$\zeta_2 = 0{,}13$	0,35	0,9	1,8	3,8	7,1

16

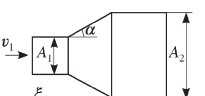


$A_1/A_2 = 0$	0,2	04,	0,6	0,8	1,0
$\zeta_1 = 1{,}0$	0,65	0,35	0,15	0,05	0

$A_2/A_1 = 0{,}1$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\zeta_2 = 0{,}5$	0,45	0,3	0,2	0,1	0

A_1/A_2 \ α	3°	5°	7,5°	10°	15°	22,5°	30°	45°
0,6	0,05	0,06	0,06	0,07	0,11	0,15	0,18	0,17
0,5	0,06	0,07	0,08	0,10	0,16	0,25	0,29	0,17
0,4	0,07	0,07	0,10	0,13	0,23	0,35	0,41	0,38
0,3	0,08	0,09	0,13,	0,18	0,31	0,45	0,56	0,54
0,2	0,09	0,10	0,16	0,23	0,41	0,62	0,74	0,70
0,1	0,10	0,12	0,21	0,28	0,52	0,80	0,93	0,88

17



ROOSTERS vrij oppervlak in %		10	20	30	40	50	60	70	80	90
ζ betrokken op snelheid in bruto-opp.	plaatstaal.	200	40	15	7	3,5	1,5	0,7	0,3	0,14
	draad	82	15	6,5	3,5	1,7	0,9	0,3	0,14	

Tabel 4.8 Aan te houden luchtsnelheden voor lage- en hoge-druk systemen [m/s]

	rechthoekig kanaal[1)]		rond kanaal	
	lage druk	hoge druk	lage druk	hoge druk
technische ruimte	8	8	10	12
schachten	6	6	8	10
verlaagde plafonds				
boven gangen	5	5	8	10
boven lokalen	3,5	3,5	6	7
aftakkingen naar rooster 2–3				

[1)] Bij rechthoekige kanalen bij voorkeur de lengte-breedte-verhouding van 4 niet overschrijden.

5 Akoestiek in klimaatinstallaties

5.1 Geluidsniveaus

Luchtmoleculen trillen om een evenwichtsstand met verschillende frequenties en amplituden. Dit veroorzaakt een luchtdrukrimpel (boven op de barometrische luchtdruk) die wordt ervaren als geluid. Om hinder en zeker gehoorbeschadiging te voorkomen moet aan de 'hoeveelheid' geluid een grens worden gesteld.

Tabel 5.1 Richtwaarden voor geluidsniveaus in de utiliteitsbouw

ruimte	geluidsniveau [dB(A)]	ruimte	geluidsniveau [dB(A)]
studio's	15–25	gangen/hallen	35–45
spreekkamers	30–40	patiëntenkamers	30–40
vergaderkamers	30–40	operatiekamers	30–40
kantoorvertrekken	30–40	wachthallen	35–45
kantines/restaurants	35–45	computerruimten	35–50
typekamers	35–45		

NEN 1070 geeft de *uitgebreide* eisen t.a.v. toelaatbare geluidsniveaus in de woningbouw. Voor een betere geluidsbeperking wordt aanbevolen te eisen dat het geluidsniveau 5 dB(A) beneden de maximale waarden uit tabel 5.2 blijft.

Tabel 5.2 Maximaal toelaatbaar geluidsniveau veroorzaakt door installaties in tot woningen behorende ruimten

geluidsbron	kamers	overige ruimten[1)]
installaties voor aan-en afvoer van water (ook sanitaire toestellen)		
in dezelfde woning	40[2)]	geen eisen
niet in dezelfde woning	35	40
overige installaties (liften,C.V.-installaties, ventilatiesystemen e.d.)	30	40[2)]

[1)] Behalve bergruimten; hiervoor zijn geen eisen.
[2)] Geldt niet voor de kamer waar de geluidsbron zich bevindt.

Opmerkingen:

- De eisen gelden voor elk van de installaties afzonderlijk en bij installaties van de aan- en afvoer van water bovendien voor elk armatuur afzonderlijk.
- Het toelaatbare geluidsniveau in kamers geldt voor lege (ongemeubileerde en ongestoffeerde) kamers. Hier moet het geluidsniveau minstens 5 dB(A) lager zijn dan in tabel 5.2.
- Wanneer er meetresultaten zijn van lege en gestoffeerde en/of gemeubileerde kamers, dan zijn de meetresultaten in de lege kamers maatgevend.
- De toelaatbare geluidsniveaus in de open lucht van installaties zijn te vinden in de ‘Handleiding meten en rekenen industrielawaai nr. IL-HR-13-01’.

5.2 Geluidsbronnen

Ventilatoren

Uit onderzoekingen van Beranek, Madison en Allen blijkt dat het *totaal* geluidsvermogensniveau van een ventilator afhangt van het debiet en het totaal drukverschil van de ventilator:

$$L_{wt} = (40 + 20 \log \Delta p_t + 10 \log \dot{V})$$

waarin:
L_{wt} = totaal geluidsvermogensniveau [dB(A)]
Δp_t = drukverschil [Pa]
$\dot{V}$ = debiet [m^3/s]

Om een klimaatinstallatie akoestisch door te kunnen rekenen moet de spectrale verdeling van het geluidsvermogensniveau in minstens 7 octaafbanden bekend zijn (63 Hz, 125 Hz, . . .4000 Hz). Om deze verdeling te bepalen moet bij het totaal geluidsvermogensniveau het relatieve spectrum van de ventilator (volgens Beranek) opgeteld worden (zie tabel 5.3).

Tabel 5.3 Relatieve spectrum (L_{rel}) voor verschillende gangbare ventilatoren [dB]

type ventilator		middenfrequentie [Hz]						
		63	125	250	500	1000	2000	4000
a	axiaal	−9	−8	−7	−7	−8	−10	−14
b	radiaal (achteroverge-bogen schoepen)	−4	−5	−7	−12	−17	−22	−27
c	radiaal (vooroverge-bogen schoepen)	−2	−6	−11	−16	−21	−26	−31

Bij a en b moet nog een correctie C_s van + 5 dB (praktijkwaarde) worden toegepast voor de middenfrequentie die overeenkomt met de schoepfrequentie ($f_0 = z \cdot n$; waarin:
z = aantal schoepen; n = toerental in omwentelingen per seconde).
De meeste leveranciers van ventilatoren kunnen de spectrale verdeling van het geluidsvermogensniveau van hun ventilatoren opgeven.

Kanalen, aftakkingen en bochten

De turbulente stroming in rechte kanalen veroorzaakt stromingsgeruis. Ook hiervoor is proefondervindelijk een relatie bepaald voor het totaal geluidsvermogensniveau L_{wt} [dB(A)] van de gemiddelde snelheid $\overline{v}$ [m/s] en de oppervlakte A [m^2] van de kanaaldoorsnede:

$$L_{wt} = (10 + 50 \log \overline{v} + \log A)$$

Bij een akoestische doorrekening moet ook hier de spectrale verdeling van het geluidsvermogensniveau bekend zijn. Daartoe moet het relatieve spectrum (L_{rel}) bij het totaal geluidsvermogensniveau opgeteld worden (zie tabel 5.4).

Tabel 5.4 Relatieve spectrum

f_m	[Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
L_{rel}	[dB]	−5	−6	−7	−8	−9	−10	−14

N.B.: Verstoring van het stromingsbeeld en resonantieverschijnselen kunnen invloed hebben op het spectrum.

In de uitdrukking voor het geluidsvermogensniveau komt de term 50 log $\overline{v}$ voor. Hieruit blijkt dat het totaal geluidsvermogensniveau evenredig is met de 5e macht van de snelheid. Uit energetisch, regeltechnisch en akoestisch oogpunt moet de snelheid zo laag mogelijk worden gehouden. Uit de praktijk blijkt, dat voor klimaatinstallaties in de utiliteitsbouw de optimale ontwerpsnelheid 6 m/s is. Er zal dan vrijwel geen onaanvaardbaar geluid worden opgewekt door plaatselijke weerstanden.

Kleppen

Bij de genoemde snelheden in de luchtkanalen en een niet te lang kanalenstelsel, zal het totale drukverschil over het kanaal gering zijn (bijv. 150 Pa bij een lengte van ± 50 m). Het opgewekte geluid door het smoren met de klep, kan dan eenvoudig worden gedempt door ongeveer 1 meter van het kanaal vlak voor en na de geluidsbron, inwendig te isoleren. Deze inwendige isolatie verbetert ook de zogenaamde overspraak. Dit is nodig bij weg te smoren drukken vanaf 60 Pa. Bij weg te smoren drukken vanaf 150 Pa moet over een grotere lengte inwendig geïsoleerd worden of moet men dempers toepassen.

Roosters

Bij roosters (het liefst zonder volumeregelaar) mag de netto snelheid in het rooster niet hoger zijn dan ca. 5 m/s (zie de geluidsgegevens van de fabrikant). Wanneer bovendien de snelheid in het aansluitkanaal ca. 2 m/s is, kan het opgewekte geluid worden verwaarloosd.

5.3 Demping

Ventilatoren

Het opgewekte geluidsvermogensniveau van de ventilator kan verlaagd worden door het toerental te verlagen:

$$\Delta L = L_{w1} - L_{w2} = 50 \log \frac{n_1}{n_2} \quad [\text{dB}]$$

Kanalen

In kanalen treedt afhankelijk van frequentie en kanaalafmetingen absorptie (en resonantie) op. Tabel 5.5 geeft waarden voor de demping van plaatstalen kanalen. Betonnen en gemetselde kanalen dempen nagenoeg niet.

Tabel 5.5 Demping voor buigslappe plaatstalen kanalen [dB/m]

grootste kanaalafmeting [mm]	middenfrequentie [Hz]				
	63	125	250	500	1000
rechthoekig					
tot 200	−0,60	−0,60	−0,45	−0,30	−0,30
200– 400	−0,60	−0,60	−0,45	−0,30	−0,20
400– 800	−0,60	−0,60	−0,30	−0,15	−0,15
800–1600	−0,45	−0,30	−0,15	−0,10	−0,06
rond					
tot 200	−0,10	−0,10	−0,15	−0,15	−0,30
200– 400	−0,06	−0,10	−0,10	−0,15	−0,20
400– 800	−0,03	−0,06	−0,06	−0,10	−0,15
800–1600	−0,03	−0,03	−0,03	−0,06	−0,06

Bochten

Knieën in rechthoekige kanalen zonder leidschoepen (airturns) dempen het geluid het beste, omdat hier reflectie naast absorptie (en resonantie) optreedt. Toch moeten knieën worden afgeraden, omdat ze geluid produceren en ze stromingstechnisch (dus energetisch) erg ongunstig zijn. Voor de overige bochten geldt tabel 5.6.

Tabel 5.6 Dempingswaarden bochten (uitgezonderd knieën) [dB]

bochtafmetingen	middenfrequentie [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
100– 250	−0	−0	−0	−1	−2	−3
250– 500	−0	−0	−1	−2	−3	−3
500–1000	−0	−1	−2	−3	−3	−3
1000–2000	−1	−2	−3	−3	−3	−3

Bij ronde kanalen wordt de bochtafmeting bepaald door de kanaaldiameter; bij rechthoekige kanalen de kanaalafmeting die in het vlak van de bocht wordt gemeten.

Aftakkingen en splitsingen

Het geluidsvermogen in het hoofdkanaal zal zich evenredig verdelen over de kanaaldoorsnede-oppervlakten van de vertakkingen en splitsingen. Dit betekent dat de demping in de tak onafhankelijk is van de frequentie:

$$D = 10 \log \frac{A_1}{\Sigma A_i} \quad [\text{dB}]$$

waarin:
A_1 = kanaaldoorsnede-oppervlakte van de aftakking
ΣA_i = som van alle kanaaldoorsnede-oppervlakten ná de vertak-king

In de praktijk is de demping in een aftakking beperkt tot 10 dB; dit in verband met de uitstraling in de overige kanalen.

Roosters en kanaalmondingen

In roosters en kanaalmondingen treden reflecties op die demping veroorzaken. Deze demping is afhankelijk van de frequentie, openingsoppervlakte en de plaats van de opening in de ruimte. Table 5.7 geeft richtwaarden, waarbij de plaats van de opening buiten beschouwing wordt gelaten.

Ruimte-absorptie

Het geluidsdrukniveau dat zich bij de ontvanger instelt, hangt af van:

- het ingebrachte geluidsvermogensniveau;
- de afstand tussen bron en ontvanger;
- de absorbtie van de ruimte.

Tabel 5.7 Demping bij roosters en kanaalmondingen [dB]

bruto doorlaat [m^2]	middenfrequentie [Hz]				
	63	125	250	500	1000
0,010	−20	−15	−9	−3	−1
0,015	−19	−13	−7	−3	
0,020	−18	−12	−6	−2	
0,030	−16	−10	−4	−1	
0,040	−15	−9	−3	−1	
0,050	−14	−8	−3		
0,060	−13	−7	−2		
0,080	−11	−5	−2		
0,100	−11	−5	−1		
0,150	−9	−3	−1		
0,200	−8	−3			
0,300	−6	−2			
0,400	−5	−1			
0,500	−4	−1			
0,600	−3	−1			
0,800	−3				
1,000	−2				
1,500	−2				
2,000	−1				

Voor gangbare kantoorvertrekken (inhoud ca. 50 m^3) zal het gemeten geluidsdrukniveau voor nagenoeg alle frequentiebanden ca. 5 dB(A) lager zijn dan het ingebrachte geluidsvermogensniveau.

Dempers

De dempende werking berust op absorptie (hoge frequenties), resonantie (lage frequenties) en in mindere mate reflectie (lage frequenties). Een demper wordt uitgekozen aan de hand van de octaafband met een middenfrequentie van 250 Hz, omdat in deze band het meest kritische geluidsniveau optreedt. Dempingswaarden groter dan 50 dB zijn praktisch niet haalbaar. De snelheid in de demper moet beperkt blijven tot ca. 12 m/s; dit in verband met het stromingsgeruis van de demper.

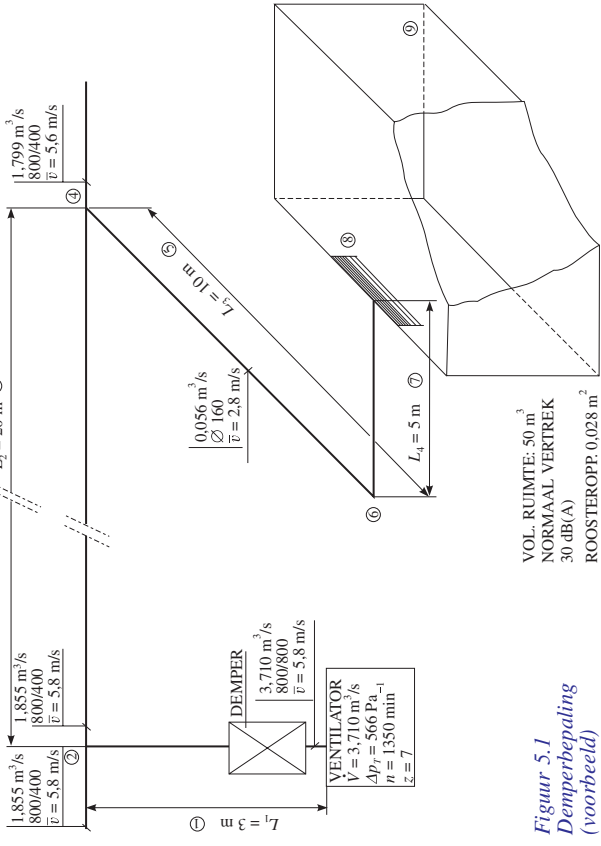
Toelaatbare geluidsniveaus

Een demper wordt bepaald op grond van de gewenste demping in de octaafband met middenfrequentie 250 Hz. Daarom moet bij het toelaatbare geluidsniveau gerekend worden met die frequentieband.

*Tabel 5.8 Toelaatbaar geluidsniveau in ruimten (*250 Hz *band)*

gestelde eis totaal geluidsvermogensniveau [dB(A)]	toelaatbaar geluidsniveau [dB]
20	21
25	26
30	31
35	35
40	41
45	46
50	50

5.4 Voorbeeld demperbepaling



Figuur 5.1
Demperbepaling (voorbeeld)

	middenfrequentie f_m [Hz]						
	63	125	250	500	1000	2000	4000
geluidsbron (ventilator) L_w	97	101	94	89	84	79	74
1 demping kanaal $L = 3$ m	−1,8	−1,8	−0,9	−0,5	−0,5	−0,5	−0,5
2 splitsing $D = 10 \log \frac{A_1}{\Sigma A_i} = 10 \log \frac{0,32}{0,32}$	−3	−3	−3	−3	−3	−3	−3
3 demping kanaal $L = 20$ m	−12	−12	−6	−3	−3	−3	−3
4 aftakking $D = 10 \log \frac{A_1}{\Sigma A_i} = 10 \log \frac{0,02}{0,32}$	(−12)	(−12)	(−12)	(−12)	(−12)	(−12)	(−12)
praktisch maximum	−10	−10	−10	−10	−10	−10	−10
5 demping kanaal $L = 10$ m	−1	−1	−1,5	−1,5	−3	−3	−3
6 bocht Ø 160 mm		0	0	0	−1	−2	−3
7 demping kanaal $L = 5$ m	−0,5	−0,5	−0,8	−0,8	−1,5	−1,5	−1,5
8 roosterreflectie bruto oppervlakte = 0,028 m^2	−16	−10	−4	−1			
9 ruimte absorptie	− 5	− 5	−5	−5	−5	−5	−5
zich instellende geluidsdrukniveau L_p toelaatbaar is 30 dB(A) d.w.z. in de octaafband met middenfrequentie 250 Hz: te dempen:	47,7	57,7	62,8 $\frac{31}{31,8 \text{ dB}}$ −	64,2	57	51	45

Conclusie: een demper kiezen met een effectieve demping van: $D_E = 32$ dB

6 Leidingsystemen

6.1 Stoom- en condensleidingen

Stoomleidingen

Meestal zijn bekend: de hoeveelheid stoom die van een producent naar een afnemer moet worden getransporteerd èn de begindruk en gevraagde einddruk. Voor het transport van stoom is een zeker drukverschil nodig, dat gelijk is aan het wrijvingsverlies in de leiding.

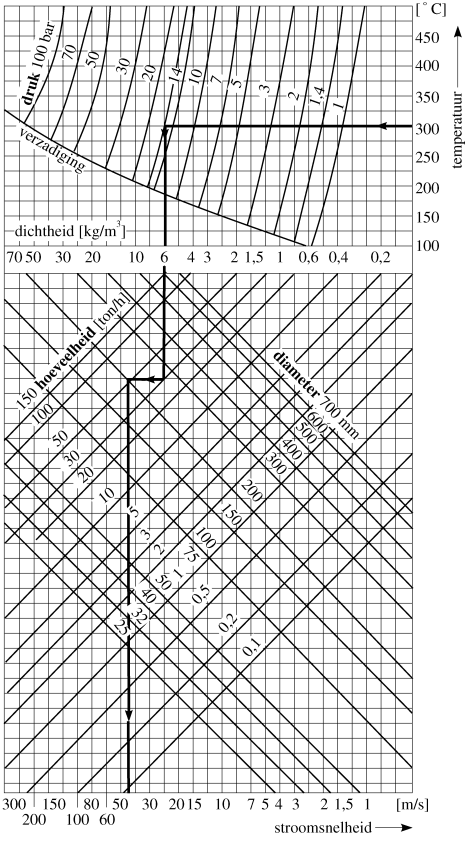
Als startwaarde wordt uitgegaan van een praktische snelheid:
- Hoofdtransport-stoomleidingen: 20–40 m/s
- Aftak-stoomleidingen : 15–20 m/s
- Aansluit-stoomleidingen : 10–15 m/s
- Condensleidingen (als stoomleidingen, maar bepaald op de geproduceerde ontspanningsstroom): 15 m/s
- Waterhoeveelheid wanneer geen verdamping optreedt: 0,5 m/s

Met behulp van figuur 6.1 wordt aan de hand van de door-stromende hoeveelheid, de druk en de snelheid, de *leidingdia-meter* bepaald (voor niet-oververhitte stoom geldt de lijn voor verzadigde stoom). Met behulp van figuur 6.2 kan dan het *weer-standsgetal C* worden bepaald en met figuur 6.3 het *drukverlies*.

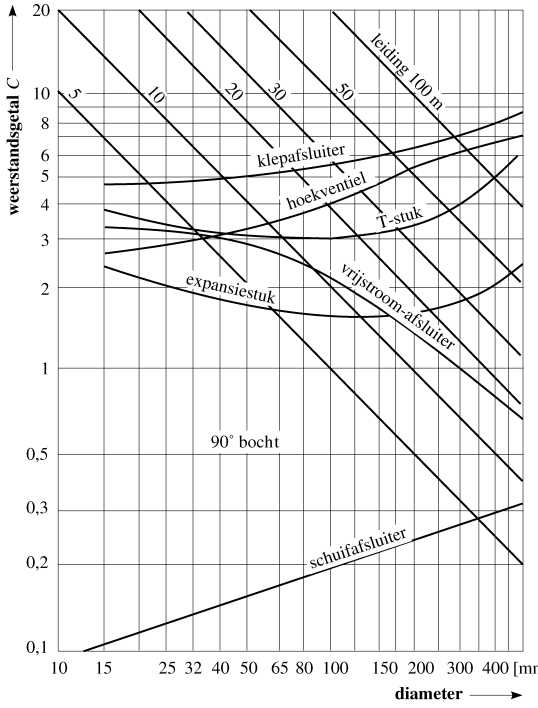
In het algemeen geldt voor het drukverlies:

$$\Delta p = \tfrac{1}{2}\rho \cdot v^2 \cdot C$$

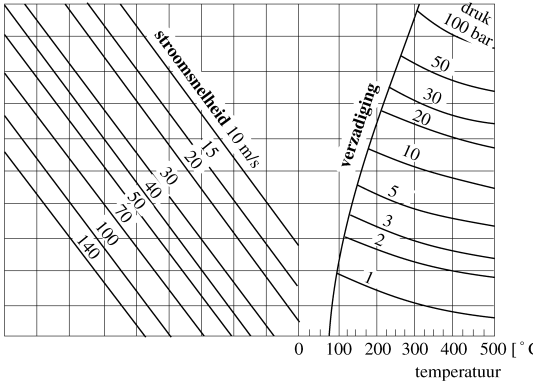
waarin:
Δp = drukverlies [bar]
ρ = soortelijke massa [kg/m^3]
v = stroomsnelheid [m/s]
C = weerstandsgetal; voor armaturen: $C = \zeta$
voor leidingen: $C = \lambda \cdot l/d$
met: λ = 0,0206 (naar Eberle) en l en d in [m′]

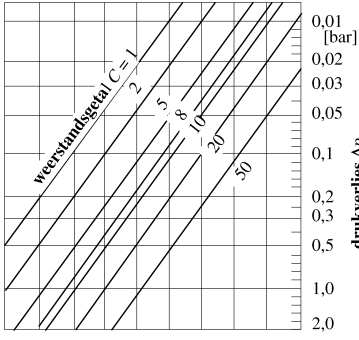


Figuur 6.1 Bepalen diameter stoomleiding

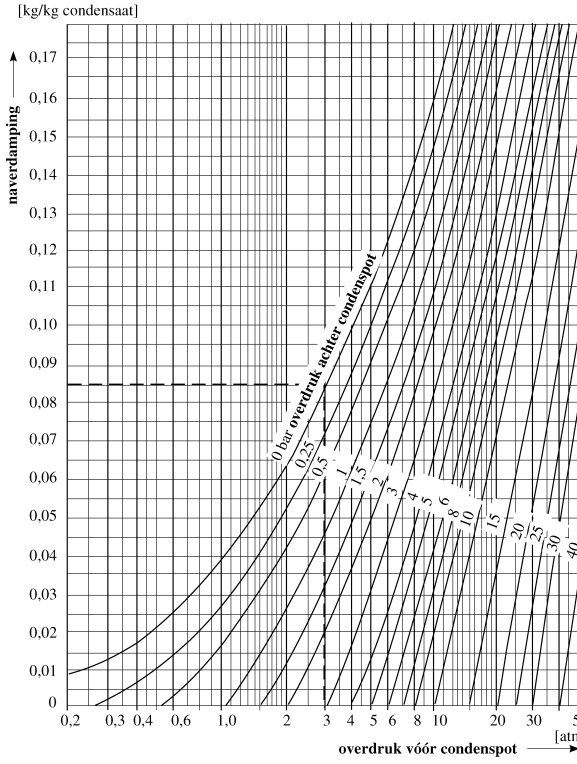


Figuur 6.2 Bepalen weerstandsgetal voor stoomleidingen





Figuur 6.3 Bepalen drukverlies stoomleidingen



Figuur 6.4 Bepalen naverdamping bij condensleidingen

Condensleidingen

De *condensleidingen* kunnen op twee manieren worden bepaald:

- Wanneer er *geen* naverdamping plaats vindt,wordt de condensleiding als waterleiding berekend met watersnelheden van 0,5 m/s.
- Wanneer er *wel naverdamping* plaats vindt, dan wordt deze bepaald m.b.v. figuur 6.4. Voorbeeld:wanneer 1 kg conden-saat in een condenspot (zie hierna)'ontspant' van 3 bar (overdruk) naar atmosferische druk, dan ontstaat er per kg condensaat 0,085 kg stoom. Met deze 0,085 kg stoom wordt dan voor de leidingberekening dezelfde procedure gevolgd als voor stoomleidingen.

Condenspotten

Wanneer stoom warmte afstaat aan warmtewisselaars en der-gelijke gebeurt dit voornamelijk door condensatie. Dit condensaat moet via de condensleiding weer naar het condensvat worden teruggevoerd. Om nu te voorkomen dat mèt het condensaat ook stoom via de condensleiding ontsnapt, worden *condenspotten* toegepast. Voor de bepaling van de grootte van de condenspot zijn de volgende parameters van belang:

- De hoeveelheid condens per tijdseenheid:

$$v = \frac{P}{Q_v} \quad [\mathrm{kg/s}]$$

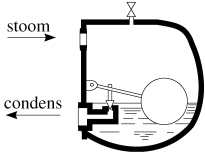
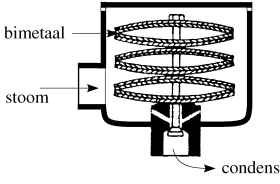
waarin:
P = vermogen [kW]
Q_v = verdampingswarmte [kJ/kg]

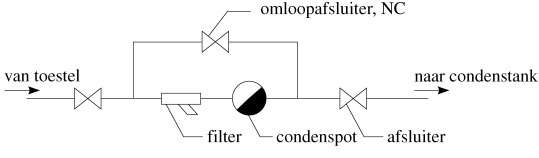
- De drukken vóór en na de condenspot.
- Het hoort proces. Bijvoorbeeld een continu condensaanbod of hoge belastingen in een korte tijdseenheid.

Voor de exacte bepaling van de grootte van de condenspot raadplege men de selectiegegevens van de fabrikant.

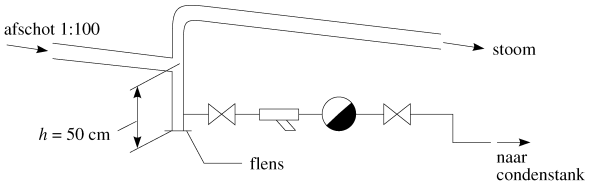
Tabel 6.1 geeft enkele typen condenspotten met toepassings-criteria. Figuur 6.5 laat de opstelling van een condenspot zien. Figuur 6.6 geeft de ontwatering van een stoomleiding weer.

Tabel 6.1 Typen condenspotten

soort condenspot	toepassingscriteria
vlotter- en emmercondenspot 	– bij geregelde systemen zoals tegenstroom-apparaten, kookpotten, enz. – niet geschikt voor buiten-opstelling in verband met vorstgevaar – afvoer van het condens is continu
thermische condenspot 	– intermitterend afvoer-systeem – toepassing in die situaties, waar een constant condensaanbod is – kleine afmetingen
thermodynamische condenspot	– vooral geschikt voor ontwatering van stoom-leidingen – vorstbestendig – klein en goedkoop



Figuur 6.5 Opstelling condenspot



Figuur 6.6 Ontwatering stoomleiding

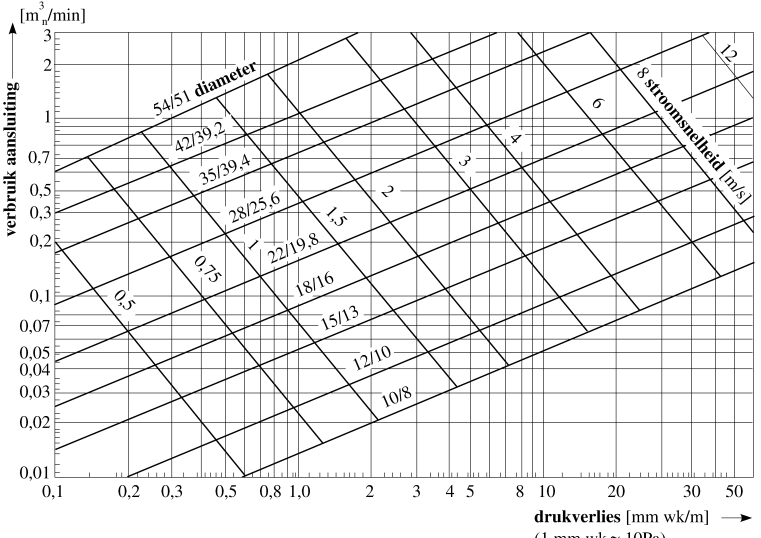
6.2 Persluchtleidingen

De diameter van een *persluchtleiding* wordt bepaald op basis van de te transporteren luchthoeveelheid per tijdseenheid en de snelheid c.q. het toelaatbare drukverlies. Voor perslucht-installaties is een startdruk van 7 bar gebruikelijk. Het drukverlies bedraagt ca. 10% van de startdruk.
De luchtsnelheden in de hoofdleidingen zijn 10–15 m/s en in aftakkingen ca. 8 m/s.

Tabel 6.2 Verbruiken bij perslucht [m_n^3/ min]

aansluiting	verbruik
afbouwhamer	1,3–1,8
boormachine groot	0,7–2,5
klein	0,3–0,4
reinigingspistool	0,25–0,35
cirkelzaag	0,7
klinkhamer	0,6–0,7
slijpmachine	0,3–1,3
laboratorium-aansluitpunt	0,01–0,02
1/2″ aansluitpunt bij 8 m/s:	35 m_n^3/h; 7 bar
3/4″ aansluitpunt bij 8 m/s:	70 m_n^3/h

Met behulp van de gegevens van tabel 6.1 en een snelheid van max. 10 m/s als uitgangspunt, kan uit figuur 6.5 de diameter en het drukverlies worden bepaald.



Figuur 6.7 Bepalen leidingdiameter en drukverlies bij persluchtleidingen

6.3 Aardgasleidingen

De diameters voor *aardgasleidingen* kunnen worden bepaald volgens vier methoden, afhankelijk van de grootte en de werkdruk van de installatie.
Twee ervan worden hier aangegeven:
- *Tabelmethode*: voor installaties tot 70 kW belasting.
- *Grafiekmethode*: voor installaties tot 1000 kW belasting.

Als uitgangspunt voor de belasting moeten de gegevens van de apparaten worden gehanteerd,bijv. 14 kW voor een fornuis.

Gelijktijdigheden

Bij de berekening mogen de volgende *gelijktijdigheden* voor *toestellen* in acht worden genomen:
- Gasfornuis : 0,7
- Verwarmingstoestel : 1,0
- Warmtapwatertoestel: 1,0

Verder kan bij woonhuizen nog met een extra gelijktijdigheids-factor gerekend worden. Voor een leidingsectie met:
- 2 of minder toestellen: 1,0
- 3 of meer toestellen : 0,8

Tabelmethode

- De belastingen worden bepaald voor ieder leidingdeel.
- De lengte wordt gerekend vanaf de gasmeter tot het verste aansluitpunt.
- Uit tabel 6.3 wordt nu de juiste leidingmaat geselecteerd aan de hand van de grootste lengte en de belasting in het betref-fende leidingdeel.

Grafiekmethode

- Er wordt een belastingstaat gemaakt,waarin – rekening hou-dend met de gelijktijdigheden – de belastingen per leidingdeel zijn aangegeven.
- De maximale sectielengte vanaf de gasmeter tot het verste aansluitpunt wordt bepaald.

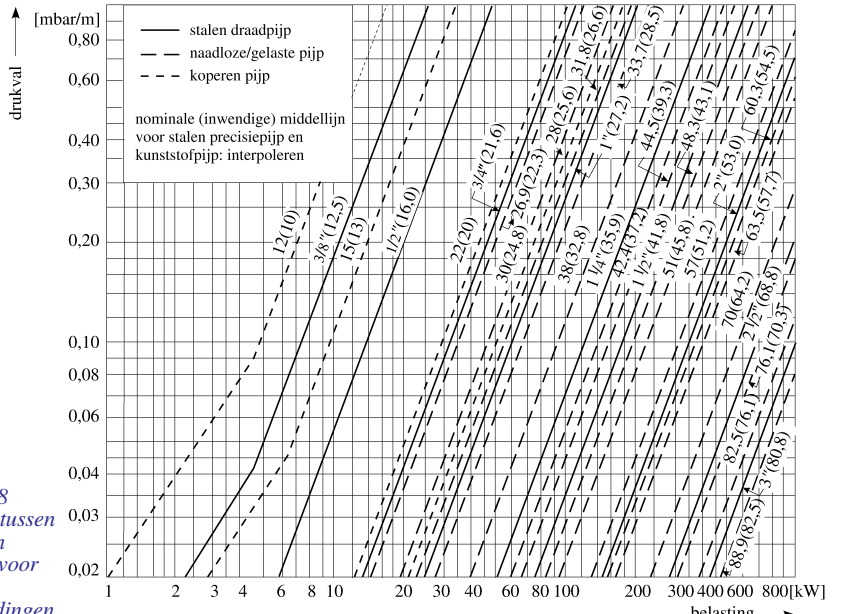
- Bij deze lage-druk installatie mag het maximale drukverlies niet meer dan 1,7 mbar bedragen.
- Het maximale drukverlies wordt nu gedeeld door de maximale lengte. Hieruit volgt het toelaatbare drukverlies/meter.
- Met behulp van figuur 6.8 kan nu op basis van de belasting per leidingdeel en het hiervoor genoemde drukverval, de juiste leidingdiameter gekozen worden.

Voor *uitvoerige* gegevens, zie NEN 1078.

Tabel 6.3 Toelaatbare belasting in leidingsecties [kW]

	lengte langste sectiereeks [m]				
nieuw gelegde leiding	0–4,0	4,1–6,0	6,1–9,0	9,1–13,0	13,1–20,0
leiding na uitbreiding	0–6,0	6,1–9,0	9,1–13,1	13,1–20,0	
staal [inch]					
3/8	20	16	12	10	7,2
1/2	35	27	22	18	14
3/4	(77)[1)]	61	48	40	32
1	(135)[1]	(108)[1]	(86)[1]	70	56
koper [mm]					
12 (10,4)	11	8,5	6,3	4,3	2,8
15 (13)	23	18	14	11	8,5
18 (16)	38	30	24	19	15
22 (19,6)	67	52	42	34	27
28 (25,6)	(122)[1]	(96)[1]	(78)[1]	64	50

[1)] De belastingen tussen ( ) overschrijden de grenswaarden van 70 kW. Bij deze tabel is uitgegaan van één richtingsverandering per meter.



Figuur 6.8 Verband tussen drukval en belasting voor pijpen in binnenleidingen

6.4 Koud- en warmtapwaterleidingen

Voor de bepaling van de leidingdiameters zijn de volgende parameters van belang:
- Benodigde einddruk bij het afnametoestel.
- Begindruk bij de watermeter.
- Hoogte vanaf de watermeter tot het afnametoestel.
- Waterdebieten en toelaatbare snelheden.

Om de doorstromende waterhoeveelheden per tijdseenheid (debiet) in de leiding te bepalen wordt uitgegaan van de gegevens in tabel 6.4, bijv. wastafelkraan 300 l/h.

Gelijktijdigheid

Wanneer op een leidingnet meer afnemers aangesloten zijn, mag worden uitgegaan van een beperkte *gelijktijdigheid*. Het is name-lijk in een wooncomplex niet erg waarschijnlijk, dat alle kranen tegelijkertijd geopend zullen zijn. Een gebruikelijke methode is de $q\sqrt{n}$ methode,waarbij geldt:
- q = waterdebiet = 300 l/h bij $n = 1$.
- n = aantal tapeenheden voor het betreffende leidingpeil.

Voorbeeld. Op een leiding zijn 10 wastafels aangesloten. Het debiet voor het eerste leidingdeel wordt als volgt bepaald:
- Uit tabel 6.4 volgt dat een wastafelkraan 1 tapeenheid vertegenwoordigt.
- Door het eerste leidingdeel gaan dus 10 tapeenheden. Het debiet is dan $300\sqrt{10} = 949/\text{h}$.

Bepalen leidingdiameter

Opmerking: de drukken worden gewoonlijk uitgedrukt in meter waterkolom [1 mwk $\triangleq$ 10 kPa].

Voor de totale druk in het leidingnet geldt:

$$p_{\text{tot}} = p_{\text{g}} + p_{\text{w}} + p_{\text{u}}$$

waarin:

p_{tot} = beschikbare druk voor de watermeter [mwk] (waterleidingbedrijven leveren meestal 25 mwk)
p_g = hoogtedruk [mwk]
= druk t.g.v. hoogteverschil tussen watermeterniveau (peil) en het hoogste tappunt in meter
p_w = drukverlies in leidingen en appendages [mwk]
p_u = benodigde voordruk voor het afnamepunt [mwk]

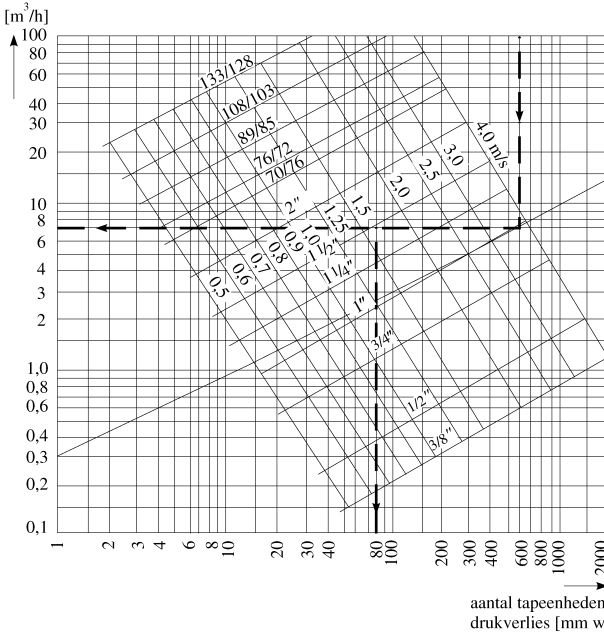
wastefelkraan	5
andere kranen	5
drukspoeler	15–25
brandslanghaspel	12–20

Gangbare maximale watersnelheden in leidingen:
- Aansluitleiding : 1 m/s (bij drukspoelers tot 3 m/s).
- Verdeelleidingen : 1,5 m/s.
- Hoofdleidingen : 2 m/s.

Om de *leidingdiameter* te kunnen bepalen moet de begindruk verminderd worden met de uitstroomdruk, de hoogte en de weerstand van de watermeter. Bijvoorbeeld:
$25 - 5(= p_u) - 10(= p_g) - 2,5(= p_{watermeter})$
$= 7,5\,mwk = 75\,kPa$

Met behulp van figuur 6.9 kan vervolgens voor ieder leidingdeel het drukverlies worden bepaald, rekening houdend met de maximale watersnelheden zoals aangegeven. De drukverliezen in figuur 6.9 vermenigvuldigt met de leidinglengte mogen de $1/2p_w$ niet overschrijden. De andere helft van p_w is nodig voor de bochten en appendages.

Voor *uitvoerige* gegevens, zie de AVWI (NEN 1006) met de bijbehorende VEWIN-werkbladen.



Figuur 6.9 Drukverlies voor koud water in koperen pijpen

Tabel 6.4 Tapeenheden watertoestellen

toestel	vermogen	tapeenheden [l/h]
tapkraan $\frac{3}{8}''$	300	1
tapkraan $\frac{1}{2}''$	600	4
tapkraan $\frac{3}{4}''$	1200	16
tapkraan $1''$	1800	36
vlotterkraan	150	$\frac{1}{4}$
mengkraan	600	4
douche-mengkraan	300	1
wastafelkraan	300	1
handwasbakken	150	$\frac{1}{4}$
gootsteenkraan	600	4
gevelkom $\frac{1}{2}''$	600	4
lab-kraan	300	1
drukspoeler(s) 1	4500	225
drukspoeler(s) 2	–	225
drukspoeler(s) 3	–	285
drukspoeler(s) 4	–	315
drukspoeler(s) 5	–	345
drukspoeler(s) 6	–	375
drukspoeler(s) 7	–	405
drukspoeler(s) 8	–	435
drukspoeler(s) 9	–	465
drukspoeler(s) 10	–	495
drukspoeler(s) 15	–	645
drukspoeler(s) 20	–	795
drukspoeler(s) 30	–	1095
drukspoeler(s) 50	–	1675
drukspoeler(s) 100	–	3195
x drukspoelers	–	$30(x-1)+225$
overige toestellen	$q\,l/h$	$\left(\frac{q}{300}\right)^2$

6.5 Handelsdiameters leidingen en afsluiters

Tabel 6.5 Tapwaterleidingen en afsluiters

NEN 2200/NEN 2263 koperen leidingen voorzien VAM KIWA–garantiemerk kwaliteitseis Nr. 57 van KIWA

tapwater pijpdiameters			K.W.	H.W. W.W.	afsluiter
uitw. [mm]	inw. [mm]	noemm. tek. [mm]	isol. [mm]	isol. [mm]	doorlaat [mm]
156	150	156	25	50	150
133	127,4	133	25	50	125
106	101	106	25	50	100
80	75,8	80	25	50	80
67	63,2	67	25	50	65
54	51	54	25	40	50
42	39,2	42	25	40	40
35	32,4	35	25	40	32
28	25,6	28	25	40	25
22	19,8	22	25	30	20
15	13	15	25	30	15
12	10	12	25	30	10
10	8	10	25	30	10

Tabel 6.6 Droogweer- en hemelwaterafvoerleidingen

P.V.C. klasse 41 NEN 7045/7046
PE 50 NEN 7008/7018
SML NEN 7062 met KOMO
certificaat nr. 3144/82

pijpdiameters P.V.C.		P.E.		S.M.L.	
noemm. tek. [mm]	inw. [mm]	noemm. tek. [mm]	inw. [mm]	noemm. tek. [mm]	uitw. [mm]
		315	295,4	300	326
		250	234,4	250	274
		200	187,6	200	210
160		160	147,6	150	160
125		125	115,2	125	135
110		110	101,4	100	110
		90	83		
75		75	69	70	78
		63	57		
50		56	50	50	58
40		40	34		
32		32	26		

Tabel 6.7 Heetwater- en stoomleidingen en afsluiters

NEN 3257/DIN 2441
NEN 2323/DIN 2448

naadloze stalen vlampijpen
volgens NEN 2323/DIN 2448
(normale wanddikte)

H.W.$>110^{*}$ /stoom $\geqslant$ 1 bar(0)

pijpdiameters				afsluiter
uitw. [mm]	inw. [mm]	noemm. tek.[mm]	isol. [mm]	doorlaat [mm]
508	486	508	50	500
457	437	457	50	450
406,4	388,8	406	50	400
355,6	339,6	355	50	350
323,9	309,7	323	50	300
273	260,4	273	50	250
219,1	206,5	219	50	200
165,1	159,3	165	50	150
139,7	131,7	139	50	125
114,3	106,3	114	50	100
88,9	80,9	88	50	80
76,1	68,1	76	50	65
60,3	52,3	60	40	50
48,3	40,3	48	40	40
naadloze stalen vlampijpen volgens NEN 2323/DIN 2448 (zware wanddikte)				
42,4	34,4	42	40	32
33,7	25,7	34	30	25
26,9	21,1	27	30	20
21,3	15,5	21	30	15
17,2	11,4	17	30	10

Tabel 6.8 C.V. water-, gekoeld water- en aardgasleidingen en afsluiters

NEN 3257/DIN 2440
NEN 2323/DIN 2448

naadloze stalen vlampijpen
volgens NEN 2323/DIN 2448

W.W. $\leqslant 110^{\circ}$ /gek.w/gas

pijpdiameters				afsluiter
uitw. [mm]	inw. [mm]	noemm. tek. [mm]	isol. [mm]	doorlaat [mm]
508	486	508	50	500
457	437	457	50	450
406,4	388,8	406	50	400
355,6	339,6	355	50	350
323,9	309,7	323	50	300
273	260,4	273	50	250
219,1	206,5	219	50	200
168,3	159,3	168	50	150
139,7	131,7	139	50	125
114,3	107,1	114	50	100
88,9	82,5	88	50	80
76,1	70,3	76	50	65
60,3	54,5	60	40	50
48,3	41,8	48	40	40

gelaste stalen buizen volgens
NEN 3257/DIN 2440

42,4	35,9	11/4″	40	32
33	27,2	1″	30	25
26,9	21,6	3/4″	30	20
21,3	16	1/2″	30	15
17,2	12,5	3/8″	30	10

Literatuur

- *ASHRA Guide*
  American Society of Heating, Refrigerating, Ventilating and Airconditioning Engineers.
- *Dubbel – Taschenbuch der Maschinenbau*
  Berlin, Springer.
- *Lehrbuch der Klimatechnik*
  Karlsruhe, Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik.
- Recknagel/Sprenger
  Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik
  München, Oldenbourg.
- Zie ook de in dit hoofdstuk genoemde publicaties.

Koeltechniek en warmtepompen G2

1 Inleiding

2 Toepassingsgebieden

3 Koelproces
3.1 Algemeen
3.2 Het koelproces in het (log)p, h-diagram
3.3 Rekenvoorbeeld bestaande koelinstallatie
3.4 Rekenvoorbeeld nieuw ontwerp warmtepomp

4 Koelmiddelen (koelgassen)
4.1 Algemeen
4.2 Koelmiddelen en wetgeving

5 Expansieventiel

6 Compressoren

7 Verdampers

8 Condensors

9 Anti-vries oplossingen

10 Absorptie-koelmachines

11 Stoomstraal-koelmachines

12 Warmtepompen, aanvullende gegevens

1 Inleiding

De behoefte van de mens aan het koelhouden van levensmiddelen bestaat al eeuwen. Aanvankelijk voorzag men hierin door natuurijs in zgn. ijskelders op te slaan. Pas na 1800 komt de ontwikkeling van een koelmachine opgang.

1750 William Cullen ontdekt dat water kan bevriezen door met een vacuümpomp een lage druk te creëren.
1810 Men bouwt een absorptiekoelmachine.
1852 William Thomson (Lord Kelvin) beschrijft het principe van de warmtepomp.
1876 De eerste kunstijsbaan in Chelsea Engeland.
1904 Mollier ontwikkelt het p,h-diagram.
1927 Eerste warmtepomp bij Southern California Edison Company.
1930 De invoering van de freonen.
1985 Montreal-protocol, terugdringen CFK productie.

In dit hoofdstuk wordt de werking van de koelmachine en de warmtepomp besproken, aangevuld met enkele richtwaarden en praktijkvoorbeelden.
Het principe van de warmtepomp en de koelmachine is identiek; alleen gebruikt men deze machines voor twee verschillende doeleinden.

2 Toepassingsgebieden

Het temperatuurgebied gaat van $+60^{\circ}C$ tot $-50^{\circ}C$. Dampstraal-, compressie- en absorptiekoelmachines worden toegepast in de machinebouw, chemische techniek, levensmiddelenkoeling, klimaatinstallaties en verwarmingstechniek.
Temperatuurgebied $-100^{\circ}C$ tot $-150^{\circ}C$, het zgn. *warme cryogene gebied* en het temperatuurgebied $-200^{\circ}C$ en lager het zgn. *koude cryogene gebied* vallen buiten deze beschouwingen.

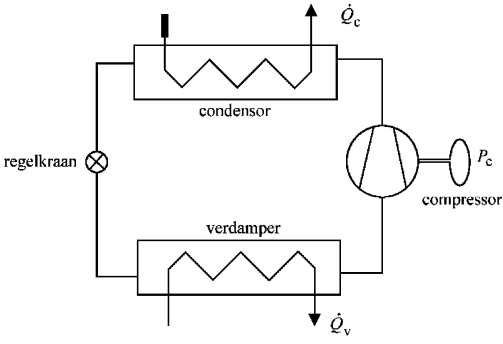
Tabel 2.1 Overzicht van soorten koelmachines

soort	vermogens-gebied [kW]	toepassingsgebied
– direct-koelers in roomairconditioners	0–2	praktijkruimten enz.
– direct-koelers in splitsystems	2–15	winkels, kantoor, vergaderruimte, bakkerij enz.
– luchtgekoelde waterkoel-aggregaten met scroll-, zuigercompressoren	tot ca. 400 (spec. tot 800)	kantoren, produktie-ruimten enz.
– watergekoelde waterkoel-aggregaten met scroll-, zuigercompressoren	tot ca. 400 (spec. tot 800)	kantoren, produktie-ruimten enz.
– schroef- en centrifugaal-koelmachine luchtgekoeld	tot ca. 1500	ziekenhuizen, grote kantoren, fabrieken
– schroef- en centrifugaal-koelmachine watergekoeld	tot ca. 4000	ziekenhuizen, grote kantoren, fabrieken
– absorptie-machines, direct gestookt, watergekoeld	tot ca. 150	kantoren enz.
– absorptie-machines, direct gestookt, luchtgekoeld	tot ca. 20	kantoren, winkels
– absorptie-machines, indirect gestookt, watergekoeld	tot ca. 350	
– grote absorptiemachines indirect gestookt (stoom of heet water) watergekoeld	van 350 tot 5500	grote installaties in combinatie met warmte-krachtinstallaties

3 Koelproces

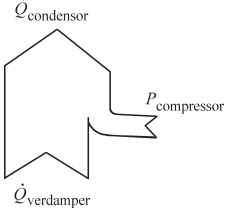
3.1 Algemeen

De koelmachine of warmtepomp bestaat uit vier hoofdcomponenten, nl. de compressor, de condensor, de regelkraan (expansieventiel) en de verdamper.



Figuur 3.1 Principeschema

In het *Sankey-diagram* wordt weergegeven hoe de energiestromen verlopen. Warmte wordt bij een lagetemperatuur opgenomen ($\dot{Q}_v$) en door de compressor (P_c), naar een hoger temperatuurniveau getransporteerd en daar aan de condensor ($\dot{Q}_c$) afgegeven.



Figuur 3.2 Sankey-diagram

Wanneer deze machine gebruikt wordt om te koelen, is $\dot{Q}_v$ de nuttige warmtestroom en spreekt men van een *koelmachine*. Wanneer deze machine gebruikt wordt om via de condensor te

verwarmen dan is $\dot{Q}_c$ de nuttige warmtestroom en spreekt men van een *warmtepomp*.

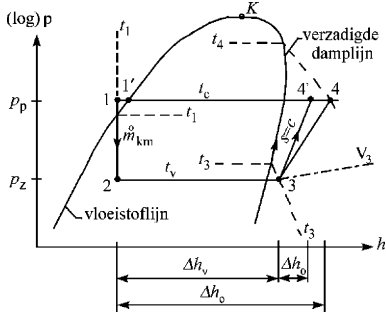
Het Sankey-diagram geeft een duidelijk beeld van de warmtestromen. De koudefactor ε_k, de warmtefactor ε_w of COP (Coëfficiënt of Performance) geven het rendement weer.

$$\text{Koelmachine: COP} = \frac{\dot{Q}_v}{P_c} \text{ (ongeveer 3 á 4)}$$

$$\text{Warmtepomp: COP} = \frac{\dot{Q}_c}{P_c} = \frac{P_c + \dot{Q}_v}{P_c} = 1 + \frac{\dot{Q}_v}{P_c} \text{ (ca. 4 á 5)}$$

3.2 Het koelproces in het (log)p, h-diagram

(Zie figuur 3.3). Op de verticale as staat de absolute druk in bar (soms logaritmisch) en op de horizontale as de warmteinhoud van het koelmiddel de zgn. enthalpie in kJ/kg aangegeven. *K* is het kritische punt, hierboven wordt het koelmiddel in dampvorm niet meer vloeibaar.



Figuur 3.3 Het koelproces in het (log)p, h-diagram

Links van de (verzadigde) vloeistoflijn F is het vloeistofgebied. Rechts van de verzadigde damplijn F is het oververhitte dampgebied en het gebied tussen deze twee lijnen noemt men het overgangs- of coëxistentiegebied. In het coëxistentiegebied lopen de isothermen evenwijdig aan de druklijnen, isotherm en druklijn vallen hier samen.
De persdruk p_p is de verzadigde dampspanning bij de verzadigings- resp. condensatietemperatuur t_c, dezelfde relatie hebben de zuigdruk p_z en de verdampingstemperatuur t_v.
In het vloeistofgebied lopen de isothermen verticaal (zie lijn t_1) en in het oververhittedampgebied schuin naar beneden (zie lijn t_3). De lijn door punt 3, 4 is een lijn van constante entropie (s = constant), dit is een omkeerbaar adiabatisch proces waarbij geen warmte toe- of afgevoerd wordt en waarvoor geldt:

$$p \cdot V^k = \text{constant}$$

De lijn door punt 3 naar rechts (v_3) is een lijn van constantvolume die belangrijk is bij berekening van de capaciteit, slagvolume (m^3/s) van de compressor.

1-2 Het passeren van het expansieventiel. De vloeistof ondergaat een drukval en verdampt gedeeltelijk. Tijdens deze fase blijft de enthalpie constant. De voeler van het expansieventiel regelt de massastroom van het koelmidel door het ventiel.

2-3 De vloeistof (met $\pm$ 20% damp) komt in de verdamper. De verdampingstemperatuur is lager dan de omgevingstemperatuur er gaat dan een warmtestroom lopen van de omgeving naar de vloeistof in de verdamper waardoor deze verdampt. De voeler van het expansieventiel regelt zoveel koelmiddel ($\dot{m}_R$) door het ventiel dat het gas licht oververhit (ca. 4°C w.u.v. dat $t_3 = t_v + 4$) de verdamper verlaat.
De verdampercapaciteit is $\dot{Q}_v = \dot{m}_R(h_3 - h_1)$ [kW]

3-4' De licht oververhitte damp wordt door de compressor aangezogen en gecomprimeerd tot de druk p_p. Dit proces wordt altijd in het diagram getekend via de lijn van $s = c$. Het theoretisch aandrijfvermogen is: $P_o = \dot{m}_R \cdot \Delta h_o$ [kW] Het werkelijke aandrijfvermogen P_{as} kan men berekenen door een schatting te maken van het inwendig rendement η_i en

het mechanisch rendement η_m van de compressor. (Afhankelijk van de soort compressor komen niet alle mechanische verliezen als warmte in de damp terecht. Echter de hier gehanteerde methode geeft redelijk reële uitkomsten). Geschat: 0,75 $\langle(\eta_i \cdot \eta_m)\rangle$ 0,85. Hoe meer zuigers, hoe meer $\eta_i \rightarrow 0{,}75$ en bij schroef- of centrifugaalcompressoren $\eta_i \rightarrow 0{,}85$. Het compressoraandrijfvermogen wordt dan:

$$P_{as} = \frac{\dot{m}_R(h_4 - h_3)}{\eta_i \cdot \eta_m}[\text{kW}]$$

Eventueel kan men h_4 berekenen: $h_4 = h_3 + \dfrac{\Delta h_o}{\eta_i \cdot \eta_m}$

4-1 De oververhitte damp verlaat de compressor ($t_4 = 60$ á 90°C) en komt in de condensor. De oververhittingswarmte wordt afgevoerd, daarna gaat de damp condenseren. In punt 1' is alle damp vloeistof geworden en afhankelijk van het soort condensor is het zelfs mogelijk dat de vloeistof 1 á 2°C onderkoeld wordt, punt 1, $t_1 = t_c - 2$. De condensorcapaciteit wordt dan:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_R(h_4 - h_1) = \dot{Q}_v + P_{as}$$

3.3 Rekenvoorbeeld bestaande koelinstallatie

De gebruiker van een koelinstallatie leest op de *persmanometer* van de compressor een druk van 7,9 bar, dit is 8,9 bar (abs) en hoort bij de lijn 1-4 in het diagram. De *zuigmanometer* wijst 1,5 bar aan, dit is 2,5 bar (abs) en de lijn 2-3 in het diagram. Aangenomen wordt dat het koelmiddel in de condensor met verzadigingstemperatuur de condensor verlaat, dit is punt 1 en de oververhitting waarop het expansieventiel afgesteld staat 5°C is, dit is punt 3.
Gesteld wordt dat de compressie isentroop verloopt ($s = c$) dit is de lijn 3-4 en het compressorrendement $\eta_i\eta_m = 75\%$. Het elektrisch

opgenomen *compressorvermogen* is 15 kW, het aandrijfvermogen zal dan ca. 3 à 5% kleiner zijn. $P_{as} = 14{,}4$ kW.

Oplossing:
Uit het diagram lezen we af dat $h_{1,2} = 249$, $h_3 = 402$ en $h_4 = 428$ kJ/kg.
Het theoretisch compressorvermogen: $P_0 = 0{,}75.14{,}4 = 10{,}8$ kW.
Uit $P_0 = \dot{m}_R \Delta h_{comp}$ volgt dat $\dot{m}_R = 10{,}8/26 = 0{,}415$ kg/sec.
Dus $\dot{Q}_{verd} = 0{,}415.(402\text{-}249) = 63{,}6$ kW.
De $COP_{(k)} = 63{,}6/14{,}4 = 4{,}41$ of 441%.
De benodigde hoeveelheid koelwater voor de condensor

$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_w c_w \Delta T_w$ bij een $\Delta T_w = 5°C$ wordt:

$$\dot{m}_w = \frac{63{,}6 + 14{,}4}{4{,}2 \times 5} = 3{,}7 \text{ kg/s} = 13{,}4 \text{ m}^3/\text{h}$$

3.4 Rekenvoorbeeld nieuw ontwerp warmtepomp

Een installateur wil een warmtepomp gebruiken voor vloerverwarming. Geëist wordt een wateraanvoertemperatuur van 25°C en een $\dot{Q}_{vloer} = 77{,}4$ kW. Rekening houdend met de *k*-waarde ($\dot{Q}_{ww} = \text{k.A.}\Delta\text{T}$) van de warmtewisselaar (dit is de condensor) is een condensatietemperatuur van $35°C \rightarrow p_p = 8{,}9$ bar(abs) mogelijk. Dit is de lijn 1-4.
Er wordt warmte onttrokken aan bronwater met een temperatuur van 8°C (meestal 10 à 12°C). Wanneer ook hier een $\Delta T = 10°C$ genomen wordt dan is de verdampingstemperatuur $-3°C \rightarrow p_z = 2{,}5$ bar(abs). Dit is de lijn 2-3. Wanneer de vloeistof juist condenseert (punt 1) en de damp 5°C oververhit de verdamper verlaat (punt 3), dan kan men uit het diagram de enthalpiewaarden aflezen.

$h_{1,2} = 249, h_3 = 402$ en $h_4 = 428$ kJ/kg.

Oplossing:
Met $\eta_i \cdot \eta_m = 0{,}75$ is $h_4 = 402 + (428 - 402)/0{,}75 = 436{,}7$ kJ/kg

$$\dot{Q}_{vloer} = \dot{Q}_{cond} = \dot{m}_R \Delta h_{cond} \text{ w.u.v. } \dot{m}_R = \frac{77{,}4}{436{,}7 - 249} = 0{,}412 \frac{kg}{sec}$$

$$P_{as} = 0{,}412.(436{,}7 - 402) = 14{,}2 \text{ kW w.u.v.}$$

$$COP_{(W)} = \frac{77{,}4}{14{,}3} = 5{,}42 \text{ is } 542\%$$

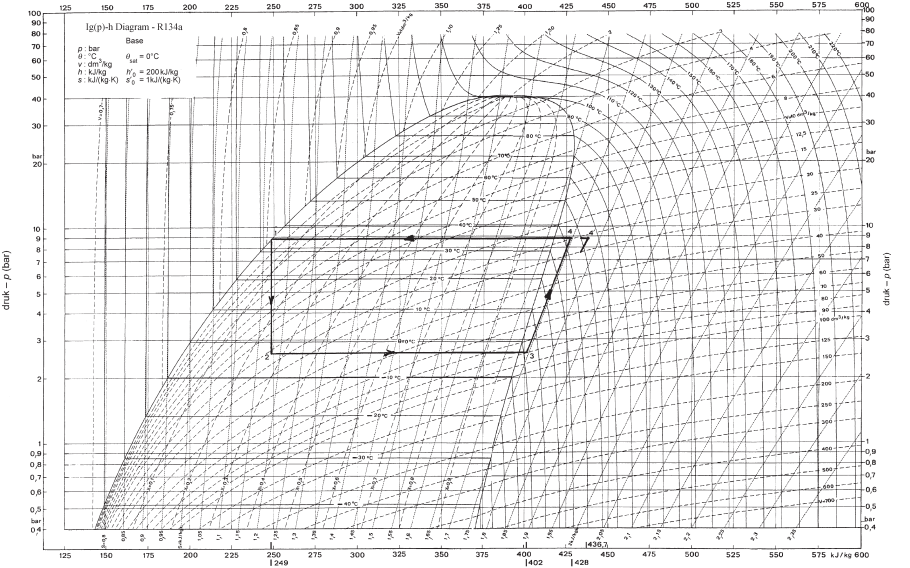
De capaciteit van de circulatiepomp van de vloerverwarming ($\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_w c_w \Delta T_w$) bij een $\Delta T = 4°C$ wordt dan

$$\dot{m}_w = \frac{77{,}4}{4{,}2 \times 4} = 4{,}6 \text{ kg/s} = 16{,}6 \text{ m}^3\text{/h}.$$

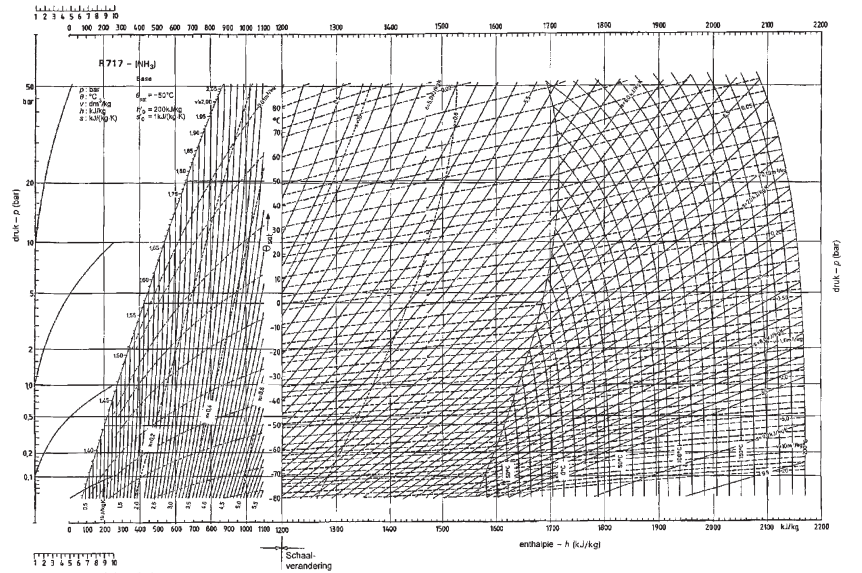
De capaciteit van de bronwaterpomp bij een $\Delta T = 5°C$ wordt dan:

$$\dot{m}_w = \frac{77{,}4 - 14{,}4}{4.2 \times 5} = 3{,}0 \text{ kg/s} = 10{,}8 \text{ m}^3\text{/h}.$$

Opmerking: De milieuwetgeving stelt een maximum aan het aantal m^3/h dat onttrokken mag worden.



Figuur 3.4 Tetrafluor-ethaan, log p,h diagram van-(CF_3-CHF_2) R134a



Figuur 3.5 Ammoniak, log p,h diagram van-(NH3) R717

4 Koelmiddelen (koelgassen)

4.1 Algemeen

Enkele veel toegepaste notaties in de koudemiddelen zijn:

CFK Koelmiddel waarvan het molecuul alleen chloor, fluor en koolstofatomen bevat.

HCFK Koelmiddel dat zowel chloor, fluor, waterstof als koolstof atomen bevat.

HFK Koelmiddel met alleen waterstof, fluor en koolstof in het molecuul.

Drop-in Koelmiddel dat een CFK in een bestaande installatie kan vervangen, zonder dat een ingrijpende technische aanpassing nodig is. Deze koelmiddelen worden op den duur verboden, omdat de *Ozon Depletion Potential* (ODP) niet nul is.

Definitieve vervanger: koelmiddel waarvan het gebruik ook op de lange duur is toegestaan (ODP = 0).

Enkelvoudig koelmiddel: koelmiddel bestaande uit een enkele verbinding.

Azeotropisch mengsel: mengsel van twee koelmiddelen die in het mengsel niet meer te onderscheiden zijn, het mengsel gedraagt zich als een enkelvoudig koelmiddel.

Niet-azeotropisch mengsel: mengsel van twee koelmiddelen dat zich niet als een enkelvoudig koelmiddel gedraagt.

Tabel 4.1 Benamingen en chemische formules koudemiddelen

stof	naam	chemische formule	triviaalnaam
R-12	di-chloor-di-fluor-methaan	CCl_2F_2	CFK
R-22	chloor-di-fluor-methaan	$CHClF_2$	HCFK
R-23	tri-fluor-methaan	CHF_3	HFK
R-115	chloor-penta-fluor-ethaan	$CClF_2CF_3$	CFK
R-124	chloor-tetra-fluor-ethaan	$CHFClCF_3$	HCFK
R-125	penta-fluor-ethaan	C_2HF_5	HFK
R-134A	tetra-fluor-ethaan	CF_3CH_2F	HFK
R-142B	chloor-di-fluor-ethaan	CH_3CClF_2	HCFK
R-152A	di-fluor-ethaan	CH_3CHF_2	HFK
R-290	propaan	C_3H_8	
R-717	ammoniak	NH_3	

Tabel 4.2 Algemene gegevens koudemiddelen

	samenstelling	1 Kookpunt (bij 1 bar) [°C]	2 Kritische temp. [°C]	3 Kritische druk [bar]	4 ODP[1]	5 HGWP[2]
Enkelvoudige koudemiddelen						
R-12		−30,1	112	41,1	1	3,1
R-22		−41	96,0	49,8	0,05	0,34
R-134A		−26,4	101,1	40,7	0	0,28
R-717[3]		−33,4	132,3	112,6	0	0
Azeotropische mengels						
R-502	48,8% R-22, 51,2% R-115	−45,7	82,2	40,7	0,34	4,01
R-507	50% R-125, 50% R-134A	−47,4	71	37,2	0	0,099
Niet-azeotropische mengels						
R-401A	53% R-22, 13% R-152A, 34% R-124	kook-	108,0	46,0	0,03	0,22
R-402A	60% R-125, 2% R-290, 38% R-22	traject	75,5	41,3	0,02	0,63
R-404A	44% R-125, 4% R-134A, 52% R-143A	zie	72	37,4	0	1
R-407C	23% R-23, 25% R-125, 52% R-134A	tabel	89,0	46,4	0	0,4
R-408A	47% R-22, 46% R-134A, 7% R-125	2.3	83,5	43,4	0,023	0,75
R-409A	60% R-22, 25% R-124, 15% R-142B		107	46,0	0,05	0,31

[1] ODP = Ozon Depletion Potential
[2] HGWP = Halocarbon Global Warming Potentiaal
[3] ammoniak

Tabel 4.3 Kooktraject temperaturen niet-azeotropische mengsels bij 1 bar

	kookpunt verzadigde vloeistof [°C]	kookpunt verzadigde damp [°C]
R-401A	−33,0	−26,9
R-402A	−48,9	−47,1
R-404A	−46,8	−45,8
R-407C	−42,6	−35,3
R-408A	−44,7	−44,0
R-409A	−34,6	−26,1

Uit tabel 4.3 blijkt dat bij een druk van 1 bar de verzadigingstemperatuur van de daar genoemde koelmiddelen (mengsels) niet constant is. Dus hier geldt niet dat in het coëxistentiegebied de isobaar en de isotherm samenvallen. Reden is dat dit mengsels zijn van een verschillend kookpunt. De lichte component verdampt eerst bij een hogere temperatuur dan de zwaardere. Deze koelmiddelen worden ook *gliders* genoemd.

Gebruik

R-134A Definitieve vervanger voor R-12
R-717 Mogelijk definitieve vervanger R-22 en R-502
R-507 Definitieve vervanger R-502

R-401A Drop-in voor R-12
R-402A Drop-in voor R-502
R-404A Definitieve vervanger voor R-502
R-407C Definitieve vervanger voor R-502
R-408A Drop-in voor R-502
R-409A Drop-in voor R-12

Olie

R-134A, R-507, R- 404A en R- 407C alleen te gebruiken in combinatie met 100% ester-olie als compressorsmering.

Eigenschappen

De in tabel 4.2 genoemde koelmiddelen, met uitzondering van R-717 (ammoniak), zijn geheel of bijna reukloos, kleurloos, niet brandbaar of explosief bij normale omgevingsdruk en niet giftig. De AEL (Allowable Exposure Limit voor 8 uur) ligt voor zover nu bekend bij alle genoemde koelmiddelen boven de 1000 ppm.
Ammoniak kan met lucht een brandbaar en zelfs explosief mengsel (bij 16 tot 25 vol%) vormen. Ammoniak reageert met zink, koper, zilver, tin alliages daarvan die koper bevatten. Ammoniak heeft een ‘stekende’ geur die al bij lage concentratie (ca. 25 ppm) waarneembaar is. Voor onbeschermd verblijf wordt een concentratie van 25 ppm gedurende 8 uur toelaatbaar geacht. Een concentratie tussen 400 en 700 ppm veroorzaakt prikkeling aan keel en ogen maar heeft geen ernstige gevolgen bij verblijf korter dan 1 uur. Een concentratie van 1700 ppm kan na 30 minuten

dodelijk zijn. Bij concentraties boven de 5000 ppm kan een korte blootstelling al dodelijk zijn.

4.2 Koelmiddelen en wetgeving

Algemeen bekend is dat de freonen, zoals R12 een CFK, de ozonlaag aantasten en mede het broeikaseffect veroorzaken. Het ministerie van VROM heeft, in Europees verband, regels opgesteld betreffende het gebruik van koelmiddelen. De *Stichting Erkenningsregeling voor de uitoefening van het Koeltechnisch Installatiebedrijf* (STEK) is door het ministerie aangewezen als uitvoerend orgaan, met vergaande bevoegdheden, om toezicht te houden op de uitvoering van deze regels.
STEK leidt monteurs op en kan bedrijven als STEK-erkende onderneming toelaten. Alle koelinstallaties of warmtepompen met een koelmiddelinhoud van 3 kilogram of meer vallen onder STEK toezicht. Naast STEK is er nog de Inspectie Milieuhygiëne (IMH) die inspecties uitvoert overal waar verwacht kan worden dat een installatie met koelmiddel in bedrijf is.

Voor meer informatie:
- www.minvrom.nl
- STEK (secretariaat/examenbureau)
  Varrolaan 100 3584 BW Utrecht
  Postbus 8138 3503 RC Utrecht
  Telefoon: (030) 259 83 43

Samenvatting van de belangrijkste regels.
- Alle installaties met een koelmiddelinhoud >3 kg (ongeacht of dit een CFK, HCFK, HFK of bijv. ammoniak is) moeten bij STEK geregistreerd zijn. Voor de scheepvaart zijn regels te verwachten.
- Alleen een STEK-monteur mag reparaties uitvoeren aan een installatie waarin zich koelmiddel bevind. Hieronder valt dus ook de kleinste huishoudkoelkast, auto-airco enz.
- Per 1 oktober 2001 mogen CFK's niet meer worden gebruik voor service- en onderhoudswerkzaamheden. Er is al een handelsverbod.

- Per 1 januari 2001 mogen HCFK's in diverse nieuwe installaties niet meer worden toegepast. Meer informatie hierover bij STEK.
- Per 1 januari 2010 mogen HCFK's niet meer gebruikt worden voor service- en onderhoudswerkzaamheden.

Doet zich een storing voor in een bestaande installatie gevuld met CFK of HCFK dan kan het advies zijn de installatie te retrofitten. Dat wil zeggen het koelmiddel wordt vervangen door een HFK. Meestal moeten dan ook de smeerolie en diverse kunststofafdichtingsringen in de compressor en het expansieventiel vervangen worden.

5 Expansieventiel

Thermostatisch expansieventiel
Dit is een beproefd concept, geschikt voor kleine tot zeer grote installaties. Het massastroomkoelmiddel wordt geregeld door een klep welke aangestuurd wordt door een membraan. Onder het membraan heerst de verdamperdruk, d.i. de compressorzuigdruk, en boven het membraan de druk die een voeler op het eind van de verdamper doorgeeft. De voeler meet temperatuur en zet deze om naar de bijbehorende verzadigingsdruk. Om te kunnen regelen is een oververhitting van $\pm 5^{\circ}$C ingesteld. Nadeel is dat de laatste 10% lengte van de verdamperspiraal niet wezenlijk bij-draagt aan de warmteoverdracht omdat hij gebruikt wordt om het koelmiddel in dampvorm te oververhitten.

Voor de selectie van een thermostatischexpansieventiel gaat men uit van:

- het soort koelmiddel;
- drie temperatuurgebieden, namelijk:
  - klimaatinstallaties, verdampingstemp. ca. 5 à 15°C;
  - normaalkoeling, verdampingstemp. ca. 0 à -20°C;
  - diepkoeling, verdampingstemp. ca. -40°C;
- verdamper-resp. koelcapaciteit [kW].

Elektronisch geregeld expansieventiel

Een centrale regeleenheid met sensoren op de zuigdruk van de compressor en de uitlaat van de verdamper regelt de massastroomkoelmiddel zodanig dat alle vloeistof verdampt is aan het eind van de verdamper. Deze wordt dus voor 98% benut omdat met een oververhitting van ca. 1°C gewerkt wordt. Voordeel: de compressorarbeid wordt kleiner, dus de COP groter. Nadeel: de prijs is hoog, waardoor pas bij grotere vermogens voordeel optreedt.

Capillaire buis

Kleine installaties, zoals koel-vrieskasten, zijn meestal voorzien van een capillaire buis in plaats van een ventiel met regelklep. De capillaire buis laat afhankelijk van $\Delta p = p_p - p_z$ en de lengte van de buis een vaste hoeveelheid koelmiddel door. De hoeveelheid koelmiddel door het capillair $\dot{m}_{km} = \text{constante}.l.\Delta p$
De lengte van de buis wordt proefondervindelijk bepaald.

6 Compressoren

Compressoren zijn in diverse soorten en afmetingen verkrijgbaar:

- De *rolzuigercompressor*, voor kleine installaties aandrijfvermogen tot 5 kW, capaciteit tot 20 m^3/h.
- De *scrollcompressor*, hermetisch gesloten, aandrijfvermogen van 2,5 tot 12,5 kW en een capacitiet van 10 tot 50 m^3/h.
- De *zuigercompressor*, hermetisch, semihermetisch en open bouwwijze, vermogen tot 375 kW, capaciteit tot 1500 m^3/h.
- De *schroefcompressor*, van 300 kw tot 3 MW.
- De *centifugaalcompressor*, vanaf 500 kW tot 10 MW.

Wordt een compressor in een *koelinstallatie* gebruikt waarvan bijv. de COP = 4 dan is de verdamper resp. de koelcapaciteit 4 maal het aandrijfvermogen.
Voor de *warmtepomp* geldt dan $\dot{Q}_{af}$ is $4 + 1 = 5$ maal het aandrijfvermogen.

7 Verdampers

Afhankelijk van de toepassing kan men onderscheid maken tussen twee uitvoeringen. De verdamper om lucht te koelen en de verdamper om bijv. water te koelen.

Lamellenverdamper

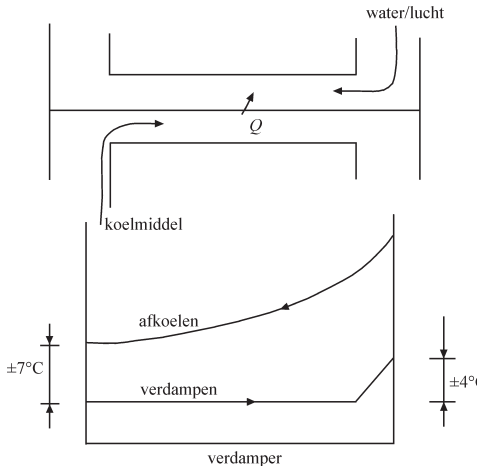
Een bundel pijpen voorzien van lamellen om het warmte overdragend oppervlak te vergroten. De lamelafstand en de diepte van de bundel bepalen de stromingsweerstand van de lucht. In de pijpen verdampt het koelmiddel. Om de drukval van het doorstromend koelmiddel te beperken worden pijpen in een bundel parallel geschakeld. Er wordt dan gebruik gemaakt van een koelmiddelverdeler, de zgn. spinnenkop.

Shell & tube verdamper

Deze is vergelijkbaar met de normale pijpen-warmtewisselaar met pijpplaat en 'waterkasten'. Het koelmiddel verdampt in de pijpen en de te koelen vloeistof, meestal een glycol oplossing, stroomt door de shell.

Temperatuurverloop in de verdamper

Het koelmiddel moet warmte opnemen uit het water of de lucht en is dus lager in temperatuur. Wanneer al het koelmiddel verdampt is stijgt de temperatuur ca. 4°C, dit is afhankelijk van de oververhitting waarop het expansieventiel is afgesteld. Water of lucht dat langs de pijpen stroomt koelt af. Gebruikelijk is om te stellen dat gekoeld kan worden tot minimaal 7°C boven de verdampingstemperatuur.
Als voorbeeld kan gesteld worden dat een koelcel die op 5°C staat afgesteld een verdampertemperatuur van -3 tot -5°C heeft. De compressor moet dus een zuigdruk creëren behorend bij deze temperatuur. Voor R134A: $t_v = -3$°C dan $p_z = \pm 2{,}6$ bar (abs). Maakt men de verdamperdruk lager en daardoor dus ook de bijbehorende verdampertemperatuur dan zal op de lamellen snel een harde ijslaag onstaan en tevens neemt de COP af.



Figuur 7.1 Het temperatuurverloop in de verdamper

8 Condensors

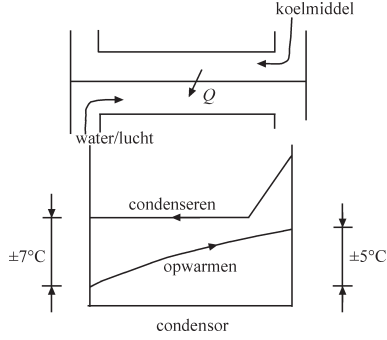
Bij condensors treft men lucht- en watergekoelde condensors aan.

Luchtgekoelde condensor
Deze bestaat uit een pijpenbundel voorzien van lamellen. Een ventilator zorgt voor die luchtverplaatsing.

Watergekoelde condensor
Meestal van het shell & tube type. Het water stroomt meervoudig door de pijpen en het koelmiddel condenseert in de shell. Het water kan onttrokken worden van oppervlaktewater of een koeltoren.

Temperatuurverloop in de condensor

(Zie figuur 8.1). Bij een schone condensor en voldoende koelwater wordt een temperatuursstijging van koelwater van 5°C aangehouden. De condensatie-temperatuur zal minimaal 7°C boven de inlaat-koelwatertemperatuur liggen.



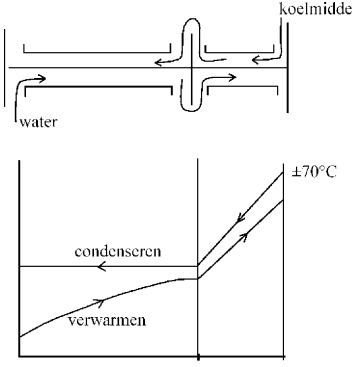
Figuur 8.1 Het temperatuurverloop in de condensor

Voor 134A: inlaat koel-watertemperatuur 20°C en condensatietemperatuur 27 tot 30°C. De bijbehorende condensatiedruk, de persdruk, is dan ca. 7,8 bar (abs). Deze persdruk is niet te beinvloeden, ook niet door de compressor, hij wordt bepaald door de koelwaterinlaattemperatuur. Wanneer de persdruk zakt doordat de koelwatertemperatuur daalt of voor kouder koelwater gekozen wordt, zal de COP toenemen.
Voor luchtgekoelde condensors zal de condensatietemperatuur ca. 15°C boven de luchtinlaattemperatuur liggen.

Warmtepompcondensor

(Zie figuur 8.2). Bij de warmtepomp is het de bedoeling om zo warm mogelijk water te krijgen. Door slimme constructies is het mogelijk water van 70°C te maken. Het gecomprimeerde gasvormige koelmiddel dat de compressor verlaat heeft een temperatuur,

ook afhankelijk van het gekozen koelmiddel, van 70 à 90°C. Door o.a. een voorkoeler toe te passen, die het gas koelt van ca. 70°C tot condensatietemperatuur, is het mogelijk een watertemperatuur van 70°C te bereiken.



Figuur 8.2 Het temperatuurverloop in de warmtepompcondensor

Bij kleine installaties voor de verwarming van bijv. tapwater wordt een verticaal buffervat gebruikt als condensor. De spiraalvormige condensorpijp komt boven het vat in en verlaat aan de onderzijde het vat. Het water boven in het vat wordt dan ca. 70°C en door de temperatuurgelaagdheid van het water zal het koelmiddel onderin het vat, waar het water nog koud is, condenseren.

9 Anti-vries oplossingen

Anti-vries oplossingen worden veel toegepast wanneer bij buiten lopende leidingen kans op bevriezing bestaat of wanneer een lage vloeistoftemperatuur vereist is, onder andere bij ijsbanen en indirecte koeling van koel-en vriescellen.

Veel gebruikte anti-vries oplossingen zijn:

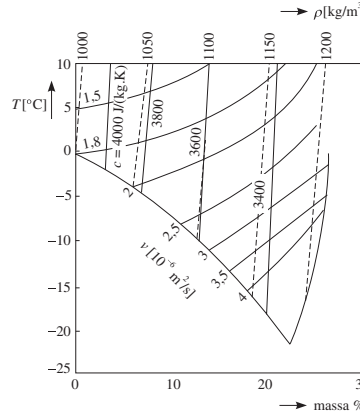
- *Pekel*, een oplossing van keukenzout (NaCl) in water. Goedkoop, eenvoudig te maken en toe te passen, ook in de levensmiddelensector. Beperkt toepasbaar vanwege eutectisch punt op -21°C en corrosiviteit van de oplossing.
- *Calciumchloride*. Goedkoop, maar net als pekel corrosief. Minder goed toepasbaar in de levenmiddelenindustrie. Toepasbaar tot ca. -30°C. Goede warmteoverdracht bij lage temperaturen, oplossing wordt niet 'stroperig'.
- *Ethyleen-glycol*. Waarschijnlijk meest gebruikte anti-vries oplossing. Breed toepassingsgebied, enigszins giftig, niet corrosief. Wordt bij lage temperatuur (onder -30°C) en hoge concentratie (boven 50%) nogal stroperig, waarbij ook de warmteoverdracht aanzienlijk slechter is.
- *Propyleen-glycol*. Minder giftig dan ethyleen-glycol. Wordt bij lage temperatuur en hoge concentratie aanzienlijk stroperiger dan ethyleen-glycol, waarbij ook de warmteoverdracht aanzienlijk slechter is.

In figuur 9.1 tot en met 9.4 worden van de vier belangrijkste anti-vries oplossingen de gegevens uit tabel 9.1 schematisch uitgezet.

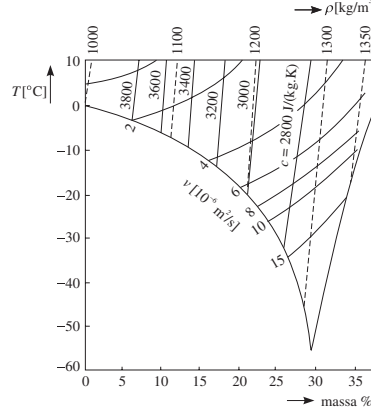
Tabel 9.1 Overzicht verschillende soorten anti-vries oplossingen bij verschillende toepassingstemperaturen

oplossing	Toepassingstemperatuur T [°C]	1 Concentratie in gewicht [%]	2 Dichtheid ρ [kg/m^3]	3 Soortelijke warmte c [J/(kg·K)]	4 Viscositeit ν [m^2/s]	5 Vriespunt [°C]
			$\times 10^3$	$\times 10^3$	$\times 10^{-6}$	
natriumchloride*	0	12	1,090	3,620	1,95	−9
	−10	22	1,175	3,300	3,7	−20
calciumchloride	0	15	1,130	3,300	2,5	−11
	−10	21	1,175	3,000	4,4	−20
	−20	25	1,250	2,850	8	−30
	−30	27	1,330	2,770	14	−41
ethyleen-glycol	0	25	1,035	3,820	3,5	−10
	−10	40	1,067	3,500	8	−21
	−20	50	1,085	3,200	25	−30
	−30	60	1,105	2,980	55	−43
propyleen-glycol	0	25	1,030	3,850	5	−10
	−10	35	1,055	3,630	25	−19
	−20	45	1,063	3,440	70	−29
	−30	55	1,072	3,200	300	−41

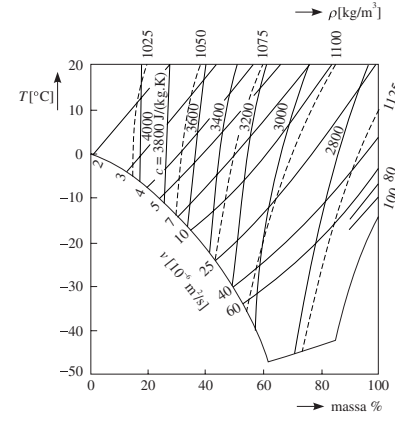
**Pekel* is een oplossing van *natriumchloride* (NaCl) in water.



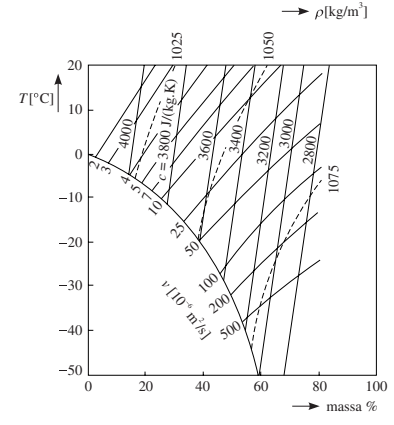
Figuur 9.1
Natriumchloride



Figuur 9.2
Calciumchloride



Figuur 9.3
Ethyleen-glycol



Figuur 9.4
Propyleen-glycol

10 Absorptie-koelmachines

Koelproces

In het processchema van figuur 10.1 is het omkaderde gedeelte in wezen de *thermische compressor* en te vergelijken met de compressor in het processchema voor compressor-koelmachines.

Werking: door toevoer van warmte op laag temperatuurniveau in de verdamper zal het water bij zeer lage druk verdampen. In de absorber wordt de waterdamp geabsorbeerd door de water-arme lithium-bromide oplossing. Uit de absorber wordt het water-rijke lithium-bromide van lage naar hoge druk gebracht door middel van de oplossings-pomp en onder toevoeging van warmte. Door de warmtetoevoer van hoge temperatuur (80 – 120°C) wordt de waterdamp weer uit de lithium-bromide oplossing gedreven. De 'arme' oplossing stroomt terug naar de absorber en begint daar opnieuw een kringloop.

De waterdamp stroomt naar de condenser en condenseert daar onder afgifte van warmte (36°C). Via een reducer gaat het condens weer over in damp op weg naar de verdamper, waarmee de koelmiddel (H_2O)-kringloop weer is gesloten.

Energiebalans

$$\dot{Q}_v + \dot{Q}_w = \dot{Q}_c$$

waarin:

$\dot{Q}_v$ = verdamper (is het koelvermogen)
$\dot{Q}_w$ = warmtetoevoer
$\dot{Q}_c$ = condensor (is het condensorvermogen)

Enkele waarden voor absorptiemachines

Voor grote machines geldt:

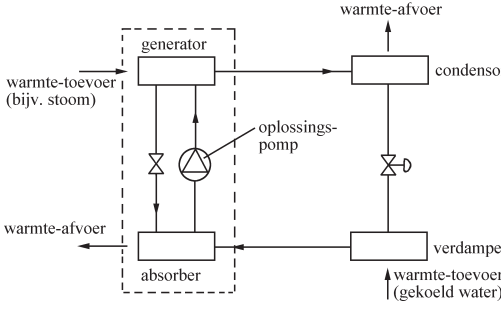
$$\frac{\dot{Q}_w}{\dot{Q}_v} \approx 1{,}5 \text{ en } \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_v} = \frac{\dot{Q}_v + \dot{Q}_w}{\dot{Q}_v} = 1 + \frac{\dot{Q}_w}{\dot{Q}_v} \approx 1 + 1{,}5 = 2{,}5$$

Temperatuurniveau heet water c.q. stoom 80 – 120°C.
Temperatuurniveau koelwater: $\vartheta_{ki} = 27°C$; $\vartheta_{ku} = 35°C$.

Temperatuurniveau gekoeld water: $\vartheta_{wu} = 12 - 15°C$; $\vartheta_{wu} = 6°C$. Benodigde plaatsruimte ca. $5 m^2/100$ kW koelvermogen.

Voor kleine machines (gasgestookt) geldt:

$$\frac{\dot{Q}_w}{\dot{Q}_v} = 2; \quad \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_v} \approx 3.$$



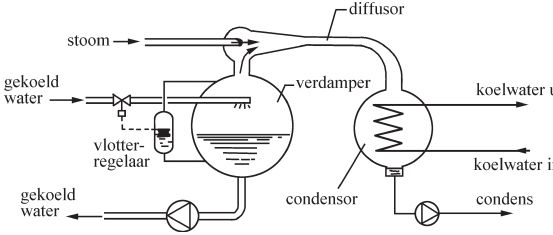
Figuur 10.1 Processchema absorptie-koelmachine

11 Stoomstraal-koelmachines

Bij een *stoomstraal-koelmachine* wordt de koude damp met behulp van een straalapparaat afgezogen en vervolgens door de stoom tot een hoger drukniveau gecomprimeerd. Op deze manier kan het mengsel van beide dampen in de condensor neer-slaan. Zie figuur 11.1.

Voordeel van een stoomstraal-verdamping is de eenvoudige bouwvorm. Nadelen zijn het hoge stroomverbruik, het grote compressorvermogen dat noodzakelijk is en een slechte regelbaarheid.

Toepassingen:
- koeling van vloeistoffen en levensmiddelen door verdamping van het vocht;
- vacuümkoeling van grootbladige groente.



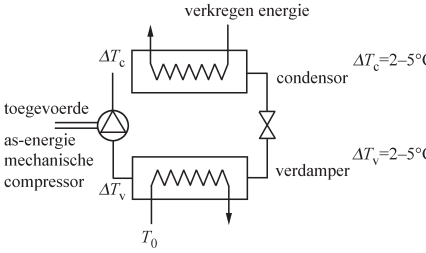
Figuur 11.1 Principe stoomstraal-koelmachine

12 Warmtepompen, aanvullende gegevens

COP = Coëfficient of Performance.

$$\text{COP} = \frac{\text{uit condensor verkregen energie}}{\text{toegevoerde asenergie}} \approx$$

$$\approx b \cdot \frac{T + \Delta T_c}{T - T_v + \Delta T_c + \Delta T_v}$$



Figuur 12.1 Coëfficient of performance (COP)

waarin:

b	= constante 0,45 tot 0,55 voor warmtepompen <10 kW;
	= constante 0,5 tot 0,6 voor warmtepompen >10 kW
T	= temperatuur te verwarmen medium
T_o	= temperatuur te koelen medium
ΔT_c, ΔT_v	= temperatuurverschil tussen media binnen en buiten de condensor, resp. verdamper

$$\text{warmtefactor} = \frac{\text{totaal verkregen warmte-energie}}{\text{totaal toegevoerde primaire energie}}$$

De warmtefactor wordt ook wel genoemd: *Primary Energy Ratio* (PER). Voor COP en PER zie ook figuur 12.2.

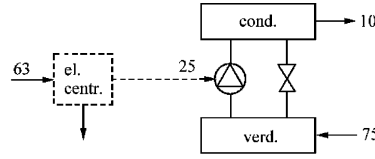
Bedrijfsvoering

Schakelsysteem bivalent parallel: boven een bepaalde belasting vult de hulpverwarming het tekort aan. Bij 50% capaciteit van de warmtepomp levert de warmtepomp ca. 90%, en de hulpverwarming ca. 10% van de jaarlijks benodigde warmte-energie.

Schakelsysteem alternatief parallel: boven bepaalde belasting wordt de warmtepomp uitgezet en alléén de hulpverwarming levert warmte. Bij 50% capaciteit van de warmtepomp levert deze ca. 60%, en de hulpverwarming ca. 40% van de jaarlijks benodigde warmte-energie.

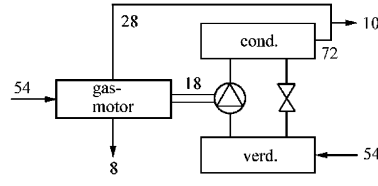
elektrisch gedreven warmtepomp (EWP)

$COP_{EWP} = 100/25 = 4$
$PER_{EWP} = 100/63 = 1{,}6$



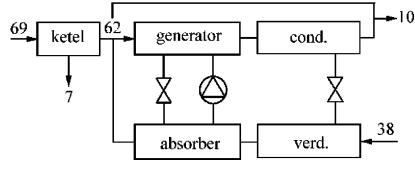
gasmotor gedreven warmtepomp (GWP)

$COP_{EWP} = 100/18 = 5{,}55$
$PER_{GWP} = 100/54 = 1{,}85$



absorptie-warmtepomp (AWP)

$COP_{AWP} = 100/62 = 1{,}61$
$PER_{AWP} = 100/69 = 1{,}45$

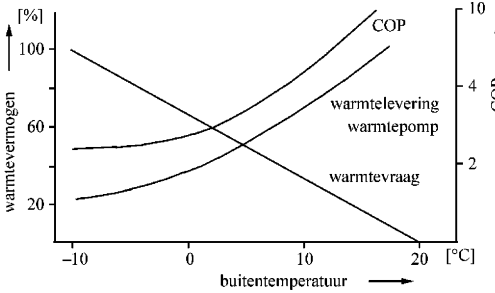


Figuur 12.2 Globale energiebalans van warmtepompen

De hulpverwarmingsbron kan zowel elektrisch als gasgevoed worden uitgevoerd (zie ook figuur 12.5).

Lucht als warmtebron

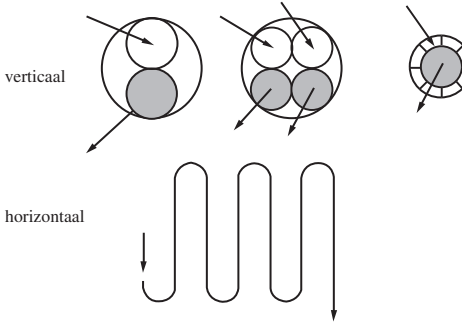
- bij buitentemperaturen beneden 5°C treedt rijpvorming op aan de verdamper warmtewisselaar;
- relatief hoog energieverbruik van de ventilator van de verdamper warmtewisselaar.



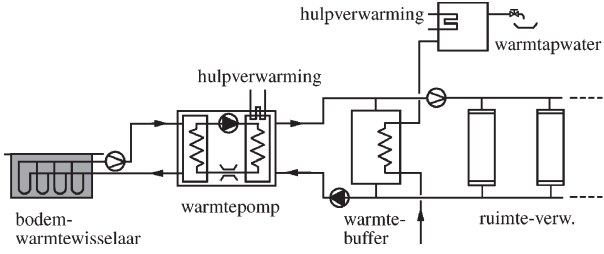
Figuur 12.3 COP en maximum vermogen als functie van de luchttemperatuur

Bodem als warmtebron

- Tot 2 à 5 m diepte invloed van seizoenen op bodemtemperatuur;
- *gesloten systemen*: verticale of horizontale warmtewisselaars (zie figuur 12.4)
  - warmte-onttrekking verticale wisselaars 20 – 100 W/m^2, afhankelijk van bodemsoort en toelaatbare temperatuurverschillen;
  - warmte-onttrekking horizontale wisselaars 15–20 W/m^2
- *open systeem:* direct gebruik van grondwater
  - water in dezelfde bodemlaag terugpompen
  - aandacht voor waterkwaliteit i.v.m. vervuiling, corrosie van verdamper warmtewisselaar
  - betere COP (ca. 10%, t.o.v. gesloten systeem, bij 60°C condensortemperatuur) vanwege hoger beschikbaar temperatuurniveau aan de verdamperzijde.



Figuur 12.4 Typen bodemwarmtewisselaars



Figuur 12.5 Principeschema WP-installatie, inpassing in cv-systeem

Energietechniek G3

1 Algemeen
- 1.1 Symbolen
- 1.2 Verbranding
- 1.3 Warmte-overdracht (theorie)

2 Warmte-uitwisseling en -opwekking
- 2.1 Warmtewisselaars
- 2.2 Warmtepijpen
- 2.3 Warmtewiel
- 2.4 Twincoil
- 2.5 Rookgaskoelers
- 2.6 Rookgascondensors

3 Verbrandingsmotoren en turbines
- 3.1 Verbrandingsmotoren
- 3.2 Stoomturbines
- 3.3 Gasturbines (open-cyclus)

4 Wind- en zonne-energie
- 4.1 Windenergie
- 4.2 Zonnewarmte
- 4.3 Fotovoltaïsche (PV) omzetting

1 Algemeen

Bij symbolen die een andere betekenis hebben dan in het SI-Stelsel is vermeld in welke paragraaf ze voorkomen.

1.1 Symbolen

A = oppervlakte [m^2]
= schaalfactor (par. 4.1)
a = versnelling [m/s^2]
= verhouding van windsnelheidsafname t.o.v. oorspronkelijke windsnelheid (par. 4.1)
c = soortelijke warmte [J/(kg.K)]
C = vormparameter (par. 4.1)
C_u = momentcoëfficiënt windturbine (par. 4.1)
C_p = vermogenscoëfficiënt windturbine (par. 4.1)
d = diameter; afstand; wanddikte [m]
D = zuigerdiameter [m]
E = jaarlijkse energiehoeveelheid [kWh/a]
G = specifieke warmte-overdracht [J/(s.K)]
g = versnelling van de vrije val [m/s^2]
h = jaarlijkse aantal vollasturen [uur/a]
H_o = onderste verbrandingswarmte of stookwaarde [MJ/kg]
H_b = bovenste verbrandingswaarde [MJ/kg]
i = aantal cilinders
k = constante van von Karman
K = warmtedoorgangscoëfficiënt [$W/(m^2.K)$]
K_r = warmteverliescoëfficiënt leiding [W/(m.K)]
l = lengte [m]
n = toerental [omw/min] (par. 3.1)
p = druk [Pa]
P = vermogen [W]
P_e = effectief motorvermogen [W]
q = warmtestroomdichtheid [W/m^2]
O = warmte [J]
R = straal [m]
Re = getal van Reynolds = $v{\cdot}d/v$
s = zuigerverplaatsing [m]
T = temperatuur [K]

t_w = wandtemperatuur [°C]
t_o = luchttemperatuur [°C]
V_s = slagvolume [m^3]
v = snelheid medium [m/s]
v_o = beginsnelheid; ongestoorde snelheid [m/s]
x = afstand [m];
= luchtovermaat
z = hoogte boven maaiveld [m]
$\langle a \rangle$; $\bar{a}$ = gemiddelde van a
α = warmte-overdrachtscoëfficiënt [W/(m^2·K)]
η = rendement/dynamische visconsiteit [kg/(m·s)]
= warmtefactor
ρ = soortelijke massa [kg/m^3]
λ = warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(m·K)]
= snellopendheid (windturbine) (par. 4.1)
ν = kinematische viscositeit [m^2/s]
ω = hoeksnelheid roterende lucht [rad/s] (par. 4.1)
Ω = temperatuurverhouding wiekenstelsel [rad/s] (par. 4.1)
φ = temperatuurverhouding (par. 2.1)
ϕ = warmtestroom [W]

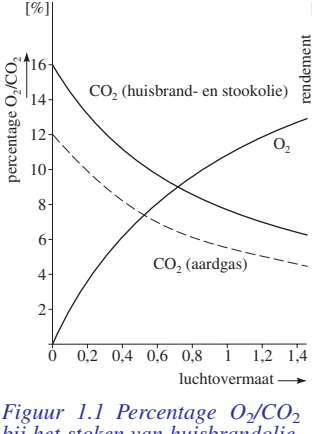
1.2 Verbranding

Calorische bovenwaarde of bovenste verbrandingswaarde (H_b): de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij volledige verbranding van een hoeveelheid droog gas met zuurstof als de verbrandingsgassen weer naar de beginvoorwaarden worden afgekoeld en het chemisch gevormde water zich in de vloeistoffase bevindt. Als dit water in de gasfase blijft is de calorische waarde lager en spreekt men over de *stookwaarde of calorische onderwaarde* (H_o). Globaal is bij aardgas het verschil 10%, bij olie 6% en bij steenkool 3%. Zie ook hoofdstuk G1, par. 2, tabel 2.9.

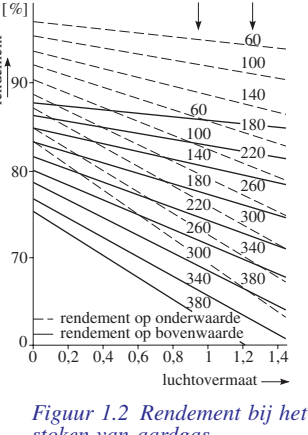
Tabel 1.1 Gegevens diverse soorten stookolie

		HBOI	HBOII	400″	800″	3500″
soortelijke massa	[kg/m^3]	840	860	960	970	980
onderste verbrandingswaarde (stookwaarde)	[MJ/kg]	42,80	42,36	40,56	40,56	40,26
bovenste verbrandingswaarde	[MJ/kg]	45,56	45,15	42,98	42,76	42,53
verbrandingslucht	[m^3/kg]	11,34	11,24	10,87	10,82	10,76
verbrandingsgas[1)]	[m^{3}kg]	12,09	11,92	11,52	11,46	11,40
maximaal dauwpunt	[°C]	52	54	50	50	50
$CO_2 + SO_2$	[vol.%]	15,4	15,6	16,0	16,1	16,1

[1)] Exclusief waterdamp.



Figuur 1.1 Percentage O_2/CO_2 bij het stoken van huisbrandolie, aardgas en stookolie

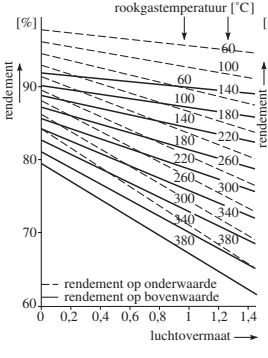


Figuur 1.2 Rendement bij het stoken van aardgas

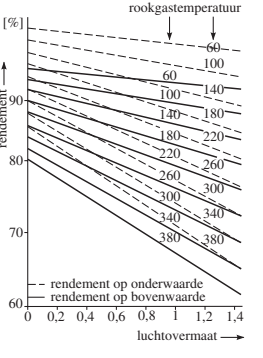
Tabel 1.2 Gegevens gasvormige brandstoffen[1)]

		aardgas[4)]	propaan	butaan
soortelijke massa	[kg/m^3]	0,781	2,01	2,70
onderste verbrandingswaarde (stookwaarde)	[MJ/m^3]	31,68	92,9	123,7
	[MJ/kg]	40,56	46,2	45,8
bovenste verbrandingswaarde	[MJ/m^3]	35,10	101,23	133,69
	[MJ/kg]	45,0	50,36	49,51
molaire massa	[kg/kmol]		44,09	58,12
verbrandingslucht (droog/nat)[2)]	[m^3/m^3]	8,43/8,52	24,38/24,65	32,16/32,52
verbrandingsgas[3)] (droog/nat)[2)]	[m^3/m^3]	9,39/9,48	26,26/26,53	34,69/35,05
waterdamp	[m^3/m^3]	1,68/1,78	3,94/4,22	5,03/5,38
ontsteekgrenzen	[m^3/m^3]	5,9/14,9	2,2/9,5	1,9/8,5
maximaal dauwpunt	[°C]	58,5	56,0	

[1)] Gegevens gelden gerekend naar 273 K, 101,3 kPa.
[2)] Nat: lucht van 20 °C/50% relatieve vochtigheid; droog:lucht van 20 °C/geen vochtigheid.
[3)] Inclusief waterdamp: 0,833 kg/m^3.
[4)] Gronings aardgas bevat van nature ca. 14% stikstof. Aan Noordzeegas wordt stikstof toegevoegd omdezelfde verbrandingswaarde te verkrijgen.



