

BEREKENING VAN DE STROMINGSWEERSTAND IN LEIDINGSYSTE- MEN	DSM Standard
	CP 3.5.1-4.6
	(PR 29)
	Code of Practice
	uitgave: 1996 - 03 bladzijde: 1 van 42

INHOUD

Hoofdstuk 1	Algemeen
Hoofdstuk 2	De stromingsweerstand van rechte leidingen
Hoofdstuk 3	Weerstandsfactor ζ voor de extra drukverliezen in bochten, spiraalvormig gebogen leidingen en dergelijke.
Hoofdstuk 4	Weerstandsfactor ζ voor de extra drukverliezen in expansiestukken
Hoofdstuk 5	Weerstandsfactor ζ voor de extra drukverliezen in appendages
Hoofdstuk 6	Weerstandsfactor voor de extra drukverliezen bij in- en uitstromingen
Hoofdstuk 7	Weerstandsfactor ζ_e voor de extra drukverliezen in vernauwingen en verwijdingen
Hoofdstuk 8	Weerstandsfactor voor de extra drukverliezen bij vertakkingen (splitsingen en samenvloeiingen van stromen)
Hoofdstuk 9	Weerstandsfactor ζ voor de extra drukverliezen over meetschijven, in meettuiten, venturimeetbuizen en dall-tubes
Hoofdstuk 10	Weerstandsfactor ζ voor de drukverliezen over zeefgazen, smoorplaten, geperforeerde platen en pijpenbundels
Hoofdstuk 11	Viscositeiten
Hoofdstuk 12	Vermelde normatieve documenten

HOOFDSTUK 1

INHOUD

1	Algemeen
1.1	Inleiding
1.2	Eenhedenstelsel
1.3	Notaties
1.4	Algemene weerstandsformule
1.5	Weerstandsformule voor expanderende gassen bij relatief grote drukval

1 ALGEMEEN

1.1 INLEIDING

Wanneer een gas of een vloeistof door een leidingsysteem stroomt, is de totale druk aan het einde van dit systeem (afgezien van drukveranderingen) lager dan aan het begin.

Dit drukverschil wordt veroorzaakt door de wrijving die de stromende deeltjes zowel van de wand als van elkaar ondervinden.

Om bij technische installaties de grootte van bijvoorbeeld pompen en ventilatoren te kunnen bepalen, moet het drukverschil over de verschillende onderdelen (veelal drukverlies genaamd) bekend zijn. Tot deze onderdelen behoren onder andere leidingen, appendages, koelers, verhitters, expansiestukken, enzovoort.

In deze norm is aangegeven op welke wijze het drukverlies in leidingsystemen in het algemeen zal kunnen worden bepaald. Voor meer nauwkeurige berekeningen, alsook voor uitgebreidere informatie wordt verwezen naar rapport nr. 4569 CL-APS 1.

DE NAUWKEURIGHEID VAN BEREKENINGEN WELKE AAN DE HAND VAN DIT DOCUMENT WORDEN UITGEVOERD, LIGT IN HET ALGEMEEN BINNEN 15%.

DIT DOCUMENT GELDT NIET VOOR HET BEREKENEN VAN HET DRUKVERLIES BIJ DE STROMING VAN NIET-NEWTONSE VLOEISTOFFEN, ZOALS POLYMEREN EN RUBBERS.

1.2 EENHEDENSTELSEL

In dit dokument is het SI(Système International d'Unités) toegepast. In de tabel op bladzijde 3 is volledigheidshalve de conversie naar het Angelsaksisch Stelsel in SI-eenheden opgenomen.