Figuur 1.3 Rendement bij het stoken van huisbrandolie



Figuur 1.4 Rendement bij het stoken van stookolie

1.3 Warmte-overdracht (theorie)

- Zie hiervoor hoofdstuk A4 *Natuurkunde* par. 5.12 e.v.
- Zie voor waarden *warmte-overdrachtscoëfficiënt* α, hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 1.1, tabel 1.14.
- Zie voor symbolen tevens par. 1.1.

Twee media gescheiden door wanden
Voor een *scheidingswand* geldt:

$$\phi = K \cdot A \cdot \Delta T$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \frac{d_\mathrm{i}}{\lambda_\mathrm{i}}}$$

Index 1, 2: overgang van medium 1 resp. medium 2 naar wand.
Index *i*: betreft materialen scheidingswand.

Voor een *buis* geldt:

$$\phi = K_\mathrm{r} \cdot l \cdot \Delta T$$

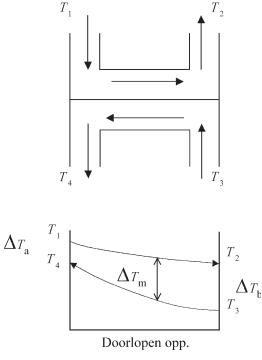
$$K_\mathrm{r} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$$

Index 1: binnenwand. Index 2: buitenwand.

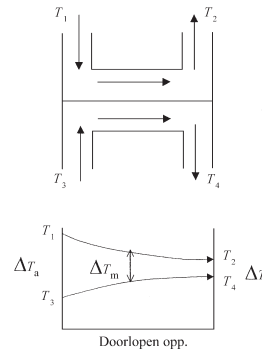
2 Warmte-uitwisseling en -opwekking

2.1 Warmtewisselaars

Overdracht in warmtewisselaars



Figuur 2.1a Tegenstroom



Figuur 2.1b Gelijkstroom

$$\phi = k \cdot A \cdot \Delta T_m = \dot{m}_{1,2} \cdot C_{1,2} \cdot (T_1 - T_2) = \dot{m}_{3,4} \cdot C_{3,4}(T_4 - T_3)$$

hierin is $\Delta T_m = \dfrac{\Delta T_a - \Delta T_b}{ln\left(\dfrac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)}$

waarin:
ΔT_m = logarithmisch gemiddeld temperatuurverschil;
ΔT_a = temperatuurverschil tussen beide media aan de ene zijde van de warmtewisselaar;
ΔT_b = temperatuurverschil tussen beide media aan de andere zijde van de warmtewisselaar.

Voor tegenstroom (fig. 2.1a) geldt:

$$\Delta T_a = T_1 - T_4$$
$$\Delta T_b = T_2 - T_3$$

Voor gelijkstroom (fig. 2.1b) geldt:

$$\Delta T_a = T_1 - T_3$$
$$\Delta T_b = T_2 - T_4$$

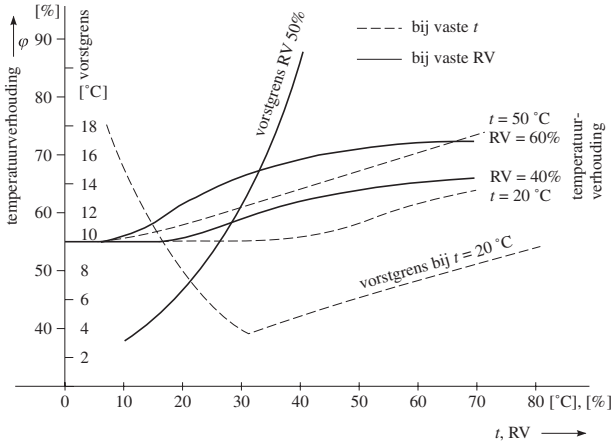
Tabel 2.1 Warmtewisselaars

materiaal	eigenschappen
aluminium	tot 50 °C temperatuurverschil tussen luchtstromen tot 1000 kPa drukverschil
staal	tot ca. 1000 °C temperatuurverschil grote levensduur
glas	zeer corrosievast tot ca. 250 °C tot ca. 10 kPa drukverschil

Tabel 2.2 Glasbuis

nr.	luchthoeveelheid [m^3/h]	vermogen (Δt = 20°C) [kW]	afmetingen [m × m × m]	specifiek vermogen [kW/m^3]	temperatuurverhouding φ[%]	drukverlies [Pa]	bevriezingsgrens [°C]
1	1000	4	0,6 × 7,7 × 0,3	32	65	200	−12
2	2000	8	0,6 × 0,7 × 0,5	38	65	200	−12
3	5000	20	0,8 × 0,8 × 1	32	65	200	−12
4	10 000	40	1,1 × 0,8 × 1,6	21	68	200	−14
5	20 000	80	1,6 × 1,7 × 2,2	13	68	200	−14
6	50 000	200	2,7 × 1,7 × 2,5	11	68	200	−14

Temperatuurverhouding: $\varphi = \dfrac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1}$ (bij tegenstroom; bij gelijkstroom T_3 vervangen door T_4)



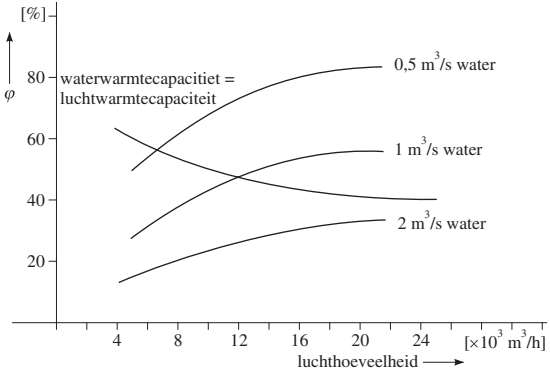
Figuur 2.2 Temperatuurverhouding als functie van de temperatuur t en van de relatieve vochtigheid (RV) van de wegblaaslucht

Toepassing: voornamelijk bij uitwisseling tussen inblaas-en wegblaaslucht.

Tabel 2.3 Aluminiumplaat

nr.	afmetingen [m × m × m]	specifiek vermogen [kW/m^3]	drukverlies [Pa]	temperatuur-verhouding φ[%]	bevriezings-grens [°C]
1	0,5 × 0,4 × 0,4	45	120	60	−12
2	0,5 × 0,5 × 0,5	64	200	60	−12
3	0,7 × 0,7 × 0,7	60	200	62	−13
4	1,0 × 1,0 × 1,0	40	200	65	−15
5	1,2 × 1,2 × 1,4	40	200	65	−15
6	1,7 × 1,7 × 3	25	200	65	−15

Lucht-water warmtewisselaar



Figuur 2.3 Temperatuurverhouding φ als functie van:
a. luchthoeveelheid bij gelijkblijvende waterhoeveelheid;
b. luchthoeveelheid bij waterstroom van dezelfde warmtecapaciteit (1 l/s water per 12 600 m³/h lucht)

Toepassingen:
- CV-waterverwarming;
- warm-tapwaterverwarming;
- warmteterugwinning uit wegblaaslucht.

Tabel 2.4 Lucht-water glasbuis bij 12 600 m³/h lucht per 1 l/s water

lucht hoeveelheid [m³/h]	water-hoeveelheid [m³/h]	afmetingen [m × m × m]	specified vermogen ($\Delta t = 20\,^{\circ}C$) [kW]	drukverlies [Pa]	temperatuur-verhouding [%]
2000	0,57	0,8 × 0,3 × 0,3	8	100	35
5000	1,43	1,6 × 0,6 × 0,3	20	100	35
10 000	2,86	1,6 × 0,9 × 0,3	40	100	35
20 000	5,71	1,6 × 0,9 × 0,6	80	200	50

Water-water warmtewisselaar

Tabel 2.5 Specificaties platenwisselaars

capaciteit [m^3/h]	warmtedoorgang [kW/°C]	specifiek vermogen ($\Delta t = 20$°C) [kW/m^3]	afmetingen [m × m × m]
8	8	5000	0,5 × 0,3 × 0,2
30	60	9000	0,8 × 0,4 × 0,4
200	380	9000	1,4 × 0,9 × 0,7
500	1300	15 000	1,7 × 0,9 × 1,1

2.2 Warmtepijpen

De *warmtepijp* (*heat pipe*) is een metalen buis die van binnen een capillaire structuur heeft. De pijp is gevuld met een damp-vloeistofmengsel.
Bij verwarming aan één einde, verdampt de vloeistof, en condenseert vervolgens aan het andere te koelen einde. De verdampingswarmte wordt nu weer afgegeven. Het condensaat vloeit door de zwaartekracht en de capillaire structuur naar het verwarmde einde terug. Omdat er overal verzadigde dampdruk heerst, is de temperatuur waarbij de warmte-opname en -afgifte plaasvindt, gelijk.
Vermogensregeling van de heat-pipe vindt plaats door verdraaiing waardoor de zwaartekracht mee- of tegenwerkt bij het transport van de vloeistof.

Toepassingsgebied: −40°C tot + 700°C (afhankelijk van het gebruikte medium).

Eigenschappen:
- rendement 40–65%;
- luchtweerstanden ca. 100 Pa per zijde.

Tabel 2.6 Specificaties van lucht-lucht warmtepijpen

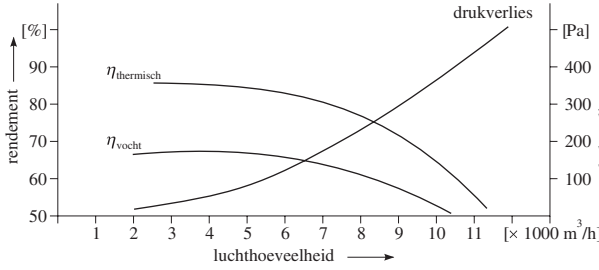
lucht hoeveelheid [m^3/h]	afmetingen [m × m × m]	specified vermogen ($\Delta t = 20\,^{\circ}C$) [kW/m^3]	drukverlies [Pa]	temperatuur-verhouding [%]
1000	0,4 × 0,3 × 0,2	280	220	40
	0,6 × 0,5 × 0,4	55	200	70
3000	1,2 × 0,3 × 0,2	380	220	40
	1,5 × 0,5 × 0,4	65	200	70
10 000	2,1 × 0,7 × 0,2	230	220	40
	3,3 × 0,8 × 0,4	60	200	70
30 000	3,9 × 1,0 × 0,2	250	220	40
	5,7 × 1,4 × 0,4	60	200	70

2.3 Warmtewiel

Werking *warmtewiel:* een langzaam roterend wiel passeert beurtelings een warme en een koude luchtstroom. De warme luchtstroom zal warmte afstaan aan het koude gedeelte van het warmtewiel dat deze stroom passeert. Wanneer dit gedeelte van het wiel in de koude stroom (de toevoerlucht) terecht komt, zal het hier de opgenomen warmte afstaan.

Tabel 2.7 Specificaties van warmtewielen

capacieit [m^3/h]	afmetingen [m × m × m]	specifiek vermogen ($\Delta t = 20\,^{\circ}C$) [kW/m^3]	aandrijf-vermogen [W]	drukverlies [Pa]	temperatuur-verhouding [%]
5000	0,5 × 1 × 1	70	80	200	70
10 000	0,5 × 1,4 × 1,4	70	120	200	70
20 000	0,5 × 2 × 2	70	250	200	70
50 000	0,5 × 3,0 × 3,0	70	370	200	70



Figuur 2.4 Drukverlies, thermisch rendement en vochtoverdracht-rendement als functie van de luchtstroom

Eigenschappen:
- Hoog rendement tot 85%, dat traploos regelbaar is tussen stilstand en maximaal toerental;
- toerental normaal 10–20 omw/min.

2.4 Twincoil

Een *twincoil-systeem* bestaat uit twee lucht/vloeistof warmtewisselaars met een vloeistofsysteem voor warmtetransport. Eén warmtewisselaar is geplaatst in de wegblaaslucht en één in de toevoerluchtstroom. In het leidingnet bevindt zich een water-glycoloplossing ter voorkoming van bevriezen. De warmtewisselaar in de warme luchtstroom neemt warmte op. Deze warmte wordt via de water-glycoloplossing overgebracht naar de warmtewisselaar in de koude luchtstroom (in de winter de toevoerlucht). Hier wordt de warmte overgedragen aan de toevoerlucht.

Eigenschappen:
- Temperatuurgebied:
  tot 120 °C: koperen buis met aluminium vinnen
  tot 300 °C: staalbuis met stalen vinnen
  $>$ 300 °C: gladde staalbuis.

- Bij lage vloeistofdruk en temperatuur zijn kunststofleidingen mogelijk.
- Regeling door aanpassing van vloeistofsnelheid.
- Vloeistofstroom voor optimale temperatuurverhouding volgt uit:

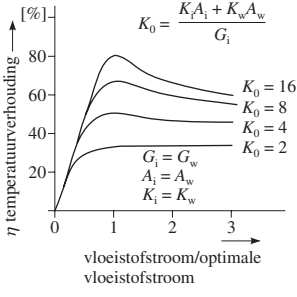
$$G_v = \frac{K_i A_i + K_w A_w}{\frac{K_i A_i}{G_i} + \frac{K_w A_w}{G_w}}$$

waarin:
G = specifieke warmte-overdracht
= massastroom × soortelijke warmte [J/(s·K)]
index i = inblaaslucht
w = wegblaaslucht
v = vloeistof

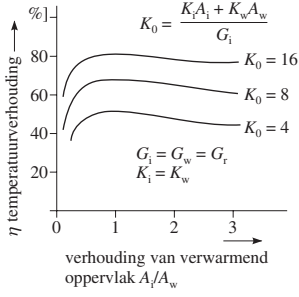
- Optimale verhouding tussen oppervlakten bij optimale vloeistofstroom:

$$A_i/A_w = \sqrt{K_w/K_i} \text{ (bij gegeven totale } A_i + A_w).$$

Dit kan belangrijk zijn bij warmteterugwinning uit hete gassen: de speciale warmtewisselaar aan de hete kant is duur en wordt daarom kleiner gekozen.



Figuur 2.5 Rendement als functie van de vloeistofstroom



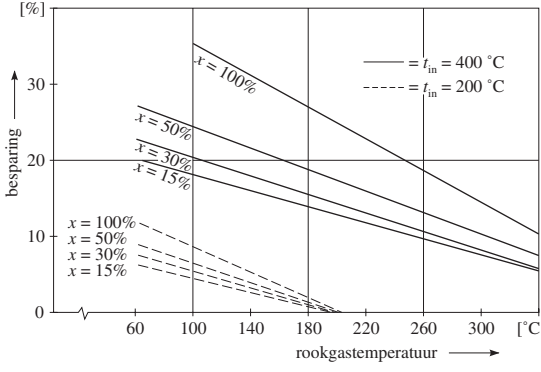
Figuur 2.6 Rendement als functies van de oppervlakteverhouding

2.5 Rookgaskoelers

De rookgassen worden niet tot het dauwpunt gekoeld. Bij *stoichiometrische verbranding* (verbranding waarbij de luchthoeveelheid precies voldoende is voor de volledige verbranding van de brandstof) gelden dauwpunten uit de tabellen van par. 1.2. Bij toepassing in uitlaatgassen van olie-gestookte verbrandings-apparatuur, ontstaat bij temperaturen lager dan 180 °C condensatie van H_2SO_3. Zie voor de ketelrendementen figuur 1.2, 1.3 en 1.4 in par. 1.2.

Tabel 2.8 Specificaties rookgaskoelers

vermogen [kW]	afmetingen [m × m × m]	specifiek vermogen [kW/m^3]
20	0,2 × 0,4 × 0,8	300–400
50	0,3 × 0,4 × 1	
100	0,3 × 0,7 × 1,3	
200	0,4 × 0,9 × 1,6	
560	0,5 × 1,4 × 2,3	

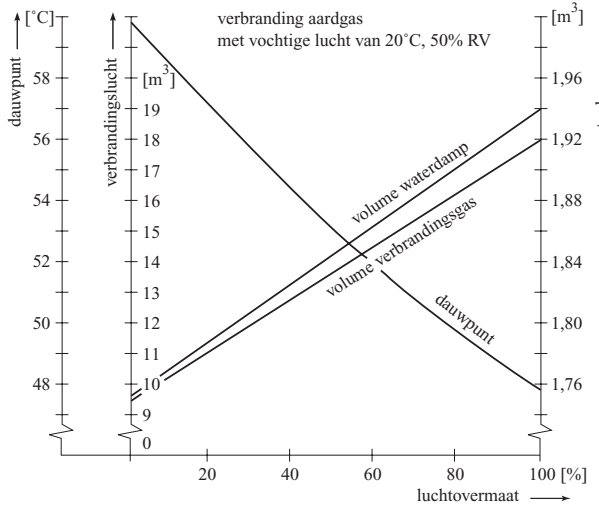


Figuur 2.7 Besparing door rookgaskoeler voor verschillende inlaattemperaturen (t) en luchtovermaten (x) (bij huisbrandolie, stookolie en aardgas)

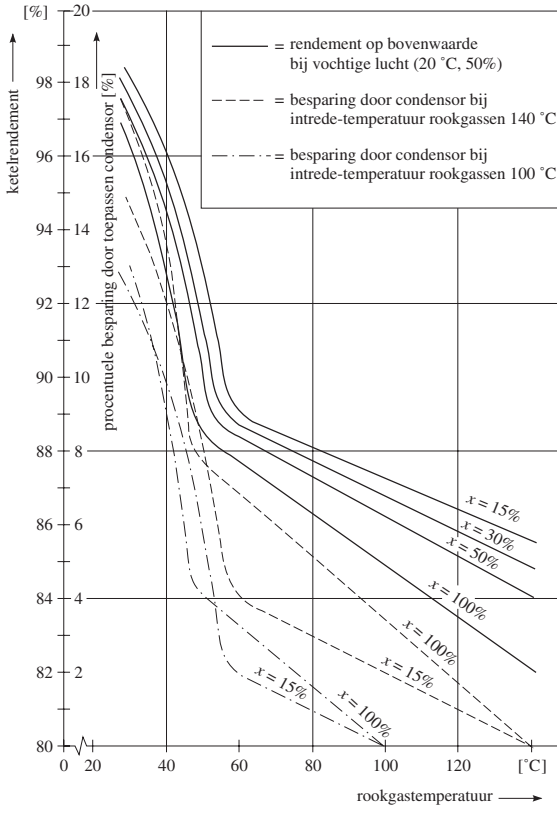
2.6 Rookgascondensors

De rookgassen worden zoveel afgekoeld, dat condensatie optreedt. *Rookgascondensors* zijn toepasbaar in verwarmingssystemen met lage temperaturen, zoals:

- vloerverwarming:
- zwembadwaterverwarming;
- industriewaterverwarming (vóórverwarming);
- bodemverwarming (tuinbouw);
- luchtverwarming.



Figuur 2.8 Dauwpunt, verbrandingsgasvolume (exclusief waterdamp) en waterdampvolume als functie van de luchtovermaat van natte lucht bij verbranding van $1\ m_n^3$ *aardgas*



Figuur 2.9 Ketelrendement op bovenwaarde en besparing bij verschillende intrede-temperaturen van rookgassen en luchtovermaten (x) als functie van de rookgastemperatuur

Luchtweerstanden:
- aluminium: 50–150 Pa;
- staal : 50–150 Pa;
- glas : 10–30 Pa.

Tabel 2.9 Specificaties rookgascondensors

vermogen [kW]	afmetingen [m × m × m]	specifiek vermogen [kW/m^3]
50	0,3 × 0,5 × 0,6	500–700
100	0,3 × 0,6 × 1	
200	0,5 × 0,7 × 1	
500	1,5 × 0,5 × 1	

3 Verbrandingsmotoren en turbines

3.1 Verbrandingsmotoren

Werking

Een zuiger beweegt heen en weer in een cilinder tussen twee vaste punten: het onderste dode punt (ODP) en het bovenste dode punt (BDP). Boven de zuiger bevindt zich de verbrandingskamer, hierin wordt periodiek brandstof toegevoerd en tot ontbranding gebracht. Een deel van de chemische energie in de brandstof wordt omgezet in beweging van de zuiger een ander deel wordt omgezet in warmte. De bewegingsenergie wordt via een drijfstang en een krukas aan de onderzijde van de zuiger omgezet in een draaiende beweging waarmee een werktuig of een generator voor elektriciteitsproductie wordt aangedreven. De restwarmte wordt afgevoerd naar de omgeving of nuttig gebruikt voor verwarmingsings- of procesdoeleinden. (zie *Warmteleveranciers* op pagina G3/23).

Het vermogen van een verbrandingsmotor kan als volgt worden berekend:

$$P_e = \frac{p_{me} \cdot i \cdot V_s \cdot n}{60 \cdot \gamma}$$

waarin:

p_{me} = gemiddelde effectieve druk, break mean effective pressure (b.m.e.p.) [kPa]

i = aantal cilinders

V_s = slagvolume per cilinder [m^3]

$$V_s = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot s}{4}$$

D = cilinderdiameter [m]

s = slaglengte [m]

n = toerental [omw/min]

γ = aantal omwentelingen per verbrandingscyclus (voor twee-takt: $\gamma = 1$, voor vier-takt: $\gamma = 2$)

Indeling

Verbrandingsmotoren worden ingedeeld op basis van:

- Toerental:
  - langzaam;
  - middelsnel;
  - snel;
  - zeer snel.
- Principe van de gaswisseling:
  - twee-takt (één omwenteling per verbrandingscyclus);
  - vier-takt (twee omwentelingen per verbrandingscyclus).
- Verbrandingsproces:
  - gas/benzine (compressieverhouding 8–11);
  - diesel (compressieverhouding 16–20 zelfontbranding).
- Wel of geen drukvulling ('turbo'):
  - Met drukvulling (meestal via een turbine aangedreven door de uitlaatgassen) wordt een hoger vermogen per cilinder bereikt.
- Bouwwijze (cilinder-opstelling):
  - lijn-vorm;
  - V-vorm.

Tabel 3.1 Karakteristieke gegevens per motortype

		dieselmotoren voor scheepsvoortstuwing en krachtcentrales			gasmotoren voor WKK	dieselmotoren voor auto's
toerental typering		langzaam	middelsnel	snel	snel	zeer snel
gaswisselingsprincipe		2-takt	4-takt	4-takt	4-takt	4-takt
toerental	[omw/min]	30–333	400–600	700–1800	750/1000/1500	3000–4500
boring	[mm]	600–1200	400–640	120–350	120–350	80–150
slag	[mm]	1000–3000	500–900	150–320	150–320	90–170
gemiddelde effectieve druk	[kPa]	1400–1000	1700–2500	2000–3000	1000–1500	900–1700
gemiddelde zuigersnelheid	[m/s]	6,5–8,5	7,5–10	8–12	8–12	10–13
brandstofverbuik diesel[1)]	[g/kWh-as]	160–200	170–210	180–240		225–300
brandstofverbuik gas[2)]	[MJ/kWh-elek]				8,6–11	
vermogen per cilinder	[kW]	1000–5000	600–1500	25–400	10–300	15–60
eenheidsgrootte	[kW]	7000–70000	1000–35000	100–6000	50–6000	60–500

[1)] diesel: 42,8 MJ/kg
[2)] gas: 31,7 MJ/m^3

Bij hoge p_{me} en v_m: hogere thermische en mechanische belasting, hoog mechanisch rendement en kortere levensduur.
Bij een toenemend toerental neemt het specifiek vermogen [kW/m^3] toe. Bij een toenemend vermogen neemt het toerental af en neemt het vermogen per cilinder toe.

Tabel 3.2 Specificaties van zuigermotoren

type	mechanisch vermogem [kW]	afmetingen ($l \times b \times h$) [m × m × m]	specifiek vermogen [kW/m^3]	gewicht [ton]	toerental [omw/min]
gas	120	1,3 × 0,8 × 1,3	90	0,8	1500
(zelfaanzuigend)	220	1,9 × 1,2 × 1,1	90	1,3	1500
gas (opgeladen)	300	1,8 × 1,3 × 1,3	100	1,4	1500
	550	2,0 × 1,5 × 1,9	100	5,1	1500
	750	2,5 × 1,5 × 2,0	100	6,8	1500
	1000	3,5 × 2,0 × 2,3	65	7,0	1500
	3000	6,0 × 2,2 × 3,5	65	27	1000
	5000	8,0 × 2,7 × 3,6	65	63	750
diesel (met	250	1,7 × 0,9 × 1,2	140	1,0	1500
drukvulling	500	2,2 × 1,3 × 1,3	135	1,5	1500
'turbo')	1000	3,5 × 1,5 × 2,0	100	4,0	1500
	1800	4,7 × 1,5 × 2,0	95	14	1000
	8000	8,4 × 3,1 × 4,2	75	80	750
	19000	12,7 × 5,5 × 5,0	55	270	500

Tabel 3.3 Rendementen van zuigermotoren [%]

type	vermogen [kW]		zelfaanzuigend		opgeladen	
			mechanisch	thermisch	mechanisch	thermisch
gasmotoren	100–	300	30–33	55–50	32–34	52–46
	300–	1000	–	–	34–41	50–40
	1000–	5000	–		40–43	45–36
diesel motoren	100–	500	–	–	35–40	45–40
	500–	2000	–	–	38–43	42–37
	2000–	8000	–	–	45–47	36–33
	5000–	20000	–	–	47–49	35–30

Thermische rendementen gelden bij rookgasafkoeling tot ca. 120 °C bij gasmotoren en tot ca. 200 °C bij dieselmotoren.

Standtijden voor zuigermotoren: levensduur 60 000–100 000 bedrijfsuren. Levensduur componenten in uren:
- brandstofpomp – 15 000 tot 80 000;
- kleppen – 12 000 tot 30 000;
- grote revisie – 15 000 tot 80 000;
- turbo – 20 000 tot 30 000.

Tabel 3.4 Emissie van schadelijke stoffen (praktijkwaarden) [ppmv] *bij 0% O_2*

stof	gasmotoren	dieselmotoren
CO	300–1000	300–500
koolwaterstoffen C_xH_y	500–2000	50–200
NO_x [1)]	100–1500	500–2000
SO_2 [2)]	–	25–100
Roet [g/kWh-mechanische energie]	–	0,1–0,35
CO_2 [kg/GJ]	56	75

[1)] omrekenfactoren voor NO_x: 1 g/GJ = 2 ppmv (0% O_2) = 3,5 mg/m^3 (3% O_2)
[2)] omrekenfactoren voor SO_2: 1,4 g/GJ = 2 ppmv (0% O_2) = 3,5 mg/m^3 (3% O_2)

Tabel 3.5 Geschiktheid diverse gassoorten voor gasmotoren (+: geschikt; −: niet geschikt)

brandstof	verbrandings-warde [MJ/m^3]	zelfaanzuigend		opgeladen	
		hoge compressie	lage compressie	hoge compressie	lage compressie
aardgas	35	+	+	+1)	+2)
propaan	98	+3), 5)	+	+1), 3), 5)	+2), 3)
butaan	126	−	+3)	−	−
rioolgas	23	+6)	+6)	+1), 6)	+2), 6)
aargas met H_2					
	10%	+3)	+3)	+1), 3)	+1), 3)
volume-% H_2	20%	+3)	+3)		+1), 3)
	30%	+3)	+3)		

1) Watertemperatuur turbo lager dan 32 °C.
2) Watertemperatuur turbo lager dan 80 °C.
3) Ontsteking vertraagd.
4) Niet meer dan 35% propaan.
5) Alléén standby toepassen.
6) Ontsteking vervroegd.

Warmteleveranciers

Ca. 60% van de aan de verbrandingsmotor toegevoerde energie komt vrij in de vorm van warmte. Wanneer deze warmte (grotendeels) nuttig wordt gebruikt spreken we van Warmtekrachtkoppeling (WKK). Deze 60% kan als volgt worden gespecificeerd (met bijbehorende temperatuurniveau's):

1 Motormantelkoeling (10%): tot 130 °C;
2 Smeeroliekoeling (4%): tot 85 °C;
3 Rookgassenkoeling (35%): stoom, heetwater, warmwater of combinaties hiervan.
  Rookgassen beschikbaar voor afkoeling van 400 à 500 °C tot ca. 200 °C (stoom), 120 °C (heetwater en warmwater).
  Verdere afkoeling van de rookgassen (ook condenserend) mogelijk bij laagtemperatuur verwarmingssystemen (bijv. in de glastuinbouw);
4 Turbokoeling (6%): 35 °C tot 80 °C; bij vermogens > ca. 600 kW_e gedeelde turbokoeling mogelijk, waarbij het hete deel (vanaf 80 °C) benut kan worden in traditionele cv-systemen (90/70).

3.2 Stoomturbines

Tabel 3.6 Rendementen stoomturbines

vermogen [MW]	rendement [%]
>100	35–40
50–100	30–35
10–50	22–30
1–10	17–24

Condensatieturbines

Dit type wordt vooral toegepast in E-centrales. Gestreefd wordt zoveel mogelijk thermische energie om te zetten in kinetische energie; ze zijn vrijwel ongeschikt als restwarmte-bron omdat het koelwater met ca. 25 °C afgevoerd moet worden.

Tegendrukturbines

De verhouding tussen het afgegeven mechanisch en het afgegeven thermisch vermogen is binnen zekere grenzen regelbaar. Deze turbines worden vooral toegepast wanneer er stoom van een hogere temperatuur en druk beschikbaar is, dan voor het proces zelf nodig is.

Rendement: som van mechanisch en thermisch rendement (90%). De interne verliezen worden door de stoom afgevoerd. Andere verliezen (lagers, lek, straling, tandwielkast, generator) bedragen minder dan 10%.
De opgewekte mechanische energie wordt voornamelijk bepaald door:

- temperatuur voedende stoom (weinig invloed);
- druk voedende stoom (normale invloed);
- druk van uitlaat-stoom (erg veel invloed);
- intern rendement turbine (veel invloed).

Tabel 3.7 Overzicht mogelijkheden regelingen warmtekrachtbalans (+ = hoog; − = laag)

regelmethode	mogelijkheid van W/K-variaties	totaal rendement	gecompliceerdheid
condenserende turbine (condens gaat rechtstreeks terug naar ketel)	++	−	
alléén tegendrukstoomturbine (warmte- en krachtbehoefte moeten tegengesteld zijn)	○	++	−−
tegendrukstoomturbine (parallel aan openbaar net)	++	++	+
tegendrukstoomturbine (met reductie overstort kleppen)	+	+	○

3.3 Gasturbines (open-cyclus)

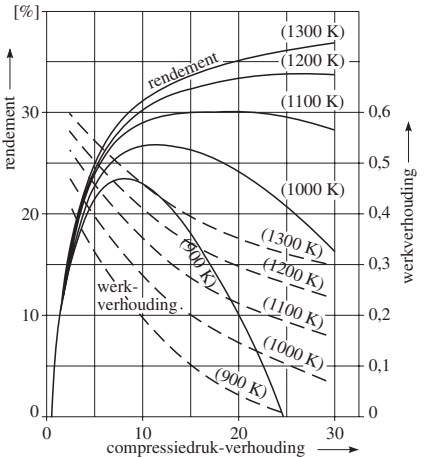
Het mechanisch rendement wordt bepaald door:
- rendement van de compressor;
- rendement van de turbine;
- temperatuur in expansieruimte (verbrandingskamer);
- drukverhouding van de compressor.

Zie figuur 3.1 waarin:

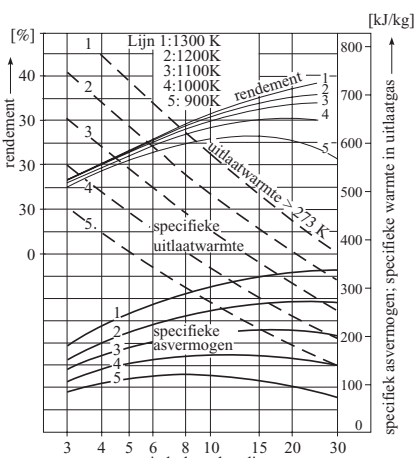
$$\text{cyclusefficiëntie} = \frac{\text{bruikbare as-energie}}{\text{primaire energie}}$$

$$\text{werkverhouding} = \frac{\text{bruikbare as-energie}}{\text{totale turbine-as energie}}$$

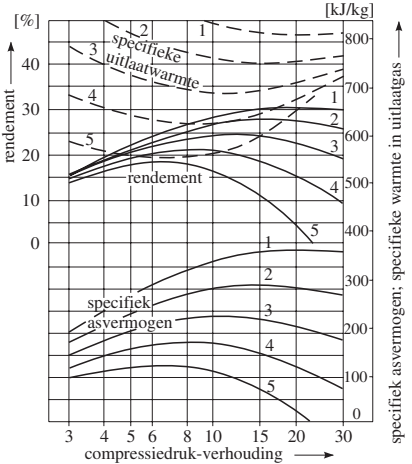
Verbetering van het mechanisch rendement is mogelijk door:
- Toepassing van diverse systeemverbeteringen:
  - meertraps compressor met tussenkoeler(s) (figuur 3.2);
  - meertraps turbine met herverhitter(s) (figuur 3.3);
  - warmteterugwinning: warmte-uitlaatgas naar inlaatlucht tussen compressoren en verbrandingskamer (figuur 3.4).
- Uitbreiding met naverbrander en stoomturbine (grootste mechanisch vermogen uit stoomturbine) (stoom-gascyclus).
- Uitbreiding met tegendrukstoomturbine (grootste mechanische vermogen uit gasturbine) (gas-stoomcyclus).



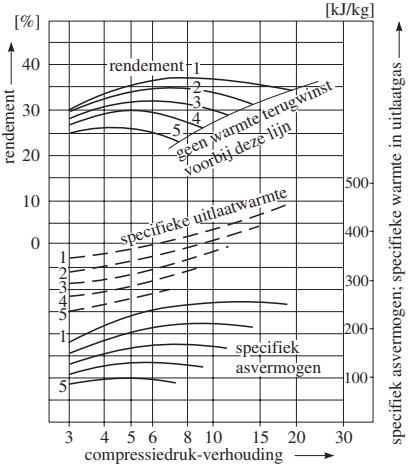
Figuur 3.1 Cyclusefficiëntie en werkverhouding als functie van de compressiedruk-verhouding voor een eenvoudige ééntraps turbine (open-cyclus)



Figuur 3.2 Tweetraps compressor met tussen-koeler



Figuur 3.3 Tweetrapsturbine met herverhitting



Figuur 3.4 Eéntrapsturbine met warmte-terugwinning

4 Wind- en zonne-energie

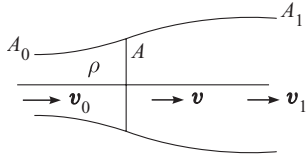
4.1 Windenergie

Bepalende variabelen voor *windmolengedrag*:
v = snelheid van medium [m/s]
R = straal van wiekenstel [m]
Ω = hoeksnelheid van rotor [rad/s]
ρ = dichtheid medium [kg/m^3]
ν = viscositeit medium [m^2/s]

Bepalende factoren:
C_M = momentcoëfficiënt $= M/(\frac{1}{2}\rho \cdot v^2 \cdot \pi \cdot R^3)$
λ = snellopendheid $= \Omega \cdot R/v$
Re = getal van Reynolds $= \rho \cdot R \cdot v/\nu$

Afgeleide factor:
C_p = vermogenscoëfficiënt $= \dfrac{P}{\frac{1}{2}\rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot R^2} = \lambda \cdot C_M$

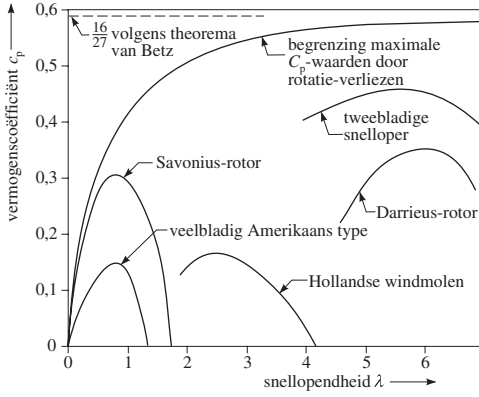
Axiale impulstheorie (alleen impulsverandering in axiale richting)
Behoudswet : $A_0 \cdot v_0 = A \cdot v = A_1 \cdot v_1$ (ρ = constant)
Kracht of vlak A: $F = \rho \cdot v \cdot A \cdot (v_0 - v_1)$
Bernoulli : $p + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 =$ constant
Hieruit volgt : $v = \frac{1}{2}(v_0 + v_1)$
P = onttrokken vermogen $\approx 2\rho \cdot v^2 \cdot (v_0 - v_1) \cdot A$



($\boldsymbol{\rho}$= constant)
($\boldsymbol{v}_0$ is buiten de 'stroombuis')

Figuur 4.1 Impulstheorie

P = maximaal voor $v = \frac{2}{3}v_0$ waarmee
$P_{\max} = \frac{8}{27}\rho \cdot v_0^3 \cdot A$



Figuur 4.2 Vermogenscoëfficiënt als functie van de snellopendheid voor diverse typen windturbines

Tabel 4.2 Afmetingen en vermogen turbine

P[kW]	diameter [m]		specifiek vermogen [W/m^2]
0,1	1	kleine windturbines	
0,5	2		
1	3		100–200
5	6		
10	7		200–300
100	19	grote windturbines	
300	30		300–500
500	40		
1000	50		500–600

Opbrengst turbine

Voor de *jaaropbrengst* van de turbine geldt globaal:

$$E = b \cdot \bar{v}^3 \cdot A$$

waarin:
E = energieopbrengst [kWh/a]
b = 1,8 (goed gedimensioneerde windmolen in windrijk gebied)
b = 2,5 (uitzonderlijk goed)
b = 3,2 (theoretisch maximum met Nederlands windregiem)
$\bar{v}$ = gemiddelde windsnelheid [m/s]
A = bestreken rotoroppervlakte [m^2]

In windrijke gebieden bedraagt de jaarproductie ca. 800 kWh/m^2 tot ca. 1100 kWh/m^2 (grote turbines aan de kust).

Windsnelheid

De *Weibull-verdeling* geeft een model voor de windsnelheidsverwachting bij gegeven parameters.

Weibull cumulatieve verdeling:

$$F(v) = 1 - \mathrm{e}^{-a \cdot v^C} = 1 - \mathrm{e}^{-\left(\frac{v}{A}\right)^C}$$

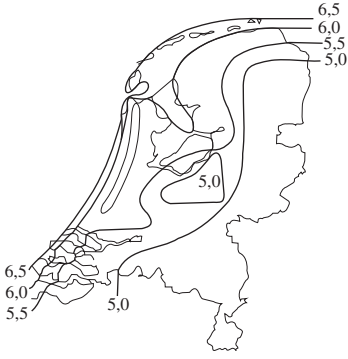
waarin (zie ook tabel 4.2, 4.3 en figuur 4.3):
C = vormparameter
$a = 1 - v/v_0$
$A = a^{-1/C}$ = schaalfactor een maat voor de jaargemiddelde windsnelheid

Tabel 4.2 Windsnelheidverdeling

Windsnelheid te Schiphol [m/s]	frequentie [‰]
0–1	49
1–2	63
2–3	103
3–4	130
4–5	130
5–6	114
6–7	104
7–8	84
8–9	64
9–10	48
10–11	36
11–12	25
12–13	17
13–14	12
14–15	8
>15	13

Tabel 4.3 Weibull-parameters

station	C	A [m/s]
Beek	2,01	4,83
Deelen	1,87	4,91
Den Helder	2,00	8,55
Eelde	1,74	5,07
Eindhoven	1,86	4,89
Gilze	1,68	4,44
H. v. Holland	1,76	6,92
Schiphol	1,86	6,36
Soesterberg	1,98	4,44
Twente	1,85	4,21
Vlissingen	1,95	6,67
Volkel	1,75	4,62



Figuur 4.3 Windsnelheidverdeling op 10 m *hoogte* [m/s]

4.2 Zonnewarmte

Toepassingen

Toepassingen van *zonnewarmte* voor de verwarming van:
- zwembadwater, pag. G3/33
- tapwater; pag. G3/35
- ruimten (vaak in combinatie met warmtepomp, zogenaamd *energiedak*), pag. G3/36

Rendement

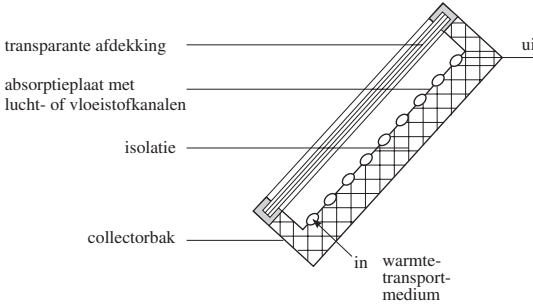
Hoge thermische prestaties worden verkregen door:
- oriëntatie op het Zuiden;
- een zo hoog mogelijke doorlating van de afdekking;
- een zo hoog mogelijke absorptie van zonnestraling;
- verlaging van het warmteverlies van de absorptieplaat.

Voor het rendement geldt:

$$\eta = \tau \cdot \alpha - U_{\mathrm{m}} \frac{T_{\mathrm{m}} - T_{\mathrm{a}}}{q}$$

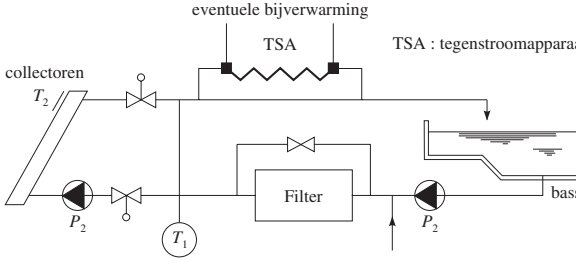
waarin:
τ = transmissiecoëfficiënt afdekking [–]
α = absorptiecoëfficiënt absorber [–]
U_m = warmteverliesfactor [W/(m^2·K)]
T_m = gemiddelde temperatuur transportmedium [K]
T_a = temperatuur omgeving [K]
q = zonnestralingsintensiteit [W/m^2]

Voor $(T_m - T_a)/q$ noteert men ook wel T^* (*gereduceerd temperatuurverschil*).

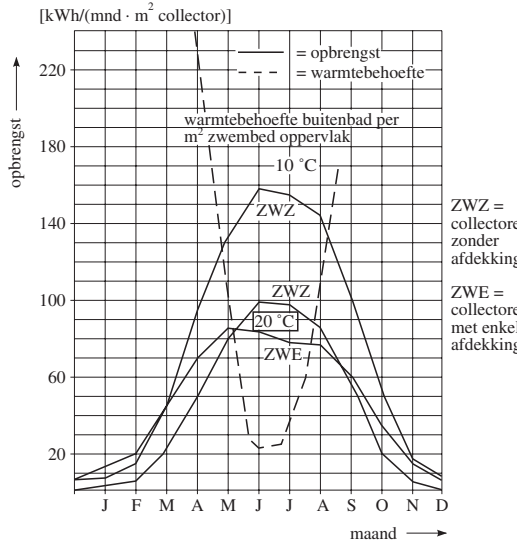


Figuur 4.4 Opbouw vlakke plaatcollector

Zwembadwater-verwarming (voor buitenbaden)
Enkele installatietechnische gegevens:
– Vloeistofdebiet per m^2 collector:
  • onafgedekte collectoren 100 à 150 liter/uur (meestal toegepast);
  • afgedekte collectoren ca. 50 liter/uur;
– Regeling van de circulatiepomp:
  • inschakelen bij collectortemperatuur 2,5 °C hoger dan bassinwater;
  • uitschakelen bij collectortemperatuur 0,5 °C hoger dan bassinwater;
  • uitschakelen ook bij bassintemperatuur hoger dan 28 °C.
– Oriëntatie collectoren: Zuid (evt. Zuid-Oost of Zuid-West).
– Hellingshoek collectoren: ca. 30°.



Figuur 4.5 Principeschema installatie en regeling collectorcircuit



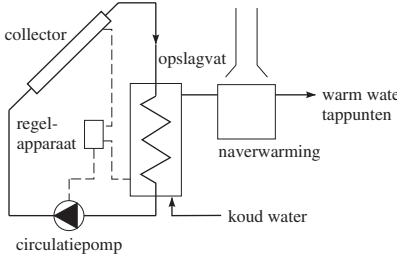
Figuur 4.6 Opbrengst per m^2 *collectoroppervlak bij een vaste inlaattemperatuur en een flow van* 100 liter *per* uur *per* m^2

Voor verwarming van het verse suppletiewater (temperatuur ca. 12 °C) bedraagt de warmte-opbrengst ca. 700 kWh per m^2 collectoroppervlak. Voor verwarming van het badwater (ca. 24 °C) is de warmte-opbrengst ongeveer 350 kWh per m^2 collector.
Als richtlijn voor een buitenbad kan voor de grootte van het collectoroppervlak ca. 0,5 m^2 per m^2 badoppervlak worden aangehouden. De besparing op het energiegebruik (zwemseizoen) zal ongeveer 75% bedragen.

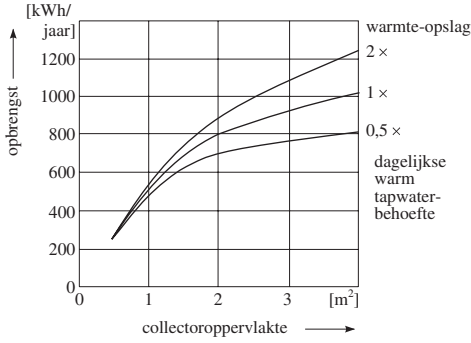
Tapwaterverwarming (zonneboiler)

Enkele installatietechnische gegevens:
- Afgedekte collectoren met spectraal selectieve absorber.
- Dimensionering op basis van ca. 50% van de warmtevraag per 100 liter afname per dag van 60 °C:
  - collectoroppervlakte: ca.2,5 à 3m^2;
  - warmte-opslag: ca. 150 liter;
  - gasbesparing: 200 m^3 per jaar.
- Oriëntatie collectoren: Zuid (evt. Zuid-Oost of Zuid-West). Bij oriëntatie West en Oost ca. ¼ minder warmte-opbrengst.
- Hellingshoek collectoren: ca. 45°.

Warmte-opbrengst bedraagt 350 à 400 kWh per m^2 collector.



Figuur 4.7 Principe zonneboiler



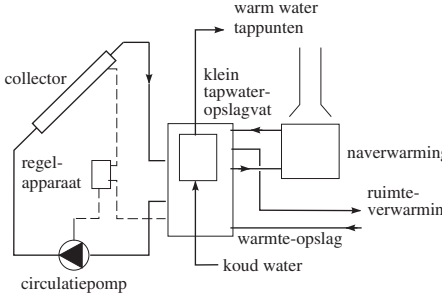
Figuur 4.8 Warmte-opbrengst zonneboiler voor tapwatervoorziening per 100 liter *dagelijks gebruikt warm water*

Ruimteverwarming en tapwaterverwarming ('vergrote' zonneboiler)

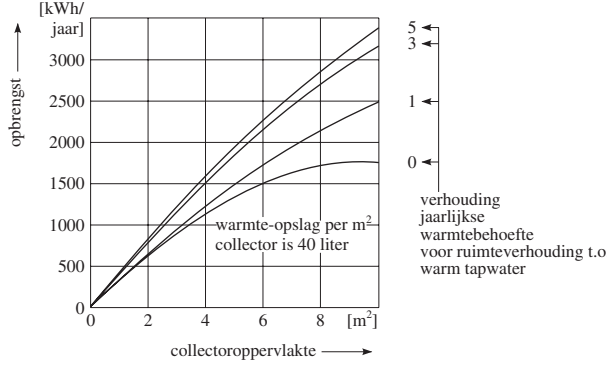
Enkele installatietechnische gegevens:

- Afgedekte collectoren met spectraal selectieve absorber.
- Dimensionering op basis van ca. 35% dekking van de totale warmtevraag per 100 liter afname per dag van 60 °C en 4kW maximale verwarmingsbehoefte:
  - collectoroppervlakte: ca. 8 à 10 m^2;
  - warmte-opslag: ca. 500 liter;
  - gasbesparing: 400 à 450 m^3 per jaar.
- Oriëntatie collectoren Zuid (evt. Zuid-Oost of Zuid-West).
- Hellingshoek collectoren: ca. 45°.

De warmte-opbrengst bedraagt ca. 300 kWh per m^2 collector.



Figuur 4.9 Principe 'vergrote' zonneboiler

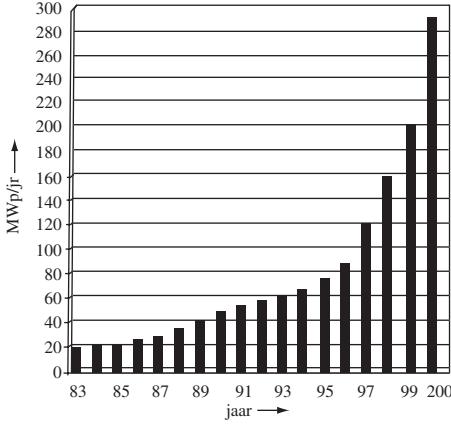


Figuur 4.10 Warmte-opbrengst 'vergrote' zonneboiler voor tapwatervoorziening en ruimteverwarming per 100 liter *dagelijks gebruikt warm water*

4.3 *Fotovoltaïsche (PV) omzetting*

Zonnecellen

Voor de directe omzetting van zonlicht in elektriciteit worden verschillende typen zonnecellen toegepast. De productie is sinds het begin van de jaren '80 sterk toegenomen (zie figuur 4.11). De wereldproductie van PV modules in 2000 komt overeen met een elektrisch vermogen van ruim 300 Mega-watt-piek (MWp, piekvermogen).



Figuur 4.11 Wereldproductie van PV modules in de periode 1983–2000.

Toepassingen

PV systemen kunnen in twee categorieën onderverdeeld worden:

- autonome systemen met bijvoorbeeld een accu als opslag;
- netgekoppelde systemen waarbij het elektriciteitsnet als virtuele opslag dient.

Autonome systemen worden toegepast in gebieden waar geen elektriciteitsnet aanwezig is (bijv. Solar Home Systems en zonnelantaarns in ontwikkelingslanden), telecommunicatie, verlichting,

wegsignalering, consumentenelektronica (rekenmachines, horloges). Autonome systemen met accu-opslag hebben een typische grootte van 10 Wp tot 1 kWp. Netgekoppelde systemen worden toegepast in de gebouwde omgeving (dakintegratie, gevels) en als PV centrales op de grond of bijvoorbeeld op geluidsschermen langs snelwegen. De grootte van deze systemen varieert van 100 Wp (daken) tot enige MWp (centrales). Op dit moment levert 1 m^2 PV paneel ca. 100 Wp en 75 kWh per jaar. Wereldwijd zijn er overheidsprogramma's voor een grootschalige introductie van PV. De verenigde Staten heeft een 'Miljoen Zonnedaken in 2010' programma, Duitsland 100.000 daken in 2005 en Nederland wil in 2010 250 MWp geïnstalleerd vermogen hebben. Deze programma's worden uitgevoerd door o.a. de overheid (landelijk en lokaal), PV-producenten, bouwondernemingen en kennisinstituten.

Op dit moment is elektriciteit uit PVnog duurder dan elektriciteit uit het net, maar PV kan al wel concurreren in autonome toepassingen. De benodigde investering (turn-key) voor netgekoppelde systemen is ruwweg 5–10 €/Wp en voor autonome systemen 7–20 €/Wp (inclusief randapparatuur als verlichting en opslag). Het bedrag is sterk afhankelijk van de grootte en van de toepassing. Voor een levensduur van ongeveer 20 jaar komen deze kosten overeen met 0,55–1,35 € per kWh. Er zijn volop mogelijkheden om de kosten van PV aanzienlijk te reduceren. Dit kan bereikt worden door:

- implementatie van goedkopere en snellere productietechnieken;
- gebruik van goedkopere en/of minder uitgangsmaterialen;
- verhoging van het omzettingsrendement met als doel kostenreductie;
- schaalvergroting (economy-of-scale, economy-of-volume).

Op de lange termijn (> 2020) zouden bij grootschalige productie de commerciële prijzen voor modules gedaald kunnen zijn tot 0,5 €/Wp. Voor een totaal PV systeem zou dit minder dan 1 €/Wp zijn.
Daarnaast kost de productie van PV-zonnecellen tot op dit moment (ca. 2000) meer energie dan ze tijdens hun technische levensduur kunnen leveren. Lopende onderzoeken naar alternatieve productiemethoden (en daarmee ook kostprijsverlaging) kunnen bijdragen aan een bredere toepassing van PV-zonne-energie.

Literatuur

- *Basisgegevens aardgas*
  Groningen, Gasunie.
- Diamant, R.M.E.
  Total energy
  Oxford, Pergamon-Press.
- Duffie, J.A., W.A. Beckman
  Solar Engineering of thermal processes
  New York, John Wiley & Sons.
- Durand, W.F.
  Aerodynamic theory (Volume IV)
  New York, Dover Publications Inc.
- *Energie Zakboek* derde druk
  Elsevier bedrijfsinformatie b.v., Arnhem 2002.
- ISSO-14
  Zonneboilers
  Rotterdam, ISSO.
- ISSO-38
  Handboek Warmtepompen
  Rotterdam, ISSO.
- Kirn, Herbert, Hadenfeldt
  Wärmepumpen (Band 1 en 2)
  Karlsruhe, C.F. Müller Verlag.
- Maake-Eckert
  Pohlman Taschenbuch der Kältetechnik
  Karlsruhe, C.F. Müller Verlag.
- Recknagel-Sprenger
  Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik
  Müchen, R. Oldenbourg Verlag Gmbh.

Elektro-installatietechniek G4

1 Elektrische machines
- 1.1 Generatoren en motoren algemeen
- 1.2 Gelijkstroommachines
- 1.3 Synchrone machines
- 1.4 A-synchrone machines
- 1.5 Berekenen van het motorkoppel
- 1.6 Transformatoren
- 1.7 De 3-fase transformator

2 Elektrische leidingen
- 2.1 Spanningsverlaging in leidingen
- 2.2 Toelaatbare stroom in leidingen

3 Installatietechniek
- 3.1 Voorschriften
- 3.2 Leidingsoorten
- 3.3 Draad- en aderkleuren sterkstroomleidingen
- 3.4 Aantal draden per buis, aansluitingen en voorzieningen
- 3.5 Beschermingsgraden (IP-aanduidingen)
- 3.6 Kortsluitstromen
- 3.7 Beveiliging door smeltpatronen
- 3.8 Installatie-automaten
- 3.9 Verbetering van de cos φ

4 Verlichtingstechniek
- 4.1 Verlichting werkvlak
- 4.2 Tabellen

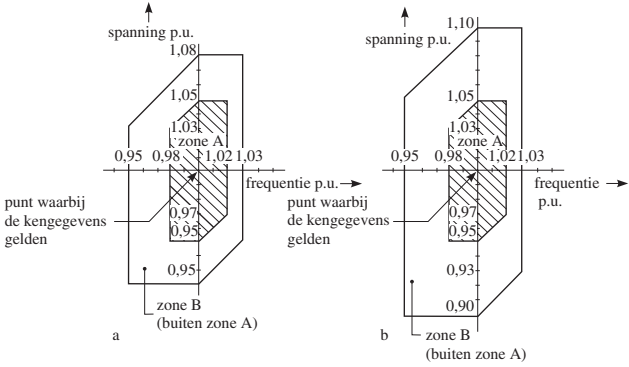
5 Elektrotechnisch tekenen
- 5.1 Belangrijkste normen
- 5.2 Elektrotechnische symbolen

1 Elektrische machines

Zie hiervoor ook NEN 3173 Roterende elektrische machines.

1.1 Generatoren en motoren algemeen

Voor generatoren en motoren worden de toelaatbare afwijkingen van spanning en frequentie en de combinatie van beide grafisch weergegeven in figuur 1.1.
In zone A dient de machine **continu** zijn voornaamste functie te vervullen. Er worden hierbij geen eisen gesteld aan de volledige eigenschappen zoals bij de kengegevens.
In zone B dient de machine zijn voornaamste functie te vervullen. Langdurig verblijf aan de buitengrens van zone B wordt niet aanbevolen.



Figuur 1.1 Grenswaarde van de spanning en de frequentie voor generatoren (a) en motoren (b)

Tabel 1.1 Toelaatbare temperatuursverhogingen en temperatuurgrenzen (omgevingstemperatuur $\leqq 40^{\circ}$C op een hoogte $\leqq 1000$ m boven de zeespiegel)

isolatieklasse	Δt_K	$t_{grens}[^{\circ}C]$	isolatieklasse	Δt_K	$t_{grens}[^{\circ}C]$
A	60	105	F	100	155
E	70	120	H	125	180
B	80	130			

Rendement generator: $\eta = \dfrac{P_e}{P_{as}} 100\%$

Rendement motor: $\eta = \dfrac{P_{as}}{P_e} 100\%$

met:
P_e totaal elektrisch vermogen (stator plus rotor)

P_{as} asvermogen: $T\omega_r$ met $\omega_r = 2\pi \dfrac{n}{60}$

η aantal omwentelingen per minuut [rpm]

1.2 Gelijkstroommachines

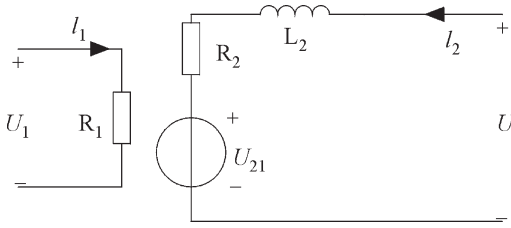
In de rotor van een gelijkstroommachine wordt een bronspanning opgewekt evenredig met het toerental

$$U_{21} = N_2' \Phi_{21} \omega_r$$

waarin:
N_2' het effectieve aantal rotorwikkelingen: $N_2' = q f_d f_k N_2$

de verkortingsfactor $f_k = \sin\left(\dfrac{\pi}{2} - \dfrac{\varepsilon}{2}\right)$ met de

verkortingshoek ε



Figuur 1.2 Rotor- en stratorvervangingsschema

de distributiefactor $f_d = \dfrac{\sin\frac{1}{2}q\beta}{\sin\frac{1}{2}\beta}$ met β de hoek tussen de spoelen

q het aantal spoelen

Φ_{21} de statorflux [Vs]
ω_r rotorhoeksnelheid [rad/s]

De rotorklemspanning is: $U_2 = I_2 R_2 + U_{21}$
R_2 de rotorweerstand [Ω]
Bij een gelijkstroom met een beperkte rimpel mag L_2 worden verwaarloosd. Bij voeding via een mutator bepaalt L_2 de rimpel op de stroom.

De elektrische tijdconstante van een gelijkstroommachine is:

$$\tau_2 = \frac{L_2}{R_2}$$

Het elektrisch koppel: $T_e = N_2' \, \Phi_{21} \, I_2$

Het askoppel: $T_{as} = T_e - T_{wrijving}$

Het wrijvingskoppel is ca. 3% van het askoppel.

Uitgangsspanning van een B6-mutator (gestuurde 3 fase gelijkrichter) bij een leemte vrije stroom door de

gelijkstroommachine: $\bar{U}_b = \dfrac{3\hat{u}\sqrt{3}}{\pi}\cos\alpha$

α stuurhoek $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$

$\hat{u}$ topwaarde van de fasespanning, $U\sqrt{2}$

Maximale uitgangsspanning bij het 230/400 [V] net:

$$\bar{U}_b = \frac{3.230.\sqrt{2}.\sqrt{3}}{\pi} \cdot \cos 30 = 466\,[\mathrm{V}]$$

Klemaanduiding volgens NEN	2448
Rotor(anker)aansluiting	A1-A2
Hulppoolwikkeling	B1-B2
Compensatiewikkeling	C1-C2
Statorwikkelingen	
Seriewikkeling	D1-D1
Shuntwikkeling	E1-E1
Afz. bekr. wikkeling	F1-F2

1.3 Synchrone machines

De relatie tussen toerental en frequentie is: $n_\mathrm{r} = \dfrac{f_1}{p}$

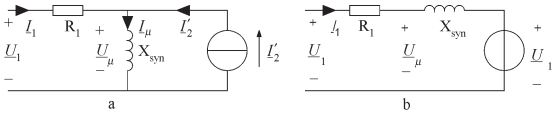
n_r rotortoerental [1/s]
f_1 statorveld frequentie [Hz]
p aantal poolparen

Voor de synchrone machine worden 2 vervangingsschema's gebruikt. Afhankelijk van de toepassing kiest men het stroombron- (a) of het spanningsbronschema (b).

Het vervangingsschema is per fase.

De overzetverhouding is: $\beta = \dfrac{I_2}{I'_2} = \dfrac{3}{\sqrt{2}}\dfrac{N'_1}{N'_2}$

I_2 rotor bekrachtigingstroom [A]
I'_2 gereduceerde rotorstroom [A]



Figuur 1.3 Stroombron- en spanningsbronvervangingsschema van de synchrone machine

N'_1 effectieve aantal statorwindingen ($N'_1 = q f_d f_k N_1$)
N'_2 effectieve aantal rotorwindingen ($N'_2 = q f_d f_k N_2$)

$$\underline{U}_{12} = \underline{I}'_2 \, \mathrm{j} \, X_{syn}$$

X_{syn} de synchrone reactantie [Ω]
Opgenomen vermogen: $P_1 = 3U_1 \, I'_2 \sin \delta$

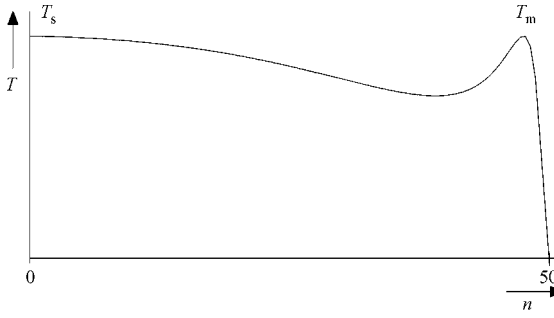
Koppel bij cilindrische rotor: $T_e = \dfrac{3U_1 I'_2}{\omega_1} \sin \delta$

δ de lasthoek (hoek tussen draaiveld en rotor)
U_1 stator fasespanning [V]

Bij machines met een permanente magneetrotor wordt een vaste waarde voor I_2 genomen.
In netbedrijf is met de bekrachtigingsstroom I_2 het blindvermogen van de machine te regelen. Inductief bedrijf, de machine is onderbekrachtigd en neemt blindvermogen op uit het net. Capacitief bedrijf, de machine is overbekrachtigd en levert blindvermogen aan het net.
Geregeld motorbedrijf is mogelijk met een stroombron- of spanningsbronfrequentieregelaar. Voor grote vermogens (> 1 [MW]) worden vrijwel altijd stroombronfrequentieregelaars gebruikt, de zogenaamde **L**oad **C**ommutated **I**nverters (LCI).

1.4 A-synchrone machines

Industriële motoren zijn vrijwel altijd normmotoren met een dubbelkooi rotor. De buitenkooi bepaalt hoofdzakelijk het startkoppel. In het normale werkgebied wordt het koppel bepaald door de binnenkooi.



Figuur 1.4 Koppel-toerenkromme van een 2-polige dubbelkooi machine

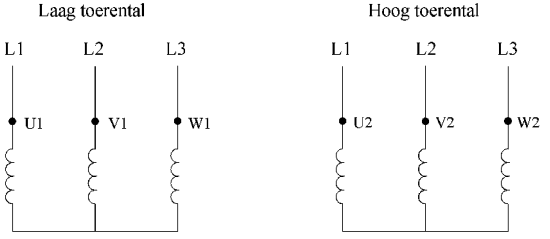
Voor de slip geldt: $s = \dfrac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} = \dfrac{n_1 - n_r}{n_1}$

In het werkgebied (stabiele gebied) geldt voor het koppel:

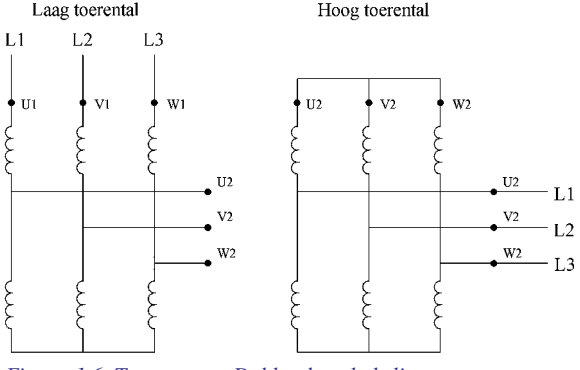
$$T_e = \frac{3U_1 s}{\omega_1 R'_2}$$

ω_1 statorveldhoeksnelheid [rad/s]
ω_r rotorhoeksnelheid [rad/s]
n_1 statordraaiveldsnelheid [1/s]
n_r rotorsnelheid [1/s]
U_1 stator fasespanning [V]
R'_2 gereduceerde rotorweerstand

Poolomschakelbare motoren
De poolomschakelbare machines hebben een hoog-laag toerenbereik. Er zijn twee gangbare uitvoeringen:
– Twee gescheiden wikkelingen (zie figuur 1.5)
– Omschakelbare spoelen, de Dahlanderschakeling (zie figuur 1.6)



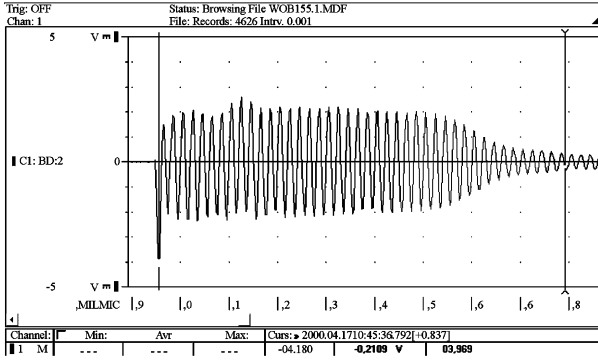
Figuur 1.5 Twee toeren machine met gescheiden wikkelingen



Figuur 1.6 Twee toeren Dahlanderschakeling

Directe aanloop

De aanloopstroom is 6-8 maal de nominale stroom en houdt deze waarde tot het kipkoppel (T_m in figuur 1.4) en neemt daarna af. Direct na het inschakelen treedt bij de grotere motoren een extra magnetiseringsstroom op. De maximale inschakelstroom kan daarbij waarden tussen 10-15 maal de nominale stroom bereiken.



Figuur 1.7 Aanloopstroom van een direct ingeschakelde 4 polige 155 [kW] a-synchrone motor, inschakelpiek ca. 4100 [A]

Bij de normale toepassingen zoals pompen, transportbanden, compressoren, etc. duurt de aanloop niet langer dan 1 [s].

Ster-driehoek

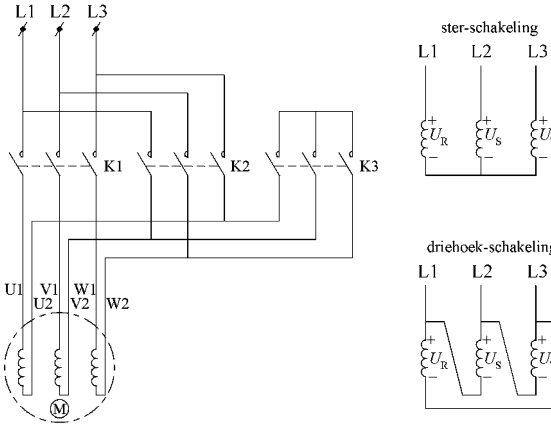
Bij ster-driehoek aanloop nemen startstroom en koppel met een factor 3 af. Het omschakelen van ster naar driehoek, met magneetschakelaars, duurt ca 50 [ms]. In deze tijd is het rotorveld nog niet afgebouwd en zal met de rotor verder draaien. De driehoekschakeling moet zodanig zijn dat het statorveld, op het moment van inschakelen, zoveel mogelijk in fase is met het rotorveld.

Aanlooptransformator

Bij een aanlooptransformator nemen startstroom en koppel met een factor p^2 af, waarbij p de overzetverhouding van de transformator is.

Softstarter

Aanlopen met een begrensde startstroom. Het startkoppel neemt kwadratisch met de startstroom af, de startstroom moet niet te laag worden ingesteld om een gegarandeerde aanloop te krijgen. Het gebruik van een startpuls is uit oogpunt van aanloopstroombeperking niet gewenst (zie directe aanloop).



Figuur 1.8 Praktisch bruikbare ster-driehoekschakeling

Frequentieregelaar

Bij gebruik van een frequentieregelaar ligt het werkpunt van een asynchrone machine altijd in het normale werkgebied. De frequentieregelaar trekt de rotor als het ware met de statorfrequentie mee. Het koppel is evenredig met de slip.

$$T_e = 3\left(\frac{U_1}{\omega_{1_N}}\right)^2 = \frac{s\omega_1}{R_2'} = ks\omega_1$$

ω_{1_N} nominale statorveldhoeksnelheid [rad/s]

U_1 nominale fasespanning [V]

Om de magnetisering van de machine, in het gebied 0-50 [Hz], constant te houden moet het quotiënt U/f constant worden gehouden. Bij een statorfrequentie boven 50 [Hz] blijft de spanning constant en neemt de magnetisering van de machine af, men spreekt hierbij van veldverzwakking. In het veldverzwakkingsbereik moet het vermogen constant blijven, het koppel zal

omgekeerd evenredig met het toerental afnemen. Bij generatorbedrijf is een remchopper of een netrecuperatiemoduul nodig.

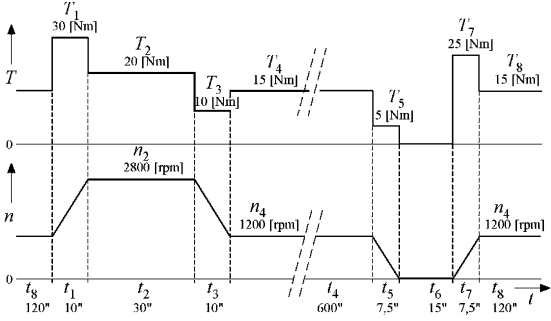
1.5 Berekenen van het motorkoppel

Om tot een juiste keuze van een aandrijving te komen is de te verwachten bedrijfscyclus, de *duty-cycle*, van belang.
Een goede methode om de belasting van de motor te bepalen is door het effectieve koppel van de cyclus te berekenen.

$$T_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T T(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3 + \cdots\cdots + T_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \cdots\cdots + t_n}}$$

$$T_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{30^2.10 + 20^2.30 + 10^2.10 + 15^2.600 + 5^2.7{,}5 + 25^2.7{,}5 + 15^2.120}{10 + 30 + 10 + 600 + 7{,}5 + 15 + 7{,}5 + 120}}$$

$$= \sqrt{\frac{188875}{800}} = 15{,}36 \text{ [Nm]}$$



Figuur 1.9 Koppel- en toerenverloop van een aandrijving, de duty-cycle

De motor moet 2800 [rpm] kunnen draaien met een relatief hoog koppel, de keuze valt op een 2 polige motor. Het gemiddelde toerental ligt echter aanzienlijk onder het nominale toerental. Voor de keuze van de motor is een toerental van1200 [rpm] het uitgangspunt, waarbij het effective koppel moet worden geleverd.

Het toerental is: $\frac{1200}{2800}.100\% = 42,85\%,$

de draaiveldfrequentie is dan:

$$\frac{42,85}{100\%}.50 = 21,4 \approx 23\,[\text{Hz}]$$

Ten gevolge van het lage gemiddelde toerental moet, in verband met de mindere koeling, het motorvermogen worden gereduceerd. Het nominale koppel van de te kiezen motor moet minimaal het effectieve koppel gedeeld door de reductiefactor zijn.

1.6 Transformatoren

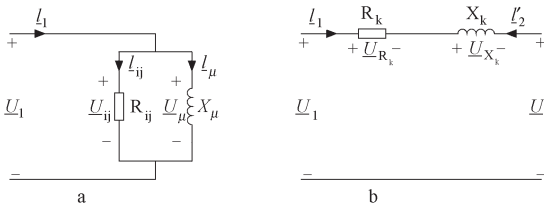
Een transformator bestaat uit twee over elkaar gewikkelde spoelen op een kern. Voor een ideale transformator (koppelfactor 1) geldt:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1}U_1 \quad \text{en} \quad I_2 = \frac{N_1}{N_2}I_1$$

Om in distributie-netten niet met allerlei winding-verhoudingen te rekenen worden gereduceerde waarden gebruikt, aangegeven met een accent.

$$U'_2 = \frac{N_1}{N_2}U_2 \quad \text{en} \quad I'_2 = \frac{N_2}{N_1}I_2$$

In nullast is de transformator te beschouwen als een spoel met kern. Het vervangingsschema bestaat uit een ijzerverliesweerstand R_{ij} en magnetiseringsreactantie X_μ (zie figuur 1.10a).



Figuur 1.10 Nullastschema (a) en kortsluitschema (b)

In belaste toestand bestaat het vervangingsschema uit de koperweerstand van beide spoelen plus de spreidingsreactantie, veroorzaakt door de flux buiten de kern om.

$$R_k = R_1 + R'_2 \quad \text{en} \quad X_k = X_{s1} + X'_{s2}$$

De kortsluitspanning is de primaire spanning waarbij in kortgesloten toestand de nominale strook I_2 loopt. Uit de kortsluitspanning en de nominale stroom kan de kortsluitimpedantie (zie figuur 1.10b) worden berekend.
Voor het nominale vermogen van een transformator aan de secundaire zijde geldt:

$$S_{nom} = U_2 I_2 [\text{VA}]$$

De spanningsverlaging onder belasting volgt uit de kortsluitimpedantie.

$$U'_2 = -U_{k_{re}} + U_1 \sqrt{1 - \left(\frac{U_{k_{im}}}{U_1}\right)^2}$$

met $U_{k_{re}}$ het reële deel en $U_{k_{im}}$ het imaginaire deel van de kortsluitspanning.

$$U_{k_{re}} = I'_b (R_k \cos\varphi_b - X_k \sin\varphi_b)$$

$$U_{k_{im}} = I'_b (R_k \sin\varphi_b - X_k \cos\varphi_b)$$

Voorbeeld:
Overzetverhouding 25, kortsluitimpedantie $R_k = 5{,}8$ [Ω] en $X_k = 16{,}5$ [Ω], secundaire spanning 230 [V], belasting 500 [A]

met $\cos\varphi = 0{,}9$ inductief

$$U_2' = 25.230 = 5750\,[\mathrm{V}] \quad I_2' = \frac{500}{25} = 20\,[\mathrm{A}]$$

$$U_{k_{re}} = 20.(5, 8.0, 9 - 16, 5.(-0, 435)) = 248\,[\mathrm{V}]$$

$$U_{k_{im}} = 20.(5, 8.(-0, 435) + 16, 5.0, 9) = 246, 5\,[\mathrm{V}]$$

$$U_2' = -248 + 5750.\sqrt{1 - \left(\frac{246, 5}{5750}\right)^2} = 5496, 7\,[\mathrm{V}]$$

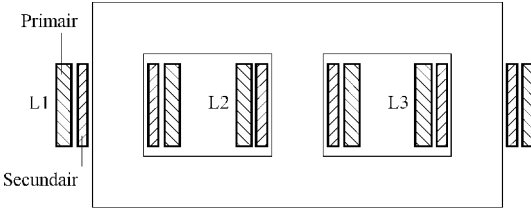
$$U_2 = \frac{U_2'}{25} = 219, 8\,[\mathrm{V}]$$

De term $U_{k_{re}}$ bepaalt hoofdzakelijk de spanningsdaling.
In de meeste gevallen mag de spanningsverlaging gelijkgesteld worden aan $U_{k_{re}}$.

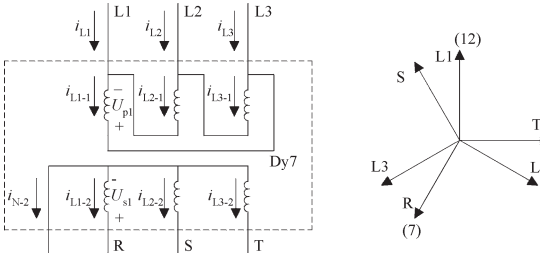
$$\Delta U = I_b'(R_k \cos\varphi_b - X_k \sin\varphi_b)$$

1.7 De 3-fase transformator

De 3-fase transformator bestaat uit een juk met 3 poten, met op elke poot een primaire en secundaire spoel.



Figuur 1.11 Opbouw van de 3-fase transformator



Figuur 1.12 3-fase transformator driehoekster met klokgetal 7, Dy7

De 3-fase zijn onderling via de kern magnetisch gekoppeld. Deze koppeling heeft gevolgen voor het gedrag bij asymmetrische belasting en 1- of 2-fase kortsluitingen.
Zowel de primaire als secundaire spoelen kunnen ster of driehoek worden geschakeld. De fasehoek tussen de primaire en secundaire zijde wordt met het klokgetal aangegeven.
De nullast- en kortsluitverliezen van distributie-transformatoren worden in overleg tussen afnemer en fabrikant bepaald.

2 Elektrische leidingen

2.1 Spanningsverlaging in leidingen

Een belangrijk punt bij het ontwerpen van een elektrische installatie is de spanningsdaling over de diverse leidingen. Bij de voeding van een motor control centre (mcc) is een spanningsdaling van ca 5% tijdens aanloop geen probleem. Bij een lichtinstallatie met tl-lampen voorzien van klassieke ballasten (spoelen) is een daling van ca. 2% al waarneembaar.
Bij de berekening van de spanningsval kan tabel 2.1 als hulpmiddel dienen.

Tabel 2.1 Ohmse weerstand en reactantie van een 4 aderige kabel. Weerstand volgens IEC. Reactantie volgens Draka.

doorsnede [mm^2]	$R(20^\circ)$ [Ω/km]	$R(90^\circ)$ [Ω/km]	l [mH/km]	X [Ω/km]
1,5	12,1000	15,4287	0,37	0,1162
2,5	7,4100	9,4485	0,35	0,1100
4	4,6100	5,8782	0,33	0,1037
6	3,0800	3,9273	0,32	0,1005
10	1,8300	2,3334	0,29	0,0911
16	1,1500	1,4664	0,28	0,0880
25	0,7270	0,9270	0,28	0,0880
35	0,5240	0,6682	0,28	0,0880
50	0,3870	0,4935	0,25	0,0785
70	0,2680	0,3417	0,22	0,0691
95	0,1930	0,2461	0,21	0,0660
120	0,1530	0,1951	0,20	0,0628
150	0,1240	0,1581	0,20	0,0628
185	0,0991	0,1264	0,20	0,0628
240	0,0754	0,0961	0,17	0,0534

De spanningsval aan het einde van een kabel, bij een gelijkspanning, wordt als volgt berekend. Kabellengte 50 [m], doorsnede 50 [mm^2], stroom 30 [A]
Totale leidingweerstand:

$$R_{\text{totaal}} = 2R_{\text{km}}l = 2.0,4935.0,5 = 0,4935\,[\Omega]$$

De spanningsverlaging wordt:

$$\Delta U = IR_{\text{totaal}} = 30.0,4935 = 14,8\,[\text{V}]$$

met:
I Stroom door de leiding
R_{km} Weerstand per km van de leiding
l lengte van de leiding

Energieverlies bij 8 uur belasting per dag.

$$W_{\text{per dag}} = pt = I^2 R_{\text{totaal}}\, t = 30^2 \cdot 0{,}4935.8.3600 = 12{,}8 \text{ [MJ]}$$

De spanningsdaling bij een wisselspanning moet op dezelfde wijze gebeuren als bij een transformator. In de praktijk kan echter met een benaderingsformule worden gewerkt $\Delta U = I(R \cos \varphi - X \sin \varphi)$.

Voorbeeld:
$I = 30$ [A], $\cos \varphi = 0{,}85$ inductief, kabellengte 500 [m], doorsnede 50 [mm^2].
Totale leidingweerstand:

$$R_{\text{totaal}} = 2R_{\text{km}} l = 0{,}4935 \cdot 0{,}5 = 0{,}2467 \text{ [}\Omega\text{]}$$

(de nulleider voert geen stroom)

$$\begin{aligned}\Delta U &= I(R\cos\varphi - X\sin\varphi) \\ &= 30 \cdot (0{,}2467 \cdot 0{,}85 - 0{,}03925 \cdot (-0{,}526)) = 6{,}91 \text{[V]}\end{aligned}$$

Energieverlies bij 8 uur belasting per dag.

$$W_{\text{per dag}} = 3pt = 3I^2 R_{\text{totaal}} t = 3.30^2 \cdot 0{,}2467.8.3600 = 19{,}18 \text{ [MJ]}$$

2.2 *Toelaatbare stroom in leidingen*

Bij de samenstelling van deze paragraaf is gebruik gemaakt van hetgeen genormaliseerd is. Het gaat dan met name om het *vijfde deel* van de NEN 1010 5e druk (zie voor een overzicht par. 3.1). In de normen is *uitgebreide* informatie opgenomen. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* te Delft.
De NEN 1010 5e druk is met name voor kabelinstallatiemethoden aanzienlijk veranderd. De toelaatbare stroom kan

zowel met berekening bepaald worden, als met behulp van tabellen 2.2 tot en met 2.14.
De volgende stappen dienen doorlopen te worden voor het bepalen van de hoogst toelaatbare stroom van leidingen:
– Bepaal in tabel 2.2, kolom 1 het nummer van de beoogde installatiemethode
– Ga na in tabel 2.3, of de beoogde installatiemethode in relatie tot de omstandigheden is toegelaten.
– Om de hoogst toelaatbare stroom te verkrijgen:
  - Bepaal aan de hand van tabel 2.2, kolommen 3 t/m 7, welke andere tabellen moeten worden geraadpleegd om de toelaatbare stroom te bepalen.
  - Bepaal eveneens aan de hand van tabel 2.2, kolommen 8 en 9, welke andere tabellen moeten worden geraadpleegd voor de reductiefactoren.

De volgende coderingen worden gebruikt om de bepalingen of toelichtingen naar herkomst te onderscheiden:
CLC overeenkomend met CENELEC harmonisatiedocument.
C/N overeenkomend met CENELEC harmonisatiedocument en bevat Nederlandse toevoegingen.
IEC overeenkomend met IEC norm.
I/N overeenkomend met IEC norm en bevat Nederlandse toevoegingen.
NL een Nederlandse bepaling of toelichting.

Voor noten in tabel 2.2, zie pag. G4/31 en G4/32.

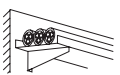
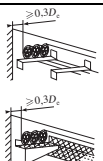
Tabel 2.2 Overzicht van installatiemethoden om bijbehorende stromen te kunnen bepalen

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
1		2.4a kolom 2	2.4c kolom 2	2.4b kolom 2	2.4d kolom 2	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in buis aangebracht in thermisch geïsoleerde wand[1)]
2		2.4a kolom 3	2.4c kolom 3	2.4b kolom 3	2.4d kolom 3	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel in buis aan gebracht in thermisch geïsoleerde wand (zie ook nr. 51)[1)]
3		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in buis gemonteerd tegen houten of gemetselde wand of op een afstand $s < 0{,}3\varnothing_{\text{buis}}$
4		2.4a kolom 5	2.4c kolom 5	2.4b kolom 5	2.4d kolom 5	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel in buis gemonteerd tegen houten of gemetselde wand of op een afstand $s < 0{,}3\varnothing_{\text{buis}}$
5		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in kabelkoker aangebracht tegen houten wand, gemetselde of betonnen muur

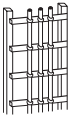
Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van: PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	reductiefactor omgevings-temp.	reductiefactor verzameling van leidingen	toelichting
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
6		in bewerking, de waarden van nr. 4 mogen worden toegepast							meer-aderige kabel in kabelkoker aangebracht tegen een houten wand, gemetselde of betonnen muur
7		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in buis aangebracht in metselwerk of beton[2)]
8		2.4a kolom 5	2.4c kolom 5	2.4b kolom 5	2.4d kolom 5	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel in buis aangebracht in metselwerk of beton[2)]
11		2.4a kolom 6	2.4c kolom 6	2.4b kolom 6	2.4d kolom 6	70°C mantel 2.4e 105°C mantel 2.4f	2.5a (lucht)	2.6a	één-aderige of meer-aderige kabel aangebracht: – tegen een houten wand of – op een afstand $s < 0{,}3.D_e$ van een houten wand
12		2.4a kolom 6	2.4c kolom 6	2.4b kolom 6	2.4d kolom 6	70°C mantel 2.4e 105°C mantel 2.4f	2.5a (lucht)	2.6a nr. 3	één-aderige of meer-aderige kabel aangebracht op afstand tegen een houten plafond

Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van: PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	reductiefactor omgevingstemp.	reductiefactor verzameling van leidingen	toelichting
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
13		in bewerking							één- of meer-aderige kabel aangebracht op afstand tegen een plafond
14		2.4a kolom 6	2.4c kolom 6	2.4b kolom 6	2.4d kolom 6	70°C mantel 2.4e 105°C mantel 2.4f	2.5a (lucht)	2.6a nr. 2 zie ook 2.6e en 2.6f	één of meer-aderige kabel aangebracht op ongeperforeerde kabelbaan
15		koper 2.4i aluminium 2.4j		koper 2.4k aluminium 2.41		70°C mantel 2.4g 105°C mantel 2.4h	2.5a (lucht)	2.6a nr. 4[3] zie ook 2.6e en 2.6f	één- of meer-aderige kabel aangebracht op geperforeerde kabelbaan horizontaal of verticaal gemonteerd
16		koper 2.4i aluminium 2.4j		koper 2.4k aluminium 2.41		70°C mantel 2.4g 105°C mantel 2.4h	2.5a (lucht)	2.6a,	één- of meer-aderige kabel aangebracht op horizontaal of verticaal gemonteerde kabelsteunen of op gaas

Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
17		koper 2.4i		koper 2.4k		70°C mantel 2.4g	2.5a (lucht)	2.6a, nr. 4 of 5	één- of meer-aderige kabel m.b.v. klampen gemonteerd op een afstand $s > 0{,}3 \cdot D_e$ van een muur
		aluminium 2.4j		aluminium 2.41		105°C mantel 2.4h		zie ook 2.6e en 2.6f	
18		koper 2.4i		koper 2.4k		70°C mantel 2.4g	2.5a (lucht)	2.6a	één- of meer-aderige kabel aangebracht op een kabellader
		aluminium 2.4j		aluminium 2.41		105°C mantel 2.4h			
19		koper 2.4i		koper 2.4k		70°C mantel 2.4g	2.5a (lucht)	2.6a	één- of meer-aderige kabel opgehangen aan een afzonderlijke spandraad of met een in de kabel geïntegreerde spandraad
		aluminium 2.4j		aluminium 2.41		105°C mantel 2.4h			
20		koper 2.4i		koper 2.4k		70°C mantel 2.4g	2.5a (lucht)	–	al dan niet geïsoleerde draad op isolatoren
		aluminium 2.4j		aluminium 2.41		105°C mantel 2.4h		f	

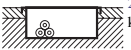
Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
21		2.4a	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a,	één- of meer-aderige kabel aangebracht in een holte van vloer wand of plafond[3)4)5)]
		$1{,}5 \cdot D_e \leq V < 5 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 5 $5 \cdot D_e \leq V < 50 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 4							
22		2.4a	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad in buis aangebracht in een holte van vloer, wand of plafond[3)4)6)]
		$1{,}5 \cdot D_e \leq V < 20 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 5 $20 \cdot D_e \leq V \rightarrow$ kolom 4							
23		in bewerking							één- of meer-aderige kabel in buis aangebracht in een holte van vloer, wand of plafond[3)4)6)]
24		2.4a	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in kabelkoker aangebracht in een holte van vloer, wand of plafond[3)4)6)]
		$1{,}5 \cdot D_e \leq V < 20 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 5 $20 \cdot D_e \leq V \rightarrow$ kolom 4							
25		in bewerking							meer-aderigekabel in kabelkoker aangebracht in een holte van vloer, wand of plafond[3)4)6)]

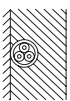
Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
26		2.4a	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in kabelkoker aangebracht in metselwerk of beton met een warmteweerstandscoëfficiënt ≤ 2 K · m/W[3)4)5)]
		$1{,}5 \cdot D_e \leq V < 5 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 5 $5 \cdot D_e \leq V < 50 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 4							
27		in bewerking							meer-aderige kabel in kabelkoker aangebracht in metselwerk of beton met een warmteweer-standscoëfficiënt ≤ 2 K · m/W[3)4)5)]
28		2.4a	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a	één- of meer-aderige kabel aan-gebracht in ruimte:[4)5)] – boven verlaagd plafond – onder zwevende vloer
		$1{,}5 \cdot D_e \leq V < 5 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 5 $5 \cdot D_e \leq V < 50 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 4							
31		2.4a	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in horizontaal lopende kabelgoten aangebracht tegen een houten wand[7)]
32		2.4a	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in verticaal lopende kabel-goten aangebracht tegen een houten wand[3)7)]

Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
33		in bewerking de waarden van nr. 36 kunnen worden toegepast							meer-aderige kabel in horizontaal lopende kabelgoten aangebracht tegen houten wand [7)]
34		in bewerking de waarden van nr. 36 kunnen worden toegepast							meer-aderige kabel in verticaal lopende kabelgoten aangebracht tegen een houten wand [3) 7)]
35		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in kabelgoot, verzonken in de vloer
36		2.4a kolom 5	2.4c kolom 5	2.4b kolom 5	2.4d kolom 5	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel in kabelgoot, verzonken in de vloer
37		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.5b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel aangebracht in opgehangen kabelgoot[7)]
38		2.4a kolom 5	2.4c kolom 5	2.4b kolom 5	2.4d kolom 5	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel aangebracht in opgehangen kabelgoot[7)]
41		2.4a $1{,}5 \cdot D_e \leq V < 20 \cdot D_e \rightarrow$ kolom 5 $20 \cdot D_e \leq V \rightarrow$ kolom 4	2.4c	2.4b	2.4d	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in buis aangebracht in een horizontaal of verticaal lopend, ongeventileerd kabelkanaal[3) 8)]

Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
42		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in buis aangebracht in een open of geventileerd kabelkanaal in de vloer[9)10)]
43		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel in een horizontaal of verticaal lopend, open of geventileerd, kabelkanaal[10)]
51		2.4a kolom 2	2.4c kolom 2	2.4b kolom 2	2.4d kolom 2	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel direct aangebracht en bevestigd in een thermisch geïsoleerde wand **NB: Nederland niet toegelaten**
52		2.4a kolom 6	2.4c kolom 6	2.4b kolom 6	2.4d kolom 6	70°C mantel 2.4e 105°C mantel 2.4f	2.5a (lucht)	2.6a	één-aderige of meer-aderige kabel direct en **zonder** aanvullende mechanische bescherming aangebracht in metselwerk of beton met een warmteweerstandscoëfficiënt $\leq$ 2 K · m/W **NB: Nederland niet toegelaten**
53		2.4a kolom 6	2.4c kolom 6	2.4b kolom 6	2.4d kolom 6	70°C mantel 2.4e 105°C mantel 2.4f	2.5a (lucht)	2.6a	één-aderige of meer-aderige kabel direct en **met** aanvullende mechanische bescherming aangebracht in metselwerk of beton met een warmteweerstandscoëfficiënt $\leq$ 2 K · m/W

Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
61		2.4a kolom 7	2.4c kolom 7	2.4b kolom 7	2.4d kolom 7	–	2.5a (grond)	2.6c	meer-aderige kabel in kabelkoker of buis aangebracht in de grond [13]
62		2.4a kolom 7	2.4c kolom 7	2.4b kolom 7	2.4d kolom 7	–	2.5a (grond)	2.6c	één-aderige kabel in kabelkoker of buis aangebracht in de grond [13]
63		2.4a kolom 7	2.4c kolom 7	2.4b kolom 7	2.4d kolom 7	–	2.5a (grond)	2.6c	één- of meer-aderige kabel direct in de grond gelegd zonder aanvullende bescherming [11) 12) 13)]
64		2.4a kolom 7	2.4c kolom 7	2.4b kolom 7	2.4d kolom 7	–	2.5a (grond)	2.6c	één- of meer-aderige kabel direct in de grond gelegd met aanvullende bescherming [11) 12) 13)]
71		2.4a kolom 2	2.4c kolom 2	2.4b kolom 2	2.4d kolom 2	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in speciaal ontworpen systeemprofiel [18)]

Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
72		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel aangebracht in plintgoot
73		2.4a kolom 5	2.4c kolom 5	2.4b kolom 5	2.4d kolom 5	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer aderige kabel aangebracht in plintgoot
74		2.4a kolom 2	2.4c kolom 2	2.4b kolom 2	2.4d kolom 2	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad in buis of één- of meer-aderige kabel aangebracht in deurkozijnen[18)]
75		2.4a kolom 2	2.4c kolom 2	2.4b kolom 2	2.4d kolom 2	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad in buis of één- of meer-aderige kabel aangebracht in raamkozijnen
76		2.4a kolom 4	2.4c kolom 4	2.4b kolom 4	2.4d kolom 4	–	2.5a (lucht)	2.6a	installatiedraad of één-aderige kabel in kabelgoten, verzonken in de wand
77		2.4a kolom 5	2.4c kolom 5	2.4b kolom 5	2.4d kolom 5	–	2.5a (lucht)	2.6a	meer-aderige kabel in kabelgoten, verzonken in de wand

Tabel 2.2 (vervolg)

nr.	installatiemethode	toelaatbare stroom in enkelvoudige stroomketens met isolatiemateriaal van:					reductiefactor		toelichting
		PVC-isolatie		XLPE/EPR-isolatie		minerale isolatie	omgevings-temp.	verzameling van leidingen	
		2 aders	3 aders	2 aders	3 aders	1, 2 en 3 aders			
81		in bewerking							één- of meer-aderige kabels in water

[1] De binnenkant van de wand bezit een warmteoverdrachtscoëfficiënt van niet minder dan 10 [W/m^{2}K].
[2] De warmteweerstandscoëfficiënt van metselwerk of beton is niet groter dan 2,5 [mK/W].
[3] Speciale aandacht moet worden besteed aan verticaal aangebrachte kabels waarbij de ventilatie beperkt is. Bovenaan de kabels kan de omgevingstemperatuur aanzienlijk oplopen [in bewerking].
[4] V is:
– de kleinste afmeting of de middellijn van een gemetselde of betonnen holte of kanaal of
– de diepste van een rechthoekig kanaal in vloer of plafond of tussen plafond en verlaagd plafond.
[5] D_e is de uitwendige middellijn van een meer-aderige kabel,
D_e = 2,2 maal de uitwendige middellijn van een één-aderige kabel als drie van deze kabels in driehoek gelegd zijn, of
D_e = 3 maal de uitwendige middellijn van een één-aderige kabel als drie van deze kabels naast elkaar zijn gelegd.
[6] D_e is de uitwendige middellijn van een buis of de diepte van een kabelkoker.
[7] D_e aangegeven 2.4a t/m 2.4d gelden voor enkelvoudige stroomketens. Als er meer dan één stroomketen is aangebracht in een kabelgoot moeten, ongeacht de aanwezigheid van inwendige afscheiding de reductiefactoren uit tabel 2.6a gebruikt worden.
[8] D_e is de uitwendige middellijn van een buis, V is de inwendige diepte van het kanaal. De diepte van een kanaal is belangrijker dan de breedte.
[9] Voor meer-aderige kabel kunnen de waarden van nr. 38 worden toegepast.
[10] Het wordt aanbevolen om deze installatiemethode alleen te gebruiken in ruimten waar de toegang beperkt is tot daartoe geautoriseerde personen zodat kan worden voorkomen dat door opeenhoping van vuil de toelaatbare stroom vermindert en brandgevaar ontstaat.
[11] De vergelijking van direct in de grond gelegde kabels met in de grond gelegde kabels in buis of kabelkoker is redelijk als de grond een warmteweerstandscoëfficiënt heeft die in de orde grootte van 2,5 [mK/W] is. Als de warmteweerstandscoëfficiënt van de grond lager is hebben kabels die direct in de grond zijn gelegd een toelaatbare stroom die aanzienlijk hoger is dan die voor kabels in buis en kabelkoker aangebracht in de grond (CLC). Zie ook tabel 2.5b.
[12] Voor kabels direct gelegd in de grond, is ook uitgegaan van ligging op een sleufdiepte van ten minste 0,70 m.
[13] Variatie van de ligging op een sleufdiepte tussen 0,50 en 0,90 m heeft een verwaarloosbare invloed op de toelaatbare stroom (NL).
[14] De warmtegeleidingscoëfficiënt van de omhulling wordt verondersteld laag te zijn door aard van de gebruikte materialen en de mogelijk aanwezige luchtruimten. Als de constructie thermisch vergelijkbaar is met de installatiemethode nr. 31 en 32 kunnen de waarden van nr. 71 en 72 worden toegepast.

Tabel 2.3 Installatie van leidingsystemen

leidingen		zonder bevestiging	direct bevestigd	buis	kabelgoot (incl. plintgoot, verzonken vloergoot)	kabelkoker	kabellander, kabelbaan, kabelsteunen	op isolatoren	spandraad
holten in de constructie van het gebouw (incl. verlaagde plafonds en zwevende vloeren)	toegankelijk	28	28	22, 23	31, 32, 33, 34, 76, 77	24, 25, 14, 15, 16, 17, 18		–	0
	niet toegankelijk	21, 28, 74, 75	0	22, 23, 74, 75	0	24, 25	0	–	–
kabelkannaal		43	43	41, 42	31, 32, 32	5, 6, 24, 25	14, 15, 16, 17, 18	–	–
in de grond gelegd		63, 64	0	61, 62	–	61, 62	0	–	–
direct aangebracht in de constructie van het gebouw		52[2)]	51[2)]	1, 2, 7, 8, 53	35, 36, 76, 77	26, 27	0	–	–
opbouw		–	11, 12, 13	3, 4	31, 32, 33, 34, 71, 72, 73	5,6	14, 15, 16, 17, 18	20	–
in zicht boven 2 meter		–	11[1)], 12[1)], 13[1)]	3[1)], 4[1)]	31[1)], 32[1)], 33[1)], 34[1)], 37, 38, 71[1)], 72[1)], 73[1)]	5[1)], 6[1)]	14, 15, 16, 17, 18	20	19
onder water 81		81	81	0	–	0	0	–	–

[1)] Wordt in CENELEC uitgesloten, maar in Nederland wél toegelaten.
[2)] Wordt in Nederland niet toegelaten.
De getallen in deze tabel corresponderen met de nummers uit tabel 2.2.
Betekenis: 0 = niet van toepassing of niet gebruikelijk in de praktijk, – = niet toegelaten.

Tabel 2.4a Toelaatbare stroom [A]*, kabels met PVC-isolatie-materiaal en* ***twee*** *belaste aders*

kerndoor-snede [mm^2]	aangebracht in buis in thermisch geïsoleerde wand		aangebracht in buis tegen een houten wand		één- of meer-aderige kabel aangebracht tegen een houten wand [1)]	meer-aderige kabel in kokers aange-bracht in de grond[1)]
	installatie-draad	meer-aderige kabel[1)]	installatie-draad	meer-aderige kabel[1)]		
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7
kernmateriaal **koper**						
1,5	14,5	14	17,5	16,5	19,5	22
2,5	19,5	18,5	24	23	27	29
4	26	25	32	30	36	38
6	34	32	41	38	46	47
10	46	43	57	52	63	63
16	61	57	76	69	85	81
25	80	75	101	90	112	104
35	99	92	125	111	138	125
50	119	110	151	133	168	148
70	151	139	192	168	213	183
95	182	167	232	201	258	216
120	210	192	269	232	299	246
150	240	219	309	265	344	278
185	273	248	353	300	392	312
240	321	291	415	351	461	361
300	367	334	477	401	530	408
kernmateriaal **aluminium**						
2,5	15	14,5	18,5	17,5	21	22
4	20	19,5	25	24	28	29
6	26	25	32	30	36	36
10	36	33	44	41	49	48
16	48	44	60	54	66	62
25	63	58	79	71	83	80
35	77	71	97	86	103	96
50	93	86	118	104	125	113
70	118	108	150	131	160	140
95	142	130	181	157	195	166
120	164	150	210	181	226	189
150	189	172	241	206	261	213
185	215	195	275	234	298	240
240	252	229	324	274	352	277
300	289	263	372	313	406	313

[1)] Is voor kerndoorsneden tot en met 16 mm^2 uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern, max}} = 70^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{omgeving}} = 30^{\circ}\text{C}$ in lucht, $T_{\text{omgeving}} = 20^{\circ}\text{C}$ in grond

Tabel 2.4b Toelaatbare stroom [A], *kabels met XLPE of EPR-isolatiemateriaal en* ***twee*** *belaste aders*

kerndoorsnede [mm^2]	aangebracht in buis in thermisch geïsoleerde wand		aangebracht in buis tegen een houten wand		één- of meeraderige kabel aangebracht tegen een houten wand [1)]	meeraderige kabel in kokers aangebracht in de grond[1)]
	installatiedraad	meeraderige kabel[1)]	installatiedraad	meeraderige kabel[1)]		
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7
kernmateriaal **koper**						
1,5	19	18,5	23	22	24	26
2,5	26	25	31	30	33	34
4	35	33	42	40	45	44
6	45	42	54	51	58	56
10	61	57	75	69	80	73
16	81	76	100	91	107	95
25	106	99	133	119	138	121
35	131	121	164	146	171	146
50	158	145	198	175	209	173
70	200	183	253	221	269	213
95	241	220	306	265	328	252
120	278	253	354	305	382	287
150	318	290	407	349	441	324
185	362	329	464	395	506	363
240	424	386	546	462	599	419
300	486	442	628	529	693	474
kernmateriaal **aluminium**						
2,5	20	19,5	25	23	26	26
4	27	26	33	31	35	34
6	35	33	43	40	45	42
10	48	45	59	54	62	56
16	64	60	79	72	84	73
25	84	78	105	94	101	93
35	103	96	130	115	126	112
50	125	115	157	138	154	132
70	158	145	200	175	198	163
95	191	175	242	210	241	193
120	220	201	281	242	280	220
150	253	230	323	277	324	249
185	288	262	368	314	371	279
240	338	307	433	368	439	322
300	387	352	499	421	508	364

[1)] Is voor kerndoorsneden tot en met 16 mm^2 uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern, max}} = 90°\text{C}$, $T_{\text{omgeving}} = 30°\text{C}$ in lucht, $T_{\text{omgeving}} = 20°\text{C}$ in grond

Tabel 2.4c Toelaatbare stroom [A], *kabels met PVC-isolatiemateriaal en* ***drie*** *belaste aders*

kerndoorsnede [mm^2]	aangebracht in buis in thermisch geïsoleerde wand		aangebracht in buis tegen een houten wand		één- of meeraderige kabel aangebracht tegen een houten wand [1)]	meeraderige kabel in kokers aangebracht in de grond[1)]
	installatiedraad	meeraderige kabel[1)]	installatiedraad	meeraderige kabel[1)]		
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7
kernmateriaal **koper**						
1,5	13,5	13	15,5	15	17,5	18
2,5	18	17,5	21	20	24	24
4	24	23	28	27	32	31
6	31	29	36	34	41	39
10	42	39	50	46	57	52
16	56	52	68	62	76	67
25	73	68	89	80	96	86
35	89	83	110	99	119	103
50	108	99	134	118	144	122
70	136	125	171	149	184	151
95	164	150	207	179	223	179
120	188	172	239	206	259	203
150	216	196	275	236	299	230
185	245	223	314	268	341	258
240	286	261	370	313	403	297
300	328	298	426	358	464	336
kernmateriaal **aluminium**						
2,5	14	13,5	16,5	15,5	18,5	18,5
4	18,5	17,5	22	21	25	24
6	24	23	28	27	32	30
10	32	31	39	36	44	40
16	43	41	53	48	59	52
25	57	53	70	62	73	66
35	70	65	86	77	90	80
50	84	78	104	92	110	94
70	107	98	133	116	140	117
95	129	118	161	139	170	138
120	149	135	186	160	197	157
150	170	155	214	183	227	178
185	194	176	245	208	259	200
240	227	207	288	243	305	230
300	261	237	331	278	351	260

[1)] Is voor kerndoorsneden tot en met 16 mm^2 uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern, max}} = 70^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{omgeving}} = 30^{\circ}\text{C}$ in lucht, $T_{\text{omgeving}} = 20^{\circ}\text{C}$ in grond

Tabel 2.4d Toelaatbare stroom [A], *kabels met XLPE of EPR-isolatiemateriaal en **drie** belaste aders*

kerndoor-snede [mm^2]	aangebracht in buis in thermisch geïsoleerde wand		aangebracht in buis tegen een houten wand		één- of meer-aderige kabel aangebracht tegen een houten wand [1)]	meer-aderige kabel in kokers aange-bracht in de grond[1)]
	installatie-draad	meer-aderige kabel[1)]	installatie-draad	meer-aderige kabel[1)]		
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7
kernmateriaal **koper**						
1,5	17	16,5	20	19,5	22	22
2,5	23	22	28	26	30	29
4	31	30	37	35	40	37
6	40	38	48	44	52	46
10	54	51	66	60	71	61
16	73	68	88	80	96	79
25	95	89	117	105	119	101
35	117	109	144	128	147	122
50	141	130	175	154	179	144
70	179	164	222	194	229	178
95	216	197	269	233	278	211
120	249	227	312	268	322	240
150	285	259	358	307	371	271
185	324	295	408	348	424	304
240	380	346	481	407	500	351
300	435	396	553	465	576	396
kernmateriaal **aluminium**						
2,5	19	18	22	21	24	22
4	25	24	29	28	32	29
6	32	31	38	35	41	36
10	44	41	52	48	57	47
16	58	55	71	64	76	61
25	76	71	93	84	90	78
35	94	87	116	103	112	94
50	113	104	140	124	136	112
70	142	131	179	156	174	138
95	171	157	217	188	211	164
120	197	180	251	216	245	186
150	226	206	289	248	283	210
185	256	233	330	281	323	236
240	300	273	389	329	382	272
300	344	313	447	377	440	308

[1)] Is voor kerndoorsneden tot en met 16 mm^2 uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern, max}} = 90°C$, $T_{\text{omgeving}} = 30°C$ in lucht, $T_{\text{omgeving}} = 20°C$ in grond

Tabel 2.4e Toelaatbare stroom [A]*, aanraakbare kabels met mineraal-isolatiemateriaal en koperen kern*

kerndoorsnede [mm^2]	twee belaste adres	drie belaste aders	
	één- of twee-aderige kabel	meer-aderige kabel of één-aderige kabel in driehoekconfiguratie	één-aderige kabel tegen elkaar gelegd in één laag
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4
maximale belasting 500 [V]			
1,5	23	19	21
2,5	31	26	29
4	40	35	38
maximale belasting 750 [V]			
1,5	25	21	23
2,5	34	28	31
4	45	37	41
6	57	48	52
10	77	65	70
16	102	86	92
25	133	112	120
35	163	137	147
50	202	169	181
70	247	207	221
95	296	249	264
120	340	286	303
150	388	327	346
185	440	371	392
240	514	434	457

Deze waarden gelden voor kabels met koperen mantelmateriaal. Bij toepassing van kabel zonder PVC-buitenmantel moeten de waarden met 0,9 worden vermenigvuldigd. Bij één-aderige kabels moeten per stroomketen de metalen mantels aan de einden met elkaar worden verbonden.

Temperatuur metalen mantel $= 70\,^{\circ}\mathrm{C}$, $T_{\mathrm{omgeving}} = 30\,^{\circ}\mathrm{C}$.

Tabel 2.4f Toelaatbare stroom [A], *niet-aanraakbare kabels met mineraal-isolatiemateriaal en koperen kern*

kerndoor-snede [mm^2]	twee belaste adres	drie belaste aders	
	één- of twee-aderige kabel	meer-aderige kabel of één-aderige kabel in driehoekconfiguratie	één-aderige kabel tegen elkaar gelegd in één laag
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4
maximale belasting 500 [V]			
1,5	28	24	27
2,5	38	33	36
4	51	44	47
maximale belasting 750 [V]			
1,5	31	26	30
2,5	42	35	41
4	55	47	53
6	70	59	67
10	96	81	91
16	127	107	119
25	166	140	154
35	203	171	187
50	251	212	230
70	307	260	280
95	369	312	334
120	424	359	383
150	485	410	435
185	550	465	492
240	643	544	572

Deze waarden gelden voor montage tegen een gemetselde of betonnen wand omdat de hoge temperatuur van de mantel ontoelaatbaar is voor een houten wand, indien geen aanvullende maatregelen zijn getroffen. Bij één-aderige kabels moeten per stroomketen de metalen mantels aan de einden met elkaar worden verbonden.

Temperatuur metalen mantel $= 105\,^{\circ}\mathrm{C}$, $T_{\mathrm{omgeving}} = 30\,^{\circ}\mathrm{C}$.

Tabel 2.4g Toelaatbare stroom [A]*, voor aanraakbare kabel met mineraal isolatiemateriaal in de vrije lucht*

kerndoorsnede [mm^2]	twee belaste adres	drie belaste aders			
	één- of tweeaderige kabel	meer-aderige kabel of één-aderige kabel in driehoekconfiguratie	één-aderige kabel in één laag		
			tegen elkaar	op afstand	
				verticaal	horizontaal
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6
maximale belasting 500 [V]					
1,5	25	21	23	26	29
2,5	33	28	31	34	39
4	44	37	41	45	51
maximale belasting 750 [V]					
1,5	26	22	26	28	32
2,5	36	30	34	37	43
4	47	40	45	49	56
6	60	51	57	62	71
10	82	69	77	84	95
16	109	92	102	110	125
25	142	120	132	142	162
35	174	147	161	173	197
50	215	182	198	213	242
70	264	223	241	259	294
95	317	267	289	309	351
120	364	308	331	353	402
150	416	352	377	400	454
185	472	399	426	446	507
240	552	466	496	497	565

Deze waarden gelden voor kabels met koperen mantelmateriaal. Bij toepassing van kabel zonder PVC-buitemantel moeten de waarden met 0,9 worden vermenigvuldigd. Bij één-aderige kabels moeten per stroomketen de metalen mantels aan de einden met elkaar worden verbonden.

Temperatuur metalen mantel $= 70\,^{\circ}\mathrm{C}$, $T_{\mathrm{omgeving}} = 30\,^{\circ}\mathrm{C}$.

Tabel 2.4h Toelaatbare stroom [A]*, voor niet- aanraakbare kabel met mineraal isolatiemateriaal in de vrije lucht*

kerndoorsnede [mm^2]	twee belaste adres	drie belaste aders			
	één- of twee-aderige kabel	meer-aderige kabel of één-aderige kabel in driehoek-configuratie	één-aderige kabel in één laag		
			tegen elkaar	op afstand	
				verticaal	horizontaal
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6
maximale belasting 500 [V]					
1,5	31	26	29	33	37
2,5	41	35	39	43	49
4	54	46	51	56	64
maximale belasting 750 [V]					
1,5	33	28	32	35	40
2,5	45	38	43	47	54
4	60	50	56	61	70
6	76	64	71	78	89
10	104	87	96	105	120
16	137	115	127	137	157
25	179	150	164	178	204
35	220	184	200	216	248
50	272	228	247	266	304
70	333	279	300	323	370
95	400	335	359	385	441
120	460	385	411	441	505
150	526	441	469	498	565
185	596	500	530	557	629
240	697	584	617	624	704

Deze waarden gelden voor kabels met koperen mantelmateriaal. Bij één-aderige kabel moeten per stroomketen de metalen mantels aan de einden met elkaar worden verbonden.

Temperatuur metalen mantel $= 105\,^{\circ}\mathrm{C}$, $T_{\mathrm{omgeving}} = 30\,^{\circ}\mathrm{C}$.

Tabel 2.4i Toelaatbare stroom [A]*, voor koperen kabel met PVC-isolatiemateriaal in de vrije lucht*

kerndoorsnede [mm^2]	meer-aderige aders		één-aderige kabel				
	twee belaste aders	drie belaste aders	twee belaste aders tegen elkaar	drie belaste aders in ∇-configuratie	drie belaste aders in één laag		
					tegen elkaar	op afstand	
						horizontal	verticaal
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7	kolom 8
1,5	22	18,5	–	–	–	–	–
2,5	30	25	–	–	–	–	–
4	40	34	–	–	–	–	–
6	51	43	–	–	–	–	–
10	70	60	–	–	–	–	–
16	94	80	–	–	–	–	–
25	119	101	131	110	114	146	130
35	148	126	162	137	143	181	162
50	180	153	196	167	174	219	197
70	232	196	251	216	225	281	254
95	282	238	304	264	275	341	311
120	328	276	352	308	321	396	362
150	379	319	406	356	372	456	419
185	434	364	463	409	427	521	480
240	514	430	546	485	507	615	569
300	593	497	629	561	587	709	659
400	–	–	754	656	689	852	795
500	–	–	868	749	789	982	920
630	–	–	1005	855	905	1138	1070

Waarden in tabel zijin voor kerndoorsneden tot en met 16 [mm^2] uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern}} = 70\,^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{omgeving}} = 30\,^{\circ}\text{C}$.

Tabel 2.4j Toelaatbare stroom [A]*, voor aluminium kabel met PVC-isolatiemateriaal in de vrije lucht*

kerndoor-snede [mm^2]	meer-aderige aders		één-aderige kabel				
	twee blaste aders	drie belaste aders	twee belaste aders tegen elkaar	drie belaste aders in Δ-configuratie	drie belaste aders in één laag		
					tegen elkaar	op afstand	
						horizontal	verticaal
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7	kolom 8
2,5	23	19,5	–	–	–	–	–
4	31	26	–	–	–	–	–
6	39	33	–	–	–	–	–
10	54	46	–	–	–	–	–
16	73	61	–	–	–	–	–
25	89	78	98	84	87	112	99
35	111	96	122	105	109	139	124
50	135	117	149	128	133	169	152
70	173	150	192	166	173	217	196
95	210	183	235	203	212	265	241
120	244	212	273	237	247	308	282
150	282	245	316	274	287	356	327
185	322	280	363	315	330	407	376
240	380	330	430	375	392	482	447
300	439	381	497	434	455	557	519
400	–	–	600	526	552	671	629
500	–	–	694	610	640	775	730
630	–	–	808	711	746	900	852

Waarden in tabel zijn voor kerndoorsneden tot en met 16 [mm^2] uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern}} = 70\,^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{omgeving}} = 30\,^{\circ}\text{C}$.

Tabel 2.4k Toelaatbare stroom [A]*, voor koperen kabel met XLPE of EPR-isolatiemateriaal in de vrije lucht*

kerndoor-snede [mm^2]	meer-aderige aders		één-aderige kabel				
	twee belaste aders	drie belaste aders	twee belaste aders tegen elkaar	drie belaste aders in Δ-configuratie	drie belaste aders in één laag		
					tegen elkaar	op afstand	
						horizontal	verticaal
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7	kolom 8
1,5	26	23	–	–	–	–	–
2,5	36	32	–	–	–	–	–
4	49	42	–	–	–	–	–
6	63	54	–	–	–	–	–
10	86	75	–	–	–	–	–
16	115	100	–	–	–	–	–
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833
400	–	–	940	823	868	1085	1008
500	–	–	1083	946	998	1253	1169
630	–	–	1254	1088	1151	1454	1362

Waarden in tabel zijin voor kerndoorsneden tot en met 16 [mm^2] uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern}} = 90\,^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{omgeving}} = 30\,^{\circ}\text{C}$.

Tabel 2.4l Toelaatbare stroom [A]*, voor aluminium kabel met XLPE of EPR-isolatiemateriaal in de vrije lucht*

kerndoor-snede [mm^2]	meer-aderige aders		één-aderige kabel				
	twee belaste aders	drie belaste aders	twee belaste aders tegen elkaar	drie belaste aders in Δ-configuratie	drie belaste aders in één laag		
					tegen elkaar	op afstand	
						horizontal	verticaal
kolom 1	kolom 2	kolom 3	kolom 4	kolom 5	kolom 6	kolom 7	kolom 8
2,5	28	24	–	–	–	–	–
4	38	32	–	–	–	–	–
6	49	42	–	–	–	–	–
10	67	58	–	–	–	–	–
16	91	77	–	–	–	–	–
25	108	97	121	103	107	138	122
35	135	120	150	129	135	172	153
50	164	146	184	159	165	210	188
70	211	187	237	206	215	271	244
95	257	227	289	253	264	332	300
120	300	263	337	296	308	387	351
150	346	304	389	343	358	448	408
185	397	347	447	395	413	515	470
240	470	409	530	471	492	611	561
300	543	471	613	547	571	708	652
400	–	–	740	663	694	856	792
500	–	–	856	770	806	991	921
630	–	–	996	899	942	1154	1077

Waarden in tabel zijn voor kerndoorsneden tot en met 16 [mm^2] uitgegaan van ronde kernen. Voor grotere kerndoorsneden is uitgegaan van sectorvormige kernen; de vermelde waarden mogen ook voor ronde kernen worden toegepast.

$T_{\text{kern}} = 90\,^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{omgeving}} = 30\,^{\circ}\text{C}$.

Tabel 2.5a Reductiefactoren voor lucht ($T \neq 30°C$) en grond ($T \neq 20°C$)

temperatuur [°C]	lucht				grond	
	PVC	XLPE en EPR	mineraal[1)]		PVC[2)]	XLPE en EPR[2)]
			aanraakbaar met of zonder PVC-mantel, 70°C	niet aanraakbaar zonder PVC-mantel, 105°C		
10	1,22	1,15	1,26	1,14	1,10	1,07
15	1,17	1,12	1,20	1,11	1,05	1,04
20	1,12	1,08	1,14	1,07	1,00	1,00
25	1,06	1,04	1,07	1,04	0,95	0,96
30	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89	0,93
35	0,94	0,96	0,93	0,96	0,84	0,89
40	0,87	0,91	0,85	0,92	0,77	0,85
45	0,79	0,87	0,78	0,88	0,71	0,80
50	0,71	0,82	0,67	0,84	0,63	0,76
55	0,61	0,76	0,57	0,80	0,55	0,71
60	0,50	0,71	0,45	0,75	0,45	0,65
65	–	0,65	–	0,70	–	0,60
70	–	0,58	–	0,65	–	0,53
75	–	0,50	–	0,60	–	0,46
80	–	0,41	–	0,54	–	0,38
85	–	–	–	0,47	–	–
90	–	–	–	0,40	–	–
95	–	–	–	0,32	–	–

[1)] Bij hogere omgevingstemperaturen, raadpleeg de leverancier.
[2)] Waarden zijn van toepassing op kabels in kokers aangebracht in de grond en op kabels aangebracht direct in de grond.

Tabel 2.5b Reductiefactoren voor grond met een warmteweerstandscoëfficiënt $\neq 2$ [mK/W]

	warmteweerstandscoëfficiënt [mK/W]						
	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
kabel in koker	1,28	1,20	1,18	1,10	1,05	1,00	0,96
kabel direct in de grond	1,88	1,62	1,50	1,28	1,12	1,00	0,90

Deze reductiefactoren zijn gemiddelde waarden (afwijking ±5%) die betrekking hebben op alle afmetingen van kabels en de installatiemethoden genoemd in de tabellen 24a tot met 2.4d.

Tabel 2.6a Reductiefactoren voor verzamelingen die bestaan uit meer dan één stroomketen of meer dan één meer-aderige kabel

configuratie (tegen elkaar gelegde leidingen)	aantal stroomketens of meer-aderige kabels												te gebruiken met gegevens uit tabellen
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20	
gebundeld: – in de lucht – op een oppervlak – verzonken of – omsloten	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	2.4a t/m 2.4f 2.4g en 2.4h kolom 2 t/m 4, 2.4i t/m 2.4l kolom 2 t/m 6
enkele laag op wand, vloer of ongeperforeerde kabelbaan	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68	0,68	2.4a t/m 2.4d kolom 6, 2.4e en 2.4f
enkele laag aangebracht tegen een houten plafond	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,59	0,58	0,57	
enkele laag op een geperfo-reerde kabelbaan horizontaal of verticaal aangebracht	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72	0,70	0,69	0,68	2.4g en 2.4h kolom 2 t/m 4, 2.4i t/m 2.4l kolom 2 t/m 5
enkele laag op een ladderbaan of in klampen enz.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	

Deze reductiefactoren gelden voor verzamelingen bestaande uit identieke en gelijkbelaste kabels. Als de horizontale afstand tussen twee naast elkaar liggende kabels groter is dan twee maal de uitwendige middellijn hoeft geen reductiefactor te worden toegepast. Dezelfde reductiefactoren gelden voor groepen met twee of drie één-aderige kabels. Als een verzameling bestaat uit zowel twee- als drie-aderige kabels wordt het totale aantal kabels gelijk gesteld aan het totale aantal stroomketens. De hierbij behorende reductiefactor wordt dan toegepast op de waarden uit de tabellen voor twee belaste aders voor de twee-aderige kabels en op de waarden voor drie belaste aders voor de drie belaste kabels. Als een verzameling bestaat uit *n* één-aderige kabels mag deze worden behandeld als een verzameling van *n*/2 stroomketens met twee belaste aders of *n*/3 stroomketens met drie belaste aders. De vermelde zijn gemiddelde waarden die betrekking hebben op alle kerndoorsneden en de installatiemethoden genoemd in de tabellen 2.4a t/m 2.4l. De nauwkeurigheid van de reductiefactoren bedraagt ±5%. Voor sommige installaties en voor installatiemethoden waarin deze tabel niet voorziet, kan het wenselijk zijn reductiefactoren toe te passen die speciaal zijn berekend (zie bijbehorende tabellen 2.6e en 2.6f).

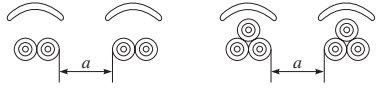
Tabel 2.6b Reductiefactoren voor meer dan één stroomketen met direct in de grond gelegde kabels

aantal stroomketens	afstand *a* tussen stroomketens				
	geen (tegen elkaar)	één kabel-middellijn	12,5 cm	25 cm	50 cm
2	0,75	0,79	0,84	0,87	0,90
3	0,64	0,68	0,75	0,80	0,86
4	0,57	0,62	0,69	0,75	0,82
5	0,52	0,57	0,65	0,72	0,80
6	0,48	0,53	0,62	0,69	0,78
7	0,45	0,51	0,59	0,67	0,76
8	0,43	0,48	0,57	0,65	0,75
9	0,41	0,46	0,55	0,63	0,74
12	0,36	0,42	0,51	0,59	0,71
16	0,32	0,38	0,47	0,56	0,68
20	0,29	0,35	0,44	0,53	0,66

De vermelde reductiefactoren gelden bij een sleufdiepte van 0,70m en een warmteweerstands-coëfficiënt van de grond van 2,5 [mK/W]. Het zijn gemiddel-de waarden die betrekking hebben op alle kerndoorsneden en typen van kabels vermeld in tabellen 2.4a t/m 2.4d, kolom 7.

Meeraderige kabels

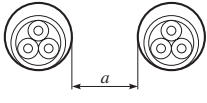
Eénaderige kabels



Tabel 2.6c Reductiefactoren voor meer dan één stroomketen met één kabel per in de grond gelegde koker (één meer-aderige kabel per koker)

aantal kokers	afstand *a* tussen kokers			
	geen (kokers raken elkaar)	25 cm	50 cm	100 cm
2	0,85	0,91	0,94	0,96
3	0,76	0,86	0,89	0,93
4	0,70	0,82	0,86	0,92
5	0,65	0,80	0,84	0,90
6	0,61	0,78	0,82	0,89
7	0,57	0,76	0,80	0,88
8	0,54	0,74	0,78	0,88
9	0,52	0,73	0,77	0,87
10	0,49	0,72	0,76	0,86
11	0,47	0,70	0,75	0,86
12	0,45	0,69	0,74	0,85
13	0,44	0,68	0,73	0,85
14	0,42	0,68	0,72	0,84
15	0,41	0,67	0,72	0,84
16	0,39	0,66	0,71	0,83
17	0,38	0,65	0,70	0,83
18	0,37	0,65	0,70	0,83
19	0,35	0,64	0,69	0,82
20	0,34	0,63	0,68	0,82

De vermelde reductiefactoren gelden bij een sleufdiepte van 0,70 m en een warmteweerstands-coëfficiënt van de grond van 2,5 [mK/W]. Het zijn gemiddelde waarden die betrekking hebben op alle kerndoorsneden en typen van kabels vermeld in tabellen 2.4a t/m 2.4d, kolom 7.

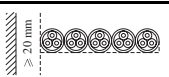
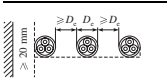
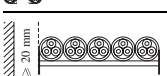
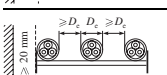


Tabel 2.6d Reductiefactoren voor meer dan één stroomketen met één kabel per in de grond gelegde koker (één één-aderige kabel per koker)

aantal kokers	afstand *a* tussen kokers			
	geen (kokers raken elkaar)	25 cm	50 cm	100 cm
2	0,82	0,88	0,91	0,95
3	0,72	0,81	0,86	0,92
4	0,66	0,76	0,82	0,91
5	0,61	0,72	0,80	0,89
6	0,57	0,68	0,78	0,88
7	0,53	0,66	0,76	0,87
8	0,50	0,63	0,74	0,87
9	0,47	0,61	0,73	0,86
10	0,45	0,59	0,72	0,85
11	0,43	0,57	0,70	0,85
12	0,41	0,56	0,69	0,84
13	0,39	0,54	0,68	0,84
14	0,37	0,53	0,68	0,83
15	0,35	0,52	0,67	0,83
16	0,34	0,51	0,66	0,83
17	0,33	0,50	0,65	0,82
18	0,31	0,49	0,65	0,82
19	0,30	0,48	0,64	0,82
20	0,29	0,47	0,63	0,81

De vermelde reductiefactoren gelden bij een sleufdiepte van 0,70 m en een warmteweerstandscoëfficiënt van de grond van 2,5 [mK/W]. Het zijn gemiddelde waarden die betrekking hebben op alle kerndoorsneden en typen van kabels vermeld in tabellen 2.4a t/m 2.4d, kolom 7.

Tabel 2.6e Reductiefactoren voor verzamelingen die bestaan uit meer dan één meer-aderige kabels in de vrije lucht

		aantal kabel-banen	aantal kabels											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20
geperforeerde kabelbaan[1] (tabel 2.2, nr. 15)	 kabels tegen elkaar	1	1,00	0,88	0,82	0,79	0,78	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,71
		2	1,00	0,87	0,80	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,68	0,64	0,60	0,55
		3	1,00	0,86	0,79	0,76	0,74	0,71	0,69	0,68	0,66	0,61	0,55	0,50
	 kabels op afstand ≥ D_e	1	1,00	1,00	0,98	0,95	0,93	0,91	0,89	0,88	0,86	0,83	0,80	0,78
		2	1,00	0,99	0,96	0,92	0,90	0,87	0,85	0,83	0,81	0,78	0,74	0,71
		3	1,00	0,98	0,95	0,91	0,88	0,85	0,82	0,80	0,78	0,72	0,66	0,62
geperforeerde kabelbaan (verticaal)[2] (tabel 2.2, nr. 15)	kabels tegen elkaar	1	1,00	0,88	0,82	0,78	0,76	0,73	0,73	0,72	0,72	0,70	0,69	0,68
		2	1,00	0,88	0,81	0,76	0,74	0,71	0,71	0,70	0,70	0,67	0,66	0,65
	kabels op afstand ≥ D_e	1	1,00	0,91	0,89	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86
		2	1,00	0,91	0,88	0,87	0,86	0,85	0,85	0,88	0,84	0,84	0,83	0,83
kabelladers kalmpen, enz.[1] (tabel 2.2, nr. 16, 17, 18)	 kabels tegen elkaar	1	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
		2	1,00	0,86	0,80	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,70	0,69
		3	1,00	0,85	0,79	0,76	0,75	0,73	0,72	0,71	0,70	0,68	0,66	0,64
	 kabels op afstand ≥ D_e	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		2	1,00	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		3	1,00	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,83	0,79

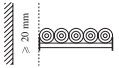
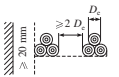
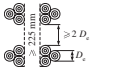
Noten, zie pag. G4/52.

[1] De reductiefactoren gelden slechts indien de verticale afstand tussen de kabelbanen ten minste 300 [mm] bedraagt en de horizontale afstand tussen kabelbanen en wand ten minste 20 [mm] is. Voor kleinere afstanden moeten kleinere reductiefactoren worden gekozen.

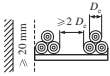
[2] De reductiefactoren gelden voor kabelbanen die rug aan rug zijn aangebracht met een onderlinge horizontale afstand die ten minste 225 [mm] bedraagt. Indien deze afstand minder is, moeten de reductiefactoren worden verminderd.

De vermelde reductiefactoren zijn gemiddelde waarden die betrekking hebben op alle kerndoorsneden en kabeltypen zoals genoemd in de tabellen 2.4g t/m 2.41. De nauwkeurigheid van de reductiefactoren bedraagt ±5%. De reductiefactoren gelden slechts voor verzamelingen van kabels de in één laag zijn aangebracht. Zij zijn niet van toepassing op kabels die zijn aangebracht in meer dan één laag waarbij de lagen elkaar raken.

Tabel 2.6f Reductiefactoren voor meer dan één stroomketen bestaande uit een verzameling één-aderige kabels[1)6)]

		aantal kabel banen	aantal driefase stroomketens[7)]			vermenigvuldigingsfactor voor;
			1	2	3	
geperforeerde kabelbaan[2)4)]	kabels tegen elkaar	1	0,98	0,91	0,87	drie kabels per stroomketen hor. aangebracht
		2	0,96	0,87	0,81	
		3	0,95	0,85	0,78	
geperforeerde kabelbaan (verticaal)[3)4)]	kabes tegen elkaar	1	0,96	0,86	–	drie kabels per stroomketen ver. aangebracht
		2	0,95	0,84	–	
Kabelladers, klampen, enz.[2)5)]	 kabels tegen elkaar	1	1,00	0,97	0,96	drie kabels per stroomketen hor. aangebracht
		2	0,98	0,93	0,89	
		3	0,97	0,90	0,86	
geperforeerde kabelbaan[2)4)]	 stroomketens op afstand ≥ $2 \cdot D_e$	1	1,00	0,98	0,96	drie kabels per stroomketen in driehoek aangebracht
		2	0,97	0,93	0,89	
		3	0,96	0,92	0,86	
geperforeerde kabelbaan (verticaal)[3)4)]	 kabelbanen op afstand, stroomketens op afstand ≥ $2 \cdot D_e$	1	1,00	0,91	0,89	
		2	1,00	0,90	0,86	

Tabel 2.6f (vervolg)

			aantal kabel-banen	aantal driefase stroomketens[7]			vermenig-vuldigings-factor voor;
				1	2	3	
kabelladers, klampen, enz.[2][5]		stroomke-tens op af-stand $\leq$ $2 \cdot D_e$	1 2 3	1,00 0,97 0,96	1,00 0,95 0,94	1,00 0,93 0,90	drie kabels per stroom-keten in driehoek aangebracht

[1] De vermelde reductiefactoren gelden niet voor kabels die zijn aangebracht in meer dan één laag waarbij de lagen elkaar raken.
[2] De reductiefactoren gelden slechts indien de verticale afstand tussen de kabelbanen ten minste 300 [mm] bedraagt en de horizontale afstand tussen kabelbanen en wand ten minste 20 [mm] is. Voor kleinere afstanden moeten kleinere reductiefactoren worden gekozen.
[3] De reductiefactoren gelden voor kabelbanen die rug aan rug zijn aangebracht met een onderlinge horizontale afstand die ten minste 225 [mm] bedraagt. Indien deze afstand minder is, moeten de reductiefactoren worden verminderd.
[4] Installatiemethode tabel 2.2, nr. 15.
[5] Installatiemethode tabel 2.2, nr. 16, 17, 18.
[6] De berekeing is gebaseerd op de toelaatbare stroom voor één stroomketen bestaande uit een verzameling één-aderige kabels in de vrije lucht.
[7] Als in een stroomketen *n* kabels per fase parallel worden gebruikt, moet de stroomketen worden gezien als een verzameling van *n* ketens die elk bestaan uit drie één-aderige kabels.

De vermelde reductiefactoren zijn gemiddelde waarden die betrekking hebben op alle kerndoorsneden en kabeltypen zoals genoemd in de tabellen 2.4g t/m 2.41. De nauwkeurigheid van de reductiefactoren bedraagt $\pm$ 5%.

Tabel 2.7 Reductiefactoren voor hogere harmonischen in vier- of vijf aderige kabels

aandeel 3e harmonische in fasestroom	reductiefactor	
	kerndoorsnede gebaseerd op fasestroom	kerndoorsnede gebaseerd op nulstroom
0–15	1	–
15–33	0,86	–
33–45	–	0,86
>45	–	1

Tabel 2.8a Maximale lengte [m] *van tegen kortsluiting beveiligde meer–aderigde leidingen*

A [mm^2]	nominale stroom [A] van gG-smeltpatronen											
	2	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80
1,5	647	320	209	122	76	59[3]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
2,5	[1]	525	345	206	134	108	80	54[3]	[2]	[2]	[2]	[2]
4	[1]	845	557	334	220	180	137	97	73	51[3]	[2]	[2]
6	[1]	[1]	835	502	332	273	209	151	117	86	63[3]	[2]
10	[1]	[1]		847	562	462	356	260	204	153	117	85
16	[1]	[1]	[1]	[1]	895	737	569	416	328	248	192	142
25	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	901	660	521	395	308	230
35	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	917	723	549	428	322
50	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	980	745	581	437
70	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	840	632
95	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	878

– Het isolatiemateriaal bestaat uit XLPE, EPR of PVC.
– Tabelwaarden gelden voor koper. Voor leidingen met kernen van aluminium moet de in de tabel aangegeven lengte zijn vermenigvuldigd met een factor 0,40.
– Kortsluiting tussen een fase en de nulleiding (5 s).
– Een vermenigvuldigingsfactor 1,73 mag worden toegepast bij het bepalen van de maximale lengte van tegen kortsluiting beveiligde leidingen van driefasenstroomketens zonder nul met een spanning van 400 [V] tussen de fasen indien kortsluiting tussen fase-beschermingsleiding of fase-aarde niet mogelijk is. Dit geldt voor stroomstelsels in ster- of in driehoekschakeling.
– Voor de maximale lengte van tegen kortsluiting beveiligde leidingen van driefasen stroomketens met nul met een spanning 230/400 [V] en een kleinere doorsnede van de nul overeenkomstig geldt een vermenigvuldigingsfactor 0,67.
– Spanning tussen fase en nul (U_0) is 230 [V].
– Tabelwaarden gelden voor koper. Voor leidingen met kernen van aluminium moet de in de tabel aangegeven lengte zijn vermenigvuldigd met een factor 0,40.

Tabel 2.8a (vervolg)

A [mm^2]	nominale stroom [A] van gG-smeltpatronen											
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
10	57[3]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
16	101	79	55[3]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
25	167	133	97	70	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
35	234	189	140	103	74	51[3]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
50	319	258	193	145	107	77	55[3]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
70	462	374	281	212	159	116	87	61[3]	[2]	[2]	[2]	[2]
95	643	521	391	296	223	165	126	91	63[3]	[2]	[2]	[2]
120	812	658	495	375	283	211	161	118	84	56[3]	[2]	[2]
150	871	707	531	403	305	227	175	129	94	65	43[3]	[2]
185	[1]	848	638	484	366	274	211	156	114	81	56	[2]
240	[1]	[1]	805	611	463	246	268	199	147	105	74	50[3]
300	[1]	[1]	971	738	559	418	324	241	178	128	92	65
400	[1]	[1]	[1]	876	664	497	385	287	213	154	112	80
500	[1]	[1]	[1]	[1]	823	617	478	357	265	192	141	101
630	[1]	[1]	[1]	[1]	965	724	560	418	311	226	166	120
800	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	847	656	490	365	265	195	142
1000	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	780	583	434	316	232	169

[1] Lengte > 1000 m, de waarde is niet opgenomen in deze tabel. Dit geldt ook voor grotere doorsneden die niet in de tabel zijn opgenomen.
[2] De lengte wordt overbelast omdat $i^2 \cdot t > k^2 \cdot A^2$.
[3] Deze waarden zijn niet toepasbaar voor leidingen met isolatie van PVC omdat de leidingen worden overbelast.

Tabel 2.8b Maximale lengte [m] *van tegen kortsluiting beveiligde meer–aderigde leidingen*

A [mm^2]	nominale stroom [A] van installatieautomaten type B											
	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
1,5	199	119	74	59	47	37	29	23	18	14	11	8[3]
2,5	342	195	122	97	78	61	48	39	30	24	19	15
4	521	313	195	156	125	98	78	62	49	39	31	24
6	781	468	293	234	187	146	117	94	74	58	47	37
10	[1]	788	493	394	315	246	197	158	125	98	79	63
16	[1]	[1]	784	627	502	392	314	251	199	157	125	100
25	[1]	[1]	[1]	992	794	620	496	397	315	248	198	159
35	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	860	688	551	437	344	275	220
50	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	932	745	592	466	373	298
70	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	854	673	538	431
95	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	934	747	598
120	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	943[1]	754
150	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	809 [1]
185	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	970 [1]

[1] lengte > 1000 m, de waarde is niet opgenomen in deze tabel. Dit geldt ook voor grotere doorsneden die niet in de tabel zijn opgenomen.
[2] De lengte wordt overbelast omdat $i^2 \cdot t > k^2 \cdot A^2$.
[3] Deze waarden zijn niet toepasbaar voor leidingen met isolatie van PVC omdat de leidingen worden overbelast.

– Het isolatiemateriaal bestaat uit XLPE, EPR of PVC.
– Tabelwaarden gelden voor koper kern. Voor aluminium kern moet de in de tabel aangegeven lengte zijn vermenigvuldigd met een factor 0,40.
– Kortsluiting tussen een fase en de nulleiding (0,1s) en tussen een fase en de beschermingsleiding (0,1s).
– Een vermenigvuldigingsfactor 1,73 mag worden toegepast bij het bepalen van de maximale lengte van tegen kortsluiting beveiligde leidingen van driefasenstroomketens zonder nul met een spanning van 400 [V] tussen de fasen indien kortsluiting tussen fase-beschermingsleiding of fase-aarde niet mogelijk is. Dit geldt voor stroomstelsels in ster- of in driehoekschakeling.
– Voor de maximale lengte van tegen kortsluiting beveiligde leidingen van driefasen stroomketens met nul met een spanning 230/400 [V] en een kleinere doorsnede van de nul overeenkomstig tabel 2.13 geldt een vermenigvuldigingsfactor 0,67.
– De beschermingsleiding heeft een doorsnede die gelijk is aan de doorsnede van de fase.
– Indien de beschemingsleiding een doorsnede heeft die de helft is van de doorsnede van de fase overeenkomstig tabel 2.10, moet de lengte zijn vermenigvuldigd met een factor 0,67.
– Spanning tussen fase en nul (U_0) is 230 [V] en de spanning tussen fase en beschermingsleiding is 230 [V].
– Voor installatieautomaten type C en D geldt een vermenigvuldigingsfactor van resp. 0,5 en 0,25.

Tabel 2.8c Maximale lengte [m] *van tegen aardsluiting beveiligde meer–aderige leidingen)*

A [mm^2]	nominale stroom [A] van gG-smeltpatronen											
	2	4	6	10	16	20	25	32	40	50	63	80
1,5	368	187	126	73	53	39	30	20	16[3]	[2]	[2]	[2]
2,5	601	305	207	120	88	65	51	35	30	19	14[3]	[2]
4	966	490	333	193	142	105	84	58	49	33	26	16[3]
6	[1]	734	498	289	213	158	126	88	75	51	41	26
10	[1]	[1]	838	486	358	266	213	148	127	87	70	47
16	[1]	[1]	[1]	774	570	424	339	236	202	139	112	76
25	[1]	[1]	[1]	[1]	902	670	536	374	320	220	178	120
35	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	930	744	519	444	306	248	167
50	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	703	601	414	336	227
70	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	868	598	485	328
95	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	830[1]	673	456
120	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	849 [1]	575
150	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	911 [1]	617
185	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	740 [1]
240	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	933 [1]

– Het isolatiemateriaal bestaat uit XLPE, EPR of PVC
– Tabelwaarden gelden voor koper. Voor leidingen met kernen van aluminium moet de in de tabel aangegeven lengte zijn vermenigvuldigd met een factor 0,40.
– Spanning tussen fase en beschermingsleiding is 230 [V].
– Aardsluiting tussen een fase en de beschermingsleiding (0,4s). De beschermingsleiding heeft een doorsnede die gelijk is aan de doorsnede van de fase. Indien de beschermingleiding een doorsede heeft die de helft is van de doorsnede van de fase overeenkomstig tabel 2.10 moet de lengte zijn vermenigvuldigd met een factor 0,67.

Tabel 2.8c (vervolg)

A [mm^2]	nominale stroom [A] van gG-smeltpatronen											
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
6	20	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
10	36	25	21	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
16	59	42	35	22	18[3]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
25	94	68	57	37	31	21	15[3]	[2]	[2]	[2]	[2]	[2]
35	131	94	80	53	45	31	23	16[3]	[2]	[2]	[2]	[2]
50	177	128	109	72	61	44	32	24	17[3]	[2]	[2]	[2]
70	256	185	158	106	89	64	48	36	26	17[3]	[2]	[2]
95	356	257	220	146	124	89	67	50	38	25	20	[2]
120	449	325	277	185	157	113	85	64	49	33	27	17[3]
150	482	349	297	198	168	122	91	69	53	36	30	19
185	578	418	357	238	202	146	110	83	64	44	36	24
240	729	528	450	300	255	184	139	105	80	56	46	31
300	879	637	543	362	308	222	168	127	97	68	56	37
400	[1]	756	645	430	365	264	199	151	116	81	67	45
500	[1]	937	799	533	453	327	247	187	144	100	84	56
630	[1]	[1]	937	625	531	384	290	220	168	118	98	66
800	[1]	[1]	[1]	731	622	449	339	257	197	138	115	77
1000	[1]	[1]	[1]	869	738	534	403	305	234	164	137	92

[1] Lengte > 1000 [m], de waarde is niet opgenomen in deze tabel. Dit geldt ook voor grotere doorsneden die niet in de tabel zijn opgenomen.
[2] De lengte wordt overbelast omdat $i^2 \cdot t > k^2 \cdot A^2$.
[3] Deze waarden zijn niet toepasbaar voor leidingen met isolatie van PVC omdat de leidingen worden overbelast.

Tabel 2.9 Minimale kerndoorsnede van leidingen

type leidingsysteem		toepassing	draden en aders	
			materiaal	$\varnothing_{kern}$ [mm^2]
vaste installatie	geïsoleerde leidingen	vermogens- en verlichtingsketens	Cu	1,5
			Al	2,5[1)]
		signalerings- en besturingsketens	Cu	0,5[2)]
	ongeïsoleerde leidingen	vermogensketens	Cu	10
			Al	16
		signalerings-en besturingsketens	Cu	4
installaties met buigzame geïsoleerde leidingen		voor een specifiek toestel	Cu	zoals gespecificeerd in de relevante norm
		voor andere toepassingen		0,75[3)]
		ELV-ketens voor bijzonder toepassingen		0,75[4)]

[1)] Klemmen die worden gebruikt voor aansluitingen van aluminium geleiders moeten voor deze specifieke toepassingen beproefd en goedgekeurd.
[2)] Voor signalerings- en besturingsketens bedoeld voor elektronische uitrusting is een minimale kerndoorsnede van 0,1 [mm^2] toegelaten.
[3)] Voor buigzame meer-aderige kabels met zeven of meer aders is noot 2) van toepassing.
[3)] Aanvullende bepalingen voor ELV-verlichtingsketens zijn in bewerking.

Tabel 2.10 Verband tussen de nominale kerndoorsnede A van fase- of poolleiding en $A_{PE_{min}}$ van de bijbehorende bescher mingsleidingen

A [mm^2]	$A_{PE_{min}}$ [mm^2]
$A \leq 16$	A
$16 < A \leq 35$	16
$A > 35$	$0{,}5 \cdot A$

Tabel 2.11a Toelaatbare stroom [A] *voor buigzame leidingen*[1)]

kerndoorsnede[2)] [mm^2]	isolatiemateriaal rubber aantal belaste aders		isolatiemateriaal PVC aantal belaste aders	
	2	3	4	5
0,75	6	6	6	6
1	10	10	10	10
1,5	16	16	16	16
2,5	25	20	25	20
4	32	25	32	25
6	40	–	–	–
10	63	–	–	–

[1)] Omgevingstemperatuur is 30°C. Correctiefactor afwijkende temperaturen, zie tabel 2.12.
[2)] Kernmateriaal is koper. Hoogst toelaatbare kerntemperatuur voor rubber is 60°C en voor PVC 70°C.

Tabel 2.11b Toelaatbare stroom [A] *voor zware buigzame leidingen met rubber isolatiemateriaal*[1)]

kerndoor-snede[2)] [mm^2]	één-aderige leiding aantal belaste aders		meer-aderige leiding aantal belaste aders	
	2	3	4	5
4	34	30	34	29
6	43	38	43	36
10	60	53	60	51
16	79	71	79	67
25	104	94	105	89
35	129	117	135	110
50	162	148	169	138
70	202	185	211	172
95	240	222	250	204
120	280	260	292	238
150	321	300	335	273
185	363	341	378	309
240	433	407	447	365
300	497	468	509	415
400	586	533	–	–
500	670	634	–	–
630	784	742	–	–

[1)] Omgevingstemperatuur is 30°C. Correctiefactor afwijkende temperaturen, zie tabel 2.12.
[2)] Kernmateriaal is koper. Hoogst toelaatbare kerntemperatuur voor rubber is 60°C.

Tabel 2.11c Toelaatbare stroom [A] *voor hulpstroomleidingen voor basisinstallatiemethoden B1, B2, C, D en E*

aantal belaste aders	aangebracht in buis tegen wand[1)]						één of meer-aderige kabel aangebracht tegen houten wand[1)]				meer-aderige kabel in vrije lucht[1)]				meer-aderige kabel in kokers aangebracht in de grond[2)]			
	installatiedraad		meer-aderige kabel															
	PVC		PVC		XLPE		PVC		XLPE		PVC		XLPE		PVC		XLPE	
	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]	$\varnothing_k$[3)]	[mm²]
	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5
2	17,5	24	16,5	23	22	30	19,5	27	24	33	22	30	26	36	22	39	26	34
3	15	20	14	19	18	25	17	23	20	28	19	25	22	30	18	24	22	29
4	13	18	13	17	23	15	20	18	25	17	23	20	27	27	17	22	20	26
5	12	17	12	16	15	21	14	19	17	23	15	21	18	25	15	20	18	24
6	11	15	11	15	14	19	13	17	15	21	14	19	17	23	14	19	17	22
7	11	14	10	14	13	18	12	15	14	20	13	18	16	22	13	18	16	21
12	9	12	8	11	11	15	10	14	12	16	11	15	13	18	11	14	13	17
18	7	10	7	10	9	13	8	12	10	14	9	13	11	15	9	12	11	14
27	6	9	6	8	8	11	7	10	9	12	8	11	9	13	8	10	9	12
36	6	8	5	7	7	10	6	9	8	11	7	10	8	12	7	9	8	11
48	5	7	5	7	6	9	6	8	7	9	6	9	7	10	6	8	7	10
60	5	6	4	6	6	8	5	7	6	9	6	8	7	9	6	8	7	9

[1)] Omgevingstemperatuur 30°C. Voor reductiefactoren voor afwijkende omgevingstemperaturen, zie tabel 2.5a (lucht). Reductiefactoren voor meer leidingen bij elkaar zie tabel 2.6a en 2.6e.

[2)] Grondtemperatuur 20°C. Voor reductiefactoren voor afwijkende temperaturen van de grond en afwijkende warmteweerstandcoëfficiënt zie tabel 2.5a (grond) en tabel 2.5b. Reductiefactoren voor meer leidingen bij elkaar zie tabel 2.6a, 2.6b, 2.6e en 2.6f.

[3)] $\varnothing_k$ = kerndoorsnede. Hoogst toelaatbare kerntemperatuur 70°C voor PVC en 90°C voor XLPE.

Tabel 2.11d Toelaatbare stroom [A] *voor buigzame hulpstroom leidingen*[1)]

aantal belaste aders	rubber of PVC			
	$\varnothing_{kern}$[2)] [mm^2]			
	0,75	1	1,5	2,5
2	6	10	16	25
3	5	9	14	22
4	5	8	13	20
5	4	7	12	18
6	4	7	11	17
7	4	6	10	16
12	3	5	9	13
18	3	5	7	11
27	2	4	6	10
36	2	4	6	9
48	2	3	5	8
60	2	3	5	7

[1)] Omgevingstemperatuur is 30°C. Voor reductiefactoren voor afwijkende temperaturen zie tabel 2.12.

[2)] Kernmateriaal is koper. Hoogst toelaatbare kerntemperatuur 60°C voor rubber en 70°C voor PVC.

Tabel 2.12 Reductiefactoren voor buigzame leidingen voor andere omgevingstemperaturen van lucht dan 30°C

$T_{omgeving}$ °C	factor	$T_{omgeving}$ °C	factor
15	1,22	40	0,82
20	1,15	45	0,71
25	1,08	50	0,58
30	1,00	55	0,41
35	0,91		

Tabel 2.13 Minimumwaarde voor de nominale kerndoorsnede A_N [mm^2] van de nul

fase of pool A [mm^2]	kernmateriaal van fase of pool–nul		
	Cu–Cu	Al–Al	Al–Cu
≤16	*A*	*A*	*A*
25	16	25	16
35	25	25	16
50	25	25	25
70	35	35	25
95	50	50	35
120	70	70	50
150	95	95	50
185	95	95	70
240	120	120	95
300	150	150	120
400	185	185	150

Tabel 2.14 Verband tussen I_B [A], I_z [A], en I_n [A][1)]

als I_B kleiner dan of gelijk aan de hieronder vermelde I_n	moet I_z groter of gelijk zijn aan	
	vlg. NEN 3241	gG-patronen vlg. NEN 10269
2	2,90	2,90
4	5,70	5,79
6	7,86	7,86
8	–	10,5
10	13,1	13,1
12	–	15,7
16	19,3	17,7
20	24,1	22,1
25	30,2	27,6
32	–	35,3
35	38,6	–
40	–	44,1
50	55,2	55,2
63	69,5	69,5
80	88,3	88,3
100	110	110
125	138	138
160	177	177
200	221	221
250	–	276
315	–	348
400	–	441
500	–	552
630	–	695
800	–	883
1000	–	1103
1250	–	1379

[1)] I_n is de ontwerpstroom van een stroomketen, I_z is de toelaatbare stroom van de leiding en I_n is de nominale stroom van de smeltpatroon.

3 Installatietechniek

3.1 Voorschriften

De eisen, waaraan elektrische sterkstroominstallaties moeten voldoen, zijn vastgelegd in verschillende publikaties, waarvan heironder de belangrijkste worden genoemd. In de normen is *uitgebreide* informatie opgenomen. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* te Delft.

NEN 1010. Veiligheidsbepalingen voor laagspanningsinstallaties, vijfde druk, bestaand uit de volgende delen:
- Deel 0–Voorwoord en introductie.
- Deel 1–Onderwerp, toepassingsgebied en fundamentele uitgangspunten.
- Deel 2–Termen en definities.
- Deel 3–Algemene kenmerken.
- Deel 4–Beschermingsmaatregelen.
- Deel 5–Keuze en installatie van elektrisch materieel.
- Deel 6–Inspectie (in voorbereiding, zal naar verwachting eind 1997 verschijnen, tegelijk met de derde druk van NEN 3140).
- Deel 7–Aanvullende en bijzondere bepalingen.
- Deel 8–Aanvullende Nederlandse bepalingen (in gedeelten opgenomen in NEN 1010-2, NEN 1010-4 en NEN 1010-5).

NEN 1014. Bliksemafleiderinstallaties.
NEN 1041. Veiligheidsbepalingen voor hoogspanningsinstallaties.
NEN 3111. Veiligheidsbepalingen voor neonbuisketens van neoninstallaties en neontoestellen.
NEN 3134. Veiligheidseisen voor laagspanningsinstallaties in medisch gebruikte ruimten.
NEN 3140. Laagspanningsinstallaties. Bepalingen voor veilige werkzaamheden, inspectie en onderhoud.
NEN 3410. Veiligheidsbepalingen voor hoog- en laagspanningsinstallaties in ruimten met gasontploffingsgevaar.

3.2 Leidingsoorten

Sterkstroomleidingen kunnen worden aangeduid met letters en cijfers. Dit wordt uitvoerig behandeld in NEN 3207.
De volgende punten zijn bepalend voor de leidingsoort.

I Het **leidingtype**, onderscheiden in 4 hoofdgroepen:
- D = draad (geïsoleerde draad: D; ornamentdraad: OD)
- K = kabel (Met metalen mantel: aluminium AK; koper KK; lood LK; ander metaal XK.
  Met niet-metalen mantel: polychloropreen: McK; polyetheen: MeK; silicoonrubber: MqK; rubber: MrK; vinyl: MvK; ander materiaal, geen metaal zijnde: MxK)
- L = leiding (mantelleiding: McL, MeL, enz. als bij kabel met niet-metalen mantel)
- S = snoer (dunne buigzame geïsoleerde draad: S; mantelsnoer: McS, MeS, enz. zie leiding; tweelingsnoer TS; koperbandsnoer FS).

II Het **materiaal van de aderisolatie**
A: anorganisch; B: butyl; E: polyetheen; L: lakband; P: gedrenkt papier; Q: silicoonrubber; R: rubber; V: vinyl; Y: ander isolatiemateriaal.

III Eventuele **omhulsels** (geen mantel), o.a. B: bekleding van vezelstof; G: gepantserd met dik metaalband of -draad; O: omvlechting van dun metaaldraad; S: omwikkeling van dun metaalband; V: bekleding van vinyl.

IV **Constructieve bijzonderheden**, zoals t: bestand tegen hoge temperatuur; o: met oliewerende mantel; h: met hulpader(s); as: met aardingsscherm; z: met zware mantel of van zware constructie.

V De **nominale toelaatbare spanning** (U) tot en met 3000 V opgegeven door U. Daarboven door U_0/U, waarin: U_0 = spanning tussen kernen en mantel.

VI Het **aantal en de doorsnede van de aders** en eventuele aardleiding. Tevens bijzonderheden zoals a: blanke aardleiding; gg: groen/gele aardleiding.

VII Het **materiaal, de vorm en de samenstelling van de ader(s)**, het materiaal is alleen op te geven als het geen koper is, bijv. Al: aluminium.
Aanduidingen voor de *vorm* r: rond; sv: sectorvorming; ov: ovaal.
Aanduidingen voor de *samenstelling* m: massief; s: samengeslagen; ss: idem met meer draden dan s; b: buigzaam; bb: bijzonder buigzaam.

VIII De **Nederlandse norm** (NEN. . .) waarin de bedoelde leiding is omschreven.

De volledige aanduiding van de leidingsoort bestaat uit de bovengenoemde delen (voor zover nodig) en in de volgorde van links naar rechts: III–II–I–IV–VI–VII–VIII.

Halogeenvrije kabels

Polyvinylchloride (PVC) als aderisolatie en ook als ommanteling van kabels bevat halogeenhoudende materialen die bij brand vertragend werken. Hierbij komen echter schadelijke gassen vrij. Voor deze gevallen bijv. bij Off-Shore en marine-toepassingen zijn er mantelkabels ontwikkeld van *halogeenvrij* acrylrubber die in hoge mate zelfdovend zijn en bij verbranding zeer weinig schadelijke gassen vrijgeven.

Normalisatie

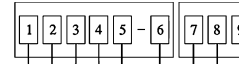
NEN 3621. Leidingen met aderisolatie met polyvinylchloride en een nominale spanning tot en met 450/750 V.

NEN 3622. Leidingen met aderisolatie van rubber en een nominale spanning tot en met 450/750 V.

NEN 3172. Papierloodkabels voor sterkstroom. Constructie en keuring.

Behalve het Nederlandse coderingssysteem volgens NEN 3207, hebben andere landen hun eigen coderingssystemen. Om aan deze verwarrende situatie een einde te maken heeft het CENELEC een universeel coderingssysteem voor leidingen uitgewerkt.

Codering volgens CENELEC



Aanduiding van het type
- H = geharmoniseerd leidingtype
- A = erkend nationaal type door CENELEC
- NL-N = leiding volgens nationale norm

2 *Nominale spanning*
- 00 = $U_0/U \leqslant 100/100$ V
- 01 = $U_0/U \geqslant 100/100 < 300/300$ V
- 03 = $U_0/U = 300/300$ V
- 05 = $U_0/U = 300/500$ V
- 07 = $U_0/U = 450/750$ V

Constructie van de leiding

3 *Isolatiemateriaal*
- V = PVC (Polyvinylchloride)
- R = Gevulcaniseerde natuurrubber
- B = EPR (Etheenpropeenrubber)
- S = Siliconrubber
- X = XLPE (Gevulcaniseerde polyetheen)
- G = EVA (Etheenvinylacetaat)

4 *Mantel-Bekleding/Omvlechting Materiaal*
- V = PVC (Polyvinylchloride)
- R = Rubber
- B = EPR 90°C (Etheenpropeenrubber)
- N = Neopreen (Polychloropreen)
- Q = PUR (Polyurethaan)
- J = Omvlechting van glasgaren
- T = Omvlechting van textiel

5 *Bijzonderheden over de constructie*
- D3 = Uitvoering met een element dat trekkracht kan opnemen
- D5 = met opvulhart; niet bedoeld om trekkrachten op te vangen
- H = platte leiding; aders zijn verbonden aan elkaar, maar gemakkelijk te scheiden (bijv. tweelingsnoer)
- H2 = platte leiding; aders niet verbonden, maar tezamen omgeven door een mantel

6 *Soort geleider*
- –U = ronde massieve kern
- –R = ronde kern, opgebouwd uit meer draden, (niet buigzaam)
- –K = buigzame kern, leiding bestemd voor vaste installatie
- –F = kern van een buigzame leiding (IEC publicatie 228, klasse 5)
- –H = kern van een bijzonder buigzame leiding (IEC publicatie 228, klasse 6)

Opbouw van de geleider

7 Aantal adres

8 G = één ader is groen/geel gekleurd (beschermingsleiding)
X = er is geen groen/gele ader in de leiding

9 Doorsnede van de geleider(s) [mm]

3.3 Draad- en aderkleuren sterkstroomleidingen

Sinds juli 1970 zijn de hieronder genoemde kleuren voorgeschreven. De kleuren van vóór 1970 zijn tussen haakjes vermeld.

Voor geïsoleerde draden en aders:

- **Groen-geel** (grijs of wit) : voor PE-, PU- PEN- en aardleidingen
- **Lichtblauw** (rood) : voor de nul.
- **Bruin** (groen) : voor fase-draden en -aders.
- **Zwart** (zwart) : voor schakel-draden en -aders, alsmede voor fase-aders.

Bij hulpstroomleidingen mogen de kleuren ook als volgt zijn (geldt niet voor tweelingsnoeren en bandsnoeren):

- groen-geel : voor PE- en PU-leidingen.
- zwart met doorlopende nummering
- één enkele kleur, mits niet geel, groen of lichtblauw

} voor overige aders.

Meeraderige leiding wordt alleen in bepaalde kleuren-combinaties samengesteld (zie tabel 3.1). Voor toelichting en toepassing van deze leidingen kan de NEN 1010 worden geraadpleegd.

Tabel 3.1 Aderkleuren[1] bij kabel of verplaatsbare leiding met aderisolatie van rubber of vinyl

aantal aders	met aardader					zonder aardader				
1	gngl		lbl		ok					
2	–					zw	lbl[2]			
3	gngl	zw	lbl[3]			zw	lbl	br		
4	gngl	zw	lbl	br		zw	lbl	br	zw	
5	gngl	zw	lbl	br	zw	zw	lbl	br	zw	zw
meer dan 5	één ader gngl overige aders zw + getal (volgnummer 1, 2, enz. van binnen naar buiten					alle aders zw + getal (volgnummer 1, 2, enz. van binnen naar buiten				
	voor leidingen met aderisolatie van rubber is bovendien toegestaan: buitenste krans: – één ader gngl – één ader lbl – overige aders ek overige kransen: – één ader br – overige aders ek					buitenste krans: – één ader lbl – één ader br – overige aders ek overige kransen: – één ader br – overige aders ek				

[1] gngl = groen/geel
lbl = lichtblauw
ok = overige kleuren, voorlopig alleen zwart en bruin
zw = zwart
br = bruin
ek = eenzelfde kleur voor al deze aders, mits niet groen/geel, lichtblauw of bruin.

[2] Geldt niet voor tweelingsnoer.

[3] Uitgezonderd verplaatsbare leiding; daarvoor geldt gngl—br—lbl.

3.4 Aantal draden per buis, aansluitingen en voorzieningen

Tabel 3.2 Maximaal aantal draden (VD 750) dat in PVC-installatiebuis (volgens NEN 3174) mag worden aangebracht; voor flexibele buis (volgens NEN 3530) gelden de getallen tussen ( )[1)]

A [mm^2]	maximale vulfactor[2)]	buitenmiddellijn buis [mm]					
		16	19/20	25	32	38/40	50
1,5		5 (4)					
2,5		4 (3)	(5)				
4	33%	3 (2)	5 (4)				
6		2 (2)	4 (3)	5 (5)			
10			2	3 (3)	(5)		
16				3 (2)	5 (4)		
25				2	3 (3)	5	
35					2 (2)	4	
50	40%					3	5
70						2	4
95							3

[1)] Aantal bochten maximaal 2; bij meer bochten buismaat één trap hoger.

[2)] $\text{Vulfactor} = \dfrac{\text{som doorsneden draden (incl. isolatie)}}{\text{binnendoorsnede buis}} \times 100\%$

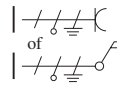
Voor 16 mm buis zijn o.a. de volgende *combinaties* VD toegestaan, met voor flexibele buis getallen tussen ( ):
- 3(3) × 2,5 mm^2 + 2(1) × 1,5 mm^2
- 2(2) × 2,5 mm^2 + 3(2) × 1,5 mm^2

Tabel 3.3 Minimum aantal wandcontactdozen voor algemeeen gebruik en lichtaansluitpunten voor woningen, woonwagens, woonschepen[1)]

ruimte[2)]			noot
verblijfsruimte			[3)]
vloeroppervlakte $\geqslant$ 20 m^2	1 per 7 m^2 of gedeelte daarvan	2	
vloeroppervlakte $<$ 20 m^2	ten minste 2 per verblijfsruimte	1	
extra voor een aanrecht	1		[4)]
toiletruimte		1	
badruimte			
zonder wastafel		1	[5)]
met wastafel vloeropp. $\leqslant$1,6 m^2		1	
met wastafel vloeropp. $>$ 1,6 m^2		2	[5)]
binnen gelegen verkeersruimte			
vloeroppervlakte $<$ 1,5 m^2		1	
vloeroppervlakte $\geqslant$1,5 m^2	1	1	
binnen berging			
vloeroppervlakte $\geqslant$1 m^2 en vrije hoogte $\geqslant$1,80 m	1	1	[6)]
buiten berging	1	1	[7)]
garage	1	1	[8)]
binnen gelegen vaste trap, zodanig dat de bovenste trede verlicht kan worden		1	[9)]
buitenlichtpunt		1	[10)]

[1)] Beschermingscontacten zijn buiten beschouwing gelaten.
[2)] Het vloeroppervlak is het netto-oppervlak waarboven het Bouwbesluit of de volgens deze tabel voorgeschreven hoogte aanwezig is.
[3)] Eén tweevoudige wandcontactdoos binnen het gedeelte van de verblijfsruimte waar zich een voorgeschreven aanrecht bevindt.
[4)] Nabij het aanrecht.
[5)] Waarvan één boven de wastafel.
[6)] Zoals bergkast, zolder, begaanbare vliering.
[7)] Niet vereist indien op een afstand $>$ 20 m gelegen vanaf dichtbijzijnde gevel. De wandcontactdoos is niet vereist indien de berging binnen het woongebouw is gelegen en binnen een afstand van 8 m een wandcontactdoos in een besloten gemeenschappelijke verkeersruimte, die toegang geeft tot de berging, aanwezig is: deze wandcontactdoos moet op een hoogte van tenminste 1,8 m boven de vloer zijn aangebracht.
[8)] Niet vereist, indien op een afstand $>$ 20 m gelegen vanaf dichtsbijzijnde gevel.
[9)] Met wisselschakeling, dit lichtpunt kan hetzelfde zijn als dat van de aan de bovenzijde van de vaste trap aangrenzende ruimte; de wisselschakeling voor het lichtpunt boven de trap is dan op het andere lichtpunt van toepassing.
[10)] Niet vereist ter plaatse van een vluchtweg.

Tabel 3.4 Voorzieningen voor elektrische toestellen

elektrisch toestel	plaats	voorziening	∅ buis [mm]	noot
kooktoestel	nabij de opstelplaats		19/20	1)
afzuigkap, verlichting of keukenmeubel	nabij de opstelplaats van het kooktoestel		16	2)
warmwatertoestel	nabij de opstelplaats		19/20	1) 3)
wasbehandelingstoestel	nabij de opstelplaats		16	
badkamerkachel	badruimte		16	2)
stooktoestel met elektrische voorzeining	nabij de opstelplaats		16	

1) Alleen bedraad indien gasinstallatie ontbreekt.
2) Tenminste 2 m boven de vloer.
3) Niet vereist indien gebruik wordt gemaakt van een collectieve warmwatervoorziening.

3.5 Beschermingsgraden (IP-aanduidingen)

Tabel 3.5 geeft de indeling van de beschermingsgraden voor omhulsels van elektrisch materieel volgens EN 60529. De aanduiding bestaat uit de letters IP (International Protection), meestal gevolgd door twee cijfers.

Tabel 3.5 Beschermingsgraad tegen uitwendige invloeden van voorwerpen en water

IP	bescherming	CEE-symbool	opmerking
voorwerpen			
0X	geen bescherming		
1X	$d > 50$ mm		hand
2X	$d > 12$ mm		vinger, aanrakingsveilig
3X	$d > 2{,}5$ mm		schroevendraaier
4X	$d > 1$ mm		draad
5X	stof		stofvrij
6X	stofdicht		stofdicht
water			
	beschermd tegen vaste voorwerpen groter dan:		
X0	geen bescherming		
X1	druppels		druipwaterdicht
X2	druppels bij schuine stand tot 15°		
X3	sproeien		regenwaterdicht
X4	spatten		spatwaterdicht
X5	stralen		spuitwaterdicht
X6	stort zeeën		
X7	onderdompeling		waterdicht, 1/2 uur op 1 m diepte
X8	onder water	m	drukwaterdicht, diepte en tijd nader overeen te komen

Betekenis additionele letter

Na de twee cijferposities wordt soms een letterpositie vermeld. Deze derde positie kan worden toegevoegd bij de volgende twee classificaties:

1. Als aanvulling op de eerste cijferpositie. De beschermingsgraad met deze toevoeging moet wel een toegevoegde waarde zijn, dat wil zeggen dat de totale beschermingsgraad hoger moet zijn dan zonder de additionele letter. In deze situatie kent de IP-klasse drie karakters, bijvoorbeeld IP 24C.
2. Als alleen een indicatie kan worden gegeven op basis van 'het mogelijke aanraken van een gevaarlijk onderdeel in het toestel' De eerste positie komt hlerbij te vervallen en wordt weergegeven door een 'X'

In onderstaande tabel zijn de mogelijkheden van een additionele letter weergegeven.

Tabel 3.6 Betekenis additionele letter

additionele letter	mate van bescherming
A	geen toegang met handpalm to gevaarlijke onderdelen in toestel
B	geen aanraking mogelijk met gevaarlijke onderdelen in toestel d.m.v. vinger (12 mm^2)
C	geen aanraking mogelijk met gevaarlijke onderdelen d.m.v. gereedschap (2,5 mm^2)
D	geen aanraking mogelijk met gevaarlijke onderdelen in toestel d.m.v. draad (1 mm^2)

Beschermingsklassen

Voor elektrisch materiaal is er een indeling in beschermingsklassen, zoals in tabel 3.7 is aangegeven.

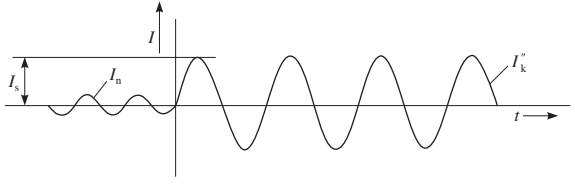
Tabel 3.7 Beschermingsklassen

toestellen	symbool	uitvoering
klasse 0[1)]		Alleen fundamentele isolatie, geen beschermingsleiding mogelijk.
klasse 01[1)]		Alleen functionele isolatie, mogelijkheid tot beschermingsleiding.
klasse I		Als klasse 0, echter uitgevoerd met beschermingsleiding.
klasse II		Voorzien van dubbele of versterkte isolatie. Geen beschermingsleiding.
klasse III		Toestellen die moeten worden gevoed met een veilige, extra lage spanning (SELV-keten).

[1)] Let op: Klasse 0 en 01 zijn niet meer toegestaan!

3.6 Kortsluitstromen

Bij een kortsluiting zal de tot dat moment vloeiende bedrijfsstroom (I_n) via een vereffeningsstroom overgaan in een symmetrische kortsluitstroom (I''_k). De waarde van I''_k en de vereffeningsstroom zijn afhankelijk van het moment waarop de kortsluiting plaatsvindt en van de impedantie (Z) van het kortgesloten circuit. Kortsluiting tijdens nul-doorgang van I_n heeft een symmetrische kortsluitstroom tot gevolg (zie figuur 3.1).
Bij kortsluiting tussen nul-doorgang en maximale waarde van I_n zal de symmetrische kortsluitstroom pas bereikt worden via een asymmetrische kortsluitstroom (zie figuur 3.2).

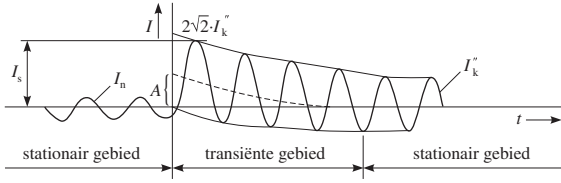


Figuur 3.1 Kortsluiting tijdens nuldoorgang

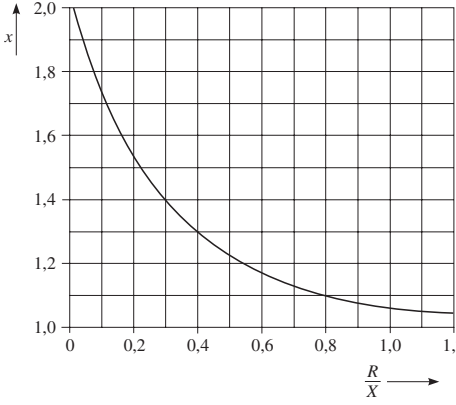
De factor A geeft de gelijkstroomcomponent weer. De verhouding tussen de maximale waarde van de kortsluitstroom, de stootkortsluitstroom (I_s) en I''_k, wordt de *stootfactor* (x) genoemd.

$$I_s = x \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k$$

$$x = f \cdot \left(\frac{R}{X}\right), \text{waarbij } 1 \leq x \leq 2 \text{ (zie figuur 3.3).}$$



Figuur 3.2 Kortsluiting tussen nul-doorgang en maximale waarde



Figuur 3.3 Stootfactor x

De stootfactor kan tevens benaderd worden door de formule

$$x \approx 1{,}02 + 0{,}98 \cdot \mathrm{e}^{-3 \cdot R/X}$$

Voor de berekening van I''_{k} in een *draaistroomnet* geldt:

$$I''_{\mathrm{k}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad Z = \sqrt{\Sigma R^2 + \Sigma X^2}$$

waarin:
U = nominale lijnspanning t.p.v. kortsluiting [V]
Z = net-impedantie van het kortgesloten circuit [mΩ/fase]
I''_{k} = symmetrische kortsluitstroom [kA]

Bij een gegeven kortsluitvermogen (S_{u}) en cos φ van het kortsluitcircuit ter plaatse van de stroomleverende energiebron geldt:

$$Z \approx \frac{1{,}U^2}{S_{\mathrm{u}}} \quad R = Z \cdot \cos\varphi \quad X = Z \cdot \sin\varphi$$

De impedantie van leidingen, kabels, rails e.d. kunnen bepaald worden uit de gegevens van de fabrikant.
De gevonden waarden voor R en X moeten herleid worden tot de nominale lijnspanning t.p.v. de kortsluiting volgens:

$$R_2 = R_1 \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \quad X_2 = X_1 \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

Voor een *transformator* geldt per fase:

$$Z = \frac{U_{\mathrm{k}} \cdot U^2}{100 \cdot S} \quad R = \frac{U_{\mathrm{r}} \cdot U^2}{100 \cdot S} \quad X = \frac{U_{\mathrm{x}} \cdot U^2}{100 \cdot S}$$

$$U_{\mathrm{r}} = \frac{P\mathrm{cu}}{S} \cdot 100 \quad U_{\mathrm{x}} = \sqrt{U_{\mathrm{k}}^2 - U_{\mathrm{r}}^2}$$

waarin:
Z = impedantie transformator per fase [mΩ]
U = nominale lijnspanning secundaire zijde transformator [V]
U_{k} = kortsluitspanning transformator in % van U
U_{r} = weerstandsspanning van transformator in % van U

U_x = reactantiespanning van transformator in % van U
S = schijnbaar vermogen transformator [kVA]
P_{cu} = koperverliezen transformator bij vollast [kW]

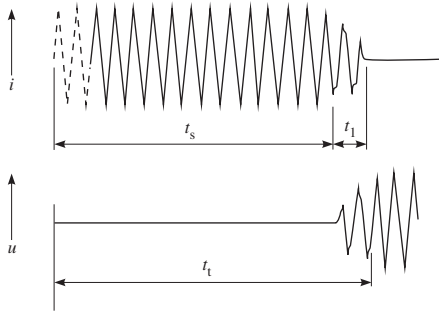
3.7 Beveiliging door smeltpatronen

Figuur 3.4 laat het oscillogram zien van een smeltpatroon bij een stroomsterkte van $5 \times I_n$ (overbelasting).
Figuur 3.5 geeft het gedrag van deze smeltpatroon weer bij een stootkortsluitstroom (I_s) I_{Seff} van 100 kA (kortsluiting).

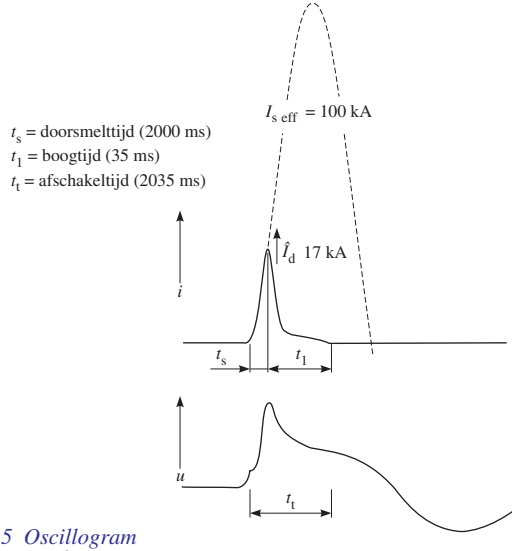
De constructie van het smeltelement is zodanig, dat de stroomsterkte wordt begrensd tot de waarde $\hat{I}_d$, ook wel *kapstroom* genoemd. Hier geldt:

t_s = doorsmelttijd (0,42 ms)
t_l = boogtijd (4,23 ms)
t_t = afschakeltijd (4,65 ms)

De afschakeling van de kortsluitstroom vindt dus plaats binnen een halve periode.



Figuur 3.4 Oscillogram overbelasting smeltpatroon



Figuur 3.5 Oscillogram kortsluiting smeltpatroon

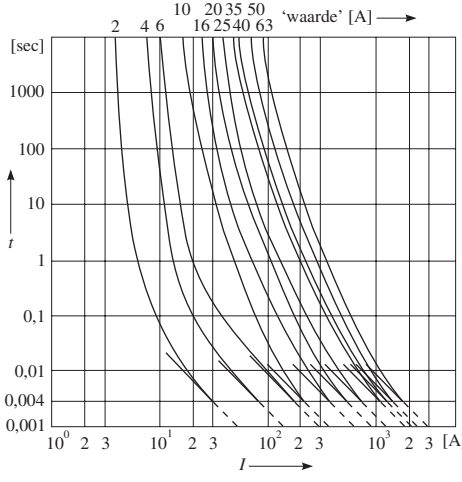
Karakteristieken

Doorsmeltkarakteristiek: doorsmelttijd als functie van de doorsmeltstroom (zie figuur 3.6).

Stroombegrenzingskarakteristiek: uit deze grafiek is af te lezen hoe groot de theoretisch maximale kapstroom is van een smeltpatroon bij een te verwachten kortsluitstroom (zie figuur 3.7). Hierin is weergegeven:

– De *asymmetrische kortsluitstroom* waarbij een stootfactor x met een maximale waarde van 1,8 wordt gehanteerd, (praktijkwaarde) wat resulteert in:

$$I_s = x\sqrt{2}I_k'' \approx 2,5I_k''.$$



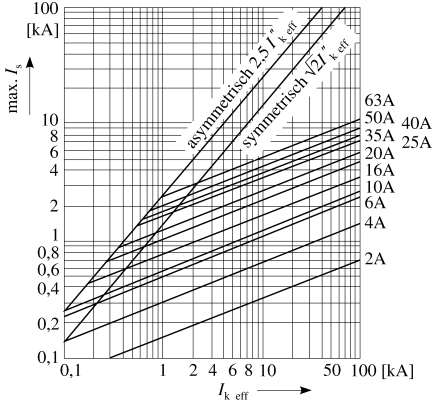
Figuur 3.6 Doorsmeltkarakteristieken smeltveiligheden DII-DIII-traag (fabrikaat Weber)

– De *symmetrische kortsluitstroom* die optreedt bij een volledige ohmse netimpedantie, een kortsluiting bij nuldoorgang of na het verloop van de vereeffeningsstroom:

$$I_s = x\sqrt{2}\,I''_k = 1\sqrt{2}\,I''_k.$$

Selectiviteit

Een installatie dient *selectief* beveiligd te zijn. Dit betekent dat alleen de beveiliging mag aanspreken, welke zich het kortst bij de foutplaats bevindt, in de richting van de voedingsbron gezien. Alle voorgeschakelde beveiligingen moeten intact blijven.
Bij D-smeltveiligheden geldt als vuistregel dat een factor 1,6 tussen twee in serie geschakelde smeltpatronen de selectiviteit zal waarborgen.



Figuur 3.7 Stroombegrenzingskarakteristieken smeltveiligheden DII-DIII traag (fabrikaat Weber)

Tabel 3.8 Kleur van de melderkop volgens NEN 3241 D-smeltveiligheden

I_{nom} [A]	kleur	I_{nom} [A]	kleur
0,5	lichtblauw	35	zwart
1	rood	50	wit
2	rose	63	koper
4	bruin	80	zilver
6	groen	100	rood
10	rood	125	geel
16	grijs	160	koper
20	blauw	200	blauw
25	geel		

Tabel 3.9 Indeling van smeltveiligheden naar grootte (volgens DIN-reeks)

D-smeltveiligheden			mespatronen	
type	stroomwaarde		type	stroomwaarde
D II	tot	25 A	DIN 00	6 A - 100 A
D III	tot	63 A	DIN 0	6 A - 160 A
D IV H	tot	100 A	DIN I	80 A - 250 A
D V H	tot	200 A	DIN II	125 A - 400 A
			DIN III	315 A - 630 A
			DIN IV	500 A -1000 A

In figuur 3.6 en 3.7 zijn de karakteristieken getekend van *trage* patronen; dit zijn smeltpatronen die traag in het overbelastings- en snel in het kortsluitgebied reageren.
Van smeltpatronen die volgens verschillende normen zijn geconstrueerd of die in serie zijn geschakeld met thermische of magnetische beveiligingsrelais, moeten de doorsmelt- resp. afschakelkarakteristieken worden vergeleken. Rekening houdend met een tolerantie van plus en minus 6% mogen de afschakelkrommen elkaar nergens benaderen of kruisen.

Aanduiding van smeltveiligheden (D-patronen), met eigenschappen en toepassing:

aM escorte-patroon: beveiligt slechts tegen kortsluiting. Toepassing bij motoren (M) in combinatie met een thermische beveiliging.

gI beveiliging voor algemeen gebruik (g: general purpose). De I staat voor trage patronen welke over het algemeen op het Europese vasteland worden gebruikt.

gII beveiliging voor algemeen gebruik (g: general purpose). De II staat voor snelle patronen welke met name in Engeland gebruikt worden.

gG beveiliging voor algemeen gebruik met totaal beveiliging. T.z.t. zal deze beveiliging de gI en gII vervangen. De karakteristiek van de gG beveiliging ligt tussen de gI en gII in.

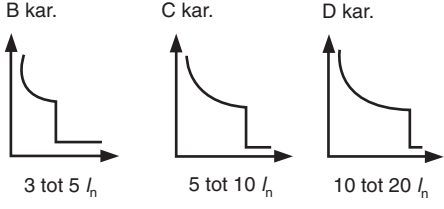
De mespatronen zijn in drie soorten verkrijgbaar met:

– snelle karakteristiek;
– trage karakteristiek;
– traag/snelle karakteristiek (voor resp. overbelasting en kortsluiting).

3.8 Installatie-automaten

Om automaten van verschillende fabrikanten eenvoudig te kunnen uitwisselen zijn er een aantal uitschakelkarakteristieken gestandaardiseerd. Er zijn twee normen de 'huishoudelijke' norm EN 60898 en de industriële norm EN 60947-2. De 'huishoudelijke' norm is bedoeld voor huisinstallaties en geldt voor de volgende spanningen en stromen:

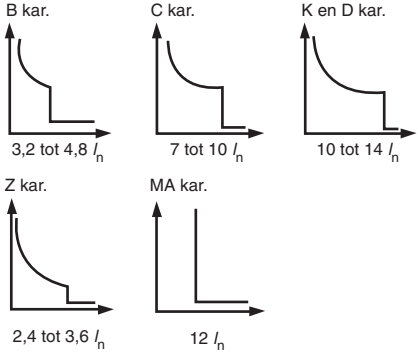
- $I_n \leq 125$ [A], nominale stroom.
- $U_n \leq 440$ [V], nominale spanning.
- $I_{B,c} \leq 25$ [kA], maximale kortsluitstroom.



Figuur 3.8 Uitschakelkarakteristieken volgens EN 60898 (huishoudelijke norm)

Voor de industriële norm EN 60947-2 gelden de uitschakelkarakteristieken volgens figuur 3.9. De maximale spanning is 1000 [VAC] of 1500 [VCD].

In geval van een kortsluiting moet er directe uitschekeling volgen. De 'klassieke' automaten werken in dit gebied met een spoel die een pal aantrekte en daarmee het uitschakelmechanisme in werking



Figuur 3.9 Uitschakelkarakteristieken volgens EN 609472 (industriële norm)

stelt. Om de pal te kunnen aantrekken moet er voldoende veldenergie in de spoel worden opgebouwd. De magnetische veldenergie is $\frac{1}{2}Li^2$. De aantrekkingskracht van de pal is evenredig met de veldenergie en dus met de maximale stroom in het kwadraat. Zodra de stroom de uitschakelwaarde heeft bereikt wordt de pal aangetrokken en treedt het uitschakelmechanisme in werking. Het duurt enige tijd voordat de contacten werkelijk openen. De stroom zal nog verder toenemen en pas na het openen van de contacten af gaan nemen. Als totale uitschakeltijd wordt vaak uit gegaan van 100 [ms], ongeveer 2 perioden van de stroom.
We kunnen ervan uitgaan dat de kortsluitstroom altijd zijn maximale waarde bereikt. Dit is de essentie van het selectiviteitsprobleem bij het toepassen van automaten.
Hebben we een lichtverdeelkast met een inkomende automaat van 63 [A] en een aantal afgaande groepen van 16 [A] (beide met C-karakteristiek), dan is er géén selectiviteit tussen de afgaande groepen en de hoofdautomaat bij een sluiting op de uitgaande klemmen van een groep.
Stel we hebben een maximale kortsluitstroom van 4 [kA] in de verdeelinrichting. Zodra de kortsluitstroom $7 \times 16 = 112$ [A] is

geworden zal de 16 [A] automaat gaan uitschakelen (de pal wordt aangetrokken). De kortsluitstroom zal echter nog steeds toenemen en zal in de eerste periode ook de waarde $7 \times 63 = 441$ [A] bereiken en daarmee zal de 63 [A] automaat ook gaan uitschakelen.
De gevolgen van de uitschakelacties zullen pas na de eerste periode merkbaar zijn, de kortsluitstroom zal dan ook de waarde van 4 [kA] bereiken en daarna afnemen. In dergelijke gevallen is er geen selectiviteit mogelijk en zullen beide automaten uitschakelen.
Hebben we een sluiting aan het eind van een kabel van een afgaande groep dan is de kortsluitstroom, t.g.v. de kabelimpedantie, veel kleiner geworden. Stel we hebben bij een sluiting, aan het einde van de kabel, een kortsluitstroom van 350 [A] dan zal alleen de 16 [A] automaat aanspreken. De maximale kortsluitstroom is kleiner dan de minimale aanspreekstroom (441 [A]) van de 63 [A] automaat.

3.9 Verbetering van de cos φ

Ter verbetering van de cos φ van een elektrische installatie, kunnen parallel aan het net condensatoren worden geschakeld.
Met onderstaande formule wordt voor de bestaande en de gewenste cos φ het blindvermogen berekend. Het verschil tussen de twee uitkomsten bepaalt het capacitieve- of *blindvermogen* van de condensator die moet worden toegepast.

$$P_q = \sqrt{\frac{P^2}{\cos^2\varphi}} - P^2$$

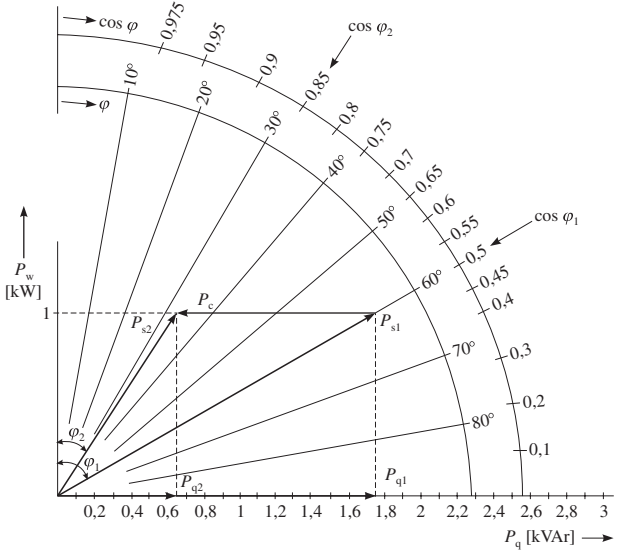
waarin:
P = vermogen [kW]
P_q = blind vermogen [kVAr]
De berekende condensator wordt in drie gelijke delen gesplitst en kan zowel in λ als in Δ op het net geschakeld worden. De capaciteit van elk deel wordt bepaald door:

$$C = \frac{P_c}{U_c^2 \cdot \omega}$$

waarin:
C = capaciteit condensator [μF]
P_c = $\frac{1}{3} P_q$ = blindvermogen condensator [kVAr]

U_c^2 = spanning condensator [V]
ω = $2\pi f$ = rotatiesnelheid draaiveld [rad/s]

De Δ-schakeling verdient de voorkeur omdat, door de hogere spanning, de condensatorcapaciteit 1/3 deel bedraagt van een λ-schakeling.
De dimensionering van de condensatorbatterij kan grafisch worden bepaald, zie figuur 3.10. Hiertoe dient het vermogen met bijbehorende cos φ, uitgezet te worden in de figuur, evenals met de gewenste cos φ (met gelijk werkelijk vermogen [kW]). Het benodigd condensatorvermogen wordt bepaald door het vectoriële verschil.



Figuur 3.10 Bepaling van het condensatorvermogen voor compensatie van cos φ_1 tot cos φ_2

4 Verlichtingstechniek

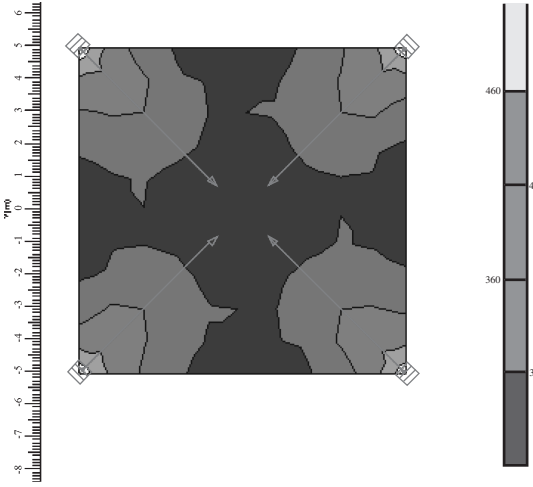
Publicaties:
- *Aanbevelingen voor binnenverlichting*, uitgave *Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde* (Postbus 9035, 6800 ET Arnhem).
- NEN 3087 *Principes en toepassingen van visuele ergonomie*.
- Bovenstaande publicaties zijn nader uitgewerkt in NEN 1890 *Binnenverlichting. Functionele eisen*.
- NEN 3002 *Ergonomie*-Ergonomische criteria voor het ontwerp en gebruik van beeldscherm en hun bedieningsmiddelen.

In de normen is *uitgebreide* informatie opgenomen. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* te Delft.

4.1 Verlichting werkvlak

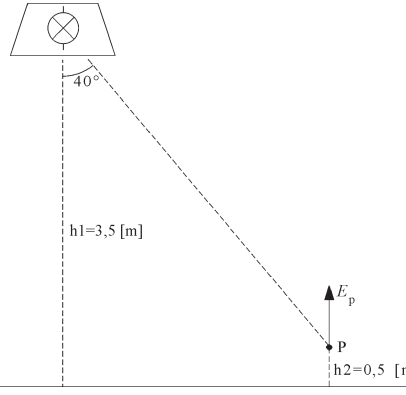
Zie ook hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par. 7 en hoofdstuk F4 *Bouwfysica*, par. 4

De verlichtingssterkte in lux [lx] in een punt p kan berekend worden met de puntmethode. Bij deze berekening wordt er géén rekening gehouden met de omgeving (soort oppervlak, reflectie, etc.). De lichtsterkte van een bepaald armatuur is uit het lichtsterktediagram af te lezen. Door van verschillende punten de verlichtingssterkte te bepalen zijn zogenaamde iso-luxlijnen (gelijke lux-waarden) te tekenen (zie figuur 4.1.)



Figuur 4.1 Terrein met luxverdeling

De berekening van de verlichtingssterkte volgens de puntmethode gaat als volgt (zie figuur 4.2).



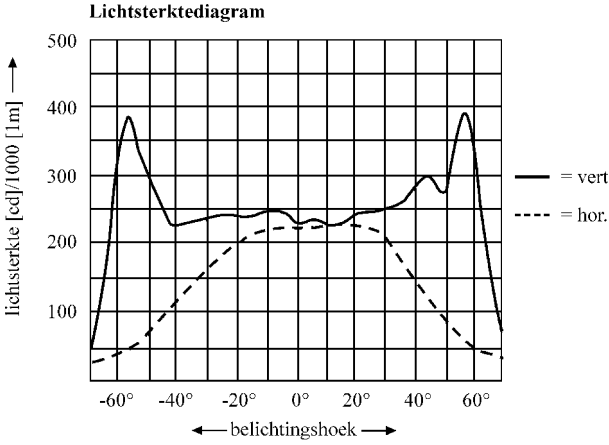
Figuur 4.2 Verlichtingssterkte i in een punt p

Er wordt een hogedruk natriumlamp gebruikt. Voor de armatuur-lampcombinatie gelden de gegevens in figuur 4.3.
Bij een hoek van 40° in verticale richting (d.w.z. loodrecht op de lamp) is de lichtsterkte 275 [cd] (candela) per 1000 [lm]. De lamp geeft een lichtstrook van 38.000 [lm], De lichtsterkte in de richting van punt p wordt:

$$I_p = I_{lamp}\frac{\Phi_{40^\circ}}{1000} = 38.000.\frac{275}{1000} = 10.450\,[cd]$$

De verlichtingssterkte in p is nu:

$$E_p = \frac{I_p}{(h1-h2)^2}\cos^3\alpha = \frac{10.450}{3^2}\cos^3 40 = 521{,}9\,[lx]$$



Armatuurgegevens

Armatuurtype:	SPF212/400
Lamptype:	SON-TC400W
Aantal lampen / armatuur:	1
Lichtstroom / lamp:	38000 lm
Vermogen / armatuur:	401,0 [W]
Spanning:	200,0 [V]
Meetcode:	LWV 084-1500

Figuur 4.3 Lichtsterktediagram en armatuurgegevens

Nieuwwaarde-index n_i: verhouding van de gemiddelde verlichtingssterkte op een werkvlak die door de nieuwe, schone installatie wordt geleverd *en* de gemiddelde verlichtingssterkte op dat werkvlak aan het einde van een bepaalde onderhoudsperiode. De index is afhankelijk van de veroudering van de lampen en de vervuiling van lampen, armaturen en ruimte. Indien geen nadere gegevens bekend zijn, dient hiervoor de waarde 1,4 te worden aangehouden.

Gelijkmatigheidsindex g: verhouding tussen de laagste *en* de gemiddelde verlichtingssterkte op het werkvlak. Deze index is o.a. afhankelijk van de lichtsterkteverdeling van het armatuur en de positie van de armaturen t.o.v. het werkvlak. *g* mag niet kleiner zijn dan 0,75.

Kleurtemperatuur T_K: van een lichtbron: absolute temperatuur [K] van een zwarte straler, waarbij deze het licht met dezelfde kleurindruk uitzendt als de beschouwde lichtbron (zie tabel 4.2 en 4.4).[1)]

Kleurweergave-index R_a: getal van 0 tot 100 dat aangeeft in welke mate de kleurindrukken van een reeks proefkleuren verlicht met de beschouwde lichtsoort, overeenkomen met de kleurindrukken van die proefkleuren indien deze worden verlicht met een temperatuurstraler met dezelfde kleurtemperatuur als de beschouwde lichtsoort (zie tabel 4.3 t/m 4.4).[1)]

Luminantiecontrast C: verhouding van de luminanties van een waar te nemen detail *en* zijn achtergrond in de visuele taak. Het luminantiecontrast in de visuele taak dient ten minste 3 en ten hoogste 10 te zijn.

Afschermhoek α van een armatuur: de hoek tussen de horizontaal en de kijkrichting van waaruit de lamp(en) net niet meer kan (kunnen) worden waargenomen.

Lichtsterkte I van een lichtbron in een bepaalde richting: quotiënt van de door een lichtbron in een ruimtehoekelement, dat die richting bevat, uitgestraalde lichtstroom en de grootte van dit ruimtehoekelement [1 cd = 1 lm/sr].

Lichtstroom $\varnothing$: de totale hoeveelheid licht, die een lichtbron per tijdseenheid uitzendt ofwel die een vlak ontvangt [lm].

Luminatie L van een lichtbron: het quotiënt van de lichtsterkte van die bron en het schijnbare oppervlak ervan in een bepaalde richting [cd/m^2].

Luminantieverhouding: verhouding tussen twee luminanties binnen het gezichtsveld. Deze verhouding mag niet groter zijn dan 10. De verhouding van de luminantie van de visuele taak en die van de directe omgeving, moet bij voorkeur niet groter zijn dan 3.

[1)]Zie voor tabellen, par. 4.2.

4.2 Tabellen[1)]

Tabel 4.1 Standaardverlichtingssterkte voor diverse toepassingen

klasse	aard verlichting	typering taak	standaard verlichtings-sterkte [lx]	voorbeelden
I	oriëntatie-verlichting (geen of incidenteel gebruik als werkruimte	a waarnemen grote objecten en beweging personen	50	opslagruimte, parkeergarage
		b waarnemen zeer grove details en herkenning personen	100	gang, trappenhuis
II	werk-verlichting (permanent gebruik als werkruimte)	a waarnemen grove details	200	grof constructie-werk, smederij, (werk) magazijn
		b lezen en schrijven en vergelijkbare details en contrasten	400	kantoor, leslokaal
		c waarnemen kleinere details en zwakkere contrasten dan bij b	800	tekenkamer, fijn montagewerk
III	speciale werk-verlichting	a waarnemen zeer fijne details en zwakke contrasten op donkere achter-grond	1600	precisiewerk, kadastraal teken-werk, fijn inspec-tiewerk
		b waarnemen aan grens gezichts-vermogen	> 3200	micro miniaturi-satie, operatieta-fel

[1)] Zie voor toelichting, par. 4.1.

Tabel 4.2 Indeling lichtbronnen naar kleurtemperatuur

kleurtemperatuur T_K [K]	omschrijving lichtkleur
2000–2500	geelwit
2500–2900	extra-warm wit
2900–3300	warm wit
3300–5000	neutraal wit
> 5000	koel wit

Tabel 4.3 Indeling lichtbronnen naar kleurweergave-index

kleurweergave-index R_a	waardering
90–100	zeer goed
80–90	goed
50–80	matig
$\leqslant 50$	slecht

Eisen gesteld aan de kleurweergave:
- nauwkeurige kleurbeoordeling en kleurvergelijking dienen mogelijk te zijn: $R_a \geq 90$.
- een natuurlijke kleurweergave is vereist: $R_a \geq 80$.
- de kleurweergave is van geringe betekenis: $R_a \geq 50$.

Tabel 4.4 Kleurtemperatuur, kleurweergave en specifieke lichtstroom van enkele belangrijke lichtbronnen (voor binnenverlichting)

lamptype	kleur-temperatuur [K]	kleur-weergave-index R_a	specifieke lichtstroom [lm/W][1)]
hogedruk natriumlampen	2300	slecht	65–120
gloeilampen	2800	zeer goed	12–20
halogeen gloeilampen	3100	zeer goed	20–25
buisvormige fluorescentielampen:	afhankelijk van het type		
hogedruk kwiklampen	3800–4300	slecht	35–60
superhogedruk kwiklampen met halogenide	4000–5000 5000–6000	matig zeer goed	90 80

[1)] Betrokken op de lamp.

5 Elektrotechnisch tekenen

5.1 Belangrijkste normen

NEN 5152. Elektrotechnische symbolen.
NEN 5158. Elektrotechnische tekeningen. Algemene principes.
NEN 5159. (Tijd)volgorde- en toestanddiagrammen (-tabellen).

Voor een nadere uitwerking van NEN 5152 en NEN 5158 zijn voor bepaalde toepassingsgebieden uitgewerkte voorbeelden van de toepassing van de regels in praktijkrichtlijnen uitgegeven:

NPR 5160. Elektrotechnische tekeningen. Het tekenen van logicaschema's.
NPR 5161. Elektrotechnische tekeningen. Voorbeelden voor de energietechniek.
NPR 5162. Elektrotechnische tekeningen. Voorbeelden voor de telecommunicatietechniek.
NPR 5163. Elektrotechnische tekeningen. Voorbeelden voor de besturingstechniek.

Speciaal voor het tekenen van kabelnetten (leidingen tekenen) zijn bestemd:
NEN 3256. Technische tekeningen. Aanduidingen op kaarten en tekeningen van bestaande situaties op schaal 1:2500 en groter.

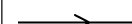
NEN 3116. Technische tekeningen. Aanduidingen voor leidingen op leidingkaarten.

In de normen is *uitgebreide* informatie opgenomen. Normen zijn verkrijgbaar bij het *Nederlands Normalisatie-instituut* te Delft.

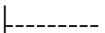
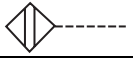
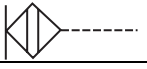
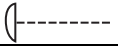
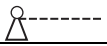
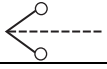
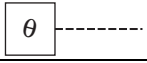
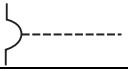
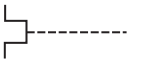
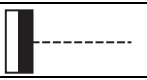
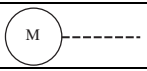
5.2 Elektrotechnische symbolen

Onderstaand overzicht geeft de omschrijving de code en het symbool weer van de meest gebruikte NEN 5152 symbolen. De letter in de kolom 'code' staat voor de codering van de betreffende onderdelen. De vetgedrukte teksten geven de rubrieken van de NEN 5152 weer.

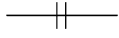
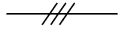
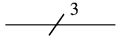
Tabel 5.1 Elektronische symbolen

omschrijving	code	symbool
spanning en stroomsoort driefasenwisselstroom met nul, 50 Hz, 400 V 1 230 V tussen elke fase en de nul. 2 duidt desgewenst een stroomstelsel of -keten aan.		3N~50 Hz 400/230 V
wisselstroom, frequentiegebied of -band, laagfrequent (bijv. netfrequenties)		
middenfrequent (bijv. audiofrequenties) – onderscheid, indien nodig, in een schema de frequentiegebieden of -banden.		
hoogfrequent (bijv. ultrasone frequenties, draaggolffrequenties, radiofrequenties) – onderscheid, indien nodig, in een schema de frequentiegebieden of -banden.		
regelbaarheid van buitenaf veranderlijk, regelbaar – bijv. met de hand.		
instelbaar – vermeld desgewenst het instelgebied.		
richting van energiestroom of signaal energiestroom of signaal in de richting van de pijl		

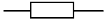
Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
mechanische bediening vertraagd bij beweging van links naar rechts.		
terugverend naar ruststand – terugverend in pijlrichting.		
grendelend element, nok, pal, slot	Y	
bedieningswijzen bediening met de hand, algemeen		
bediening door drukken		
bediening door nadering		
bediening door aanraking		
noodstopbediening – bijv. slagdrukknop.		
bediening door sleutel		
bediening door centrifugaalkracht		
bediening door temperatuur		
bediening door elektromagnetische overstroombeveiliging		
bediening door thermisch element – bijv. bij contacten van thermisch relais.		
bediening door bimetaal – bijv. bij thermostaat.		
bediening door elektromotor		

Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
aarding aarding, algemeen symbool – vermeld desgewenst doel of soort.		
massa, gestel, frame – laat desgewenst de arcering geheel of gedeeltelijk weg. Teken de lijn die de massa aangeeft dikker indien de arcering geheel wordt weggelaten:		
aardelektrode		
geleiders twee afzonderlijke leidingen of circuits – het aantal leidingen of circuits wordt aangegeven door rechte streepjes of door een recht streepje en een getal.	W	
leiding, bestaande uit drie geleiders		
leiding, bestaande uit drie geleiders		
klemmen en verbindingen van geleiders verbinding van geleiders aftakking	X	
verbinding van geleiders dubbele aftakking	X	
dubbele aftakking met aanduiding van de richting naar de verbindingspunten	X	
kruising van leidingen of geleiders (niet geleidend verbonden)	X	
verbindingsonderdelen (contact)bus contactdoos contrasteker	X	
contactdoos aan doorgaande leiding	X	

Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
wandcontactdoos met randaarde	X	
stopcontact contactpen met contactbus steker met contrasteker	X	
weerstanden weerstand, algemeen symbool	R	
verwarmingselement verwarmingstoestel	E	
condensatoren condensator, algemeen symbool	C	
inductieve componenten wikkeling spoel (zelf)inductie smoerspoel	L	
inwendig verbonden wikkelingen driefasenstelsel in D-, delta- of driehoekschakeling – ook voor meerfasenstelsels in veelhoekschakeling, mits het aantal fasen met een getal wordt aangegeven.		
driefasenstelstel in open-driehoekschakeling		
driefasenstelsel in Y- of sterschakeling – ook voor meerfasenstelsels in veelhoekschakeling, mits het aantal fasen met een getal wordt aangegeven.		
driefasenstelsel in Z- of zigzagschakeling		
machine-onderdelen hulppoolwikkeling		
seriewikkeling		
shuntwikkeling		

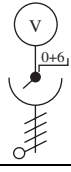
Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
machines, algemeen elektrische machines, algemeen symbool 1 vervang het sterretje door één van de onderstaande lettersymbolen: C synchrone omzetter; G generator; GS synchrone generator; M motor; MG machine die als motor of generator kan fungeren; MS synchrone motor. 2 vul desgewenst het lettersymbool aan met het symbool voor wissel- of gelijkstroom		
transformatoren, algemeen transformator met twee wikkelingen	T	
transformator met drie wikkelingen	T	
stroomtransformator	T	
symbolen van vermogensomzetters wisselstroom-gelijkstroom-omzetter	U	
voorbeelden van terugverende en niet-terugverende contacten maakcontact, terugverend	**Q** S	
verbreekcontact, terugverend	Q S	

Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
schakel- en besturingsmaterialen contactor	K	
vermogensschakelaar	Q	
vermogensschakelaar met elektromagnetische overstroombeveiliging, installatie-automaat	F	
installatie-automaat met aardlekbeveiliging	F Q	
scheider met draaipunt	Q	
lastscheider	Q	
open walsschakelaar	Q	
schakelaar met onderspanningsbeveiliging, schakelaar met nulspanningsbeveiliging	F Q	
schakelaar met elektromagnetische bediening	K	
sterdriehoekschakelaar	Q	
grondsymbolen van motorstarters aanzetter, algemeen symbool – specifieke functiesymbolen kunnen in het algemeen symbool worden getekend om bepaalde typen aanzetters weer te geven.	Q	

Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
relaisspoelen relaisspoel met één actieve wikkeling	K	
spoel van relais met afvalvertraging	K	
spoel van relais met opkomvertraging	K	
smeltveiligheden van smeltpatroon lastschakelaars smeltveiligheid, waarbij de voedende zijde is aangegeven door een dikke lijn – $\frac{25}{6}$ betekent: de nominale stroom van de patroonhouder is 25 [A] en de patroon 6 [A].	F	
vonkbruggen en overspanningsafleiders overspanningsafleider – bijv. bliksemafleider.	F	
voorbeelden van aanwijzende meetinstrumenten voltmeter met voltmeteromschakelaar voor viergeleidersysteem met 6 standen en nulstand	P S	
kilowattuurmeter	P	
aanduiding voor bijzondere geleiders nul (N)	W	
beschermingsleiding (PE)	W	

Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
(hoofd) aardleiding (E) functionele aarde (E)	W	
gecombineerde beschermingsleiding en nul (PEN)	W	
leidingen naar boven gaande leiding		
naar beneden gaande leiding		
schakelaars voor installaties in gebouwen enkelpolige schakelaar	S	
achtpolige schakelaar – 8 als voorbeeld.	S	
serieschakelaar	S	
wisselschakelaar	S	
serie-parallelschakelaar	S	
kruisschakelaar stroomkringschema	S	
verlichting licht(aansluit) punt met leiding het aantal lampen en hun vermogen kan worden aangegeven.	E	
armatuur, fluorescentiebuislamp, algemeen symbool	E	

Tabel 5.1 (vervolg)

omschrijving	code	symbool
noodverlichting aangesloten op noodstroomvoorziening	E	
armatuur met fluorescentiebuislamp	E	

Zie ook hoofdstuk B2, par. 4.2

Literatuur

Zie de in dit hoofdstuk genoemde publicaties.

Werktuigbouwkunde H

1 Algemeen
- 1.1 Ruwheid
- 1.2 ISO-passingstelsel

2 Verbindingen
- 2.1 Schroefdraadsystemen
- 2.2 Berekening schroefbouten
- 2.3 Krimpverbindingen
- 2.4 Lassen
- 2.5 Solderen
- 2.6 Klinken, felsen, lijmen

3 Overbrengingen
- 3.1 Spieën
- 3.2 Getande asverbindingen (spline-assen)
- 3.3 Assen en askoppelingen
- 3.4 (Aandrijf) kettingen
- 3.5 V-snaren
- 3.6 Tandriemen
- 3.7 Tandwielen, tandwieloverbrengingen, planeetwielen

4 Diverse machine-elementen
- 4.1 Lagers
- 4.2 Remmen
- 4.3 Afdichtringen
- 4.4 Veren

5 Werktuigen
- 5.1 Pompen (voor vloeistof)
- 5.2 Ventilatoren en compressoren
- 5.3 Pneumatische componenten

5.4 Hydraulische componenten
5.5 Hefwerktuigen

6 Werktuigbouwkundig tekenen
6.1 Ruwheidsaanduiding
6.2 Lasaanduiding
6.3 Patroon van bewerkingssporen
6.4 Vorm-en plaatstoleranties

Zie voor materiaalgegevens, hoofdstuk E1 *Materialen*.

1 Algemeen

1.1 Ruwheid

Ruwheidswaarde R_a (ISO R468–1966)
De *ruwheidswaarde* wordt uitgedrukt in μm (micron of 'mu'). Voorheen werd de ruheidswaarde aangegeven in 'ru'

$$1\ \text{ru} = \mu\,\text{inch} = 1/40\ \mu\text{m}$$

Voor de (omvangrijke) definitie van R_a : zie NEN 3631 en 3632.

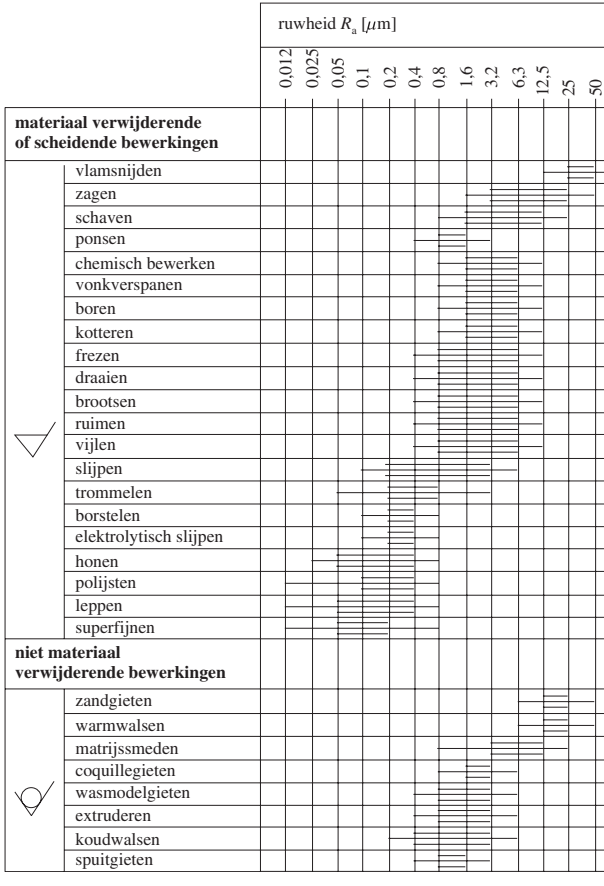
Ruwheidsaanduiding
De in de tekening opgegeven ruwheid moet gezien worden als de maximaal toelaatbare ruwheid. De ruwheid die in de tekening wordt aangegeven mag niet fijner zijn dan praktisch nood-zakelijk. Zie ook par. 6.1 *Ruwheidsaanduiding*.