Conversie

GROOTHEID		SI		ANGELSAKSISCH STELSEL	
		basisgrootheden	grondeenheden	basisgrootheden	grondeenheden
		lengte massa tijd	m kg s	lengte kracht tijd	ft lbf s
NAAM	SYMBOOL	EENHEID		EENHEID	
kracht	F	N		lbf (pound-force)	
gewicht(skracht)	G			1 lbf $\approx$ 4,45 N	
massa	m	kg		lbf $\cdot$ s ² /ft 1 lbf $\cdot$ s ² /ft $\approx$ 14,59 kg	
dichtheid	ρ	kg/m ³		lb/ft ³ 1 lb/ft ³ $\approx$ 16,02 kg/m ³	
druk	p	Pa		lbf/ft ² (1 lbf/ft ² $\approx$ 47,88 Pa) lbf/in ² = psi 1 psi $\approx$ 6895 Pa	
arbeid	$W, (A)$	J = N $\cdot$ m (= W $\cdot$ s)		ft $\cdot$ lbf 1 ft $\cdot$ lbf $\approx$ 1,356 J	
energie	$E, (W)$				
hoeveelheid warmte	Q	J		Btu 1 Btu $\approx$ 1055 J	
vermogen	P	W (= J/s = N $\cdot$ m/s)		ft $\cdot$ lbf/s 1 ft $\cdot$ lbf/s = 1,356 W 1 hp $\approx$ 745,7 W	
warmtestroom (verwarmingscap.)	Φ	W (= J/s = N $\cdot$ m/s)		Btu/s 1 Btu/s $\approx$ 1055 W	
dynamische viscositeit	η	Pa $\cdot$ s (= N $\cdot$ s/m ²)		lbf $\cdot$ s/ft ² 1 lbf $\cdot$ s/ft ² $\approx$ 47,88 Pa $\cdot$ s	
kinematische viscositeit	ν	m ² /s		ft ² /s 1 ft ² /s $\approx$ 0,0929 m ² /s	
temperatuur	T	K (Rankine)		°R (Rankine) $T_K = 5/9 T_R$	

1.3 NOTATIES

	SI-eenheden	
A	m^2	Doorstroomoppervlak
D_i	m	Inwendige leidingdiameter
D_{eq}	m	Equivalente leidingdiameter (voor de bepaling van de relatieve gladheid D_{eq}/k)
Φ_m	kg/s	Massastroom (= doorstromende massa-hoeveelheid)
g	m/s^2	Versnelling van de vrije val
Δh	m	Geodetisch hoogteverschil
k	mm	Hydraulisch equivalente ruwheid van de leidingwand
L	m	Totale leidinglengte, inclusief bouwlengten van appendages, hulpstukken, enzovoort, alsmede de ontwikkelde lengten van bochten, echter exclusief de lengten van geleidelijke (conische) vernauwingen en verwijdingen
m	-	Kleinste doorstroomoppervlak / grootste doorstroomoppervlak
Δp	Pa	Totale drukverlies (statische + dynamische druk)
$\Delta p_1, \Delta p_2 \dots$	Pa	Verliezen in totale druk in apparaten (warmtewisselaars, scheidingskolommen, enzovoort).
Re	-	Getal van Reynolds
v	m/s	Stroomsnelheid
α	-	Contractiecoëfficiënt
β	°	Conushoek
ρ	kg/m^3	Dichtheid bij procesdruk en procestemperatuur
δ		Ombuigings- resp. vertakkingshoek
$\zeta_1, \zeta_1 \dots$	-	Weerstandsfactoren voor de extra drukverliezen in bochten, appendages, instromingen, enzovoort.
ζ_e	-	Weerstandsfactor voor het eindverlies
η	Pa·s	Dynamische viscositeit
ν	m^2/s	Kinematische viscositeit
λ	-	Weerstandscoefficiënt voor een rechte leiding
ϕ	-	Correctiefactor

1.4 ALGEMENE WEERSTANDSFORMULE

Het totale drukverlies in een leiding kan worden berekend met de formule:

$$\Delta p = \left(\lambda \cdot \frac{L}{D_i} + \sum \zeta_n \right) \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \sum \Delta p_n + \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (1)$$

De formule geldt voor een leidingsysteem van constante diameter en bij constante stroomsnelheid. Indien in een leidingsysteem verschillende diameters en/of verschillende stroomsnelheden voorkomen, moet het systeem in stukken van gelijke diameter en/of gelijke snelheid worden onderverdeeld en het drukverlies van de afzonderlijke stukken worden berekend en daarna worden gesommeerd.

In de formule is L de totale leidinglengte, inclusief de bouwlengten van appendages, hulpstukken, enzovoort en de ontwikkelde lengten van bochten; de lengten van geleidelijke vernauwingen of verwijdingen worden niet meegeteld.

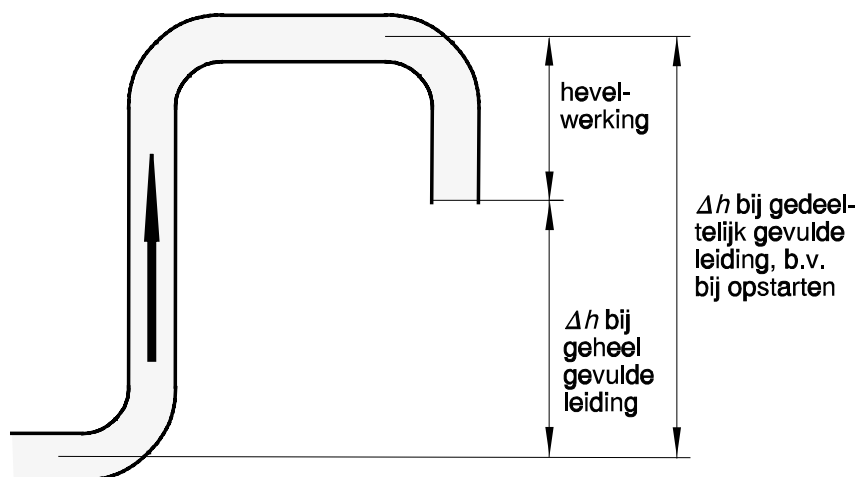
Voor de weerstandscoefficiënt λ zie hoofdstuk 2.

De grootheden ζ_1 , ζ_2 , enzovoort zijn de weerstandsfactoren voor de extra drukverliezen in bochten, expansiestukken, appendages, instromingen (hoofdstuk 3 tot en met 6), meetschijven, meettuiten, enzovoort, zeefgazen en smoorplaten (hoofdstuk 9 en 10)

De grootheid ζ_e is, voor het geval dat het leidingstuk gevolgd wordt door een nauwere of wijdere leiding, alsook bij een vertakking, de weerstandsfactor voor het eindverlies (hoofdstuk 7 en 8), en voor het geval de leiding in een grote ruimte uitmondt, de weerstandsfactor van de uitstroming (hoofdstuk 6); de weerstand van de aansluiting, respectievelijk uitstroming, wordt steeds bij het voorafgaande leidingstuk gesommeerd.

Ter vereenvoudiging wordt bij stroomsplitsingen (hoofdstuk 8) gerekend met een weerstandsfactor voor het eindverlies van de toestromende tak $\zeta_e = 0$. In dit geval moet echter steeds een instroomverlies voor de afvloeiende takken in rekening worden gebracht.

De drukverliezen Δp_1 , Δp_2 , enzovoort zijn de verliezen in totale druk in apparaten (deze zijn belastingsafhankelijk; opgave vragen aan de fabrikant, zonodig bij verschillende belastingen).



Het hydrostatisch drukverschil $\rho \cdot g \cdot \Delta h$ moet in rekening worden gebracht als begin- en eindpunt niet op dezelfde hoogte liggen, Δh is positief als het eindpunt hoger ligt en negatief als het eindpunt lager ligt, zie ook figuur 1.1. De algemene weerstandsformule geldt zowel voor vloeistoffen als voor gassen. Voor deze laatste echter slechts als het totale drukverlies kleiner is dan ca. 10% van de absolute druk aan het begin van de leiding. Is het drukverlies groter, dan moet in verband met het veranderen van de dichtheid een correctie worden toegepast zoals aangegeven onder hoofdstuk 1.5