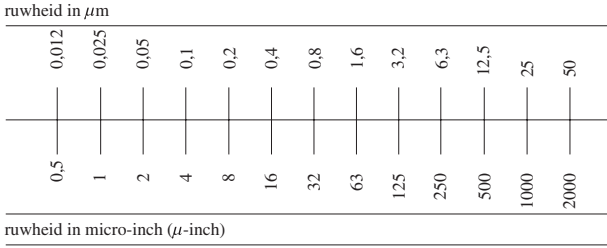
Bewerkingen in relatie tot de ruwheid
De oppervlakteruwheid die bereikt kan worden bij verspanende en niet-verspanende bewerking is afhankelijk van de soort bewerking, gereedschap enz. (zie tabel 1.2).
Voor bewerkingsgegevens, zie hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 2.10 en par. 3.7

Tabel 1.1 Ruwheid [μm] *afhankelijk van de afmetingen*

afmetingen [mm]		ruwheidsklassen						
		R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
boven	t/m							
3	18	40	10	2,5	0,6	0,16	0,05	0,012
18	80	63	16	4	1	0,25	0,08	0,025
80	250	100	25	6	1,6	0,4	0,1	0,025
100	500	160	40	10	2,5	0,6	0,16	0,05

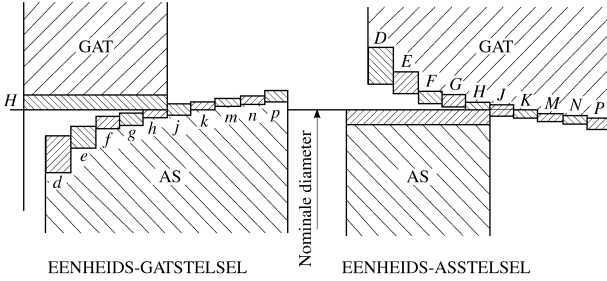
Tabel 1.2 Richtlijnen voor de ruwheid R_a in relatie tot de bewerking





Figuur 1.1 Relatie ruwheid in µm en micro-inch

1.2 ISO-passingstelsel



Figuur 1.2 Iso-passingstelsel

De aanduiding bestaat achtereenvolgens uit:

nominale waarde, letter, cijfer

waarin:
letter = ligging tolerantiegebied
(hoofdletter: **GAT**; kleine letter: **as**)
cijfer = aanduiding grootte tolerantiegebied

Voorbeeld (gat): 25 *H7*

Tabel 1.3 Voorkeur-passingen

stelsel:	eenheidsgat		eenheidsas	
klasse:	gewoon werk	nauwk. werk	gewoon werk	nauwk. werk
lichtlopende passing	*H* 8–*f* 8	*H* 7–*f* 7	*F* 8–*h* 9	*F* 7–*h* 6
zwaarlopende passing		*H* 7–*g* 6		*G* 7–*h* 6
glijdende passing	*H* 8–*h* 7	*H* 7–*h* 6	*H* 8–*h* 9	*H* 7–*h* 6
schuivende passing		*H* 7–*j* 6		*J* 7–*h* 6
zwaarschuivende passing	*H* 8–*k* 7	*H* 7–*k* 6	*K* 8–*h* 9	*K* 7–*h* 6
klemmende passing		*H* 7–*m* 6		*M* 7–*h* 6
lichte pers-passing		*H* 7–*n* 6		*N* 7–*h* 6
pers-passing		*H* 7–*p* 6		*P* 7–*h* 6
			*	*

* Hier kan ook *h* 7 gekozen worden.

Tabel 1.4 Toleranties voor assen [μm]

nom. maat **as** [mm] boven	t/m	*f* 8	*f* 7	*g* 6	*h* 9	*h* 7	*h* 6	*j* 6	*k* 7	*k* 6	*m* 6	*n* 6	*p* 6
1	3	− 7	− 7	− 3	0	0	0	+ 6	+10	+ 6	+ 9	+13	+ 16
		− 21	− 16	−10	− 25	− 9	− 7	− 1	0	0	+ 2	+ 6	+ 9
3	6	− 10	− 10	− 4	0	0	0	+ 7	+13	+ 9	+12	+16	+ 20
		− 28	− 22	−12	− 30	−12	− 8	− 1	+ 1	+ 1	+ 4	+ 8	+ 12
6	10	− 13	− 13	− 5	0	0	0	+ 7	+16	+10	+15	+19	+ 24
		− 35	− 28	−14	− 36	−15	− 9	− 2	+ 1	+ 1	+ 6	+10	+ 15
10	18	− 16	− 16	− 6	0	0	0	+ 8	+19	+12	+18	+23	+ 29
		− 43	− 34	−17	− 43	−18	−11	− 3	+ 1	+ 1	+ 7	+12	+ 18
18	30	− 20	− 20	− 7	0	0	0	+39	+23	+15	+21	+28	+ 35
		− 53	− 41	−20	− 52	−21	−13	− 4	+ 2	+ 2	+ 8	+15	+ 22
30	50	− 25	− 25	− 9	0	0	0	+11	+27	+18	+25	+33	+ 42
		− 64	− 50	−25	− 62	−25	−16	− 5	+ 2	+ 2	+ 9	+17	+ 26
50	80	− 30	− 30	−10	0	0	0	+12	+32	+21	+30	+39	+ 51
		− 76	− 60	−29	− 74	−30	−19	− 7	+ 2	+ 2	+11	+20	+ 32
80	120	− 36	− 36	−12	0	0	0	+13	+38	+25	+35	+45	+ 59
		− 90	− 71	−34	− 87	−35	−22	− 9	+ 3	+ 3	+13	+23	+ 37
120	180	− 43	− 43	−14	0	0	0	+14	+43	+28	+40	+52	+ 68
		−106	− 83	−39	−100	−40	−25	−11	+ 3	+ 3	+15	+27	+ 43
180	250	− 50	− 50	−15	0	0	0	+16	+50	+33	+46	+60	+ 79
		−122	− 96	−44	−115	−46	−29	−13	+ 4	+ 4	+17	+31	+ 50
250	315	− 56	− 56	−17	0	0	0	+16	+56	+36	+52	+66	+ 88
		−137	−108	−49	−130	−52	−32	−16	+ 4	+ 4	+20	+34	+ 56
315	400	− 62	− 62	−18	0	0	0	+18	+61	+40	+57	+73	+ 98
		−151	−119	−54	−140	−57	−36	−18	+ 4	+ 4	+21	+37	+ 62
400	500	− 68	− 68	−20	0	0	0	+20	+68	+45	+63	+80	+108
		−165	−131	−60	−155	−63	−40	−20	+ 5	+ 5	+23	+40	+ 68

Tabel 1.5 Toleranties voor gaten [μm]

nom. maat **GAT** [mm] boven	t/m	*F*8	*F*7	*F*7	*H*8	*H*7	*J*7	*K*8	*K*7	*M*7	*N*7	*P*7
1	3	+ 21	+ 16	+12	+14	+ 9	+ 3	0	0	0	− 4	− 7
		+ 7	+ 7	+ 3	0	0	− 6	−14	−10	− 9	−13	− 16
3	6	+ 28	+ 22	+16	+18	+12	+ 5	+ 5	+ 3	0	− 4	− 8
		+ 10	+ 10	+ 4	0	0	− 7	+13	− 9	−12	−16	− 20
6	10	+ 35	+ 28	+20	+22	+15	+ 8	+ 6	+ 5	0	− 4	− 9
		+ 13	+ 13	+ 5	0	0	− 7	−16	−10	−15	−19	− 24
10	18	+ 43	+ 34	+24	+27	+18	+10	+ 8	+ 6	0	− 5	− 11
		+ 16	+ 16	+ 6	0	0	− 8	−19	−12	−18	−23	− 29
18	30	+ 53	+ 41	+28	+33	+21	+12	+10	+ 6	0	− 7	− 14
		+ 20	+ 20	+ 7	0	0	− 9	−23	−15	−21	−28	− 35
30	50	+ 64	+ 50	+34	+39	+25	+14	+12	+ 7	0	− 8	− 17
		+ 25	+ 25	+ 9	0	0	−11	−27	−18	−25	−33	− 42
50	80	+ 76	+ 60	+40	+46	+30	+18	+14	+ 9	0	− 9	− 21
		+ 30	+ 30	+10	0	0	−12	−32	−21	−30	−39	− 51
80	120	+ 90	+ 71	+47	+54	+35	+22	+16	+10	0	−10	− 24
		+ 36	+ 36	+12	0	0	−13	−38	−25	−35	−45	− 59
120	180	+106	+ 83	+54	+63	+40	+26	+20	+12	0	−12	− 28
		+ 43	+ 43	+14	0	0	−14	−43	−28	−40	−52	− 68
180	250	+122	+ 96	+61	+72	+46	+30	+22	+13	0	−14	− 33
		+ 50	+ 50	+15	0	0	−16	−50	−33	−46	−60	− 79
250	315	+137	+108	+69	+81	+52	+36	+25	+16	0	−14	− 36
		+ 56	+ 56	+17	0	0	−16	−56	−36	−52	−66	− 88
315	400	+151	+119	+75	+89	+57	+39	+28	+17	0	−16	− 41
		+ 62	+ 62	+18	0	0	−18	−61	−40	−57	−73	− 98
400	500	+165	+131	+83	+97	+63	+43	+29	+18	0	−17	− 45
		+ 68	+ 68	+20	0	0	−20	−68	−45	−63	−80	−108

2 Verbindingen

Zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 12.5 e.v.

2.1 Schroefdraadsystemen

Metrische schroefdraad (ISO):
- M – metrisch. Zie tabel 2.1.
- MF – metrisch fijn.

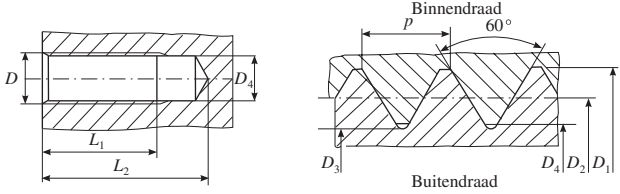
Bewegingsschroefdraad:
- Tr – trapezium. Zie tabel 2.2.

Whitworth-schroefdraad:
- BSW – gewone Whitworth-draad (W). *Niet toepassen*.
- BSF – fijne Whitworth-draad. *Niet toepassen*.
- BSP – pijpschroefdraad (G en R). Zie tabel 2.3.

Unieschroefdraad:
- UNC – unieschroefdraad grof. Zie tabel 2.4.
- UNF – unieschroefdraad fijn.
- UNEF – unieschroefdraad extra fijn.

Amerikaanse pijpschroefdraad:
- NPT – National Pipe Thread Taper.
- NPTF – National Pipe Thread Taper Fuel and Oildryseal. *Conisch*. Toegepast voor zowel binnen- als buitendraad. Zie tabel 2.5.
- NPSF – als NPTF, maar *rechte* draad. Uitsluitend toegepast als binnendraad; de bijbehorende buitendraad is NPTF. Zie tabel 2.6.

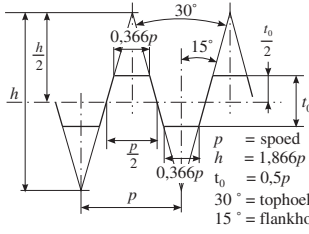
Tabel 2.1 Metrische schroefdraad M (maten in mm*)*

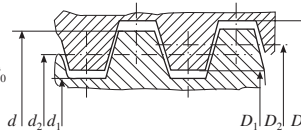


D	*p*	D_1	D_2	D_3	D_4		L_1	L_2
					$A^{1)}$	$B^{2)}$		
M 3	0,5	3	2,68	2,39	2,4	2,5	5	9
M 4	0,7	4	3,54	3,14	3,2	3,3	7	11
M 5	0,8	5	4,48	4,02	4,1	4,2	9	14
M 6	1	6	5,35	4,77	4,8	5	10	16
M 8	1,25	8	7,19	6,47	6,6	6,8	12	19
M10	1,5	10	9,03	8,16	8,3	8,5	15	23
M12	1,75	12	10,86	9,85	10	10,2	17	27
*M14	2	14	12,70	11,55	11,5	11,7	19	29
M16	2	16	14,70	13,55	13,8	14	22	33
*M18	2,5	18	16,37	14,93	15,2	15,5	25	37
M20	2,5	20	18,38	16,93	17,2	17,5	28	42

[1)] Boordiameter voor *kortspanig* materiaal.
[2)] Boordiameter voor *langspanig* materiaal.
* Bij voorkeur niet gebruiken.

Tabel 2.2 Trapeziumschroefdraad Tr (maten in mm)[1)]

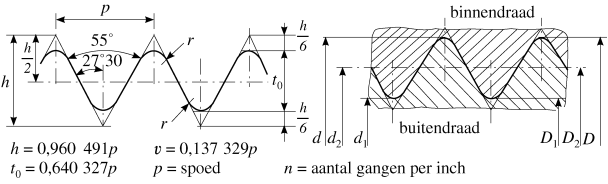




aanduiding Tr $d \times p$	$d_2 = D_2$	d_1	D	D_1	aanduiding Tr $d \times p$	$d_2 = D_2$	d_1	D	D_1
8 × 1,5	7,25	6,2	8,3	6,5	52 × 8	48	43	53	44
9 × 2	8	6,5	9,5	7	55 × 9	50,5	45	56	46
10 × 2	9	7,5	10,5	8	60 × 9	55,5	50	61	51
11 × 2	10	8,5	11,5	9	65 × 10	60	54	66	55
12 × 3	10,5	8,5	12,5	9	70 × 10	65	59	71	60
14 × 3	12,5	10,5	14,5	11	75 × 10	70	64	76	65
16 × 4	14	11,5	16,5	12	80 × 10	75	69	81	70
18 × 4	16	13,5	18,5	14	85 × 12	79	72	86	73
20 × 4	18	15,5	20,5	16	90 × 12	84	77	91	78
22 × 5	19,5	16,5	22,5	17	95 × 12	89	82	96	83
24 × 5	21,5	18,5	24,5	19	100 × 12	94	87	101	88
26 × 5	23,5	20,5	26,5	21	110 × 12	104	97	111	98
28 × 5	25,5	22,5	28,5	23	120 × 14	113	104	122	106
30 × 6	27	23	31	24	130 × 14	123	114	132	116
32 × 6	29	25	33	26	140 × 14	133	124	142	126
34 × 6	31	27	35	28	150 × 16	142	132	152	134
36 × 6	33	29	37	30	160 × 16	152	142	162	144
38 × 7	34,5	30	39	31	170 × 16	162	152	172	154
40 × 7	36,5	32	41	33	180 × 18	171	160	182	162
42 × 7	38,5	34	43	35	190 × 18	181	170	192	172
44 × 7	40,5	36	45	37	200 × 18	191	180	202	182
46 × 8	42	37	47	38	210 × 20	200	188	212	190
48 × 8	44	39	49	40	220 × 20	210	198	222	200
50 × 8	46	41	51	42	230 × 20	220	208	232	210

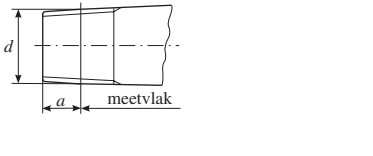
[1)] In de tabel zijn *nominale* waarden aangegeven (voor minimum-flankspeling = 0) voor spoedreeks *middel* (NEN 2781). Voor spoedreeks *fijn*, zie NEN 2783. Voor toleranties, zie NEN 2782.

Tabel 2.3a Cilindrische pijpschroefdraad of bevestigingspijpschroefdraad (voorheen Gasdraad)[1)2)]



aanduiding[1)]	n	p	$d = D$	d_2	d_1	a
G 1/16	28	0,907	7,723	7,142	6,561	4,0
G 1/8	28	0,907	9,728	9,147	8,566	4,0
G1/4	19	1,337	13,157	12,301	11,445	6,0
G3/8	19	1,337	16,662	15,806	14,950	6,4
G1/2	14	1,814	20,955	19,793	18,631	8,2
G3/4	14	1,814	26,441	25,279	24,117	9,5
G1	11	2,309	33,249	31,770	30,291	10,4
G1 1/4	11	2,309	41,910	36,418	38,952	12,7
G1 1/2	11	2,309	47,803	46,324	44,845	12,7
G2	11	2,309	59,614	58,135	56,656	15,9
G2 1/2	11	2,309	75,184	73,705	72,226	17,5
G3	11	2,309	87,884	86,405	84,926	20,6

[1)] De aangegeven maten zijn *nominale* maten. Grensmaten worden opgegeven in NEN 1141.
[2)] De maten gelden tevens over *conische* pijpschroefdraad in het meetvlak (zie figuur 2.1) gemeten.



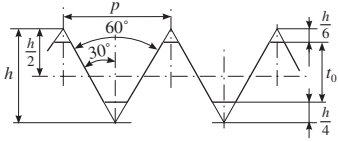
Figuur 2.1 Conische pijpschroefdraad (afdichtend). Zie voor maten, tabel 2.3a met de toelichting in noot 2.

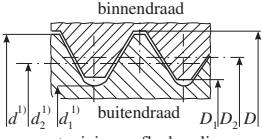
Tabel 2.3b Aanduidingen pijpschroefdraad (voorheen Gasdraad)

soort	beschrijving	voorbeeld aanduiding
bevestigings-pijpschroefdraad (niet afdichtend)[1)]	1½ inch binnendraad (cilindrisch)	G1½
	1½ inch binnendraad tolerantieklasse B (cilindrisch)	G1½ B
pijpschroefdraad (afdichtend)[2)]	½ inch buitendraad (conisch)	R½
	½ inch binnendraad (cilindrisch)	Rp½
	½ inch binnendraad (conisch)	Rc½

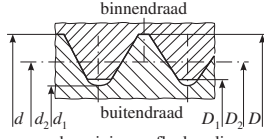
[1)] Zie NEN 176.Voor tolerantieklassen zie NEN 1141.
[2)] Zie NEN 3258.

Tabel 2.4
Unieschroefdraad
(maten in mm*)*





met minimum-flankspeling
(passingklassen 1A/1B, 2A/2B)

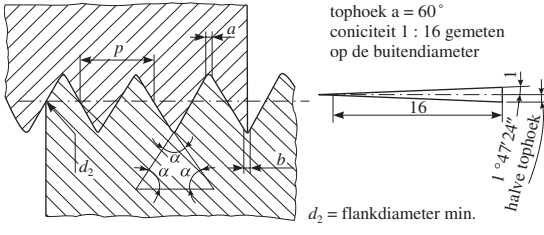


zonder minimum-flankspeling
(passingklassen 3A/3B)

aanduiding		*n*	*p*	$D = d^{1)}$	$d_2{}^{1)} = D_2$	$d_1{}^{1)}$	D_1
¼ –20	UNC	20	1,270	6,350	5,524	4,793	4,978
5/16 –18	UNC	18	1,411	7,938	7,021	6,205	6,401
⅜ –16	UNC	16	1,588	9,525	8,494	7,577	7,798
7/16 –14	UNC	14	1,814	11,112	9,934	8,887	9,144
½ –13	UNC	13	1,954	12,700	11,430	10,302	10,592
9/16 –12	UNC	12	2,117	14,288	12,913	11,692	11,989
⅝ –11	UNC	11	2,309	15,875	14,376	13,043	13,386
¾ –10	UNC	10	2,540	19,050	17,399	15,933	16,307
⅞ – 9	UNC	9	2,822	22,225	20,391	18,763	19,177
1 – 8	UNC	8	3,175	25,400	23,338	21,504	21,971
1⅛ – 7	UNC	7	3,629	28,575	26,218	24,122	24,638
1¼ – 7	UNC	7	3,629	31,750	29,393	27,297	27,813
1⅜ – 6	UNC	6	4,233	34,925	32,174	29,731	30,353
1½ – 6	UNC	6	4,233	38,100	35,349	32,906	33,528
1¼ – 5	UNC	5	5,080	44,450	41,151	38,217	38,964
2 – 4½	UNC	4½	5,644	50,800	47,135	43,876	44,679
2¼ – 4½	UNC	4½	5,644	57,150	53,485	50,226	51,029
2½ – 4	UNC	4	6,350	63,500	59,375	55,710	56,617
2¾ – 4	UNC	4	6,350	69,850	65,725	62,060	62,967
3 – 4	UNC	4	6,350	76,200	72,075	68,410	69,317
3¼ – 4	UNC	4	6,350	82,550	78,425	74,760	75,667
3½ – 4	UNC	4	6,350	88,900	84,775	81,110	82,017
3¾ – 4	UNC	4	6,350	95,250	91,125	87,460	88,367
4 – 4	UNC	4	6,350	101,600	97,475	93,810	94,717

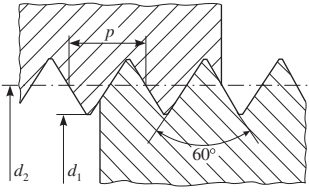
[1)] De waarden van d, d_1 en d_2 gelden alleen voor de buitendraad zonder minimum-flankspeling (klasse 3A). Voor de buitendraad met minimum-flankspeling (klassen 1A en 2A) zijn de waarden kleiner, zie hiervoor NEN 1250.

Tabel 2.5 Conische schroefdraad NPTF



aanduiding		*n*	*p*	d_2	*a*		*b*	
					max.	min.	max.	min.
1/16″–27	NPTF	27	0,941	6,888	0,102	0,051	0,152	0,102
1/8″–27	NPTF	27	0,941	9,233	0,102	0,051	0,152	0,102
1/4″–18	NPTF	18	1,411	12,126	0,127	0,076	0,178	0,127
3/8″–18	NPTF	18	1,411	15,545	0,127	0,076	0,178	0,127
1/2″–14	NPTF	14	1,814	19,264	0,127	0,076	0,178	0,127
3/4″–14	NPTF	14	1,814	24,579	0,127	0,076	0,178	0,127
1″–11½	NPTF	11½	2,209	30,826	0,152	0,102	0,229	0,152
1¼″–11½	NPTF	11½	2,209	39,551	0,152	0,102	0,229	0,152
1½″–11½	NPTF	11½	2,209	45,621	0,152	0,102	0,229	0,152
2″–11½	NPTF	11½	2,209	57,633	0,152	0,102	0,229	0,152
2½″– 8	NPTF	8	3,175	69,076	0,203	0,152	0,279	0,203
3″– 8	NPTF	8	3,175	84,852	0,203	0,152	0,279	0,203

Tabel 2.6 Cilindrische schroefdraad NPSF



aanduiding		n	p	d_1	d_2	
				min.	max.	min.
1/16″–27	NPSF	27	0,941	6,304	7,120	7,031
1/8″–27	NPSF	27	0,941	8,651	9,467	9,378
1/4″–18	NPSF	18	1,411	11,232	12,456	12,324
3/4″–18	NPSF	18	1,411	14,671	15,893	15,761
1/2″–14	NPSF	14	1,841	18,118	19,728	19,558
3/4″–14	NPSF	14	1,841	23,465	25,075	24,965
1″–11½	NPSF	11½	2,209	29,464	31,407	31,201

2.2 Berekening schroefbouten

Maatgevend voor de maximaal toelaatbare trekkracht op bouten is de *spanningsdoorsnede* F_s (iets groter dan de kerndiameter):

$$F_s = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2$$

waarin: d_1 = kerndiameter
d_2 = flankdiameter

Tabel 2.7 Maximaal toelaatbare trekbelastingen (berekend op de rekgrens/vloeigrens) voor metrische ISO-schroefdraad [kN]

boutafmetingen				kwaliteitsklasse 4.6	6.8	8.8	10.9	12.9
diameter	spoed [mm]	kernopp. [mm^2]	F_s [mm^2]	vloeigrens [kN/mm^2]		rekgrens $\sigma_{0,2}$ [kN/mm^2]		
				0,24	0,48	0,64	0,9	1,08
M 4	0,7	7,75	8,78	2,1	4,7	5,6	7,9	9,5
M 5	0,8	12,7	14,2	3,5	7,7	9,1	12,8	15,3
M 6	1	17,9	20,1	4,9	10,9	12,9	18,1	21,7
M 8	1,25	32,8	36,6	9,0	19,8	23,4	32,9	39,5
* M 8	1	36,0	39,2	9,6	21,2	25,1	35,3	42,3
M10	1,5	52,3	58,0	14,3	31,3	37,1	52	62,5
* M10	1,25	56,3	61,2	15,1	33,0	39,2	55	66
M12	1,75	76,2	84,3	20,7	45,5	54	76	91
* M12	1,25	81,1	88,1	21,7	47,6	56,5	79,5	95
M16	2	144	157	38,5	84,8	100	141	170
* M16	1,5	157	167	41,0	90,2	107	150	180
M20	2,5	225	245	60,4	132	157	220	265
* M20	1,5	259	272	66,9	147	174	245	294
M24	3	324	353	86,9	191	226	318	381
* M24	2	365	384	94,6	207	246	346	415
M30	3,5	519	561	138,1	303	359	505	606
* M30	2	596	621	152,7	335	397	559	671

* Metrische ISO schroefdraad fijn, 1e voorkeurreeks.

Van principiële betekenis voor de veiligheid van een bout-verbinding is de keuze van de juiste *voorspankracht* (zie tabel 2.8).

Om de gekozen voorspankracht te bereiken, kan de verbinding met een momentsleutel worden aangetrokken. Het juiste moment wordt berekend met:

$$M = F_v[0,16p + \mu_t(0,58d_2 + D_m/2)]$$

waarin:
M = juiste moment [N · m]
p = spoed van de draad [m]
μ_t = wrijvingscoëfficiënt draad en oplegvlak moer ($\approx$ 0,14)
d_2 = flankdiameter draad [m]
D_m = gemiddelde diameter oplegvlak moer op boutkop [m]
F_v = berekende voorspankracht [N] (zie tabel 2.8)

Zie ook hoofdstuk C2 *Toegepaste mechanica*, par. 3.2 voor toelaatbare spanning in bouten op basis van vermoeiing en kerfwerking.

Ook kan de verbinding machinaal worden aangetrokken door middel van de *reksturing*methode. Hierbij is de *rek* van de bout maatstaf voor het aanhalen.

Tabel 2.8 Gemiddelde waarden van de voorspankracht afhankelijk van de belasting per bout

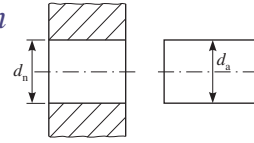
boutbelasting [kN]			voorspankracht F_v	boutdiameter M ... bij kwaliteitsklasse			
statisch axiaal	dynamisch axiaal	statisch en/of dynamisch, op afschuiving	[kN]	6,9	8,8	10,9	12,9
1,6	1	0,32	2,5	4	4	–	–
2,5	1,6	0,5	4	5	5	4	4
4	2,5	0,8	6,3	6	6	5	5
6,3	4	1,25	10	7*	7*	6	5
10	6,3	2	16	9*	8	7*	7*
16	10	3,15	25	12	10	9*	8
25	16	5	40	14	14	12	10
40	25	8	63	18	16	14	12
63	40	12,5	100	22	20	16	16
100	63	20	160	27	24	20	20
160	100	31,5	250	–	30	27	24
250	160	50	400	–	–	30	30

* Maten M7 en M9 alleen in uitzonderingsgevallen gebruiken.

2.3 Krimpverbindingen

Maximaal over te brengen koppel:

$$M = 0,5 \cdot \pi d_a^2 \cdot l \cdot f \cdot \bar{\sigma}_o$$



Figuur 2.2 Krimpverbinding

waarin:

M = max. over te brengen koppel [N · mm]
$\bar{\sigma}_0$ = toelaatbare vlakte-drukken [N/mm^2]
gietijzer : 30–50 N/mm^2
staal : 50–90 N/mm^2
d_a = asdiameter [mm]
l = naflengte [mm]
f = wrijvingscoëfficiënt (veiligheidshalve f = 0,1)

Maximaal toelaatbare krimpmaten ($\Delta d/d$):

– gesmeed staal op ijzer 1 : 750
– gesmeed staal op gesmeed staal 1 : 650
– gietstaal op gietijzer 1 : 750
– gietstaal op gesmeed staal 1 : 650
– gietijzer op gesmeed staal 1 : 800 à 2000

M.b.v. een gekozen krimpmaat kan de benodigde krimptem-peratuur bepaald worden:

$$T_k = \frac{\Delta d + s}{\alpha \cdot d_n} + T_o$$

waarin:

Δd = $d_a - d_n$ [mm]
d_a = asdiameter [mm]
d_n = gatdiameter naaf [mm]
s = vereiste minimum speling voor het samenvoegen $s = d \cdot 10^{-3}$ [mm]
α = lineaire uitzettingscoëfficiënt ($\alpha_{staal} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ K^{-1})
T_o = omgevingstemperatuur
T_k = krimptemperatuur

Voor sterkteberekeningen, zie literatuur.

2.4 Lassen

Autogeen lassen

Bij *autogeen lassen* wordt het werkstuk op temperatuur gebracht door een brandend gasmengsel, meestal bestaand uit acetyleen en zuurstof in een verhouding van 1:1 tot 1:1,1.

Elektrisch lassen

Bij het elektrisch lassen met wisselstroom wordt gebruik gemaakt van een lastransformator, bij het lassen met gelijkstroom een omvormer. De temperatuur van de vlamboog is ca. 6000 °C. Nullastspanning: 40–90 V; boogspanning: 20–30 V.
De stroomsterkte wordt ingesteld afhankelijk van de vereiste elektrische energie.

Open-boog-lassen: de vereiste warmte wordt geleverd door elektrische energie, die een vlamboog in stand houdt tussen werkstuk en lasmateriaal.

Beschermd booglassen: de vlamboog brandt onder een bepaalde bescherming, die afkomstig kan zijn van de elektrodebekleding, of extra als poeder wordt toegevoegd.

Lassen onder bescherm: de vlamboog brandt hierbij in een afzonderlijk toegevoegd gas. Men onderscheidt o.a. CO_2-, MIG-, TIG- en *plasmalassen*. De toegevoegde gassen bestaan veelal uit CO_2, Ar, He of mengsels van deze gassen.

Weerstandlassen: door de overgangsweerstand wordt het raakstuk van twee voorwerpen tot smelttemperatuur verhit, lasmateriaal wordt toegevoegd.

Weerstandsstuiklassen: de door overgangsweerstand verhitte lasplaatsen worden door druk met elkaar verbonden. Een veel toegepaste variant hierop is het zgn. *puntlassen* waarbij door koperen elektrodes twee voorwerpen plaatselijk op elkaar worden gedrukt en door de elektrische stroom op die plek boven de smelttemperatuur worden verhit. Hierbij wordt geen lasmateriaal toegevoegd.

Laserlassen: hierbij wordt gelast met een lichtstraal waarbij de benodigde energie wordt verkregen via laserpulsen. Voordeel van deze methode is de geringe warmte-ontwikkeling naast de las.

Voor *lasaanduiding* op tekening, zie par. 6.2.

2.5 Solderen

Bij *solderen* worden twee of meer delen met elkaar verbonden door een *soldeerlegering* Men onderscheidt *zacht* en *hard* solderen, afhankelijk van het gebied van de smelttemperatuur van de soldeerlegering (zie hierna). In het tussenliggende temperatuur-gebied zijn slechts enkele zeer speciale soldeerlegeringen bekend. De materialen van de te verbinden delen dienen uiteraard een hogere smelttemperatuur te hebben dan die van de toegepaste soldeerlegering.

Zacht solderen

Men spreekt van *zacht solderen* wanneer de soldeerlegering een smelttemperatuur heeft die lager is dan 350 °C. Tabel 2.9 geeft enkele zacht-soldeerlegeringen.
De soldeerlegering hecht niet op alle metalen. Voor het solderen is een reinigingsmiddel nodig (vloeibaar of als pasta).

Voorbeelden toepassingen: verbindingen bij koperen water-leidingen en in de elektrotechnische industrie.

Hard solderen

Men spreekt van *hard solderen* wanneer de soldeerlegering een smelttemperatuur heeft die hoger is dan 550 °C. Tabel 2.10 geeft enkele hard-soldeerlegeringen.
Hard solderen geeft een sterkere verbinding dan zacht solderen. Bij het hard solderen moet men gebruik maken van een vloeimiddel (vele soorten met verschillende eigenschappen en toepas-singsgebieden).

Voorbeelden toepassingen: rijwielframe, kabeleinden in huls, keramiek aan metaal, verbindingen van messing, staal, RVS.

Tabel 2.9 Zacht-soldeerlegeringen

samenstelling [massa-%]					smelttemperatuur of -traject [°C]	kenmerken
Sn	Pb	Ag	Sb	Zn		
35	65				183–245	algemene toepassingen
50	50				183–215	
60	40				183–190	badsolderen, soldeerdraad
70				30	198–320	solderen van aluminium
96,5		3,5			221	hogere sterkte bij ca, 100 °C
95			5			

Tabel 2.10 Hard-soldeerlegeringen

samenstelling [massa-%]					smelttemperatuur of -trakect [°C]	kenmerken
Cu	Ag	Zn	Cd	Sn		
100					1083	solderen van staal (reductiesolderen)
19	40	21	20		595–630	algemeen m.u.v. Al, Mg, Zn Cd-dampen zijn giftig
28	30	21	21		610–690	idem
21	55	22		2	627–660	idem, Cd-vrij!
40	25	33		2	680–760	
60		40			885–900	goedkoop, massafabricage
28	27				780	duur, vacümapparatuur

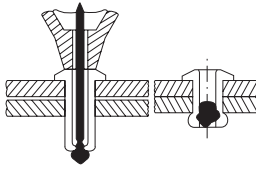
2.6 Klinken, felsen, lijmen

Klinken

Klinkverbindingen (koud of warm) worden steeds minder toegepast (o.a. nog bij restauratie en een enkele speciaalconstructie).

Blindklinken (poppen)

Verbindingen met *popnagels*, d.m.v. een poptang, worden veel toegepast in de plaatwerkindustrie en voor het bevestigen van kleine onderdelen. De verbinding kan éé-zijdig worden uitgevoerd. Zie figuur 2.3.



Figuur 2.3 Popnagelverbinding (blindklinken)

Figuur 2.4 Felsen

Felsen

Felsverbinding maakt men door de randen van twee (of meer) plaatdelen in elkaar te vouwen en om te slaan (veel toegepast in de blik-industrie, kachelpijpen enz.). Zie figuur 2.4.

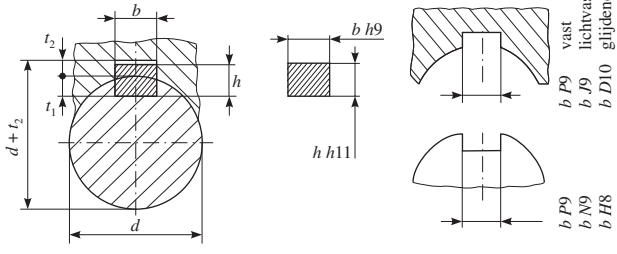
Lijmen

Lijmverbindingen (met de hand of machinaal) worden steeds vaker toegepast, vooral door de ontwikkeling van nieuwe hoogwaardige lijmsoorten voor de meest uiteenlopende materialen. Lijm geeft geen galvanische werking tussen de gelijmde delen. Enkele toepassingen: remvoering en frictieplaten, plaatverbindingen in de vliegtuigindustrie, enz. Zie verder hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 13.

3 Overbrengingen

3.1 Spieën

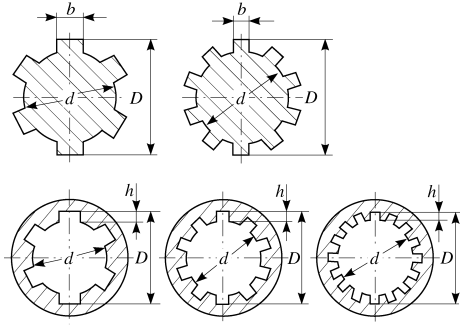
Tabel 3.1 Spieën (maten in mm; *materiaal meestal St60 of C45k)*



asdiameter boven t/m	spieafmetingen $b \times h$	spiebaan in as		spiebaan in naar	
		t_1	tolerantie	$d + t_2$	tolerantie
6– 8	2 × 2	1,2		1	
8– 10	3 × 3	1,8		1,4	
10– 12	4 × 4	2,5	+0,1	1,8	+0,1
12– 17	5 × 5	3		2,3	
17– 22	6 × 6	3,5	——	2,8	——
22– 30	8 × 7	4		3,3	
30– 38	10 × 8	5		3,3	
38– 44	12 × 8	5		3,3	
44– 50	14 × 9	5,5		3,8	
50– 58	16 × 10	6		4,3	
58– 65	18 × 11	7	+0,2	4,4	+0,2
65– 75	20 × 12	7,5		4,9	
75– 85	22 × 14	9		5,4	
85– 95	25 × 14	9		5,4	
95–110	28 × 16	10		6,4	
110–130	32 × 18	11	——	7,4	——
130–150	36 × 20	12		8,4	
150–170	40 × 22	13		9,4	
170–200	45 × 25	15		10,4	
200–230	50 × 28	17	+0,3	11,4	+0,3
230–260	56 × 32	20		12,4	
260–290	63 × 32	20		12,4	
290–330	70 × 36	22		14,4	
330–380	80 × 40	25		15,4	
380–440	90 × 45	28		17,4	
440–500	100 × 50	31		19,5	

3.2 Getande asverbindingen (spline-assen)

Spline-verbindingen komen voor in verschillende soorten vertandingen, waaronder de evolvente vertanding. Figuur 3.1 toont de veel toegepaste *spievertanding* die geschikt is voor het overbrengen van stotende belastingen (aandrijfas vrachtwagen).



Figuur 3.1 Spievertanding met evenwijdige zijvlakken

De afmetingen zijn vastgelegd in enkele normen (Amerikaanse SAE-Standard in inch-maten; DIN-normen 5461 t/m 5464 voor mm-maten).
Uitvoeringen: 6, 8, 10,16 en 20 tanden (zie tabel 3.2a en b). Men moet onderscheid maken tussen de *vaste* en de *beweegbare asverbinding*. Bij de beweegbare verbinding moeten de tanden op de as gehard en geslepen zijn.
Voor de berekening van het door de as over te brengen moment gaat men er van uit dat slechts ¾ van het aantal tanden in aanraking is met de naaf. Het over te brengen moment bedraagt:

$$M_w = \tfrac{3}{4} n \cdot l \cdot \frac{D-d}{2} \cdot \frac{d}{2} \cdot \bar{\sigma}_o \text{ [N·m]}$$

waarin:
n = aantal tanden
l = werkzame tandlengte [m]

D, d = diameter [m]
$\bar{\sigma}_0$ = toelaatbare vlaktedruk [N/m^2]

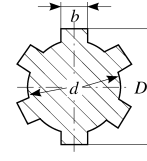
Tabel 3.2a Normale uitvoering

n	b	d	D
6	3	11	14
	3,5	13	16
	4	16	20
	5	18	22
	5	21	25
	6	23	28
	6	26	32
	7	28	34
8	6	32	38
	7	36	42
	8	42	48
	9	46	54
	10	52	60
	10	56	65
	12	62	72
10	12	72	82
	12	82	92
	14	92	102
	16	102	112
	18	112	125

Tabel 3.2b Zware uitvoering

n	b	d	D
10	2,5	16	20
	3	18	23
	3	21	26
	4	23	29
	4	26	32
	4	28	35
	5	32	40
	5	36	45
	6	42	52
	7	46	56
16	5	52	60
	5	56	65
	6	62	72
	7	72	82
20	6	82	92
	7	92	102
	8	102	115
	9	112	125

n = aantal tanden



Tabel 3.3 Passingen en toleranties

		naaf			as					
					binnen-centrering			flank-centrering		
		b	D	d	b	D	d	b	D	d
as beweegbaar in de naaf	gehard	$D9$	$H11$	$H7$	$h8$	$a11$	$f7$	$h8$	$a11$	–
	ongehard	$F10$	$H11$	$H7$	$e8$	$a11$	$f7$	$e8$	$a11$	–
as vast in de naaf	gehard	$D9$	$H11$	$H7$	$p6$	$a11$	$j6$	$u6$	$a11$	–
	ongehard	$F10$	$H11$	$H7$	$h6$	$a11$	$j6$	$k8$	$a11$	–

Tabel 3.4 Toelaatbare vlaktedruk $\bar{\sigma}_0$ [N/mm^2]

belasting	gietijzeren naaf	stalen naaf
stotend	40	70
niet stotend	60	100

3.3 Assen en askoppelingen

Drijfwerkassen

Diameter *drijfwerkassen:*

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_w}{0,2\bar{\tau}_w}}$$

waarin:
d = asdiameter [m]
M_w = over te brengen koppel [N · m]
$\bar{\tau}_w$ = toelaatbare wringspanning [N/m^2]

Verder geldt:

$$M_w = W_w \cdot \bar{\tau}_w = \frac{P}{2\pi n}; W_w = \frac{\pi}{16} d^3$$

en dus:

$$d = 2\sqrt[3]{\frac{P}{\pi^2 \cdot n \cdot \bar{\tau}_w}}$$

waarin:
P = over te brengen vermogen [W]
n = toerental [s^{-1}]

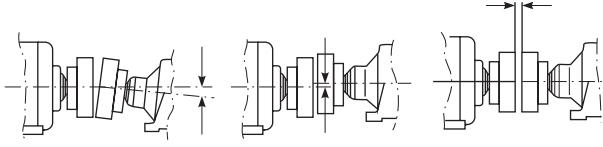
Praktijkformules (maximale verdraaiingshoek per strekkende meter ¼°):

$$d \approx 0{,}129\sqrt[4]{\frac{P}{n}}; \quad d \approx 2{,}31 \cdot 10^{-3}\sqrt[4]{M_w}$$

waarin:
P = over te brengen vermogen [kW]
n = toerental [min^{-1}]
d = asdiameter [m]

Askoppelingen
- Vaste of starre koppelingen.
- Beweegbare koppelingen:
  - scharnier- of cardan-koppeling (enkel of dubbel), zie ook hieronder;
  - flexibele koppelingen;
  - elastische koppelingen.
- Moment-afhankelijke koppelingen o.a.:
  - slipkoppeling;
  - koppelbegrenzende koppeling.
- Toerental-afhankelijke koppelingen:
  - centrifugaal-aanloopkoppeling;
  - hydrokinetische koppelingen.
  - vloeistofkoppelingen.
- In- en uitschakelbare koppelingen (elektromagnetische koppelingen).

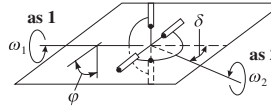
Als twee assen gekoppeld worden, kunnen er bij de montage bepaalde kleine afwijkingen (of combinaties daarvan) optreden (zie figuur 3.2). Deze kunnen opgevangen worden door toepassing van beweegbare koppelingen.



Figuur 3.2 Mogelijke afwijkengen bij askoppelingen

De *cardan-koppeling* heeft als nadeel dat bij éénparige beweging van de ene as de andere oneenparig loopt.
De verhouding van de hoeksnelheden bedraagt:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\cos\delta}{1 - \sin^2\delta \cdot \sin^2\varphi}$$



Figuur 3.3 Cardan-koppeling

waarin:
δ = hoek tussen beide assen
φ = hoek waarover de vork van as 1 uit het vlak van de beide assen is gedraaid

3.4 (Aandrijf) kettingen

Rendement: normaal ca. 98%

Vermogen: zie figuur 3.5, pag. H/35

Levensduur: wordt mede bepaald door de belasting die optreedt in het scharnierpunt:

$$p = \frac{F}{f} \quad [\mathrm{N/mm^2}]$$

waarin:
F = optredende trekkracht in de ketting [N]
f = oppervlakte scharnierpunt [mm^2]

Toelaatbaar is (bij ontoereikende smering en/of vervuiling 50–25% van deze waarden):
- bij zware stoten 7– 12 N/mm^2
- normaal bedrijf 12– 30 N/mm^2
- korte levensduur 30–120 N/mm^2

Kettingsnelheid (bij juist aantal tanden en goede smering):
- gunstig tot 7 m/s
- normaal tot 12 m/s
- mogelijk tot 25 m/s

As-afstand [mm]:

$$a = \frac{t}{4}\left[x - \frac{z_1 + z_2}{2} + \sqrt{\left(x - \frac{z_1 + z_2}{2}\right)^2 - 2\left(\frac{z_2 - z_2}{\pi}\right)^2}\right]$$

Aantal schakels:

$$x = 2\frac{a}{t} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \left(\frac{z_2 - z_1}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{t}{a}$$

Omtrekkracht aan kettingwiel:

$$F = \frac{P}{v} = \frac{2M_{d1}}{d_{o1}} = \frac{2M_{d2}}{d_{o2}}$$

waarin:
P = overgebracht vermogen [W]
M_d = moment [Nm]
d_o = diameter kettingwiel [m]

Middelpuntvliegende kracht:

$$F_c = q \cdot \frac{v^2}{g}$$

waarin:
q = kettinggewicht [N/m]
g = zwaarteveldsterkte ($\approx 9{,}81$ m/s^2)

Totale kracht in ketting:

$$F_t = F + F_c$$

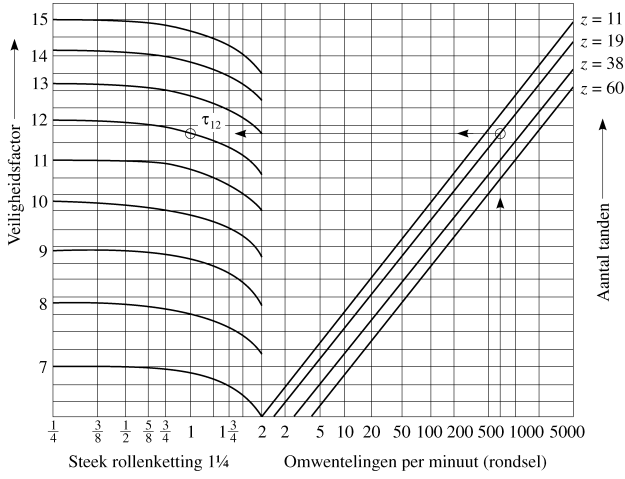
Statische veiligheidsfactor:

$$S_{st} = \frac{F_B}{F_t} \geqq 7$$

waarin: F_B = breukbelasting [N]
Dynamische veiligheidsfactor:

$$S_d = \frac{F_B}{F_t \cdot \gamma} \geqq 5$$

waarin: γ = veiligheidsfactor (zie figuur 3.4, pag. H/31)



Figuur 3.4 Veiligheidsfactor γ (zie ook toelichting hieronder)

Opmerking bij figuur 3.4: geldt voor een levensduur van 15 000 bedrijfsuren, goede smering, stootvrije belasting en een totale kettinglengte van ten minste 100 schakels. Bij andere bedrijfsomstandigheden gelden correctiefactoren voor de veiligheidsfactor:

– geen stoten	1	correctiefactoren
– lichte stoten	1,35	
– midelmatige stoten	1,60	
– zware stoten	1,70	

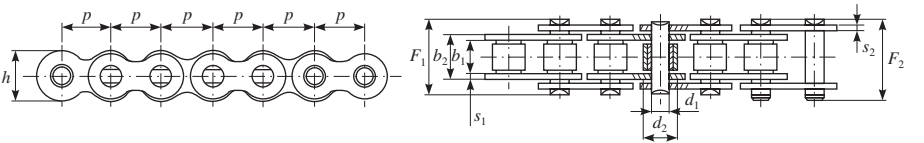
Voor duplex- of triplex rollenkettingen moet de correctiefactor steeds met 1,2 worden vermenigvuldigd.

stootfactor y = 1/correctiefactor

Voor meer uitgebreide berekening, leverancier raadplegen.

Tabel 3.5 Enkrlvoudige (simplex) rollenketting in Europese[1] *uitvoering (maten in* mm *tenzij anders aangege vens)*[2]

Bron: Köbo *Groningen*

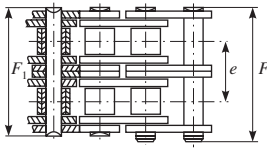


inch	p	b_1 min.	b_2 max.	d_1 h9	d_2 max.	F_1	F_2	h max.	s_1	s_2	f[cm^2]	F_B [kN]	q [kg/m]
–	6	2,80	4,1	1,85	4,00	6,5	7,4	5,0	0,6	0,6	0,08	3	0,12
–	8	3,00	4,7	2,31	5,00	7,6	8,6	7,1	0,8	0,8	0,11	5	0,18
$\frac{3}{8}''$	9,525	5,72	8,5	3,28	6,35	13,4	15,1	8,2	1,3	1,3	0,28	9,3	0,41
$\frac{1}{2}'' \times \frac{1}{8}''$	12,7	3,30	5,8	3,66	7,75	9,3	10,5	9,9	1,0	1,0	0,21	8,2	0,28
$\frac{1}{2}'' \times \frac{3}{16}''$	12,7	4,88	8,8	4,09	7,75	14,5	15,9	11,1	1,9	1,6	0,36	16	0,59
$\frac{1}{2}''$	12,7	7,75	11,3	4,45	8,51	17,0	19,3	11,8	1,6	1,6	0,50	18,2	0,70
$\frac{5}{8}''$	15,875	9,65	13,3	5,08	10,16	19,1	21,5	14,7	1,6	1,6	0,67	22,5	0,95
$\frac{3}{4}''$	19,05	11,68	15,6	5,72	12,06	22,3	25,1	16,1	1,8	1,8	0,89	30,5	1,25
$1''$	25,4	17,02	25,4	8,28	15,88	35,8	40,1	21,0	4,0	3,0	2,10	71,5	2,70
$1\frac{1}{4}''$	31,75	19,56	29,0	10,19	19,05	40,6	46,1	26,4	4,5	3,5	2,96	100	3,60
$1\frac{1}{2}''$	38,1	25,40	37,9	14,63	25,40	53,4	60,1	33,4	5,5	5,0	5,54	180	6,70
$1\frac{3}{4}''$	44,45	30,99	46,5	15,90	27,94	64,5	72,2	37,0	7,0	6,0	7,39	227	8,30
2	50,8	30,99	45,5	17,81	29,21	64,5	73,1	42,2	7,0	6,0	8,10	270	10,5
$2\frac{1}{2}''$	63,5	38,10	55,7	22,89	39,37	79,0	87,1	52,9	8,0	8,0	12,75	395	16,0
$3''$	76,2	45,72	70,5	29,24	48,26	99,7	107,7	63,8	12	10	20,61	630	25,0

[1] Rollenketting volgens DIN8187. De rollenketting volgens DIN 8188 (naar Amerikaanse norm ANSI) heeft t.o.v de Europese ketting kleine afwijkingen, waardoor de ketting en kettingwielen niet uitwisselbaar zijn met de Europese. De Amerikaanse ketting en kettingwielen zijn wel verkrijgbaar. Deze worden meestal toegepast in machines bestemd voor Amerika.

[2] f = scharnierend oppervlak; F_B = breekbelasting (minimaal); q = massa (ca.).

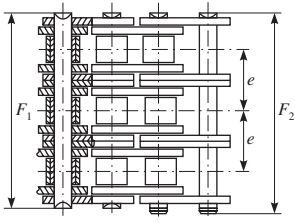
Tabel 3.6 Duplex rollenketting in Europese[1] *uitvoering (maten in* mm *tenzij anders aangegeven)*[2)3)] *Bron:* Köbo *Groningen*



inch	p	F_1	F_2	e	f [cm^2]	F_B [kN]	q [kg/m]
–	8	13,9	14,6	5,64	0,22	9,5	0,36
3/8″	9,525	22,5	24,6	10,24	0,56	18,1	0,78
1/2″	12,7	31,0	32,7	13,92	1,01	35,4	1,35
5/8″	15,875	35,9	37,3	16,59	1,34	43,9	1,85
3/4″	19,05	41,9	43,5	19,46	1,79	56,5	2,50
1″	25,4	67,7	72,1	31,88	4,21	139,5	5,40
1 1/4″	31,75	77,1	83,1	36,45	5,91	195	7,20
1 1/2″	38,1	101,8	109,1	48,36	11,09	351	13,5
1 3/4″	44,45	124,9	131,7	59,56	14,78	443	16,6
2″	50,8	123,1	132,1	58,55	16,21	526	21,0
2 1/2″	63,5	151,3	160,1	72,29	25,50	700	32,0
3″	76,2	191,6	199,0	91,21	41,23	1150	50,0

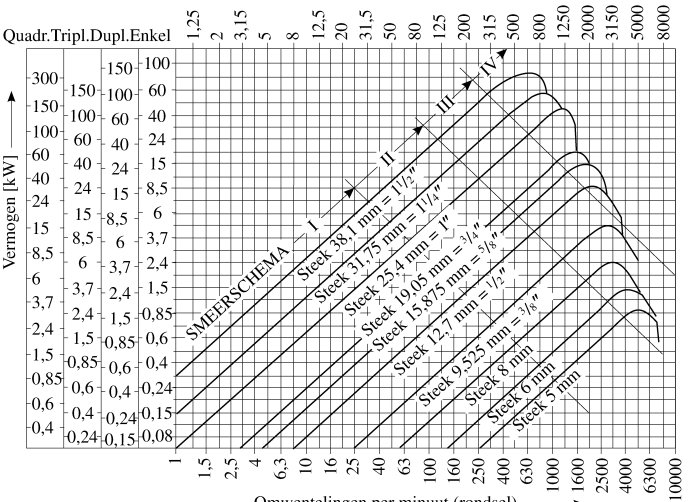
[1)2)] Zie noten tabel 3.5.
[3)] Ontbrekende maten zijn gelijk aan die van de simplexketting (tabel 3.5).

Tabel 3.7 Triplex rollenketting in Europese[1)] *uitoering (maten in* mm *tenzij anders aangege)*[2)3)] *Bron:* Köbo *Groningen*



inch	p	F_1	F_2	e	f [cm^2]	F_B [kN]	q [kg/m]
$\frac{3}{8}''$	9,525	32,7	34,8	10,24	0,84	27	1,2
$\frac{1}{2}''$	12,7	44,9	46,6	12,92	1,51	52,7	2,0
$\frac{5}{8}''$	15,875	52,4	53,9	16,59	2,02	65,3	2,8
$\frac{3}{4}''$	19,05	61,1	63,2	19,46	2,68	84,1	3,8
$1''$	25,4	99,6	104,1	31,88	6,31	207,5	8,0
$1\frac{1}{4}''$	31,75	113,6	119,1	36,45	8,87	290	11
$1\frac{1}{2}''$	38,1	150,2	157,1	48,36	16,63	522	21
$1\frac{3}{4}''$	44,45	183,5	191,2	59,56	22,18	660	25
$2''$	50,8	181,7	191,1	58,55	24,31	784	32
$2\frac{1}{2}''$	63,5	223,6	232,1	72,29	38,25	1116	48
$3''$	76,2	281,6	290,3	91,21	61,84	1720	75

[1)2)] Zie noten tabel 3.5.
[3)] Ontbrekende maten zijn gelijk aan die van de simplexketting (tabel 3.5).



Figuur 3.5 Rollenkettingen in Europese uitvoering

3.5 V-snaren

Voordelen van *V-snaren*:
- lange levensduur;
- geruisloos;
- 'ingebouwde' beveiliging;
- geschikt voor hoge toerentallen.

Nadeel: er treedt altijd enige slip op.

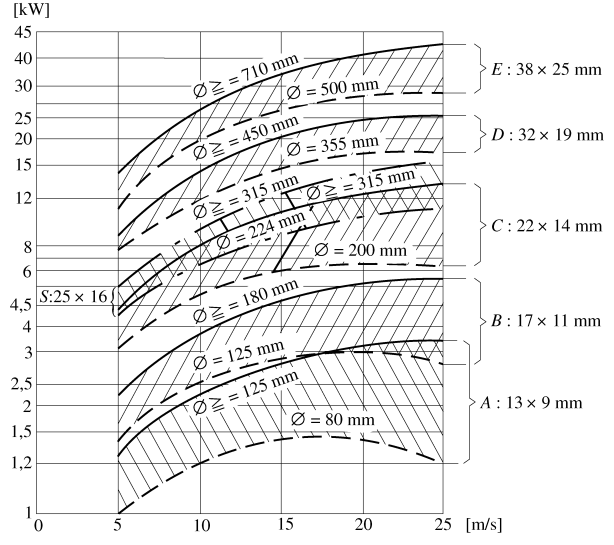
Smalprofielsnaren kunnen per cm snaarbreedte aanzienlijk meer vermogen overbrengen dan de standaardprofielen.

Rendement aandrijving: 60–95%. Het rendement is afhankelijk van o.a. de aard van de aandrijving, de riemspanning en de klimatologische omstandigheden.

Tabel 3.8 Afmetingen V-snaren [mm]

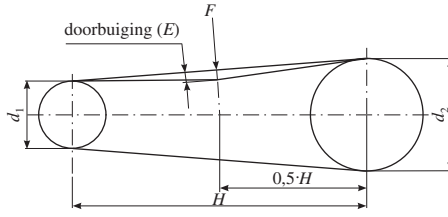
standaardprofiel		smalprofiel		vormvertand smalprofiel	
A	13 × 8	SPZ	9,7 × 8	XPZ	9,7 × 8
B	17 × 11	SPA	12,7 × 10	XPA	12,7 × 10
C	22 × 14	SPB	16,3 × 13	XPB	16,3 × 13
D	32 × 20	S19	18,6 × 13		
E	40 × 25	SPC	22 × 18		

Door de wigwerking is de wrijving tussen V-snaar en schijf veel groter dan bij vlakke riemen. De zijkanten van de V-snaar maken een hoek van 38° met elkaar.
Er worden zoveel snaren naast elkaar op een schijf aangebracht als er nodig zijn om het gevraagde vermogen over te brengen. Men moet er goed op letten dat alle V-snaren van een bundel dezelfde lengtetoleranties hebben. Dit wordt op de V-snaar aangegeven met een code-getal.
Het aantal buigingen, dat de snaar ondergaat, moet niet meer zijn dan 40 per seconde, i.v.m. de grotere warmteontwikkeling door interne wrijvingsverliezen. De riemsnelheid ligt gewoonlijk tussen 2 en 25 m/s.



Figuur 3.6 Keuze van V-snaren voor een omspannen hoek van 180°

Door ontwikkelingen van nieuwe materialen is het mogelijk geworden de overbrengingscapaciteit te verhogen. De vormvertande smalprofiel V-riem, X-type, heeft hierdoor een hogere overbrengingscapaciteit bij dezelfde afmeting. Deze riem is door zijn tandvorm veel buigzamer dan de smalprofielriem. Dit voordeel maakt het mogelijk om kleinere schijven toe te passen.
Voor keuze van vormvertande smalprofiel V-riemen kan het best gebruik gemaakt worden van de gegevens van de leverancier.



Figuur 3.7 Berekening doorbuiging E

Tabel 3.9 Bepaling E_{100}

profiel	drukkracht per V-riem	diameter d_1 [mm]	indrukking per 100 mm asafstand E_{100} [mm]
XPZ	25	63– 71	2,00
		71– 90	1,75
		90–125	1,45
		>125	1,30
XPA	50	80–100	2,75
		100–140	2,30
		140–200	2,10
		>200	2,00
XPB	75	112–160	2,00
		160–224	1,55
		224–355	1,20
		>355	1,10

Formule voor het bepalen van richtwaarde van juiste riemspanning:

$$E = \frac{E_{100} \cdot H}{100}$$

Voor E_{100} zie tabel 3.9.

waarin:
E = totale indrukking van V-riem in midden van hartaf stand [mm]
E_{100} = indrukking van V-riem per 100 mm [mm]
H = hartafstand [mm]

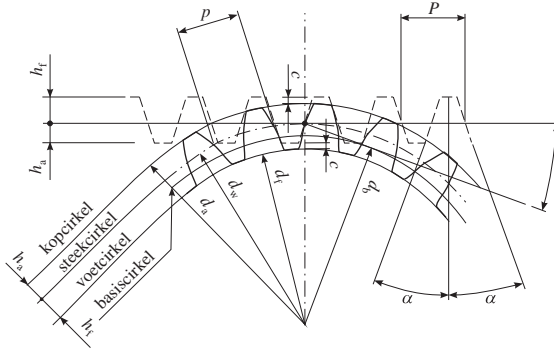
3.6 Tandriemen

Tandriemen zijn kunststof riemen die door een tandenprofiel zonder slip vermogen overbrengen. In de kunststofriem is een meestal spriaalsgewijs lopende trekdraad opgenomen, die de trekkracht opneemt.
Voordelen:geringe massa, geluidsarm bedrijf, slipvrij en een hoog rendement van ca. 98%. Tandriemen mogen – uiteraard – ongesmeerd lopen.
Toepassingen o.a. in verpakkingsmachines, in de levensmiddelenindustrie en als nokkenasaandrijving bij verbrandingsmotoren.

Tabel 3.10 Overgedragen vermogen tandriemaandrijgen

steek [mm]	code	breedte [mm]	riemschijf [aantal tanden]	toerental [min^{-1}]	vermogen/breedte [kW/mm]
2½	T 2,5	3–10	30	15 000	0,3/ 10
5	T 5	6–16	30	10 000	4,5/ 16
10	T10	10–75	30	8 000	65 / 75
20	T20	25–100	30	4 500	300 /100
⅕″	XL	¼″–⅜″	30	10 000	0,7/⅜″
⅜″	L	½″–1″	30	6 000	4,5/1″
½″	H	¾″–3″	30	6 000	55 /3″
⅞″	XH	2″–4″	30	2 500	75 /4″
1¼″	XXH	2″–5″	30	2 000	120 /5″

3.7 Tandwielen, tandwieloverbrengingen, planeetwielen



Figuur 3.8 Detail tandwiel met symbolen

Rechte tandwielen

Met *rechte tandwielen* worden assen gekoppeld die in één vlak liggen.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = i$$

index 1: drijvende as
index 2: gedreven as

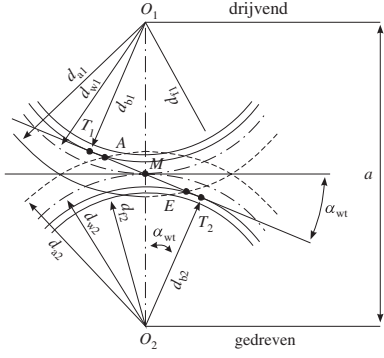
waarin:
ω = hoeksnelheid [rad/s]
n = toerental [min^{-1}]
z = aaantal tanden

Ook geldt (bij verwaarlozing wrijvingsverliezen):

$$\frac{F_2 \cdot r_2}{F_1 \cdot r_1} = \frac{M_2}{M_1} = i$$

waarin:
F = kracht die werkt aan omtrek van beide wielen [N]
r = straal tandwiel [m]
M = moment op de as [N · m]

Rechte vertanding tanden zijn evenwijdig met de as waarop de wielen gemonteerd zijn (in tegenstelling tot scheve vertanding).



Figuur 3.9 Detail drijfwerk met symbolen

Indien de punten A en E buiten het lijnstuk T_1-T_2 liggen, treedt ondersnijding op. In dat geval V-drijfwerk toepassen.

Grondbeginsel tandconstructies: de loodlijnen, in elk raakpunt van de tandprofielen op de gemeenschappelijke raaklijnen getrokken, moeten alle door hetzelfde punt M van de verbindingslijn van de middelpunten O_1 en O_2 gaan. Alleen dan geldt:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{M \cdot O_1}{M \cdot O_2} = i \quad p = \pi \cdot \frac{d_w}{z}$$

waarin:
p = steek (vaak opgegeven in π veelvouden)
d_w = diameter steekcirkel [mm]
z = aantal tanden [mm]

$$\text{Modulus: } m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z}$$

Aanbevolen moduli (NEN 1630): 1 – 1,25 – 1,5 – 2 – 2,5 – 3 – 4 – 5 – 8 – 10 – 12 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 mm.

Berekeningen van rechte tandwielen met rechte tanden (druk-hoek 20°):

$$P = M_d \cdot \omega \cdot 10^{-3} = M_d \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot 10^{-3}; M_d = \frac{9550P}{n}$$

waarin:
M_d = toegevoerd koppel [N · m]
ω = hoeksnelheid [rad/s]
P = toegevoerd vermogen [kW]
n = toerental ingaand [min^{-1}]
b = tandbreedte [mm]
d_w = steekcirkel drijvend wiel [mm]
i = overbrengingsverhouding
k = factor volgens

Tabel 3.11 Factor k voor levensduur 5000 uren

n	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200
k	16,15	12,75	11,25	10,14	9,45	8,85	8,40	8,10	7,75	7,27	7,05

De volgende berekeningen geven waarden ter bepaling van nul-wielen en nul-drijfwerken voor zowel rechte- als schuine tanden.

Nul-wielen

Rechte tanden

steek $$p = \frac{\pi \cdot d}{z} = m \cdot \pi$$

moduul $$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z}$$

kophoogte	$h_a = h_{at} = m$
voethoogte	$h_f = h_{fp} = m + c$
topspeling	$c = (0,1 \ldots 0,3) \cdot m \approx 0,2 \cdot m$
steekcirkel-$\varnothing$	$d = m \cdot z$
kopcirkel-$\varnothing$	$d_a = d + 2 \cdot h_a$
voetcirkel	$d_f = d - 2 \cdot h_f$
drukhoek	$\alpha = \alpha_n = \alpha_t = \alpha_p$
basiscirkel-$\varnothing$	$d_b = d \cdot \cos\alpha$
ter vermijding van ondersn. grenstandental (theoretisch)	$zg = \dfrac{2}{\sin^2\alpha} \approx 17$
praktisch bij $\alpha_p = 20^\circ$	$zg' \approx 14$
Schuine tanden	
normaalsteek	$P_n = m_n \cdot \pi$
omtreksteek	$P_t = \dfrac{m_n \cdot \pi}{\cos\beta}$
normaalmoduul	$m_n = \dfrac{p_n}{\pi} = \dfrac{d}{z} \cdot \cos\beta$
omtrekmoduul	$m_n = \dfrac{m_n}{\cos\beta} = \dfrac{d}{z}$
kophoogte	$h_a = h_{at} = m$
voethoogte	$h_f = h_{fp} = m + c$

topspeling

$$c = (0,1 \ldots 0,2) \cdot \mathrm{m} \approx 0,2 \cdot m$$

steekcirkel-∅

$$d = \frac{m_\mathrm{n} \cdot z}{\cos\beta} = m_\mathrm{t} \cdot z$$

kopcirkel-∅

$$d_\mathrm{a} = d + 2 \cdot h_\mathrm{a}$$

voetcirkel

$$d_\mathrm{f} = d - 2 \cdot h_\mathrm{t}$$

drukhoek

$$\alpha_\mathrm{n} = \alpha_\mathrm{p}$$
$$\tan\alpha = \frac{\tan\alpha_\mathrm{n}}{\cos\beta}$$

basiscirkel-∅

$$d_\mathrm{b} = d \cdot \cos\alpha_\mathrm{t}$$

vervangingstandental

$$z_\mathrm{nx} = \frac{z}{\cos^2\beta_\mathrm{b} \cdot \cos\beta}$$

ter vermijding van ondersn. grenstandental bij $\alpha_\mathrm{p} = 20^\circ$ (praktisch)

$$z_{\mathrm{gs}'} \approx 14 \cdot \cos^3\beta$$

Nul-drijfwerk

Rechte tanden

as-afstand

$$a_\mathrm{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} = m\frac{z_1 + Z_2}{2}$$

V-aandrijfwerk, rechte tanden

profielverschuiving

$$x \cdot m$$

profielversch. factor ter vermijding van ondersnijding

$$x_\mathrm{min} = \frac{z \cdot \sin^2 a}{2} + \frac{h_\mathrm{a0} - Q_\mathrm{a0} \cdot (1 - \sin\alpha)}{m}$$

kan maximaal 0,17 kleiner zijn

idem bij $\alpha_p = 20^\circ$ indien gereedschapmachine gegevens ontbreken

$$z \approx \frac{14 - z}{17}$$

bij gegeven as-afstand

$$x_1 + x_2 = (z_1 + z_2) \cdot \frac{(\text{inv}\alpha_{wt} - \text{inv}\alpha_t)}{2 \cdot \tan \alpha_n}$$

α_{wt} wordt berekend uit

$$\cos \alpha_{wt} = \frac{(z_1 + z_2) \cdot m_t}{2 \cdot a} \cdot \cos \alpha_t$$

of

$$\text{inv}\, \alpha_{wt} = 2 \cdot \frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \cdot \tan \alpha_n + \text{inv}\, \alpha_t$$

Schuine tanden

as-afstand

$$a_d = \frac{d_1 + d_2}{2} = m_n \frac{z_1 + z_2}{2 \cdot \cos \beta}$$

V-aandrijfwerk, schuine tanden

profielverschuiving

$$x \cdot m_n$$

profielversch. factor ter vermijding van ondersnijding

$$x_{min} = -\frac{z \cdot \sin^2 \alpha}{2 \cdot \cos \beta} + \frac{h_{a0} - Q_{a0} \cdot (1 - \sin \alpha)}{m_n}$$

kan maximaal 0,17 kleiner zijn

idem bij α_p = 20° indien gereedschapmachinegegevens ontbreken

$$x \approx \frac{14 - \left(\frac{z}{\cos^3 \beta}\right)}{17}$$

bij gegeven as-afstand

$$x_1 + x_2 = (z_1 + z_2) \cdot \frac{\text{inv}\, \alpha_{wt} - \text{inv}\, \alpha_t}{2 \cdot \tan \alpha_n}$$

α_{wt} wordt berekend uit

$$\cos \alpha_{wt} = \frac{(z_1 + z_2) \cdot m_t}{2 \cdot a} \cdot \cos \alpha_t$$

of

$$\text{inv}\, \alpha_{wt} = 2 \cdot \frac{x_1 + x_2}{z_1 + z_2} \cdot \tan \alpha_n + \text{inv}\, \alpha_n$$

Voor rechte en schuine tanden

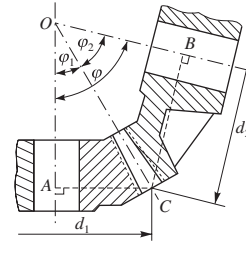
as-afstand	$a = a_d \cdot \frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{wt}}$
kophoogtecorrect.	$k \cdot m_n = a - a_d - m_n \cdot (x_1 + x_2)$
	Deze formule geeft het juiste voor teken! Bij 2 uitwendige tandwielen wordt $k \cdot m_n < 0$.
	Bij $k < 0{,}1$ kan dikwijls de kophoogtecorr. vervallen
kophoogte	$h_a = h_{ap} + x \cdot m_n + k \cdot m_n$
voethoogte	$h_f = h_{fp} - x \cdot m_n$
kopcirkel-$\varnothing$	$d_a = d + 2 \cdot h_a$
voetcirkel-$\varnothing$	$d_f = d - 2 \cdot h_f$

Kegelwielen

Bij *kegelwielen* kunnen de assen elkaar onder een willekeurige hoek snijden. De wielen bewegen alsof ze elkaar raken als twee kegels waarvan de halve tophoeken φ_1 en φ_2 zijn.

Er geldt:

$$\left.\begin{aligned} i &= \frac{z_1}{z_2} \\ d &= \frac{z \cdot t}{\pi} \end{aligned}\right\} \Rightarrow i = \frac{d_2}{d_1}$$



Figuur 3.10 Detail kegelwiel

waarin:

i = overbrengingsverhouding
z_1, z_2 = aantal tanden van de wielen
t = tandsteek

Uit figuur 3.10 volgt:

$$\left.\begin{aligned} d_1 &= 2AC = 2OC \cdot \sin\varphi_1 \\ d_2 &= 2BC = 2OCc \cdot \sin\varphi_2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \tan\varphi_2 = \frac{i \cdot \sin\varphi}{1 = i \cdot \cos} \quad (\varphi_1 = \varphi - \varphi_2)$$

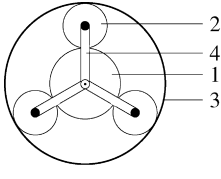
Voor $\varphi = 90^\circ$ geldt: $\tan\varphi_2 = i$ en $\tan\varphi_1 = \dfrac{1}{i}$

Behalve kegelwielen met rechte tanden komen er ook kegelwielen met scheve, en met *gebogen tanden* voor. Voordelen: geleidelijker overdracht van de kracht op tand na tand en een geruislozer loop. Ook is bij een bepaald over te brengen vermogen de bouwgrootte kleiner. Deze wielen moeten zeer zorgvuldig op elkaar afgesteld worden zodat de tanden op de juiste plaats belast worden.
Bij kegeltandwielen moet eveneens rekening worden gehouden met grote axiale krachten in de lagering, die de toepassing van kegellagers (zie par. 4.1) snel noodzakelijk maken.
Voor bepaling van het over te brengen vermogen door een stel kegelwielen kan men de gegevens van de fabrikanten raadplegen.

Planeetwielen

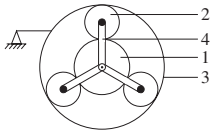
Planeetwielmechanismen zijn constructies met tandwielen waarmee in een relatief kleine ruimte grote vermogens kunnen worden overgebracht (zie figuur 3.11)

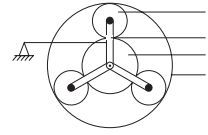
Met meer planeetwielen (twee tot vijf) kan een evenredig groter vermogen worden overgebracht.

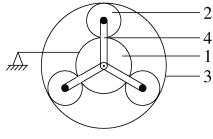


1 zonnewiel
2 planeetwiel
3 satellietwiel
4 planeetwieldrager

Figuur 3.11 Planeetwielmechanisme







$\omega_3 = 2 \cdot \omega_4 (z_1 + z_2)/z_3$

Planeetdrager aangedreven, zonnewiel vast

ω = hoeksnelheid [rad/s]
z = aantal tanden
index 1: zonnewiel
2: planeetwiel
3: satellietwiel
4: planeetdrager

NB $z_3 = z_1 + 2z_2$

Figuur 3.12 Planeetwielconstructies

Met planeetwielconstructies kan men verschillende toerentallen realiseren met dezelfde constructie, door bepaalde onderdelen vast te houden en andere aan te drijven (zie figuur 3.12).

Tandwielen met schroefvertanding

Hier worden twee elkaar kruisende assen gekoppeld. Schroefvertanding (*worm en wormwielen*) is een speciale manier van overbrenging (zie voor nadere gegevens de vakliteratuur).
Minimale overbrengverhouding voor een enkelvoudige wormoverbrenging is ca. 1:5.

Smering

Meestal lopen de tandvelgen door de olie waarmee de kast gedeeltelijk is gevuld. Wanneer de omtreksnelheid van de wielen meer dan 12–15 m/s bedraagt, is het beter om met een pomp een straal olie tegen de tanden te spuiten (op de plaats waar ze elkaar raken).

Rendement

Met normaal bewerkte wielen bereikt men een rendement van ca. 95% per trap. De olie-hoeveelheid en de behuizing moeten dan zo gedimensioneerd zijn, dat 5% van het doorgevoerde vermogen als warmte kan worden afgevoerd. De maximaal toelaatbare olietemperatuur daarbij is ca. 90 °C.

4 Diverse machine-elementen

4.1 Lagers

Glijlagers

Glijlagers zijn in een groot aantal uitvoeringen verkrijgbaar. Ze worden geleverd in diverse materiaalsoorten; het loopvlak is van metaal, kunststof of een combinatie daarvan. Glijlagers kunnen vaal grote belastingen opnemen. Uitgebreide gegevens zijn bij de leverancier verkrijgbaar.

Keramische glijlagers

Bij zeer extreme omstandigheden (bijzonder hoge temperatuur, agressieve omgeving, hoge belasting) kunnen geen lagers worden toegepast van kunststof, staal of andere metalen. In dergelijke gevallen kan men kiezen voor *keramische glijlagers*. Deze zijn samengesteld uit carbiden, nitriden of oxiden.
Enkele kenmerken van *keramiek* zijn: hard, slijtvast, bestand tegen chemicaliën en hoge temperaturen (tot ca. 1400 °C), vorm-vast, lage wrijvings-en uitzettingscoëfficiënt, elektrisch isolerend, goede warmtegeleiding, lage soortelijke massa, geen smering nodig. Zie ook hoofdstuk E1, par. 4 *Technische keramiek*.

Wentellagers

Toepassing: zie tabel 4.1.

Tabel 4.1 Toepassing wentellagers

belasting	wentellager
radiale belasting grotere belasting	kogellagers cilinderlagers (rol- of naaldlagers)
zuiver axiale belasting lichtere belasting grotere belasting	taatslagers kogeltaatslagers cilinder- of naaldtaats-lagers
zeer zware axiale belasting èn bepaalde gelijktijdig optredende **radiale** belastingen	tontaatslagers

Equivalente *dynamische lagerbelasting:*

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

waarin:
P = equivalente dynamische lagerbelasting [N]
F_r = werkelijke radiale belasting [N]
F_a = werkelijke axiale belasting [N]
X = radiale belastingsfactor
Y = axiale belastingsfactor
} zie lagertabellen fabrikant

Equivalente *statische* lagerbelasting P_o: zie tabel 4.2.
(wanneer $P_o < F_r$: rekenen met $P_o = F_r$)

Nominale levensduur:

$$L = \frac{10^6}{60 \cdot n} \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

waarin:
L = nominale levensduur [bedrijfsuren]
n = toerental [min^{-1}]
C = dynamisch draaggetal van het lager [N]
P = equivalente dynamische lagerbelasting [N]
p = levensduurexponent (kogellagers: 3; rollagers: 10/3)

Montage: lagers moeten zó gemonteerd worden dat de ring waarvan elk punt beurtelings belast wordt, met een *klempassing* gemonteerd wordt. Dit om walsen van het lager te voorkomen. De andere ring mag met een *schuifpassing* gemonteerd worden. Van twee lagers op een as van enige lengte ($l > d$) moet één van de beide lagers als vast lager worden uitgevoerd. Het andere lager wordt uitgevoerd als los lager, om het uitzetten van de as door temperatuurschommelingen te kunnen opvangen.

Laat de monteer- en demonteerkrachten nooit door de rollichamen overdragen:oefen deze direct uit op het juiste onderdeel.

Moet bij wijze van uitzondering van deze regel worden afgeweken, draai het lager dan tijdens de montage of demontage, om plaatselijke beschadiging te voorkomen.

Smering: door smering wordt direct metallisch contact tussen rollichamen, lagerringen en kooi voorkomen. Het smeermiddel beschermt het lager tegen slijtage en corrosie. De benodigde hoeveelheid is relatief gering. Wanneer bij montage de ruimte tussen de binnen- en buitenring geheel wordt gevuld met kogellagervet, zal de nasmeerperiode in het algemeen bij 5 à 10 000 bedrijfsuren liggen ($d \leqq 60$ mm; $n \leqq 2000\ \text{min}^{-1}$). In hoofdzaak komen *metaalzeepvetten* in aanmerking van de consistentieklassen 1, 2 en 3. Temperatuurbereik vetten:

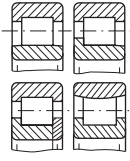
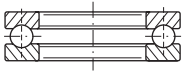
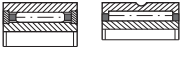
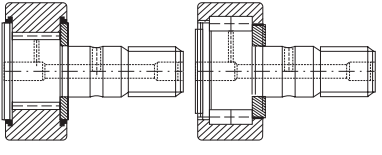
- Natriumzeepvetten: $-\ 30^\circ\text{C} \leqq \text{temp.} \leqq +\ 80^\circ\text{C}$
- Lithiumzeepvetten: $-\ 30^\circ\text{C} \leqq \text{temp.} \leqq +\ 110^\circ\text{C}$
- Synthetische vetten hebben grotere temperatuurbereiken.

Onder zeer extreme omstandigheden (zie onder 'keramische glijlagers' hiervoor) kunnen ook hier (gedeeltelijk) uit keramiek vervaardigde wentellagers worden gekozen, met voor elke toepassing een speciale uitvoering.

Tabel 4.2 Wentellager-uitvoeringen

soort		toelaatbare hoekafwijking[1)]	lagerbelasting (zie tekst)
	groefkogellager		$P = X \cdot F_\text{r} + Y \cdot F_\text{a}$ $P_0 = 0,6\,F_\text{r} + 0,5\,F_\text{a}$
	tweerijig zich instellend kogellager	ca. $2\frac{1}{2}^\circ$	$P = X \cdot F_\text{r} + Y \cdot F_\text{a}$ $P_0 = X_0 \cdot F_\text{r} + Y_0 \cdot F_\text{a}$
	eenrijig hoekcontact kogellager		$P = X \cdot F_\text{r} + Y \cdot F_\text{a}$ $P_0 = 0,5\,F_\text{r} + Y_0 \cdot F_\text{a}$
	tweerijig tonlager	ca. 1°	$P = X \cdot F_\text{r} + Y \cdot F_\text{a}$ $P_0 = X_0 F_\text{r} + Y_0 F_\text{a}$

Tabel 4.2 (vervolg)

soort	toelaatbare hoekafwijking[1)]	lagerbelasting (zie tekst)
eenrijig tonlager	ca. 4°	$P = F_r + 9,5\,F_a$ $P_0 = F_r + 5\,F_a$
 eenrijige cilinderlagers		$P = F_r$ $P_0 = F_r$
tweerijige cilinderlager		$P = F_r$ $P_0 = F_r$
kegellager		$P = X_0 \cdot F_r + Y \cdot F_a$ $P_0 = 0,5\,F_r + Y_o \cdot F_a$
 kogeltaatslager		$P = F_a$ $P_0 = F_a$
 naaldlagers met spoorkragen met binnenring		
 nokrollen of curverollen		

[1)] Raadpleeg ook leverancier.

4.2 Remmen

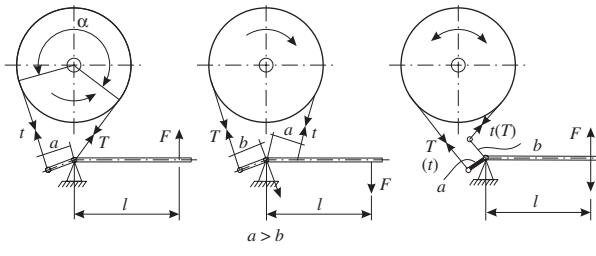
Bij het *remmen* kunnen zeer grote krachten optreden op de lagers en de as van het af te remmen lichaam. Hierbij moet men rekening houden bij de berekening van assen en lagers.

Bandremmen

Bij *bandremmen* wordt een stalen band met remvoering om een remschijf geslagen. Door deze band met een hefboom aan te trekken wordt door de wrijvingskracht F_w een remmend koppel op het remwiel aangebracht.

$F_w = T - t$ waarbij $T = t \cdot e^{f \cdot \alpha}$

(voor staal op gietijzer geldt $e^{f \cdot \alpha} \approx 2{,}2$)



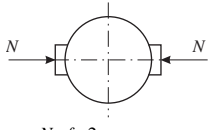
$F = t \cdot a/l$	$F = (t \cdot a - T \cdot b)/l$	$F = a(T + t)/l$
gewoon	**differentiaal**	**voor twee draairichtingen (remkracht in beide richtingen gelijk: $a = b$)**

α = omspannen-hoek
f = wrijvingsoëfficiënt
M_{rem} = remmend moment
t, T = trekkracht in de band
N = normaalkracht

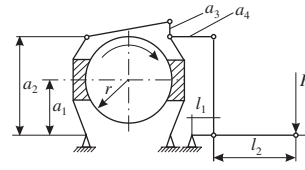
F = kracht (alg.)
F_c = cilinderkracht
F_v = veerkracht

Figuur 4.1 Soorten bandremmen

Blokremmen

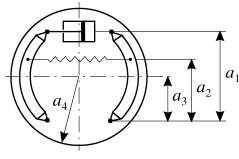


$$M_{\text{rem}} = N \cdot f \cdot 2 \cdot r$$



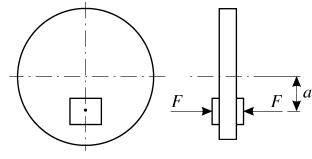
$$N = F\frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{a_4}{a_3} \cdot \frac{(l_1 + l_2)}{l_1}$$

Figuur 4.2 Remwiel met twee blokken (spoorwagons)



$N = (F_c \cdot a_1 - F_v \cdot a_2)/a_3$ F_c = cilinderkracht
$M_{\text{rem}} = N \cdot f \cdot 2 \cdot a_4$ F_v = veerkracht

Figuur 4.3 Trommelrem (blokken liggen in het remwiel)



$M_{\text{rem}} = N \cdot f \cdot 2 \cdot a \quad (N = F)$

Figuur 4.4 Schijfrem

Elektrisch remmen

Een elektromotor kan in principe een remmend vermogen leveren door als generator te werken. Het elektrisch vermogen wordt dan teruggeleverd; hoe meer vermogen daarvan wordt opgenomen, des te groter de remkracht.

4.3 Afdichtringen

Afdichtring zijn in vele uitvoeringen verkrijgbaar. Bij de keuze van een afdichtring is van belang:
- statische of dynamische afdichting (zie hierna);
- hoge of lage drukken van het medium;
- temperatuur;
- aard van het medium in verband met de materiaalkeuze van de ring.

Statische afdichtingen

Voor een *statische afdichting* wordt, naast de plaatafdichting, vaak gebruik gemaakt van een O-ring. Deze is verkrijgbaar in vele compounds. Bij drukverschillen tot ca. 160 bar zijn O-*ringen* met een hardheid van 70° Shore A goed bruikbaar. Bij hogere drukken gebruikt men types met een hardheid van 90° Shore A.

Zie hoofdstuk E1, par. 12 *Verbinding en bevestiging*, tabel 12.21.

Dynamische afdichtingen

Bij *dynamische afdichtingen* kan onderscheid worden gemaakt tussen:
- *Translerende* delen met afdichtingen voor zuigers, zuigerstangen en schraapringen.
- *Roterende* delen met toepassingen voor oliekeerringen en stofkeerringen.

O-ringen (zie hiervoor) zijn in beperkte mate bruikbaar voor dynamische afdichtingen. Hiervoor raadplege men leveranciers.

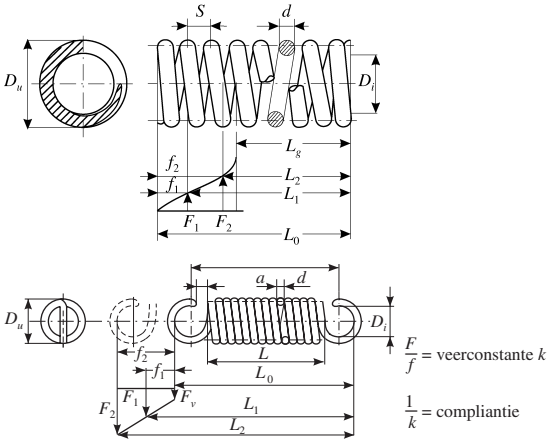
4.4 Veren

Veren zijn in veel soorten en vormen in de handel verkrijgbaar, o.a.: drukveren, trekveren, buigveren, torsieveren, bladveren, schotelveren.

Veerberekeningen[1] (alle maten in mm)

d = draaddikte
D_i = inwendige veer-diameter
D_u = uitwendige veer-diameter
(kies D_u zo mogelijk niet kleiner dan $5d$)
n_w = aantal werkzame windingen
n_t = n_w + het aantal niet werkzame windingen
L_o = ongespannen lengte
L_1 = gespannen lengte bij F_1
L_2 = gespannen lengte bij F_2
f_1 = uittrek/indruk bij F_1
f_2 = uittrek/indruk bij F_2
S = spoed van de windingen
F = kracht [N]
σ = buigspanning [N/mm^2]
τ = schuifspanning [N/mm^2]
G = glijdingsmodules [N/mm^2]
ϑ = hoek [rad]
E = elasticiteitsmodules [N/mm^2]

[1] Gegevens afkomstig van TEVEMA, Amsterdam.



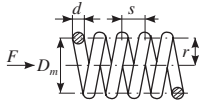
Figuur 4.5 Veren

Tabel 4.3 Veerberekeningen

1 Cilindrische schroefvormige veer op trek of druk belast met ronde doorsnede

$$F = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{d^3}{r} \tau$$

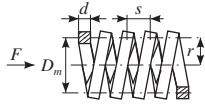
$$f = \frac{64 n_w r^3 F}{d^4 G}$$



2 Als 1 met vierkante doorsnede

$$F = \frac{d^3}{4{,}8r} \tau$$

$$f = \frac{44{,}9 n_w r^3 F}{d^4 G}$$

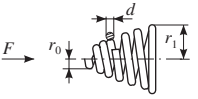


Tabel 4.3 (vervolg)

3 Conische schroefvormige veer op trek of druk belast met ronde doorsnede

$$F = \frac{\pi d^3}{16 r_1}\tau$$

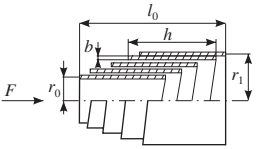
$$f = 16\frac{n_w(r_1 + r_0)(r_1^2 + r_0^2)F}{d^4 G}$$



4 Als 3, echter met rechthoekige doorsnede (bufferveren)

$$F = \frac{2}{9}\cdot\frac{b^2 h}{r_1}\tau$$

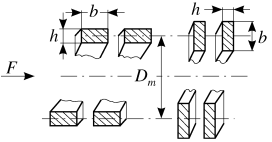
$$f = \frac{2}{5}\pi n_w \frac{b^2 + h^2}{bh^2}(r_1 + r_0)(r_1^2 + r_0^2)\frac{\tau}{G r_1}$$



5 Als 1, echter met rechthoekige doorsnede (voor de waarden φ en ψ, zie figuur 4.6, pag. H/63

$$F = \frac{bh\sqrt{bh}}{\psi D_m}$$

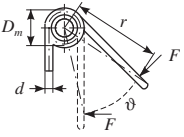
$$f = \varphi\frac{FDm^3 n_w}{b^2 h^2 G}$$



6 Schroefvormig gewonden buigveer met ronde doorsnede

$$F = \frac{\pi}{32}\cdot\frac{d^3}{r}\sigma$$

$$\vartheta = \frac{2D_m \pi n_w}{Ed}\sigma$$

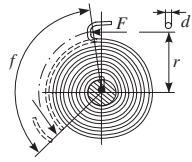


Tabel 4.3 (vervolg)

7 Spiraalvormig gewonden buigveer met ronde doorsnede (wekkerklok veer)
$L =$ verende lengte

$$F = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d^3}{r} \sigma$$

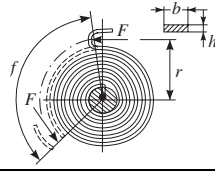
$$f = \frac{2rL}{Ed} \sigma$$



8 Als 7, echter met rechthoekige doorsnede

$$F = \frac{b^2 h}{6r} \sigma$$

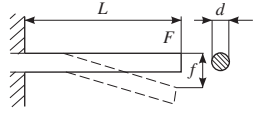
$$f = \frac{2rL}{Eh} \sigma$$



9 Buigveer met ronde doorsnede, eenzijdig ingeklemd (big een waarde $L/f \geqslant 5$ is de afwijking $\leqslant 4\%$)

$$F = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d^3}{L} \sigma$$

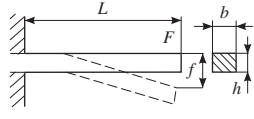
$$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{L^2}{dE} \sigma$$



10 Buigveer met rechthoekige doorsnede

$$F = \frac{bh^2}{6L} \sigma$$

$$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{L^2}{hE} \sigma$$

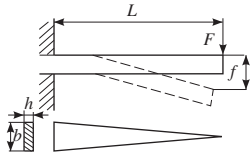


Tabel 4.3 (vervolg)

11 Buigveer in driehoekige vorm met rechthoekige doorsnede

$$F = \frac{bh^2}{6L}\sigma$$

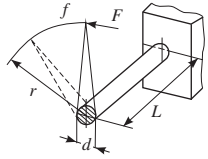
$$f = \frac{L^2}{hE}\sigma$$



12 Torsietaaf met ronde doorsnede

$$F = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{d^2}{r}\tau$$

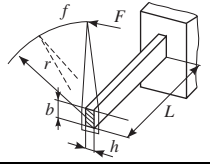
$$f = \frac{2Lr}{dG}\tau$$



13 Als 12 met rechthoekige doorsnede (voor η_2 en η_3, zie table 4.5)

$$F = \frac{\eta_2 bh^2}{r}\tau$$

$$f = \frac{\eta_2}{\eta_3} \cdot \frac{rL}{Gh}\tau$$

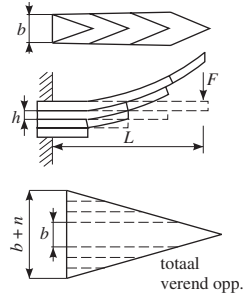


14 Buigveer met meerdere bladen in driehoekige vorm met een rechthoekige doorsnede

n = aantal bladen

$$F = \frac{\eta bh^2}{6L}\sigma$$

$$f = \frac{0{,}9L^2}{hE}\sigma$$



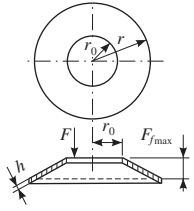
Tabel 4.3 (vervolg)

15 Schotelveren

$$F = \frac{h^2}{1 - \frac{2r_0}{3r}}\sigma$$

$$f = \frac{0,65r^2}{Eh\left(1 - \frac{2r_0}{3r}\right)}\sigma$$

$F_{f\max}$ = maximum indrukking



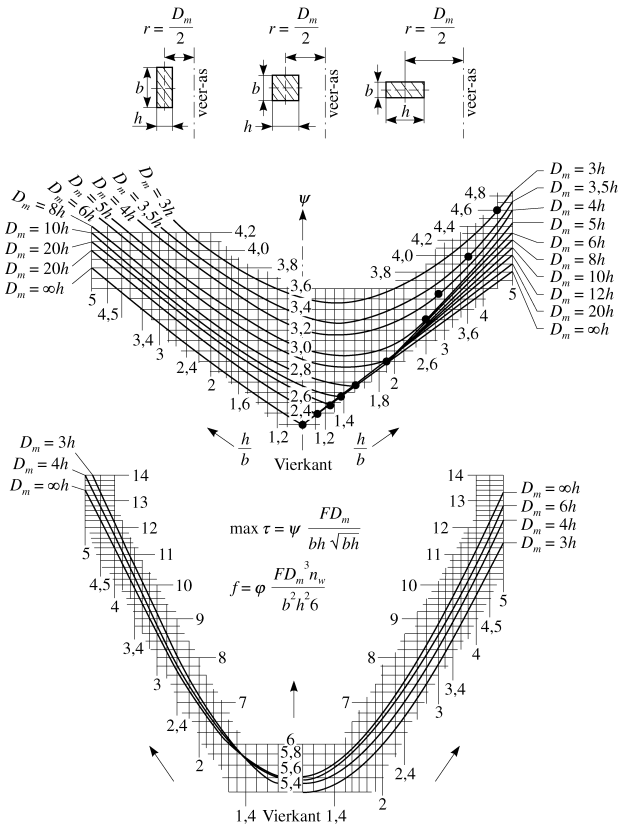
Tabel 4.4 Materiaalsoorten voor veren

materiaalsoort		G [kN/mm^2]	E [kN/mm^2]	max. $\sigma^{1)}$ [N/mm^2]	max. $\tau^{1)}$ [N/mm^2]
bandstaal		83	215	1000–1800	650–1200
verenstaaldraad	0,1-2mm	83	215	1200–1500	800–1000
bij koud	2-8mm	83	215	800–1200	500–800
gewikkelde veren	8 en meer	83	215	500–800	500
warm gewikkelde veren		80	200	700–1000	700
roestvrijstaaldraad		75	170	800	700
roestvrijstaalblad		75	170	500	350
fosforbronsdraad		45	120	500	330
fosforbronsblad		45	120	400	270
messingdraad		36	100	280	180
messingblad		36	100	250	160

[1)] rustende belasting : 100%
wisselende belasting : 20−50%
stootbelasting : 10−40%
} van de tabel-waarden

Tabel 4.5 Waarden voor η_2 en η_3

h/b	1	1,5	2	3	4	6	8	10	>10
η_2	0,208	0,231	0,246	0,267	0,282	0,299	0,307	0,313	0,333
η_3	0,140	0,196	0,229	0,263	0,281	0,299	0,307	0,313	0,333
η_2/η_3	1,485	1,180	1,075	1,015	1,005	1,000	1,000	1,000	1,000



Figuur 4.6 Cilindrische schroefvormige veer met rechthoekige doorsnede (zie ook tabel 4.3. nr. 5)

5 Werktuigen

5.1 Pompen (voor vloeistof)

Verdringerpompen (zie figuur 5.1 a t/m e)

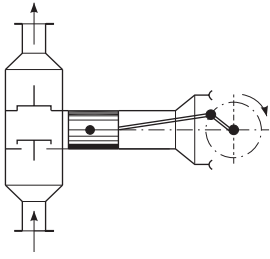
- *Zuigerpomp*
- *Plunjerpomp*

} met of zonder windketel.

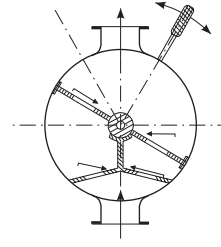
- vaak toegepast voor verpompen van grondwater.
- *Vleugelpomp*: uitsluitend voor handbediening voor verpompen van water, olie e.d.; vrij lage opbrengst.
- *Membraanpomp*: voor kleine opbrengst; aandrijving met de hand of krukmechanisme; ook voor grondwaterverpomping gebruikt.
- *Tandradpomp*: roterende verdringerpompen voor kleine tot grote opbrengsten met drukken tot ca. 20 MPa; veel toepassingen, o.a. alle soorten vloeistoffen tot matig visceuze media.
- *Roterende vleugelpomp*: voor zwaar visceuze media en vrij lage opbrengst.
- *Wormpomp*: veel toegepast voor zwaar visceuze media, tot pasta's (spuitgietmachines); kunnen hoge drukken opbouwen.
- *Schottenpomp* (zie par. 5.3 en 5.4).
- *Axiaal plunjerpomp* (zie par. 5.4)

Centrifugaalpomp

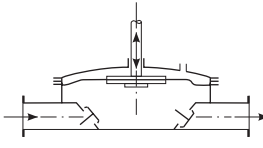
De *centrifugaalpomp* (figuur 5.1f) kent erg veel toepassings-mogelijkheden en is geschikt voor hoge drukken en alle soorten vloeibare en visceuze media. Zie voor circulatiepompen hoofdstuk G1, par. 1.7 *Pompen*.



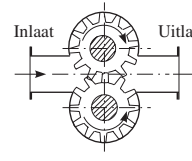
a Plunjerpomp



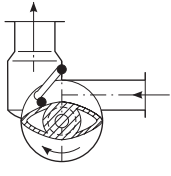
b Vleugelpomp



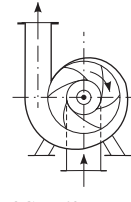
c Membraanpomp



d Tandradpomp



e Roterende vleugelpomp



f Centrifugaalpomp

Figuur 5.1 Pompen (voor vloeistof)

5.2 *Ventilatoren en compressoren*

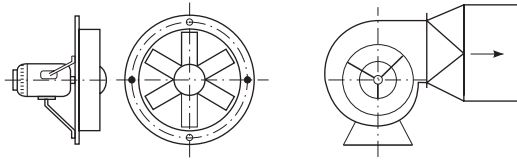
Ventilatoren

Ventilatoren worden meestal gebruikt voor het verplaatsen van kleine tot zeer grote luchthoeveelheden met lage druk (zie figuur 5.2).

Centrifugaalventilatoren verplaatsen luchthoeveelheden tot ca. 100 m^3/sec, met een druk tot ca. 2000 mm waterkolom (0,02 MPa).

Compressoren

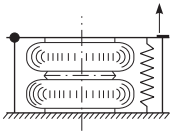
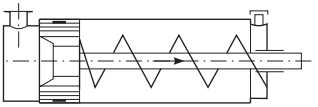
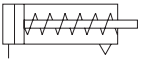
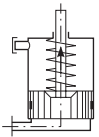
Compressoren worden gebruikt voor het comprimeren van gassen. Uitvoeringen: zuiger- en wormcompressoren, elk in één- of meertrapsuitvoering.



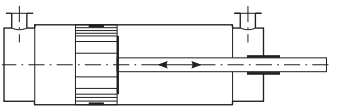
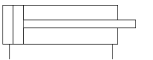
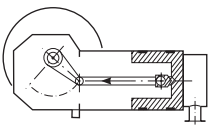
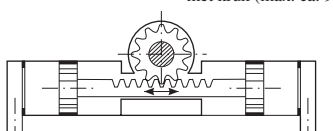
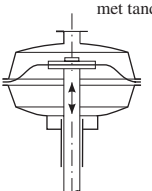
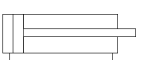
Figuur 5.2 Schroefventilatoren en centrifugaalventilator

5.3 Pneumatische componenten

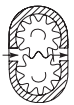
Tabel 5.1 Pneumatische componenten

component	symbool	omschrijving
		*balgcilinder*: eenvoudigste cilindervorm voor het verplaatsen van grote lasten
		*enkelwerkende cilinder*: beperkte slag door ingebouwde veer die de teruggaande slag (geen arbeidsslag) moet uitvoeren
		*korte-slag cilinder*: relatief grote kracht; voor kleine verplaatsingen als aandrukken, vergrendelen, opsluiten, enz.

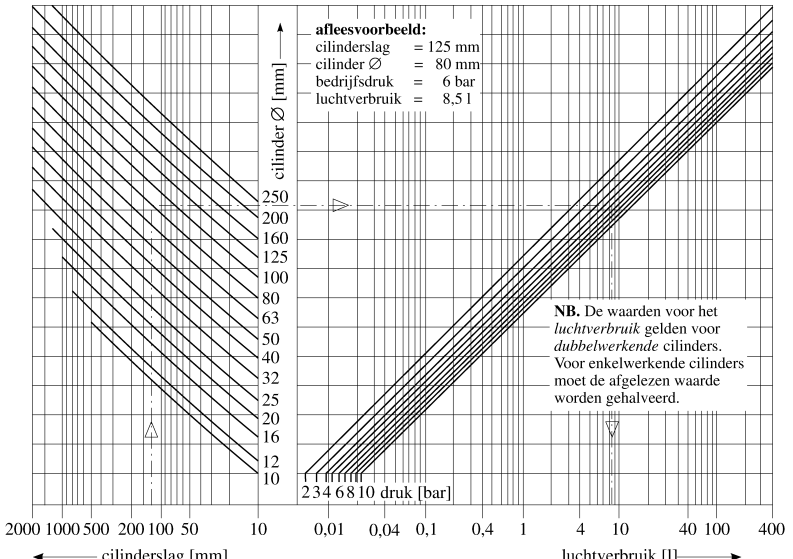
Tabel 5.1 (vervolg)

component	symbool	omschrijving
		*dubbelwerkende cilinder*: kan naar beide zijden arbeid verrichten; snelheid van de beweging is regelbaar met een ventiel
 met kruk (max. ca. 90 °)		*draai-cilinder*: lineaire beweging wordt omgezet in een draaiende, de hoekverdraaiing wordt meestal bepaald door de slag van de cilinder
 met tandheugel (tot ca. 360 °)		
		*membraan-cilinder:* voor kleine bewegingen met vrij grote kracht

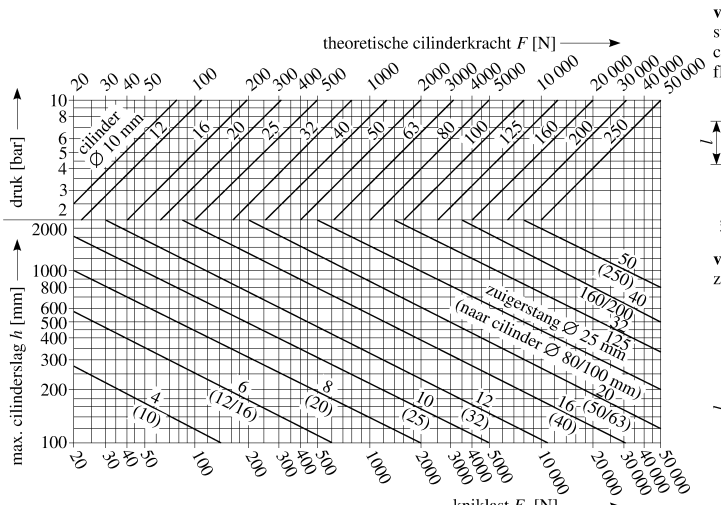
Tabel 5.2 Eigenschappen van de belangrijkste pneumatische motoren

karakteristieken	radiale zuiger	gekoppelde zuigers	schotten	tandwiel	dynamische turbine
					
maximum werkdruk [bar]	100	8	8	100	8
afgegeven vermogen [kW]	1,5–30	1–6	0,1–18	0,5–5	0,01–0,2
maximum rotatie-frequentie [omw/min]	6000	5000	30 000	15 000	120 000
specifiek lucht-verbruik [l/kJ]	15–23	20–25	25–50	30–50	30–60
maximum expansievoud	2:1	1,5:1	1,6:1	1:1	–
aantal werkzame cilinders of ruimten per omwenteling	4–6	4	2–10	10–25	enkel traps
koppelverandering gedurende é én omwenteling in % van de gem. waarde	30–15	60–40	60–2	20–10	–
afdichting	zuigerveer/ klepspeling	zuigerveer/ positief	spleet/ positief	spleetpositief	speling
smering	olie in luchtaanvoer	olie in luchtaanvoer	olie in luchtaanvoer	olie in luchtaanvoer	alleen lager-smering
maximale inwendige snelheden [m/s]	25	20	30	30	70

Bron: *Atlas Copco*, Zwijndrecht.