Figuur 1.1

1.5 WEERSTANDSFORMULE VOOR EXPANDERENDE GASSEN BIJ RELATIEF GROTE DRUKVAL

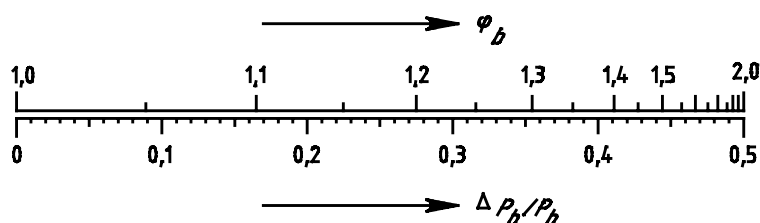
Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 1.4 mag de algemene weerstandsformule alleen dan voor gassen worden gebruikt, wanneer het drukverlies Δp over het leidingsysteem kleiner is dan circa 10% van de absolute druk aan het begin van de leiding. Is de drukval groter, dan moet op de algemene weerstandsformule een correctie worden toegepast. Afhankelijk van het feit of de omstandigheden aan het begin van de leiding bekend zijn, verloopt de berekening als volgt:

1.5.1 De omstandigheden aan het begin van de leiding zijn bekend

Met de algemene weerstandsformule (1) wordt een eerste benadering Δp_b voor het drukverlies bepaald, waarbij wordt gerekend met de dichtheid en de stroomsnelheid zoals die aan het begin van de leiding heersen. Het feitelijke drukverlies Δp wordt berekend door de eerste benadering Δp_b te vermenigvuldigen met een correctiefactor φ_b .

$$\Delta p = \varphi_b \cdot \Delta p_b \quad (2)$$

De correctiefactor φ_b hangt af van de verhouding tussen Δp_b en p_b (= de absolute druk aan het begin van de leiding) en kan worden afgelezen uit de dubbelschaal van figuur 1.2



Figuur 1.2: Correctiefactor φ_b voor isothermische stroming

1.5.2 Omstandigheden aan het eind van de leiding zijn bekend

Met de algemene weerstandsformule (1) wordt een eerste benadering Δp_e voor het drukverlies bepaald, waarbij wordt gerekend met de dichtheid en de stroomsnelheid zoals die aan het eind van de leiding heersen.

Het feitelijke drukverlies Δp wordt berekend door de eerste benadering Δp_e te vermenigvuldigen met een correctiefactor φ_e .

$$\Delta p = \varphi_e \cdot \Delta p_e \quad (3)$$

De correctiefactor φ_e hangt af van de verhouding tussen Δp_e en p_e (= de absolute druk aan het eind van de leiding) en kan worden afgelezen uit de dubbelschaal van figuur 1.3

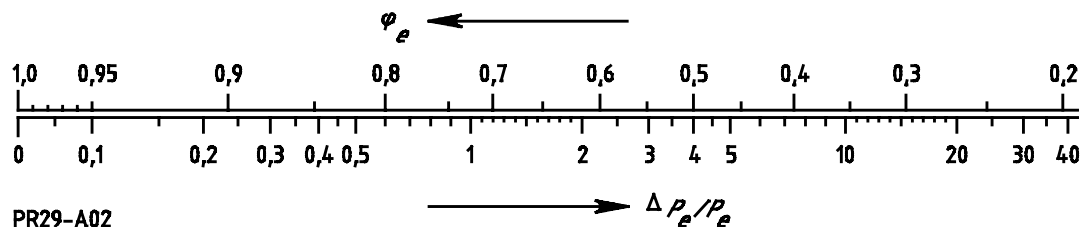


Fig. 1.3: Correctiefactor φ_e voor isothermische stroming.

Opmerking:

Deze berekeningen mogen slechts worden toegepast als aan de volgende voorwaarden is voldaan:

- a: De gassnelheid bedraagt nergens in de leiding meer dan circa 60 m/s;
- b: De stroming verloopt isothermisch. Dit zal vrijwel steeds het geval zijn, mits van buitenaf geen verwarming of afkoeling van (een deel van) de leiding plaatsvindt.