Figuur 5.3 Luchtverbruik pneumatische cilinders (bron: Bosch, *Amsterdam)*



Figuur 5.4 Maximale slaglengte bij knikbel sting voor cilinders volgens DIN 24 335, CET OP RP43P, RP52P en ISO 6431–6432 (Bron: Bosch, *Amsterdam)*

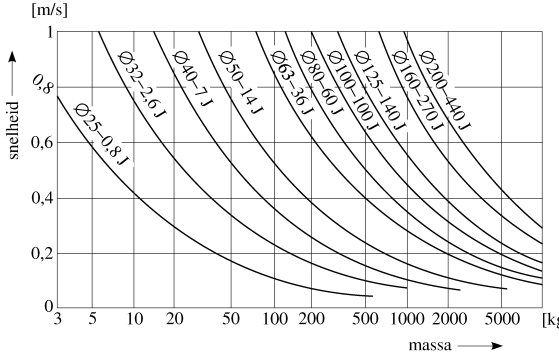
Tabel 5.3 Belastingkracht (uitgaande slag/ingaande slag) cilinder bij last/krachtverhouding van 0,5 [N]

diameter [mm]	perslucht p [bar]				
	4	5	6	7	8
∅ 25 stang d = 12	100/75	125/95	145/115	170/130	200/150
32 stang d = 12	160/140	200/170	240/210	280/240	320/280
40 stang d = 18	250/200	320/250	380/300	440/350	500/400
50 stang d = 18	390/340	500/430	580/510	690/600	780/680
63 stang d = 22	620/540	780/680	940/820	1090/960	1250/1090
80 stang d = 22	1000/920	1250/1160	1500/1390	1760/1630	2010/1860
100 stang d = 30	1580/1420	1960/1800	2360/2140	2750/2500	3140/2860
125 stang d = 30	2460/2320	3080/1900	3700/3470	4300/4050	4910/4630
160 stang d = 40	4020/3780	5020/4720	6030/5660	7040/6600	8040/7550
200 stang d = 40	6280/6020	7850/7540	9420/9050	11000/10560	12560/12050

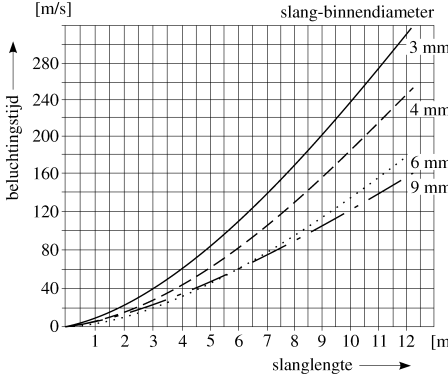
Toelichting. Theoretische kracht die een zuiger uitoefent: $A \times p$ (A = oppervlakte; p = druk). De drukkracht $A \times p$ dient groter te zijn dan de belastingkracht F vanwege wrijving en om schokkende bewegingen te voorkomen.

$$\frac{\text{belastingkracht } (F)}{\text{drukkracht } (A \times p)} = \text{last/kracht-verhouding}$$

Bij toepassing van conventionele automatisering wordt een last/kracht-verhouding van 0,5 geadviseerd. A kan dan bepaald worden uit: $A = F/0{,}5p$. Hieruit volgt de cilinder-diameter.
Voor standaardcilinders (CNOMO, CETOP) kan de diameter direct worden afgelezen uit de tabel.
De zuiger kan een druk uitoefenen door druk (bij uitgaande zuiger) en door trek (bij ingaande zuiger); bij trek is F kleiner omdat de zuigeroppervlakte moet worden verminderd met de stangdoorsnede.
Bron: *Telemecanique*, Haarlem.



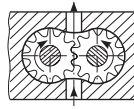
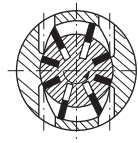
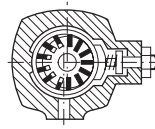
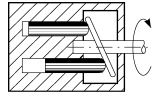
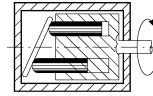
Figuur 5.5 Cilinderdiameter afhankelijk van de bewegende massa en de (eenparige) zuigersnelheid (bron: Telemecanique, *Haarlem)*



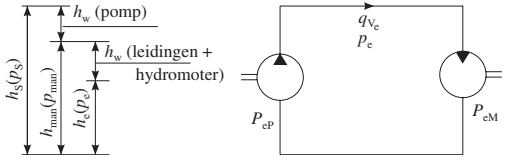
Figuur 5.6 Beluchtingstijden (bron: Festo, *Delft)*

5.4 Hydraulische componenten

Tabel 5.4 Pompen en eigenschappen

benaming	schematische voorstelling	drukbereik [Pa]	kenmerken
tandwielpomp (vaste opbrengst)		$\ldots 200 \times 10^5$	eenvoudig; robuust; klein; zelfaanzuigend
schottenpomp (vaste opbrengst)		$\ldots 175 \times 10^5$	verhoudingsgewijs geruisarm; eenvoudig
schottenpomp (verstelbare opbrengst)		$\ldots 120 \times 10^5$	geruisarm; rustige loop
axiaalplunjerpomp (vaste trommel)		$\ldots 200 \times 10^5$	axiaal oscillerende zuigers in stilstaand huis; zelfaanzuigend
axiaalplunjerpomp (vaste plaat)		$\ldots 250 \times 10^5$	axiaal oscillerende zuigers in roterend huis; doorzwenken van de plaat al dan niet variabele opbrengst; meestal zelfaanzuigend

Tabel 5.5 Overzicht hydrauliek-formules



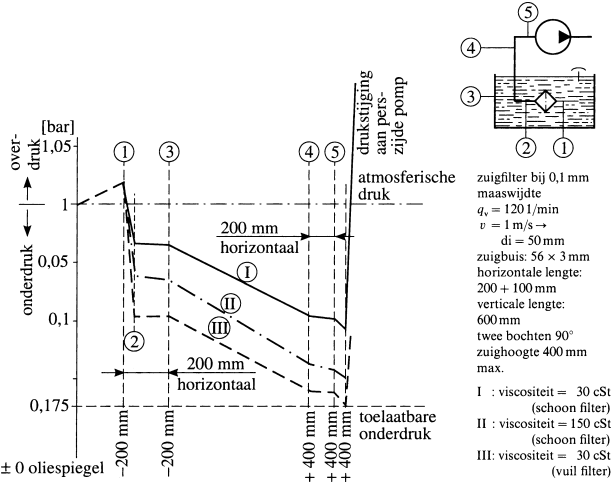
hydropomp		**hydromotor**	
rendementen			
$\eta_{vP} = \dfrac{q_{v_e}}{q_{v_{thP}}}$	$\eta_{mp} = \dfrac{P_{thP}}{P_{eP}}$	$\eta_{vM} = \dfrac{q_{v_{thM}}}{q_{v_e}}$	$\eta_{mM} = \dfrac{P_{eM}}{P_{thM}}$
	$\eta_{hinst} = \dfrac{Pe}{Ps}$		
slagvolume			
$q_{v_{thP}} = \dfrac{\pi}{4} \cdot d_p^2 \cdot s_p \cdot z_p \cdot n_p$		$q_{v_{thM}} = \dfrac{\pi}{4} \cdot d_m^2 \cdot s_M \cdot z_M \cdot n_M$	
$q_{v_e} = q_{v_{thP}} \cdot \eta_v$ (1)		$q_{v_{eM}} = q_{v_{thM}} / \eta_{vM}$ (2)	
vermogen			
$P_{thP} = q_{v_{thP}} \cdot \rho \cdot g \cdot h_s$ $= q_{v_{thP}} \cdot p_s$		$P_{thM} = q_{v_{thM}} \cdot p_e$	
$P_{eP} = \dfrac{q_{v_e} \cdot \rho \cdot g \cdot h_e}{\eta_{vP} \cdot \eta_{mP} \cdot \eta_{h_{inst}}}$ $= \dfrac{q_{v_e} \cdot p_e}{\eta_{vP} \cdot \eta_{mP} \cdot \eta_{h_{inst}}}$ (3)		$P_{eM} = q_{v_e} \cdot p_e \cdot \eta_{mM} \cdot \eta_{vM}$ (4)	

uit (1) en (2) volgt: $q_{v_{thP}} = \dfrac{q_{v_{thM}}}{\eta_{vP} \cdot \eta_{vM}}$

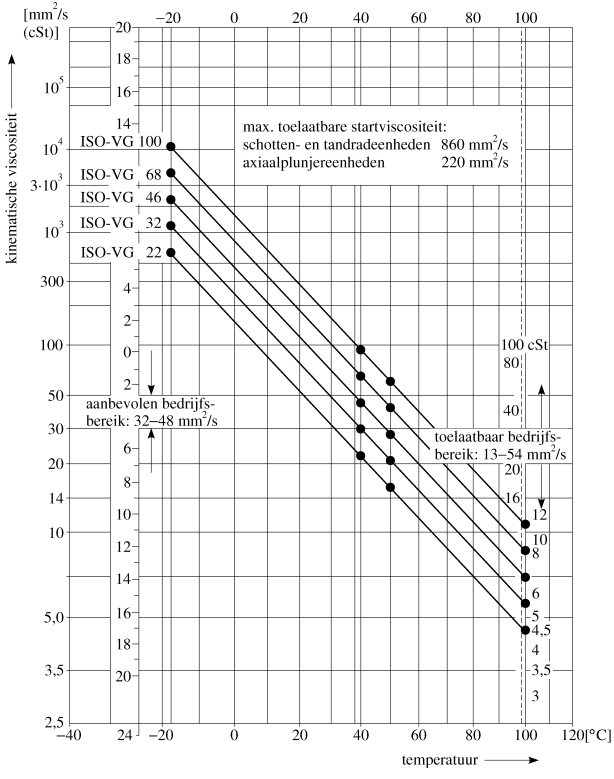
uit (3) en (4): $P_{eP} = \dfrac{P_{eM}}{\eta_{vP} \cdot \eta_{vM} \cdot \eta_{mP} \cdot \eta_{mP} \cdot \eta_{h_{inst}}}$

Toelichting bij tabel 5.5, hydrauliek-formules

h	= opvoerhoogte	[mVK]	indices:	
p	= opvoerdruk	[Pa]	e	= effectief
η_v	= volumetrisch rendement	[–]	man	= manometrisch
η_m	= mechanisch rendement	[–]	s	= schijnbaar
η_h	= hydraulisch rendement	[–]	P	= pomp
P_{th}	= theoretisch vermogen	[W]	M	= motor
P_e	= effectief vermogen	[W]		
$q_{v_{th}}$	= theoretisch debiet	[m^3/s]		
q_{v_e}	= rotatie-frequentie	[m^3/s]		
n	= rotatie-frequentie	[Hz]		
M	= draaimoment	[N · m]		
d	= plunjerdiameter	[m]		
s	= slaglengte	[m]		
z	= aantal cilinders	[–]		



Figuur 5.7 Drukverloop zuigleiding hydropomp (bron: Vickers systems, *Weesp)*



Figuur 5.8 Temperatuur/viscositeit-grafiek hydraulische olie (bron: Vickers systems)

5.5 *Hefwerktuigen*

Oogbouten en -moeren
Zie hoofdstuk E1 *Materialen*, par. 12 *Verbinding en bevestiging*, tabel 12.12.

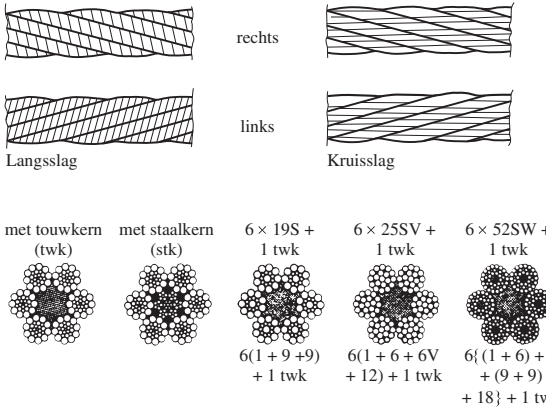
Katrollen, takels enz.
Theorie: zie hoofdstuk C1 *Mechanica*, par. 5.

Toepassingen:
- *Wormtakels*: zowel handbediend d.m.v. een ketting als elektrisch aangedreven.
- *Handtakels* (derde-handstakel, vierloper, noktakel e.a.): veel gebruikt in de bouw, op werven enz.; voor het verplaatsen van grote lasten, ook horizontaal.
- *Westontakel*.
- *Windas* en *lier:* toegepast op de schepen, in bouwliften enz.
- *Domme kracht:* komt vaak voor bij sloperijen, scheepswerven enz.
- *Schroefvijzel:* wordt veel gebruikt in garages enz.; ook gebruikt met aangedreven schroefas, waarbij de moer verplaatst en de last meeneemt.
- *Tandwieloverbrengingen*: in bijna alle aandrijvingen waar het toerental omgevormd moet worden; meestal in dichte met olie gevulde kasten verkrijgbaar.

Staaltouw of staalkabel
Staaltouw bestaat uit 6 of 7 om elkaar gewonden strengen. Een streng bestaat uit een aantal draadjes (0,4–2,2 mm) die schroefvormig om elkaar gewonden zijn. De draadjes kunnen rechts of links gewonden in de streng liggen.

Langs- of gelijkslag: de draadjes in de strengen en de strengen in het touw zijn in dezelfde richting gewonden.

Kruisslag: tegengesteld gewonden.
Figuur 5.9 laat enkele varianten zien.



Figuur 5.9 Staaltouw of staalkabel (Bron: Den Haan bv, Gorinchem)

De meest toegepaste *draaiarme kabelconstructie* bestaat uit 8 strengen met een staalkern waarvan de slagrichting van de strengen tegengesteld is aan die van de staalkern. Meestal is de slagwijze van de strengen rechtse kruisslag en van de staalkern linkse langsslag.

Draaivrije kabelconstructies bestaan uit 2 lagen strengen met een staal-of touwkern waarbij de slagrichting van de buitenstrengen tegengesteld is aan die van de binnenstrengen en van de eventueel aanwezige staalkern. De meest toegepaste draaivrije kabelcon-structie bestaat uit 12 buitenstrengen en 6 binnenstrengen en een staal- of touwkern.

6 Werktuigbouwkundig tekenen

Zie voor algemene informatie, hoofdstuk D1 *Technisch tekenen*.

6.1 Ruwheidsaanduiding

Zie ook par. 1.1 *Ruwheid*.

Basissymbool; waarin a = ruwheid in μm die geldt als maximale ruwheid van het vlak waarop dit symbool is aangegeven. De werkplaats bepaalt hoe deze ruwheid tot stand komt.

Materiaal met verspaningstoegift.

Ingeschreven ruwheid moet worden bereikt zonder verspanen.

Op de horizontale verlenging van het symbool wordt de oppervlaktebehandeling aangegeven.

Betekenis symbolen:
q = bewerkingsmethode (bijv. hardverchromen)
a = maximale ruwheid die bij bewerkingsmethode q mag worden bereikt
s = aanduiding bewerkingspatroon

6.2 Lasaanduiding

Lasverbindingen kunnen worden onderscheiden in:
- smeltlasverbindingen;
- druklasverbindingen.

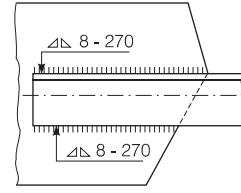
Smeltlassen tekent men in aanzicht met een enkele lijn (met of zonder randarcering). In het zijaanzicht of in de doorsnede wordt de schematische lasvorm fijn gearceerd en vol getekend.

Tabel 6.1 Enkele symbolen voor lasnaadvormen bij smeltlasverbindingen

lasnaadvorm	symbool	lasnaadvorm	symbool
hoeklas		I-las	
dubbele hoeklas		V-las	
T-las		halve V-las	
K-las		X-las	
V-las met tegenlas		U-las	
U-las met tegenlas		halve U-las	
halve U-las met met tegenlas		tweezijdige U-las	

Men past hiervoor de symbolen toe van tabel 6.1 (zie hiervoor tevens NEN 2755).

Bij het aanzicht of bij de doorsnede vermeldt men de lasgegevens in de volgorde: symbool van de lasnaadvorm, lasdikte en de lengte van de las.

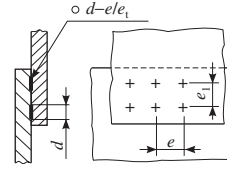


De *druklas* wordt in de doorsnede van de verbinding aangegeven met een volle ellips behalve bij de drukstuiklas en de vonkstuiklas. In aanzicht worden de drukstuiklas, de vonkstuiklas, de rollas, de pletlas en de folielas met een enkele dunne lijn aangegeven. De puntlas en de doordruklas worden in aanzicht met het teken + aangegeven. Voor het aanduiden van de lasvorm gebruikt men de symbolen van tabel 6.2 (zie hiervoor tevens NEN 2755 en 2756).

Tabel 6.2 Enkele symbolen bij druklasverbindingen

lasnaadvorm	symbool	lasnaadvorm	symbool	lasnaadvorm	symbool
drukstuiklas		puntlas		rollas	
vonkstuiklas		doordruklas		pletlas foelielas	

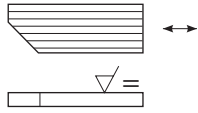
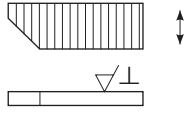
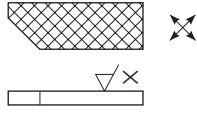
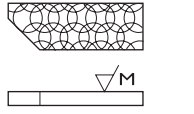
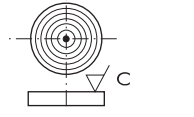
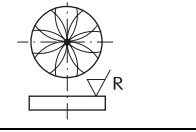
De gegevens voor het lassen worden bij de doorsnede en zo nodig bij het aanzicht van de druklasverbinding aangegeven in de volgorde: lasvorm en voor zover nodig, laslensmiddellijn d, steek e, rijafstand e_1 en bijzondere gegevens.



6.3 Patroon van bewerkingssporen

Het *patroon van bewerkingssporen* moet alleen worden aangeduid wanneer dit in verband met de functie van het oppervlak vereist is. tabel 6.3 geeft de symbolen, die geplaatst moeten worden naast het symbool voor de ruwheidswaarde (zie par. 6.1).

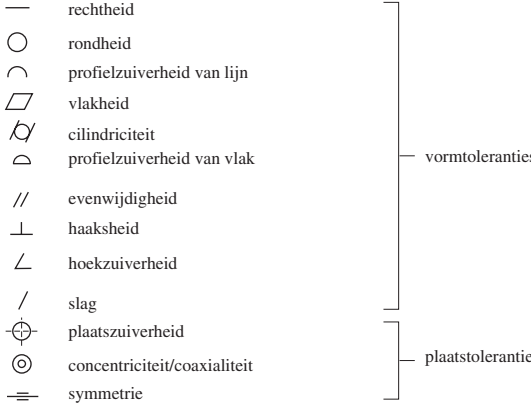
Tabel 6.3 Symbolen voor het patroon van bewerkingssporen

symbol	richting bewerkingssporen	voorbeeld
=	evenwijdig aan de lijn die het oppervlak voorstelt waarvoor het symbool id toegepast	
⊥	loodrecht op de lijn die het oppervlak voorstelt waarvoor het symbool is toegepast	
×	in twee schuine richtingen in het vlak waarvoor het ruwheidssymbool is toegepast	
M	in verschillende willekeurige richtingen	
C	ongeveer cirkelvormig t.o.v het middelpunt van het oppervlak (b.v. spiraalvormig)	
R	ongeveer radiaal t.o.v. het middelpunt van het oppervlak	

6.4 Vorm- en plaatstoleranties

Symbolen

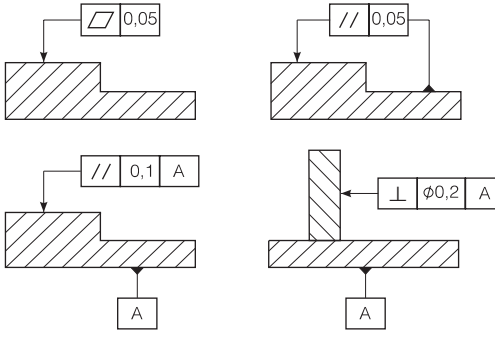
Voor het aangeven van de vorm- en plaatszuiverheden met een tolerantiewaarde, wordt gebruik gemaakt van symbolen (zie hieronder). In de NEN-bladen 3310 en 3311 worden de vorm- en plaatstoleranties uitgebreider behandeld.



Aanduidingen

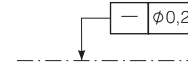
Het symbool wordt op de tekening geplaatst in een rechthoek met twee of drie vakjes.

Het linker vlak is bestemd voor het symbool, rechts daarvan staat de tolerantie in mm wanneer de maten in de tekening ook in mm staan aangegeven.
Het meest rechtse (derde) vak wordt gebruikt om de letter van het referentievlak aan te geven.
Met aanhaallijnen wordt aangegeven waar de vorm- en plaatstolerantie op van toepassing is.

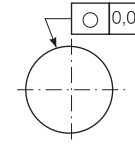


Enkele betekenissen van vorm- en plaatstoleranties.

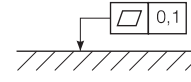
De hartlijn moet liggen binnen een cilindrische zone met een middellijn van 0,2 mm.



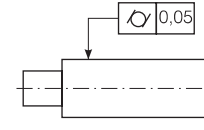
De omtrek van het product moet zijn gelegen in een schil met een dikte van 0,05 mm.



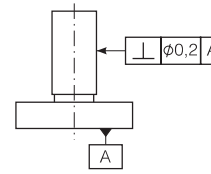
De oppervlakte moet liggen tussen twee evenwijdige vlakken met een onderlinge afstand van 0,1 mm.



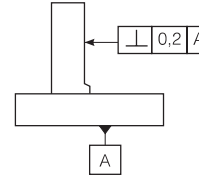
Het oppervlak van de cilinder moet liggen binnen een cilindervormige schil met een dikte van 0,05 mm.



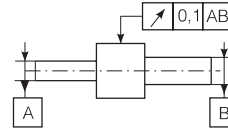
De haaksheid van een cilinder of lijn betekent, dat de hartlijn binnen een haaks op het vlak A staande cilindrische ruimte met een middellijn van 0,2 mm moet liggen.



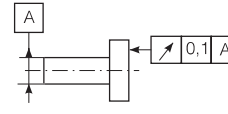
De haaksheid van een vlak wil zeggen dat het te maken vlak moet liggen tussen twee evenwijdige vlakken op een afstand van 0,2 mm van elkaar en ⊥ t.o.v. vlak A.



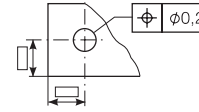
Bij een volledige omwenteling van de referentie-as A–B mag de radiale slag van het cilindervlak waarop deze is aangegeven, niet meer bedragen dan 0,1 mm.



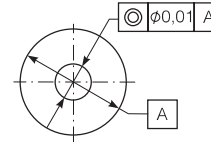
Bij een volledige omwenteling om de referentie-as A mag de axiale slag van het vlak waarop deze is aangegeven, niet meer bedragen dan 0,1 mm.



Het middelpunt van de betreffende cirkel moet liggen in een cirkel waarvan het middelpunt samenvalt met het snijpunt van de gegeven hartlijnen en waarven de middellijn 0,3 mm bedraagt.

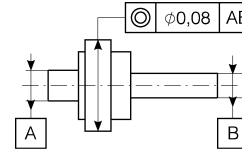


Het middelpunt van de cirkel waarop de concentriciteitstolerantie is aangegeven, moet liggen in een cirkel met een middellijn



van 0,01 mm en waarvan het middelpunt samenvalt met het middelpunt van de referentiecirkel A.

De hartlijn van de cilinder waarop de coaxialiteitstolerantie is aangegeven, moet liggen in een cilindrische zone met een middellijn van 0,08 mm waarven de hartlijn samenvalt met de referentie-as A–B.



Literatuur

- Dubbel
  Taschenbuch für den Maschinenbau
  Berlin, Springer Verlag.
- Eschmann, Hasbargen, Weigand
  Die Wälzlagerpraxis
  München, R. Oldenburg.
- Hütte
  Des Ingenieurs Taschenbuch
  Deel IIA en IIB (Maschinenbau)
  Berlin, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- Niemann, G.
  Maschinenelementen
  Berlin, Springer-Verlag.
- Marks, L.S.
  Mechanical engineers handbook
  New York, McGraw Hill.
- Energie Zakboek
  Arnhem, Elsevier bedrijfsinformatie bv.

I Elektronica

1 Passieve componenten
- 1.1 Weerstanden
- 1.2 Condensatoren
- 1.3 Spoelen
- 1.4 Kristallen
- 1.5 Transmissielijnen (lange leidingen)
- 1.6 Golfgeleiders
- 1.7 Antennes

2 Halfgeleidercomponenten
- 2.1 Afkortingen
- 2.2 Gewone en schakeldiodes
- 2.3 Zenerdiode
- 2.4 Schottky-diode
- 2.5 Capaciteitsdiode
- 2.6 Hoog-frequent diodes
- 2.7 Foto-elektrische diodes
- 2.8 Halfgeleider-schakelaars
- 2.9 Bipolaire transistors
- 2.10 Unipolaire transistors
- 2.11 Magnetische sensoren

3 Netwerktheorie
- 3.1 Symbolen
- 3.2 Wetten en theorema's
- 3.3 Netwerkcomponenten
- 3.4 In- en uitschakelverschijnselen
- 3.5 Aanpassingsnetwerken

4 Vierpool- en tweepoortschakelingen
- 4.1 Algemeen
- 4.2 Vierpoolcoëfficiënten
- 4.3 Transformatoren
- 4.4 Brugschakelingen

5 Filters
5.1 Polynomen en realisatie
5.2 Vierpoolfilters
5.3 Benaderingsmethoden ideale filterkarakteristiek
5.4 Filtersynthese
5.5 Frequentie- en impedantienormering
5.6 T-netwerken
5.7 Actieve filters

6 Versterkers
6.1 Ideale en niet-ideale versterkers
6.2 Versterkers algemeen
6.3 Terugkoppeling
6.4 Vervorming
6.5 Vermogensversterkers (continu werkend)
6.6 Vermogensversterkers (discontinu werkend)
6.7 Verschilversterker
6.8 Operationele versterker

7 Radiotechniek
7.1 Trillingskringen algemeen
7.2 Gesloten trillingskringen
7.3 Gekoppelde kringen (bandfilters)
7.4 Oscillatoren en andere signaalgeneratoren
7.5 Modulatie
7.6 Demodulatie (detectie)

8 Elektronische voedingsapparatuur
8.1 Gelijkrichtschakelingen
8.2 Afvlakking, spanningen en stromen
8.3 Spanningsstabilisatoren

9 Ruis

10 Lasers

11 Mobiele telefonie

1 Passieve componenten

1.1 Weerstanden

Vaste weerstanden

Weerstand en *geleiding* van lichaam:

$$R = \rho \frac{l}{A} [\Omega] \qquad G = \gamma \frac{A}{l} = \frac{1}{R} \quad [\mathrm{S}]$$

waarin:
l = lengte in stroomrichting [m]
A = doorsnede loodrecht op stroomrichting [m^2]
ρ = soortelijke (specifieke) weerstand (*resistiviteit*) [$\Omega \cdot \mathrm{m}$]
γ = soortelijke (specifieke) geleiding (*conductiviteit*) [S/m]

Vierkantsweerstand (laagweerstand)

$$R_{\square} = \frac{\rho}{d} [\Omega]$$

waarin: d = laagdikte, l = laaglengte, b = laagbreedte } zelfde eenheid

$$R = R_{\square} \frac{l}{b} [\Omega]$$

Temperatuurscoëfficiënt:

$$\alpha = \frac{1}{\rho(T_0)} \left(\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}T} \right)_{T=T_0} \quad [\mathrm{K}^{-1}]$$

Weerstandsverandering t.g.v. ΔT:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha \Delta T) \quad \text{of: } R_{T2} = R_{T1} \frac{1 + \alpha(T_2 - T_0)}{1 + \alpha(T_1 - T_0)}$$

als α gegeven is bij $T = T_0$

Materialen met lage waarde van α (zie ook hoofdstuk E1 *Materialen*, tabel 1.7): manganine α = 0,02 × $10^{-3}\mathrm{K}^{-1}$; nichroom α = 0,13 × 10^{-3} K^{-1}; constantaan α = 0,02 × 10^{-3} K^{-1}.

Weerstandswaarden zijn vastgelegd in *E-reeksen:*

– E-12 reeks voor 10% tolerantie
– E-24 reeks voor 5% tolerantie } koolweerstanden

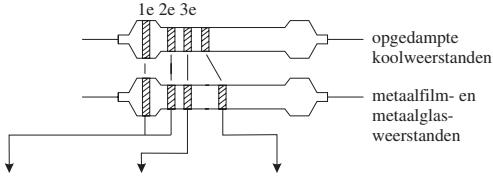
– E-48 reeks voor 2% tolerantie
– E-96 reeks voor 1% tolerantie
– E-192 reeks voor 0,5% tolerantie

} metaalfilm-weerstanden

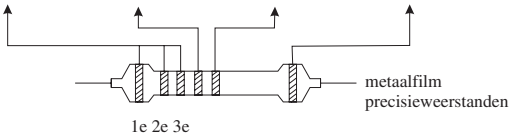
Waarden E-24 reeks (*waarden E-12 reeks = vet*):

10	11	**12**	13	**15**	16	**18**	20	**22**	24	**27**	30
33	36	**39**	43	**47**	51	**56**	62	**68**	75	**82**	91

Tabel 1.1 Kleurcode vaste weerstanden met ringen



kleur	cijfers	vermeningv. [Ω]	tolerantie [%]	temp. coëff.
				× 10^{-6}/K
zwart	0	1		±200
bruin	1	10	±1	±100
rood	2	100	±2	±50
oranje	3	1 k		±15
geel	4	10 k		±25
groen	5	100 k	±0,5	
blauw	6	1 M	±0,25	±10
violet	7	10 M	±0,1	±5
grijs	8			
wit	9			±1
zilver		× 0,01	±10	
goud		× 0,1	±5	



Waarde- en tolerantieaanduiding door middel van cijfer/lettercode (zie onder) of kleurcode (zie tabel 1.1).

Ciifer/letter-code voor waarde:
R of E: eenheid, bijv. 1,8 Ω: 1R8 of 1E8; 22 Ω: 22R

k :1000 × 47 000Ω: 47 k
M :10^6 × 6 800 000Ω: 6M8

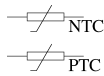
Voor tolerantie:

B:±0,1%	F:±1%	K:±10%
C:±0,25%	G:±2%	−:±20%
D:±0,5%	J :±5%	

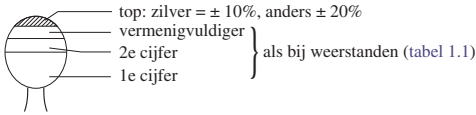
Thermistors

Soortelijke weerstand: $\rho(T) = a \cdot e^{b/T}$. a en b zijn materiaal constanten. De 25°C-waarde is afhankelijk van het type thermistor en kan liggen tussen 1 Ω en 50 kΩ. Constante b varieert tussen 2600 en 5500 [K].
Temperatuurscoëfficiënt: $\alpha = -\dfrac{b}{T^2}\,[\mathrm{K}^{-1}]$

- NTC: $-3{\cdot}10^{-2} > \alpha > -5{\cdot}10^{-2}$
- PTC: $7{\cdot}10^{-2} < \alpha < 60{\cdot}10^{-2}$



Kleurcode: geeft 25°C-weerstandswaarde.



Spanningsafhankelijke weerstanden (VDR's, varistors)

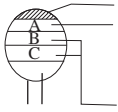
$$U = C \cdot I^{\beta}$$

waarin:
C = vormfactor (constructie-afhankelijk): $40 < C < 1600$ [Ω]
β = materiaalconstante : $0{,}1 < \beta < 0{,}4$

Weerstand: $R = \dfrac{C}{I^{(1-\beta)}} = \dfrac{C^{1/\beta}}{U^{(1/\beta-1)}}$

Vermogen: $P = CI^{\beta+1} = C^{-1/\beta} \cdot U^{(1+1/\beta)}$

Kleurcode



top: zilver = ± 10%, anders ± 20%
band A geeft gelijkstroom waarbij de spanning is gemeten: bruin : I = 100 mA
rood : I = 10 mA
rood : I = 1 mA
banden B en C geven de spanning volgens afwijkende kleurcode (tabel 1.2)

Tabel 1.2 Kleurcode spanningsafhankelijke weerstanden

band B	band C	U[V]	band B	band C	U[V]
bruin	blauw	8	oranje	blauw	56
bruin	grijs	10	oranje	grijs	68
rood	zwart	12	geel	zwart	82
rood	rood	15	geel	rood	100
rood	geel	18	geel	geel	120
rood	blauw	22	geel	blauw	150
rood	grijs	27	geel	grijs	180
oranje	zwart	33	groen	zwart	220
oranje	rood	39	groen	rood	270
oranje	geel	47	groen	geel	330

Lichtgevoelige weerstanden (LDR's)

$R = a \cdot E^{-\alpha}$

a en α zijn afhankelijk van materiaal en gebruiksomstandigheden ($0{,}7 > \alpha > 0{,}9$).
Voor maximale gevoeligheid: kleine a
Donkerweerstand ($E = 0$) : $R > 1$ MΩ
Lichtweerstand ($E = 1000$ lux): $R < 100$ Ω

1.2 Condensatoren

N.B. Alle grootheden in SI-eenheden. $\varepsilon_0\varepsilon_r$ geldt voor medium om of tussen de geleiders.

Plaatcondensator
n platen, oppervlakte A, afstand d

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r(n-1)A}{d}$$

Bolcondensator
diameter D

$$C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r D$$

Draad boven oppervlak
draadlengte d, draaddiameter D, afstand draadhart tot plaat h

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\left(\frac{4h}{D}\right)}$$

Coaxiale cilinders (coaxkabel)
diameter binnenmantel D_1, diameter buitenmantel D_2, draadlengte l

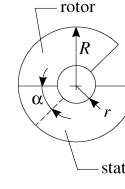
$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln(D_2/D_1)}$$

Tweedraads condensator
draadlengte l, draaddiameter D, hartafstand v.d. draden h

$$C = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{\ln\left(\frac{4h}{D}\right)}$$

Rotorcondensator
n platen, afstand tussen rotor- en statorplaten d, hoekverdraaiing α [rad]

$$C = (n-1)\varepsilon_0\varepsilon_r\frac{R^2 - r^2}{2d}\cdot\alpha$$



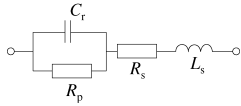
Zie ook hoofdstuk A4, par. 8.1 *Elektrostatica*.

Vervangingsschema en impedantie

$$\boldsymbol{Z}_c = \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_r} + R_s + j\omega L_s$$

Voor $\omega R_p C_r \gg 1$ wordt

$$\boldsymbol{Z}_c = R_s + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_r}\right)$$



Figuur 1.1 Vervangingsschema condensator

waarin: R_p = lekweerstand (hoog)
R_s = serieweerstand (laag)
L_s = zelfinductie t.g.v. rollen en aansluitdraden

Tabel 1.3 Overzicht vaste condensatoren

type	diëlektricum	ε_r	tan δ (25 °C, 1 kHz)	min. capaciteit
papierfolie	papier, geïmpregneerd met olie, was, vaseline	2 tot 3	< 0,01	1 nF
gemetalliseerde folie (MP)	kunststof	~6	<0,03	10 nF
kunststoffolie en gemetalliseerde folie (M)	polycarbonaat (KC)	2,9	$<3 \cdot 10^{-3}$	1 nF
	polypropyleen (KP)	2,3	$<0{,}5 \cdot 10^{-3}$	50 pF
	polystyreen (KS)	2,6	$<0{,}4 \cdot 10^{-3}$	50 pF
	polysulfone	3,1	$<2 \cdot 10^{-3}$	1 nF
	mylar (PETP) (KT)	3,1	$<6 \cdot 10^{-3}$	1 nF
Keramisch (MLC) klasse I (NPO)	titaandioxyde Ca-titanaat	6 tot 250	$<1{,}5 \cdot 10^{-3}$	1 nF
klasse II (X7R) (Z5U)	ferro-elektrolyten (Ba-titanaat)	250 tot 7000	$<25 \cdot 10^{-3}$	200 pF 1,5 nF
mica	mica	4 tot 6	$0{,}6 \cdot 10^{-3}$	1 pF
glas	glas	7 tot 8,5	<0,03	0,1 pF
elektrolytisch				
aluminium (nat)	Al_2O_3	8,4	0,06	0,1 µF
tantaal	Ta_2O_5	27,6		
sinter droog			0,06 tot 0,08	0,1 µF
sinter nat			0,2	1 µF

Opmerking. *C*-waarden, spanning en tolerantie kunnen per fabrikant afwijken. Grotere *C*- en spanningswaarden mogelijk.

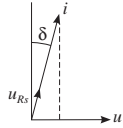
Indien $L_s \neq 0$ (bij gerolde papiercondensatoren en elektrolyten):

$$\boldsymbol{Z}_c \approx R_s + \frac{1}{j\omega C_r} \text{ voor lage frequenties}$$

$$\boldsymbol{Z}_c \approx R_s + j\omega L_s \text{ voor hoge frequenties}$$

Verliesfactor

$$\textit{Verliesfactor} = \tan\delta = \frac{\mathrm{Re}(\boldsymbol{Z}_c)}{\mathrm{Im}(\boldsymbol{Z}_c)}$$



max. capaciteit	max. spanning	max. tolerantie	max. frequentie	eigenschappen/toepassing
100 µF	100 kV	20%	1 MHz	hoogsp. afvlakking cos φ-verbetering storingsonderdrukking
20 µF	1300 V	20%	100 MHz	koppelen, ontkoppelen motoraanloop, TL
1 µF	250 V	5%	GHz-	
4,7 µF	2 kV	20%	gebied	transistorschakelingen
6,8 µF	1 kV	1%		hoogohmige schakelingen
10 µF	400 V	20%		geschakelde voedingen
10 µF	600 V	20%		
22 nF	500 V	2%	1 GHz	lage temp. coëft., hoge stabiliteit, HF-filters, reson. circuits
1 µF	200 V	10%		hoge temp. coëff.,
2,7 µF	100 V	10%		lage stabiliteit, koppelen, ontkoppelen
22 nF	5 kV	20%		schakelingen met
0,15 µF	6 kV	20%	10 GHz	hoge stabiliteit
1 F	700 V	−10, + 50%	100 kHz	afvlakking ontkoppeling
1 mF	80 V	±20%	1 kHz	energie-opslag
1,2 mF	125 V	−15, +50%		

Bij lage frequentie (1 kHz):
$\delta = \arctan \omega R_s C_r \approx \omega R_s C_r \approx \omega R_s C$

Verliesfactor = dissipatiefactor $= \tan \delta = \delta$ voor kleine $\delta (< 2^\circ)$

Vermogensdissipatie: $P_c = U \cdot I \cdot \sin \delta \approx U^2 \cdot \omega C \cdot \delta$

Warmte-ontwikkeling: $p = 55f \cdot \varepsilon_r \cdot E^2 \cdot \delta \cdot 10^{-12}$ [W/m^3]

waarin: $f =$ frequentie [Hz]
$\varepsilon_r =$ relatieve permittiviteit [−]
$E =$ veldsterkte over diëlektricum [V/m]

Kwaliteit: $Q = 1/\delta$.

Typen condensatoren (vast)
Zie tabel 1.3.

1.3 Spoelen

Formules voor berekening van spoelen
Algemene formules: zie hoofdstuk A4 *Natuurkunde;* voor exactere formules zie o.a. *Electronic Designers Handbook*, tabel 3.8.

Voor lucht is $\mu_r = 1$. Voor andere materialen, zie E1 *Materialen*, par. 1.1 tabel 1.22 en 1.23.

Rechte vrije ronde draad (lengte l, diameter D [mm])

$$L \approx 0,2 \mu_r \cdot \left(\ln \frac{4l}{D} - 1 \right) \ [\mu \text{H/m}]$$

Rechte ronde draad boven plat geaard vlak
(lengte l, diameter D, hoogte boven vlak h [mm])

$$L \approx 0,2 \mu_r \cdot \ln \frac{4h}{D} \ [\mu \text{H/m}]$$

Coaxkabel (diameter binnenmantel D_i, diameter buiten-mantel D_u [mm])

$$L \approx 0,2\mu_\mathrm{r}\left(\ln\frac{D_u}{D_i} - \frac{1}{4}\right) \quad [\mu\mathrm{H/m}]$$

Luchtspoel meerlagig, cilinder (lengte l, gem. diameter spoel D_m, dikte gewikkelde laag d in mm, aantal windingen N):

$$L \approx 2{\cdot}10^{-3} D_\mathrm{m} \frac{D_\mathrm{m} - d}{D_\mathrm{m} + d + 2l} {\cdot} N^2 \quad [\mu H]$$

Voor $d \ll D_\mathrm{m}$ en l:

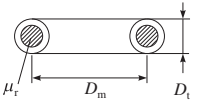
$$L \approx 2,6{\cdot}10^{-3} \frac{D_\mathrm{m}^2 N^2}{(D_\mathrm{m} + 3l)} \quad [\mu\mathrm{H}]$$

Eén lus van één wikkeling (draaddikte D, diameter lus D_m, buiten-diameter D_u, binnendiameter D_i in mm):

$$L \approx 0,2{\cdot}10^{-3} D_\mathrm{m}\left(\ln\frac{D_\mathrm{u} - D_\mathrm{i}}{D} + \frac{1}{3}\right) \quad [\mu\mathrm{H}]$$

Toroïde (N windingen, D in mm)
Algemeen:

$$L \approx \frac{1}{4}{\cdot}10^{-3} \frac{\mu_0\mu_\mathrm{r} D_\mathrm{t}^2 N^2}{D_\mathrm{m}} \quad [\mathrm{H}]$$



Voor luchtspoel:

$$L \approx 0,32{\cdot}10^{-3} \frac{D_\mathrm{t}^2 N^2}{D_\mathrm{m}} \quad [\mu\mathrm{H}]$$

HF- en MF-spoelen met ferrietkern

$$L = A_L N^2 \quad [\mathrm{nH}]$$

waarin:

$$A_L = \text{inductiviteitsfactor} = \frac{\mu_0 \mu_e}{C_1} \quad [\text{nH}]$$

$$C_1 = \sum \frac{l}{A} = \text{magnetische vormfactor } [\text{mm}^{-1}]$$

μ_e = relatieve effectieve permeabiliteit van de gekozen kern, met/zonder luchtspleet

Meestal gaat men uit van een door de fabrikant gegeven waarde voor A_L of μ_e.

Koperverliezen

Ontstaan in de wikkelingsweerstand R.

Bij lage frequenties: $R = R_{dc} = \rho \frac{l}{A}$

Voor koper (25°C): $R_{dc} = 21,6 \frac{N \cdot l_w}{D^2} \quad [\mu\Omega]$

waarin: N = aantal windingen
l_w = gem. lengte van één winding [mm]
D = draaddiameter [mm]

Bij hoge frequenties speelt **Skin-effect** een rol: de weerstand wordt hoger bij toenemende frequentie.

Indringdiepte: $\Delta = (\pi \gamma \mu f)^{-1/2}$ [m]

waarin: γ = specifieke geleiding materiaal [S/m]
$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ = permeabiliteit materiaal [H/m]
f = frequentie [Hz]

Wisselstroomweerstand: $R_{ac} = \frac{1}{\pi \Delta \gamma D} = \sqrt{\frac{\pi \rho}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{f}{D}}$ [Ω/m]
(alleen voor 'vrije' geleider)

Voor koper is: $\Delta = 0,067 \cdot f^{-1/2}$ [m] (f in Hz;
$R_{ac} = 82,4 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}/D$ [Ω/m] D in mm)

Voor de meeste metalen is $\mu = 0{,}4\pi \cdot 10^{-6}$; dan is:

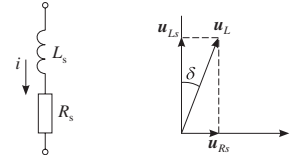
$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 5.10^{-9} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}} \qquad (\rho \text{ in } \Omega\text{m}, \; D \text{ in mm})$$

Kernverliezen

Kunnen gedacht worden te ontstaan in het reële deel R_s van een complexe *inductantie*.

$$\boldsymbol{Z}_L = j\omega \boldsymbol{L} = R_s + j\omega L_s$$

$$\tan\delta = \frac{R_s}{\omega L_s}$$



Figuur 1.2 Vervangingsschema van inductantie

In geval van een *luchtspleet* verkleinen de kernverliezen volgens:

$$\tan\delta_e = \frac{\mu_e}{\mu_i} \tan\delta$$

waarin: μ_i = relatieve permeabiliteit *zonder* luchtspleet
μ_e = relatieve permeabiliteit *met* luchtspleet

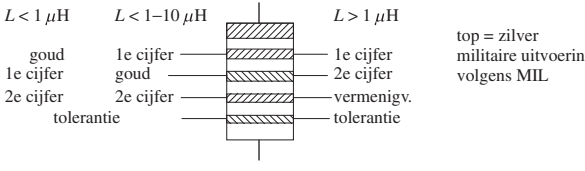
Voor grote μ_i wordt bij benadering: $\mu_e = l/d$

waarin: l = lengte magnetische weg in kernmateriaal
d = lengte luchtspleet

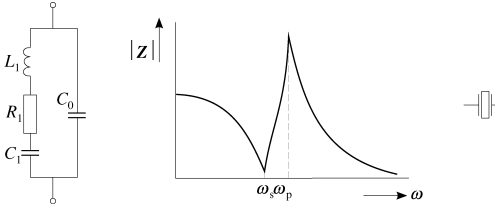
Kwaliteit van de spoel: $Q_s = \dfrac{1}{\tan\delta} = \dfrac{\omega L_s}{R_s}$

Tabel 1.4 Kleurcode voor L-waarde van vaste zelfinducties (weerstandsvorm)

kleur	1e cijfer	2e cijfer	vermenigv.	tolerantie
zwart	0	0	$\times$ 1 μH	
bruin	1	1	$\times$ 10 μH	
rood	2	2	$\times$ 100 μH	
oranje	3	3	$\times$ 10^3 μH	3%
geel	4	4		
groen	5	5		
blauw	6	6		
violet	7	7		
grijs	8	8		
wit	9	9		
zilver				10%
goud	komma			5%
geen				20%



1.4 Kristallen



Figuur 1.3 Vereenvoudigd vervangingsschema, impedantie $|\boldsymbol{Z}|$ en symbool van kristal

$$\boldsymbol{Z} = \frac{1}{\mathrm{j}\omega} \cdot \frac{\omega_\mathrm{s} R_1 Q}{r} \cdot \frac{1 + \mathrm{j}Q\left(\dfrac{\omega}{\omega_\mathrm{s}} - \dfrac{\omega_\mathrm{s}}{\omega}\right)}{1 + \mathrm{j}Q\sqrt{\left(1 + \dfrac{1}{r}\right)} \cdot \left(\dfrac{\omega}{\omega_\mathrm{p}} - \dfrac{\omega_\mathrm{p}}{\omega}\right)}$$

waarin:

Serie-resonantie frequentie: $\omega_\mathrm{s} = \sqrt{\dfrac{1}{L_1 C_1}}$

Parallel-resonantie frequentie: $\omega_\mathrm{p} = \sqrt{\dfrac{1}{L_1 C_1}\left(1 + \dfrac{1}{r}\right)}$

Elektro-mechanische *koppelfactor:* $r = \dfrac{C_0}{C_1}$

Kwaliteit: $Q = \dfrac{1}{R_1}\sqrt{\dfrac{L_1}{C_1}}$

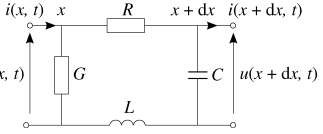
Voor $R_1 = 0$ wordt: $\boldsymbol{Z} = -\dfrac{\mathrm{j}}{\omega C_0} \cdot \dfrac{\dfrac{\omega_\mathrm{s}^2}{\omega^2} - 1}{\dfrac{\omega_\mathrm{p}^2}{\omega^2} - 1}$

Temperatuurscoëfficiënt van ω_s: $\alpha_{\omega\mathrm{s}} = \dfrac{1}{\omega_\mathrm{s}} \cdot \dfrac{\mathrm{d}\omega_\mathrm{s}}{\mathrm{d}T}$

Kwartskristal: $f_\mathrm{s} = 3$ tot 60 MHz, $Q =$ zeer groot, tot 10^6, $\alpha \approx 10^{-6}$/K
Loodzirconaat-titanaat: Q tot 500
Bariumtitanaat : Q tot 400

1.5 Transmissielijnen (lange leidingen)

Figuur 1.4 geeft het algemeen vervangingsschema per eenheid van lengte dx.



Figuur 1.4 Element transmissielijn

Telegraaf-vergelijkingen

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (RC + GL)\frac{\partial u}{\partial t} + RG{\cdot}u$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (RC + GL)\frac{\partial i}{\partial t} + RG{\cdot}i$$

Karakteristieke impedantie: $\mathbf{Z}_0 = \sqrt{\dfrac{R + \mathrm{j}\omega L}{G + \mathrm{j}\omega C}} = \dfrac{\overrightarrow{u(x)}}{\overrightarrow{i(x)}} = \dfrac{\overleftarrow{u(x)}}{\overleftarrow{i(x)}}$

waarin: $\overrightarrow{u(x)}$ en $\overrightarrow{i(x)}$ = spanning en stroom *heengaande* golf

$\overleftarrow{u(x)}$ en $\overleftarrow{i(x)}$ = spanning en stroom *gereflecteerde* golf

Propagatieconstante: $\gamma = \alpha + \mathrm{j}\beta = \sqrt{(R + \mathrm{j}\omega L)(G + \mathrm{j}\omega C)}$
waarin:

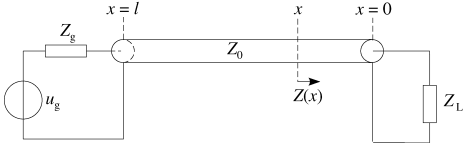
$$\alpha \approx \frac{1}{2}\frac{R}{|\mathbf{Z}_0|} + \tfrac{1}{2}G|\mathbf{Z}_0| = \textit{verzwakkingsconstante}\ [\mathrm{rad/m}]$$

$$\beta \approx \omega\sqrt{LC}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{R}{2\omega L} - \frac{G}{2\omega \mathrm{C}}\right)^2\right] = \textit{faseconstante}\ [\mathrm{rad/m}]$$

Deze formules gelden voor kleine waarden van α.
Voortplantingssnelheid = fasesnelheid:

$$v = f{\cdot}\gamma = \frac{\omega}{\beta} \quad [\mathrm{m/s}]$$

Impedantie $\mathbf{Z}(x)$ op afstand x van einde van de lijn (figuur 1.5):



Figuur 1.5 Transmissielijn met bron en belasting

$$\mathbf{Z}(x) = \mathbf{Z}_0 \frac{\mathbf{Z}_\mathrm{L} \cosh \mathrm{j}x + \mathbf{Z}_0 \sinh \mathrm{j}x}{\mathbf{Z}_0 \cosh \mathrm{j}x + \mathbf{Z}_\mathrm{L} \sinh \mathrm{j}x}$$

Reflectiecoëfficiënt op plaats van x (waarbij de belasting is aangebracht op plaats $x = 0$):

$$\boldsymbol{r}(x) = \frac{\overleftarrow{u(x)}}{\overrightarrow{u(x)}} = \frac{\overleftarrow{u(0)}}{\overrightarrow{u(0)}} \mathrm{e}^{-2\gamma x}$$

Aan de belasting is: $\boldsymbol{r}(0) = \dfrac{\mathbf{Z}_\mathrm{L} - \mathbf{Z}_0}{\mathbf{Z}_\mathrm{L} + \mathbf{Z}_0}$

Op plaats x is: $u(x) = (1 + \boldsymbol{r}(x))\overrightarrow{u(x)}$

$$i(x) = (1 - \boldsymbol{r}(x))\overrightarrow{i(x)}$$

Staande golf-verhouding (voltage standing wave ratio, VSWR):

$$S = \frac{u_\mathrm{max}}{u_\mathrm{min}} = \frac{i_\mathrm{max}}{i_\mathrm{min}} = \frac{1 + |\boldsymbol{r}|}{1 - |\boldsymbol{r}|}; \quad \text{dan } |\boldsymbol{r}| = \frac{S - 1}{S + 1}$$

Voor *verliesvrije* leiding is $R = G = 0$, dus:

$$\alpha = 0 \; ; \; \beta = \omega\sqrt{LC} = \frac{2\pi}{\gamma} \; ; \; v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\mathbf{Z}_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_0 \quad ; \quad \mathbf{Z}(x) = R_0 \frac{\mathbf{Z}_\mathrm{L} + \mathrm{j}\, R_0 \tan\beta x}{R_0 + \mathrm{j}\, \mathbf{Z}_\mathrm{L} + \tan\beta x}$$

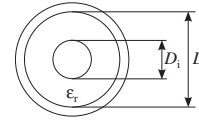
Kortgesloten lijn: $\mathbf{Z}(x) = \mathrm{j}\, R_0 \tan\beta x$

Open lijn : $\mathbf{Z}(x) = -\mathrm{j}R_0 \cot \beta x$
Aangepaste lijn : $\mathbf{Z}(x) = R_0$

Vermogen in belasting

- voor $r = 0 : P_{\mathrm{Lm}} = \dfrac{u_0^2}{R_{\mathrm{L}}}$
- voor $r \neq 0 : P_{\mathrm{L}} = P_{\mathrm{Lm}}(1 - r(0)^2) = \dfrac{(S+1)^2}{4S}$

Enkele coaxkabel



$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log\left(\frac{D_u}{D_i}\right) \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{D_u}{D_i}\right) \quad [\Omega]$$

Verliesweerstand: (D_i, D_u in mm; f in Hz; ρ in Ωm)

Algemeen:

$$r \approx 0,63 \cdot 10^{-6} \sqrt{\rho f}\left(\frac{1}{D_i} + \frac{1}{D_u}\right) + \frac{4}{\pi}\frac{\rho}{D_i^2} \cdot 10^6 \quad [\Omega/\mathrm{m}]$$

Voor koper:

$$r_c \approx 83,3 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}\left(\frac{1}{D_i} + \frac{1}{D_u}\right) + 22,3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{D_i^2} \quad [\Omega/\mathrm{m}]$$

$$L \approx 0,46 \log\left(\frac{D_u}{D_i}\right) \quad [\mu\mathrm{H/m}]$$

$$C \approx \frac{24,1\varepsilon_r}{\log\left(\dfrac{D_u}{D_i}\right)} \quad [\mathrm{pF/m}]$$

Verzwakking: in geleider $\alpha_g \approx 4,34 \dfrac{r}{Z_0}$ [dB/m]

in diëlektricum $\alpha_d \approx 91 \cdot 10^{-9} f \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \tan \delta$ [dB/m]

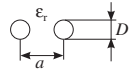
Tabel 1.5 Veel gebruikte coaxkabels

type RG/U	$Z_0[\Omega]$	buiten-diam. [mm]	C [pF/m]	α [dB/100m]		
				10	100	1000 MHz
8A	50	10,3	100	2,2	7,2	30
58C	50	5,0	100	4,6	16	66
214	50	10,8	100	2,2	7,2	30
11A	75	10,3	68	2,2	7,2	30
59B	75	6,1	68	3,6	10,8	38
328[1)]	25	37,1	280	–	–	–

[1)] Voor hoge spanningen tot 20 kV.

Open tweedraads-geleider

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \operatorname{arccosh}\left(\frac{a}{D}\right) \approx \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left(\frac{2a}{D}\right) \quad [\Omega]$$

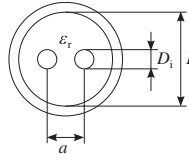


(a en D in dezelfde eenheid)

Afgeschermde tweedraads-geleider

$$Z_0 = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left[\frac{a}{D_i}\frac{D_u^2 + D_i^2 - a^2}{D_u^2 + D_i^2 + a^2} + \sqrt{\frac{a^2}{D_i^2}\left\{\frac{D_u^2 + D_i^2 - a^2}{D_u^2 + D_i^2 + a^2}\right\} - 1}\right]$$

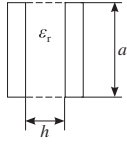
$$\approx \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln\left[\frac{2a}{D_i} \cdot \frac{D_u^2 - a^2}{D_u^2 + a^2}\right] \quad [\Omega]$$



(a, D_i en D_u in dezelfde eenheid)

Parallelstrip

$$Z_0 \approx \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \frac{h}{a} \quad [\Omega]$$

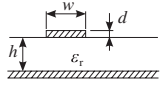


(h en a in dezelfde eenheid)

Microstrip

Formules zijn binnen 1% nauwkeurig voor:

$$\frac{d}{h} < 0,005 \;;\; 2 < \varepsilon_r < 10 \;;\; 0,1 < \frac{w}{h} < 5$$



Figuur 1.6 Microstrip

$$\text{Voor } w < h : Z_0 \approx \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \ln\left(8\frac{h}{w} + \frac{1}{h}\frac{w}{h}\right) \quad [\Omega]$$

$$w > h : Z_0 \approx \frac{120}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \frac{1}{\frac{w}{h} + 1{,}4 + \frac{2}{3}\ln\left(\frac{w}{h} + 1{,}44\right)} \quad [\Omega]$$

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 12\frac{h}{w}\right)$$

$$\text{Voor } \frac{w}{h} \to \infty : Z_0 = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \frac{h}{w} \quad [\Omega]$$

(d, h en w in dezelfde eenheid)

Verzwakking $\left(\text{voor } \frac{w}{h} \to \infty\right)$:

– In geleider: $\alpha_g \approx 8{,}68 \cdot 10^3 \frac{R_s}{Z_0 w}$ [dB/m] (w in mm)

waarin: $R_s = 1{,}12 \cdot 10^{-3}\sqrt{\rho \cdot f}$
f = frequentie [Hz]
ρ = soort. weerstand stripmateriaal [Ωm]

– Voor kopergeleider: $\alpha_g \approx 1{,}26 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{f}}{Z_0 w}$ [dB/m]

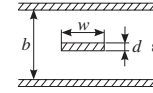
– In diëlektricum: $\alpha_d \approx 91 \cdot 10^{-9} f \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \cdot \tan\delta$ [dB/m]

Strip-transmissielijn

Formules zijn binnen 1% nauwkeurig voor:

$$\frac{d}{b} < 0{,}25 \text{ en } \frac{w}{b-d} > 0{,}05$$

$$Z_0 \approx \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{30\pi\left(1 - \frac{d}{b}\right)}{\frac{w_e}{b} + \frac{c}{\pi}} \quad [\Omega]$$



Figuur 1.7
Strip-transmissielijn

(b, d en w in dezelfde eenheid)

$$c = 2\ln\left(\frac{1}{1-\frac{d}{b}}+1\right) - \frac{d}{b}\ln\left\{\frac{1}{\left(1-\frac{d}{b}\right)^2}\right\}$$

$$\frac{w_e}{b} = \frac{w}{b} - \frac{\left(0,35-\frac{w}{b}\right)^2}{1+12\frac{d}{b}}$$

Verzwakking:

– In geleiders: $\alpha_g \approx \dfrac{0,023 R_s \sqrt{\varepsilon_r}}{30\pi(b-d)} Z_0 \cdot A$ [dB/m]

waarin: $R_s = 1,12 \cdot 10^{-3}\sqrt{\rho \cdot f}$ [Ω]

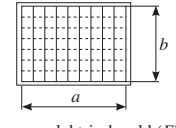
$$A \approx 1 + 2\frac{w}{b} + \frac{1}{\pi}\ln\frac{2b}{d}$$

(ρ in Ωm; f in Hz; b, d, w in m)

– In diëlektricum: $\alpha_d \approx 91.10^{-9} f \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \cdot \tan\delta$ [dB/m]

1.6 Golfgeleiders

Golfgeleiders (*golfpijpen*) met rechthoekige doorsnede worden het meest gebruikt.
Voor golfvoortplanting in de grondmode geldt:
$0,5\ \lambda < a < \lambda$
$b < 0,5\lambda$



— elektrisch veld (E)
----- magnetisch veld (H)

Golflengte in de vrije ruimte (lucht): $\lambda = \dfrac{c_0}{f}$

Golflengte in lengterichting van de pijp:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

Afsnijgolflengte in de grondmode:

$$\lambda_c = 2a$$

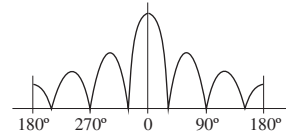
Voor $a = \lambda$ zijn tegelijkertijd meerdere veldverdelingen (modi) mogelijk. Voor energie-transport wordt vrijwel uitsluitend de grondmode toegepast. Vermogen dat getransporteerd kan worden, bijv. voor $\lambda = 30$ mm pijp (I-band) is: ong. 5k W gemiddeld en ong. 1 MW piek.

Tabel 1.8 Veel gebruikte golfpijpen in aluminium-uitvoering

benaming	freq. band [GHz]	binnenafm. [mm]	demping [dB/m]
WR 650	1,14 tot 1,73	165,1 × 82,55	0,0052
WR 284	2,60 tot 3,95	72,14 × 34,04	0,0189
WR 90	8,2 tot 12,5	22,86 × 10,16	0,110

1.7 Antennes

Antennediagram (*stralingspatroon*): Uitgezonden vermogen als functie van de hoek φ (in het horizontale vlak). Men onderscheidt een *hoofdbundel* en *zijlussen. Stralingspatronen* zijn afhankelijk van elevatiehoek θ en van de toepassing.



Figuur 1.8 Stralingspatroon antenne

Voorbeelden:
- Radio/TV: omni-directionele bundel in het horizontaal vlak.
- Straalverbinding: smalle hoofdbundel.
- Radar: zeer smalle hoofdbundel (1 à 2 graden), lage zijlussen (−30 dB t.o.v. top van hoofdbundel).

Bundelbreedte (B): hoek tussen de punten waar het stralingspatroon 3 dB t.o.v. het maximum is gedaald. Voor grote antennes

(afmeting $d \gg$ golflengte λ) : $B = 70\dfrac{\lambda}{d}$ [graden].

Antennewinst (gain):

$$G = \frac{\text{vermogensdichtheid in bepaalde richting}}{\text{verm.dichtheid in die richting bij gelijkmatige uitstraling (teller en noemer voor hetzelfde zendvermogen)}}$$

Meestal wordt met *gain* de maximale waarde hiervan bedoeld.

$$G \approx \frac{20\,000 \text{ tot } 30\,000}{B_1 \cdot B_2} \quad [-]$$

waarin:
B_1 en B_2 de bundelbreedten (in graden) in twee onderling loodrechte richtingen zijn

Vermogensdichtheid:

$$\varphi \approx \frac{G \cdot P_z}{4\pi r^2} \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

waarin:
P_z = zendvermogen van antenne [W]
G = gain in beschouwde richting [−]
r = afstand tussen meetpunt en zendantenne [m]

Effectief antenne-oppervlak (zeer afhankelijk van de fysische antenne-afmetingen):

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad [\mathrm{m^2}]$$

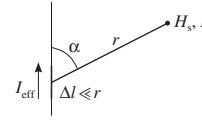
Ontvangen vermogen (op ontvang-antenne):

$$P_o = A_e \cdot \varphi \quad [\mathrm{W}]$$

waarin:
φ = vermogensdichtheid (stralingsflux) ter plaatse van de antenne [$\mathrm{W/m^2}$]

Stralingsveld van zeer korte zendantenne

Magnetische veldsterkte:



$$H_s = \frac{I_{eff} \cdot \Delta l}{2\lambda r} \sin\alpha \quad [\mathrm{A/m}]$$

Elektrische veldsterkte:

$$E_s = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot H_s \quad [\mathrm{V/m}] \quad (\mu \text{ en } \varepsilon \text{ voor omringend medium})$$

Golfweerstand van de EM-straling:

$$R = \frac{E_s}{H_s} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ [\Omega]$$

In vacuüm (en lucht): $R = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \approx 377\,\Omega$

Stralingsfluxdichtheid (vermogensdichtheid):

$$\varphi_s = E_s \cdot H_s = 120\pi H_s^2 = \frac{E_s^2}{120\pi} \quad [\mathrm{W/m^2}]$$

Stralingsenergiedichtheid (in lucht):

$$w_s = \frac{\varphi_s}{c_0}\ [\mathrm{J/m^3}]; \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \mathrm{m/s}$$

Stralingsweerstand van de antenne:

$$R_s = \frac{P_s}{I_{eff}^2} \quad [\Omega]$$

waarin:
P_s = uitgestraalde vermogen [W]
I_{eff} = effectieve stroom door de (dipool) antenne [A]

Eigenschappen van enige antennetypen
(l en λ altijd in dezelfde eenheid uitdrukken)

Elementaire dipool ($l < 0{,}1\lambda$):

$$R_s = 80\pi^2\left(\frac{l^2}{\lambda}\right) \quad [\Omega]; \quad G = 1{,}5 \quad [\text{dB}]$$

Korte dipoolantenne in midden gevoed ($l \ll \frac{1}{2}\lambda$):

$$R_s = 200\left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad [\Omega]\ ; \quad h_{\text{eff}} = \tfrac{1}{2}l\ ; \quad G = 1{,}5 \quad [\text{dB}]$$

Verticale dipoolantenne op aarde ($l \ll \frac{1}{4}\lambda$):

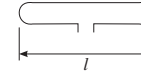
$$R_s = 400\left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad [\Omega]\ ; \quad h_{\text{eff}} = \tfrac{1}{2}l\ ; \quad G = 3 \quad [\text{dB}]$$

$\frac{1}{2}\lambda$-*dipool* ($2 \times \frac{1}{4}$):

$R_s = 73\ \Omega$ (voor $\lambda/2d \to \infty$); in praktijk: $R_s = 60\ \Omega$
$h_{\text{eff}} = 2l/\pi$; $A_{\text{eff}} = 1{,}64l^2/\pi$; $G = 1{,}64$

Verticale $\frac{1}{4}\gamma$-*antenne* op aarde:

$R_s \approx 30\ \Omega$; $h_{\text{eff}} = 2l/\pi$; $G = 3{,}28$ [dB]



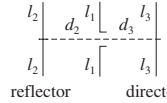
Figuur 1.9
Gevouwen dipool

Gevouwen dipoolantenne:

$l \approx 0{,}45\lambda$; $R_s \approx 280\ \Omega$

Yagi-Uda antenne (voor 100 MHz tot 1 GHz):

$A_{\text{eff}} \approx \lambda^2/4\pi$ [m^2]
$G \approx 6$ à 7 dB



voor $l_1 = l_2 = d_2 = \lambda/4$
$l_3 = 0{,}9\lambda/4; d_3 = 0{,}8\lambda/4$

Paraboolantenne:

$$A_{\text{eff}} \approx 0{,}55A\ ;\ G = \eta\frac{4\pi A}{\lambda^2}\ \ (0{,}4 < \eta < 0{,}6)$$

A = werkelijke oppervlakte [m^2]
λ = golflengte [m]

Maximum afstand tussen zender en ontvanger voor ultrakortegolfgebied:

$$d \approx 4{,}1(\sqrt{h_z} + \sqrt{h_0}) \quad [\text{km}]$$

waarin: h_z = hoogte zendantenne boven aarde [m]
h_o = hoogte ontvangantenne boven aarde [m]

2 Halfgeleidercomponenten

2.1 Afkortingen

ASCR	Asymmetrical Silicon Controlled Rectifier
BJT	Bipolaire Junctie Transistor
CMOS	Complementaire MOS
DIAC	Diode Alternating Current switch
FET	Field Effect Transistor
GBS	Gemeenschappelijke Basis Schakeling
GCS	Collector Schakeling
GDS	Drain Schakeling
GES	Emitter Schakeling
GGS	Gate Schakeling
GSS	Source Schakeling
GTO	Gate Turn Off
IGFET	Insulated Gate FET
IMPATT	Impact ionisation Avalance Transit Time
JFET	Junctie-FET
LASCR	Light Activated Silicon Controlled Rectifier
LED	Light Emitting Diode
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor FET
PIN	Positief Intrinsiek Negatief
SCR	Silicon Controlled Rectifier
TRAPATT	Trapped Plasma Avalance Triggered Time
TRIAC	Triode Alternating Current switch
UJT	Uni Junction Transistor

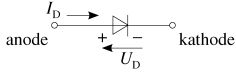
VDR Voltage Dependent Resistor
VVR Voltage Variabel Resistor

2.2 Gewone en schakeldiodes

PN-diode

Diodestroom:

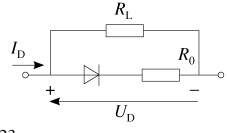
$$I_D = I_s\left(\exp\frac{U_D - R_0 I_D}{pU_T} - 1\right) + \frac{U_D}{R_L}$$



Verzadigingsstroom:

$$I_s = BT^m \exp\left(-\frac{U_{go}}{pU_T}\right)$$

vervangingsschema

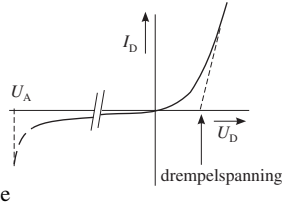


Temperatuurspanning:

$$U_T = \frac{kT}{e} \approx 86{,}174\cdot10^{-6}\cdot T \quad [\text{V}]$$

k = const. van Boltzmann $\approx 1{,}38\cdot10^{-23}$ J/K
e = elementaire lading $\approx 1{,}6\cdot10^{-19}$C
Voor $T = 300$ $U_T \approx 25{,}8$ mV

karakteristiek



B = constante, onafhankelijk van de temperatuur, afhankelijk van materiaal, junctie-oppervlak en dotering

U_{go} = *gapspanning* bij $T = 0$ K
m en p : materiaalconstanten
} zie tabel

R_0 vertegenwoordigt het materiaal:
$R_0 = 0{,}01\,\Omega$ tot $10\,\Omega$

R_L vertegenwoordigt lekstroom langs oppervlak
$R_L \approx 1\,\text{M}\Omega$

tabel

	Ge	Si
U_{go}	0,785 V	1,21V
m	≈2	≈1,5
p	≈1	≈2

Doorslag t.g.v. het *lawine-effect*:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{-U_D}{U_A}\right)^n} = \text{op } I_s \text{ werkende vermenigvuldigings-factor}$$

U_A = doorslagspanning [V]

$n \approx 2$ voor P-materiaal

$n \approx 4$ voor N-materiaal

Differentiaalweerstand in doorlaatgebied: $r_D = R_0 + \frac{pU_T}{I_D}$ [Ω]

Praktijkformule voor temperatuurafhankelijkheid van *diodesperstroom*:

$$I_{sper}(T_0 + \Delta T) \approx I_{sper}(T_0) \cdot 2^{\Delta T/10}$$: verdubbeling per $\Delta T \approx 10°C$

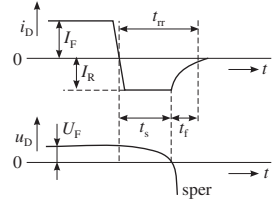
Temperatuurafhankelijkheid van de *voorwaartsspanning:*

$$\frac{dU_D}{dT} \approx -2,5 \text{ mV/K voor } I_D = \text{constant}$$

Diffusiecapaciteit: $C_d \approx \tau / r_d$ (τ = gem. levensduur ladingdragers in s)

Ruimteladingscapaciteit: $C_r \sim (-U_D)^{-q}$; $0,3 < q < 0,5$

Schakelverschijnselen PN-diode



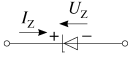
I_F = voorwaartsstroom [A]
U_F = voorwaartsspanning [V]
I_R = reverse stroom [A]
t_{rr} = reverse recovery time [s]
t_s = storage time [s]
t_f = fall time (transition time) [s]

Snelle schakeldiode (fast-recovery rectifier): kleine t_{rr}.

Soft-recovery diode: relatief grote t_f.
Snap-diode = step-recovery diode: zeer kleine t_f (enige ps).
Toepassing: pulsgeneratie, pulsvorming, generatie van zeer hoge frequenties.

2.3 Zenerdiode

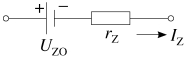
$$U_Z = U_{ZO} + r_Z I_Z$$



Differentiaalweerstand:

$$r_Z = \left.\frac{dU_Z}{dI_Z}\right|_{T=\text{const.}} \qquad r_Z = 2 \text{ tot } 20\,\Omega$$

vervangingsschema



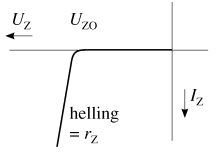
Temperatuurscoëfficiënt:

$$\alpha_Z = \frac{1}{U_Z} \cdot \left.\frac{dU_Z}{dI_Z}\right|_{I_Z=\text{const.}}$$

$\alpha_Z > 0$ voor $U_Z > 5$ à 6 V

$\alpha_Z < 0$ voor $U_Z < 5$ à 6 V

karakteristiek



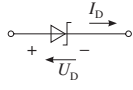
Speciale constructie: *Transient suppressor* (*Transorb*) kan groot vermogen in zeer korte tijd verwerken.

2.4 Schottky-diode (als gelijkrichter)

Lage drempelspanning:

$$U_d \approx 0{,}2 \pm 0{,}05\ V \quad \text{(low current versies)}$$

Relatief grote sperstroom: 10 tot 100 μA bij 20 °C.
Lage doorslagspanning: 30 tot 40 V.
Nagenoeg geen ladingsopslag.

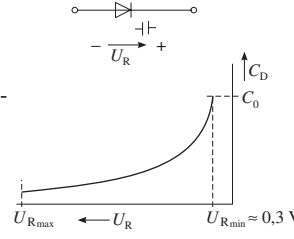


2.5 Capaciteitsdiode

Ook: *varicap, varactor.*

$$C_D \approx \frac{C_0}{\sqrt[n]{0,7 + U_R}}$$

C_0 = maximaal bruikbare capaciteit
U_R = sperspanning
n = fabricage-afhankelijke constante
Ge: $n \approx 2$
Si: $n \approx 3$

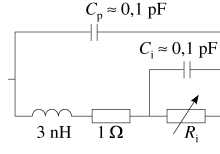


Voor *hypercap-diodes* (dubbele diffusie) is $n < 2$.

2.6 Hoog-frequent diodes

PIN-diode
Werkt als variabele HF-weerstand, regelbaar d.m.v. gelijkstroom/sperspanning.
Voorwaartstoestand:
$R_i \approx K \cdot I^{-0,87}$; $20 < K < 50$
Spertoestand: $R_i \approx 10$ kΩ.

vervangingsschema

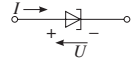


Toepassing: microgolf-schakelaar, duplexer in radarinstallatie, modulator. $\hat{I}_{HF}$ kan veel groter zijn dan I_{DC}.

Schottky-diode (Barrier diode, hot-carrier diode)
Nagenoeg geen ladingsopslag, meerderheidsladingdragers verzorgen geleiding. Toepassing: HF-schakeldiode.

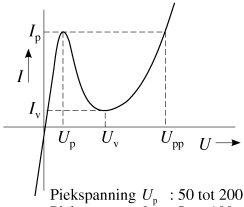
Tunneldiode

$$I = \underbrace{AU_j e^{-aU_j}}_{\text{tunnelstroom}} + \underbrace{B(e^{bU_j} - 1)}_{\text{normale diodestroom}}$$



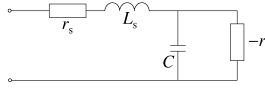
$U_j = U - r_s I$ = junctiespanning
Materiaal: Ge of GaAs.

karakteristiek



Piekspanning U_p : 50 tot 200 mV
Piekstroom I_p : 5 tot 100 mA
Dalspanning U_v : 300 tot 500 mV
Dalstroom I_v : 0,5 tot 5 mA
'Tweede'
piekspanning U_{pp} : 450 tot 1000 mV

vervangingsschema (voor negatief weerstandsgebied)

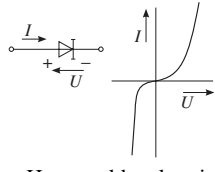


$r_s \approx$ 1,5Ω tot 4Ω
L_s = parasitaire serie-inductantie van de aansluitdraden
C = 1,5 tot 20 pF
$-r_n$ = negatieve differentiaal weerstand = 10 tot 120 Ω

Resistieve afsnijfrequentie = frequentie waarbij de kleinsignaal-weerstand = 0: f_{ro} = 1 tot 5 GHz.
Toepasssing: HF-schakelaar, versterkerelement in HF-oscillatoren.

Backdiode (terugwaartsdiode)

'Bijna-tunneldiode'. Toegepast in 3e kwadrant als HF-mixer. Ook als laagspannings referentie-diode.



Avalanche diodes

Ook: *avalanche-transit diode, read-diodes.* Hoge veldsterkte in verarmingslaag tussen P en N geeft stootvorming lawine-effect. Looptijd van lawine van P naar N geeft resonantiefrequenties tussen 3 en 300 GHz, afhankelijk van de sperspanning en de dotering. Toepassing in pulserende microgolfzenders met hoog vermogen. Twee typen:

- *IMPATT-diode* Impact ionisation avalanche transit time)
  $U_R \leqslant$ 100 V. Toepassing in microgolfoscillatoren.
- *TRAPATT-diode* (Trapped plasma avalanche triggered time)
  U_R zo hoog dat plasma ontstaat.

Gunn-diode

Ook: *bulk-effect diode, transferred electron diode*. Alleen stukje P of N, materiaal 'GaAs, InP.

Gunn-effect: ongelijke verdeling van veldsterkte voor sperspanning boven bepaalde grenswaarde.

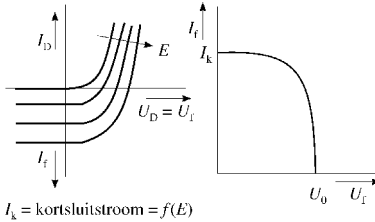
Verplaatsing van groepen ladingdragers geschiedt met bepaalde herhalingsfrequentie. Toepassing in microgolfoscillatoren en -versterkers.

2.7 *Foto-elektrische diodes*

Lichtgevoelige diode (fotodiode)

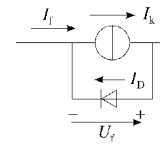
Stroom : $I_f = I_k - I_D$

Open sanning: $U_0 = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_k}{I_s} + 1\right)$



I_k = kortsluitstroom = $f(E)$
E = verlichtingssterkte
(voor U_f en I_0, zie par. 2.2)
U_T = temperatuurspanning
zie par. 2.2.

vervangingsschema



Fotostroom-mode : $I_f = I_k + I_s$

Fotospannings-mode: $U_f = U_T \cdot \ln\left[1 + \frac{I_p - I_f}{I_s}\right]$

LED's (Light Emitting Diodes)

Deze halfgeleiders stralen door fotoluminiscentie licht uit, waarvan de frequentie onder meer afhankelijk is van de band-afstand van de betrokken halfgeleidermaterialen. In de praktijk worden LED's samengesteld uit meerdere materialen, waarbij vooral galliumarsenide (GaAs) in diverse concentratieverhoudingen–vaak in combinatie met fosfor – toegepast wordt.
Een LED licht op als er een stroom in doorlaatrichting door vloeit. De levensduur van een LED wordt aanzienlijk verkort als deze in sperrichting gebruikt wordt en de sperspanning te hoog (als vuistregel: hoger dan de normale doorlaatspanning) wordt. In situaties waarin dit niet voorkomen kan worden: altijd een diode of andere LED anti-parallel schakelen.

Zichtbaar licht

De meest gebruikte LED's zijn van oudsher rood, geel/oranje of groen van kleur; blauwe LED's zijn wel verkrijgbaar, maar worden veel minder toegepast. Ook worden vaak meerdere LED's van verschillende kleuren in één behuizing ondergebracht, waardoor mengkleuren mogelijk zijn. Verder is er een enorme diversiteit op het gebied van stroomverbruik, stralingshoek en lichtintensiteit. Bovendien worden LED's in de meest uiteenlopende vormen en afmetingen geproduceerd, ook in SMD-uitvoering.
Een normale LED licht op bij een voorwaartse stroom van 10..20 mA. De zogenaamde 'low current' versies hebben slechts 2 tot 3 mA nodig. Bij LED's met hoge lichtintensiteit kan de benodigde stroom oplopen tot 50 mA. De spanningsval over een LED bedraagt ca. 1,5..2 V.
Toepassing: indicaties, displays, paneelverlichting

Infrarood licht (IR)

Deze LED's vinden vooral toepassing in afstandsbedieningen en -besturingen voor kortere afstanden, zoals voor audio/video apparatuur en data-overdracht tussen meetinstrumenten, computerapparatuur etc. Verder worden ze gebruikt in daglicht-ongevoelige lichtsluizen en reflectiesensoren.
Het stroomverbruik van IR-LED's ligt gemiddeld een factor 10 hoger dan van de eerder genoemde LED's voor het zichtbare spectrum.
Toepassing: afstandsbedieningen, draadloze data-communicatie

Blauw licht/Ultraviolet licht (UV)
Ultraviolet licht kent de volgende toepassingen:

- Speciale spectraallampen: voor chemische analyses.
- LED's: signalering/belichting van instrumenten; CD aftast-mechanismen voor hogere dichtheidtoepassingen.
- MV lampen: speciale fluorescentie-effecten/onderzoek; het uitharden van plastics en lijmen.

Bij kortgolvig UV is $\lambda \approx 250$ tot 360 nm.

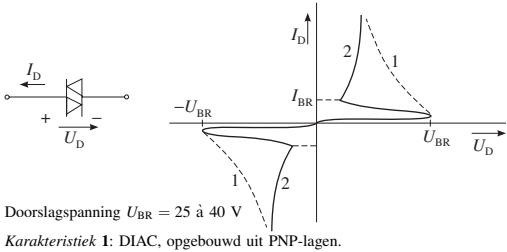
Tabel 2.1 Gegevens LED's

materiaal	golflengte [nm]	kleur
SiC	470	blauw
GaP	555	groen
GaAsP/GaP	590	geel
GaAsP/GaP	610	oranje
GaAlAs	660	rood
GaAlAs	880	IR
GaAs	940	IR

Bron: catalogus Kingbright Opto-electronic Components 1995

2.8 Halfgeleider-schakelaars

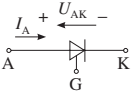
DIAC

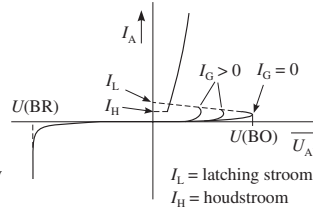


Doorslagspanning $U_{BR} = 25$ à 40 V

Karakteristiek **1**: DIAC, opgebouwd uit PNP-lagen.
Karakteristiek **2**: DIAC, opgebouwd uit twee anti-parallel geschakelde vierlagendiodes in één kristal; andere naam: *tweerichting-thyristordiode.*
$I_{BR} < 10\,\mu A$

Thyristor (SCR = Silicon Controlled Rectifier)





Doorslagspanningen:
$U(\mathrm{BO}) \approx U(\mathrm{BR})$ tot 3 kV
I_A tot 1600 A

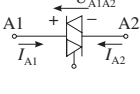
I_L = latching stroom
I_H = houdstroom

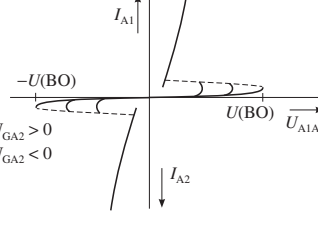
Beperkingen t.a.v.:

$\frac{\mathrm{d}I_A}{\mathrm{d}t}$ tijdens aanschakelen (20–200 A/μs)

$\frac{\mathrm{d}U_{AK}}{\mathrm{d}t}$ tijdens voorwaartse blokkering (20–300V/μs)

TRIAC





Werking in:
mode 1: $U_{A1A2} > 0$, $U_{GA2} > 0$
mode 4: $U_{A1A2} < 0$, $U_{GA2} < 0$
U(BO) tot 1,2 kV
I_{A1} en I_{A2} tot 500 A

Identieke beperkingen als bij thyristor.

Bijzondere thyristortypen

ASCR (asymmetrische thyristor):
- grote maximale waarden van $\mathrm{d}U_{AK}/\mathrm{d}t$ en $\mathrm{d}I_A/\mathrm{d}t$;
- kleine voorwaartsspanning;

– korte schakeltijden;
– kleine U(BO).

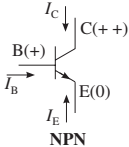
RCT (Reverse Conducting Thyristor):
– diodekarakteristiek in ‘sper’ richting;
– kleine voorwaartsspanning;
– korte schakeltijden;
– grote maximale $\mathrm{d}U_{\mathrm{AK}}/\mathrm{d}t$.

GTO (Gate Turn-off) Thyristor:
– afschakelen d.m.v. negatieve gatepuls.

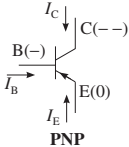
LASCR (lichtgevoelige thyristor):
– ontsteking d.m.v. lichtstroom.

2.9 Bipolaire transistors (BJT’s)

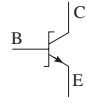
Symbolen



NPN

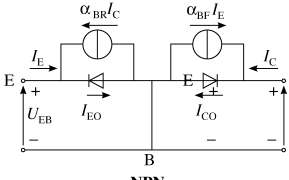


PNP

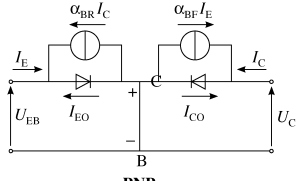


(NPN) Schottky

Twee-diode gelijkstroom-modellen (volgens Ebers en Moll)



NPN



PNP

$$I_E = -\alpha_{BR} I_C - I_{EO}\left(e^{-U_{EB}/U_T} - 1\right)$$
$$I_C = -\alpha_{BF} I_E - I_{CO}\left(e^{-U_{CB}/U_T} - 1\right)$$

$$I_E = -\alpha_{BR} I_C + I_{EO}\left(e^{U_{EB}/U_T} - 1\right)$$
$$I_C = -\alpha_{BF} I_E - I_{CO}\left(e^{U_{CB}/U_T} - 1\right)$$

I_{EO} en I_{CO} zijn open-circuit verzadigingsstromen (altijd positief). De kortsluit-verzadigingsstromen zijn:

$$I_{ES} = I_{EO}/(1 - \alpha_{BF}\ \alpha_{BR})$$
$$I_{CS} = I_{CO}/(1 - \alpha_{BF}\ \alpha_{BR})$$

Reciprociteitsformules:

$$\alpha_{BR} I_{CS} = \alpha_{BF} I_{ES} \quad \text{en} \quad \alpha_{BR} I_{CO} = \alpha_{BF} I_{EO}$$

Meestal wordt geschreven:

$$\alpha_B = \alpha_{BF} \quad \text{en} \quad I_{CBO} = |I_{CO}|$$

U_T = temperatuurspanning, zie par. 2.2.
α_B = gelijkstroom-versterkingsfactor voor gemeenschappelijke basis (index F = forward/voorwaarts; index **R** = reverse/terugwaarts).

Tekens van spanningen en stromen

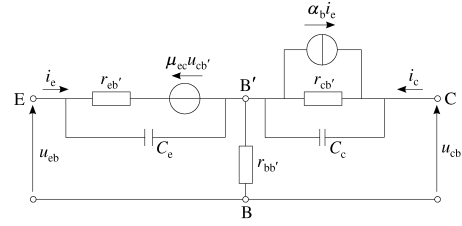
werkgebied	**NPN**					**PNP**				
	U_{CB}	U_{EB}	I_E	I_B	I_C	U_{CB}	U_{EB}	I_E	I_B	I_C
actief	+	−	−	+	+	−	+	+	−	−
afsnij	+	+	(+)	(−)	(+)	−	−	(−)	(+)	(−)
invers	−	+	(+)	+	−	+	−	(−)	−	+
verzadiging	−	−	−	+	+	+	+	+	−	−

(+) en (−): lekstromen

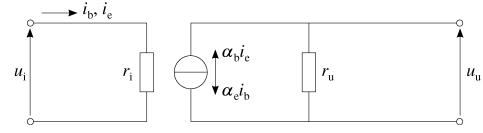
Vereenvoudigde formules voor gelijk- en wisselstroom

config.	gelijkstroom	wisselstroom
algemeen	$I_B + I_E + I_C = 0, I_{CEO} = (\alpha_E + 1)I_{CBO}$ $\alpha_E = \frac{\alpha_B}{1-\alpha_B}; \alpha_B = \frac{\alpha_E}{1+\alpha_E}$	$i_b + i_e + i_c = 0$ $\alpha_e = \frac{\alpha_b}{1-\alpha_b};$ $\alpha_b = \frac{\alpha_e}{1+\alpha_e};$
GBS	$I_C = -\alpha_B I_E + I_{CBO} = h_{FB} I_E$	$i_c = -\alpha_b i_e = h_{fb} i_e$
GES	$I_C = \alpha_E I_B + I_{CEO} = h_{FE} I_B$	$i_c = \alpha_e i_b = h_{fe} i_b$
GCS	$I_E = (\alpha_E + 1)I_B + I_{CEO}$	$i_e = (\alpha_e + 1)i_b$

Fysisch vervangingsschema (GBS)



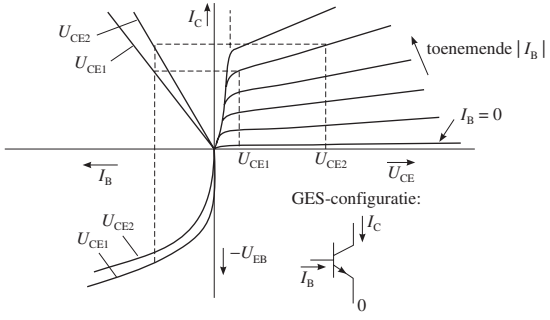
Praktisch LF-vervangingsschema



Formules voor kleine signalen, lage frequentie

	GBS	GES	GCS
ingangs-weerstand	$r_{ib} = r_{eb'} + (1-\alpha_b) r_{bb'}$	$r_{ic} = r_{bb'} + (\alpha_e + 1) r_{eb'}$ $= (\alpha_e + 1) r_{ib}$	$r_{ic} = r_{bb'} + \dfrac{R_E + r_{eb'}}{1-\alpha_b}$
uitgangs-weerstand	$r_{ub} = r_{cb'} + r_{bb'} \approx r_{cb'}$	$r_{ue} = (1-\alpha_b) r_{cb'}$ $= \dfrac{r_{cb'}}{\alpha_e + 1}$	$r_{uc} = r_{ib} // r_{ue} // R_E \approx r_{ib}$
steilheid	$S_b = \left(\dfrac{i_c}{u_{eb}}\right)_{u_{cb}=0} = \dfrac{\alpha_b}{r_{ib}}$	$S_e = \left(\dfrac{i_c}{u_{be}}\right)_{u_{ce}=0} = \dfrac{\alpha_e}{r_{ie}} = S_b$	
spannings-versterking	$A_{ub} = \dfrac{\alpha_b}{r_{ib}} \cdot R_L = S_b R_L$	$A_{ue} = \dfrac{-\alpha_c}{r_{ie}} \cdot R'_L = -S_e R'_L$	$A_{uc} = \dfrac{R'_E}{R'_E + r_{ib}} \approx 1$
vermogens-versterking	$A_{pb} = \dfrac{\alpha_b^2}{r_{ib}} \cdot R_L$	$A_{pe} = \dfrac{\alpha_e^2}{r_{ie}} \dfrac{(R'_L)^2}{R_L}$	$R'_E = R_E // r_{ue}$ $R'_L = R_L // r_{ue}$

Karakteristieken (voor NPN bij constante temperatuur)



Frequentiegedrag van BJT

Afsnijfrequentie voor stroomsturing:

$$f_{\alpha b} = \frac{1}{2\pi r_{eb'} C_e} \qquad f_{\alpha e} = \frac{f_{\alpha b}}{\alpha_{eo} + 1} = (1 - \alpha_{bo}) f_{\alpha b}$$

Afsnijfrequentie voor spanningssturing:

$$f_{sb} = f_{se} = \frac{1}{2\pi r_p C_e} \quad \text{waarin} \quad r_p = r_{bb'} // (\alpha_{eo} + 1) r_{eb'}$$

Transitie-frequentie:

$$f_T = f(|\boldsymbol{\alpha}| = 1) \approx f_{\alpha b}$$

Stroomversterkingsfactoren voor wisselstromen (index 0: $f = 0$):

$$\boldsymbol{\alpha}_b \approx \frac{\boldsymbol{\alpha}_{bo}}{1 + \mathrm{j} f / f_{\alpha b}} \qquad \boldsymbol{\alpha}_e \approx \frac{\boldsymbol{\alpha}_{eo}}{1 + \mathrm{j} f / f_{\alpha e}} = \frac{\boldsymbol{\alpha}_b}{1 - \boldsymbol{\alpha}_b}$$

Maximaal bereikbare frequentie:

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi r_{bb'} C_c}} \text{ (max. bereikbare versterking} = 1)$$

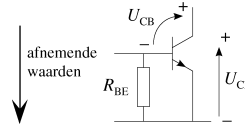
BJT als schakelaar (in GES)

Aan-toestand (Engels: *on*): beide juncties in geleiding.
- Verzadigingsspanning $|U_{\text{CE sat}}| < |U_{\text{EB aan}}|$
- Collectorstroom $I_{\text{C sat}} < h_{\text{FE}}\text{E}I_{\text{B}}$
- Oversturingsfactor $n = \dfrac{h_{\text{FE}}I_{\text{B}}}{I_{\text{Csat}}}$

Af-toestand (Engels: *off*): beide juncties gesperd.
- Collectorstroom $I_{\text{C}} \approx I_{\text{CBO}}$

Maximale spanningen m.b.t. doorslag

Open emitter $R_{\text{BE}} = \infty$	: BU_{CBO}
Met $0 < R_{\text{BE}} < \infty$	: BU_{CER}
Met $R_{\text{BE}} = 0$	: BU_{CES}
Met B-E-junctie gesperd	: BU_{CEX}
Open basis	: BU_{CEO}



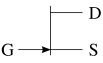
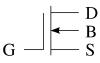
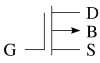
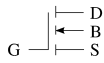
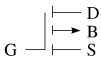
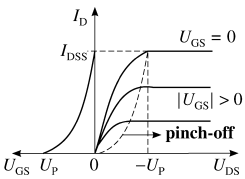
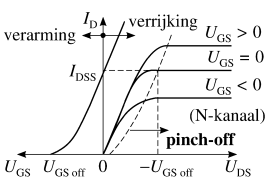
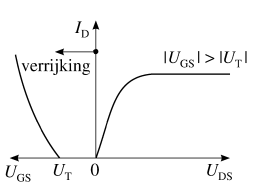
Secundaire doorslag begrenst maximale gelijkstroomdissipatie bij hoge waarden van U_{CE} ($< BU_{\text{CEO}}$).

2.10 Unipolaire transistors

Overzicht veldeffect-transistors (FET's)

Zie tabel op pag. I/42

Overzicht veldeffect-transistors (FET's)

naam	Junctie-FET (JFET)		FET's met geisoleerde gate (IGFET's, MOSFET's)			
Type	N-kanaal	P-kanaal	normaal aan = verarming		normaal af = verrijking	
			N-kanaal	P-kanaal	N-kanaal	P-kanaal
Symbool D = drain G = gate S = source B = substraat						
karak-teristieken						
U_{DS}	> 0	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0
I_D	> 0	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0
U_{GS}	< 0	> 0	neg. → pos.	pos. → neg.	> 0	< 0
U_P, U_{GSoff}, U_T	< 0	> 0	< 0	> 0	> 0	< 0
Engelse namen	Field-effect Transistor N-channel P-channel		Isolated Gate FET/Metal-Oxide-Semiconductor FET normal-on = depletion		normal-off = enhancement	

Gelijkstroomformules

JFET

$U_{DS(P)} = U_{GS} - U_P =$ spanning waarbij voor bepaalde U_{GS} het afknijpen (pinch-off) optreedt.
$U_P =$ afknijpspanning (pinch-off voltage)

Weerstandsgebied: $|U_{DS}| < |U_{DS(P)}|$

$$I_D = I_{DSS}\left[-\frac{2U_{DS}}{U_P}\left(1-\frac{U_{GS}}{U_P}\right)-\left(\frac{U_{DS}}{U_P}\right)^2\right]$$

Pinch-off gebied: $|U_{DS}| > |U_{DS(P)}|$

$$I_D = I_{DSS}\left(1-\frac{U_{GS}}{U_P}\right)^n \text{ voor } U_{DS} = \text{constant}; n \approx 2$$

IGFET, MOSFET (voor pinch-off gebied[1])
Normaal-aan FET (depletion):

$$I_D = \tfrac{1}{2}\beta(U_{GS} - U_{GS\,off})^2 = I_{DSS}\left[1-\frac{U_{GS}}{U_{GS\,off}}\right]^2$$

Normaal-af FET (enhancement): $I_D = \frac{1}{2}\beta(U_{GS} - U_T)^2$
N-kanaal: $U_{GS} > U_T > 0; \beta > 0$
P-kanaal: $U_{GS} < U_T < 0; \beta < 0$
β = constante, bepaald door afmetingen.
$U_T =$ drempelspanning (threshold voltage).

Wisselstroomformules (voor pinch-off gebied[1])

Steilheid:

$$S = \left.\frac{dI_D}{dU_{GS}}\right|_{U_{DS}=\text{const.}} = \left(\frac{i_d}{u_{gs}}\right)_{u_{ds}=0}$$

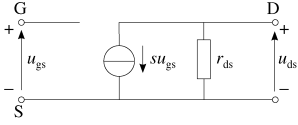
Spannings-versterkingsfactor:

$$\mu = \left.\frac{dU_{DS}}{dU_{GS}}\right|_{I_D=\text{const.}} = \left(\frac{u_{ds}}{u_{gs}}\right)_{i_d=0}$$

[1] Het *pinch-off gebied* is dat gebied waar de karakteristieken vlak gaan lopen, zie figuur in overzicht.

Drainweerstand (of inwendige weerstand):

$$r_{ds} = \left.\frac{dU_{DS}}{dI_D}\right|_{U_{GS}=\text{const.}} = \left(\frac{u_{ds}}{i_d}\right)_{u_{gs}=0}$$



laagfrequent vervangingsschema

JFET $: s = -\frac{2I_{DSS}}{U_P}\left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)$

IGFET : $s = \beta(U_{GS} - U_{GSoff})$

Barkhausen $: \mu = sr_{ds}$

Stroom: $i_d = s\left(u_{gs} + \frac{u_{ds}}{\mu}\right) = su_{gs} + \frac{u_{ds}}{r_{ds}}$

waarin:
s = steilheid [m A/V]

Formules voor kleine LF-signalen (pinch-off gebied)

	GSS	GGS	GDS (source-volger)
ingangsweerstand r_i	∞	$\frac{r_{ds} + R_D}{\mu + 1} \approx \frac{1}{s}$	∞
uitgangsweerstand r_u	r_{ds}	r_{ds}	$\frac{r_{ds}R_S}{r_{ds} + (\mu + 1)R_S}$
spanningsversterking A_u	$-s\frac{r_{ds}R_D}{r_{ds} + R_D}$	$\frac{(\mu + 1)R_D}{r_{ds} + R_D}$	$\frac{\mu R_s}{r_{ds} + (\mu + 1)R_S}$

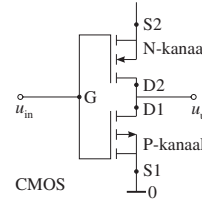
R_D = belastingsweerstand in draincircuit
R_S = weerstand tussen source en aarde

$$\text{Grensfrequentie}: f_s = \frac{1}{2\pi r_s C_{gs}} \qquad r_s \approx \frac{1}{3s} \text{ voor JFET} \qquad r_s \approx \frac{1}{5s} \text{ voor IGFET}$$

FET als spanningsafhankelijke weerstand (VVR of VDR):

$$r_{ds} = \frac{U_P^2}{2I_{DSS}} \cdot \frac{1}{U_{GS} - U_P - U_{DS}}$$

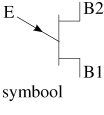
Complementaire MOS (CMOS)
N-kanaal en P-kanaal verrijkingstypen op één chip. Toegepast als inverterend schakelelement.



Constructienamen van diverse fabrikanten voor het verkrijgen van bepaalde eigenschappen, vooral snel vermogens-schakelen:

VMOS, VFET, HEXFET, DMOS, UMOS, ZMOS, SIPMOS.

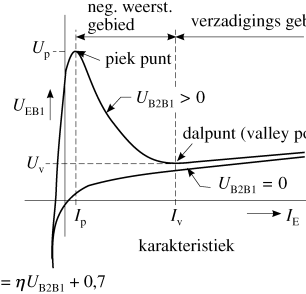
Uni-junction transistor (UJT)

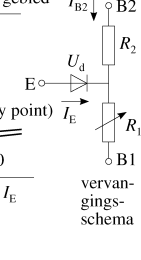


symbool

Intrinsieke weerstands-verhouding:

$$\eta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$





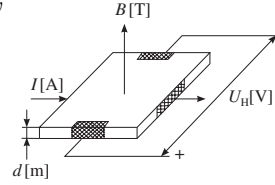
Piek-puntspanning: $U_p = \eta U_{B2B1} + 0{,}7$

2.11 Magnetische sensoren

Hall-element

De kracht F op een met snelheid v in veld B bewegende lading q is:

$$\boldsymbol{F} = q(\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$$



Dit resulteert in een elektrische veldsterkte:

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{H}} = -\frac{1}{nq}(\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B}) = -r_{\mathrm{H}}(\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B})$$

De Hall-spanning over een plaatje met dikte d is:

$$U_{\mathrm{H}} = r_{\mathrm{H}} \frac{I \cdot B}{d} \quad [\mathrm{V}]$$

$$r_{\mathrm{H}} = \frac{1}{nq} = \text{Hall-constante} \quad [\mathrm{m^3/C}]$$

n = concentratie ladingdragers in het plaatje [$\mathrm{m^{-3}}$]
$q = +e$ (gaten) of $-e$ (elektronen)
e = eenheidslading ($0{,}16 \times 10^{-18}$C) van electron
P-materiaal: U_{H} en r_{H} positief
N-materiaal: U_{H} en r_{H} negatief

$r_{\mathrm{H}} \approx -\ 116 \times 10^{-6}$ $\mathrm{m^3/C}$ voor InSb
$r_{\mathrm{H}} \approx -\ 112 \times 10^{-6}$ $\mathrm{m^3/C}$ voor InAs
$r_{\mathrm{H}} \approx -\ 1{,}4 \times 10^{-6}$ $\mathrm{m^3/C}$ voor InP

Magneto-resistieve sensor (MRS of MDR)

$\boldsymbol{B} \perp \boldsymbol{I}\ ;\ \varrho = \varrho_0(1 + k_{\mathrm{m}}B^2)$

ϱ_0 = specifieke weerstand voor $B = 0$

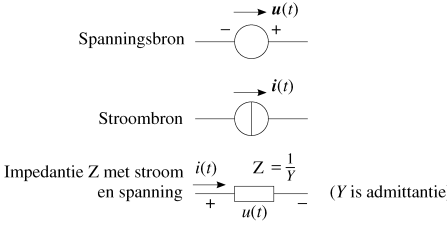
Voor InSb: $k_{\mathrm{m}} = 38$. Bij $B = 1\mathrm{T}$

Andere materialen: InSb-NiSb en Permalloy (Ni-Fe legering)

3 Netwerktheorie

Zie ook par. 7.2 en hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par. 8.

3.1 Symbolen



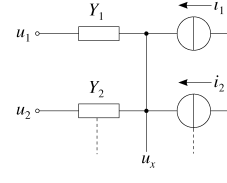
3.2 Wetten en theorema's

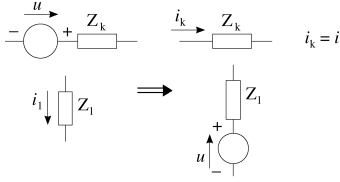
Eerste wet van Kirchhoff (stroomwet): $\sum i(t) = 0$
($i(t)$ is positief naar het knooppunt)

Tweede wet van Kirchhoff (*spanningswet*: $\sum u(t) = 0$
(rondgaand langs maas van netwerk; $u(t)$ is zowel actief als passief)

Superpositietheorema

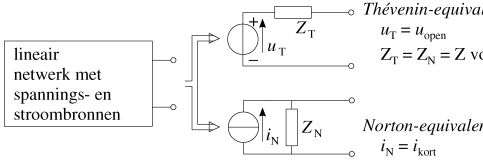
$$u_x = \frac{\sum_i u_i Y_i + \sum_i i_i}{\sum_i Y_i}$$





i_l stroomt t.g.v. u i_k stroomt t.g.v. u

Theorema's van Thévenin en Norton
Een lineair netwerk kan worden vervangen door één spanningsbron (Thévenin) of één stroombron (Norton).



Zie voor *ster/driehoek-transformatie*,
hoofdstuk G4 *Elektro-installatietechniek*, par. 2.1

3.3 Netwerkcomponenten

Weerstand: $u(t) = R \cdot i(t)$ $\qquad i(t) = G \cdot u(t)$

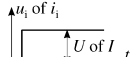
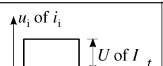
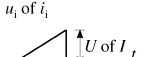
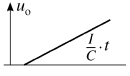
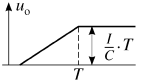
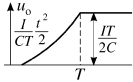
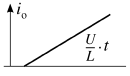
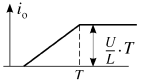
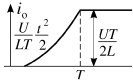
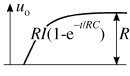
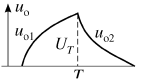
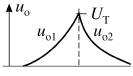
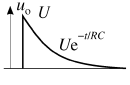
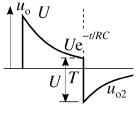
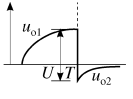
Condensator: $u(t) = \dfrac{1}{C}\displaystyle\int_0^t i(\tau)\mathrm{d}\tau + u(0)$ $\qquad i(t) = C\dfrac{\mathrm{d}u(t)}{\mathrm{d}t}$

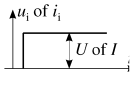
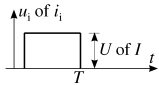
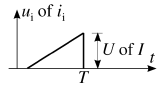
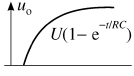
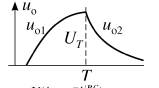
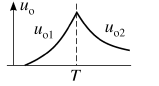
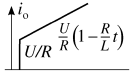
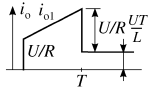
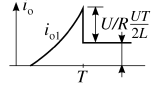
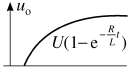
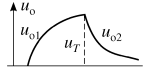
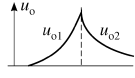
$$\Delta q = C\Delta u$$

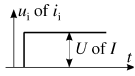
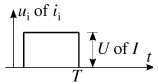
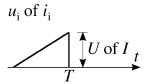
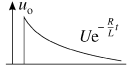
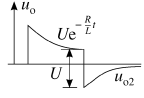
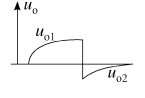
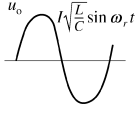
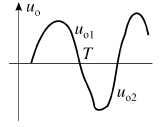
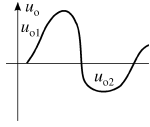
Spoel: $u(t) = L\dfrac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}$ $\qquad i(t) = \dfrac{1}{C}\displaystyle\int_0^t u(\tau)\mathrm{d}\tau + i(\mathrm{o})$

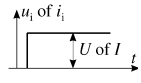
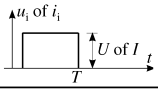
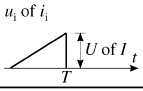
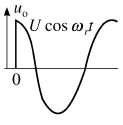
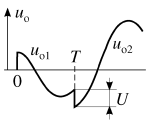
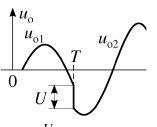
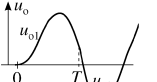
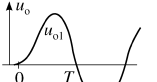
$$\Delta\phi = L\Delta i$$

3.4 In- en uitschakelverschijnselen

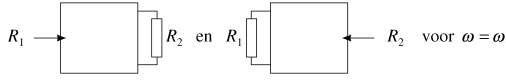
ingangs-golfvorm / circuit	u_i of i_i	u_i of i_i	u_i of i_i
			
			
			
			
		$u_{o1} = RI(1-e^{-t/RC})$ $u_{o2} = U_T e^{-(t-T)/RC}$ $U_T = RI(1-e^{-T/RC})$	$u_{o1} = IR\left[\frac{t}{T} - \frac{RC}{T}(1-e^{-t/RC})\right]$ $u_{o2} = IR e^{-(t-T)/RC} \times \left[1 - \frac{RC}{T}(1-e^{-T/RC})\right]$
			
		$u_{o2} = -U(1-e^{-T/RC}) \times e^{-(t-T)/RC}$	$u_{o1} = U\frac{RC}{T}(1-e^{-t/RC})$ $u_{o2} = U\left[\frac{RC}{T}(1-e^{-T/RC}) - 1\right] \times e^{-(t-T)/RC}$

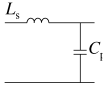
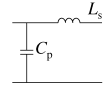
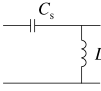
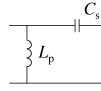
			
		 $u_{o1} = U(1-e^{-t/RC})$ $u_{o2} = U_T e^{-(t-T)/RC}$ $U_T = U(1-e^{-T/RC})$	 $u_{o1} = U\left[\frac{t}{T} - \frac{RC}{T}(1-e^{-t/RC})\right]$ $u_{o2} = U\left[1 - \frac{RC}{T}(1-e^{-T/RC}\right]$ $\times e^{-(t-T)/RC}$
		 $i_{o1} = \frac{U}{R}\left(1-\frac{R}{L}t\right)$	 $i_{o1} = \frac{U}{R}\left(\frac{t}{T} + \frac{R}{LT}\frac{t^2}{2}\right)$
		 $u_{o1} = U\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)$ $u_{o2} = U_T e^{-\frac{R}{L}(t-T)}$ $U_r = U\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)$	 $u_{o1} = U\left[\frac{t}{T} - \frac{L}{RT}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\right]$ $u_{o2} = U\left[1 - \frac{L}{RT}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\right]$ $\times e^{-\frac{R}{L}(t-T)}$

	u_i of i_i 	u_i of i_i 	u_i of i_i 
		 $u_{o2} = -U\left(1-e^{-\frac{R}{L}T}\right)\times$ $\times e^{-\frac{R}{L}(t-T)}$	 $u_{o1} = \frac{UL}{RT}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)$ $u_{o2} = -U\left[1-\frac{L}{RT}\left(1-e^{-\frac{R}{L}T}\right)\right]$ $\times e^{-\frac{R}{L}(t-T)}$
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$		 $u_{o1} = I\sqrt{\frac{L}{C}}\sin\omega_r t$ $u_{o2} = I\sqrt{\frac{L}{C}}[\sin\omega_r t -$ $\sin\omega_r(t-T)]$	 $u_{o1} = \frac{IL}{T}(1-\cos\omega_r t)$ $u_{o2} = I\sqrt{\frac{L}{C}}\left(1-\frac{1}{\omega_r T}\sin\omega_r T\right)$ $\times \sin\omega_r(t-T)$ $+\frac{LI}{T}(1-\cos\omega_r(T)$ $\times \cos\omega_r(t-T)$

	u_i of i_i	u_i of i_i	u_i of i_i
			
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$		 $u_{01} = U\cos\omega_r t$ $u_{02} = -U(1-\cos\omega_r T)$ $\cos\omega_r(t-T) -$ $-U\sin\omega_r T \times$ $\times \sin\omega_r(t-T)$	 $u_{01} = \frac{U}{\omega_r T}\sin\omega_r t$ $u_{02} = -U\left(1 - \frac{\sin\omega_r T}{\omega_r T}\right) \times$ $\times \cos\omega_r(t-T) +$ $+\frac{U}{\omega_r T}\cos\omega_r T \sin\omega_r(t-T)$
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$u_0 = U(1-\cos\omega_r t)$	 $u_{01} = U(1-\cos\omega_r t)$ $u_{02} = U(1-\cos\omega_r T)$ $\cos\omega_r(t-T)$ $+ U\sin\omega_r(t-T)$	 $u_{01} = U\left(\frac{t}{T} - \frac{1}{\omega_r T}\sin\omega_r t\right)$ $u_{02} = U\left(1 - \frac{\sin\omega_r T}{\omega_r T}\right)$ $\cos\omega_r(t-T) +$ $+\frac{U}{\omega_r T}(1-\cos\omega_r T)$ $\times \sin\omega_r(t-T)$

3.5 Aanpassingsnetwerken

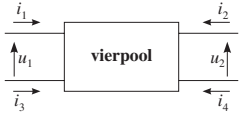


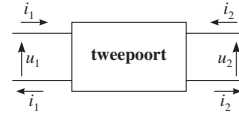
$R_1 < R_2$	$R_1 > R_1$
	
$\omega_0 L_s = \sqrt{R_1(R_2 - R_1)}$	$\omega_0 L_s = \sqrt{R_2(R_1 - R_2)}$
$\omega_0 C_p = \frac{1}{R_2}\sqrt{\frac{R_2 - R_1}{R_1}}$	$\omega_0 C_p = \frac{1}{R_1}\sqrt{\frac{R_1 - R_2}{R_2}}$
	
$\omega_0 L_p = R_2\sqrt{\frac{R_1}{R_2 - R_1}}$	$\omega_0 L_p = R_1\sqrt{\frac{R_2}{R_1 - R_2}}$
$\omega_0 C_s = \frac{1}{\sqrt{R_1(R_2 - R_1)}}$	$\omega_0 C_s = \frac{1}{\sqrt{R_2(R_1 - R_1)}}$

4 Vierpool- en tweepoortschakelingen

4.1 Algemeen

Een *tweepoort* is een *vierpool* waarvan de klemstromen paarsgewijs gelijk, maar tegengesteld zijn. Algemeen wordt voor beide netwerken de naam *vierpool* gebruikt.



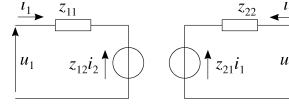


4.2 Vierpoolcoëfficiënten

Een vierpool kan beschreven worden d.m.v. twee vierpool-vergelijkingen met *vier vierpoolcoëfficiënten* of *parameters*. Bij ieder paar vergelijkingen hoort een vervangingsschema. Er wordt uitgegaan van lineaire vierpolen voor zgn. *kleine signalen*.

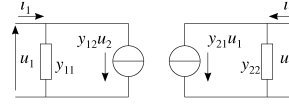
z-parameters

$$u_1 = z_{11} i_1 + z_{12} i_2$$
$$u_2 = z_{21} i_1 + z_{22} i_2$$



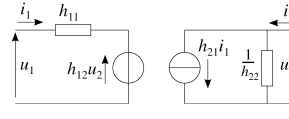
y-parameters

$$i_1 = y_{11} u_1 + y_{12} u_2$$
$$i_2 = y_{21} u_1 + y_{22} u_2$$



h-parameters

$$u_1 = h_{11} i_1 = h_{12} u_2$$
$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2$$



Betrekkingen tussen vierpoolmatrices

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = Z \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = Y \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

van→ naar↓	Z		Y		H	
Z	z_{11}	z_{12}	$\frac{y_{22}}{\Delta u}$	$-\frac{y_{12}}{\Delta y}$	$\frac{\Delta h}{h_{22}}$	$\frac{h_{12}}{h_{22}}$
	z_{21}	z_{22}	$-\frac{y_{21}}{\Delta y}$	$\frac{y_{11}}{\Delta y}$	$-\frac{h_{21}}{h_{22}}$	$\frac{1}{h_{22}}$
Y	$\frac{z_{22}}{\Delta z}$	$-\frac{z_{12}}{\Delta z}$	y_{11}	y_{12}	$\frac{1}{h_{11}}$	$-\frac{h_{12}}{h_{11}}$
	$-\frac{z_{21}}{\Delta z}$	$-\frac{z_{11}}{\Delta z}$	y_{21}	y_{22}	$\frac{h_{21}}{h_{11}}$	$\frac{\Delta h}{h_{11}}$
H	$\frac{\Delta z}{z_{22}}$	$\frac{z_{12}}{z_{22}}$	$\frac{1}{y_{11}}$	$-\frac{y_{12}}{y_{11}}$	h_{11}	h_{22}
	$-\frac{z_{21}}{z_{22}}$	$\frac{1}{z_{22}}$	$\frac{y_{21}}{y_{11}}$	$\frac{\Delta y}{y_{11}}$	h_{21}	h_{22}

Algemeen : $\Delta p = p_{11}p_{22} - p_{12}p_{21}$ (determinant)

Transistorparameters (BJT)

$$\text{GBS} \quad Y_b = \begin{vmatrix} y_{ib} & y_{rb} \\ y_{fb} & y_{ob} \end{vmatrix} \quad H_b = \begin{vmatrix} h_{ib} & h_{rb} \\ h_{fb} & h_{ob} \end{vmatrix}$$

$$\text{GES} \quad Y_e = \begin{vmatrix} y_{ie} & y_{re} \\ y_{fe} & y_{oe} \end{vmatrix} \quad H_e = \begin{vmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{vmatrix}$$

Belangrijkste betrekkingen tussen transistorparameters (zie ook par. 2.9, fysisch vervangingsschema):

$$h_{ib} = r_{eb'} + (1 - \alpha_b) r_{bb'} = r_{ib} \qquad h_{ie} \approx r_{ie} = r_{bb'} + (\alpha_e + 1) r_{eb'}$$

$$h_{ie} \approx \frac{h_{ib}}{1+h_{fb}} \qquad h_{fb} = -\alpha_b \qquad\qquad h_{fe} \approx -\frac{h_{fb}}{1+h_{fb}} = \alpha_e$$

$$h_{rb} \approx \mu_{ec} \qquad\qquad h_{re} \approx -\frac{\mu_{ec}}{1-\mu_{ec}}$$

$$h_{ib} = r_{eb'} + (1-\alpha_b) r_{bb'} = r_{ib} \qquad\qquad h_{ie} \approx r_{ie} = r_{bb'} + (\alpha_e + 1) r_{eb'}$$

$$y_{ie} \approx \frac{1}{r_{ie}} + j\omega(C_e + C_c) \qquad\qquad y_{re} \approx -j\omega C_c$$

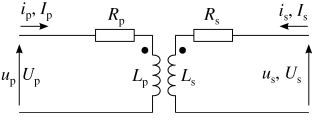
$$y_{fe} \approx = \frac{\alpha_e}{r_{ie}} - j\omega C_e \qquad\qquad y_{oe} \approx \frac{1}{r_{ue}} + j\omega C_c$$

Voor FET's in GSS:

$$y_{is} = j\omega(C_{in} + C_{gd}) \qquad\qquad y_{rs} = -j\omega C_{gd}$$

$$y_{fs} = s - j\omega C_{gd} \qquad\qquad y_{os} = \frac{1}{r_{ds}} - j\omega C_{gd}$$

4.3 Transformatoren



$$u_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt}$$

$$u_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_p}{dt}$$

$M = k\sqrt{L_p L_s}$
$k < 1$

De punt geeft het begin van de wikkeling

Voor sinusvormige stromen en spanningen:

$$U_p = (R_p + j\omega L_p)\boldsymbol{I}_p + j\omega M \boldsymbol{I}_s$$
$$U_s = (R_s + j\omega L_s)\boldsymbol{I}_s + j\omega M \boldsymbol{I}_p$$

Perfecte transformator ($k = 1$)

$$M = \sqrt{L_p L_s}$$

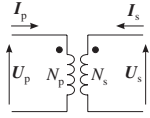
Transformatieverhouding $n = \dfrac{N_s}{N_p} = \sqrt{\dfrac{L_s}{L_p}}$

Ideale transformator

$L_p, L_s \to \infty \quad R_p = R_s = 0 \quad k = 1$

$$\left|\frac{\boldsymbol{U}_s}{\boldsymbol{U}_p}\right| = \frac{N_s}{N_p} = n$$

$$\left|\frac{\boldsymbol{I}_s}{\boldsymbol{I}_p}\right| = \frac{N_p}{N_s} = \frac{1}{n}$$

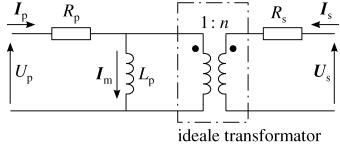


Perfecte transformator met magnetiseringsstroom

$$\boldsymbol{I}_m \approx \frac{\boldsymbol{U}_p}{j\omega L_p}$$

$$\boldsymbol{I}_p = \boldsymbol{I}_m - n\boldsymbol{I}_s$$

$$n = \frac{N_s}{N_p}$$



Normale transformator

= perfecte transformator + spreidingsinductanties

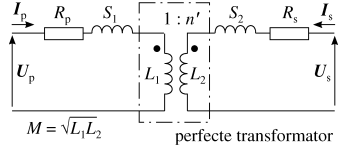
$S_1 = (1 - k)L_p$

$S_2 = (1 - k)L_s$

$L_1 = kL_p$

$L_2 = kL_s$

$$n' \approx \sqrt{\frac{L_s}{L_p}}$$

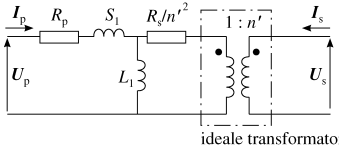


Alle parameters aan primaire zijde:

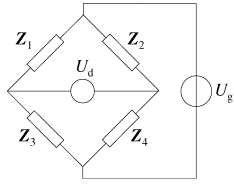
$S_1 = (1 - k^2)L_p$

$L_1 = k^2 L_p$

$$n' \approx \frac{1}{k}\sqrt{\frac{L_s}{L_p}} = \frac{1}{k}\frac{N_s}{N_p}$$



4.4 Brugschakelingen



Brug van Wheatstone
$U_d = 0$ voor:

$$\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_4 = \mathbf{Z}_2\mathbf{Z}_3$$
$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$$
$$(\mathbf{Z} = |\mathbf{Z}|e^{j\varphi})$$

Brug van Wheatstone voor weerstandsmeting:
$\mathbf{Z}_1 = R_1; \mathbf{Z}_2 = R_2; \mathbf{Z}_3 = R_3; \mathbf{Z}_4 = R_x$(te meten weerstand)

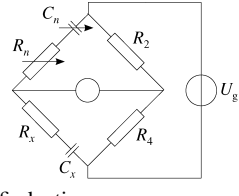
$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

Voor meting van kleine capaciteiten:
$Z_1 = \dfrac{1}{j\omega C_n}$ (C_n variabel); $\mathbf{Z}_2 = R_2; \mathbf{Z}_4 = R_4$

$$\mathbf{Z}_3 = \frac{1}{j\omega C_x} \qquad C_x = \frac{R_2}{R_4} C_n$$

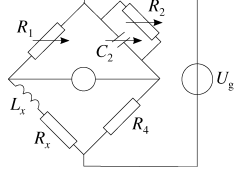
Voor meting van capaciteiten met verliezen:

$$C_x = \frac{R_2}{R_4} C_n$$
$$R_x = \frac{R_4}{R_2} R_n$$



Brug van Maxwell voor meting van zelfinducties:

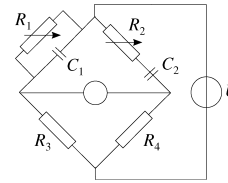
$$L_x = R_1 R_4 C_2$$
$$R_x = \frac{R_1 R_4}{R_2}$$



R_1 en R_2 variabel
C_2 in stappen

Brug van Wien voor frequentiemeting:
$R_4 = 2R_2 \quad R_1 = R_2 = R$

$$C_1 = C_2 = C \qquad \omega = \frac{1}{RC}$$



5 Filters

5.1 Polynomen en realisatie

Impedantiefunctie

Algemene *impedantiefunctie* van tweepool (éénpoort):

$$Z(s) = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \cdots + a_n s^n}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \cdots + b_m s^m}$$

Bestaat Z uitsluitend uit inductanties en capacitanties dan kan Z als volgt worden geschreven:

$$Z(s) = \frac{(1+\pi_1 s^2)(1+\pi_3 s^2)\ldots}{sC_0(1+\pi_2 s^2)(1+\pi_4 s^2)\cdots}$$

$$\pi_i = \frac{1}{\omega_i^2}$$

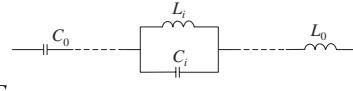
$$\text{of } Z(s) = \frac{sL_0(1+\pi_2 s^2)(1+\pi_4 s^2)\cdots}{(1+\pi_1 s^2)(1+\pi_3 s^2)\cdots}$$

Synthese aan de hand van een polynoom

Methode van Foster (breukafsplitsin):

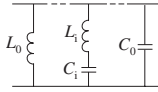
$$Z(s) = \frac{1}{sC_0} + \sum_i \frac{sL_i}{1 + s^2 L_i C_i} + sL_0 \text{ geeft :}$$

serie-schakeling



$$Y(s) = \frac{1}{sL_0} + \sum_i \frac{sC_i}{1 + s^2 L_i C_i} + sC_0 \text{ geeft}$$

parallel-schakeling



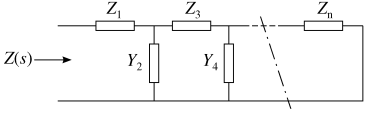
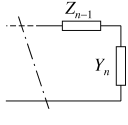
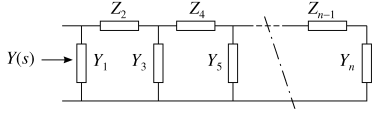
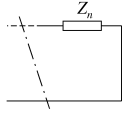
Methode van Cauer (kettingbreukontwikkeling):

$$Z(s) = Z_1 + \cfrac{1}{Y_2 + \cfrac{1}{Z_3 + \cfrac{1}{Y_4 + \cfrac{1}{\vdots}}}} \qquad \text{of } Y(s) = Y_1 + \cfrac{1}{Z_2 + \cfrac{1}{Y_3 + \cfrac{1}{Z_4 + \cfrac{1}{\vdots}}}}$$

le realisatie (pool op ∞):	2e realisatie (pool op 0)
$Z_i = sL_i$	$Z_i = \dfrac{1}{sC_i}$
$Y_i = sC_i$	$Y_i = \dfrac{1}{sL_i}$

Orde n van polynomen in $Z(s)$ of $Y(s)$ geeft aantal componenten in netwerk.

Netwerkrealisatie

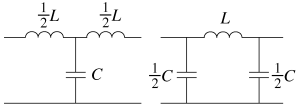
n = oneven	n = even
	
	

5.2 *Vierpoolfilters*

Vierpoolfilters zijn filters op basis van spiegelbeeldimpedantie.

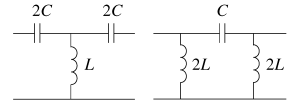
Laagdoorlaatfilters	**Hoogdoorlaatfilters**

R_0 = aanpassingsweerstand, f_g = grensfrequentie



$$L = \frac{R_0}{\pi f_g} \qquad C = \frac{1}{\pi R_0 f_g}$$

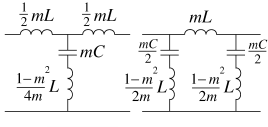
$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad f_g = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$$



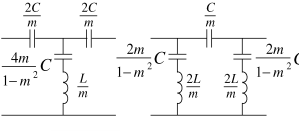
$$L = \frac{R_0}{4\pi f_g} \qquad C = \frac{1}{4\pi R_0 f_g}$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad f_g = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}$$

f_∞ = frequentie voor oneindige demping



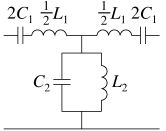
$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_g}{f_\infty}\right)^2}$$

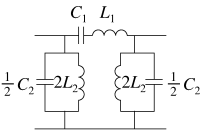


$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_\infty}{f_g}\right)^2}$$

Banddoorlaatfilters

f_1 = ondergrens doorlaatgebied
f_2 = bovengrens doorlaatgebied





$$L_1 = \frac{R_0}{\pi(f_2 - f_1)}$$

$$L_2 = \frac{R_0(f_2 - f_1)}{4\pi f_1 f_2}$$

$$C_1 = \frac{f_2 - f_1}{4\pi f_1 f_2 R_0}$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi R_0 (f_2 - f_1)}$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$$

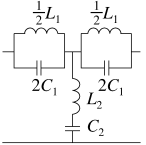
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

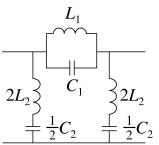
$$f_1 = f_0\left\{\sqrt{\frac{C_1}{C_2} + 1} - \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}\right\}$$

$$f_2 = f_0\left\{\sqrt{\frac{C_1}{C_2} + 1} + \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}\right\}$$

Bandsperfilters

f_1 = ondergrens spergebied
f_2 = bovengrens spergebied





$$L_1 = \frac{R_0(f_2 - f_1)}{\pi f_1 f_2}$$

$$L_2 = \frac{R_0}{4\pi(f_2 - f_1)}$$

$$C_1 = \frac{1}{4\pi R_0 (f_2 - f_1)}$$

$$C_2 = \frac{f_2 - f_1}{\pi R_0 f_1 f_2}$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

$$f_1 = \tfrac{1}{4} f_0\left\{\sqrt{\frac{C_2}{C_1} + 16} - \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}\right.$$

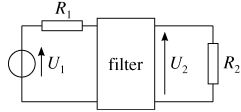
$$f_2 = \tfrac{1}{4} f_0\left\{\sqrt{\frac{C_2}{C_1} + 16} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}\right\}$$

5.3 Benaderingsmethoden ideale filterkarakteristiek

Basisfilter is laagdoorlaatfilter; andere filters worden hiervan d.m.v. normering *afgeleid* zie par. 5.5.

Vermogensoverdracht van een tweepoortfilter

$$|S_{21}|^2 = \frac{P_2}{P_A} = \frac{\frac{1}{2}|U_2|^2/R_2}{\frac{1}{8}|U_1|^2/R_1}$$



Figuur 5.1 Tweepoortfilter

P_A = uit bron beschikbare vermogen

$$\frac{P_A}{P_2} = |G(s)|^2 = 1 + |K(s)|^2$$

waarin: $G(s)$dempingsfunctie[1)]
$K(s)$karakteristieke functie

Voor stationaire harmonische signalen: $s = j\omega$.

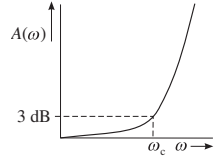
Dempingsfactor: $A(\omega) = 20 \log G(j\omega)$ [dB]
Fasehoek : $B(\omega) = \arg G(j\omega)$ [rad]
Groeplooptijd : $\tan(\omega) = \dfrac{dB}{d\omega}$ [s]

Butterworth-benadering

- maximaal vlak verloop in doorlaatband;
- monotoon toenemende demping in sperband

De genormeerde dempingsfunctie ($\omega_c = 1$) van de n-de orde volgt uit:

$$|G(s)|^2 = G(s)\cdot G(-s) = \\ = 1 + s^n(-s)^n$$



Figuur 5.2 Demping Butterworth-filter

[1)] Het veelgebruikte woord *demping* heeft hier de betekenis van *verzwakking*.

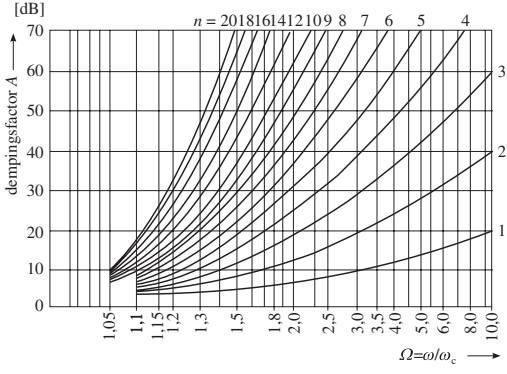
Hiermee wordt de spanningsoverdrachtsfunctie van het filter:

$$H(\mathrm{j}\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+\omega^{2n}}}$$

Hier is $G(s)$ het Butterworth-polynoom. In tabel 5.1 zijn de eerste vier polynomen vermeld. Figuur 5.3 geeft $A(\omega)$ als functie van $\Omega = \dfrac{\omega}{\omega_c}$ en n.

Tabel 5.1 Butterworth-polynomen

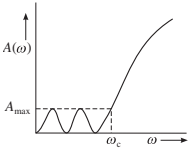
n	Butterworth-polynoom $G(s)$
1	$1+s$
2	$1+\sqrt{2}s+s^2$
3	$1+2s+2s^2+s^3$
4	$1+2,6131s+3,4142s^2$ $+2,6131s^3+s^4$



Figuur 5.3 Demping voor Butterworth-benadering

Tsjebysjev-benadering (Engels: Chebyshev)

- gelijke rimpel in doorlaatband;
- monotoon toenemende demping in sperband.



Voor $\omega_c = 1$ is:

$$|G/(s)|^2 = 1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega)$$

Figuur 5.4 Demping Tsjebysjev-filter

ε = reële constante = maat voor rimpel
$\varepsilon < 1$

$$A_{\max} = 10\log(1+\varepsilon^2)$$
$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1A_{\max}} - 1}$$

Aantal maxima + minima van de rimpel = orde n van het filter $T_n(\omega)$ = Tsjebysjev-polynoom van de n-de orde:

$$T_n\omega = \cos(n \arccos \omega) \text{ (zie tabel 5.2)}$$

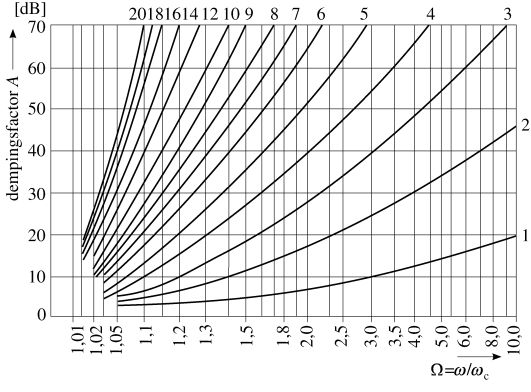
Algemeen is:

$$T_{n+1} = 2\omega T_n - T_{n-1}$$

Tabel 5.2 Tsjebysjev-polynomen

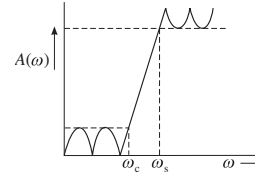
n	$T_n(\omega)$
0	1
1	ω
2	$2\omega^2 - 1$
3	$4\omega^3 - 3\omega$
4	$8\omega^4 - 8\omega^2 + 1$
5	$16\omega^5 - 20\omega^3 + 5\omega$

Figuur 5.5 geeft $A(\omega)$ als functie van $\Omega = \dfrac{\omega}{\omega_c}$ en n, voor $\varepsilon = 1$ ($A_{\max} = 3$ dB)



Figuur 5.5 Demping voor Tsjebysjev-bendadering

Cauer-benadering (Tsjebysjev-compleet of elliptische benadering)
- constante rimpel in doorlaatband en sperband;
- steil verloop tussen doorlaat- en sperband.



Figuur 5.6 Demping Cauer-filter

Voor $\omega_c = 1$ is:

$$|G/(s)|^2 = 1 + \varepsilon^2 C_n^2(\omega)$$

C_n is nu zo gekozen dat in de doorlaatband en de sperband constante rimpel optreedt.

Bessel-benadering
- maximaal vlak verloop van de groeplooptijd als functie van de frequentie;
- geringe uitslingerverschijnselen bij snelle ingangsvariaties;
- slechte dempingskarakteristiek bij $\omega = \omega_c$.

$$G(j\omega) = ae^{j\omega T_0}$$
$$A(\omega) = 10 \log e^{(\omega T_0)^2/(2n-1)}$$

waarin: T_0 = constante groeplooptijd

Toepassing: in TV- en audiofilters.

5.4 Filtersynthese

Op basis van de benaderingsmethoden kunnen passieve filters met L en C worden ontworpen. Daartoe moet het filter aan beide zijden met een zuivere weerstand worden afgesloten. Het ontwerpen geschiedt aan de hand van grafieken en tabellen; zie hiervoor o.a.: Zverev, *Handbook of Filter Synthesis*.

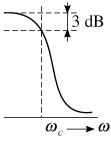
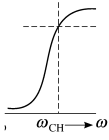
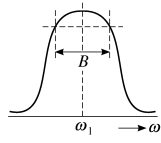
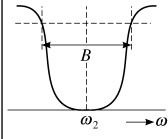
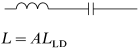
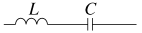
5.5 Frequentie- en impedantienormering

Impedantie-normering

$$R \rightarrow mR \qquad L \rightarrow mL \qquad C \rightarrow \frac{C}{m}$$

Frequentie-normering

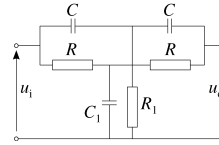
LD = laagdoorlaat
HD = hoogdoorlaat
BD = banddoorlaat
BS = bandsper
B = bandbreedte
A = normeringsfactor

basisfilter LD	HD	BD	BS
			
	$\omega_{LD} = -\frac{A}{\omega}$	$\omega_{LD} = A\frac{\omega_1^2 - \omega^2}{-\omega}$	$\omega_{LD} = A\frac{\omega}{\omega_2^2 - \omega^2}$
R	R	R	R
L_{LD}	$C = \frac{1}{AL_{LD}}$	 $L = AL_{LD}$ $C = \frac{1}{A\omega_1^2 L_{LD}}$	$L = \frac{AL_{LD}}{\omega_2^2}$ $C = \frac{1}{AL_{LD}}$
C_{LD}	$L = \frac{1}{AC_{LD}}$	$L = \frac{1}{A\omega_1^2 C_{LD}}$ $C = AC_{LD}$	 $L = \frac{1}{AC_{LD}}$ $C = A\omega_2^2 C_{LD}$
ω_c	$\omega_{CH} = \frac{A}{\omega_c}$	$B = \frac{\omega_c}{A}$; $A = \frac{\omega_c}{B}$	$B = \frac{A}{\omega_c}$; $A = \omega_c B$

5.6 T-netwerken

Dubbel T-netwerk

Voor $\dfrac{R}{C} = 4\dfrac{R_1}{C_1}$ is:



Figuur 5.7 Dubbel T-netwerk

$$\frac{u_o}{u_i} = 0 \text{ bij de frequentie}$$

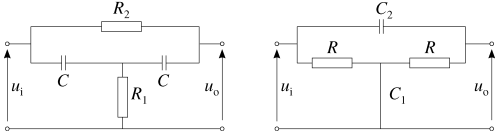
$$\omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{R\sqrt{C \cdot C_1}}$$

$$R_1 = \frac{R}{2} \text{ en } C_1 = 2C \text{ geeft : } H(\omega) = \frac{j\beta}{4 + j\beta}$$

met β = relatieve verstemming $= \dfrac{\omega}{\omega_0} - \dfrac{\omega_0}{\omega}$, waarin: $\omega_0 = 1/RC$.

Overbrugde T-netwerken

De netwerken van figuur 5.8 zijn geen nulnetwerken, d.w.z. u_0/u_i kan niet $= 0$ worden voor enige frequentie.

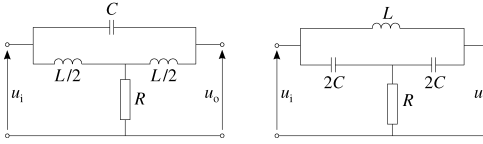


Figuur 5.8 Overbrugde T-netwerken

Voor het linker netwerk is de overdrachtsfunctie:

$$H(j\omega) = \frac{1 - \tau_1\tau_2\omega^2 + 2\tau_1 j\omega}{1 - \tau_1\tau_2\omega^2 + (2\tau_1 + \tau_2)j\omega} \quad \text{met} \quad \tau_1 = R_1C \text{ en } \tau_2 = R_2C$$

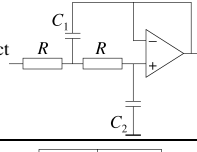
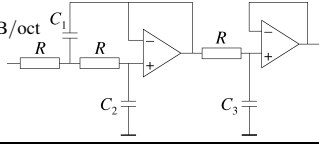
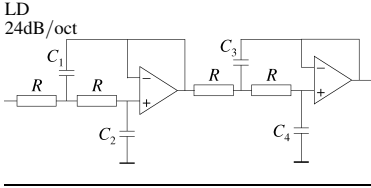
$$|H(j\omega)|_{min} = \frac{2\tau_1}{2\tau_1 + \tau_2} \quad \text{voor} \quad \omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_1\tau_2}} = \frac{1}{C\sqrt{R_1R_2}}$$



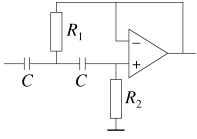
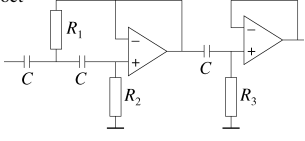
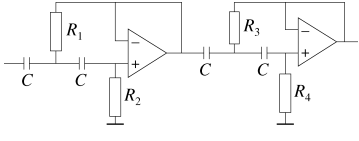
Figuur 5.9 Nulnetwerken

Voorwaarde: $R = \frac{1}{4}Q_0\omega_0 L$, $Q_0 =$ kwaliteitsfactor van L bij $\omega = \omega_0$; $\dfrac{u_o}{u_i} = 0$ voor $\omega = \omega_0 = \sqrt{\dfrac{1}{LC}}$

5.7 Actieve filters

(C en R gegeven voor afsnijfrequentie f)	Bessel	Butterworth
LD 12dB/oct 	$C_1 = \dfrac{0,1444}{f \cdot R}$ $C_2 = \dfrac{0,1084}{f \cdot R}$	$C_1 = \dfrac{0,2251}{f \cdot R}$ $C_2 = \dfrac{0,1125}{f \cdot R}$
LD 18dB/oct 	$C_1 = \dfrac{0,1520}{f \cdot R}$ $C_2 = \dfrac{0,07955}{f \cdot R}$ $C_3 = \dfrac{0,1203}{f \cdot R}$	$C_1 = \dfrac{0,3183}{f \cdot R}$ $C_2 = \dfrac{0,07958}{f \cdot R}$ $C_3 = \dfrac{0,1592}{f \cdot R}$
LD 24dB/oct 	$C_1 = \dfrac{0,1162}{f \cdot R}$ $C_2 = \dfrac{0,1066}{f \cdot R}$ $C_3 = \dfrac{0,1599}{f \cdot R}$ $C_4 = \dfrac{0,06162}{f \cdot R}$	$C_1 = \dfrac{0,1723}{f \cdot R}$ $C_2 = \dfrac{0,1470}{f \cdot R}$ $C_3 = \dfrac{0,4159}{f \cdot R}$ $C_4 = \dfrac{0,0609}{f \cdot R}$

Actieve filters (vervolg)

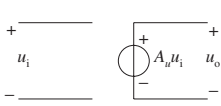
(C en R gegeven voor afsnijfrequentie f)		Bessel	Butterworth
HD 12dB/oct		$R_1 = \frac{0,1753}{f \cdot C}$ $R_2 = \frac{0,2338}{f \cdot C}$	$R_1 = \frac{0,1125}{f \cdot C}$ $R_2 = \frac{0,2251}{f \cdot C}$
HD 18dB/oct		$R_1 = \frac{0,1667}{f \cdot C}$ $R_2 = \frac{0,3184}{f \cdot C}$ $R_3 = \frac{0,2105}{f \cdot C}$	$R_1 = \frac{0,0796}{f \cdot C}$ $R_2 = \frac{0,3183}{f \cdot C}$ $R_3 = \frac{0,1592}{f \cdot C}$
HD 24dB/oct		$R_1 = \frac{0,2181}{f \cdot C}$ $R_2 = \frac{0,2376}{f \cdot C}$ $R_3 = \frac{0,1584}{f \cdot C}$ $R_4 = \frac{0,4111}{f \cdot C}$	$R_1 = \frac{0,1470}{f \cdot C}$ $R_2 = \frac{0,1723}{f \cdot C}$ $R_3 = \frac{0,0609}{f \cdot C}$ $R_4 = \frac{0,4159}{f \cdot C}$

Banddoorlaat- en bandsperfilters kunnen worden verkregen d.m.v. juiste samenvoeging van LD en HD filtersecties.
Toepassing van actieve filters tot ongeveer 1 MHz.

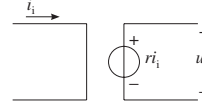
6 Versterkers

6.1 *Ideale en niet-ideale versterkers*

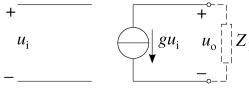
Ideale versterkers (transactors)



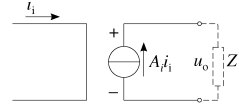
spanning-spanning



stroom-spanning



spanning-stroom

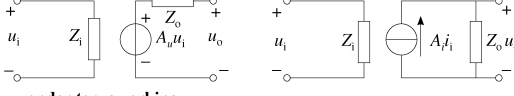


stroom-stroom

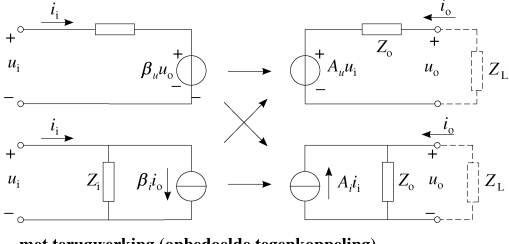
A_u = spanningsversterking (ook μ)
A_i = stroomversterking (ook α)

r = transresistantie
g = transconductantie

Niet-ideale versterkers



zonder terugwerking



met terugwerking (onbedoelde tegenkoppeling)

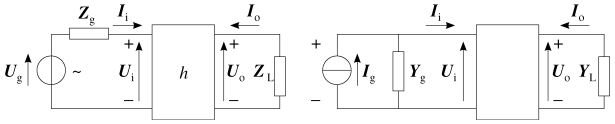
6.2 Versterkers algemeen

Algemeen

$U, \boldsymbol{I}$ = draaivectornotatie van spanning en stroom (zie ook hoofdstuk A4 *Natuurkunde*, par. 8.3)

$\boldsymbol{Z} = R + \mathrm{j}X \qquad \boldsymbol{Y} = G + \mathrm{j}B$

De versterkers worden voorgesteld als tweepoorten, beschreven m.b.v. *h*- resp. *y*-parameters.



Ingangsimpedantie

$$\boldsymbol{Z}_\mathrm{i} = \frac{\boldsymbol{U}_\mathrm{i}}{\boldsymbol{I}_\mathrm{i}} = h_{11} - \frac{h_{12}h_{21}\boldsymbol{Z}_\mathrm{L}}{1 + h_{22}\boldsymbol{Z}_\mathrm{L}}$$

Ingangsadmittantie

$$\boldsymbol{Y}_\mathrm{i} = \frac{\boldsymbol{I}_\mathrm{i}}{\boldsymbol{U}_\mathrm{i}} = y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{y_{22} + \boldsymbol{Y}_\mathrm{L}}$$

Uitgangsimpedantie

$$\boldsymbol{Z}_\mathrm{o} = \left|\frac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{o(open)}}}{\boldsymbol{I}_{\mathrm{o(kort)}}}\right| \text{ voor } \boldsymbol{U}_\mathrm{g} = \text{constant} = \frac{h_{11} + \boldsymbol{Z}_\mathrm{g}}{(h_{11} + \mathrm{Z}_\mathrm{g})h_{22} - h_{12}h_{21}}$$

Uitgangsadmittantie

$$\boldsymbol{Y}_\mathrm{o} = \left|\frac{\boldsymbol{I}_{\mathrm{o(kort)}}}{\boldsymbol{U}_{\mathrm{o(open)}}}\right| \text{ voor } \boldsymbol{I}_\mathrm{g} = \text{constant} = y_{22} - \frac{y_{12}y_{21}}{y_{11} + \mathrm{Y}_\mathrm{g}}$$

Spanningsversterking

$$\boldsymbol{A}_u = \frac{\boldsymbol{U}_\mathrm{o}}{\boldsymbol{U}_\mathrm{i}} = -\frac{h_{21}}{h_{11}\left(h_{22} + \dfrac{1}{\boldsymbol{Z}_\mathrm{L}}\right) - h_{12}h_{21}} \qquad \boldsymbol{A}_u = -\frac{y_{21}}{y_{22} + \boldsymbol{Y}_\mathrm{L}}$$

Stroomversterking

$$\boldsymbol{A}_i = \frac{\boldsymbol{I}_\mathrm{o}}{\boldsymbol{I}_\mathrm{i}} = \frac{h_{21}}{1 + h_{22}\boldsymbol{Z}_\mathrm{L}} \qquad \boldsymbol{A}_i = \frac{y_{21}\boldsymbol{Y}_\mathrm{L}}{y_{11}(y_{22} + \boldsymbol{Y}_\mathrm{L}) - y_{12}y_{21}}$$

Vermogensversterking: $A_p = \dfrac{P_\mathrm{o}}{P_\mathrm{i}} = |A_u| \cdot |A_i|$.

MF- en HF-versterkers

Vermogensversterking (*power gain*):

$$A_p = \frac{G_\mathrm{L}}{g_\mathrm{i}}\left(\frac{y_{21}}{y_{22}+Y_\mathrm{L}}\right) \quad \text{met} \quad g_\mathrm{i} = \mathrm{Re}\left(y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{y_{22}+\boldsymbol{Y}_\mathrm{L}}\right)$$

Transductor-versterking (*transducer gain*):

$$A_\mathrm{T} = \frac{P_\mathrm{L}}{P_{\mathrm{g\,max}}} \qquad \text{waarin: } P_{\mathrm{g\,max}} = \frac{i_\mathrm{g}^2}{4G_\mathrm{g}}; \quad G_\mathrm{g} = \mathrm{Re}(Y_\mathrm{g})$$

$$A_\mathrm{T} = \frac{4g_\mathrm{i}G_\mathrm{L}|y_{21}|^2}{\{y_{12}y_{21} - (y_{11}+Y_\mathrm{g})(y_{22}+Y_\mathrm{L})\}^2}$$

Unilaterale versterker als $y_{12} = 0$; dan is $g_\mathrm{i} = g_{11}$. Dan:
Beschikbare vermogensversterking (*available power gain*)

$$A_{p\mathrm{u}} = \frac{G_\mathrm{L}}{g_{11}}\frac{|y_{21}|^2}{|y_{22}+Y_\mathrm{L}|^2}$$

Aanpassing op uitgang: $y_{22} + Y_\mathrm{L} = 2g_{22}$, dan $G_\mathrm{L} = g_{22}$. Dan:
Maximale vermogensversterking (*maximum available gain*)

$$A_{p\,\mathrm{max}}(MAG) = \frac{|y_{21}|^2}{4g_{11}g_{22}}$$

Als $y_{12} \neq 0$ moet versterker onvoorwaardelijk stabiel zijn.

Stabiliteitsfactor van Rollett:

$$k_\mathrm{s} = \frac{2g_{11}g_{22} - \mathrm{Re}(y_{12}y_{21})}{|y_{12}y_{21}|} > 1$$

Voor $k_\mathrm{s} \geq 1$ is vermogensversterking maximaal als:

$$G_\mathrm{g} = \frac{|y_{12}y_{21}|}{2g_{22}}\sqrt{k_s^2 - 1} \qquad B_\mathrm{g} = -\mathrm{Im}\left(y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{2g_{22}}\right)$$

$$G_\mathrm{L} = \frac{|y_{12}y_{21}|}{2g_{11}}\sqrt{k_s^2 - 1} \qquad B_L = -\mathrm{Im}\left(y_{22} - \frac{y_{12}y_{21}}{2g_{11}}\right)$$

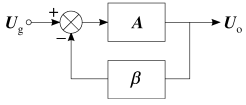
Maximaal stabiele vermogensversterking:

$$A_{\text{pms}} = \frac{|y_{21}/y_{12}|}{k_{\text{s}} - \sqrt{k_{\text{s}}^2 - 1}} \quad \overset{k_{\text{s}} = 1}{\longrightarrow} \quad \left|\frac{y_{21}}{y_{12}}\right|$$

6.3 Terugkoppeling

Algemeen

Versterking:



$$A_{\text{t}} = \frac{U_{\text{o}}}{U_{\text{g}}} = \frac{A}{1 + \beta A}$$

Relatieve gevoeligheid:

$$\frac{\mathrm{d}A_{\text{t}}/A_{\text{t}}}{\mathrm{d}A/A} = \frac{1}{1 + |\beta A|}$$

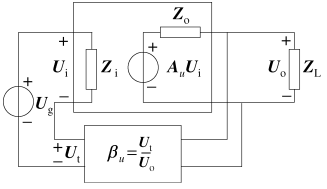
A_u = spanningsversterking
A_i = stroomversterking
Z_{i} = ingangsimpedantie vanaf signaalbron gezien
Z_{o} = uitgangsimpedantie vanaf belasting gezien

] zonder terug-koppeling

met index t: in geval van terugkoppeling
β_u = spanningsterugkoppelfactor
β_i = stroomterugkoppelfactor

Spannings/spannings-terugkoppeling

ook: spannings/serie-t.k.
parallel/serie-t.k.



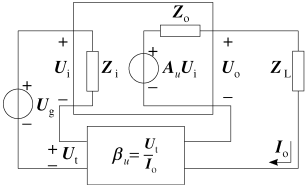
$$A_{u\text{t}} = \frac{A'_u}{1 + \beta_u A'_u}$$

$$A'_u = \frac{Z_{\text{L}}}{Z_{\text{L}} + Z_{\text{o}}} A_u$$

$$Z_{\text{it}} = Z_{\text{i}}(1 + \beta_u A'_u) \qquad Z_{\text{ot}} = \frac{Z_{\text{o}}}{1 + \beta_u A_u}$$

Stroom/spannings-terugkoppeling

ook: stroom/serie-t.k.
serie/serie-t.k.



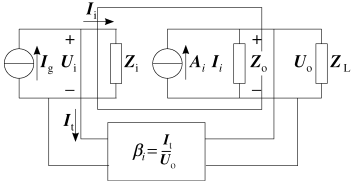
$$A_{ut} = \frac{A'_u}{1 + \beta_u A'_u}$$

$$A'_u = \frac{Z_L}{A_L + Z_o} A_u$$

$$Z_{it} = Z_i \left(1 + \frac{\beta_u}{Z_L} A'_u\right) \qquad Z_{ot} = Z_o \left(1 + \frac{\beta_u}{Z_o} A_u\right)$$

Spannings/stroom-terugkoppeling

ook: spannings/parallel-t.k.
parallel/parallel-t.k.



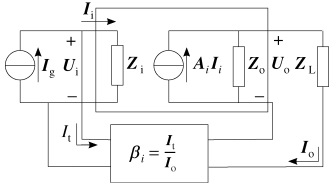
$$A_{it} = \frac{A'_i}{1 + \beta_i Z_L A'_i}$$

$$A'_i = \frac{Z_o}{Z_o + Z_L} A_i$$

$$A_{ut} = \frac{Z_L}{Z_i} A'_i \qquad Z_{it} = \frac{Z_i}{1 + \beta_i Z_L A'_i} \qquad Z_{ot} = \frac{Z_o}{1 + \beta_i Z_o A_i}$$

Stroom/stroom-terugkoppeling

ook: stroom/parallel-t.k.
parallel/serie-t.k.



$$A_{it} = \frac{A'_i}{1 + \beta_i A'_i}$$

$$A'_i = \frac{Z_o}{Z_o + Z_L} A_i$$

$$A_{ut} = \frac{Z_L}{Z_i} A'_i \qquad Z_{it} = \frac{Z_i}{1 + \beta_i A'_i} \qquad Z_{ot} = Z_o(1 + \beta_i A_i)$$

6.4 Vervorming

Lineaire vervorming

Wanneer $u_{in} = \hat{U}_1 \cdot \sin\omega_1 t + \hat{U}_2 \cdot \sin\omega_2 t$ en
$u_{out} = A(\omega_1)\hat{U}_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \phi_1) + A(\omega_2)\hat{U}_2 \cdot \sin(\omega_2 t + \phi_2)$
dan amplitude-vervorming als $A(\omega_1) \neq A(\omega_2)$
dan fase-vervorming als $\phi_1/\omega_1 \neq \phi_2/\omega_2$

Niet-lineaire vervorming

Wanneer $i_o = b_1 u_i + b_2 u_i^2 + b_3 u_i^3 + b_4 u_i^4 + b_5 u_i^5 + \cdots$
met $u_i = \hat{U}_i \cdot \cos\omega t$
dan $i_o = A_0 + A_1 \cos\omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \cos 3\omega t + A_4 \cos 4\omega t$
met
$$A_0 = \tfrac{1}{2} b_2 \hat{U}_i + \tfrac{3}{8} b_4 U_i^4 + \cdots$$
$$A_1 = b_1 \hat{U}_i + \tfrac{3}{4} b_3 \hat{U}_i^3 + \tfrac{5}{8} b_5 \hat{U}_i^5 + \cdots$$
$$A_2 = \tfrac{1}{2} b_2 \hat{U}_i^2 + \tfrac{1}{2} b_4 \hat{U}_i^4 + \cdots$$
$$A_3 = \tfrac{1}{4} b_3 \hat{U}_i^3 + \tfrac{5}{16} b_5 \hat{U}_i^5 + \cdots$$

Vervormingsfactoren : $d_2 = \dfrac{A_2}{A_1}$; $d_3 = \dfrac{A_3}{A_1}$; $\ldots d_n = \dfrac{A_n}{A_1}$

Totale harmonische vervorming (*total harmonic distortion*, *THD*):

$$d_1 = \sqrt{d_2^2 + d_3^2 + \cdots + d_n^2} \cdot 100\%$$

Intermodulatie vervorming

Wanneer twee signalen $u_1 = \hat{U}_1 \cos\omega_1 t$ en $u_2 = \hat{U}_2 \cos\omega_2 t$ op de ingang van een versterker worden gezet kan de uitgangsstroom zijn:

$$i_o = b_1(u_1 + u_2) + b_2(u_1 + u_2)^2$$

Dit wordt:
$i_o = A_0 + A_1 \cos\omega_1 t + A_2 \cos\omega_2 t + A_3 \cos 2\omega_1 t + A_4 \cos 2\omega_2 t + A_5 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + A_6 \cos(\omega_1 - \omega_2)t$

met:
$$A_0 = \tfrac{1}{2} b_2 (\hat{U}_1^2 + \hat{U}_2^2)$$
$$A_1 = b_1 \hat{U}_1 + \tfrac{3}{4} \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2^2$$
$$A_2 = b_1 \hat{U}_2 + \tfrac{3}{2} \hat{U}_1^2 \cdot \hat{U}_2$$
$$A_3 = \tfrac{1}{2} b_2 \hat{U}_1^2$$

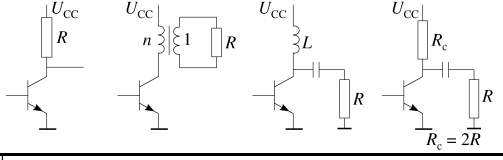
$$\left.\begin{aligned} A_4 &= \tfrac{1}{2} b_2 \hat{U}_2^2 \\ A_5 &= b_2 \hat{U}_1 \hat{U}_2 \\ A_6 &= b_2 \hat{U}_1 \hat{U}_2 \end{aligned}\right\} \text{intermodulatie termen}$$

6.5 *Vermogensversterkers (continu werkend)*

Uitgangspunt: $U_c - I_c$-karakteristiekenveld van transistoren wordt theoretisch volledig benut (verzadigingsspanning en lekstroom $= 0$).

Klasse-A versterker

Transistor geleidt gehele periode. eta; ca. 8–50%.

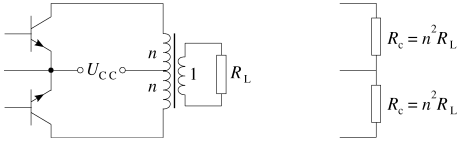


U_{CEW}	$\frac{1}{2}U_{CC}$	U_{CC}	U_{CC}	$\frac{1}{4}U_{CC}$
I_{CW}	$\frac{1}{2}\frac{U_{CC}}{R}$	$\frac{U_{CC}}{n^2R}$	$\frac{U_{CC}}{R}$	$\frac{3}{4}\frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{3}{8}\frac{U_{CC}}{R}$
P_{Batt}	$\frac{1}{2}\frac{U_{CC}^2}{R}$	$\frac{U_{CC}^2}{n^2R}$	$\frac{U_{CC}^2}{R}$	$\frac{3}{4}\frac{U_{CC}^2}{R_C} = \frac{3}{8}\frac{U_{CC}^2}{R}$
$P_{R\sim(max)}$	$\frac{1}{8}\frac{U_{CC}^2}{R}$	$\frac{1}{2}\frac{U_{CC}^2}{n^2R}$	$\frac{1}{2}\frac{U_{CC}^2}{R}$	$\frac{1}{32}\frac{U_{CC}^2}{R}$
η_{max}	25%	50%	50%	8,33%

index W: werkpunt

Klasse-B balans-versterker (push pull)

Iedere transistor geleidt een halve periode. η: $\leqslant$ 78,5%.



$$U_{CEW} = U_{CC} \qquad P_{Batt} = \frac{2}{\pi}\frac{U_{CC}^2}{R_C} = \frac{2}{\pi}\cdot\frac{U_{CC}^2}{n^2 R_L}$$

$$I_{CW} = 0$$

$$P_{Tmax} = \frac{U_{CC}^2}{\pi^2 n^2 R_L} \qquad P_{R_L\sim(max)} = \frac{U_{CC}^2}{2R_C} = \frac{U_{CC}^2}{2n^2 R_L}$$

Klasse-AB balans-versterker
Iedere transistor geleidt langer dan een halve periode.
Voor transformatorkoppeling: $50 < \eta < 78{,}5\%$.

6.6 *Vermogensversterkers (discontinu werkend)*

Klasse-C versterker
Enkelvoudige klasse B-versterker. Transistor geleidt korter dan een halve periode. $78{,}5 < \eta < 100\%$.

Klasse-D versterker
Transistoren werken als schakelaar, de belasting is gekoppeld via afgestemde kring. Z_{kring} is zeer klein voor schakelfrequentie.
Ingangssignaal = pulsbreedte-gemoduleerd signaal.
$f_{schakel} \geqslant 10 \times$ hoogste frequentie van te versterken signaal.
Voor transformatorgekoppelde versterker met twee schakeltransistoren is maximaal uitgangsvermogen in belasting R_L:

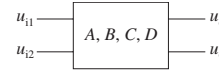
$$P_{R_L(max)} = \frac{8}{\pi^2}\frac{U_{CC}^2}{n^2 R_L}$$

Theoretisch is $\eta = 100\%$; praktisch: $95 < \eta < 99\%$.

Speciale versterkers (klasse E, F, S en combinaties)
Bevatten veelal schakelende transistoren en afgestemde kringen, hebben zeer hoog rendement ($95 < \eta < 99\%$).

6.7 Verschilversterker

Aangegeven spanningen t.o.v. gemeenschappelijke aarde.



Differentiaalspanningen: $u_{id} = \frac{1}{2}(u_{i1} - u_{i2})$ en $u_{od} = \frac{1}{2}(u_{o1} - u_{o2})$
Common-mode spanningen: $u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2})$ en
$u_{oc} = \frac{1}{2}(u_{o1} + u_{o2})$
Verschilspanningen: $u_i = u_{i1} - u_{i2}$ en $u_o = u_{o1} - u_{o2}$
Algemeen: $u_{od} = Au_{id} + Bu_{ic}$
$u_{oc} = Cu_{ic} + Du_{id}$

$$\left.\begin{array}{ll} \textit{Discriminatiefactor} & F = \dfrac{A}{C} \\ \textit{Rejectie-factor} & H = \dfrac{A}{B} \end{array}\right\} \text{moeten zo groot mogelijk zijn}$$

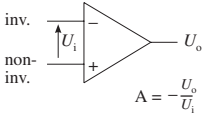
Ook: $H = CMRR = \textit{Common Mode Rejection Ratio}$

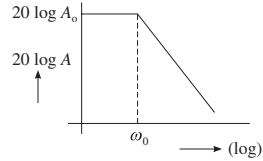
Andere definitie voor rejectie-factor:

$$H = \frac{\text{infasespanning } u_{ic}}{\text{tegenfasespanning } u_{id}} \text{ voor hetzelfde uitgangssignaal } u_{od}$$

Common Mode Rejection:
$\text{CMR} = 20 \log H$ [dB]

6.8 Operationele versterker



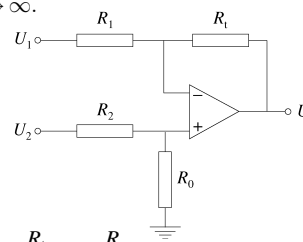


Gainbandwidth-product, kortweg *GB-product:*

$$GB = A_0 \cdot \frac{\omega_0}{2\pi} = (2\pi\tau)^{-1} \qquad \text{waarin : } \tau = (A_0\omega_0)^{-1}$$

Rekenversterkerschakelingen met ideale operationele versterker:
$A_0 \to \infty; R_0 \to 0; R_i \to \infty; GB \to \infty.$

Algemene basisschakeling:



$$U_o = -\frac{R_t}{R_1}U_1 + \\ + \left(1 + \frac{R_t}{R_1}\right)\left(\frac{R_o}{R_o + R_2}\right)U_2$$

Als aftrekschakeling

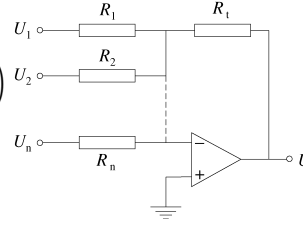
Als $R_2 + R_o = R_1 + R_t$ is $U_o = -\dfrac{R_t}{R_1}U_1 + \dfrac{R_o}{R_1}U_2 (= \beta U_2 - \alpha U_1)$.

Als $R_1 = R_t$ en $R_o = R_2$ is $U_o = U_2 - U_1$.

Optelschakeling:

$U_0 =$

$$-\left(\frac{R_t}{R_1}U_1 + \frac{R_t}{R_2}U_2 + \cdots \frac{R_t}{R_n}U_n\right)$$

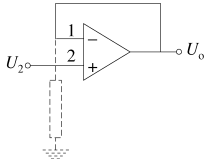


Spanningsvolger:

$$A_u = \frac{U_o}{U_2} = 1$$

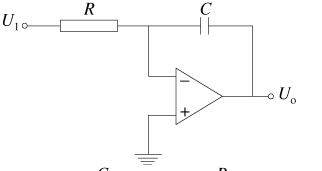
$$R_{ing} \approx A R_{1,2} \rightarrow \infty$$

$$R_{uitg} \approx \frac{R_u}{A} \rightarrow 0$$



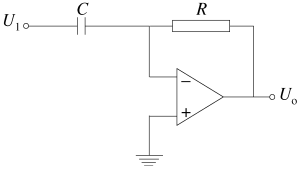
Integrator:

$$U_o = -\frac{1}{RC}\int_0^t U_1(t)\,\mathrm{d}t$$



Differentiator:

$$U_o = -RC\frac{\mathrm{d}U_1}{\mathrm{d}t}$$

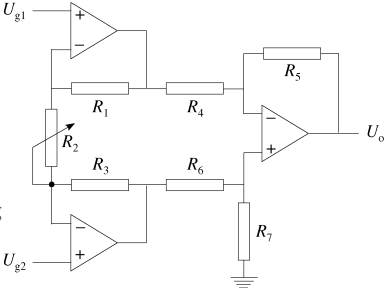


Deze schakeling wordt in verband met de grote kans op instabiliteit weinig gebruikt.

Instrumentatie-versterker

Kenmerk: zeer goede (= grote) CMRR.
Als $R_1 = R_3$ en $R_6/R_7 = R_4/R_5$:

$$U_o = \left(1 + 2\cdot\frac{R_1}{R_2}\right) \times \times \frac{R_5}{R_4}(U_{g2} - U_{g1})$$



Met R_2 is de versterking instelbaar.

7 Radiotechniek

7.1 Trillingskringen algemeen

Voor LC-kring met *afstemfrequentie* f_0 is de golflengte:

$$\lambda = \frac{c_0}{f_0} \approx 1884\sqrt{LC} \quad [\text{m}]$$

waarin: L in µH
C in µF

Bij demping met weerstand R verschilt *eigenfrequentie* f_e van de afstemfrequentie f_o:

$$f_e = f_0\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} = f_0\sqrt{1 - \xi^2} = \frac{1}{T_e}$$

waarin: T_e = periode [s]
Q = kwaliteit, zie par. 7.2
ξ = *dempingsfactor* of *relatieve demping*, $\xi = 1/2Q$

$\xi > 1$: overgedempte kring	aperiodische respons
$\xi = 1$: kritisch gedempte kring	aperiodische respons
$\xi < 1$: ondergedempte kring	periodische respons

Ook: $\alpha = \omega_0\xi$[rad/s] = werkelijke of absolute demping

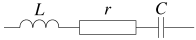
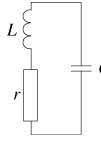
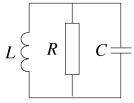
Logaritmisch decrement:

$$\delta = \ln\frac{\hat{u}(t)}{\hat{u}(t + T_e)} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} = \frac{\pi}{Q} \cdot \frac{f_0}{f_e}$$

Doorschot:

$$D = \exp\left(-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}}\right) = \exp\left(-\frac{\delta}{2}\right)$$

7.2 Gesloten trillingskringen

	seriekring	*LrC*-kring	parallelkring
			
resonantie-ferequentie ω_0 (Z reëel)	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{r^2}{L^2}} \approx \sqrt{\frac{1}{LC}}$ $r \ll \omega_0 L$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$
Z bij resonantie	r	$\frac{L}{Cr}$	R
kwaliteits-factor Q	$\frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 Cr}$ $= \frac{1}{r}\sqrt{\frac{L}{C}}$	$\frac{\omega_0 L}{r} \approx \frac{1}{\omega_0 Cr}$ $\approx \frac{1}{r}\sqrt{\frac{L}{C}}$	$\frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 RC$ $= R\sqrt{\frac{C}{L}}$
Z buiten resonantie	$\bar{Z} = r(1+\mathrm{j}\beta Q)$	$\approx \frac{L/Cr}{1+\mathrm{j}\beta Q}$	$\frac{R}{1+\mathrm{j}\beta Q}$
relatieve verstemming $\beta = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \approx \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$ als $Q > 10$			

Resonantiekromme:

$$\left|\frac{I}{I_0}\right| = \left|\frac{U}{U_0}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{f}{f_0}-\frac{f_0}{f}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\beta Q)^2}}$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{1+158\left(\frac{\Delta f L}{r}\right)^2}}$$

Bandbreedte: $B_{\sqrt{2}} = \frac{f_0}{Q} = \frac{r}{2\pi L} \approx 0{,}16\frac{r}{L}$ [Hz]

Voetbreedte: $B_{10} = 1{,}6\frac{r}{L}$ [Hz]

Selectiviteit

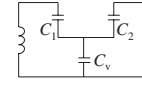
- verzwakking $10\times$: $S_{10} \approx 0{,}2\frac{\omega_0 L}{r} = 0{,}2Q$
- verzwakking $\sqrt{2}\times$: $S_{\sqrt{2}} \approx 2\frac{\omega_0 L}{r} = 2Q$

Zie ook definities in par. 7.3.

7.3 Gekoppelde kringen (bandfilters)

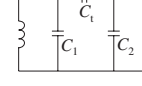
Capacitieve koppeling
Voetkoppeling:

$$k = \sqrt{\frac{C_1 C_2}{(C_1 + C_V)(C_2 + C_V)}}$$



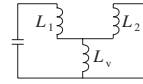
Topkoppeling:

$$k = \frac{C_t}{\sqrt{(C_1 + C_t)(C_2 + C_t)}}$$



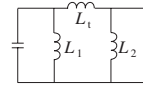
Inductieve koppeling

Voetkoppeling:



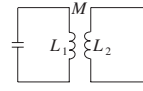
$$k = \frac{L_V}{\sqrt{(L_1 + L_V)(L + L_V)}}$$

Topkoppeling:



$$k = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{(L_1 + L_V)(L_2 + L_V)}}$$

Koppeling door wederzijdse inductie



$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Kritische koppeling:

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{Q_1 Q_2}}$$ maximale spanningsoverdracht voor $f = f_0$

Overkritische koppeling

$k > k_c$ resonantiekromme heeft twee toppen

Onderkritische koppeling:

$k < k_c$ lagere en smallere resonantiekromme dan voor $k = k_c$

Transitionele koppeling:

$$k = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{Q_1^2} + \frac{1}{Q_2^2}\right)}$$ meest vlakke top voor $Q_1 \neq Q_2$

Voor symmetrische bandfilter ($Q_1 = Q_2 = Q$) geldt:

	$k = k_c$	$k < k_c$	$k > k_c$
bandbreedte $B_{\sqrt{2}}$[Hz]	$\frac{f_0}{Q}\sqrt{2} = f_0 k_c \sqrt{2}$	$\frac{f_0}{Q}\sqrt{2}$	$f_0\sqrt{2(k^2 - k_c^2)}$
topbreedte $f_2 - f_1$[Hz]			$f_0\sqrt{k^2 - k_c^2}$
top-dal verhouding			$\frac{1}{2}\left(kQ + \frac{1}{kQ}\right)$
voetbreedte B_{10}[Hz]	$\frac{f_0}{Q}\sqrt{10(1 + k^2Q^2)}$		
selectiviteitsfactor S_{10}	$\frac{2}{\sqrt{10}}\frac{Q}{\sqrt{1 + k^2Q^2}}$		

Definities

Bandbreedte: verschil tussen twee frequenties waarbij spanning over een kring gelijk is aan $1/\sqrt{2}(= -3\text{dB})$ van de waarde bij resonantie.

Voetbreedte: verschil tussen twee frequenties waarbij spanning over een kring gelijk is aan 0,1 $(= -20\text{dB})$ van de waarde bij resonantie.

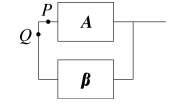
Topbreedte: frequentieverschil tussen de toppen van de resonantiekromme.

Top/dal-verhouding: verhouding $\frac{u_{\max}}{u_{\text{dal}}}$ over een kring bij constante ingangsspanning.

Selectiviteitsfactor: $S_{10} = f_0/\frac{1}{2}B_{10}$.

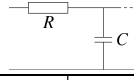
7.4 Oscillatoren en andere signaalgeneratoren

Algemene oscilleervoorwaarde voor oscillatoren met sinusvormige uitgangsspanning:
Rondgaande versterking $\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{\beta} = 1$.
Fasevoorwaarde: Im $(\boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{\beta}) = 0$.
D.w.z. fasedraaiing van P naar Q: 360°.



RC-generatoren

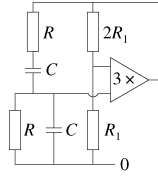
Faseverschuivingsoscillator

				
aantal gelijke direct gekoppelde RC-leden	$1/\beta$	f_0	$1/\beta$	f_0
3	29	$389,8/RC$	29	$64,9/RC$
4	18,37	$190,2/RC$	18,37	$133,2/RC$
5	15,43	$117,6/RC$	15,43	$215,4/RC$
6	14,12	$81,0/RC$	14,12	$312,7/RC$

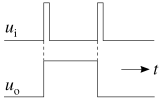
R in MΩ C in pF, f_0 in kHz.

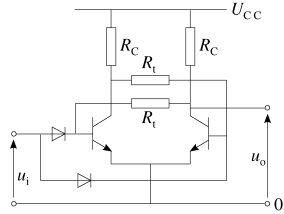
Brug van Wien-oscillator

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$



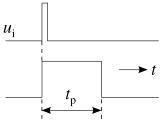
Bistabiele multivibrator

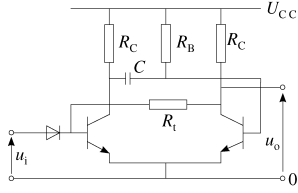




$$\left(1-\frac{U_{BE}}{U_{CC}}\right)h_{FE}R_C > R_C + R_t$$

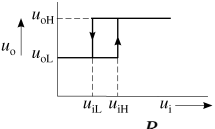
Monostabiele multivibrator





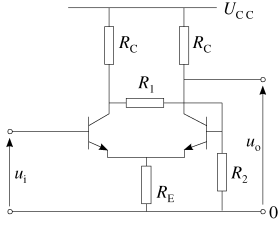
$$t_p = R_B C \ln\frac{2U_{CC} - U_{BE}}{U_{CC} - U_{BE}} \approx R_B C \ln 2$$

Schmitt-trigger



$$u_{oL} \approx U_{CC} - \frac{R_C}{R_E}u_{iH}$$

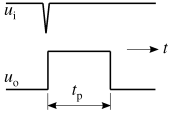
$$u_{oH} \approx U_{CC}$$

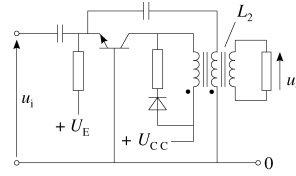


$$u_{iL} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2 + \left(1 + \frac{R_2}{R_E}\right)} \cdot U_{CC}$$

$$u_{iH} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_C} \cdot U_{CC}$$

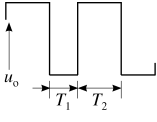
Blocking-oscillator
(hik-oscillator)

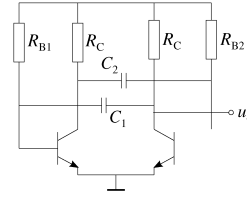




$$t_p \approx \frac{[U_{CC} - n(U_E + U_{BE})](n-1)L_2}{n^2 h_{ib} U_{CC}}$$

Astabiele multivibrator
(blokvormige uitgangsspanning)



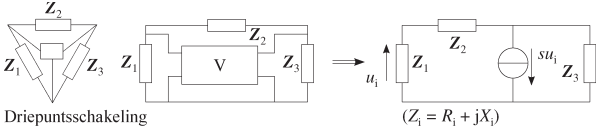


$T_1 \approx 0,69\, R_{B1} C_1$
$T_2 \approx 0,69\, R_{B2} C_2$

Voorwaarden:
$R_C C_1 < \frac{1}{4} T_2, R_C C_2 < \frac{1}{4} T_1$
$h_{FE} R_C > R_B > 5,8 R_C$

LC-oscillatoren

Te beschouwen als driepuntsschakeling:



Driepuntsschakeling

V is ideale versterker: $Z_i = \infty$, $Z_0 = 0$, steilheid s.
Oscilleervoorwaarde: $-s\mathbf{Z}_1\mathbf{Z}_3 = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_3$
Hieraan wordt voldaan als $X_1 + X_2 + X_3 = 0$, $R_1 = R_2 = R_3 = 0$

oscillatortype	Z_1	Z_2	Z_3	f_0
Colpitts	C_1	L_2	C_3	$\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2\dfrac{C_1C_3}{C_1+C_3}}}$
Hartley	L_1	C_2	L_3	$\dfrac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_3)C_2}}$
Clapp	C_1	$L_2 + C_2$ ($C_2 \ll C_1$ en C_3)	C_3	$\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$
Kristal (Pierce)	C_1	K	C_3	$f_s < f_0 < f_p$ (voor f_s en f_p zie par.1.4)

7.5 Modulatie

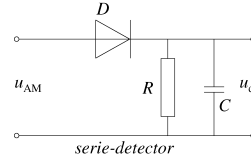
	amplitudemodulatie (AM)	fasemodulatie (PM)	frequentiemodulatie (FM)
draaggolf (carrier)	$\hat{u}_\mathrm{c}\cos\omega_\mathrm{c}t$	$\hat{u}_\mathrm{c}\cos(\omega_\mathrm{c}t+\varphi)$	$\hat{u}_\mathrm{c}\cos(\omega_\mathrm{c}t+\varphi)$
signaal	$\hat{u}_\mathrm{m}\cos\omega_\mathrm{m}t$	$\hat{u}_\mathrm{m}\cos\omega_\mathrm{m}t$	$\hat{u}_\mathrm{m}\cos\omega_\mathrm{m}t$
gemoduleerde draaggolf	$\hat{u}_\mathrm{c}(1+m\cos\omega_\mathrm{m}t$ $=\hat{u}_\mathrm{c}\cos\omega_\mathrm{c}t+\frac{m}{2}\hat{u}_\mathrm{c}\cos(\omega_\mathrm{c}+\omega_\mathrm{m})t$ $+\frac{m}{2}\hat{u}_\mathrm{c}\cos(\omega_\mathrm{c}-\omega_\mathrm{m})t$ dubbelzijband-modulatie (DZB)	$\hat{u}\cos(\omega_\mathrm{c}t+k_\mathrm{p}\hat{u}_\mathrm{m}\cos\omega_\mathrm{m}t)$ $=\hat{u}\cos\left(\omega_\mathrm{c}t+\frac{\Delta\omega}{\omega_\mathrm{m}}\cos\ \omega_\mathrm{m}t\right)$ $=\hat{u}\cos(\omega_\mathrm{c}t+m_\mathrm{p}\cos\omega_\mathrm{m}t)$	$\hat{u}_\mathrm{c}\cos\left(\omega_\mathrm{c}t+\frac{k_\mathrm{f}\hat{u}_\mathrm{m}}{\omega_\mathrm{m}}\sin\omega_\mathrm{m}t\right)$ $=\hat{u}\cos\left(\omega_\mathrm{c}t+\frac{\Delta\omega}{\omega_\mathrm{m}}\sin\omega_\mathrm{m}t\right)$ $=\hat{u}_\mathrm{c}\cos(\omega_\mathrm{c}t+m_\mathrm{f}\sin\omega_\mathrm{m}t)$
momentele frequentie $\omega=\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}$	ω_c	$\omega_\mathrm{c}-k_\mathrm{p}\hat{u}_\mathrm{m}\sin\omega_\mathrm{m}t$	$\omega_\mathrm{c}+k_\mathrm{f}\hat{u}_\mathrm{m}\cos\omega_\mathrm{m}t$
frequentie-zwaai $\Delta\omega=2\pi\Delta f$		$k_\mathrm{p}\hat{u}_\mathrm{m}\omega_\mathrm{m}$	$k_\mathrm{f}\hat{u}_\mathrm{m}$
modulatiediepte/ modulatie-index	$m=\frac{\hat{u}_\mathrm{m}}{\hat{u}_\mathrm{c}}$	$m_\mathrm{p}=k_\mathrm{p}\hat{u}_\mathrm{m}$	$m_\mathrm{f}=\frac{k_\mathrm{f}\hat{u}_\mathrm{m}}{\omega_\mathrm{m}}$
vermogen in één AM-zijband	$P_\mathrm{zb}=\frac{m^2}{4}P_\mathrm{c}$ (P_c = draaggolfverm.)		
maximale Δf			FM-omroep:75 kHz TV-geluid: 50 kHz
bandbreedte B	$B=\frac{2\omega_\mathrm{mmax}}{2\pi}$ [Hz]		$B\approx 2,5,\Delta f$ [Hz] voor $f_\mathrm{mmax}\leqslant 15$ kHz

7.6 Demodulatie (detectie)

Detectie AM-signalen

Ook: *omhullende detectie* of *topdetectie*.
Onderstaande geldt voor dubbel zijband gemoduleerde signalen, waarin de draaggolf niet is onderdrukt.
Detectordemping R_d: de belasting die het detectorcircuit vormt voor de (antenne) bron:

- bij seriedetectie: $R_d = \frac{1}{2}R$;
- bij paralleldetectie $R_d = \frac{1}{3}R$.

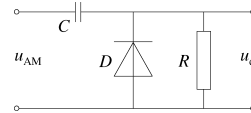


serie-detector

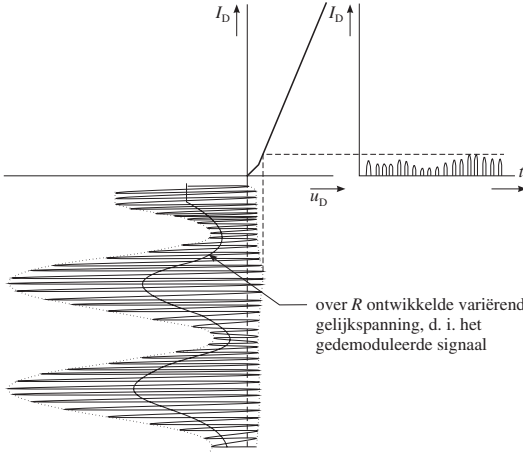
Keuze tijdconstante:

$$RC < \frac{1}{m \cdot \omega_m}$$

m = modulatiediepte ($0 < m < 1$)
ω_m = modulatiefrequentie

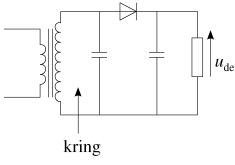


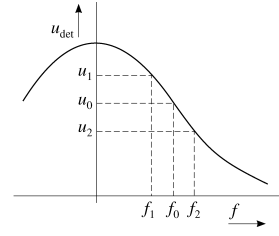
parallel-detector



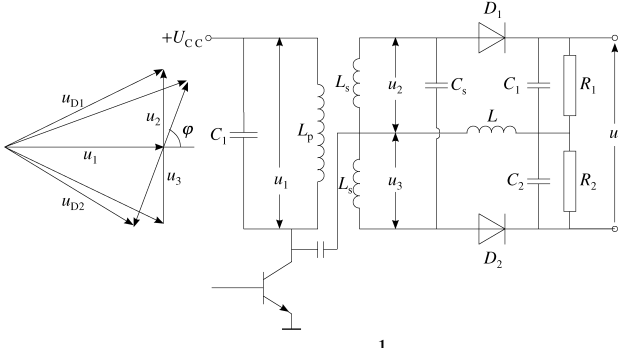
Detectie van FM-signalen

Flankdetectie (verstemde afstemkring)



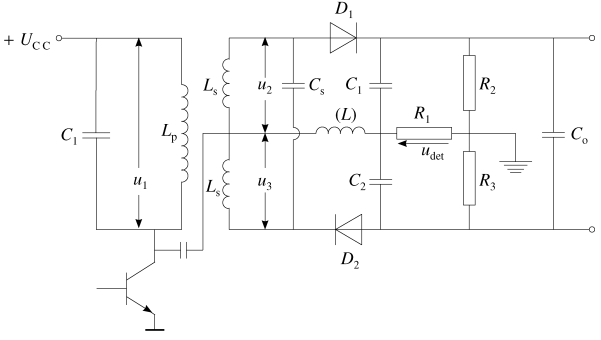


Foster-Seely discriminator (fase-discriminator)

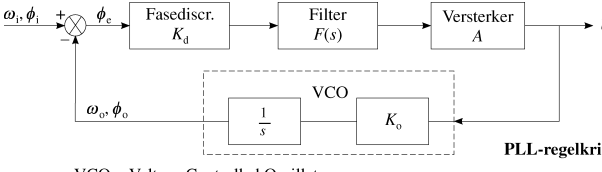


$$u_{det} = k_d(|u_{D1}| - |u_{D_2}|) \qquad \varphi = \arctan\frac{1}{\beta Q}$$

Ratio-detector



Phase locked loop (PLL)



VCO = Voltage Controlled Oscillator

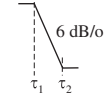
Voor het lineaire gebied ($\omega_0 = \omega_i$) geldt:

$$\frac{U_o(s)}{\omega_i} = \frac{AK_dF(s)}{s + AK_dK_oF(s)}$$

Het filter is meestal een serieschakeling van twee eerste orde filters met ieder een tijdconstante τ_1 en τ_2.

Loopparameters:

- Open loop gain: $K = AK_oK_d$ [rad/s]
- Resonantiefrequentie: $\omega_n = \sqrt{\dfrac{K}{\tau_1 + \tau_2}}$ [rad/s]



- Demping: $\zeta = \frac{1}{2}\omega_n\left(\tau_2 + \frac{1}{K}\right)$ [–]
- Rustfrequentie van VCO: ω_c [rad/s]

Eigenschappen:
- *Houdgebied* (*lock range*): $2\Delta\omega_H = 2K$
- *Vanggebied* (*capture range*) = gebied waarbinnen PPL uiteindelijk synchroniseert ($\omega_0 = \omega_i$):

  $$2\Delta\omega_V \approx 4\sqrt{\omega_n K\left(\zeta - \frac{\omega_n}{2K}\right)}$$

- *Lock-in gebied* = gebied waarbinnen PLL binnen 1 periode van het ingangssignaal synchroniseert:

  $$2\Delta\omega_L \approx 2K\frac{\tau_2}{\tau_1}$$

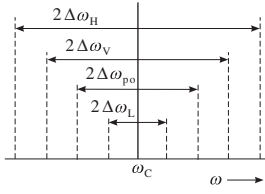
- *Pull-out gebied* = maximale $\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_c$ op ingang aangebracht, waarbij PLL gesynchroniseerd blijft zonder perioden over te slaan:

  $$\omega_{po} = 1{,}8\omega_n(1+\zeta)$$

- *Acquisitietijd* = tiid nodig voor het invangen (*pull-in time*):

  $$T_p \approx \frac{(\omega_i - \omega_c)_0^2}{2\zeta\omega_n^2} \qquad (\omega_i - \omega_c)_0 = \text{initiële verstemming}$$

- Stabiliteitsgrenzen:

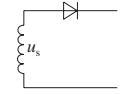


Toepassing: als *FM-discriminator*, waarbij $u_o(t)$ de frequentiedemodulatie van $u_i(t)$ geeft.

8 Elektronische voedingsapparatuur

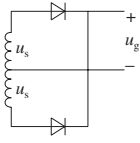
8.1 Gelijkrichtschakelingen

Eénfase enkelzijdig (Engels: half wave)

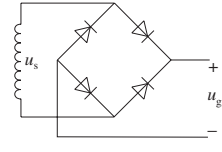


$$u_g = \frac{\hat{U}_s}{\pi} + \frac{\hat{U}_s}{2}\cos\omega_n t + $$
$$-\frac{2\hat{U}_s}{\pi}\left(\tfrac{1}{3}\cos 2\omega_n t + \tfrac{1}{15}\cos 4\omega_n t + \cdots\right)$$
$$(\omega_n = 2\pi f_n, f_n = \text{netfrequentie [Hz]})$$

Tweefase enkelzijdig (Engels: full wave)
(ook: *éénfase dubbelzijdig met middenaftakking)*

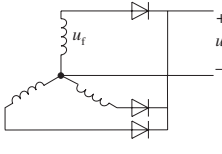


Eénfase dubbelzijdig (Engels: full wave bridge)
(ook: *énfase dubbelzijdige brug, Graetz-brug)*



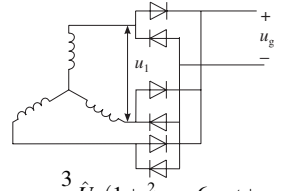
$$u_g = \frac{2}{\pi}\hat{U}_s - \frac{4}{\pi}\hat{U}_s\left(\tfrac{1}{3}\cos 2\omega_n t + \tfrac{1}{15}\cos 4\omega_n t + \tfrac{1}{35}\cos 6\omega_n t + \cdots\right)$$

Driefase enkelzijdig



$$u_g = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}\hat{U}_f\left(1 - \tfrac{1}{4}\cos 3\omega_n t - \tfrac{2}{35}\cos 6\omega_n t + \cdots\right)$$

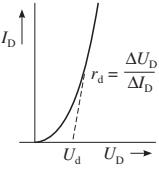
Driefase dubbelzijdig



$$u_g = \frac{3}{\pi}\hat{U}_l\left(1 + \tfrac{2}{35}\cos 6\omega_n t + \cdots\right)$$

8.2 Afvlakking, spanningen en stromen

Tabel 8.1 geeft formules en relatieve waarden voor:



U_{Bgem} = gemiddelde spanning over belasting R_B voor $\hat{U}_s$, $\hat{U}_f$ en $\hat{U}_1$ (zie par. 8.1)
U_d = drempelspanning gelijkrichter ($\approx$ 0,7 V)
α = $R_B/(R_B + R_{se})$
R_{se} = equivalente serieweerstand per gelijkrichttak
= $n^2R_{prim} + R_{sec} + pr_d(+ R_L)$
r_d = differentiaal-weerstand gelijkrichter (0,1 tot 1 Ω)
R_L = gelijkstroomweerstand van de spoel [Ω]
p = 1 voor middenaft., p = 2 voor brug
U_{rtt} = top-topwaarde van de rimpel op U_B[V]
U_{reff} = effectieve waarde van de rpimpel op U_B[V]
$\hat{I}_D$ = gelijkrichter piekstroom [A]
I_{Dgem} = gemiddelde gelijkrichterstroom [A]
I_B = gemiddelde belastingsstroom = U_{Bgem}/R_B[A]
$\hat{U}_{Dsper}$ = maximale sperspanning over een gelijkrichter [V]
I_{seff} = effectieve secundaire transformatorstroom [A]
S_{sec} = schijnbaar secundair transformatorvermogen [V $\cdot$ A]
L_k = kritische zelfinductie van de smoorspoel [H]
I_{BK} = kritische belastingstroom voor bepaalde R_B[A]

8.3 Spanningsstabilisatoren

Algemeen

Stabilisatiefactor: $S = \dfrac{dU_1}{dU_2} \cdot \dfrac{U_2}{U_1}$ (I_2 en T_o constant)

Uitgangsweerstand: $R_u = \left|\dfrac{dU_2}{dI_2}\right|$ (U_1 en T_o constant) [Ω]

Temperatuurscoëfficiënt: $\alpha_T = \dfrac{1}{U_2} \cdot \dfrac{dU_2}{dT_o}$ (U_1 en I_2 constant) [K^{-1}] of p.p.m./°C]

Tabel 8.1 Formules en relatieve waarden bij afvlakking (zie ook pag. I/96 en I/97)

gelijkricht-circuit afvl./belasting	tweefase enkelzijding *C*-afvl	éénfase dubbelzijdig *C*-afvl.	tweefase enkelzijdig *LC*-afvl.	éénfase dubbelzijdig *LC*-afvl.	driefase enkelzijdig *R*-belasting	driefase dubbelzijdig *R*-belasting
$U_{B\,gem}$	$0,82(\hat{U}_s - U_d)$	$0,82(\hat{U}_s - 2U_d)$	$\alpha\left(\frac{2}{\pi}\hat{U}_s - U_d\right)$	$\alpha\left(\frac{2}{\pi}\hat{U}_s - 2U_d\right)$	$0,826\hat{U}_f$	$0,955\hat{U}_l$
U_{rtt}/U_B	$\frac{0,4}{f_n R_B C}$				0,605	0,14
U_{reff}/U_B	$\frac{0,115}{f_n R_B C}$		$\frac{1}{316 f_n^2 LC}$		0,183	0,042
$\hat{I}_D/I_B$	4	4	1	1	1,21	1,05
$I_{D\,gem}/I_B$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,33,	0,33
$\hat{U}_{Dsper}/\hat{U}_s$	2	1	2	1	1,73	1
$I_{s\,eff}/I_B$	1,35	1,9	0,71	1	0,577	0,816
S_{sec}	$(2,35U_B + 1,9U_d)I_B$	$(1,64U_B + 2,7U_d)I_B$	$1,41U_{seff}\cdot I_B$	$U_{seff}\cdot I_B$	$1,48U_B\cdot I_B$	$0,955U_B\cdot I_B$
Diversen			$L_K = \frac{R_{Bmax} + R_{se}}{6\pi f_n}$ $I_{BK} = \left(1 + \frac{R_{se}}{R_B}\right)\frac{U_B}{6\pi f_n L}$			
Voorwaarden	$R_{se} = 0,06R_B$ $C > \frac{8}{f_n R_B}$ [F]		$LC \gg \frac{1}{160 f_n^2}$ (L in H, C in F)		$U_d \ll \hat{U}_s$ $R_{sc} \ll R_B$	

U_S, U_F, en U_1 zijn onbelaste secundaire transformatorspanningen

Lijnregulatie: $\frac{1}{U_2}\frac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}U_1}$ (I_2 en T_0 constant
(*Line regulation*) meestal uitgedrukt in %/ V

Belastingregulatie: $\frac{1}{U_2}\cdot\left|\frac{\mathrm{d}U_2}{\mathrm{d}I_1}\right|$ (U_1 en T_0 constant)
(*Load regulation*) meestal uitgedrukt in %/A

Rendement: $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_v}$

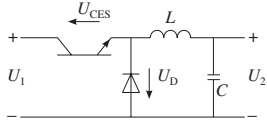
T_o = omgevingstemperatuur
P_v = verliesvermogen
index 1: ingang, index 2: uitgang

Schakelende spanningsstabilisator

Omlaagregeling ($U_2 < U_1$)
$U_2 = w(U_1 - U_{CES}) - 1(1 - w)U_D$
w = werkfractie schakelaar

$$= \frac{t_{aan}}{T} = f \cdot t_{aan}$$

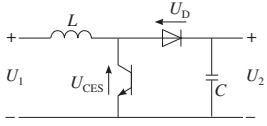
$$\frac{\Delta U_2}{U_2} \approx \frac{1 - w}{8f^2LC}$$



Omhoogregeling ($U_2 > U_1$)

$$U_2 = \frac{U_1 - wU_{CES}}{1 - w} - U_D$$

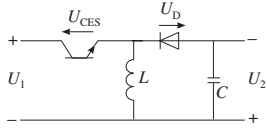
$$\frac{\Delta U_2}{U_2} \approx \frac{w(1 - w)}{8f^2LC}$$



Omkeringsregeling ($U_2 \approx -kU_1$)

$$U_2 = -\frac{w}{1 - w}(U_1 - U_{CES}) + U_D$$

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} \approx \frac{1 - w}{8f^2LC}$$



9 Ruis

Symbolen

k = constante van Boltzmann $\approx 1{,}3801 \times 10^{-23}$J/K
T = absolute temperatuur [K]
B = ruisbandbreedte [Hz]
e = lading elektron $\approx 1{,}6022 \times 10^{-19}$ C
R = weerstand [Ω]
G = geleiding = $1/R$[S]

Thermische ruis in weerstand R

Als spanningsbron in serie met R:

$$E_\mathrm{n} = \sqrt{\bar{e}_\mathrm{n}^2} = \sqrt{4kTBR} \text{ (Nyquist)}$$

Als stroombron parallel aan geleider G : $I_\mathrm{n} = \sqrt{\bar{i}_\mathrm{n}^2} = \sqrt{4kTBG}$

Maximaal afgegeven vermogen ruisbron: $P_\mathrm{n} = kTB = \dfrac{\bar{e}_\mathrm{n}^2}{R}$

Hagelruis

Deze ruis ontstaat als stroom in een geleider, waardoor een gelijkstroom I loopt: $\bar{i}_\mathrm{n}^2 = 2eIB$.

Signaalruis-verhouding (signal to noise ratio, SNR)

$$\text{SNR} = \frac{\text{signaalvermogen}}{\text{ruisvermogen}} \text{ (op bepaalde plaats in versterker)}$$

Veelal uitgedrukt in dB.

$$\text{Ruisfactor versterker: } F = \frac{\text{SNR ingang}}{\text{SNR uitgang}}$$

Ruisfactor: $NF = 10 \log F$ [dB]
In cascadeschakeling:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \cdots$$

waarin: G_j = vermogensversterking trap j

Ruisgetal vierpool met R_0 aan de ingang:

$$F = 1 + \frac{R_v}{R_0} + \frac{R_0}{R_i};\ \text{substitutie van } R_0 = \sqrt{R_v \cdot R_i}$$

$$F_{opt} = 1 + 2\sqrt{\frac{R_v}{R_i}}\ \text{(extreme waarde)}$$

Hierbij is aangenomen, dat in de vierpool aanwezig zijn:
- een spanningsruisbron R_v;
- een stroomruisbron R_i.

10 Lasers

Halfgeleider (injectie) lasers

halfgeleider		λ [nm]	P_{uit} [W]	drempelstroom [mA]
continu				
GaAs		780–830	1–100	20–250
GaAlAs		850–890	1–10	30–150
GaInAsP		1300	1–7	15–125
InSb		3–10 μm	0,1–10	100–500
gepulst		$P_{piek'}$ [W]	pulslengte [ns]	samenstelling
GaAlAs	850	0,1–1000	80	diode-array
	890	0,5–80	80	stack
	904	1 –1000	200	diode-array

Kleurstof-lasers (gepulst), λ af te stemmen

λ [μm]	P_{piek} [W]	pulslengte [ns]
0,19–5	20×10^6	8
0,22–0,96	10×10^6	50
0,34–0,95	$0{,}5 \times 10^6$	200
0,43–0,75	5×10^6	1500

11 Mobiele telefonie

Afkortingen

2G	Second Generation (Mobile System)
3G	Third Generation (Mobile System)
AMPS	Analog Mobile Phone System (analoog netwerk USA)
ANSI	American National Standards Institute
ARIB/TTC	Association of Radio Industry and Bussiness (Japan)
BTS	Base Transmitter Station
BW	Bandwidth
CDMA	Code Division Multiple Access
DCS	Digital Cellular System (DCS1800/GSM1800)
DECT	Digital European Cordless Telephone
EDGE	Enhanced Data Rate for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standardization Institute
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telephone System
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GSM	Global System for Mobile communications (oorspr.: Groupe Speciale Mobile)
GPRS	General Packet Radio System
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
IMT	International Mobile Telecommunications
ITU	International Telecommunications Union
LNA	Low Noise Amplifier
MSS	Mobile Satellite Service
NMT	Nordic Mobile Telephone (mobiel netwerk uit Scandinavië)

NTT	Nippon Telecom & Telegraph Corporation (Japan)
PCS	Personal Communications System
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
8PSK	8 Phase Shift Keying
SIM	Subscriber Identity Module
SMS	Short Message Service
TACS	Total Access Communication System (mobiel netwerk uit Engeland)
TCP/IP	Transport Control Protocol/Internet Protocol
TD/CDMA	Time Division CDMA
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TTA	Telecommunications Technologies Association (Zuid-Korea)
UMTS	Universal Mobile Telephone Service
UTRA UMTS	Terrestrial Radio Access
WAP	Wireless Access Protocol
W-CDMA	Wideband CDMA
WRC	World Radiocommunication Conference

Ontwikkeling van mobiele telefonie in Nederland

Tabel 9.1 Ontwikkeling van mobiele telefonie in Nederland

generatie	netwerk	start	gebruikers	frequentieband [MHz]	kanalen	kanaalraster [MHz]	duplexafstand [MHz]	modulatie
–	ATF1	1980	2.500	148–153	38	20	4,6	FM, analoog
1G	ATF2	1985	32.000	451–463	180	25	10	FM, analoog
1G	ATF3	1989	300.000	890–935	2.000	12,4	45	FM, analoog
		–	–	890–935	1.000	25	45	FM, analoog
2G	GSM 900	1994	eind 2000: 9 miljoen voor	880–960	173	200	45	GMSK, digitaal
	GSM1800	1999	GSM900/1800	1710–1880	374	200	95	GMSK, digitaal
	DCS1900	–		1850–1990	299	200	80	GMSK, digitaal
3G	UMTS	vanaf 2001		1885–2025 2110–2200	12	5000	190	WCDMA, digitaal

Literatuur

- Davidse, J.
  Grondslagen van de Elektronica, delen 1,2,3,4
  Prisma-Technica 35, 36, 37, 38
  Utrecht, Uitgeverij Het Spectrum.
- *Elektronica vademecum*
  Deventer, Kluwer.
- *Elektuur*, decembernummer 2000
  en januarinummer 2001.
- Giacoletto, L.J.
  Electronics Designers' Handbook
  McGraw-Hill.
- ITT
  Reference Data for Radio Engineers
  New York, Howard W. Sams Co.
- Overstraeten R.J. van, E.H. Nordholt, G.A. Schwippert, M.P.J. Stevens
  Poly-Elektronica Zakboekje
  Arnhem, Koninklijke PBNA.
- Sietsma, A.J.
  Radiotechniek, delen I, II, IIIA, IIIB
  Culemborg, T.U.H. Stam N.V.
- Sjobbema, D.J.W.
  Componenten
  Deventer, Kluwer.
- Rupprecht, W.
  Netzwerksynthese
  New York, Springer Berlin.
- Zverev, A.I.
  Handbook of Filter Synthesis
  New York, John Wiley and Sons, Inc.

Procestechniek J

1 Eenheidsbewerkingen

2 Verenigingsprocessen
2.1 Mengen en roeren
2.2 Suspenderen
2.3 Dispergeren
2.4 Verstuiven

3 Scheidingsprocessen
3.1 Overzicht scheidingsprocessen
3.2 Sedimentatie
3.3 Centrifugeren
3.4 Stofcyclonen
3.5 Filtratie
3.6 Destillatie
3.7 Vloeistof-vloeistof extractie
3.8 Kristallisatie

4 Verblijftijdspreiding
4.1 Verblijftijdverdelingen
4.2 Voorbeelden

5 Chemische reactoren
5.1 Reactoren
5.2 Selectiviteit en opbrengst

6 Procestechnisch tekenen
6.1 Symbolen
6.2 Voorbeelden van processchema's

1 Eenheidsbewerkingen

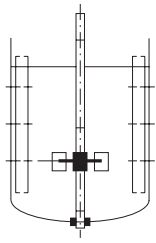
Eenheidsbewerkingen kunnen ingedeeld worden in een aantal hoofdgroepen:
- *opslag en transport*;
- *verkleinen;*
- *vormgeven*
- *verenigingsprocessen;*
- *scheiden;*
- *warmtewisselen.*

Elk van deze hoofdgroepen bevat een groot aantal eenheidsbewerkingen die in verschillende typen apparaten kunnen worden uitgevoerd. Een volledig overzicht is te vinden in de vakliteratuur (vermeld aan het einde van dit hoofdstuk). Hieronder zullen enkele bewerkingen uit de groepen **verenigingsprocessen** (par. 2) en **scheiden** (par. 3) nader worden behandeld.

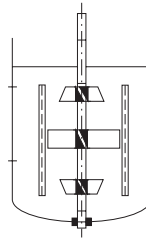
2 Verenigingsprocessen

2.1 Mengen en roeren

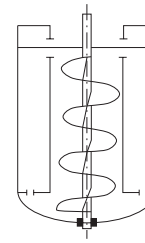
Doel van het *mengen* en *roeren* kan zijn de deelnemende fasen (L: Liquid, S: Solid, G: Gas) te homogeniseren, suspenderen, dispergeren en/of de warmte- dan wel de stofoverdracht te bevorderen. Apparatuur voor het mengen en roeren van L-L, L-S en L-G systemen gebeurt onder andere middels roerwerken. Enkele typen roerwerken zijn in figuur 2.1 afgebeeld.



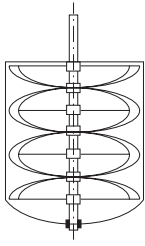
standaardgeometrie
Turbine met 6 bladen



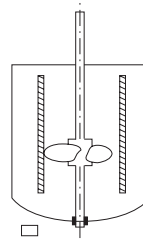
3 paddles met
gedraaide bladen



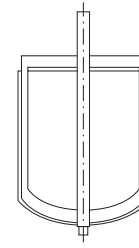
Schroef



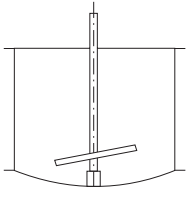
Helixvormige ribben



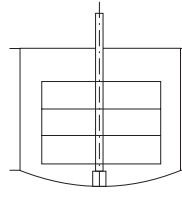
Propeller



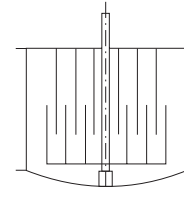
Anker



Enkelvoudige paddle

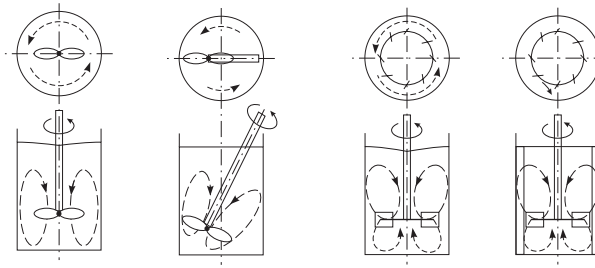


Raamwerk
paddle

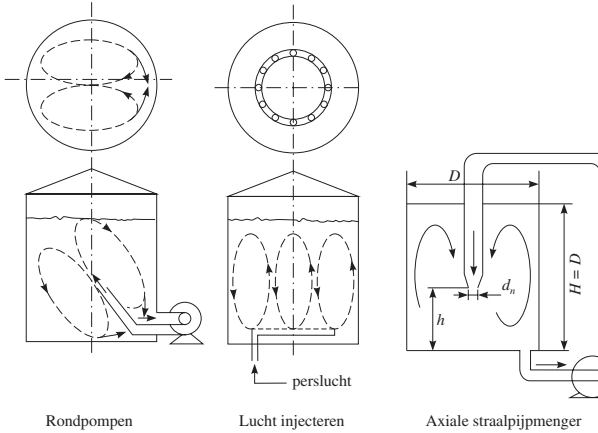


In elkaar grijpende
paddle

Figuur 2.1 Typen roerwerken



Figuur 2.2 Stromingspatronen van roerwerken



Figuur 2.3 Stromingspatronen van andere typen mengers

Tabel 2.1 Toepassingsmogelijkheden voor de belangrijkste hoofdtypen roerders[1)]

type roerder	d/D	keerschot	η_{max} [Pa · s]	toepassing voor			
				homogeniseren	suspenderen	dispergeren	warmteoverdracht
propeller	0,33	ja	0,5	ja	ja	–	ja
turbine	0,33	ja	0,5	–	–	ja	ja
anker	0,95	–	5	–	–	–	ja
helix	0,95	–	1000	ja	–	–	ja

[1)] d = diameter roerder [m]
D = diameter cylindrisch mengvat [m]
η = dynamische viscositeit [Pa · s]

Vermogensverbruik bij roerwerken

$$P = 2\pi nT$$

waarin: P = gedissipeerd vermogen [W]
n = toerental roerder [omw/s]
T = roermoment [Nm]

Vermogenskental of *kental van Newton*:

$$Ne = \frac{P}{\rho n^3 d^5}$$

waarin: ρ = dichtheid medium [kg/m^3]
d = diameter roerder [m]

Het vermogenskengetal is afhankelijk van:
- het type roerwerk
- uitvoeringsvorm van het roerwerk
- uitvoering van het roervat. Bijvoorbeeld het wel/niet toepassen van baffles.
- mate van turbulentie in het roervat

De mate van turbulentie in het roervat wordt weergegeven door de waarde van het Reynoldsgetal.

Reynoldsgetal betrokken op de roerder:

$$Re = \frac{\rho n d^2}{\eta}$$

waarin: η = dynamische viscositeit [Pa · s]
Er geldt: $Ne = f(Re)$

Voor $Re < 10$ geldt[1)]:

$$Ne :: \frac{1}{Re},$$

dus

$$\frac{P}{\eta n^2 d^3} = \text{constant} = Ne'$$

Voor $Re > 2 \cdot 10^4$ geldt: $Ne = \frac{P}{\rho n^3 d^5} = \text{constant}.$

Tabel 2.2 Gebruikelijke waarden van Ne en Ne′ voor verschillende typen roerwerken

type roerder		$Ne(Re > 10^4)$	$Ne'(Re < 10)$
1	6-bladige turbineroerder in gebaffled vat (4 baffles)	5,5–6,5	~70
2	propellerroerder in gebaffled vat (4 baffles)	0,4	42
3	roterende schijf in ongebaffled vat	0,02	–
4	scheve bladroerder, 6 bladen	1,5	70
5	schroefroerder in geleide buis ($d = 0{,}4\ D_v$)	–	800

Pompcapaciteit van roerwerken

$\phi_p = c \cdot nd^3$ (m^3/s), waarin de constante $c = f(Re)$ en bovendien afhangt van de uitvoeringsvorm van de roerder.
Voor $Re > 10^4$ geldt tabel 2.3.

[1)] N.B.::staat voor 'evenredig met'.

Tabel 2.3 Waarden voor de constante c

type roerder	aantal bladen	bladhoogte/roerderdiameter	c
propeller	3	–	0,4
turbine	6	0,2	1,3

Mengtijd in mengbare vloeistof-vloeistof systemen

De *mengtijd* is de tijd die nodig is voor het *homogeniseren* van twee mengbare vloeistoffen. Voor roerders geldt de volgende goede benadering voor de mengtijd:

$$t_m = 4 \cdot t_c = 4 \cdot \frac{V}{2 \cdot \phi_p} \quad [s]$$

waarin: t_c = circulatietijd in het mengvat [s]
V = volume mengvat [m^3]
ϕ_p = pompcapaciteit roerder [m^3/s]

Voor rondpomp-systemen en axiale straalpijpmengers met $H = D$ (zie figuur 2.2) geldt de *relatie van Rácz c.s.*:

$$\frac{t_m \cdot v_n}{d_n} = 1{,}1 \cdot \left(\frac{D}{d_n}\right)^{2{,}75}$$

waarin: v_n = uitstroomsnelheid uit straalpijp [m/s]
d_n = diameter uitstroomopening straalpijp [m]
D = diameter cilindrisch mengvat [m]

2.2 Suspenderen

Suspenderen is het verdelen van vaste stofdeeltjes in een vloeistof of in een gas. *Relatie van Zwietering*:

$$n_{\min} = C \cdot \frac{v^{0.1} \cdot d_p^{0,2} \cdot \left(g \cdot \frac{\rho_s - \rho_t}{\rho_1}\right)^{0,45} \cdot \left(\frac{m_p}{m_t} \cdot 100\right)^{0,13}}{d^{0,85}}$$

$\eta_{\min}$ = minimaal benodigd toerental roerder om de vaste stofdeeltjes niet langer dan 1 seconde op de bodem te laten rusten vóór zij opgewerveld worden [omw/s]
d = diameter roerder [m]
d_p = diameter vaste-stof deeltjes [m]
g = zwaarteveldsterkte [m/s^2]
ρ_s = dichtheid vaste-stof deeltjes [kg/m^3]
ρ_1 = dichtheid vloeistof [kg/m^3]
v = kinematische viscositeit vloeistof [m^2/s]
m_p = massa vaste-stof deeltjes [kg]
m_1 = massa vloeistof [kg]
C = constante, afhankelijk van type roerder, van de hoogte van de roerder boven de bodem en van de verhouding vatdiameter/ roerderdiameter (zie)

Tabel 2.4 Waarden voor de constante C bij suspenderen

type roerder	afstand roerder-bodem / vatdiameter	roerderdiameter / vatdiameter	C
turbine	0,2–0,25	0,3	7,5
propeller	0,25	0,33	6,5

Voor het suspenderen in straalpijpmengers geldt de *relatie van Rácz c.s.*:

$$\frac{V_{\min} \cdot \rho_1 \cdot d_n}{\eta} = 0{,}4 \left(\frac{d_p^3 \cdot g(\rho_s - \rho_1)\rho_1}{\eta^2}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_1}\right)^{-0,07} \times \left(\frac{d_p}{D}\right)^{-1,46} \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^{-0,04} \cdot \left(\frac{d_n}{D}\right)^{0,06} \cdot \left(\frac{m_p}{m_t}\right)^{0,30}$$

waarin:
V_{min} = minimaal benodigde uitstroomsnelheid uit de straalpijp om de vaste stof deeltjes niet langer dan 1 seconde op de bodem te laten rusten vóór zij opgewerveld worden [m/s]
d_n = diameter uitstroomopening straalpijp [m]
D = diameter mengvat [m]
h = hoogte straalpijp boven de bodem [m]

(De andere symbolen zijn bij de *relatie van Zwietering* aangegeven.)
Deze relatie geldt voor een ronde bodem. Voor andere bodemvormen wordt V_{min} groter.

2.3 Dispergeren

Voor het vergroten van het contactoppervlak tussen twee fasen wordt één van de fasen in de andere fase verdeeld, met de bedoeling, de warmte-en/of het stoftransport tussen deze fasen te vergroten.
Voor de *stofoverdracht* tussen twee fasen geldt:

$$q_m = k \cdot A \cdot (c_e - c)$$

waarin: q_m = hoeveelheid overgedragen stof [kg/s]
k = stofoverdrachtscoëfficiënt [m/s]
c_e = contactoppervlakte tussen de fasen [m_2]
c = evenwichtsconcentratie van de over te dragen component [kg/m_3]
c = actuele concentratie [kg/m^3]

Voor de gebruikelijke vloeistof-gas contactapparaten geldt: $k \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s
De waarde van A hangt in sterke mate af van het gedissipeerde vermogen; voor vloeistof-gas systemen geldt:

$$\frac{A}{V} :: \left(\frac{P}{V}\right)^{0,8}$$

waarin: $\frac{A}{V}$ = contactoppervlak per volume-eenheid [m^{-1}]

$\frac{P}{V}$ = vermogenstoevoer per volume-eenheid [W/m^3]

De waarde van (P/V) varieert in de praktijk (aerobe zuivering van afvalwater, fermentatie) tussen 10 en $8 \cdot 10^3$ [W/m^3]
Het energetisch rendement van gas-vloeistof contactapparaten wordt gewoonlijk uitgedrukt in kg overgedragen stof per eenheid toegevoerde energie. Voor de overdracht van zuurstof in waterlucht systemen is de waarde hiervan ca. 1,5–2,0 kg zuurstof per kWh toegevoerde energie.

2.4 Verstuiven

Voor het verdelen van vloeistoffen in kleine druppels worden *verstuivers* (*atomizers, Zerstäuber*) toegepast. Voorbeelden van *sproeiprocessen* zijn het aanbrengen van dunne lagen (verven en lakken), het *sproeidrogen* (melkpoeder) en het *prillen* (ureumbolletjes).

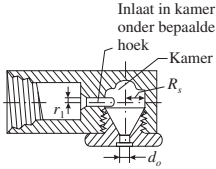
De verstuivers kunnen worden ingedeeld naar de energie die bij het verstuiven wordt gebruikt (zie ook figuur 2.3 en daarna):
- éénfase drukverstuivers (werkend met vloeistofdruk);
- tweefasen drukverstuivers (werkend met gasdruk);
- centrifugaal-verstuivers (werkend met centrifugaal-kracht).

De theoretisch benodigde arbeid A_{th} voor het verstuiven is zeer klein en rechtevenredig met de oppervlakte van de geproduceerde druppels:

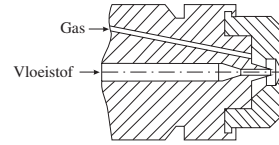
$$A_{th} = \sigma \cdot \zeta \quad [N \cdot m]$$

waarin: σ = oppervlaktespanning vloeistof [N/m]
ζ = totale oppervlakte druppels [m^2]

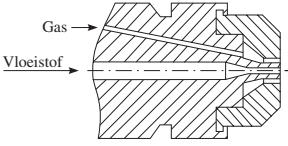
De werkelijk benodigde verstuivingsarbeid is zeker een factor 100 groter dan deze theoretische waarde; dit wordt veroorzaakt door de versnelling van de vloeistof en door de wrijvingsverliezen in de verstuiver.



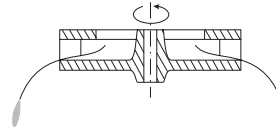
Eenfase drukverstuiver



Tweefasen drukverstuiver
met interne menging



Tweefasen drukverstuiver
met externe menging



Centrifugaal-verstuiver

Figuur 2.4 Verschillende typen verstuivers

Eenfase verstuivers

Capaciteit van de *eenfase verstuiver*:

$$M = \tfrac{1}{4}\pi \cdot D^2 \cdot f \cdot \sqrt{2\rho \cdot \Delta p}\ [\mathrm{kg/s}]$$

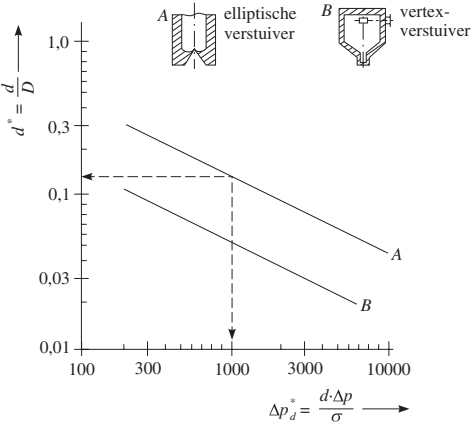
waarin:

M = verstoven hoeveelheid vloeistof [kg/s]
D = diameter verstuiveropening [m]
van $0{,}6 \cdot 10^{-3}$ tot $130 \cdot 10^{-3}$ m
f = wrijvingsfactor [−]
van 0,6 tot 0,95
ρ = dichtheid vloeistof [kg/m^3]
Δp = drukval over verstuiver [N/m^2]

Benodigd pompvermogen:

$$N_p = \frac{M \cdot \Delta p}{\rho \cdot \eta} \quad [\mathrm{W}]$$

waarin: η = rendement pomp [−]



Figuur 2.5 Ontwerpdiagram eenfase verstuivers

De diameter van de verstuiveropening kan met behulp van worden bepaald. Uit de gewenste druppeldiameter d [m], de te kiezen drukval Δp [N/m^2] en de gegeven oppervlaktespanning σ[N/m] wordt de dimensieloze druk Δp^* berekend. In figuur 2.5 wordt nu de waarde van de dimensieloze diameter d^* afgelezen, waaruit de vereiste verstuiverdiameter D [m] wordt berekend.
Als van een bepaald type eenfase waterverstuiver bekend is welke gemiddelde druppelgrootte deze produceert, dan kan de druppelgrootte voor een andere vloeistof als volgt worden berekend:

$$\frac{d_L}{d_W} = \left(\frac{\sigma_L}{\sigma_W}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\rho_W}{\rho_L}\right)^{0,3}$$

waarin:
μ = dynamische viscositeit vloeistof [Pa · s]
σ = oppervlaktespanning vloeistof [N/m]
ρ = dichtheid vloeistof [kg/m^3]
index W = water
index L = andere vloeistof

Tweefasen verstuivers

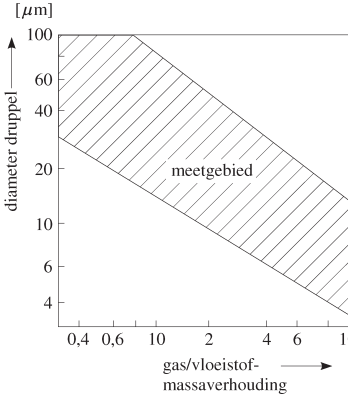
In *tweefasen verstuivers* wordt de voor de verstuiving benodigde energie door de gasfase geleverd. In plaats van een gas kan ook stoom worden gebruikt die verderop in het proces kan worden gecondenseerd. De grootte van de geproduceerde druppels is niet uniform, maar varieert tussen wijde grenzen (zie figuur 2.6).
Tweefasen verstuivers kunnen goed toegepast worden voor het verstuiven van sterk eroderende en visceuze vloeistoffen.

Centrifugaal-verstuivers

Bij *centrifugaal verstuivers* is de diameter van de verstuiverschijf tussen $0{,}2 \cdot 10^{-2}$ en $50 \cdot 10^{-2}$ m, de omtreksnelheid tussen 30 en 180 m/s. De capaciteit per apparaat is groot, maximaal ca. 4000 liter per uur. Bij zeer lage capaciteit worden nagenoeg monodisperse deeltjes geproduceerd:

$$d = \frac{0{,}52}{n}\sqrt{\frac{\sigma}{D \cdot \rho}}\ [\text{m}]$$

waarin:
n = toerental verstuiverschijf [omw/s]
D = diameter verstuiverschijf [m]
σ = oppervlaktespanning vloeistof [N/m]
ρ = dichtheid vloeistof [kg/m^3]

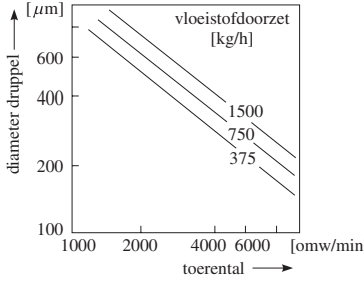


Figuur 2.6 Druppeldiameter als functie van de gas/vloeistofmassaverhouding

Tabel 2.5 Gas-vloeistof verhouding als functie van de gassnelheid

gassnelheid [m/s]	gas/vloeistof-verhouding [kg gas/kg vloeistof]
30–120	2–25
120–300	0,2–1
supersonisch	0,2–1

Bij hogere capaciteiten worden grotere druppels geproduceerd (zie figuur 2.7). Centrifugaal-verstuivers produceren grotere druppels dan drukverstuivers en kunnen geen nauwkeurig gerichte druppelzwerm produceren anders dan in een vlak rondom de verstuiverschijf. Centrifugaal-verstuivers zijn zeer geschikt voor het verstuiven van visceuze suspensies, verstopping treedt nagenoeg niet op.



Figuur 2.7 Druppeldiameter als functie van toerental en doorzet (diameter verstuiverschijf: $12{,}7 \cdot 10^{-2}$ m*)*

3 Scheidingsprocessen

Als drijvende kracht van scheidingsprocessen wordt energie en/of concentratieverschillen toegepast. Belangrijke energiebronnen hierbij zijn: mechanische, thermische en chemische energie. Magnetische en elektrische energie worden minder vaak toegepast.

Scheidingsprocessen zijn onder te verdelen in processen voor:
- componentscheiding;
- fasenscheiding;
- deeltjesgrootte scheiding.

Onder componentscheiding wordt verstaan dat één of meerdere componenten uit één fase worden afgescheiden. Vaak wordt componentscheiding toegepast daar waar een gas of vloeistof gezuiverd wordt. Bekende processen waarbij componentscheiding wordt toegepast zijn de drinkwaterbereiding en afgassenzuivering. Voorbeelden van componentscheiding zijn:
- adsorptie;
- absorptie;
- ionenwisseling;
- membraan scheiden.

Scheidingsprocessen kunnen ook aan de hand van de deelnemende fasen (*L*iquid, *S*olid, *G*as) ingedeeld worden.

S-L scheiding
Voorbeelden van S-L scheiding zijn:
– filtratie;
– bezinken;
– centrifugeren.

L_1-L_2 scheiding
Voorbeelden van L_1-L_2 scheiding zijn:
– decanteren;
– destilleren;
– extraheren.

L-G scheiding
Voorbeeld van L-G scheiding is ontgassing.

Tot slot worden in de vaste fase deeltjes gescheiden op basis van deeltjesgrootte. Op dit principe berust het zeven van een vaste stof.

3.1 Overzicht scheidingsprocessen

Zie tabel 3.1.

Tabel 3.1 Overzicht van de meest voorkomende Scheidingsprocessen

naam proces	voeding	scheidend agens	productstromen	scheidingsprincipe	voorbeelden
1. Absorptie	gas	vloeistof (niet-vluchtig)	damp + vloeistof	oplosbaarheid (Wet van Henry)	Verwijdering SO_2 rookgassen Verwijdering CO_2 en SO_2 uit aardgas m.b.t. ethanolamines (DEA) Winning van moeilijk condenseerbare aromastoffen Terugwinning alcohol boven gistingskuipen Regeling CO_2-concentratie in gascellen waar fruit wordt bewaard Lucht conditionering Absorberen van CO_2 bij carbonatie van suikersappen Absorptie van chloor voor desinfectie doeleinden (breekpunts chlorering)
2. Adsorptie	gas of vloeistof	vast adsorbens	fluïdum + vast adsorbens	verschil in adsorptie potentialen	Fysisch-chemische waterzuivering Zuivering van gassen Drogen van gassen Ontkleuring van suikersiropen, eiwit, hydrolysaten e.d. Zuiveren van plantaardige en dierlijke oliën met bleekaarde
3. Destillatie	vloeistof en/of damp	thermische energie	damp + vloeistof	verschil in relatieve vluchtigheid	Scheiding van aardolie in fracties Zuivering reactiemengsels in chemische industrie Zuiveren van oplosmiddelen voor vastvloeistof extractie (winning peniciline, olie-extractie uit plantaardig materiaal, ontvetten van viseiwit concentraten enz.) Rectificatie van aromaconcentraten
4. Verdamping	vloeistof	thermische energie	damp + vloeistof	verschil in relatieve vluchtigheid	Winning van drinkwater Concentreren van oplossingen (of fijne suspensies)en vloeibare voedingsmiddelen (b.v. vruchtensappen, melk, koffe-extract)
5. Ontspannings-verdamping ('flash'-verdamping)	vloeistof	mechanische energie (drukval)	damp + vloeistof	verschil in relatieve vluchtigheid	Ontzilten van zeewater Concentreren van vruchtensappen
6. Kristallisatie	vloeistof	koelen of adiabatisch verdampen van oplosmiddel	vaste stof + vloeistof	verschillen in inbouwmogelijkheden in kristalrooster	Vriesconcentreren van oplossingen en vloeibare voedingsmiddelen (b.v. vruchtensappen, melk, koffieextract) Bereiding drinkwater uit zout water Zuivering reactiemengsels (scheiding o,m,p-xylenen) Winning van suiker uit leach-oplossin gen Zuivering van vetten

Tabel 3.1 (vervolg)

naam proces	voeding	scheidend agens	productstromen	scheidingsprincipe	voorbeelden
7. Strippen	vloeistof	gas (niet-oplosbaar)	damp + vloeistof	verschil in relatieve vluchtigheid	Verwijdering van NH_3 uit afvalwater Verwijdering lichte koolwaterstoffen uit ruwe-olie fracties Scheiding aromastoffen van vruchten sappen vóór het concentreren
8. Moleculaire flotatie (schuimscheiding en absorptieve gasbelscheidingen)	vloeistof	gasbelletjes; soms surfactants	twee vloeistofstromen (mengbaar)	positieve adsorptie aan gas/vloeistofgrensvlak	Verwijdering surfactants uit vloeistoffen
9. Extractie	vloeistof	niet-mengbare vloeistof	twee vloeistoffen (niet mengbaar)	selectiviteit (wet v. Nernst)	Winning aromatische koolwaterstoffen uit pyrolyse benzine Terugwinning fenol uit proceswater Talrijke hydrometallurgische schei dingen
10. Osmose	waterige oplossing	geconcentreerde zoutoplossing semi permeabel membraan	twee vloeistoffen	streven naar thermodynamisch evenwicht; gelijke osmotische druk	Concentreren van vloeibare voedingsmiddelen
11. Ionenwisseling	vloeistof	vaste harsen (b.v. amberlite)	vloeistof + ionenwisselaar	wet v.d. massawerking	Ontharden van water Ontzouten van melk en melkwei Ontassen van gelatine en glycerine Behandeling van wijn, vruchtensappen en dranken Behandeling van (stoom) ketel voedingswater
12. Gel filtratie	vloeistof	vast gel (b.v. crosslinked dextranen)	vloeistof + gelfase	verschil in permeatie in gelmatrix	Zuivering van eiwitten, pharmaceutica
13. Drogen van vaste stoffen	vaste stof	warmte	droge vaste stof + vochtige damp	verdamping van water	Slibdrogen Conserveren voedingsmiddelen
14. Vriesdrogen	bevroren waterhoudende vaste stof	thermische energie	vaste stof + waterdamp	sublimatie van water	Drogen van pharmaceutica en voedings- en genotmiddelen (koffie)
15. Leaching uitwassen	vaste stof	oplosmiddel	vloeistof + vaste stof	selectieve oplosbaar heid	Reiniging filterkoeken Hydrometallurgie Wassen van slib voor chemisch conditioneren Decaffineren van koffie Winning van olie uit plantaardig materiaal (soja, katoenzaad, raapzaad, aardnoten, sesamzaad) Ontvetten van vis-eiwit concentraten

Tabel 3.1 (vervolg)

naam proces	voeding	scheidend agens	productstromen	scheidingsprincipe	voorbeelden
16. Gasdiffusieproces	gas	druk gradiënt over membraan	twee gassen	verschillen in Knudsen diffusie	Concentreren van U^{235} F_6 uit natuurlijk UF_6
17. Massa spectrometrie	gas	magnetisch veld	gassen	verschillen in lading/massa	Isotoop-scheidingen
18. Microfiltratie	colloïdale oplossingen, gas met bacteriën	symmetrisch, poreus membraan	twee vloeistoffen, gassen	zeefwerking, drukval over membraan 10–100 kpa	Afscheiden van colloïdaal opgeloste stoffen, afscheiden van bacterië b.v. in operatiekamers
19. Ultrafiltratie	vloeistof met grote moleculen, b.v. eiwitten, olie/water emulsie	asymmetrisch membraan (toplaag en poreuze dragerlaag)	2 vloeistoffen	zeefwerking, drukval over membraan 50 kPa−1 MPa	Winning van eiwitten uit wei en uit aardappelvruchtwater, scheiding olie/water emulsies
20. Hyperfiltratie	vloeistof met opgeloste zouten of organische stoffen	asymmetrisch membraan (dichte toplaag en poreuze dragerlaag)	2 vloeistoffen	diffusie door membraan, drukval over membraan 1–10 MPa (osmotische druk)	Zeewater-ontzouting, brakwater- en oppervlaktewater-ontzouting (tuinderijen)
21. Dialyse	vloeistof met opgeloste laagmoleculaire en hoog-moleculaire stoffen	microporeus membraan	2 vloeistoffen	diffusie door membraan onder invloed van concentratiegradiënt over membraan	Bloedzuivering in kunstnier, scheiden van laagmoleculaire van hoogmoleculaire stoffen
22. Elektrodialyse	waterige oplossing met ionen	ionogene membranen	2 vloeistoffen	selectief ionentransport door elektrisch potentiaalverschil	Ontzouten van zeewater, brakwater en voedingsmiddelen.
23. Membraan-gasscheiding	gas met kleine en grote moleculen	asymmetrische membranen	2 gasstromen	drukval, concentratie-gradiënt over membraan, diffusie door membraan	Scheiding van H_2 van overige gassen bij NH_3-synthese Methode is sterk in ontwikkeling
24. Pervaporatie	vloeistof met isomere mengsels of van azeotrope samenstelling	asymmetrisch membraan	1 vloeistof en 1 gasstroom	verlaagde druk aan de gaskant van membraan, vloeistof verdampt, gas diffundeert door membraan	Scheiding van ethanol en water
25. Moleculaire destillatie	vloeistof (oplossing)	thermische energie + vacuüm	vloeistof + damp	verschillen in verdampingssnelheid volgens kinetische gastheorie	Scheiding van vitamine-A esters
26. Ultracentrifuge	vloeistof (oplossing) gas	centrifugaalkracht	twee vloeistoffen twee gassen	diffusie o.i.v. druk gradiënt	Scheiding van hoogmoleculaire stoffen naar molgewicht, isotopen-scheiding

3.2 Sedimentatie

Op een bolvormig deeltje met diameter d_p dat zich in een gas of vloeistof beweegt met een snelheid v, werkt een weerstandskracht F_p:

$$F_p = c_w \cdot A \cdot \tfrac{1}{2} \rho v_p^2$$

waarin: c_w = weerstandscoëfficiënt [−]
A = oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het deeltje in de bewegingsrichting [m^2]
ρ = dichtheid van het fluïdum [kg/m^3]
v_p = snelheidsverschil tussen deeltje en fluïdum [m/s]

In de stationaire toestand is deze weerstandskracht gelijk aan het schijnbare gewicht van het deeltje:

$$c_w \cdot A \cdot \tfrac{1}{2} \rho v_p^2 = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \Delta \rho \cdot g$$

De bezinksnelheid is dus:

$$v_p = \left(\frac{4g \cdot \Delta \rho \cdot d_p}{3\rho \cdot c_w} \right)^{1/2}$$

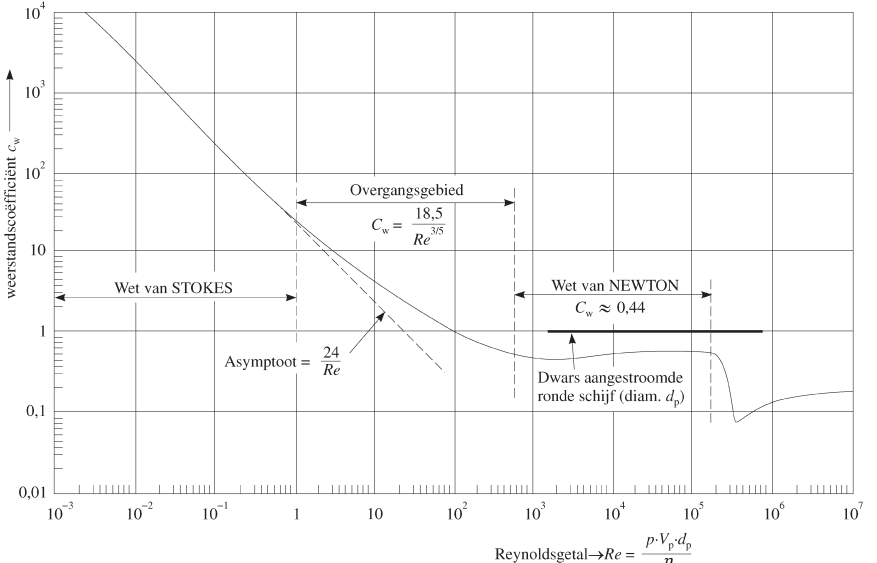
waarbij: $c_w = f(Re)$, zie figuur 3.1.

Voor de gezamenlijke bezinksnelheid van een zwerm deeltjes van uniforme deeltjesgrootte geldt de *relatie van Richardson en Zaki*:

$$\frac{v_z}{v_p} = (1 - \phi)^n$$

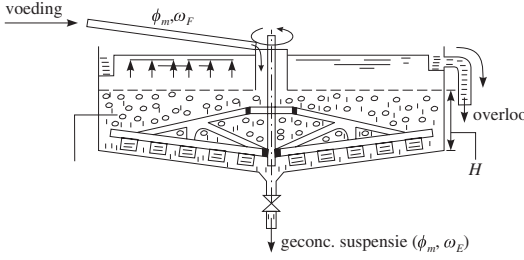
waarin: v_z = bezinksnelheid van de zwerm [m/s]
v_p = bezinksnelheid enkel deeltje [m/s]
ϕ = volumefractie deeltjes
n = exponent = 4,6 voor $Re < 0{,}2$ en
= 2,4 voor $Re > 500$

Bij een volumefractie van de deeltjes van 0,01 geldt al een teruggang van 5% van v_z t.o.v. v_p.



Figuur 3.1 Weerstandscoëfficiënt c_w als functie van Re voor bolvormige lichamen

Een belangrijke constructie is de DORR-indikker voor het afscheiden van sediment uit vloeistoffen, in gebruik bij waterzuivering en o.a. de mijn-industrie:



Figuur 3.2 DORR indikker

De gemiddelde opwaartse vloeistofsnelheid in de indikker is:

$$v_{\text{opw.}} = \frac{(\omega_{\text{F}} - \omega_{\text{E}})\phi_{\text{m}}}{A \cdot \rho}$$

waarin: ω_{F} = watergehalte in de voeding [kg water/kg droog]
ω_{E} = watergehalte geconcentreerde suspensie [kg water/kg droog]
ϕ_{m} = massastroom droge stof in de voeding [kg/s]
A = oppervlakte bezinkzone [m^2]
ρ = dichtheid van de vloeistof [kg/m^3]

Om de deeltjes te kunnen laten bezinken dient de opwaartse vloeistofsnelheid kleiner te zijn dan de bezinksnelheid van de deeltjes:

$$v_{\text{p}} \geqslant \frac{(\omega_{\text{F}} - \omega_{\text{E}})\phi_{\text{m}}}{A \cdot \rho}$$

of:

$$A \geqslant \frac{(\omega_{\text{F}} - \omega_{\text{E}})\phi_{\text{m}}}{v_{\text{p}} \cdot \rho}$$

3.3 Centrifugeren

Voor de bezinksnelheid in een centrifugaalkrachtveld geldt:

$$v_{p,c} = \left(\frac{4r\omega^2 \cdot \Delta\rho \cdot d_p}{3\rho \cdot c_w} \right)^{1/2}$$

waarin: $v_{p,c}$ = bezinksnelheid deeltje [m/s]
r = straal centrifuge [m]
ω = $2\pi n$ = hoeksnelheid centrifuge [rad/s]
n = toerental centrifuge [omw/s]
$\Delta\rho$ = dichtheidsverschil tussen de twee fasen [kg/m^3]
d_p = diameter bezinkend deeltje [m]
ρ = dichtheid continue fase (vloeistof of gas) [kg/m^3]

c_w de weerstandscoëfficiënt, is weer een functie van *Re* en kan worden bepaald uit figuur 3.1, par. 3.2.
Het centrifugekengetal k_c geeft de verhouding weer tussen het centrifugaal-krachtveld en het zwaartekrachtveld:

$$k_c = \frac{r \cdot \omega^2}{g} = \frac{r \cdot 4\pi^2 n^2}{g}$$

Bij benadering geldt dus: $k_c = 4rn^2$

Tabel 3.2 Waarden van k_c voor verschillende typen vloeistof centrifugaal

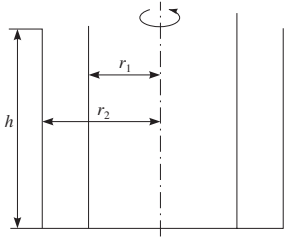
type centrifuge	max. diameter [m]	toerental [omw/s]	k_c
mantel-centrifuge	1,6	10	500
schotel-centrifuge	0,7	75	7500
buis-centrifuge	0,045	750	50000

De gemiddelde sedimentatietijd t_s voor laminaire stroming volgt uit:

$$t_s = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{v_{p,c}} = \frac{18\mu}{\omega^2 d_p^2 \Delta\rho} \cdot \ln\frac{r_2}{r_1}$$

μ = dynamische viscositeit van het filtraat [Pa · s]

In deze vergelijking is voor c_w de waarde $\frac{24}{Re}$ ingevuld (*wet van Stokes*).

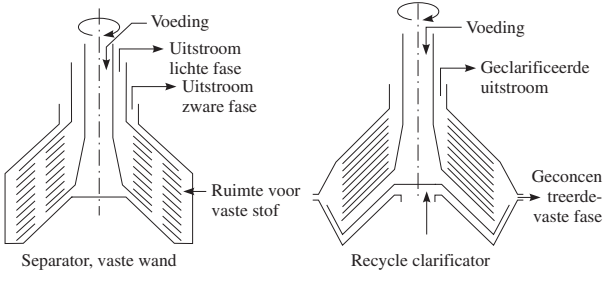


Figuur 3.3 Principe mantel-centrifuge

Het maximaal te reinigen debiet ϕ_v is dan:

$$\phi_v = \frac{V}{t_s} \ [m^3/s]$$

waarin: $V = \pi(r_2^2 - r_1^2) \cdot h =$ vloeistofvolume centrifuge $[m^3]$



Figuur 3.4 Twee uitvoeringsvormen van de schotel-centrifuge

Voor een schotel- of lamellencentrifuge geldt voor het maximale debiet ϕ_i:

$$\phi \times v_{p,c} = \frac{2\pi\omega^2(N-1)(r_2^3 - r_1^3)}{3g \cdot \tan\theta} [\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]$$

waarin: N = aabtal schotels
r_2 = buitenradius schotels [m]
r_1 = binnenradius schotels [m]
θ = halve tophoek van de schotels [−]

3.4 Stofcyclonen

Hier vindt scheiding plaats onder invloed van een centrifugaalkracht werkend op deeltjes in een roterend fluïdum. Dit gaat gepaard met een bepaalde drukval. Voor lucht geldt bij benadering voor deze drukval:

$$\Delta P = K \cdot \tfrac{1}{2}\rho v^2 \ [\mathrm{Pa}]$$

waarin: $10 < K < 25$
v = inlaatsnelheid lucht [m/s]
ρ = dichtheid lucht [kg/m^3]

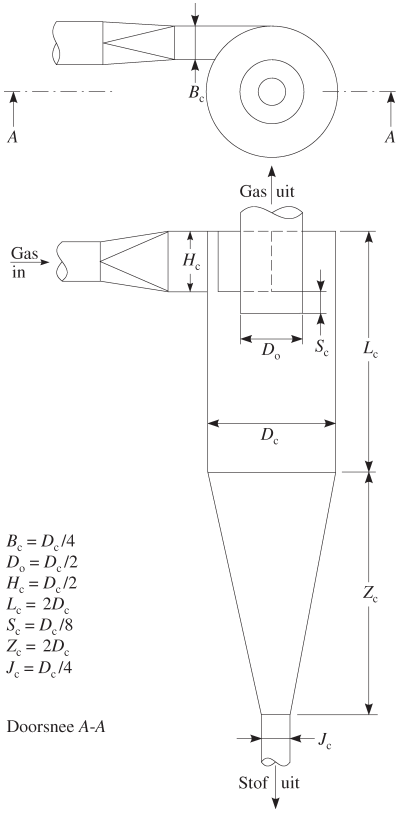
Stofdeeltjes die groter zijn dan ca. 10^{-5} m, kunnen met een stofcycloon goed worden opgevangen.

De *cycloon-parameter* volgens *van Ebbenhorst-Tengbergen* is:

$$C_y = \frac{\text{centrifugaalkracht werkend op deeltje}}{\text{weerstandskracht werkend op deeltje}}$$

$$C_y = \frac{d_p^2 \cdot v \cdot \rho_p}{D_c \cdot \rho \cdot \nu}$$

waarin: d_p = diameter deeltje [m]
v = snelheid in inlaatstuk cycloon [m/s]
ρ_p = dichtheid deeltje [kg/m^3]
D_c = diameter cylindrisch gedeelte cycloon [m]
ρ = dichtheid fluidum [kg/m^3]
ν = kinematische viscositeit fluïdum [m/s]



Figuur 3.5 Geometrische verhoudingen van een stofcycloon

Voor een stof-afvang van 99% is $C_y \approx 1$. De snelheid v in het inlaatstuk van de cycloon wordt meestal op ca. 20 m/s gesteld. Medium-eigenschappen tesamen met de cycloon-parameter bepalen de cycloon-diameter D_c, waarna m.b.v. vastgelegde geometrische verhoudingen de andere afmetingen van de cycloon kunnen worden berekend (zie figuur 3.5).

3.5 Filtratie

Om een vaste stof van een vloeistof of een gas te scheiden wordt filtratie toegepast. Er zijn twee soorten te onderscheiden:
- *koekfiltratie*, waarbij de te filteren deeltjes bruggen vormen over de poriën van het filterdoek;
- *verstoppingsfiltratie*, waarbij deeltjes de poriën verstoppen.

Bij koek-filtratie worden de volgende stappen onderscheiden:
- vorming van de filterkoek;
- verwijderen van de vloeistof uit de filterkoek;
- het uitwassen van de filterkoek;
- het drogen van de filterkoek;
- het verwijderen van de filterkoek, waarna de filtratie-cyclus opnieuw begint.

Wet van Darcy voor de stroming door een poreus medium:

$$v = \frac{1}{A} \cdot \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = K \cdot \frac{\Delta p}{\eta \cdot l}$$

waarin:
v = lineaire vloeistofsnelheid, betrokken op het gehele oppervlak A van de filter [m/s]
$\mathrm{d}V$ = hoeveelheid vloeistof die in tijd $\mathrm{d}t$ door de filter stroomt [m^3]
K = evenredigheidsconstante, permeabiliteit genoemd [m^2]
Δp = drukverschil over de filter [Pa]
η = dynamische viscositeit vloeistof [Pa · s]
l = dikte van de filterkoek, gemeten in de stromingsrichting [m]

Voor een filterkoek, bestaande uit bolvormige deeltjes geldt de *relatie van Kózény*:

$$v = \frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{180} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon^2)} \cdot d_\mathrm{p}^2 \cdot \frac{\Delta p}{\eta \cdot l}$$

waarin: ε = porositeit van de filterkoek (ca. 0,45)
d_p = diameter vaste deeltjes in de filterkoek [m]

3.6 Destillatie

Damp-vloeistofevenwichten

Wet van Raoult: partiële druk P_1 van component 1 in de dampfase $P_1 = x_1\ P_1^\mathrm{s}$, $P_2 = x_2\ P_2^\mathrm{s}$, waarin P_1^s = verzadigde dampspanning en x_1 = molfractie van component 1 in de vloeistoffase.

Bij ideale dampfase geldt de *Wet van Dalton*: $P_1 = y_1\ P$,$P_2 = y_2\ P$, waarin P = totaaldruk van damp/vloeistof. De selectiviteit, waarmee de mate van scheiding wordt gedefinieerd, is bijvoorbeeld die van component 1 t.o.v. component 2 in een binair mengsel:

$$\alpha_{12} = \frac{y_1/y_2}{x_1/x_2} = \frac{(P_1^\mathrm{s}x_1/P)/(P_2^\mathrm{s}x_2/P)}{x_1/x_2} = P_1^\mathrm{s}/P_2^\mathrm{s}$$

indien gas én vloeistoffen ideaal zijn.

Afwijking van ideaal gedrag wordt verwerkt door invoering van de activiteits-coëffciënt γ_v in *Wet van Raoult*:

$$P_1 = \gamma_1^v x_1 P_1^\mathrm{s} \qquad P_2 = \gamma_2^v x_2 P_2^\mathrm{s}$$

waarin: $\gamma_1^v x_1$ = activiteit van component 1 in de vloeistoffase

Is de gasfase ideaal dan geldt met de *Wet van Dalton*:

$$y_1 P = \gamma_1^v x_1 P_1^\mathrm{s}\ \textit{en}\ y_2 P = \gamma_2^v x_2 P_2^\mathrm{s}.$$

De *verdelingscoëfficiënt* K_1 van component 1 is de verhouding van dampfaseconcentratie en vloeistofconcentratie:

$$K_1 = \frac{y_1}{x_1} = \frac{\gamma_1^v P_1^s}{P}$$

Dan geldt voor de selectiviteit ofwel relatieve vluchtigheid:

$$\alpha_{12} = \frac{\gamma_1^v \cdot P_1^s}{\gamma_2^v \cdot P_2^s}$$

Activiteitscoëfficiënten kunnen berekend worden volgens de *vergelijking van Van Laar*:

$$\ln \gamma_1^v = A_{12} \left(\frac{A_{12} x_2}{A_{12} x_1 + A_{21} x_2} \right)^2$$

en

$$\ln \gamma_2^v = A_{21} \left(\frac{A_{12} x_1}{A_{12} x_1 + A_{21} x_2} \right)^2$$

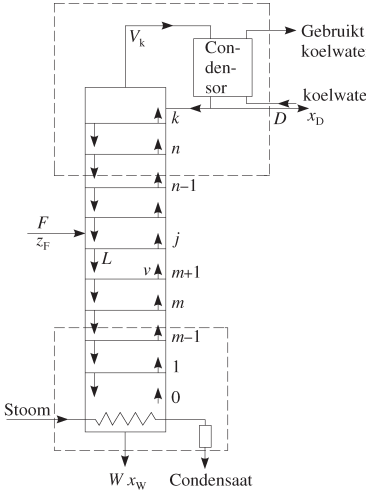
De waarde van de constanten A_{12} en A_{21} is te vinden in de literatuur (zie literatuurlijst bij dit hoofdstuk). Voor mengsels van enkele alcoholen en water worden deze constanten vermeld in tabel 3.3.

Het aantal *theoretische schotels* dat nodig is voor een bepaalde scheiding, kan volgens verschillende methoden worden berekend.

Tabel 3.3 Van Laar constanten bij $p = 760$ mm Hg

component 1	component 2	A_{12}	A_{21}
methanol	water	0,8906	0,5193
ethanol	water	1,7693	0,9409
1-propanol	water	2,7205	1,1655
1-butanol	water	3,7980	1,1690

Methode van McCabe-Thiele



Figuur 3.6 Schematische voorstelling van een rectificeerkolom

Massabalans over de installatie hierboven luidt: $F = D + W$ en voor de component met de hoogste vluchtigheid:

$$z_F \cdot F = x_D \cdot D + x_W \cdot W$$

waarin: F = voeding kmol/s met molfractie z_F
D = distillat kmol/s topproduct met molfractie x_D
W = bodemproduct mol/s met molfractie x_w

De balans over de topsectie luidt op totaal:

$$V_{n-1} = L_n + D$$

waarin: L_n = vloeistof komend van plaat n
V_{n-1} = damp, komend van plaat $n-1$

Voor de vluchtigste component volgt:

$$y_{n-1} \cdot V_{n-1} = x_n \cdot L_n + x_D \cdot D$$

waarin: y_{n-1} = samenstelling damp, komend van $n-1$
x_n = samenstelling vloeistof, komend van n

Dan volgt:

$$y_{n-1} = x_n \cdot \frac{L_n}{V_{n-1}} + x_D \cdot \frac{D}{V_{n-1}}$$

Evenzo geldt voor de bodemsectie dat totaal: $L_m = V_{m-1} + W$ en voor de vluchtigste component:

$x_m \cdot L_m = y_{m-1} \cdot V_{m-1} + x_W \cdot W$ of ook:

$$y_{m-1} = x_m \cdot \frac{L_m}{V_{m-1}} - x_W \cdot \frac{W}{V_{m-1}}$$

Aannemend dat zowel vloeistof- als dampstroom binnen één sectie constant zijn, volgt voor de werklijn van de topsectie:

$$y_{n-1} = x_n L_t / V_t + x_D \cdot D / V_t$$

en voor de bodemsectie geldt de werklijn:

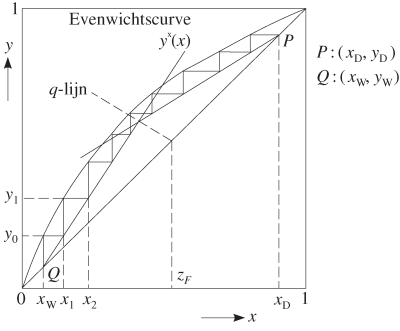
$$y_{m-1} = x_m \cdot L_b / V_b - x_w \cdot W / V_b$$

Dit zijn lijnen in een zgn. $(x-y)$ diagram. De werklijn van de topsectie gaat door punt $x = x_D$ met de helling:

$$L_t / V_t \left(= \frac{V_t - D}{V_t} \right) < 1$$

De werklijn van de bodemsectie is een rechte door punt (x_w, x_w) met helling:

$$L_b / V_b \left(= \frac{V_b + W}{V_b} \right) > 1$$



Figuur 3.7 McCabe-Thiele diagram voor continue rectificatie

Compositie x_w volgt y_o op de evenwichtscurve. Met behulp van de werklijnvergelijking, volgt x_1, ofwel grafisch door snijding met de werklijn. Het aantal trappen tussen werklijn en evenwichtslijn wordt het aantal *theoretische schotels* genoemd.

De thermische conditie van de voeding bepaalt het verband tussen topsectie en bodemsectiestromingsverdeling. Ingevoerd is de q-factor volgens $L_b = L_t + q \cdot F$

Invoer van juist kokende vloeistof betekent $q = 1$.
Invoer van damp op dauwpunt betekent $q = 0$, dus:

$$q = \frac{\text{warmte nodig om 1 mol voeding om te zetten in verzadigde damp}}{\text{verdampingswarmte per mol}}$$

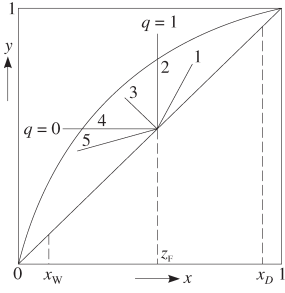
Voor de dampstromen geldt de balans:

$$V_t = V_b + (1 - q)\ F$$

De q-factor wordt gebruikt ter bepaling van het werklijnensnijpunt (x_i y_i). De vergelijking van de q-lijn volgt uit:

$$\left.\begin{aligned} y_i V_t &= x_i L_t + x_D \cdot D \\ y_i V_b &= x_i L_b - x_w \cdot W \end{aligned}\right\} y_i(F - qF) = -x_i \cdot qF + z_F \cdot F.$$

of $y_i = x_i \dfrac{q}{q-1} - \dfrac{z_F}{q-1}$ is dan de meetkundige plaats van de snijpunten.



1 Voeding is vloeistof beneden kooktemperatuur $q > 1$.
2 Voeding is vloeistof op kooktemperatuur $q = 1$.
3 Voeding is mengsel van vloeistof en damps $0 < q < 1$.
4 Voeding is damp op dauwtemperatuur $q = 0$.
5 Voeding is oververhitte damp $q < 0$.

Figuur 3.8 Enkele situaties voor verschillende q-lijnen

Refluxverhouding

Interne refluxverhouding in topsectie $= L_t/V_t$ en is in bodemsectie $= L_b/V_b$.
Externe refluxverhouding $= L_t/D = R$.
Totale reflux is er als alle topgecondenseerde damp wordt teruggevoerd als reflux dus als $L_t/V_t = 1$ of $L_t/D = \infty$; zo volgt het minimale aantal schotels bij werklijnen die samenvallen met de diagonaal.

Valt het snijpunt van de werklijnen op de evenwichtslijn, dan is de scheiding tussen gewenste x_D en x_w nog juist theoretisch mogelijk

voor de gegeven waarden van z_F en q, maar geeft een oneindig aantal schotels. Gemiddeld geldt dat de optimale reflux 1,3 maal de minimale externe flux bedraagt. Voor een gepakte kolom geldt:
- het aantal theoretische evenwichtstrappen noemt men N;
- het *H.E.T.P.* is de lengte van één theoretische evenwichtstrap in een gepakte kolom;
- de theoretische kolomlengte L_c = (H.E.T.P.). N.

Methode van Fenske-Underwood

Bij deze methode zijn de volgende berekeningstappen:
- Bereken het minimum aantal theoretische schotels, N_{min}, bij oneindig grote externe refluxverhouding R.
- Bereken de minimale externe refluxverhouding, R_{min}, bij oneindig aantal theoretische schotels.
- Bepaal de optimale refluxverhouding, R_o.
- Bereken het aantal theoretische schotels, N_{th}, nodig voor die bepaalde scheiding.

Voor N_{min} geldt de *relatie van Fenske*:

$$N_{min} + 1 = \frac{\log\left[\left(\frac{x_L}{x_H}\right)_D \cdot \left(\frac{x_H}{x_L}\right)_B\right]}{\log\ \overline{\alpha}}$$

waarin:

$\left(\frac{x_L}{x_H}\right)_D$ = de molfractieverhouding van het lichte tot het zware sleutel-component in het destillaat

$\left(\frac{x_H}{x_L}\right)_B$ = de molfractieverhouding van het zware tot het lichte sleutelcomponent in het bodemproduct

$\overline{\alpha} = (\alpha_B \cdot \alpha_D)^{1/2}$ = de gemiddelde relatieve vluchtigheid tussen lichte en zware sleutelcomponenten bij bodem- en toptemperatuur (voor ideale dampmengsels is dit de verhouding van de zuivere dampspanningen)

N.B. Multicomponent-systemen dient men dus te reduceren tot pseudo-binaire systemen door het kiezen van twee ‘sleutelcomponenten’.

Voor de minimale externe reflux-verhouding, $R_{\min}$, geldt de *relatie van Underwood*:

$$\frac{\alpha_A \cdot x_{FA}}{\alpha_A - \theta} + \frac{\alpha_B \cdot x_{FB}}{\alpha_B - \theta} + \frac{\alpha_C \cdot x_{FC}}{\alpha_C - \theta} + \ldots = 1 - q$$

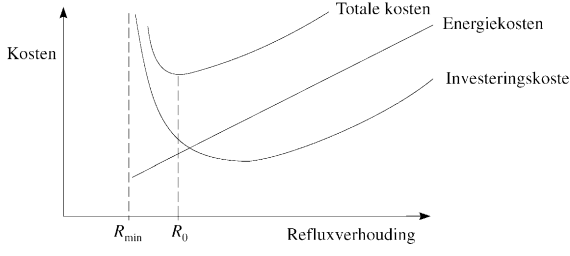
Uit deze vergelijking wordt de hulpgrootheid θ berekend en ingevuld in de volgende relatie:

$$\frac{\alpha_A \cdot x_{DA}}{\alpha_A - \theta} + \frac{\alpha_B \cdot x_{DB}}{\alpha_B - \theta} + \frac{\alpha_C \cdot x_{DC}}{\alpha_C - \theta} + \ldots = R_{\min} + 1$$

waaruit $R_{\min}$ is te berekenen.

x_{FA}, x_{FB}, x_{FC},.. zijn de molfracties van de componenten *A, B, C,* . . . , in de voeding *F.*
x_{DA}, x_{DB}, x_{DC},.. zijn de molfracties van de componenten *A, B, C,* . . . , in het destillaat.
α_A, α_B, α_C, . . . zijn de vluchtigheden van de componenten *A, B, C,* . . . t.o.v. het zware sleutel-component.
q werd reeds gedefinieerd bij de methode McCabe-Thiele.

De optimale refluxverhouding is een functie van de energiekosten en investeringskosten.
De waarde van de optimale refluxverhouding R_o, is te bepalen met behulp van figuur 3.9.



Figuur 3.9 Kosten als functie van de refluxverhouding

De energie-prijs bepaalt dus in belangrijke mate de waarde van R_o
Gebruikelijk is 1,1 $R_{min} < R_o < 2\ R_{min}$.
Het aantal theoretische schotels tenslotte, wordt berekend uit de *grafische correlatie van Gilliland*:

$$\left(\frac{N_{th} - N_{min}}{N_{th} + 2}\right) = 0{,}5448 - 0{,}5914\left(\frac{R_o - R_{min}}{R_o + 1}\right) + \frac{0{,}0027}{\dfrac{R_o - R_{min}}{R_o + 1}}$$

Het aantal schotels dat in de kolom dient te worden geïnstalleerd hangt nog af van het *schotelrendement* ε:

$$N_{geïnstalleerd} = \frac{N_{th}}{\varepsilon}$$

ε is op een ingewikkelde manier afhankelijk van de stromingsomstandigheden op de schotel en van de fysische eigenschappen van het damp-vloeistof mengsel. Voor veel destillatie-processen in de aardolie-industrie geldt bij benadering $\varepsilon \approx 0{,}7$.

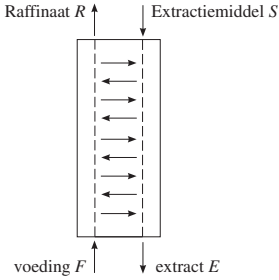
3.7 Vloeistof-vloeistof extractie

Dit is een fysische werkwijze waarbij uit een vloeistof één of een groep componenten selectief worden verwijderd. Dit gebeurt door deze componenten in een tweede vloeistof (extractiemiddel) te laten oplossen, die niet mengbaar is met de eerste vloeistof en vervolgens de twee vloeistoffen te scheiden.

Voor ideale vloeistof-vloeistof (L-L) systemen geldt voor de verdelingscoëfficiënt k:

$$k = \frac{C_{Ei}}{C_{Ri}}$$

waarin: C_{Ei} = concentratie van component i in de extractfase in de evenwichtstoestand
C_{Ri} = concentratie van component i in de raffinaatfase in de evenwichtstoestand



Figuur 3.10 Vloeistof-vloeistof extractie

Naarmate k voor een gegeven systeem groter is, verloopt de extractie beter.
Het aantal benodigde extractietrappen of theoretische schotels, is te bepalen met de *relatie van Kremser*:

$$\phi = \frac{E^{N+1} - E}{E^{N+1} - 1}$$

waarin: ϕ = de fractie niet geëxtraheerd van component i
$E = k \cdot \frac{S}{F}$ = extractiefactor, wordt constant verondersteld over alle trappen
S = massastroom extractiemiddel [kg/s]
F = massastroom voeding [kg/s]
N = aantal theoretische extractietrappen

Het aantal theoretische extractietrappen voor een bepaalde scheiding is als volgt te berekenen:
- Stel een bepaalde eis aan de fractie niet geëxtraheerd van het component dat geëxtraheerd dient te worden (ϕ).
- Bereken E voor een aangenomen waarde van N.
- Bereken de fasenverhouding uit $E/k = S/F$.
- Bereken voor gegeven voedingsstroom F de benodigde hoeveelheid extractiemiddel S.

– Herhaal zo nodig de berekening met een andere waarde van N.

Bij apparatuur voor vloeistof-vloeistofextractie wordt meestal het tegenstroom-principe toegepast. Extractie-apparatuur kan worden ingedeeld op basis van het krachtenveld dat bij de extractie is betrokken:

Zwaartekrachtveld
– Zonder mechanische roering:
  - sproeikolom ($1 < N < 2$);
  - gepakte kolom (hoogte 1 theoretische trap ca. 0,3–3m);
  - schotelkolom.
– Met mechanische roering:
  - kolommen met roterende roerders, b.v. *R*otating *D*isc *C*ontactor;
– - Pulsatie-kolom: heen-en weergaande beweging van de vloeistof of van de schotels.

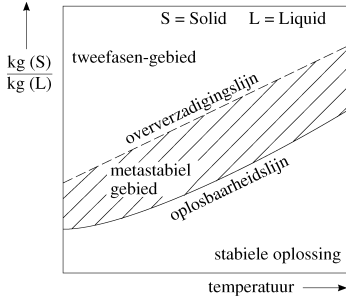
Centrifugaalveld
– centrifugaal- extractoren ($2 < N < 8$).

3.8 Kristallisatie

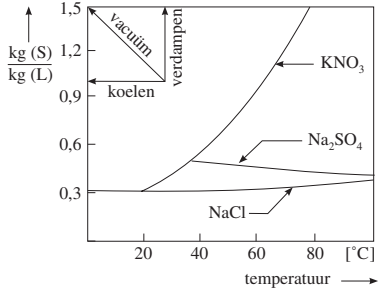
Bij *kristallisatie* wordt een vaste stof in kristallijne vorm als eindproduct verkregen. Kristallisatie kan uitgevoerd worden uit de gasfase (*rijpen*), uit een smelt (*smeltkristallisatie*) en uit een oplossing (figuur 3.11 en figuur 3.12).
Voor het ontstaan van kristallen is altijd een bepaalde oververzadiging nodig. Als er reeds kristallisatiekernen aanwezig zijn, is de benodigde oververzadiging kleiner dan bij afwezigheid van kristallisatiekernen waar eerst nucleatie uit de oplossing moet optreden.
De vloeistof die na de kristallisatie overblijft wordt *moederloog* genoemd.

De groeisnelheid van de kristallen hangt af van:
– de mate van oververzadiging (drijvende kracht);

- de grootte van het contactoppervlak tussen kristal en moederloog;
- de specifieke stoftransportsnelheid naar het deeltje uit de moederloog;
- de afvoer van de kristallisatiewarmte van het deeltje naar de moederloog.



Figuur 3.11 Temperatuur/concentratie-diagram



Figuur 3.12 Oplosbaarheid van enkele vaste stoffen in water als functie van de temperatuur

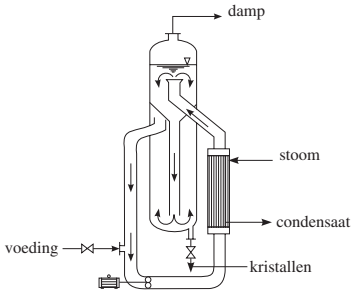
Met behulp van kristallisatie uit een oplossing kunnen de volgende stoffen in zuivere vorm worden gewonnen:
- NaCl;
- $Na_2CO_3 \times 10\ H_2O$;
- $Na_2SO_4 \times 5\ H_2O$;
- $Na_2HPO_4 \times 12\ H_2O$;
- Na_2PO_4
- KCl;
- $KHCO_3$;
- suiker;
- $MgSO_4 \times 7\ H_2O$;
- $CuSO_4 \times 5\ H_2O$;
- $BaSO_4$;
- $PbSO_4$;
- enz.

Classificatie van kristallisatoren

Kristallisatoren kunnen worden onderscheiden naar de manier waarop oververzadiging van de oplossing wordt bereikt (zie ook hierna):
- *Verdamper-kristallisator:* oververzadiging door verdamping van het oplosmiddel bij constante temperatuur.
- *Koel-kristallisator:* oververzadiging door indirecte koeling via een wand met behulp van een koelmiddel.
- *Vacuüm-kristallisator:* oververzadiging door directe koeling via verdamping onder vacuüm.
- *Precipitatie-kristallisator:* oververzadiging door toevoeging van andere stoffen.

Verdamper-kristallisator

De concentratie van de oplossing wordt door *verdamping* van het oplosmiddel verhoogd, waarbij nucleatie en kristalgroei optreedt. De kristallen worden afgescheiden (bezinken, filtreren, cycloneren) en gewassen. Deze methode wordt vooral toegepast voor grote capaciteiten (honderden tonnen per dag) en voor stoffen waarvan de oplosbaarheid geen sterke afhankelijkheid van de temperatuur vertoont (bijv. NaCl). Bij de apparaten wordt onderscheid gemaakt tussen apparaten met geforceerde circulatie (figuur 3.13) en met natuurlijke circulatie.

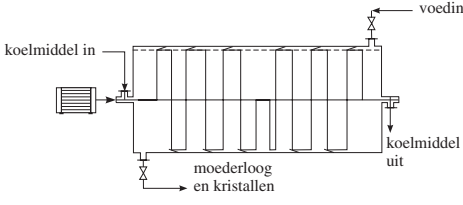


Figuur 3.13 Verdamperkristallisator met geforceerde circulatie

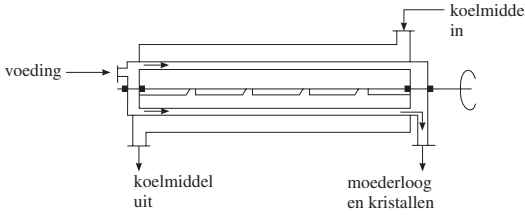
Koel-kristallisator

De oververzadiging wordt hier via *koeling* van de oplossing bereikt (bijv. KNO_3). Bij de apparaten onderscheidt men:

- *Apparaten zonder aankorsting van de wand*: hier mag het temperatuurverschil tussen oplossing en koelmiddel niet meer dan 2,5°C bedragen. Dit betekent dat zeer grote koelopper-vlakken nodig zijn (figuur 3.14).
- *Apparaten met kristalneerslag op de wanden*: hier mag het temperatuurverschil tussen oplossing en koelmiddel 10 tot 15°C bedragen. Deze apparaten moeten echter wel altijd met een schraapinrichting zijn uitgerust om de gevormde kristallen van de koelwand te verwijderen. De productiecapaciteit is hier betrekkelijk klein; de maximale warmtestroom per apparaat is ca. 50 kW (figuur 3.15).



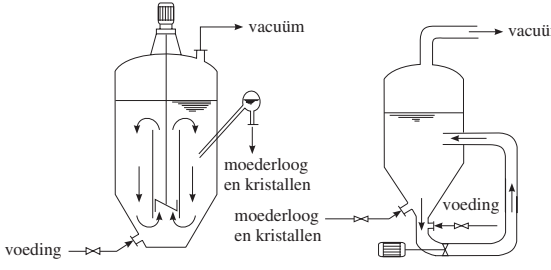
Figuur 3.14 Koel-kristallisator met roterende koelelementen



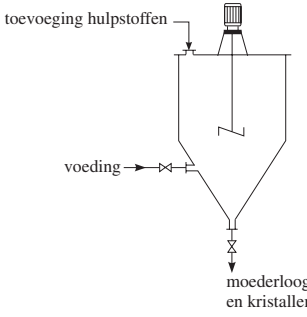
Figuur 3.15 Koel-kristallisator met roterende schraper langs de koelwand

Vacuüm-kristallisator

De oververzadiging wordt hier bereikt via twee mechanismen: via verdamping van het oplosmiddel *en* de daarmee gepaard gaande temperatuurverlaging. Ook kan alleen afkoeling worden bereikt door het laten verdampen van een laag-kokende component die bij de oplossing werd gemengd. De productiecapaciteit van deze apparaten kan zeer laag tot zeer hoog zijn. Zij zijn gecompliceerder en vergen hogere investeringen dan de indirecte koel-kristallisator. Zie figuur 3.16.



Figuur 3.16 Vacuüm-kristallisator met interne en extern geforceerde circulatie



Figuur 3.17 Precipitatie-kristallisator

Precipitatie-kristallisator
In bepaalde gevallen kan oververzadiging van de oplossing worden bereikt door toevoeging van andere stoffen. Hierdoor wordt de oplosbaarheid van de uit te kristalliseren stof verlaagd (bijv. bij de productie van $PbSO_4$ en $BaSO_4$). Dit proces noemt men *precipitatie-kristallisatie* (figuur 3.17).

4 Verblijftijdspreiding

Het goed functioneren van een apparaat wordt door *verblijftijd-spreiding* nadelig beïnvloed doordat:
- deeltjes zich aan een behandeling kunnen onttrekken (ingeval van een snellere doorloop); of
- onnodig lang (ingeval van vertraging) worden behandeld.

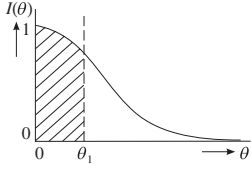
Is spreiding niet aan de orde dan spreekt men van *propstroom*.
Is τ de *gemiddelde verblijftijd* gedefinieerd als

$$\tau = \frac{\text{apparaatvolume}}{\text{volumedebiet}} = \frac{V}{q_v}$$ en t de *doorlooptijd* van een deeltije dan is $\theta = t/\tau$ de dimensieloze tijd.

4.1 Verblijftijdverdeling

De *I* functie (Internal-age-distribution)

Deze functie geeft de verdeling in het apparaat, waarbij de functie $I(\theta)$ is gegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1 Voorbeeld van een I-functie

Van $\theta = 0$ tot $\theta = \mathrm{d}\theta$ stroomt er een volume binnen, gelijk aan

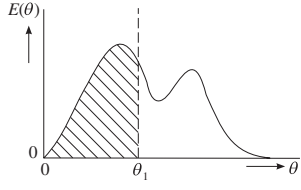
$$q_v \cdot \mathrm{d}t = \frac{V\mathrm{d}\theta}{q_v} \cdot q_v.$$

De volume fractie tussen $\theta = 0$ en $\theta = \mathrm{d}\theta$ is dan

$$I(\theta)\mathrm{d}\theta = \frac{q_v\left(\frac{V\mathrm{d}\theta}{q_v}\right)}{V} = \mathrm{d}\theta, \text{ dus } I(\theta) = 0.$$

De *E*-functie (Exit-age-distribution)

Deze functie geeft de verblijftijdverdeling aan de uitgang, waarbij $E(\theta)\ \mathrm{d}\theta$ de volumefractie is van het op $\theta = 0$ binnengekomen fluïdum; die een verblijftijd tussen θ en $\theta + \mathrm{d}\theta$ heeft doorstaan in het apparaat.



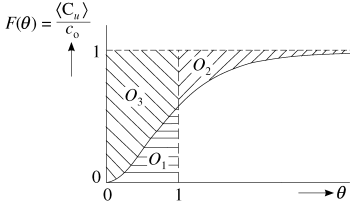
Figuur 4.2 Voorbeeld van een E-functie

De *F*-functie

Hierbij is $F(\theta_1)$ de volumefractie van de uitgaande stroom die korter dan θ_1 in het apparaat verbleef en dus gelijk is aan

$$\int_0^{\theta_1} E(\theta)\mathrm{d}\theta \qquad \text{Nu is bovendien } F(\theta) = 1 - I(\theta), \text{ dus}$$

$$F = 1 - I = \int_0^{\theta} E(\theta)\mathrm{d}\theta \text{ en } E = \frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}\theta} = \frac{-\mathrm{d}I}{\mathrm{d}\theta}$$



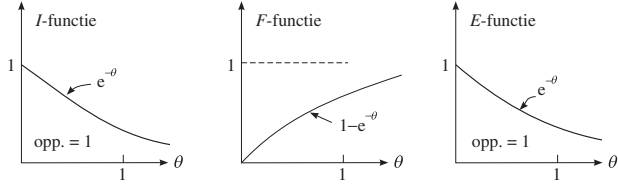
Figuur 4.3 Voorbeeld van een F-functie en grafische controle daarvan: $O_1 = O_2$

4.2 Voorbeelden

Perfecte menging

Hiervoor geldt de massabalans:

$$V \cdot \frac{\mathrm{d}c_0}{\mathrm{d}t} = q_v(c_i - c_0) \text{ dus } F = 1 - \frac{c_0}{c_i} = 1 - \mathrm{e}^{-t/\tau} = 1 - \mathrm{e}^{-\theta}$$



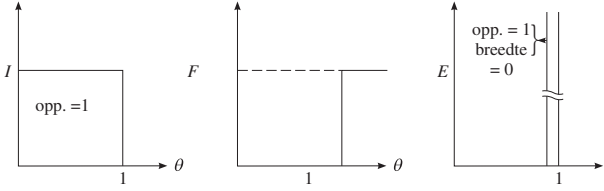
Figuur 4.4 I-, F-, en E-functie bij perfecte menging

Propstroming

Hierbij is de verblijftijd gelijk aan de gemiddelde verblijftijd zodat:

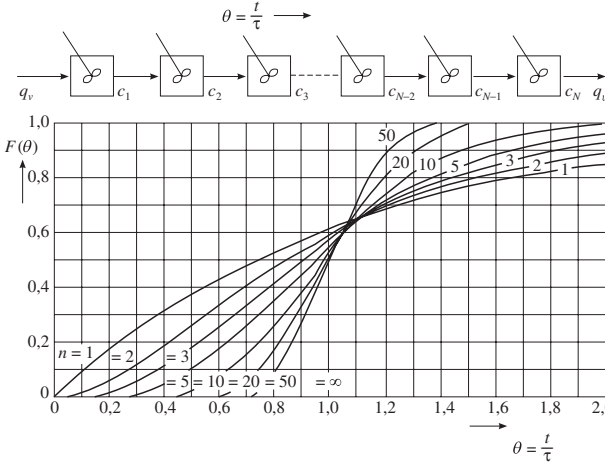
$F = 0 \qquad 0 \leqq \theta < 1$

$F = 1 \qquad \theta \geqq 1$



Figuur 4.5 I-, F-, en E-functie bij propstroming

Serie van perfecte mengers



Figuur 4.6 Serie van perfecte mengers met volume V

$$F(\theta) = 1 - \mathrm{e}^{-N\theta} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(N\theta)^{\mathrm{k}}}{k!}$$

Door differentiatie krijgt men:

$$E(\theta) = N^{\mathrm{N}} \mathrm{e}^{-\mathrm{N}\theta} \left(\frac{\theta^{\mathrm{N}-1}}{(N-1)!} \right) \text{ en } \sigma^2 = \frac{1}{N}$$

Propstroom met axiale menging

Een maat voor de menging in de buis is het *getal van Peclet*:

$$Pé = \frac{convectief\ \ transportcomponent\ A}{dispersief\ \ transportcomponent\ A} \cong$$

$$\cong \frac{\langle V_{\mathrm{x}} \rangle \cdot C_{\mathrm{A}}}{\mathbb{D}_{\mathrm{E}} \left(\frac{C_{\mathrm{A}}}{L} \right)} = \frac{\langle V_{\mathrm{x}} \rangle \cdot L}{\mathbb{D}_{\mathrm{E}}},$$

waarin: $\mathbb{D}_{\mathrm{E}} =$ dispersiecoëfficiënt in stromingsrichting volgt uit massabalans in x-richting:

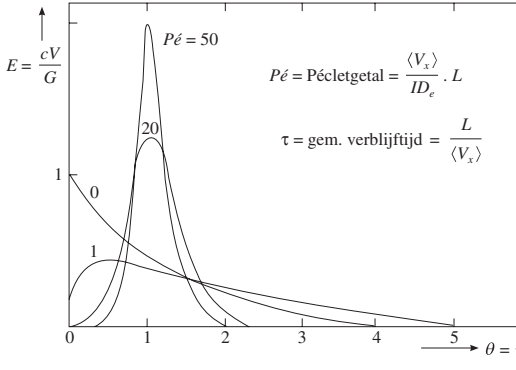
$$\frac{\delta C_A}{\delta t} + \langle V_x \rangle \frac{\delta C_A}{\delta x} = \mathbb{D}_E \frac{\delta^2 C_A}{\delta x^2}$$

$\langle V_{\mathrm{x}} \rangle =$ gemiddelde snelheid over de buisdoorsnede [m/s]

Het concentratieverloop met de tijd is weergegeven in figuur 4.7. Uitgezet is VC_A/G waarin $V =$ referentievolume en $G =$ totale hoeveelheid tracer.

De relatie tussen de standaardafwijking σ en de gemiddelde verblijftijd τ luidt hier:

$$\left(\frac{\sigma}{\tau} \right)^2 = \frac{2}{Pé^2} \{ Pé - 1 + \exp(-Pé) \}$$



Figuur 4.7 Concentratieverloop

Definieert men het aantal mengtrappen als $m' = \frac{Pé}{2}$ dan volgt

$$\left(\frac{\sigma}{\tau}\right)^2 = \frac{1}{2m'^2}\{2m' - 1 + \exp(-2m')\} = \frac{1}{N}.$$

Voor waarden van $m' > 5$ geldt:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^2 = m' + \tfrac{1}{2} = N$$

5 Chemische reactoren

In *chemische reactoren* vindt een stofomzetting–chemische reactie–plaats die gepaard gaat met de fysische verschijnselen impuls-, warmte- en stoftransport.

Reactoren kunnen als volgt worden ingedeeld:
- *Ladingsgewijs* werkende reactoren.
- *Continue doorstroomde* reactoren, die afhankelijk van de stromingstoestand (zie Verblijftijdspreiding) worden onderscheiden in:

- buisreactoren (ook propstroom-reactoren genoemd);
- perfect geroerde tankreactoren.

Voor alle reactoren geldt de wet van behoud van materie:

$$\begin{bmatrix}\text{Accumulatie}\\ \text{van component } i\\ \text{in de}\\ \text{reactor}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\text{Toegevoerde}\\ \text{massa van}\\ \text{component } i\\ \text{naar de reactor}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\text{afgevoerde}\\ \text{mass van}\\ \text{component } i\\ \text{uit de reactor}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\text{massa van}\\ \text{component } i\\ \text{gevormd in}\\ \text{de reactor}\end{bmatrix}$$

of weergegeven met symbolen:

$$V \cdot \frac{\mathrm{d}c_\mathrm{i}}{\mathrm{d}t} = \phi_\mathrm{v}(c_{\mathrm{i,\ in}} - c_{\mathrm{i,\ uit}}) + r_\mathrm{i} \cdot V$$

waarin: r_i = reactiesnelheid $\left[\dfrac{\text{hoeveelheid van } i \text{ gevormd}}{\text{reactorvolume} \cdot \text{seconde}}\right]$

V = reactorvolume [m^3]

ϕ_v = volumestroom [m^3/s]

Voor een eerste orde chemische reactie geldt:

$$r_\mathrm{i} = k \cdot c_\mathrm{i}\ [\mathrm{kmol}/(\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s})]$$

waarin: $k = k_0 \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{E/RT}}$ = eerste orde reactiesnelheidsconstante [s^{-1}]

E = activeringsenergie van de reactie [J/kmol]

R = gasconstante [J/(kmol · K)]

c_i = concentratie van component i [kmol/m^3]

T = absolute temperatuur [K]

N.B. De orde van een chemische reactie geeft de mate van afhankelijkheid aan van de chemische reactiesnelheid r ten opzichte van de concentratie c_i van één of meer reactanten. Dus $r_\mathrm{i} = k \cdot c_\mathrm{i}^2$ betekent 2e orde, enz. Ook gebroken machten zijn mogelijk; de dimensie van k dient dus te worden aangepast aan de orde van de reactie.

5.1 Reactoren

Ladingsgewijs werkende isotherme reactoren

Voor een ladingsgewijs werkende reactor is, na belading geen toevoer of afvoer. Met andere woorden $\phi_\mathrm{v} = 0$.

Voor de chemische reactie $A \rightarrow P$, eerste orde in A, geldt voor de omzetting van A:

$$-\frac{dC_A}{dt} = r_A = k \cdot C_A$$

Integratie geeft: $C_A = C_{A_o} \cdot e^{-kt}$
met C_{A_o} als beginconcentratie van A op $t = 0$.
De omzettingsgraad of conversie wordt bij gelijkblijvende dichtheid van het reactiemengsel als volgt gedefinieerd:

$$Z_A = \frac{C_{A_o} - C_A}{C_{A_o}}$$

De conversie in *ladingsgewijs werkende reactoren* is dus:

$$Z_A = 1 - e^{-kt}$$

De reactietijd voor een isotherme reactie bij constant volume is gegeven door:

$$t = \frac{1}{k}\int_0^{-Z_i} \frac{dZ_i}{1 - Z_i}$$

De totale tijd bestaat uit de reactietijd plus de tijd, nodig voor vullen, ledigen en eventueel schoonmaken van de reactor.

Doorstroomde reactoren

De conversie in een ideale *buisreactor* is:

$$Z_A = 1 - e^{-k \cdot \tau}$$

waarin: $\tau = V_R/\phi_v$ = gemidelde verblijftijd in de reactor [s]
ϕ_v = volumestroom door de reactor [m/s]
V_R = volume reactor [m^3]

De conversie in een *perfect gemengde tankreactor* is:

$$Z_A = \frac{k \cdot \tau}{1 + k \cdot \tau}$$

waarin: τ = gemiddelde verblijftijd in de reactor [s]

In een aantal in serie geschakelde tankreactoren van gelijke grootte geldt voor de conversie:

$$Z_{AN} = 1 - \left(1 + \frac{k \cdot \bar{\tau}}{N}\right)^{-N}$$

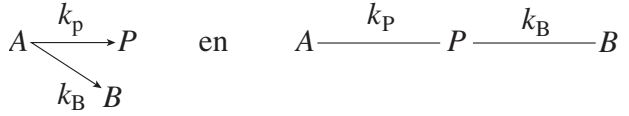
waarin: $\bar{\tau}$ = $N \cdot \tau$ = totale verblijftijd in de reactoren
τ = verblijftijd in één reactor
N = aantal reactoren in serie geschakeld

Voor $N \to \infty$ wordt $Z_{AN} = 1 - e^{-k\bar{\tau}}$, dus gelijk aan de conversie in een buisreactor met even lange verblijftijd.

Voor industriële reactoren ligt de verblijftijd tussen ca. 1 en 1000 seconden, hoewel ook enkele zeer korte en zeer lange verblijftijden bekend zijn. Voor lange verblijftijden worden vooral tank-reactoren en in serie geschakelde tankreactoren toegepast.

5.2 Selectiviteit en opbrengst

Veel voorkomende typen reacties zijn de parallel-reacties en de volgreacties:



waarin: A = grondstoffen
P = gewenst product
B = bijproduct, van relatief weinig waarde of zelfs van negatieve waarde
k = respectievelijke reactiesnelheidsconstante

Selectiviteit: $S_P = \dfrac{C_P}{C_P + C_B}$; Opbrengst: $O_P = \dfrac{C_P}{C_{A_0}}$

Opbrengst = conversie × selectiviteit

In isotherme reactoren geldt voor 1e orde reacties:

Parallel-reacties
Perfect gemengde tankreactor:

$$S_P = \frac{k_p}{k_p + k_B}, \quad O_p = \frac{k_p \cdot \tau}{1 + (k_p + k_B) \cdot \tau}$$

Buisreactor:

$$S_P = \frac{k_p}{k_p + k_B}; \quad O_p = \frac{k_p}{k_p + k_B}(1 - e^{-(k_p + k_B)\tau})$$

Volg-reacties
Perfect gemengde tankreactor:

$$S_P = \frac{1}{1 + k_B \cdot \tau}; \quad O_p = \frac{k_p \cdot \tau}{(1 + k_p \cdot \tau)(1 + k_B \cdot \tau)}$$

Buisreactor:

$$S_P = \frac{k_p(e^{-k_B \cdot \tau} - e^{-k_p \cdot \tau})}{(k_p - k_B)(1 - e)^{-k_p \cdot \tau}}; \quad O_p = \frac{k_p}{k_p - k_B}(e^{-k_B \cdot \tau} - e^{-k_p \cdot \tau})$$

6 Procestechnisch tekenen

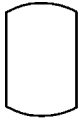
In een processchema wordt de apparatuur door symbolen voorgesteld.
De volgende lijst is een verzameling van veel in de literatuur gebruikte symbolen voor de meest gangbare apparaten (volgens ISO 10628: 1997). Weinig voorkomende of gecompliceerde apparatuur kan worden weergegeven door een rechthoek met bijschrift of aanduiding die onderaan het schema verklaard wordt. In processchema's worden ook symbolen gebruikt van het Nederlands Normalisatie Instituut. Zie daarvoor NEN 3157:1985 nl. *Technische tekeningen: Symbolen voor de meet- en regel-techniek. Basissymbolen voor de procesinstrumenten*.
In par. 6.2 worden twee voorbeelden gegeven van processchema's, waarbij NEN symbolen zijn gebruikt.

De gebruikte afkortingen zijn:
G = gas, L = vloeistof, S = vaste stof, WW = warmtewisselaar, H.D. = hoge druk, L.D. = lage druk.

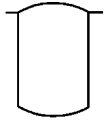
6.1 Symbolen

vat, algemeen

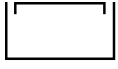
basin, algemeen



vat met bolle bodem

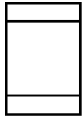


vat met bolle opslag



tank met drijvend dak

Vaten en tanks

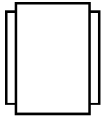


kolom, algemeen
vat met binnenkant, algemeen

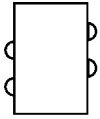
gepakte kolom met twee bedden

Faciliteiten voor verwarming en koeling

faciliteit voor
verhitten/koelen, algemeen



gemanteld vat

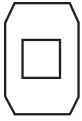


vat met semi-tube coil

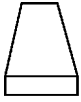
Warmtewisselaars en fornuizen

warmtewisselaar, algemeen

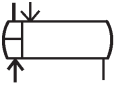
warmtewisselaar, algemeen



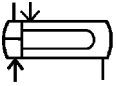
industriefornuis, algemeen



koeltoren, algemeen



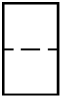
pijpen warmtewisselaar



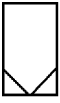
pijpen warmtewisselaar met U-bundel

spiraal warmtewisselaar

Filters

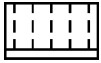


filter, algemeen
Filter toerusting, algemeen



gasfilter, algemeen
luchtfilter, algemeen

vloeistoffilter, algemeen



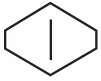
filterpers

roterend drumfilter

actief koolfilter

Scheiden, sorteren en zeven

zeefapparaat, algemeen
schraper, algemeen



scheider, algemeen

sorteerder, algemeen

afscheider, algemeen
centrifuge, algemeen

centrifuge, algemeen

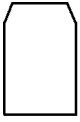
electromagnetische scheider

venturi scrubber

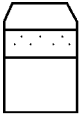
elektrostatische stoffilter

centrifugale scheider

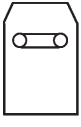
Drogers



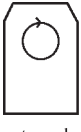
droger, algemeen



fluid bed droger



banddroger



roterende drumdroger

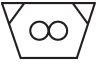
Molens en plethamers

plethamer, algemeen

plethamer, algemeen

molen, algemeen

hamermolen



rolmolen

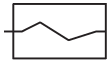
Mengers, kneders en mixers

menger, algemeen

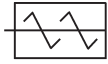
anker menger

propeller menger

turbine menger



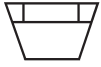
mixer, algemeen



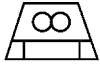
kneder, algemeen

statische mixer

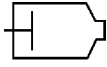
Procesmachines



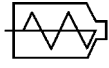
procesmachine, algemeen



rolpers



extruder



schroef extruder

Pompen

pomp, algemeen

centrifugaal pomp

zuigerpomp

positive displacement pomp

vloeistofstraal pomp

Opm.: De pijl geeft de richting van de stroom aan.

Compressoren, vacuümpompen en ventilatoren

compressor, algemeen
vacuümpomp, algemeen

zuigercompressor
zuiger-vacuümpomp

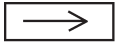
turbocompressor
turbo-vacuümpomp

vloeistof ring pomp

ventilator, algemeen

Opm.: Het smalste gedeelte geeft de richting van de stroom aan.

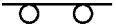
Transport



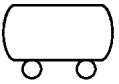
transportinrichting, algemeen

transportband, algemeen

emmerladder



vrachtwagen (algemeen)

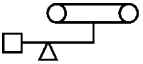


tankauto

schip

Wegen

weegschaal, algemeen



weegband

Distributie

verdeelapparaat voor
vaste stoffen, algemeen

verdeelapparaat voor vloeistoffen
sproeistuk

Aandrijving

aandrijving, algemeen

Kleppen

klep, algemeen

hoekklep, algemeen

driewegklep, algemeen

controleklep, algemeen

controleklep, voortdurend in werking

veiligheidsklep[1)]

vlamkering

vlamkering

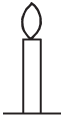
luchtklep (breather valve)

[1)] De vette lijn geeft de uitlaatkant aan

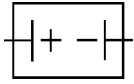
Diversen

bulkopslag

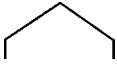
schoorsteen



gasvlam

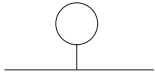


elektrolyse cel, algemeen



kap

Meet- en regelapparatuur



Meet-en/of regelinstrument

Uitgangssignaal van regelinstrument

Letters in de cirkel geven de aard van het instrument aan. In overeenstemming met 'British Standard' BS 1646 gelden de volgende regels:

1e letter: de te meten grootheid
- T = temperatuur
- P = druk (pressure)
- L = niveau (level)
- F = hoeveelheid (flow)
- DP = drukverschil (differential pressure)
- DT = temperatuurverschil (differential temperature)
- D = dichtheid (density)
- S = toerental (speed)
- A = analyse

2e letter: registrerend, aanwijzend of blind instrument
- R = schrijvend (recording)
- I = aanwijzend (indicating)
- geen = blind

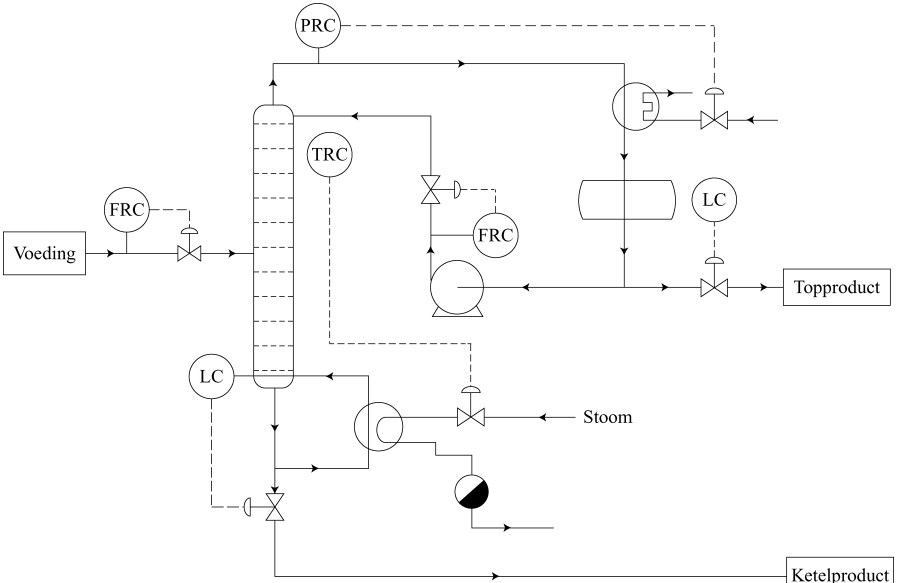
3e letter: C = regelaar (controller)
- T = omzetter (transmitter)
- A = controle (alarm)
- S = schakelaar (switch)

Voorbeeld:

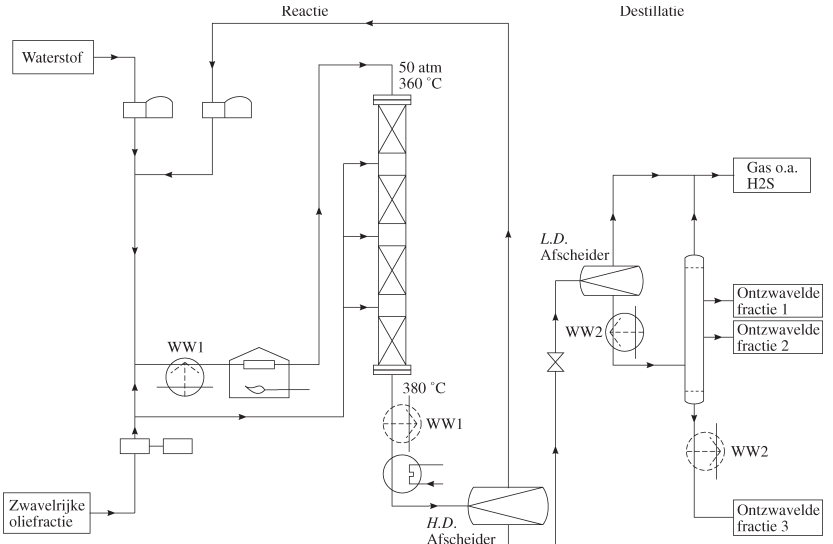
= temperature recording controller = instrument dat de temperatuur registreert en regelt.

6.2 Voorbeelden van processchema's

Zie figuur 6.1 en 6.2 hierna.



Figuur 6.1 Schema destillatietoren



Figuur 6.2 Ontzwavelen volgens het 'shell trickle' proces

Literatuur

- Coulson, J.M., J.F. Richardson
  Chemical engineering
  Oxford, Pergamon Press.
- Gmehling, J., U. Onken, W. Arlt
  Vapor-liquid equilibrium data collection
  Frankfurt/Main, Schön & Weitzel.
- Perry, R.H., C.H. Chilton
  Chemical engineer's handbook
  McGraw-Hill book Company.
- *Symbolen voor het weergeven van apparatuur in processchema's*
  Oorspronkelijke uitgave T.H. Delft
  Gewijzigde uitgave T.H. Twenthe.
- *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*
  Weinheim/Bergstr., Verlag Chemie.

Milieu en veiligheid K

1 Milieu
- 1.1 Algemeen
- 1.2 Afvalstoffen
- 1.3 Bodemverontreiniging
- 1.4 Geluid- en trillinghinder
- 1.5 Luchtverontreiniging
- 1.6 Oppervlaktewater/waterbodem
- 1.7 Afvoer van afvalwater via de riolering
- 1.8 Zuivering afvalwater
- 1.9 Milieu-effectrapportage (m.e.r.)
- 1.10 Milieuzorg

2 Veiligheid
- 2.1 Instellingen op het gebied van interne veiligheid
- 2.2 Brand- en explosiegevaarlijke stoffen
- 2.3 Giftigheid van stoffen (MAC-waarden)
- 2.4 Gevarensymbolen
- 2.5 Externe veiligheid

1 Milieu

1.1 Algemeen

Milieu is de omgeving van de mens, waarmee deze in een wederkerige relatie staat. Daarbij kan een onderscheid worden gemaakt tussen:
- *Intern milieu*: het milieu *binnen* de grenzen van een technische activiteit of gebouw.
- *Extern milieu*: het milieu *buiten* de grenzen van een technische activiteit of gebouw.

Enkele begrippen:
- *Bedrijfshygiëne*: zorg voor hygiëne in intern milieu.
- *Milieuhygiëne*: zorg voor hygiëne in extern milieu.
- *Arbeidsveiligheid*: zorg voor veiligheid in intern milieu.
- *Externe veiligheid*: zorg voor veiligheid in extern milieu.
- *Hygiëne*: betreft de gevolgen van lage intensiteiten (concentraties, druk, enz.) bij langdurige of frequente blootstelling.
- *Veiligheid*: betreft hoge intensiteiten bij korte belastingduur.
- *Duurzame ontwikkeling*: voorziet in de behoeften van de huidige generatie zonder daarmee voor de toekomstige generaties de mogelijkheden in gevaar te brengen om ook in hun behoeften te voorzien.

Om verdere milieuaantasting te voorkomen wordt door de overheid een vier-sporenbeleid gevoerd:
- Effectgerichte maatregelen } bestrijding aan de bron
- Emissiegerichte maatregelen }
- Volumegerichte maatregelen } verandering hoeveelheid
- Procesgeintegreerde maatregelen }

Het Derde *Nationaal Milieubeleidsplan* (NMP3) bevat de strategie voor het milieubeleid op rijksniveau voor de periode van 1999 tot 2003, met een doorkijk naar de jaren daarna. De strategie richt zich op het bereiken van een duurzame ontwikkeling. Het NMP3 is een vervolg op het milieubeleid in het NMP1 en NMP2. In het NMP3 is aangegeven op welke punten het kabinet het milieubeleid zal wijzigen. Het NMP3 vervangt het NMP1 en NMP2.
Ter realisatie van het milieubeleid zijn de milieuproblemen gebaseerd op een indeling volgens Negen thema's (klimaatverandering,

verzuring, vermesting, verspreiding, verontreiniging van de bodem verwijdering, verstoring, verdroging, verspilling). Voor elk van deze thema's is aangegeven welke doelen in de toekomst gerealiseerd moeten worden. De doelstellingen geven overheden en doelgroepen (landbouw, industrie, detailhandel, raffinaderijen, energiebedrijven, verkeer en vervoer, consumenten, bouw, afvalverwijderingsbedrijven, actoren in de waterketen) enig houvast bij de uitvoering van het milieubeleid. Naast doelgroepen en milieuthema's is het gebiedenbeleid het derde integratiekader van het milieubeleid. Met het gebiedenbeleid kan ingespeeld worden op lokale en regionale verschillen.

1.2 Afvalstoffen

Afval wordt in het algemeen gekenmerkt als materiaal dat voor de bezitter ervan geen waarde meer heeft.

Verwerking van afvalstoffen

Het *beleid* ten aanzien van de verwerking van afvalstoffen is uitgewerkt in de Nationale Milieubeleidsplannen (NMP3, etc.). De basis van het beleid is de volgende prioriteitsvolgorde voor het omgaan met afvalstoffen:

- preventie.
- hergebruik.
- nuttige toepassing.
- verbranden.
- storten.

De landelijke *planning* van de voor de verwerking van afvalstoffen benodigde capaciteiten gebeurt door het *Afvaloverlegorgaan* (AOO). Het AOO heeft inmiddels het tweede Tienjarenprogramma Afval (1995–2005) uitgebracht, met bijbehorende wijzigingen waarin actualiseringen zijn opgenomen. Uitgangspunten bij de planning zijn:

- maximale bevordering van preventie en hergebruik.
- drastische vermindering van het storten van afval.
- krappe programmering verbrandingscapaciteit.
- bevorderen van de flexibiliteit van de verwijderingsstructuur.
- landelijk afstemmen van regionale zelfvoorziening.

Specifiek beleid voor de verwerking van *gevaarlijk afval* is opgenomen in het Meerjarenplan verwijdering gevaarlijke afvalstoffen.

Momenteel is het Landelijk Afvalbeheersplan (LAP) in voorbereiding. Dit LAP zal te zijner tijd zowel het 10 jaren scenario van het AOO als het MJP-GA vervangen. Tabel 1.1 en 1.2 bevatten gegevens over de samenstelling van afvalstromen. Tabel 1.3 geeft gegevens over de hoeveelheden en de bewerking en verwerking van afvalstoffen, alsmede gegevens over de toekomstige ontwikkelingen in het afvalaanbod en de verwijderingswijze. Tabel 1.4 bevat gegevens over hoeveelheden en de verwerkingswijze van gevaarlijke afvalstromen.

Juridisch kader

Figuur 1.1 schets de mogelijkheden van verwijdering van reststoffen en de juridische raakvlakken; figuur 1.2 gaat meer Specifiek in op de relatie tussen de wetten die van toepassing zijn op de verwijdering van afvalstoffen. De wetgeving geeft randvoorwaarden waaraan inzameling, opslag, bewerking, verwerking, nuttige toepassing, hergebruik, storten en verbranden van afvalstoffen dienen te voldoen. Handhaving vindt plaats door het bevoegd gezag.

Tabel 1.1 Gemiddelde samenstelling huishoudelijk afval in 1996 (in gewichts % t.o.v. totaal)

componenten	gemiddeld % t.o.v. totaal	% droge stof
GFT en ongedef. rest	30.7	46
papier/karton	34.9	67
kunststoffen	11.0	78
glas	4.7	99
ferro	3.8	93
non-ferro	0.7	83
textiel	3.1	82
brood	2.2	69
dierlijk afval	1.7	49
keramiek	2.7	97
tapijten/matten	0.4	97
leer/rubber	1.1	91
hout	2.2	90
bijzonder afval/KCA	0.9	86
totaal huishoudelijk afval	100.0	65
gemiddeld aanbod huishoudelijk afval(kg/aansluiting/week)	12.5	

Bron. Fysisch onderzoek naar de samenstelling van het Nederlandse huishoudelijk afval, resultaat 1996

Tabel 1.2 Samenstelling afvalstoffen in 1990 [kton]

materiaal	HHA	GHA	KWDA	ZHA	INDA	BSA	SA	RDA	totaal
papier/karton	1150	25	575	40	365	25	5	45	2230
hout	40	130	60	–	240	220	5	10	705
kunststoffen	370	60	180	30	165	35	30	20	890
ferro	140	65	60	5	30	35	25	18	378
non-ferro	30	5	10	–	5	15	5	2	72
glas	260	10	75	5	15	50	20	10	445
steenachtig	60	70	30	–	340	2100	–	90	2690
GFT	2170	120	375	35	550	–	–	525	3775
div. brandbaar	300	45	70	5	200	20	30	–	670
div. niet brandbaar	160	10	45	–	900	1000	–	400	2515
totaal	4680	540	1480	120	2810	3500	120	1120	14370

HHA = huishoudelijk afval
GHA = grof huishoudelijk afval
KWDA = kantoor-, winkel- en dienstenafval
ZHA = ziekenhuisafval
INDA = industrieel afval
BSA = bouw- en sloopafval
SA = shredderafval
RDA = reinigingsdienstenafval
GFT = groente-, fruit- en tuinafvla

Bron. Studie naar de invloed van materiaalhergebruik en preventie op aanvraag en samenstelling van inzamelstromen uitgaande van milieubeleid (SIMPOSIUM), bureau B&G, december 1991.

Tabel 1.3 Raming milieubelasting van het thema verwijdering (afval, exclusief baggerspecie, mestoverschotten en radioactief afval)

categorie	potentieel aanbod	preventie	hergebruik[1)]	verbranden	storten	lozen
	miljard kg					
1990						
huishoudelijk afval	5490	–	900	1700	2900	–
grof huisafval	700	–	90	230	380	–
KWD-afval[2)]	3030	–	720	540	1770	–
zuiveringsslib	3740	–	2830	80	830	–
autowrakken en -banden	580	–	410	–	170	–
veegafval, etc.[3)]	1310	–	190	210	920	–
bouw- en sloopafval	12390	–	8740	150	3510	–
agrarisch afval	2040	–	1210	50	780	–
verontreinigde grond	1380	–	490	–	890	
reststoffen kolencentrales	1270	–	1130	–	140	–
straalgrit	130	–	10	–	80	40
scheepvaartafval	1280	–	1050	10	–	220
fosforzuurgips	2300	–	–	–	100	2200
jarosiet	220	–	–	–	220	–
(overig) industrie-afval[4)]	15930	120	11660	250	3890	–
(overig) meldingen WCA[5)]	650	–	260	230	150	10
totaal	52430	120	29670	3440	16730	2470
2000 ER (European Renaissance scenario: hoge economische groei)						
huishoudelijk afval	6320	630	2390	2500	800	–
grof huisafval	1020	90	220	510	200	–
KWD-afval[2)]	3560	470	1280	1310	500	–
zuiveringsslib	2400	–	520	620	1260	–
autowrakken en -banden	560	–	480	70	–	–
veegafval, etc.[3)]	1410	170	310	340	590	–
bouw- en sloopafval	13630	200	12080	130	1210	–
agrarisch afval	2400	390	1950	60	–	–
verontreinigde grond	3400	–	2380	–	1020	–
reststoffen kolencentrales	870	–	870	–	–	
straalgrit	140	60	30	–	40	10
scheepvaartafval	1550	410	950	–	–	180
fosforzuurgips	2050	–	–	–	–	2050
jarosiet	–	–	–	–	–	–
(overig) industrie- afval[4)]	16020	1550	13190	580	700	–
(overig) meldingen WCA[5)]	710	130	270	180	130	–
totaal	56010	4100	36920	6300	6460	2240
2000 GS (Global Shift scenario: lage economische groei)						
huishoudelijk afval	6150	400	2060	2690	1000	–
grof huisafval	780	60	170	410	150	–
KWD-afval[2)]	3230	430	950	1250	600	–
zuiveringsslib	2410	–	520	620	1270	–
autowrakken en -banden	530	–	440	90	–	–
veegafval, etc.[3)]	1410	170	310	340	600	–
bouw- en sloopafval	12210	120	10880	100	1110	–
agrarisch afval	2390	390	1950	60	–	–
verontreinigde grond	3400	–	2380	–	1020	–
reststoffen kolencentrales	800	–	800	–	–	–
straalgrit	130	50	30	–	40	10
scheepvaartafval	1440	390	880	–	–	170
fosforzuurgips	1910	–	–	–	–	1910
jarosiet	–	–	–	–	–	–
(overig) industrie-afval[4)]	15610	1260	13100	580	670	–
(overig) meldingen WCA[5)]	660	120	260	170	120	–
totaal	53070	3380	34730	6300	6570	2090

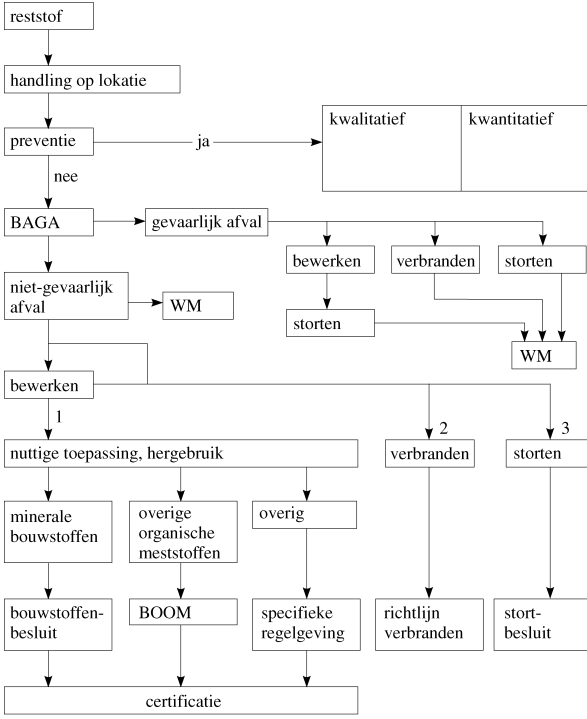
1) Inclusief nuttige toepassing en reinigen.
2) Kantoor-, winkel- en dienstenafval (inclusief ziekenhuis- en verilingafval).
3) Veeg-, markt-, plantsoen-, drijf-, kolken- en rioolafval.
4) Inclusief afval openbare nutsbedrijven, afval delfstoffenwinning en oxykalkslik
5) Afval volgens het BAGA, inclusief afgewerkte olie.

Bron. Nationale Milieuverkenning 3, 1993–2015, RIVM, 1993.

Tabel 1.4 Afvalproductie en verwijderwijze van een aantal categorieën gevaarlijk afval [Kton]

	aanbod	(gemeld)	overig	hergebruik	verbranden	storten
halogeen koolwaterstofhoudend afval	18,1	18,1	0,1	6	10,4	1,6
halogeen arme oplosmiddelen	35,5	35,5		10	25,5	
fotografische afvalstoffen	16,4	16,4	8,1	8	0,4	
zuren en basen	47	47	19,3	25,4	2,3	
afgewerkte olie	66,6	64,9		66,6		
oliehoudende sludges	137	133		7	130	
oliefilters	3,8	2,3		2,1	1,7	
accu's	23	17,4		23		
batterijen	4	1,9	1,6	0,8		1,6
ziekenhuisafval	8,8	5,4			8,8	
overige organisch gevaarlijk afval:						
C-1 afval	0,72	0,69				0,7
C-2 afval (incl. vlieggas AVI's)	116	111		22	1,2	92,8
C-3 afval (excl. zeefzand en grond)	165	165		19,8	1,7	143,6
zwafelhoudend afval	13	13	9,1	3,9		
gasontladingslampen	3	1,6		1,7	1,3	
totaal	657,92		38,2	196,3	183,3	240,3
totaal (gemeld)		633,19	28,2	191	178,7	234,8
Toevoegen?						
verontreinigde grond	2600	2600		754		1846
gebruikte chemicaliën verpakkingen	39	31,4		0,8	31,6	6,6
ferro en non-ferro	10,9	10,9		10,9		
verontreinigd staalgrid	80	13,5	53			27
te verbranden afvalstoffen	292	292			274.5	17,5
totaal *indien* toevoegen:	4337,74		157,6	1349,3	851,4	2612,5
totaal (gemeld)		4214,18	32,7	956,5	478,6	445,6

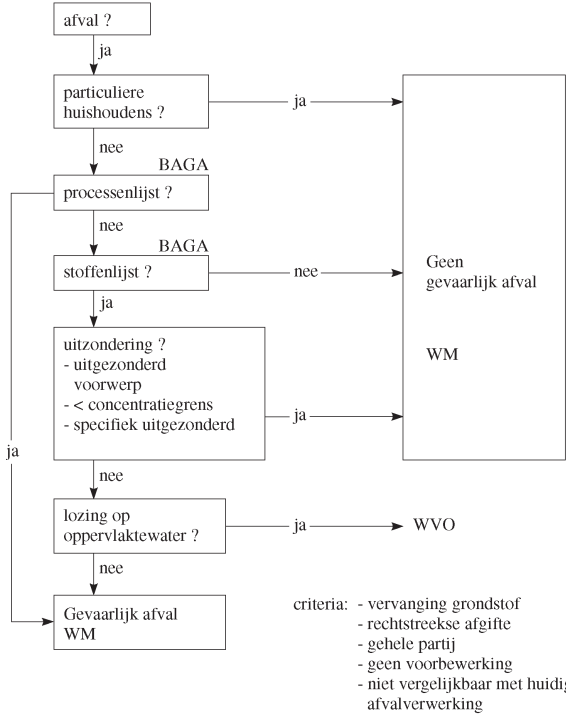
o.b.v. Meerjarenplan gevaarlijke afvalstoffen II
IPO/VROM, mei 1996



1, 2, 3: NMP-prioriteitsvolgorde

BAGA = Besluit aanwijzing gevaarlijke afvalstoffen
BOOM = Besluit kwaliteit en gebruik overige organische meststoffen
WM = Wet milieubeheer

Figuur 1.1 Mogelijkheden van verwijdering van reststoffen



BAGA = Besluit aanwijzing gevaarlijke afvalstoffen
WM = Wet milieubeheer
WVO = Wet verontreiniging oppervlakewateren

Figuur 1.2 Relatie tussen de wetgeving die van toepassing is op afvalstoffen

1.3 Bodemverontreiniging

Onder *bodem* verstaat men het door verwering en bodemvormende processen uit afzettingen en gesteenten ontstane bovenste deel van de aardkorst. *Verwering* heeft fysische, chemische en biologische oorzaken. De *bodemvormende processen* ontstaan door accumulatie van organische stoffen afkomstig van planten en dieren en in- en uitspoeling van chemische stoffen. De bodem bestaat uit grond (minerale en humeuze delen), bodemlucht en grondwater.

Bodemverontreiniging

Van *bodemverontreiniging* is sprake als er stoffen in hogere concentraties in de bodem worden aangetoond, dan ter plaatse op grond van natuurlijk voorkomen te verwachten is. Door bodemverontreiniging kunnen de functionele eigenschappen van de bodem teniet worden gedaan of ernstig worden verstoord. Er zijn twee bronnen van bodemverontreiniging te onderscheiden:

- *Lokale bronnen* die een geconcentreerde verontreiniging op een bepaalde oppervlakte bewerkstelligen, bijv. lekkende vaten, gestort afval.
- *Diffuse bronnen* die een verontreiniging over een grotere oppervlakte tot gevolg hebben, bijv. zure regen.

Bodemsanering

Als reactie op schandalen bij bodemverontreiniging ontwikkelde de overheid een noodwet: de *Interimwet bodemsanering* (IBS, 1983). De Interimwet is in 1994 als saneringsparagraaf opgenomen in de *Wet Bodembescherming* (WBB). Volgens de WBB is het criterium dat ‘functionele eigenschappen die de bodem voor mens, plant of dier heeft ernstig zijn of dreigen te worden verminderd’ maatstaf ter beantwoording van de vraag of sanering nood-zakelijk is. Bij deze beoordeling speelt een rol:

- de aard en de concentratie van stoffen (mate en effect);
- het bodemgebruik (blootstelling c.q. risico’s).

De *toetsingswaarden* zijn bij deze beoordeling een hulpmiddel (zie ook tabel 1.7 t/m 1.9). Deze waarden dienen in samenhang met het bodemgebruik beschouwd te worden bij het beoordelen van de urgentie van sanering.

Bij een sanering dient gestreefd te worden naar *multifunctionaliteit*. Er zijn lokatiespecifieke omstandigheden denkbaar waarbij multifunctionaliteit op korte of lange termijn niet altijd onverkort van toepassing kan zijn. In dat geval dient er sprake te zijn van isolatie en beheersing van de (rest)verontreiniging (bijvoorbeeld leeflaagsanering). Er zijn technische, milieuhygiënische en financiële lokatiespecifieke omstandigheden. De financiële lokatiespecifieke omstandigheden zijn door middel van verhoudingsfactoren afhankelijk gesteld van de geraamde kosten van het herstelalternatief. De formule ter bepaling van de verhoudingsfactoren luidt:

$$\text{Verhoudingsfactor} = 1 + 2^{(7-\log(\text{K}\cdot\{\text{multif.}\}))}$$

K {multif.} staatvoor de geraamde kosten van het herstelalternatief. Vervolgens wordt de berekende verhoudingsfactor vergeleken met de quotiënt van de geraamde kosten van enerzijds het herstelalternatief en anderzijds het IBC-alternatief.

$$\text{Quotiënt} = \frac{\text{K}\{\text{multif.}\}}{\text{K}\{\text{IBC}\}}$$

Hierbij staat K {IBC} voor de geraamde kosten van het IBC-alternatief. Indien het kostenquotiënt groter is dan de berekende verhoudingsfactor is er sprake van een ‘extreem kostenverschil’. Ter illustratie is in tabel 1.5 voor enkele fictief geraamde kosten van herstelalternatieven de bijbehorende verhoudingsfactor gegeven. Met behulp van deze verhoudingsfactor zijn vervolgens fictieve kosten van de IBC-alternatieven bepaald. Indien uit het saneringsonderzoek blijkt dat de geraamde kosten onder deze fictieve kosten blijven, is sprake van een ‘extreem kostenverschil’.

Tabel 1.5 Voorbeelden toepassing verhoudingsfactoren

kosten herstelalternatief	verhoudingsfactor	keuze IBC indien kosten IBC
€ 100.000.000,-	1,5	$<f$ 66.000.000,-
€ 10.000.000,-	2	$<f$ 5.000.000,-
€ 5.000.000,-	2,2	$<f$ 2.240.000,-
€ 1.000.000,-	3	$<f$ 333.000,-
€ 250.000,-	3,6	$<f$ 69.000,-
€ 100.000,-	5	$<f$ 20.000,-
€ 10.000,-	9	$<f$ 1.111,-

Het streven naar multifunctionaliteit wordt in het beleid vertaald door saneren tot de referentiewaarde of tot een lokale achtergrondconcentratie van een stof waaraan een niet verontreinigde bodem moet voldoen. Deze streefwaarde geldt in principe onafhankelijk van het gebruik van de bodem.
Met het in juni 1997 uitgebrachte kabinetsstandpunt over de vernieuwing van het bodemsaneringsbeleid is een koerswijziging ingezet voor de gevallen van verontreiniging die voor 1987 zijn ontstaan. Deze koerswijziging houdt in, dat als gevolg van een nieuwe saneringsaanpak door middel van functiegericht en kosteneffectief saneren, extra inzet van middelen door het rijk en door intensivering van particuliere investeringen, wordt gestreefd naar beheersing van de bodemverontreinigingsproblematiek in circa 25 jaar.

Zorgplicht

De op 1 januari 1987 in werking getreden WBB kent onder andere een *zorgplicht*: degene die bodembedreigende handelingen verricht is verplicht een bodemverontreiniging te verwijderen, die is ontstaan na het in werking treden van deze plicht.

Meldingsplicht sanering

De WBB bevat onder andere een meldingsplicht van het voornemen tot sanering. Het betreft hier naast ‘ernstige’ ook ‘lichtere’ gevallen van bodemverontreiniging. Bij deze melding moeten gegevens over onderzoek en een eventueel saneringsplan worden verstrekt. De provincie moet de beschreven eindsituatie acceptabel vinden anders

kan zij bij een ernstige verontreiniging een saneringsbevel opleggen c.q. zelf de eventuele verontreiniging laten saneren, gevolgd door verhaal van de kosten. Handelen in strijd met de meldingsplicht is strafbaar gesteld op grond van de *Wet economische delicten*.

Bouwstoffenbesluit

Het bouwstoffenbesluit (BB), dat op 1 januari 1999 geheel in werking is getreden, bevat regels voor de toepssing van bouwstoffen (steenachtige materialen) in een werk op het land en in oppervlaktewateren.
Het BB stelt regels aan de mate waarin secundaire grondstoffen het milieu mogen beïnvloeden. Er worden grenzen gesteld aan de samenstelling en immisie van bouwmaterialen in de bodem en het oppervlaktewater. Degene die het materiaal toepast, dient aan te tonen, dat aan de eisen wordt voldaan. Dat kan door gebruik te maken van een product met een certificaat of een andere kwaliteitsverklaring.
Voor toepassing van secundaire grondstoffen wordt in het BB een onderscheid gemaakt in zgn. *categorie-1* en *categorie-2* bouwstoffen. Categorie-1 bouwstoffen, waarvan de immissie in de bodem bij ongeïsoleerd gebruik slechts tot een marginale bodembelasting leidt, mogen op het land zonder isolatiemaatregelen worden toegepast. Andere bouwstoffen mogen slechts als categorie-2 bouwstof worden gebruikt in combinatie met isolatiemaatregelen. Voor het gebruik van categorie-1 materialen in oppervlaktewateren kan worden volstaan met een melding aan de waterkwaliteitsbeheerder, terwijl voor de toepassing van categorie-2 bouwstoffen een WVO-vergunning is vereist. De eisen die in het BB zijn opgenomen ten behoeve van de toepassing van bouwstoffen in oppervlak-tewateren zijn in grote lijnen opgenomen in tabel 1.6.

Tabel 1.6 Eisen bouwstofcategorieën oppervlaktewateren

schone grond	categorie-1 bouwstof	categorie-2 bouwstof
meldingsplicht	meldingsplicht terugneembaarheid verwijderingsvoorschriften minimumhoeveelheid (alleen voor grond)	vergunningsplicht terugneembaarheid verwijderingsvoorschriften min. en max. hoeveelheid IBC-voorschriften

Wet milieubeheer (WM)

In het algemeen mag een eigenaar of huurder van een WM-plichtige inrichting geen activiteiten uitvoeren die in strijd zijn met het belang van de bescherming van het milieu. In de WM worden derhalve eisen gesteld aan de activiteiten. Op basis hiervan kan een overheid eisen een verontreiniging die optreedt na het van kracht worden van een WM-vergunning te saneren. In het kader van de WM wordt dikwijls vastlegging van de *nulsituatie* met betrekking tot de bodemkwaliteit verlangd.

Bodemverontreiniging bedrijfsterreinen

Voor bodemverontreiniging op in gebruik zijnde *bedrijfsterreinen* is in 1989 door de Minister van VROM de *Commissie Bodemsanering in gebruik zijnde bedrijfsterreinen* (BSB) ofwel de *Commissie Oele* ingesteld. Taak van de Commissie was het opstellen van een strategisch plan voor vrijwillige bodemsanering door bedrijven van in gebruik zijnde bedrijfsterreinen. In dit kader is door de Commissie een systematiek ter beoordeling van gevallen van bodemverontreiniging opgesteld. Basis van deze systematiek is een risico-analyse. Door middel van deze risicoanalyse kan tevens de urgentie van aanpak van een geval van bodemverontreiniging worden nagegaan. De voorstellen hebben geleid tot de BSB-operatie.

In het strategisch plan worden scores vastgesteld op basis van risico's zowel voor de volksgezondheid en voor het milieu. Combinatie van beide scores leidt tot een *urgentiescore* van aanpak van het bodemverontreinigingsgeval. Mede afhankelijk van de kosten en lokatiespecifieke omstandigheden, dient een verontreiniging gesaneerd dan wel geïsoleerd en beheerst te worden. Thans wordt nagedacht over de vraag hoe de BSB-systematiek kan worden geïntegreerd met de urgentie-systematiek van de WBB.

STI-waarden

Tabel 1.7 is een praktisch hulpmiddel bij de beoordeling van bodemverontreiniging.

Tabel 1.7 Toetsingstabel STI-waarden

stoffen	in grond [mg/kg droge stof]						in grondwater [μg/l]		
	$S^{1)}$		$T^{2)}$		$I^{3)}$		$S^{1)}$	$T^{2)}$	$I^{3)}$
	<	>	<	>	<	>			
metalen									
arseen (As)	15		21,7		28,4		10	35	60
barium (Ba)	39		80		121		50	338	625
cadmium (Cd)	0,4		3,3		6,1		0,4	3,2	6,0
chroom (Cr)	50	4)	120	4)	190	4)	1	16	30
cobalt (Co)	4,4		28,7		53		20	600	100
koper (Cu)	15		47		79		15	45	75
kwik (Hg)	0,2		3,4		6,6		0,05	0,18	0,3
lood (Pb)	50		181		312		15	45	75
molybdeen (Mo)	10		105		200		5	153	300
nikkel (Ni)	10	4)	35	4)	60	4)	15	45	75
zink (Zn)	50		154		257		65	433	800
anorganische verbindingen									
cyanide-vrij	1		11		20		5	753	1500
cyanide-complex (pH <5)	5		328		650		10	755	1500
cyanide-complex (pH ≥5)	5		27,5		50		10	755	1500
thiocyanaten (som)	h		10		20		h	750	1500
aromatische verbindingen									
benzeen	0,01	0,15	0,11	1,58	0,2	3	0,2	15	30
tolueend	d(0,05)	0,15	13	195	26	390	d(0,5)	500	1000
ethylbenzeend	d(0,05)	0,15	5	75	10	150	d(0,5)	75	150
xylenen (som o, m, p)	d(0,05)	0,15	2,5	37,6	5	75	d(0,5)	35	70
fenol	d(0,02)	0,15	4	60	8	120	0,2	1000	2000
cresolen (som, o, m, p)	(0,01d)		0,5	7,5	1	15	d(0,2)	100	200
catechol	–		2	30	4	60	d	625	1250
resorcinol	–		1	15	2	30	(5d)	300	600
hydrochinon	–		1	15	2	30	–	400	800
polycyclische aromatische koolwaterstoffen									
naftaleen	d(0,05)	d(0,05)	–		–		0,1	35	70
fenanthreen	d(0,1)	0,135	–		–		0,02	2,5	5
anthraceen	d(0,1)	0,15	–		–		0,02	2,5	5
fluorantheen	d(0,1)	0,045	–		–		d(0,1)	0,5	1
benzo(a)anthraceen	d(0,1)	0,06	–		–		d(0,1)	0,25	0,5
chryseend	d(0,1)	0,06	–		–		d(0,1)	0,026	0,05
benzo(a)pyreen	d(0,1)	0,075	–		–		d(0,1)	0,026	0,05
benzo(k)fluorantheen	d(0,1)	0,075	–		–		d(0,1)	0,026	0,05
benzo(ghi)peryleen	d(0,1)	0,06	–		–		d(0,1)	0,025	0,05
indeno(123cd)pyreen	d(0,1)	0,075	–		–		d(0,1)	0,025	0,05
PAK (som 10)	0,2	3	4,1	61,5	8	120	–	–	–

Tabel 1.7 (vervolg)

stoffen	in grond [mg/kg droge stof]						in grondwater [μg/l]		
	$S^{1)}$		$T^{2)}$		$I^{3)}$		$S^{1)}$	$T^{2)}$	$I^{3)}$
	<	>	<	>	<	>			
gechloreerde koolwaterstoffen									
dichloormethaan	d(0,1)		2	30	4	60	d(2)	500	1000
trichloormethaan	d(0,1)		1	15	2	30	d(1)	200	400
tetrachloormethaan	d(0,1)		0,1	1,5	0,2	3	d(1)	5	10
1,2-dichloorethaan	(0,1d)		0,4	6	0,8	12	d(2)	200	400
vinylchloride	–		0,01	0,15	0,02	0,3	–	0,35	0,7
trichloorethen (tri)	d(0,1)		6	90	12	180	d(1)	250	500
tetrachloorethen (per)	cd(0,1)		0,4	6	0,8	12	d(1)	20	40
overige gechlor. koolw. st	(0,1d)		25		50		–[5)]	–	–
chloorbenzenen (som)	(0,01d)		3	45	6	90	–	–	–
monochloorbenzeen	d(0,05)		–		–		d(0,5)	90	180
dichloorbenzeen (som)	d(0,05)		–		–		d(0,5)	25	50
trichloorbenzeen (som)	d(0,05)		–		–		d(0,05)	5	10
tetrachloorbenzeen (som)	d(0,01)	0,03	–		–		0,01	1,26	2,5
pentachloorbenzeen	d(0,01)		–		–		0,01	0,5	1
hexachloorbenzeen	d(0,01)		–		–		0,01	0,26	0,5
chloorfenolen (som)	(0,02d)		1	15	2	30	–	–	–
monochloorfenolen (som)	d(0,02)						0,25	50	100
dichloorfenolen (som)	d(0,02)						0,08	15	30
trichloorfenolen (som)	d(0,02)						0,025	5	10
tetrachloorfenolen (som)	d(0,02)						0,01	5	10
pentachloorfenol	d(0,02)		0,5	7,5	1	15	0,02	1,5	3
chloormaftaleen	–	–	1	15	2	30	–	3	6
PCB's (som)[6)]	d(0,01)	0,06	0,1	1,5	0,2	3	0,01	0,01	0,01
bestrijdingsmiddelen									
DDD, DDE, DDT (som)	d(0,01)		0,4	6	0,8	12	d(0,01)	0,005	0,01
drins(som)	d(0,01)		0,4	6	0,8	12	(0,01d)	0,05	0,1
aldrin	d(0,01)		–		–		d(0,01)	–	–
dieldrin	d(0,01)		–		–		d(0,01)	–	–
endrin	d(0,01)		–		–		d(0,01)	–	–
HCH's (som)[7)]	d(0,01)		0,2	3	0,4	6	(0,01d)	0,5	1
alpha-HCH	d(0,01)		–		–		d(0,01)	–	–
beta-HCH	d(0,01)		–		–		d(0,01)	–	–
gamma-HCH	d(0,01)		–		–		d(0,01)	–	–
overige chl. best. midd.	(0,01d)		2,5		5		–	–	–

Tabel 1.7 (vervolg)

stoffen	in grond [mg/kg droge stof]						in grondwater [μg/l]		
	$S^{1)}$		$T^{2)}$		$I^{3)}$		$S^{1)}$	$T^{2)}$	$I^{3)}$
	<	>	<	>	<	>			
carbaryl	(0,5d)		0,5	7,5	1	15	d(0,1)	0,06	0,1
carbofuran	(0,5d)		0,2	3	0,4	6	d(0,1)	0,06	0,1
menab	(0,1d)		3,5	52	7	105	d(5)	0,05	0,1
atrazine	d(0,01)		0,6	9	1,2	18	d(0,1)	75	150
overige niet-chl.best.midd.	(0,01d)		5		10		–	–	–
overige stoffen									
minerale olie	10	150	505	7575	1000	15000	50	325	600
ftalaten (som)	d(0,1)	0,3	6	90	12	180	d(2)	2,75	5
styreen	d(0,5)	0,3	10	150	20	300	0,5	150	300
cyclohexanon	d(1)		27	405	54	810	d(1000)	7500	15000
pyridine	d(0,5)		0,1	1,6	0,2	3	d(5)	1,75	3
tetrahydrofuran	d(0,5)		0,05	0,7	0,08	1,2	d(500)	0,75	1
tetrahydrothiofeen	d(0,05)	0,3	9	135	18	270	0,5	15	30

Bron. Circulaireinterventiewaarden bodemansering, Staaaaatscourant 95, 24 mei 1994.
[1)] S = streefwaarde
[2)] T = toetsingswaarde nader onderzoek = 0,5 (S + I of 0,5 (I)
[3)] I = interventiewaarde
[4)] Zie tabel 1.8.
[5)] Zie tabel 1.9.
[6)] PCB's: som 7 behalve S-waarde; deze geldt voor som 7 minus PCB 118.
[7)] HCH's: som van alpha, beta, gamma en delta-HCH.

d(0,01) = S-waarde ligt beneden de detectiegrens (tussen haakjes).
(0,1d) = er is geen S-waarde, de detectiegrens geldt als indicatie.
d = detectiegrens Tauw Milieulab.
– = geen waarde in circulaire.

<, > **voor metalen** (zie tabel 1.7)
< = laagst mogelijke waarden met L(utum) = 0% en H(umus) = 0%
> = voor L en H groter dan 0% te berekenen via tabel 1.8.

<, > **voor overige stoffen** (zie tabel 1.7)
deze zijn alleen humus-afhankelijk met H is minimaal 2% en maximaal 30% (resp. < en >).

Individuele waarden boven de 50 zijn afgerond op 0 decimalen.
Individuele waarden voor PAK's (grond) zijn ontleend aan de notitie MILBOWA (Kamerstukken II 1991–1992, 21990 en 21250, nr. 3).
EOX en fenol-index hebben alleen een 'trigger-functie' (geen toetsing).

Tabel 1.8 Berekeningswijze metalen in grond op basis van lutum- en humusgehalte

metalen	berekening *S*-waarde[1)]	× factor = *I*-waarde
arseen (As)	15 + 0,4 (*L* + *H*)	1,9
barium (Ba)	39 + 6,5 *L*	3,12
cadmium (Cd)	0,4 + 0,007 (*L* + 3*H*)	15
chroom (Cr)	50 + 2*L*	3,8
cobalt (Co)	4,44 + 0,62*L*	12
koper (Cu)	15 + 0,6 (*L* + *H*)	5,28
kwik (Hg)	0,2 + 0,00172 (2*L* + *H*)	33
lood (Pb)	50 + *L* + *H*	6,24
nikkel (Ni)	10 + *L*	6
zink (Zn)	50 + 1,5 (2*L* + *H*)	5,14

1) Referentiewaarden voor *zware metalen, arseen* en *fluor* kunnen voor alle grondsoorten worden berekend met de voor elk element gegeven formule. In deze formule wordt de referentiewaarde afhankelijk gesteld van het lutumgehalte (*L*) en/of het organische stofgehalte (*H*).
Onder het *lutumgehalte* wordt verstaan het gewichtspercentage minerale bestanddelen met een doorsnede kleiner dan 2 μm, betrokken op het totale drooggewicht van de grond. Onder het *organische stofgehalte* wordt verstaan het gewichtspercentage gloeiverlies, betrokken op het totale drooggewicht van de grond.

Tabel 1.9 Berekende waarden voor gechloreerde koolwaterstoffen in grondwater op basis van RIVM-rapport (725201007) en Kocwaarden Tauw (intern rapport 0024116)

overige gechloreerde koolwaterstoffen	Koc	*S* [1)]	*T* [2)]	*I* [3)]
1,1-dichloorethaan	30	(5d)	1300	2600
1,1,1-trichloorethaan	152	(1d)	275	550
1,1,2-trichloorethaan	56	(1d)	750	1500
cis 1,2-dichlooretheen	59	(5d)	650	1300

1) *S* = streefwaarde
2) *T* = toetsingswaarde nader onderzoek = 0,5 (*S* + *I*) of 0,5 (*I*)
3) *I* = interventiewaarde

1.4 Geluid- en trillinghinder

De *Wet geluidhinder*, de *Wet milieubeheer*, de *Luchtvaartwet* en de Arbowet bevatten regels voor het voorkomen en beperken van geluid- en trillinghinder.

De Wet geluidhinder zal naar verwachting medio 2003 worden ingetrokken en, volgens het systeem van de Modernisering Instrumentarium Geluidbeleid (MIG), opgaan in de Wet milieubeheer. Met deze wetswijziging worden de gemeentelijke bevoegdheden vergroot. Liggen momenteel de normen nog vast in de Wet geluidhinder, vanaf medio 2003 kunnen de germeenten gebiedsgericht geluidbeleid voeren. De, door de gemeenten zelf te bepalen, normstelling wordt dan verwoord in het gemeentelijke geluidbeleidsplan. Dit geluidbeleidsplan kan weer een onderdeel zijn van het gemeentelijke milieubeleidsplan.

Lawaai op de arbeidsplaats

Conform de Arbowet zijn grenswaarden gesteld aan de geluidniveaus waaraan werknemers kunnen worden blootgesteld. Bij equivalente geluidniveaus boven 80 dB(A) moet de werkgever gehoorbeschermingsmiddelen ter beschikking stellen. Bij equivalente geluidniveaus boven 85 dB(A) zijn de werknemers verplicht gehoorbeschermingsmiddelen te dragen.

Industrielawaai

Normstelling voor industrielawaai is vastgelegd in de Wet geluidhinder en de Wet milieubeheer. Meten en berekenen van de geluidniveaus vindt plaats conform de Handleiding meten en rekenen industrielawaai.
De Wet geluidhinder voorziet in de geluidzonering van industrieterreinen. De geluidbelasting afkomstig van alle bedrijven op het industrieterrein gezamenlijk mag buiten deze geluidzone niet meer bedragen dan 50 dB(A).

Tabel 1.10 Grenswaarden industrielawaai in nieuwe situaties [dB(A)]

situatie woning op moment van zonevaststelling	voorkeurs-grenswaarde	ten hoogste toelaatbare gevelbelasting met ontheffing	ten hoogste toelaatbaar binnenniveau
geprojecteerd of nieuw te projecteren	50	55	35
in aanbouw of annwezig	50	60	35

Voor bedrijven die niet op een geluid-gezoneerd industrieterrein zijn gelegen worden in de milieuvergunning geluidvoorschriften opgenomen die zijn gebaseerd op de Circulaire industrielawaai en de H ndreiking industrielawaai en vergunningverlening. Uitgangspunt hierbij is het referentieniveau van het omgevingsgeluid dat wordt bepaald door de laagste waarde van enerzijds het L_{95} van het omgevingsgeluid en anderzijds het equivalente geluidniveau L_{Aeq} vanwege wegverkeer minus 10 dB(A).

Wegverkeerslawaai

Normstelling voor wegverkeerslawaai, voor zover woningen liggen binnen een wettelijke zone, is vastgelegd in de Wet geluidhinder. Meten en berekenen van de geluidniveaus vindt plaats conform de meet- en rekenvoorschriften verkeerslawaai.

Tabel 1.11 Zonebreedte voor wegverkeer [meter]

aantal rijstroken		
stedelijk gebied	buitenstedelijk gebied	breedte van de zone
1 of 2	–	200
–	1 of 2	250
3 of meer	–	350
–	3 of 4	400
–	5 of meer	600

Tabel 1.12 Grenswaarden wegverkeerslawaai in nieuwe situaties [dB(A)]

situatie	voorkeurs-grenswaarde	ten hoogste toelaatbare gevelbelasting met ontheffing		ten hoogste toelaatbaar binnenniveau
		stedelijk	buiten-stedelijk	
nieuwe woning/bestaande weg				
nieuw te bouwen woning	50	65	55	35
nieuw te bouwen agrarische bedrijfswoning	50	n.v.t.	60	35
vervangende nieuwbouw	50	7	n.v.t.	35
bestaande woning/nieuwe weg aanleg				
bestaande woningen	50	65	60	35
gelijktijdig met de wegaanleg te bouwen woningen	50	60	55	35

Railverkeerslawaai

Normstelling voor railverkeerslawaai, voor zover woningen liggen binnen een wettelijke zone (voor iedere spoorlijn geldt een toegesneden breedte van de zone), is vastgelegd in de Wet geluidhinder. Meten en berekenen van de geluidniveaus vindt plaats conform de meet- en rekenvoorschriften railverkeerslawaai.

Tabel 1.13 Grenswaarden railverkeerslawaai in nieuwe situaties [dB(A)]

situatie	voorkeurs-grenswaarde	ten hoogste toelaatbare gevelbelasting met ontheffing	ten hoogste toelaatbaar binnenniveau
nieuwe woning	57	70	37

Luchtvaartlawaai

Normstelling voor luchtvaartlawaai, voor zover woningen liggen binnen een wettelijke zone, is vastgelegd in de Luchtvaartwet.

Voor de grote luchtvaart wordt de geluidbelasting B uitgedrukt in Kosteneenheden (Ke). Voor de kleine luchtvaart wordt de geluidbelasting uitgedrukt in Belasting Eenheid Kleine Luchtvaart (bkl). Voor de nachtperiode wordt het equivalente geluidniveau L_{Aeq} gehanteerd.

Tabel 1.14 Grenswaarden luchtvaartlawaai

situatie	ten hoogste toelaatbare geluidbelasting
grote luchtvaart	35 Ke buiten de geluidzone
	65 Ke ter plaatse van woningen binnen de zone
kleine luchtvaart	47 bkl buiten de zone
nachtelijk vliegverkeer	26 dB(A) ter plaatse van woningen

Trillinghinder

A1 = streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max}, dimensieloos
A2 = hoogste streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max}, dimensieloos
A3 = streefwaarde voor de trillingssterkte V_{max}, dimensieloos

Tabel 1.15 Streefwaarden voor continue trillingen gedurende lange tijd in gebouwen met betrekking tot hinder voor personen

gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
gezondheidszorg	0,1	0,3	0,05	0,1	0,15	0,05
wonen	0,1	0,3	0,05	0,1	0,15	0,05
onderwijs en kantoor	0,15	0,5	0,07	0,15	0,5	0,07
bijeenkomst	0,15	0,5	0,07	0,15	0,5	0,07
kritische werkruimte	0,1	0,1	–	0,1	0,1	–

Tabel 1.16 Streefwaarden voor herhaald voorkomende trillingen gedurende lange tijd in gebouwen (bestaande situaties) met betrekking tot hinder voor personen

gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
gezondheidszorg	0,2	0,6	0,1	0,2	0,3	0,1
wonen	0,2	0,6	0,1	0,2	0,3	0,1
onderwijs en kantoor	0,3	0,9	0,15	0,3	0,9	0,15
bijeenkomst	0,3	0,9	0,15	0,3	0,9	0,15
kritische werkruimte	0,1	0,1	–	0,1	0,1	–

Tabel 1.18 Streefwaarden voor herhaald voorkomende trillingen gedurende lange tijd in gebouwen (nieuwe situaties) met betrekking tot hinder voor personen

gebouwfunctie	dag en avond			nacht		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
gezondheidszorg	0,1	0,3	0,05	0,1	0,15	0,05
wonen	0,1	0,3	0,05	0,1	0,15	0,05
onderwijs en kantoor	0,15	0,5	0,07	0,15	0,5	0,07
bijeenkomst	0,15	0,5	0,07	0,15	0,5	0,07
kritische werkruimte	0,1	0,1	–	0,1	0,1	–

Literatuur

- NEN 3418, Ergonomie, Meting van geluid op de arbeidsplaats – Oriënterende meetmethode, NNI, Delft, 1992;
- NEN 3419, Ergonomie, Meting van geluid op de arbeidsplaats, Uitgebreid onderzoek, NNI, Delft, 1992;
- Handleiding meten en rekenen industrielawaai, Ministerie van VROM, Den Haag, 1999;
- Circulaire industrielawaai, Ministerie van VROM, Den Haag, 1979;
- Handreiking industrielawaai en vergunningverlening, Ministerie van VROM, Den Haag, 1998;
- SBR richtlijn 1, Hinder voor personen in gebouwen door trillingen, Meet- en beoordelingsrichtlijn, Stichting Bouwresearch, Rotterdam, 1993;
- Wet geluidhinder;
- Wet milieubeheer;
- Luchtvaartwet;
- Arbowet;

1.5 Luchtverontreiniging

De toelaatbare uitstoot van *luchtverontreinigende stoffen* wordt geregeld via de milieuvergunning. De belangrijkste normen zijn opgenomen in Algemene maatregelen van bestuur (AMvB's) in het kader van de Wet milieubeheer. Daarnaast wordt de *Nederlandse emissierichtlijn* (NER) gehanteerd ter vaststelling van vergunningsvoorwaarden. Tabel 1.19 geeft een globaal overzicht.

Tabel 1.19 Emissie-eisen uit de Nederlandse emissie richtlijn (NER)

veronteiniging	GMS[1)] [g/uur]	eis [mg/m^3]	voorbeeld
stof	< 500	10 (doekfilter)	
	> 500	10 (doekfilter)	
		25	
stofvormige anorganische verbindingen			
S.A.1	1	0,2	Hg
S.A.2	5	1	koperrook
S.A.3	25	5	fluoriden
gasvormige anorganische verbindingen			
G.A.1	10	1	fosgeen
G.A.2	50	5	chloorgas
G.A.3	300	30	HCl
G.A.4	5000	200	NO_x, SO_2
organische stoffen			
O.1	100	20	1,1 dichlooretheen
O.2	2000	100	chloorbenzenen
O.3	3000	150	ethanol
carcinogenen			
C.1	0,5	0,1	benzo(a)pyreen
C.2	5	1	dimethylsulfaat
C.3	25	5	benzeen

[1)] Indien de ongereinigde massastroom groter is dan een bepaalde *grensmassastroom* (GMS) dan geldt een concentratie-eis.
Het rangnummer van stofklassen is maat voor de toxiciteit. Hoe lager het rangnummer, hoe strenger de eis. Voor extreem risicovolle stoffen en geurende stoffen zijn afzonderlijke eisen geformuleerd.

Bron. Nederlandse Emissie Richtlijn, 1993. Stafbureau NER, Postbus 1, 3720 BA Bilthoven.

Immissienormen[1)]

In de besluiten luchtkwaliteit uit de *Wet milieubeheer* zijn de kwaliteitsdoelstellingen voor de buitenlucht in de vorm van grens- en richtwaarden geformuleerd. Tabel 1.20 geeft een overzicht van de gehanteerde normen. In de tabel zijn tevens relevante MTR- en streefwaarden weergegeven.

Metingen

Controle van luchtverontreiniging kan geschieden via het meten van de emissie. In de NER wordt het meetregiem (meetfrequentie en -methoden) voor verschillende verbindingen genoemd. Voor wat betreft de meetmethoden wordt verwezen naar ondermeer Nederlandse Praktijkrichtlijnen (NPR), NEN-normen ISO-normen en VDI-richtlijnen. Meetwaarden kunnen in verschillende eenheden worden uitgedrukt. Tabel 1.21 geeft een overzicht van veel gehanteerde eenheden.

Verspreiding luchtverontreiniging

Is de emissie van luchtverontreiniging door een bron vastgesteld (bijv. door metingen), dan kan de *verspreiding* hiervan in de atmosfeer worden berekend met behulp van *verspreidingsmodllen*. Het belangrijkste in Nederland gehanteerde model is het *Nieuw Nationaal Model* (NNM-model). Dit model wordt als PC-versie op de markt gebracht door TNO (*Pluim-Plus*) en Kema (*Stacks*).

Met het NNM-model kunnen percentielwaarden worden berekend op een willekeurige plaats rond de bron. Een *percentielwaarde p* is die waarde die in $(100 - p)\%$ van de tijd (op jaar-basis) op een bepaalde plaats zal worden overschreden. De berekende concentratie is onder andere een functie van de temperatuur van de rookgassen, de hoogte van de schoorsteen, de grootte van de emissie, bepaalde omgevingsvariabelen en de meteorologische omstandigheden.

Op basis van NNM-berekeningen kan worden getoetst of de emissie van een specifieke bron aanleiding geeft tot overschrijding van kwaliteitsdoelstellingen voor de buitenlucht.

[1)] *Immissie* heeft betrekking op inworp, *emissie* op uitworp van vaste, vloeibare of gasvormige stoffen of van geluid.

Tabel 1.20 Overzicht wettelijke normen, MTR- en streefwaarden voor de luchtkwaliteit[1)]

component	MTR[2)]	streefwaarde[3)]	middelingstijd	opmerking
acroleëne	25		30 minuten jaar	* streefwaarde wordt bepaald door
	0,5	0,01(*)	jaar	natuurlijke achtergrond; deze waarde ligt onder de thans bestaande detectielimiet
acrylonitril	10	0,1	jaar	
arseen	0,5	0,005	jaar	
asbest	100.000 (aantal vezel-equivalenten per m^3) (*)	1.000 (aantal vezel-equivalenten per m^3) (*)	jaar	* t.a.v. de type vezel geldt: *equivalentiefactor* • chrysotiel vezel, lengte < 5mm *0.1* • amfibole vezel, lengte > 5mm *10* • amfibole vezel, lengte < 5mm *1*
benzeen	30	1	jaar	
	10		jaar	grenswaarde[4]
	5		jaar	richtwaarde[5]
cadmium	n.b.	n.b.		
3-chloorpropeen	7	0,07		
chroom (VI)	(ng/m^3) 2,5	(ng/m^3) 0,025	jaar	
1,2-dichloorethaan	100	1	jaar	
1,1-dichloorethen	200	2	jaar	
dichloormethaan	(mg/m^3) 25	–	4 uur	
	(mg/m^3) 1,7	($\mu g/m^3$) 20	jaar	
1,2-dichloorpropaan	12	0,1	jaar	
1,3-dichloorpropeen	40	0,4	jaar	
etheen	300	–	uur	* streefwaarde wordt bepaald door
	9	–	24 uur	naturlijke achtergrond
		0,5 (*)	jaar	
etheenoxide	3	0,03	jaar	
fenol	100	1	jaar	
fijn stof (PM_{10})	[in 2005] 50 (*)	–	dag	* er is geen drempelwaarde i.v.m. gezondheidseffecten aan te geven; aangegeven waarden zijn EU- grenswaarden; 5)
	[in 2005] 40 (*)	[in 2010] 20 (**)	jaar	overschrijding dag-gemiddelde beperkt toegestaan: in 2005 niet meer dan 35 × per jaar, en in 2010 niet meer dan 7 × per jaar; ** (streef)-waarde van 20$\mu g/m^3$ voor 2010 is in EU als indicatieve grens-waarde aangegeven
fluoriden	0,3	–	dag	
	0,05	(ng/m^3) 0,5	jaar	
formaldehyde	120	–	30 minuten	* streefwaarde wordt bepaald door
	10	1(*)	jaar	natuurlijke achtergrond

Tabel 1.20 (vervolg)

component	MTR[2)]	streefwaarde[3)]	middelingstijd	opmerking
koolmonoxide	(mg/m^3) 10	–	8 uur	* streefwaarde wordt bepaald door natuurlijke achtergrond
		(mg/m^3) 0,1 (*)	jaar	grenswaarden [6)]
	(mg/m^3) 6		98-P (uur)	
	(mg/m^3) 40		99,99-P (uur)	
koper	n.b.	n.b.		
kwik	n.b.	n.b.		
lood	0,5	0,005	jaar	
	2		98-P (8 uur)	grenswaarden [6)]
	0,5		jaar	jaargem. granswaarde ook in EU vastgesteld [5)]
methylbromide	10.000	100	uur	
	100	1	jaar	
nikkel	0,25	0,0025	jaar	
ozon	n.b. (*)	120 (**)	uur	* er is geen drempelwaard i.v.m. gezondheidseffecten aan te geven; ** streefwaarde wordt bepaald door natuurlijke achtergrond
		50 (**)	groeiseizoen (mei-september), 8-20 u)	
PAK (als benzo(a)pyreen)	(ng/m^3) 1	(ng/m^3) 0,01	jaar	
propyleenoxide	90	1	jaar	
stikstofdioxide	(humaan) 40 [in 2010] (*)	0,4	jaar	* tevens EU- grenswaarden [5)] eco-norm als NO_x, uitgedrukt in gewichtseenheden NO_2
	(eco) 30 [in 2001] (*)		jaar	
	135		98-P (uur)	grenswaarde [7)]
	80		98-P (uur)	richtwaarde [7)]
	175		99,5-P (uur)	grenswaarde [7)]
	25		50-P (uur)	richtwaarde [7)]
styreen	800	8	jaar	
tetrachlooretheen	250	2,5	jaar	
tetrachloormethaan	60	1	jaar	
tolueen	3.000	–	dag	
	300	3	jaar	
1,1,1-trichloorethaan (*)	(mg/m^3) 4,8	(µg/m^3) 48	jaar	* MTR- en streefwaarde nog slechts zeer tijdelijk als referentie-niveau te hanteren, gezien verbod op productie en gebruik i.v.m. aantasting ozonlaag (verbod productie per 1.1.96 8) verordening EU met verbod gebruik is aangenomen en is eind '99 van kracht geworden)
trichlooretheen	5.000	50	jaar	
trichloormethaan	100	1	jaar	
vinylchloride	100	1	jaar	
zink	n.b.	n.b.		
zwaveldioxide	(humaan) 125	–	dag	* tevens EU-grenswaarde; [5)] in 2005 niet meer dan 3 × per jaar te overschrijden;
	(*)	0,5	jaar	
	50	–		

Tabel 1.20 (vervolg)

component	MTR[2)]	streefwaarde[3)]	middelingstijd	opmerking
	–		jaar	** levens EU-grenswaarde; aan deze eco-norm te voldoen vanaf 2001
	(eco) 20 (**)			
	75		50-P (24 uur)	grenswaarde [9)]
	30		50-P (24 uur)	richtwaarde [9)]
	200		95-P (24 uur)	grenswaarde [9)]
	80		95-P (24 uur)	richtwaarde [9)]
	250		98-P (24 uur)	grenswaarde [9)]
	100		98-P (24 uur)	richtwaarde [9)]
	500		dag	grenswaarde [9)]
	830		uur	richtwaarde [9)]
zwavelwaterstof (*)	n.b.	n.b.		* in geval tank ontbreekt, zullen zeer waarschijnlijk toxische effecten op mens of milieu ook niet meer aan de orde zijn
zwarte rook	n.b.	n.b.		
(zwevende	30		50-P (24 uur)	grenswaarden [9)]
deeltjes)	75		95-P (24 uur)	
	90		98-P (24 uur)	
	150		dag	

[1)] Uit NeR, September 2000, Infomil.
[2)] De *MTR-waarde* is de bovengrens voor een stof, die op basis van wetenschappelijke gegevens aangeeft bij welke concentratie ofwel geen als negatief te waarderen effect is of – in het geval van carcinogene stoffen – een kans van 10^{-6} op sterfte voorspeld kan worden.
[3)] De *streefwaarde* geeft aan wanneer er sprake is van verwaarloosbare effecten op het milieu.
[4)] Besluit luchtkwaliteit benzeen, Staatsblad 1997, 460.
[5)] Richtlijn 1999/30/EG van 22 april 1999, Publicatieblad Europese Gemeenschappen L 163/41.
De verwachting dat de in deze richtlijn opgenomen normen in 2001 in Nederlandse regelgeving worden geïmplementeerd.
[6)] Besluit luchtkwaliteit koolstof-monoxide en lood, Staatsblad 1997, 459.
[7)] Besluit luchtkwaliteit stikstof-dioxide, Staatsblad 1997, 458.
[8)] Besluit inzake stoffen die de ozonlaag aantasten, Staatsblad 1995, 657.
[9)] Besluit luchtkwaliteit zwaveldioxide en zwevende deeltjes, Staatsblad 1997, 457.

Tabel 1.21 Eenheden bij het meten van luchtverontreiniging

eenheden onder bedrijfscondities t.a.v. temperatuur (T_b), druk (P_b) en vochtigheid	omrekening	enheden onder normale, droge condities (0°C; 101,3 kPa)
ppm	$\frac{M}{22,4} \times \frac{273}{T_b}$	mg/m^3 i.n.d.
mg/m^3	$\frac{273}{T_b} \times \frac{P_b}{101,3} \times \frac{1}{(1+f_b/0,804)}$	mg/m^3 i.n.d.
vol.%	$1/(1 + f_b/0{,}804)$	vol.%, droog
mg/m^3	$\frac{(20,95 - O_{(x)})}{(20,95 - O_{(b)})}$	mg/m^3 i.n.d. bij $O_{(x)}$.

M = molecuulmassa
T_b = temperatuur rookgas [K]
P_b = absolute druk rookgas [kPa]
f_b = absolute vochtigheid [kg/m^3_n]
$O_{(b)}$ = zuurstofgehalte onder bedrijfscondities
$O_{(x)}$ = zuurstofgehalte onder referentiecondities
m^3 i.n.d. = in normale toestand droog, ook wel aangeduid als mg/m^3_n of mg/Nm^3

1.6 Oppervlaktewater/waterbodem

Er wordt gesproken van verontreiniging van het *oppervlaktewater* en/of de *waterbodem* indien daarin door menselijk handelen milieuvreemde stoffen in terechtkomen, dan wel dat van nature voorkomende stoffen in verhoogde concentraties worden aangetroffen. Afhankelijk van de effecten worden de volgende categorieën stoffen onderscheiden:

- Zuurstofbindende stoffen.
- Eutrofiërende stoffen.
- Verziltende stoffen.
- Smaakbedervende en kwalijk riekende stoffen.
- Schuimvormende stoffen.

- Giftig werkende stoffen en organismen.
- Onoplosbare stoffen.
- Stoffen die de pH beïnvloeden.

Daarnaast is de afvoer van warmte in het water een vorm van verontreiniging.

Wetgeving

De belangrijkste wetten betreffende het waterbeheer zijn de *Wet op de waterhuishouding* en de *Wet verontreiniging oppervlaktewateren* (WVO). De WVO is sinds 1970 van kracht en heeft tot doel het bestrijden en het voorkomen van verontreiniging van de oppervlaktewateren. Nadere invulling van de WVO wordt gegeven door middel van Algemene maatregelen van bestuur (AMvB's).

Voorbeelden zijn:

LB	WVO	stedelijk afvalwater
LB	WVO	huishoudelijk afvalwater

Functietoekenning en waterkwaliteitsdoelstellingen

Door middel van een AMvB zijn vijf *watertypen* onderscheiden, waarvoor specifieke waterkwaliteitsdoelstellingen gelden.

- Oppervlaktewater voor de bereiding van drinkwater.
- Zwemwater.
- Water voor zalmachtigen.
- Water voor karperachtigen.
- Water voor schelpdieren.

Deze doelstellingen zijn te vinden in het *Besluit inzake kwaliteitsdoelstellingen en metingen van oppervlaktewater* (Staatblad. 1983 nr. 606). Door de waterkwaliteitsbeheerder kan aan een bepaald water een specifieke functie worden toegekend. Voor dat water geldt dan de verplichting om te streven naar de bijbehorende waterkwaliteitsdoelstellingen. Voor alle (zoete) oppervlaktewateren gelden normen voor de kwaliteitsbepaling ervan. De normen staan in de gewijzigde versie Bijlage A: Normen 4^{e} nota Waterhuishouding, Staatscourant 16 juni 2000, nr. 114. Voor de waterbodem gelden aanvullend toetings-, signaleringsen interventiewaarden, zie tabel 1.22.

1.7 Afvoer van afvalwater via de riolering

Met ingang van 1 maart 1996 is de nieuwe regeling voor lozing van afvalwater met behulp van een *riolering* inwerking getreden. De gemeentelijke lozingsverordening is daarmee op dezelfde datum van rechtswege komen te vervallen. De wetgeving-soperatie was nodig om tegemoet te komen aan EG-regelgeving. Daarbij is het belangrijk één zaak goed in het oog te houden, namelijk het onderscheid dat wordt gemaakt tussen:

– lozingen afkomstig van een inrichting;
– lozingen niet afkomstig van een inrichting.

Er gelden landelijke kwaliteitscriteria voor oppervlaktewater en sediment waaraan een lozing kan worden getoetst. In de praktijk betekent dit het volgende:

Lozingen afkomstig van inrichtingen

Indien een inrichting een milieuvergunning nodig heeft op grond van de Wet milieubeheer is het WM-bevoegde gezag aangewezen in de milieubeheer-vergunning voorschriften op te nemen over een eventuele indirecte lozing. De vergunningverleners zullen zich moeten houden aan de instructie-AMvB die op grond van 8.45, eerste lid, van de WM valt te verwachten.
Voorzover op een inrichting algemene regels van toepassing zijn, worden daarin voorschriften met betrekking tot afvoer van afvalwater via het riool opgenomen. Voor die inrichtingen die op basis van artikel 1, tweede lid, van de WVO zijn of worden aangewezen – de meeste bezwaarlijke indirecte lozingen – verandert er niets; in zo'n geval is en blijft ook na 1 maart 1996 de water-kwaliteitsbeheerder bevoegd.

Lozingen niet afkomstig van inrichtingen

Er is een aparte regeling waarin algemeen geldende voorschriften zijn opgenomen voor de lozing van huishoudelijk afvalwater en van bedrijfswater dat afkomstig is uit niet-inrichtingen (KB 19 januari 1996, houdende voorschriften voor het brengen van bedrijfsafvalwater vanuit niet-inrichtingen en huishoudelijk afvalwater in een voorziening voor de inzameling en transport van afvalwater).

Minimumkwaliteit (MTR) en streefwaarden voor oppervlaktewater en sediment

(Zie tabel 1.22 t/m 1.26)

IJkpunten voor stoffen in watersystemen, zijnde MTR voor de konte termijn en de streefwaarden voor de lange termijn.

De getalswaarden voor de totale concentratie in water gelden voor een zwevend-stofconcentratie van 30 mg/l.

De getalswaarden voor sediment gelden voor de standaard van 10% organische stof en 25% lutum.

Voor standaard zwevend stof (20% organische stof en 40% lutum) liggen de getalswarden voor metalen een factor 1,5 hoger en voor organische verbindingen een factor 2 hoger dan voor sediment.

De streefwaarde en MTR voor metalen is inclusief de landelijke achtergrondconcentratie.

Symbolen van tabel 1.22 t/m 1.26

#	= getalswaarde = interventiewaarde
!	= in de afleiding is een onzekerheidsfactor van 10 gehanteerd i.v.m. weinig data (EPA/1000)
..	= geen getalswaarde vastgesteld
*	= geen bodemtypecorrectie voor zandige sedimenten (org. stof <10%)
**	= in gebieden met mariene beinvloeding komen van nature hogere concentraties voor
***	= bodemtypecorrectie: F = 175 + 13 L (L = % lutum)
****	= meting in de ochtend
@	= de afleiding van deze MTR's wijkt af van de standaard procedure voor metalen, omdat onvoldoende dat beschikbaar zijn voor het vaststellen van een landelijke achtergrond-concentratie, maar zijn voorlopig opgenomen n.a.v. een zaak bij het Europese Hof over de utvoering van de Richtlijn 76/464/EEG. Bij deze milieukwaliteitsormen dient de lokale achtergrondconcentratie te worden opgeteld.
w	= winter-waarde (dec-feb)
z	= zomer-waarde (apr-sep) voor eutrofieringsgevoelige, stagnante wateren Voor de monitoring van trends in de waterkwaliteit kan voor stromende wateren de waarde voor stagnante wateren als jaargemiddelde worden gehanteerd
z/kv	= eerstgenoemde waarde geldt voor zandgebieden, de tweede waarde geldt voor klei-en veengableden

Tabel 1.22 Kwaliteitscriteria oppervlaktewater en sediment (metalen) [1)]

	oppervlaktewater			oppervlaktewater		sediment	
	achtergrond concentratie Noordzee	landelijke streefwaarde	MTR	landelijke streefwaarde	MTR	landelijke streefwaarde	MTR-sed
metalen	(opgelost) µg/l	(opgelost) µg/l	(opgelost) µg/l	(totaal) µg/l	(totaal) µg/l	(droge stof) mg/kg d.s.	(droge stof) mg/kg d.s.
cadmium	0,03	0,08	0,4	0,04	2	0,8	12 #
norg nisch kwik	0,003	0,01	0,2	0,07	1,2	0,3	10 #
methyl-kwik	..	0,01	0,02	0,06	0,1	0,3	1,4
koper	0,3	0,5	1,5	1,1	3,8	36	73
nikkel	..	3,3	5,1	4,1	6,3	35	44
lood	0,02	0,3	11	5,3	220	85	530 #
zink	0,4	2,9	9,4	12	40	140	620
chroom	..	0,3	8,7	2,4	84	100	380 #
arseen	..	1	25	1,3	32	29	55 #
antimoon	..	0,4	6,5	0,4	7,2	3	15 #
barium	..	75	220	78	230	160	300
beryllium	..	0,02	0,2	0,02	0,2	1,1	1,2
cobalt	..	0,2	2,8	0,2	3,1	9	19
molybdeen	..	4,3	290	4,4	300	3	200 #
seleen	..	0,09	5,3	0,09	5,4	0,7	2,9
thallium	..	0,06	1,6	0,06	1,7	1	2,6
tin	..	0,2	18	2,2	220	..	..
vanadium	..	0,9	4,3	1	5,1	42	56
boor@	..	6,5	650	..	..	..	..
tellurium@	..	..	..	..	..	..	..
titanium@	..	..	..	..	..	..	..
uranium@	..	0,01	1	..	..	..	..
zilver@	..	0,0008	0,08	..	..	..	5,5
zoute wateren:	..	0,01	1,2	..	..	..	..

[1)] Voor symbolen, zie pag. K/35.
Uit: Staatscourant, 6 Juni 2000, nr. 114/pag. 18.

Tabel 1.23 Kwaliteitscriteria oppervlaktewater en sediment (organische verbindingen)

	oppervlaktewater			sediment	
organische verbindingen	MTR opgelost	streef-waarde totaal	MTR totaal	streef-waarde droge stof	MTR-sed droge stof
PAK	µg/l	µg/l	µg/l	mg/kg d.s.	mg/kg d.s.
naftaleen	1,2	0,01	1,2	0,001*	0,1*
anthraceen	0,07	0,0008	0,08	0,001*	0,1*
fenantreen	0,3	0,003	0,3	0,005*	0,5*
fluorantheen	0,3	0,005	0,5	0,03*	3*
benz(a)anthraceen	0,01	0,0003	0,03	0,003*	0,4*
chryseen	0,3	0,009	0,9	0,1*	11*
benzo(k)fluorantheen	0,04	0,002	0,2	0,02*	2*
benzo(a)pyreen	0,05	0,002	0,2	0,003*	3*
benzo(ghi)peryleen	0,03	0,005	0,5	0,08*	8*
indenopyreen	0,04	0,004	0,4	0,06*	6*
chloorbenzenen	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
pentachloorbenzeen	300	3	300	1	100
hexachloorbenzeen	9	0,09	9	0,05	5
chloorfenolen	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s	µg/kg d.s.
pentachloorfenol	4000	40	4000	2	300
chlooranilines	µg/l	µg/l	µg/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
tetrachlooranilïnes (ind)	3	0,03	3	1,71	1220
pentachlooraniline	0,1	0,001	0,1	0,6	60
organochloorverbindingen	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/1kg d.s.
aldrin	0,9	0,01	1	0,06	6
dieldrin	12	0,4	39	0,5	450
endrin	4	0,04	4	0,04	4
DDT	0,4	0,009	0,9	0,09	9
DDD	0,4	0,005	0,5	0,02	2
DDE	0,4	0,004	0,4	0,01	1
α-endosulfan	20	0,2	20	0,01	1
α-HCH	3300	33	3300	3	290
β-HCH	800	9	860	9	920
j-HCH (lindaan)	910	9	920	0,05	230
heptachloor	0,5	0,005	0,5	0,7	0,7
heptachloorepoxide	0,5	0,005	0,5	0,0002	0,02
chloordaan	2	0,02	2	0,03	3

Tabel 1.23 (vervolg)

	oppervlaktewater			sediment	
organische verbindingen	MTR opgelost	streef-waarde totaal	MTR totaal	streef-waarde droge stof	MTR-sed droge stof
organofosforverbindingen	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
azinfos-ethyl	11	0,1	11	0,005	0,5
azinfos-methyl	12	0,1	12	0,009	0,9
chloorfenvintos	2	0,02	2	0,0006	0,06
chloorpyrifos	3	0,03	3	0,01	1
cumafos	0,7	0,007	0,7	0,0006	0,06
demeton	140	1	140		
diazinon	37	0,4	37	0,01	1
dichloorvos	0,7	0,007	0,7	0,00003	0,003
dimethoaat	23000	230	23000	0,8	78
disulfoton	82	0,8	82	0,03	6
ethoprofos	63	0,6	63	0,003	0,3
fenitrothion	9	0,09	9	0,007	0,7
fenthion	3	0,03	3	0,004	0,4
foxim	82!	0,8!	82!	0,08!	8!
heptenofos	20	0,2	20	0,003	0,3
malathion	13	0,1	13	0,009	0,9
mevinfos	2	0,02	2	0,0006	0,06
oxydemeton-methyl	35!	0,4!	35!	0,0003!	0,03!
parathion(-ethyl)	2	0,02	2	0,001	0,1
parathion-methyl	11	0,1	11	0,01	1
pyrazofos	40	0,4	40	0,02	2
tolclofos-methyl	790!	8!	800!	1!	130!
triazofos	32	0,3	32	0,007	0,7
trichloorfon	1	0,01	1	0,00002	0,002
organische tinverbindingen	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
tetrabutyltin-verbindingen	1600!	18!	1600!	0,8!	78!
zoute wateren:	17!	0,2!	17!	0,008!	0,8!
tributyltin-verbindingen	14	0,1	14	0,1	10
zoute wateren:	1	0,01	1	0,007	0,7
trifenyltin-verbindingen	5	0,05	5	0,08	6
zoute wateren:	0,8	0,009	0,9	0,01	1
organische sillciumverbindingen	µg/l	µg/l	µg/l	mg/kg d.s.	mg/kg d.s.
octamethyltetrasiloxaan	0,4	0,005	0,5	0,01	1,3

Tabel 1.23 (vervolg)

organische verbindingen	oppervlaktewater MTR opgelost	oppervlaktewater streef-waarde totaal	oppervlaktewater MTR totaal	sediment streef-waarde droge stof	sediment MTR-sed droge stof
zuran (fenolherbiciden & chloorfenoxycarbo	µg/l	µg/l	µg/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
bentazon	64!	0,6!	64!	1!	130!
2,4-D	10	0,1	10	0,3	27
dichloorprop	40	0,4	40	32	3200
dinoseb	0,03	0,0003	0,03	0,003	0,3
dinoterb	0,03	0,0003	0,03	0,1	11
DNOC	21	0,2	21	0,7	280
MCPA	2	0,02	2	0,05	5
mecoprop	4	0,04	4	0,02	2
2,4,5-T	9!	0,09!	9!	0,2!	50!
carbamaten & dithio-carbamaten	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
aldicarb	98	1	98	0,001	0,1
benomyl	150	2	150	0,006	0,6
carbaryl	230	2	230	0,03	3
carbendazim	110	1	110	0,03	3
carbofuran	910	9	910	0,02	2
maneb	als ETU	..	als ETU	2	2
metam-Natrium	35!	0,4!	35!	0,006!	0,6!
methomyl	80	0,8	80	0,001	0,1
oxamyl	1800	18	1800	0,01	1
pirimicarb	90	0,9	90	0,02	2
propoxur	10	0,1	10	0,0001	0,01
thiram	32	0,3	32	0,008	0,8
tri-allaat	1900	19	1900	0,2	160
zineb	als ETU	..	als ETU	130!	..
triazinen, pyridazinen & triazolen	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
anilazin	85	0,9	85	0,02	2
atrazin	2900	29	2900	0,2!	26
chloridazon	73000	730	73000	3	350
cyanazin	190	2	190	0,01!	2
desmetryn	34000!	340!	34000!	0,08!	370!
metamitron	10000	100	10000	1	95
simazin	140!	1!	140!	0,009!	0,9!
synthetische pyrethroiden	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
bifenthrin	1	0,01	1	0,05	5
cypermethrin	0,09	0,001	0,1	0,004	0,4
deltamethrin	0,3	0,004	0,4	0,01	1
permethrin	0,2	0,003	0,3	0,009	0,9

Tabel 1.23 (vervolg)

	oppervlaktewater			sediment	
organische verbindingen	MTR opgelost	streef-waarde totaal	MTR totaal	streef-waarde droge stof	MTR-sed droge stof
aniliden & dinitro-anilinen	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
metazachloor	34000!	340!	34000!	3	260
metolachloor	200	2	200	0,03	3
propachloor	1300	13	1300	0,06	6
quintozeen	2900	31	3100	..	..
trifluralin	37!	0,4!	38!	0,1!	19!
fenylureum-herbiciden (aromatische chloc)	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
diuron	430	4	430	0,08!	9
isoproturon	320	3	320	0,05	5
linuron	250	3	250	0,09	9
metabenzthiazuron	1800	18	1800	0,7	67
metobromuron	10000	100	10000	1	110
cholinesterase remming	..	..	0,5	..	..
carboximiden	ng/l	ng/l	ng/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
captafol	28!	0,3!	28!	0,03!	3!
captan	110	1	110	0,01	1
overige stoffen (niet op basis van risico-grenzen)	µg/l	µg/l	µg/l	mg/kg d.s.	mg/kg d.s.
NTA	..	..	200	..	..
minerale olie	..	..	..	50	1000
PCB	µg/l	µg/l	µg/l	µg/kg d.s.	µg/kg d.s.
PCB-28	..	..	..	1	4
PCB-52	..	..	..	1	4
PCB-101	..	..	..	4	4
PCB-118	..	..	..	4	4
PCB-138	..	..	..	4	4
PCB-153	..	..	..	4	4
PCB-180	..	..	..	4	4
screeningsparameters	µg/l	µg/l	µg/l	mg/kg d.s.	mg/kg d.s.
EOX	..	..	..	0,3	..
VOX	..	..	5	..	..
ETU	..	..	0,005	..	..

[1] Voor symbolen, zie pag. K/35.

Uit: Staatscourant 16 juni 2001 nt. 117/pag.18.

Tabel 1.24 Kwaliteitscriteria oppervlaktewater en sediment (algemene stoffen) [1)]

algemene stoffen	oppervlaktewater			sediment	
	achtergrond-concentratie Noordzee	landelijke streef-waarde	MTR	landelijke streef-waarde	MTR-sed
NUTRIENTEN & EUTROFIERINGSPARAMETERS					
ortho-fosfaat (mg P/l)	0,02 (w)	..	..	..	..
totaal-fosfaat (mg P/l)	..	0,05 (z)	0,15 (z)	..	..
DIN (nitaat + nitriet + ammon.) mg N/l	0,15 (w)	..	..	..	..
totaal-stikstof (mg N/l)	..	1 (z)	2,2 (z)	..	..
nitraat (mg N/l)	..	..	..	..	..
ammoniak (mg/Nl)	..	..	0,02	..	..
ammoniumverbindingen	..	..	..	..	..
chlorofyl-a (µg/l)	..	..	100 (z)	..	..
ZOUTEN					
chloride (mg Cl/l)	..	..	200	..	..
fluoride (mg F/l)	..	..	1,5	500 (mg/kg)***	..
bromide (mg Br/l)	..	..	8	20 (mg/kg)	..
sulfaat (mg SO4/l)	..	..	100	..	..
totaal-sulfiden (µgS/l)	..	..	..	2 (mg/kg)	

[1)] Voor symbolen, zie pag. K/35.
Uit: Staatscourant 16 Juni 2000, nr. 114/pag. 18.

Tabel 1.25 Kwaliteits criteria oppenvlakte water en zwevend stof (radioactieve stoffen)[1)]

radioactieve stoffen (1Bg = 27 pCl)	oppervlaktewater			zwevend stof		
	achtergrond-concentratie Noordzee mBg/l	landelijke streef-waarde mBg/l	MTR mBg/l	achtergrond-concentratie Noordzee Bg/kg	landelijke streef-waarde Bg/kg	MTR Bg/kg
totale α-activiteit	500	100	..	..	..	..
rest β-activiteit	300	200	..	..	..	..
tritium-activiteit	10.000	10.000	..	..	..	..
radium-226	5	5	..	..	..	..
strontium-90	15	10	..	..	..	..
cesium-137	20	..	..	..	40	..
lood-210	..	..	..	100	100	..
polonium-210	..	..	..	100	100	..
cobalt-58	..	..	..	10	10	..
cobalt-60	..	..	..	10	10	..
jodium-131	..	..	..	..	20	..
overige j-stralers	..	..	..	< 2	2	..

[1)] Voor symbolen, zie pag. K/35.

Uit: Staatscourant 16 juni. 2000, nr. 114/pag. 18.

Tabel 1.26 Kwaliteits criteria oppervlaktewater (parameters)[1)]

parameters	oppervlaktewater	
	streef-waarde	MTR
algemeen		
kleur, geur, schuim, vast afvalm troebeling	..	niet zichtbaar of ruikbaar verontreinigd
temperatuur (C)	..	25
zuurstof (mg/l)	..	5****
zuurgraad (pH)	..	6,5–9
doorzicht (z, meter)	..	0,4
bacteriologisch		
thermotolerante coll's (80 perc., MPN/ml)	..	20
enterovirussen/fagen	..	afwezig in 10l

[1)] Voor symbolen, zie pag. K/35.
Uit: Staatscourant, 6 Juni 2000, nr. 114/pag. 18.

z = zomer-waarde (april-september) voor eutroferings-gevoelige, stagnante wateren.

1.8 Zuivering afvalwater

Verontreiniging oppervlaktewater

De verantwoordelijkheid van de kwaliteit van het *oppervlaktewater* in Nederland ligt in handen van de waterkwaliteitsbeheerders (de waterschappen, zuiveringsschappen, hoogheemraadschappen). Rijkswateren worden beheerd door het Rijk zelf (Rijkswaterstaat). Een en ander is geregeld in de *Wet verontreiniging oppervlaktewateren* (WVO).
In de WVO isgeregeld dat voor de meeste industriële lozingen een *WVO-vergunning* nodig is. Zowel industrieën als huishoudens dienen een financiële bijdrage te leveren aan waterzuivering; de hoogte van de bijdrage is afhankelijk van het aantal geloosde *vervuilingseenheden* (*v.e.'s*). Met de opbrengsten hiervan wordt het waterkwaliteitsbeheer in Nederland betaald.

Lozingseisen

De maximale toegestane lozing van verontreinigingen door bedrijven wordt vastgelegd in de WVO-vergunning. Voor *rioolwaterzuiveringsinstallaties* (RWZI's) gaan de effluenteisen gelden volgens tabel 1.27.

Tabel 1.27 Grenswaarden voor rioolwaterzuiveringsinrichtingen te lozen afvalwater voor fosfaat (C-26) en totaal-stikstof (C-31)

stof	grens-waarden[1)]	nieuwe riool-waterzuiverings-inrichtingen m.i.v.	bestaande riool-waterzuiverings-inrichtingen m.i.v.
fosfaat			
> 100 000 i.e.[2)]	1	1 juli 1990	1 januari 1995
20 000 t/m 100 000 i.e.[2)]	2	1 juli 1990	1 januari 1995
< 20 000 i.e.[2)]	2	1 januari 1995	1 januari 1995
totaal-stikstof			
≥ 20 000[2)]	10/15[3)]	1 september 1992[3)]	1 januari 1998
< 20 000 i.e.[2)]	15	1 september 1992	1 januari 1998

[1)] De grenswaarden worden uitgedrukt in milligram per liter.
[2)] Het betreft hier de ontwerpcapaciteit gebaseerd op een biochemisch zuurstof verbruik-belasting van 54 gram zuurstof per inwonerequivalent per dag.
[3)] De grenswaarde 15 milligram totaal-stikstof per liter geldt voor nieuwe rioolwaterzuiver-ingsinrichtingen ≥ 20 000 i.e. waarop simultaan wordt gedefosfateerd tot 1 januari 1995. Vanaf die datum geldt ook voor die inrichtingen een grenswaarde van 10 milligram totaal-stikstof per liter.

Bron. Besluiten van 13 juni 1990, Stb. 301 en van 3 juli 1992, Stb. 383.

Onderdelen rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI)

Een RWZI bestaat in de regel uit de volgende onderdelen (zie ook hierna):
- Roostergoedverwijdering.
- Zandvang.
- Contacttank/voorbezinktank.
- Beluchtingscircuit.
- Nabezinktank.
- Effluent polishing (eventueel).
- Slibbehandeling.

Ontwerp RWZI

Roostergoedverwijdering :
- Spleetwijdte: 5 mm.

Zandvang :
- *Oppervlaktebelasting*: 30–40 $m^3/(m^2 \cdot h)$.

Contacttank :
- Zie hiervoor publicatie STOWA (1988); nadere gegevens in literatuurlijst aan het einde van dit hoofdstuk.

Beluchtingscircuit:
- Slibbelasting: 0,05 kg BZV/(kg droge stof · dag).
  BZV = biochemisch zuurstofverbruik.
- Slibgehalte: 3–4 kg/m^3.
- Nitrificatie, denitrificatie en slibproductie: zie hiervoor publicatie Kayser (gegevens in literatuurlijst aan het einde van dit hoofdstuk).
- Fosfor-verwijdering: zie hiervoor publicatie DBW/RIZA (nadere gegevens in literatuurlijst aan het einde van dit hoofdstuk).
  - Chemisch: fosfor neerslaan door toevoegen $FeSO_4$ of $FeCl_3$. Extra slibproductie. Ca. 25% nitrificatie-remming.
  - Biologisch – waterlijn: anaërobe tank, verblijftijd 2 uur òf intermitterend beluchten.
  - Biologisch – sliblijn: phostripproces, magnetisch defosfateren, flocculeren.

Nabezinktank:
- Oppervlaktebelasting bij regenwaterafvoer (RWA):
  0,7, $m^3/(m^2 \cdot uur)$.
- Slibbuffercapaciteit: zie hiervoor publicatie STOWA (1981), gegevens in literatuurlijst aan het einde van dit hoofdstuk.

Effluent polishing:
- Continue zandfiltratie.

Slibbehandeling:
- Gravitatie-indikking:
  - Droge stofbelasting: 20–30 kg ds/($m^2 \cdot$ dag).
  - Hoeveelheid droge stof: 2,5–3%.
- Mechanische slibontwatering:
  - Zeefbandpers.
  - Centrifuge.
  - Kamerfilterpers.
- Slibgisting.

Het *zuiveringsslib* kan vervolgens verder worden verwerkt door:
- Storten.
- Composteren.
- Verbranden.
- Drogen.

Beluchting:
Bij beluchting geldt voor de O_2-vraag:
- BZV-oxidatie: 0,5 × BZV vracht omgezet.
- Endogeen verbruik:
  slibgehalte × volume × temperatuurscoëfficiënt.
- N-kj oxidatie: 4,57 × N-kj vracht omgezet.
  N-kj = stikstot-kjeldahl = alle gereduceerde stikstof.
- Opbrengst denitrificatie: 2,86 × nitraatvracht omgezet (uitgedrukt in stikstof).

Voor de O_2-inbreng geldt

$$O_2\text{-inbreng} = \frac{O_2\text{-vraag} \times O_2\text{-deficiet} \times \text{piekfactor}}{\alpha\text{-factor}}$$

Praktijkparameters
Zie hiervoor tabel 1.28, 1.29, 1.30, en 1.31.

Tabel 1.28 Ontwerpparameters voorbezinktanks

	voorbezinking	nabezinking	
		actief slib	oxidatiebed
oppervlaktebelasting [$m^3/m^2 \cdot h$]	1½ –2½	1–1½	1½
verblijftijd [h]	1–1½	1½ –2	1
mesbelasting [$m^3/m \cdot h$]	<10	<3–5	<5

Tabel 1.29 Ontwerpparameters voor slibinstallaties met actief slib (A = oxidatiesloot, B = laagbelaste, C = middelmatig belaste, D = hoogbelaste actief-slibinstallatie)

	A	B	C	D
BZV-verwijdering	> 95%	> 90%	⩽ 90%	70–80%
nitrificatie	> 95%	> 65%	< 10%	0%
BZV-belasting [kg/m^3 · d]	0,2	0,4	1	3
slibbelasting [kg BZV per kg droog slib. d][1)]	0,05	0,2	0,4*)	1,0
slibgehalte [kg droog slib per m^3]	3	3	2,5	2,5
hydraulische belasting [d^{-1}] = m^3 per d/m^3 beluchtingsruimte]	0,3	4	6	20
diepte tank [m]	3	3	3	3
OC/Load[2)]	2,5	2,5	1,5	1
zuurstofdeficiet	90%	90%	90%	90%
voor oppervlaktebeluchting:				
gemiddeld netto vermogen [kW/i.e.]	0,0023	0,0013	0,0007	0,0005
voor bellenbeluchting:				
inblaasdiepte		3	3	3
luchtdebiet gemiddeld [Nm^3/i.e.]		0,084	0,044	0,031

[1)] Bij slibbelasting tussen 0,5 en 1 daalt het zuiveringsrendement en ontstaat slecht bezinkbaar (zgn.'licht') slib.
[2)] De *OC/Load-verhouding* is het quotiënt van de beluchtingscapaciteit (OC) en de BZV-belasting.

Tabel 1.30 Energierendement van beluchtingssystemen

systeem	[kg O_2 per kWh]
fijne bellen	1 –1,5
middelgrote bellen	0,9–1,3
rotoren	1,2–1,8
puntbeluchters	1,2–2

Tabel 1.31 Slibhoeveelheden

	l/(i.e. · dag)	droogrest [gew.%]
voorbezinking	1,1	5
totaal met laagbelast actief slib	1,87	4,5
totaal met hoogbelast actief slib	1,75	4,5
zuivering met laagbelaste oxidatiebedden	1,22	5,5
zuivering met hoogbelaste oxidatiebedden	1,48	5

1.9 Milieu-effectrapportage (m.e.r.)

Er is behoefte aan een benadering van het milieu in zijn totaliteit en aan een tijdige inventarisatie van de milieu-effecten van grootschalige activiteiten. Deze inventarisatie wordt vastgelegd in een *milieu-effectrapportage* (m.e.r.). Deze aanpak is wettelijk opgenomen in de *Wet milieubeheer*. De m.e.r. is een hulpmiddel bij de bestuurlijke besluitvorming inzake grootschalige activiteiten waarvan verwacht wordt dat ze een aanzienlijke invloed op het milieu hebben. M.e.r. bestaat uit het maken, beoordelen en gebruiken van een *milieu-effectrapport* (MER) en het evalueren achteraf van de gevolgen voor het milieu van een mede op basis van het MER genomen besluit, één en ander met in achtneming van een aantal procedurele richtlijnen. Een MER is een openbaar rapport, waarin de voorspelde milieueffecten van een voorgenomen activiteit en alternatieven daarvoor systematisch en zo objectief mogelijk worden beschreven.

M.e.r.-plichtige activiteiten staan beschreven in het besluit milieueffectrapportage 1994.

De m.e.r.-procedure is opgebouwd uit:
- voorfase;
- startnotitie, inspraak en richtlijnadvies;
- de richtlijnen;
- het m.e.r.;
- toetsingen inspraak;
- het bestuurlijk besluit;
- de evolutie.

Een m.e.r.-rapport bevat tenminste:

a. een beschrijving van hetgeen met de voorgenomen activiteit wordt beoogd;
b. een beschrijving van de voorgenomen activiteit en van de wijze waarop zij zal worden uitgevoerd, alsmede van de alternatieven daarvoor, die redelijkerwijs in beschouwing dienen te worden genomen, en de motivering van de keuze voor de in beschouwing genomen alternatieven;
c. een aanduiding van de besluiten bij de voorbereiding waarvan het milieu-effectrapport wordt gemaakt, en een overzicht van de eerder genomen besluiten van bestuursorganen, die betrekking hebben op de voorgenomen activiteit en de beschreven alternatieven;
d. een beschrijving van de bestaande toestand van het milieu, voor zover de voorgenomen activiteit of de beschreven alternatieven daarvoor gevolgen kunnen hebben, alsmede van de te verwachten ontwikkeling van dat milieu, indien die activiteit noch de alternatieven worden ondernomen;
e. een beschrijving van de gevolgen voor het milieu, die de voorgenomen activiteit, onderscheidenlijk de beschreven alternatieven kunnen hebben, alsmede een motivering van de wijze waarop deze gevolgen zijn bepaald en beschreven;
f. een vergelijking van de ingevolge onderdeel d beschreven te verwachten ontwikkeling van het milieu met de beschreven gevolgen voor het milieu van de voorgenomen activiteit, alsmede met de beschreven gevolgen voor het milieu van elk der in beschouwing genomen alternatieven;
g. een overzicht van de leemten in de onder d en e bedoelde beschrijvingen ten gevolge van het ontbreken van de benodigde gegevens;
h. een samenvatting die aan een algemeen publiek voldoende inzicht geeft voor de beoordeling van het milieu-effectrapport en van de daarin beschreven gevolgen voor het milieu van de voorgenomen activiteit en van de beschreven alternatieven.

Naast de lijst met m.e.r.-plichtige activiteiten bestaat er een lijst van activiteiten waarbij eerst een beoordelingsprocedure moet worden doorlopen om te bepalen of al dan niet een m.e.r.-procedure noodzakelijk is.

Voorbeelden van m.e.r.-plichtige activiteiten zijn onder andere te vinden op het gebied van:
- wegen, spoorwegen en vaarwegen;
- havens en luchtvaartterreinen;
- defensie
- woningbouw;
- landinrichting;
- delfstoffenwinning;
- verwijdering van afvalstoffen;
- bedrijfsterreinen;
- energievoorziening;
- etc.

1.10 Milieuzorg

Een milieuzorgsysteem is een samenhangend geheel van beleidsmatige, organisatorische en administratieve maatregelen, gericht op de beheersing en vermindering van milieubelasting. Het begrip milieuzorg is eind jaren tachtig overkomen waaien uit Amerika en is in diverse Europese landen opgepakt. Zo heeft de Nederlandse overheid geprobeerd het bedrijfsleven te stimuleren over te gaan tot de invoering van milieuzorg door veel informatie te verstrekken en voorlichtingcampagnes op te zetten. De internationale norm voor milieuzorgsystemen is ISO14001. De Europese overheid heeft eveneens gekozen voor het stimuleren van milieuzorg door het opzetten van de zogenaamde EMAS-regeling.

De internationale norm ISO 14001 1996 specificeert de eisen van een milieuzorgsysteem. De norm is toepasbaar op allerlei organisaties ongeacht hun aard en omvang. Het model is gebaseerd op de verbetercirkel: milieubeleid, planning, implementatie en uitvoering, controle en corrigerende maatregelen, beoordeling door de directie.

Centraal staan de volgende elementen:
– voldoen aan wet- en regelgeving
– streven naar continue verbetering
– vermindering milieubelasting

Of een organisatie voldoet aan de eisen van de norm wordt door een onafhankelijke en deskundige (certificatieinstelling) beoordeeld. In Nederland wordt door de Stichting Coördinatie Certificatie Milieuzorgsystemen (SCCM) toegezien op deze certificerende instellingen.

EMAS

Op 29 juli 1993 is de verordening nummer 1836/93 van de Europese Unie gepubliceerd inzake de vrijwillige deelneming van bedrijven uit de industriële sector aan een communautair milieubeheer- en milieuzorgsysteem. De verordening wordt meestal aangeduid als de *EMAS-verordening* waarbij EMAS verwijst naar de Engelse titel van de verordening: 'Eco-Management and Audit Scheme'.

De verordening regelt een vrijwillige deelname van industriële bedrijven aan de invoering van een milieubeheer- en milieuauditsysteem. Het doel van de verordening is 'het bevorderen van continue verbeteringen in de milieuprestatie van industriële activiteiten' door:
– ontwikkeling en implementatie van milieubeleid, milieuprogramma's en milieuzorgsystemen bij bedrijven;
– systematische, objectieve en periodieken evaluatie van de milieuprestaties;
– inlichting van het publiek over de milieuprestaties.

Deelname is vrijwillig: de bedoeling van de verordening is dat bedrijven het belang gaan inzien van het zich laten registreren als bedrijf waar een Eco-audit is uitgevoerd. De in ruil daarvoor verkregen plaats in het Eco-Management and Audit Scheme Register met bijbehorende logo zou moeten worden beschouwd als een aantrekkelijke mogelijkheid voor marktonderscheiding. Het logo dient als kenmerk dat men is ingeschreven als voldoend aan de eisen van de verordening. Indien het bedrijf beschikt over een gecertiffceerd milieuzorg-systeem (conform ISO 14001) is

uitsluitend verificatie nodig van de milieuverklaring (openbaar milieujaarverslag). Hiermee is een goede koppeling bewerkstelligd tussen verificatie van milieuzorgsystemen op basis van (internationale) normen en de EMAS-verordening.

2 Veiligheid

2.1 Instellingen op het gebied van interne veiligheid

Voorschriften, normen en publicaties m.b.t. arbeidshygiëne en arbeidsveiligheid zijn verkrijgbaar bij Servicecentrum Uitgevers (SdU), Christoffel Plantijnstraat 2, 2515 TZ's-Gravenhage, tel. (070) 3789880.

Directoraat-Generaal van de Arbeid
Anna van Hannoverstraat 4, 2595 BJ's-Gravenhage.
Tel. (070) 3334444.
De DGA ressorteert onder het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. Doelstelling: bevorderen van optimale arbeidsomstandigheden t.a.v. veiligheid, bescherming van gezondheid en welzijn.

Arbeidsinspectie
De *Arbeidsinspectie* (voorheen I-SZW) is een dienst van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en is verdeeld over zes regio's in Nederland met regiokantoren in Groningen, Amsterdam, Utrecht, Rotterdam, Arnhem en Roermond. Het hoofdkantoor is gevestigd in Den Haag.

De Arbeidsinspectie is o.m. belast met het toezicht op de naleving van de Arbowet 1998, het Arbobesluit en de Arboregeling. De Arbeidsinspectie kan strafrechtelijk optreden en bestuurlijke boeten opleggen (het zogenoemde lik-op-stukbeleid). Zij stelt o.m. onderzoekingen in en geeft voorlichting op veiligheidstechnisch- en op bedrijfs- en beroepshygiënisch gebied.

Verder heeft de Arbeidsinspectie een wisselende bevoegdheid met betrekking tot de Wet milieubeheer alsmede een informatieve taak inzake het functioneren van ondernemingsraden.

Over de werkzaamheden van de inspectie wordt jaarlijks een verslag uitgebracht. Verder verschijnen er Arbo-Informatiebladen.

Met de inwerkingtreding van het Arbobesluit en de Arboregeling zijn de voormalige publicatiebladen (P-bladen) van de Arbeidsinspectie vervangen door Arbobeleidsregels. Deze geven een invulling van de Arbowetgeving voor praktijksituaties. De beleidsregels zijn geen algemeen bindende voorschriften. Een werkgever mag andere maatregelen treffen dan in de beleidsregels zijn beschreven, mits hetzelfde beschermingsniveau wordt bereikt.

Stoomwezen b.v.

Weena-Zuid 168, 3012 CR Rotterdam; postbus 769, 3000 AT Rotterdam.
Tel. (010) 201 4200.
De instantie heeft o.m. de volgende taken:

- Beoordelen van constructies en materiaal van nieuwe stoomtoestellen, nieuwe damptoestellen en nieuwe drukhouders en verder het beproeven van deze toestellen.
- Periodiek in- en uitwendig onderzoek van in gebruik zijnde stoomtoestellen, damptoestellen en drukhouders. Voor dit onderzoek moeten deze toestellen buiten werking worden gesteld.
- Periodiek oppervlakkig onderzoek wanneer de toestellen in gebruik zijn.

Afdeling Externe Veiligheid

Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM), directie Stoffen, Veiligheid, Straling, Rijnstraat 8, 2515 XP's-Gravenhage. Tel. (070)3394703.

Stichting Arbouw

Arbouw, *Stichting ter bevordering van veiligheid en gezondheid in de bouw.* La Guardiaweg 4, 1043 DG Amsterdam. Postbus 8114, 1005 AC Amsterdam. Tel. (020) 5805580.

Nederlands Normalisatie-instituut (NEN)
Vlinderweg 6, Postbus 5059, 2600 GB Delft. Tel. (015) 2690390. De Stichting NEN is de door het Ministerie van Economische zaken aangewezen instantie om in Nederland de normalisatie te bevorderen en tot stand te brengen. De normen komen tot stand onder de verantwoordelijkheid van *normcommissies*, door de inzet van deskundigen van bedrijfsleven, universiteiten, overheid en andere organisaties. Een *norm* is een technisch regelgevend document gebaseerd op consensus met het doel eenheid te bewerkstelligen, uit het oogpunt van gezondheid, veiligheid of markteconomische overwegingen. Het NEN begeleidt en coördineert de normalisatie-activiteiten ten behoeve van de ontwik-keling van Nederlandse normen en de bijdragen aan mondiale en Europese normalisatie.

2.2 *Brand- en explosiegevaarlijke stoffen*

Tabel 2.1 Combinaties van chemicaliën die zeer gevaarlijk kunnen zijn

contact vermijden van: chemische stof	met
aceton	geconcentreerd nitreerzuur (geconc. H_2SO_4 en HNO_3)
acetyleen	halogenen, koper, kwik en zilver
alkalimetalen	tetrachloorkoolstof en andere halogeenkoolwaterstoffen: CO_2
ammoniak	kwik (b.v. in manometers), chloor, chloorkalk, broom, jodium en fluorwaterstofzuur
ammoniumnitraat	zuren, poedervormige metalen, chloraten, nitrieten, zwavel, fijn verdeelde organische of brandbare stof
aniline	salpeterzuur en waterstofperoxide
azijnzuur	chroomzuur, salpeterzuur, hydroxiverbindingen, ethyleenglycol, perchloorzuur, peroxiden, permanganaten

Tabel 2.1 (vervolg)

contact vermijden van: chemische stof	met
brandbare vloeistof	ammoniumnitraat, chroomzuur, peroxiden in het algemeen, salpeterzuur, halogenen en organische peroxiden
broom	ammoniak, acetyleen, butadieen, butaan, methaan, propaan en andere petroleumgassen, watergas, natriumcarbide, terpentijn, benzeen en fijn verdeelde metalen
calciumcarbide	water
chloor	zie broom
chloordioxide	ammoniak, methaan, fosforwaterstof en zwavelwaterstof
chloraten	ammoniumzouten, zuren, poedervormige metalen, zwavel, fijn verdeelde organische stoffen en brandbare stoffen
chroomzuur	azijnzuur, naphthaleen, kamfer, glycerol, terpentijn, alcohol, brandbare stoffen
fluor	alle andere stoffen
fluorwaterstof	ammoniak en ammonia
jodium kaliumpermanganaat	acetyleen, ammonia, ammoniak, waterstof glycerol, ethyleenglycol, benzaldehyde en zwavelzuur
koolstof (actieve)	calciumhypochloriet, oxidatiemiddelen
koolwaterstoffen	halogenen, chroomzuur, peroxiden
koper	acetyleen, waterstofperoxide
kwik	acetyleen, knalzuur en ammoniak
natriumperoxide	alcoholen, ijsazijn, azijnzuuranhybrid, benzaldehyde, zwavelkoolstof, glycerol, ethyleenglycol, ethylacetaat, methylacetaat en furfural
oxaalzuur	zilver en kwik
perchloorzuur	azijnzuuranhydride, bismuth en legeringen hiervan, alcoholen, papier en hout

Tabel 2.1 (vervolg)

contact vermijden van: chemische stof	met
salpeterzuur	azijnzuur, aniline, chroomzuur, cyaanwaterstof, zwavelwaterstof, brandbare gassen en vloeistoffen
waterstofperoxide	koper, chroom, ijzer, de meeste metalen en hun zouten, brandbare vaste en vloeibare stoffen, aniline, nitromethaan, alcoholen en aceton
zilver	acetyleen, oxaalzuur, wijnsteenzuur, knalzuur, ammoniumverbindingen
zuurstof	oliën, vetten, waterstof en brandbare stoffen
zwavelwaterstof	rokend salpeterzuur, oxidatiemiddelen
zwavelzuur	chloraten, perchloraten en permanganaten

Bron. Merck & Co Supervisors manual safety and fireprotection en H.A.J. Pieters, Veiligheid en chemie.

Tabel 2.2 Stoffen die MET WATER mogen worden geblust

stof	toepassingen
aluminiumresinaten metaalstearaten enz.	metaalschijfpoeders, rubberindustrie, cosmetische industrie, verffabrieken, kunststoffenindustrie, lederindustrie, textiel en papier
benzolperoxide	
bleekpoeders	textielindustrie
koolstof	als filter en ontkleuringsmedium brandstof, absorptieapparaten
nitraten, chromaten, chloraten, perchloraten, bromaten enz.	pyrotechnische industrie, kunstmeststoffen, inktfabrieken, metallurgische technieken
nikkelcarbonyl	nikkelfabrieken volgens 'Mond'-proces
organische vaste stof	
fenol	gasbedrijven, kunststoffenindustrie, kleurstoffen, desinfectantia
fosfor	pyrotechniek, lucifers
zwavel	zwavelzuurfabrieken, rubberfabrieken, gasbedrijven, insecticiden, explosieven
carbonaten, silicaten, fosfaten, chlorides, sulfaten, boraten, nitrieten, jodiden, bromiden, enz.	

Tabel 2.3 Stoffen die NIET MET WATER mogen worden geblust

stof	toepassingen
alkalimetalen	nucleaire industrie
calciumcarbide	acetyleengastoestellen, acetyleenfabricage synth. N-bedrijven, fabricage calciumcyanide
calciumoxide	gebrande kalk
peroxiden van Na en K	bleekmiddelenindustrie
aluminiumchloride kwikchloride	
cyaniden, cyanaten, ferro en ferricyanide, fosforchloride, -sulfide, -oxide, kaliumsulfide, natron- en kaliloog	cyaniden; goudextractie, galvanotechniek, fotografie, insecticiden, $AlCl_3$; katalysator in de organische industrie
kamfer	farmaceutische industrie; celluloidfabricage

2.3 Giftigheid van stoffen (MAC-waarden)

De MAC is een bestuurlijk vast te stellen *maximaal aanvaarde concentratie* van een gas, damp, nevel of van stof in de lucht op de werkplek. Bij de vaststelling van de MAC-waarde wordt zo veel mogelijk als uitgangspunt gehanteerd dat die concentratie bij herhaalde blootstelling ook gedurende een langere of zelfs een arbeidsleven omvattende periode – voor zover de huidige kennis reikt – in het algemeen de gezondheid van zowel de werknemers als hun nageslacht niet benadeelt.

MAC-waarden mogen niet worden beschouwd als in algemene zin toelaatbaar geachte waarden of waarden waarnaar gestreefd moet worden, maar als een uiterste bovengrens die niet mag worden overschreden. Naast de *bestuurlijke* MAC-waarden worden er door

de overheid ook *wettelijke* MAC-waarden vastgesteld. Als wettelijke grenswaarden zijn die MAC-waarden aangewezen, die een volledige 'drietrapsprocedure' hebben doorlopen, hetgeen omvat:
- Advies van de Werkgroep van Deskundigen (WGD)
- SER advies
- Ministeriële vaststelling

MAC-waarden worden veelal uitgedrukt in: mg/m^3, deeltjes/ml lucht of ppm (*ppm = parts per million* = cm^3 stof/m^3 lucht).

*Tabel 2.4 Klasse-indeling giftige stoffen naar **afnemende** giftigheid*

klasse-grenzen [ppm]	stof (als gas in de lucht aanwezig)
≦ 0,1	arseenwaterstof, parathion, nikkelcarbonyl
0,1–2	
2 –20	azijnzuur, aniline, cresol, zoutzuur, cyaanwaterstof, fluorwaterstof, fenol, zwaveldioxide, stikstofdioxide, zwavelwaterstof, benzeen, tetrachloorkoolstof
20 –100	zwavelkoolstof, tri- en perchloorethyleen, ammoniak, koolmonoxide, dichloorethaan, butadieen
100 –500	aceetaldehyde, amylacetaat, methanol, tolueen, xyleen
500 –2500	aceton, ethanol, pentaan
≧5000	kooldioxide

Tabel 2.5 Voorbeelden van giftige stoffen met hun MAC-waarden ingedeeld naar type effect

longprikkelend	MAC [ppm]	verstikkend of bedwelmend	MAC [ppm]	systeem-effecten	MAC [ppm]
ammoniak	20	dichloordifluor-methaan	1000	aniline	0,25
chloor	1	dichloormethaan	100	arseenwaterstof	0,05
chloorpikrine	0,1	ethanol	500	benzeen	1
fluorwaterstof	3,3	ether	100	cyaanwaterstof	10
formaldehyde	1	kooldioxide	5000	fenol	2
fosgeen	0,02			fosforwaterstof	0,3
				koolmonoxide	25
fosforwaterstof	0,3			nitroaniline	1
ozon	0,06			nitrobenzeen	1
stikstofdioxide	2			parathion	0,1[1)]
zoutzuur	5			zwavelkoolstof	10
zwaveldioxide	2			zwavelwaterstof	10

[1)] mg/m^3

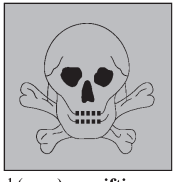
Bron. SZW; Nationale MAC-lijst 2000

2.4 Gevarensymbolen

a **ontplofbaar**

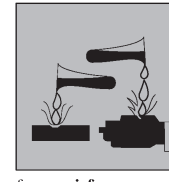
b **zeer licht ontvlambaar**

c **oxiderend**



d **(zeer) vergiftig**

e **schadelijk (Xn) irriterend (Xi)**



f **corrosief**

g **milieugevaarlijk**

h **radioactief**

Kleuren:
- a t/m g: zwart op oranjegele achtergrond
- h: zwart en rood op witte achtergrond

Figuur 2.1 Gevarensymbolen

2.5 *Externe veiligheid*

Externe veiligheid is gericht op het beperken van gevaren voor de omgeving als gevolg van ongewenste gebeurtenissen in procestechnische installaties, waarbij gevaarlijke stoffen kunnen vrijkomen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een risico-analyse, waarmee de risico's bepaald worden waaraan groepen, individuen (mensen, dieren of planten) in een gekozen situatie worden blootgesteld.

Risico

Risico is de combinatie van ongewenste gevolgen van een activiteit en de kans dat deze gevolgen zullen optreden. In de praktijk worden de volgende definities gehanteerd voor de beoordeling van risico's van grote ongevallen:

- *Individueel risico:* de kans die iemand die 24 uur per dag doorbrengt op een bepaalde plaats, gedurende een jaar loopt om te overlijden ten gevolge van een ongeval met de betreffende activiteit.
- *Groepsrisico:* de kans gedurende een jaar op een ongeval met de betreffende activiteit ten gevolge waarvan gelijktijdig een bepaald aantal personen komt te overlijden.

Kwantitatieve risico-analyse

Een *risico-analyse* is opgebouwd uit de volgende onderdelen:

- Indentificatie van ongewenste gebeurtenissen.
- Effectberekening: hierbij wordt de bronsterkte en de verspreiding van stoffen bepaald, veelal op basis van standaard-modellen.
- Kwantificering van de ontwikkelingskansen voor de relevante ongewenste gebeurtenissen.
- Kwantificering van de risico's: berekening van het individueel- en groepsrisico.

Na afronding van de risico-analyse kan een risicobeoordeling plaatsvinden. Hierbij worden de risico's getoetst op aanvaardbaarheid en worden eventueel risicobeperkende maatregelen getroffen. Binnen de risico-analyse kunnen de verschillende risico-beperkende maatregelen worden beoordeeld op hun effectiviteit.

Literatuur

MILIEU (par. 1)
- *Circulaire Industrielawaai*
  Ministerie van VROM
  Den Haag, 1979 (herdruk 1982).
- DBW/RIZA
  Knelpunten bij de invoering van defosfatering
  Deventer, Witteveen en Bos, 1988.
- *Handleiding Milieu-effectrapportage*
  Ministeries van VROM en Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.
- Kayser, R.
  'Ein Ansatz zur Bemessung einstufiger Belebungsanlagen für Nitrifikation-Denitrifikation'
  Gwf-wasser/abwasser 124, H9, S. 419–427, 1983.
- *Nationaal Milieubeleidsplan (NMP2)*
  Tweede Kamer, 1994, 23 560
- STOWA (1981)
  'Richtlijnen voor het ontwerpen van ronde nabezinktanks'
  In: *Hydraulische en technologische aspecten van het nabezink-proces* (deel 2)
  Rijswijk, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- STOWA (1988)
  Handboek *Het voorkomen en bestrijden van licht slib* Rijswijk, Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).
- *Zorgen voor morgen. Nationale milieuverkenning 1985–2010*
  Samson H.D. Tjeenk Willink/RIVM, 1988.

VEILIGHEID (par. 2)
- *Arbojaarboek*
  Uitgave: Nederlands Instituut voor Arbeidsomstandigheden (NIA), Amsterdam en Kluwer Deventer.
- *Chemiekaarten: gegevens voor veilig werken met chemicaliën*
  Uitgave: TNO Arbeid
  Vereniging Nederlandse Chemische
  Industrie, Ten Hagen & Stam Uitgevers.
- *Methoden voor het berekenen van de fysische effecten van het incidenteel vrijkomen van gevaarlijke stoffen* (Gele boek)
  CPR-14, DGA 1988.

– *Methoden voor het bepalen van mogelijke schade aan mensen en goederen door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen* (Groene boek)
CPR-16, DGA 1990.
– *Methoden voor het bepalen en verwerken van kansen* (Rode boek)
CPR-12, DGA 1985.
– *Omgaan met risico's, de risicobenadering in het milieubeleid*
Tweede Kamer, 1988–1989, 21137 nr. 5.
– Rapport Informatie-eisen BRZO '99, CRP-20, SdU 1999

Updates en links

Alle updates en links vindt u op onze internet site:
www.elsevier-vdu.nl/html/ptz/polytech.html

Daar vindt u ook **tips en trucs** om deze cd-rom optimaal te gebruiken.

Over deze uitgave

Redactie: Ir. P.H.H. Leijendeckers Prof. Em (voorzitter), Ir. J.B. Fortuin, Prof. ir. F. van Herwijnen, Ir. G.A. Schwippert

Electronic document design: K. Mussani

Eindredactie: ing. N. Witten, drs. T.J.A. Worm

Uitgave: Reed Business Information bv, Doetinchem

Uitgever: Drs. P.J.M. Meijer-Sasse

ISBN: 90 6228 463 9

Auteurs

Ing. J.A.J. van Atteveld — *Klimaatregeling en leidingsystemen* (hoofdstuk G1). Installatiedeskundige, raadgevend Technies Buro van Heugten b.v., Nijmegen.

Msc. Mar. Eng. J.J. Bakker — *Koeltechniek en warmtepompen* (hoofdstuk G2). Docent energietechniek en installatietechniek, Hogeschool van Utrecht, sector Industriële Techniek.

Ing. M.J.W. van Beek — *Technisch tekenen* (hoofdstuk D1), *Verbinding en bevestiging* (hoofdstuk E1, par. 12.5–12.9) en *Werktuigbouwkunde* (hoofdstuk H, uitgezonderd par. 5.3–5.4).

Prof. Dr. J.G. Bethlehem — *Statistiek* (hoofdstuk A3). Senior adviseur survey-methodologie, Centraal Bureau voor de Statistiek, Sector Methoden en Ontwikkeling, Voorburg. Hoogleraar aan de Universiteit van Amsterdam, Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie.

Dr. Ir. B.A.L. Betlem — *Regel- en besturingstechniek* (hoofdstuk B2, par. 1, 2, 3 en 6). Universitair Docent, Universiteit Twente, Faculteit Chemische Technologie, Dynamica en Beheersing van Processen.

Ir. K.A. Brink — *Bemaling van ontgravingen* (hoofdstuk F2, par. 4). Raadgevend ingenieur, ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Velp.

Prof. Dr. W. Buijs — *Scheikunde* (hoofdstuk A5). Research Fellow Industrial Chemistry, DSM Research, Geleen.

Ir. J.B. Fortuin — *redacteur* — auteur van *Eenheden en symbolen* (hoofdstuk A1) Gepensioneerd, tot 1999 Projectleider Energie bij Tebodin b.v., Den Haag.

Ir. C.P.J.M. Geelen — *Energietechniek* (hoofdstuk G3). Wetenschappelijk research medewerker, TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie, Apeldoorn.

Ing. A. van der Grijn — *Metalen* (hoofdstuk E1, par. 2). Metaalkundige, MAF Metaalkundig Adviesbureu Fryslân, Drachten.

Ir. D. ten Have — *Informatie-techniek* (hoofdstuk B1). Senior IT Adviseur, Philips International b.v., Eindhoven.

Prof. Ir. F. van Herwijnen — *Redacteur* — Auteur van *Bouwtechnische symbolen* (hoofdstuk D2). Directeur/raadgevend ingenieur, Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Veip/Delif. Hoogleraar

Constructief Ontwerpen, faculteit Bouwkunde, Technische Universiteit Eindhoven.

Ir. J. van't Hoff — *Baggerwerken* (hoofdstuk F2, par. 8). Raadgevend ingenieur, Ingenieursbureau Van't Ho., Zeist.

Ir. L. Hommels — *Mechanica* (hoofdstuk C1) en *Toegepaste mechanica* (hoofdstuk C2), Docent mechanica en werktuigonderdelen, Hogeschool Arnhem en Nijmegen, Faculteit Techniek.

Ing. E.H. de Jongh — *Elektro-installatietechniek* (hoofdstuk G4). Docent Hogeschool van Arnhem en Nijmegen, faculteit Techniek, afdeling Elektrotechniek met specialiteit: vermogenselektronica, elektromechanica en energietechniek.

C. de Joode — *Wiskunde* (hoofdstuk A2). Docent wiskunde, Technische Hogeschool Rijswijk.

Dr. Ir. A. Jorissen — *Houtconstructies* (hoofdstuk F3, par. 2). Specialistisch constructeur, ABT Adviesbureau voor bouwtechniek b.v., Velp.

Dipl. Ing. D.R. Kleborn — *Kunststoffen* (hoofdstuk E1, par. 3). Product Data Manager, DSM Engineering Plastics, Geleen.

Mr. Ing. G.J. Kremers — Coördinator *Milieu en veiligheid* (hoofdstuk K), auteur van *Algemeen* (par. 1.1), *Afvalstoffen* (par. 1.2), *Bodemverontreiniging* (par. 1.3). Auteurs:

- Ir. B.W. Hoekstra — *Luchtverontreiniging* (par. 1.5).
- Ir. E.H. Marsman — *Oppervlaktewater/waterbodem* (par. 1.6), *Afvoer van afvalwater via de riolering* (par. 1.7), *Zuivering afvalwater* (par. 1.8).
- Ing. a.L. van der Steeg — *Veiligheid* (par. 2).
- Ing. B.H. Willihagen — *Geluid- en trillinghinder* (par. 1.4).
- Ing. L.H.T. Wuijster — *Milieu-effectrapportage* (par. 1.9), *Milieuzorg* (par. 1.10). Tauw Infra Consult b.v., Deventer.

Ir. P.H.H. Leijendeckers Prof. Em. — *Redacteur* (voorzitter redactiecommissie). Prof. Em. Technische Universiteit Eindhoven.

Ir. L.F.H. Lemmens — *Elektronica* (hoofdstuk I). Technisch redacteur, Segment b.v., Beek (L).

Ing. J.J. Mecking — *Materialen in de bouw* (hoofdstuk E1, par. 5–12.4). Bouwkundige, ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Velp.

Ing. J.H.H. Mennen — *Procestechniek* (hoofdstuk J). Senior Process Engineer, DSM Services Engineering Stamicarbon, Geleen.

Ir. J.F. van Meurs — *Bouwfysica* (hoofdstuk F4). Bouwfysica specialist, Raadgevend Technies Bureau van Heugten b.v., Nijmegen.

Ir. R. Nijsse — *Berekenen van bouwconstructies* (hoofdstuk F3, par. 1). Directeur/raadgevend ingenieur, ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Velp.

J.G.M. Nillezen — *Tabellen voor staalconstructies* (hoofdstuk E2) en Betonconstructies (hoofdstuk F3, par. 4). Constructeur, ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Velp.

J. Ouwehand — *Besturingstechniek en PLC-techniek* (hoofdstuk B2, par. 4–5) en *Pneumatische en hydraulische componenten* (hoofdstuk H, par. 5.3–4). Vice voorzitter van het College van Bestuur, ROC A 12, Ede.

Dr. Ir. I.G. Rácz — *Procestechniek* (hoofdstuk J). Universitair hoofddocent, Universiteit Twente, Enschede.

Dr. Ir. P.P.J. Ramaekers — *Technische keramiek* (hoofdstuk E1 par. 4); Directeur Training & Technology b.v., Sittard. co-auteurs:

– Dr. Ing. Y.G. Roman
– Dr. Ir. R.A. Terpstra

Ing. J. Rensman — *Algemene gegevens* (hoofdstuk E1, par. 1). Manager Kwaliteitszorg, ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Velp.

Mevr. Dr. Ing. Y.G. Roman — *Technische keramiek* (hoofdstuk E1, par. 4; co-auteurs Dr. Ir. P.P.J. Ramaekers en Dr. Ir. R.A. Terpstra). Project Manager, Joint Innovation b.v., Arnhem.

Dr. R. Schoenmakers — *Natuurkunde* (hoofdstuk A4). TEM (Transmission Electron Microscope) Application Software Engineer, FEI Electron Optics, Eindhoven.

Ir. G.A. Schwippert — *Redacteur.* Directeur Arthur's Consultancy v.o.f., Technisch en Economisch Adviesbureau, Pijnacker.

H.A.A.J. Seinen — *Lijmen* (hoofdstuk E1, par. 13). Directeur Remmers Bouwchemie b.v., Hoogeveen.

Ing. E. Smienk — *Civiele techniek* (hoofdstuk F2, par. 1–3, 5–7). Hoofd civiele techniek/projectleider, ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Velp.

Dr. Ir. R.A. Terpstra — *Technische keramiek* (hoofdstuk E1, par. 4); co-auteurs Dr. Ir. P.P.J. Ramaekers en Dr. Ing. Y.G. Roman. Directeur CEPAration, Helmond.

Ir. H. visser — *Landmeten* (hoofdstuk F1). Technical Manager & New Business Development, Omnistar b.v., Leidschendam.

Ing. J.A.M. van Vliet — *Staalconstructies* (hoofdstuk F3, par. 5). Raadgevend ingenieur, ABT Adviesbureau voor Bouwtechniek b.v., Velp.

Ir. S.N.M. Wijte — *Steenconstructies* (hoofdstuk F3, par. 3). Adviseur, Adviesbureau J.G. Hageman b.v., Rijswijk.

Auteursrecht

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this work may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without written permission from the publisher.

© 2004 Reed Business Information bv
Afdeling Vakdocumentaire uitgaven
Postbus 4, 7000 BA Doetinchem
Telefoon: (0314) 35.82.99
Fax: (0314) 35.82.59
E-mail: info@elsevier-vdu.nl
Internet: http://www.elsevier-vdu.nl

Aansprakelijkheid

Deze cd-rom is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. De uitgever stelt zich echter niet aansprekelijk voor de gevolgen van eventueel nog voorkomende onjustheden in de inhoud van deze uitgave.

Netwerken

Deze cd-rom is bestemd voor gebruik in een stand alone-computer. Voor gebruik in een netwerk gelden afwijkende leveringsvoorwaarden. Deze zijn op aanvraag verkrijgbaar. Het is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming deze cd-rom in een netwerk te gebruiken.

Helpdesk

Voor vragen over deze cd-rom kunt u contact opnemen met de klantenservice, telefoon: (0314) 35.82.99 of een e-mail sturen aan: info@elsevier-vdu.nl

Klik hier om het formulier online in te vullen

Reactieformulier cd-rom Poly-Technisch

De redactie van deze cd-rom is bijzonder geïnteresseerd in uw op- of aanmerkingen betreffende deze uitgave. Zij stelt het zeer op prijs wanneer u onderstaande vragen invult en via fax, post of e-mail aan ons retour zendt.

Heeft u suggesties voor aanvullingen of wijzigingen?

.....

Welke onderdelen raadpleegt u geregeld?

.....

Welke onderdelen gebruikt u minder vaak?

.....

Wat vindt u van het bedieningsgemak van deze cd-rom?

.....

Over welke andere onderwerpen zou u graag een cd-rom zien verschijnen?

.....

Eventuele andere opmerkingen?

.....

Naam: .....

Functie: .....

Straat: .....

Postcode + plaats: .....

Telefoon: .....

E-mail adres: .....

Fax of stuur uw reactie naar:
Reed Business Information bv
Afdeling Vakdocumentaire uitgaven
Antwoordnummer 395
7000 VB Doetinchem
(geen postzegel nodig)

Telefoon (0314) 35 82 99
Fax (0314) 35 82 59
e-mail: info@elsevier-vdu.nl
internet: http://www.elsevier-vdu.nl

versie 2004