Voor leidingen waarbij niet aan deze voorwaarden wordt voldaan en voor leidingen waarin hoogteverschillen van meerdere honderden meters voorkomen, en uit dien hoofde met de verandering van de dichtheid van het gas rekening moet worden gehouden, wordt verwezen naar rapportnummer 4569 CL-APS 1.

HOOFDSTUK 2

INHOUD

2	De weerstand van rechte leidingen
2.1	Leidingen met ronde doorsnede
2.1.1	Laminaire stroming
2.1.2	Turbulente stroming
2.2	Leidingen met doorsnede van willekeurige vorm
2.2.1	Laminaire stroming
2.2.2	Turbulente stroming

2 DE WEERSTAND VAN RECHTE LEIDINGEN

2.1 LEIDINGEN MET RONDE DOORSNEDE

Het drukverlies in een recht leidingstuk met ronde doorsnede bedraagt:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (4)$$

De weerstandscoefficiënt λ is afhankelijk van het getal van Reynolds en/of de (hydraulisch-equivalente) ruwheid van de leiding.

Voor de waarde van λ onder verschillende omstandigheden zie figuur 2.3.

Het getal van Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D_i}{\nu} \quad (5)$$

Voor gegevens over de ruwheid zie de tabel onder hoofdstuk 2.2.2.

2.1.1 Laminaire stroming

Bij $Re < 2300$ is de stroming laminair en heeft de ruwheid geen invloed op de weerstand. Wel moet er op worden gelet of door aankorsting de doortocht van de leiding kan verminderen. Bij laminaire stroming geldt:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

2.1.2 Turbulente stroming

Bij $Re > 2300$ moet met turbulente stroming worden gerekend; de ruwheid heeft dan een aanmerkelijke invloed op de weerstand. De grootte van de invloed hangt af van de verhouding diameter/hydraulisch equivalente ruwheid. Deze verhouding D_i/k , ook wel relatieve gladheid genoemd, is als parameter gehanteerd in figuur 2.3

Opmerking:

In vele gevallen zal een leiding na verloop van tijd door aangroeiing of corrosie kleiner in diameter (en ruwer) respectievelijk ruwer worden. Indien dit kan worden verwacht, verdient het aanbeveling hiermee reeds bij de aanvang rekening te houden. Algemene richtlijnen zijn hiervoor echter moeilijk te geven.

2.2 LEIDINGEN MET DOORSNEDE VAN WILLEKEURIGE VORM

Bij stroming door een leiding met een niet-ronde doorsnede kan niet worden gesproken van een diameter van de leiding. In de plaats hiervoor moet worden gerekend met de equivalente leidingdiameter:

$$D_{eq} = \frac{4A}{O} = \frac{4 \times \text{doorstroomde oppervlak}}{\text{natte omtrek}} \quad (7)$$

De formule voor het drukverlies wordt dan:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D_{eq}} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (8)$$

En het getal van Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D_{eq}}{\nu} \quad (9)$$

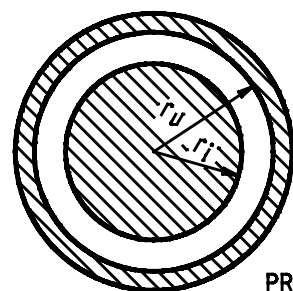
2.2.1 Bij laminaire stroming wordt de weerstandscoefficiënt voor niet-ronde doorsneden:

$$\lambda = \varphi \cdot \frac{64}{Re} \quad (10)$$

een functie van A en O .

Voor een ringvormige doorsnede (zie figuur 2.1) is $\varphi = 1,5$ mits $r_u/r_i < 3$. Voor grotere waarden van r_u/r_i raadplege men rapportnr. 4569 CL-APS.1.

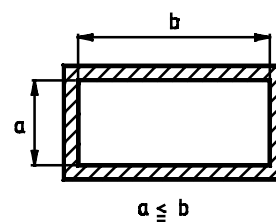
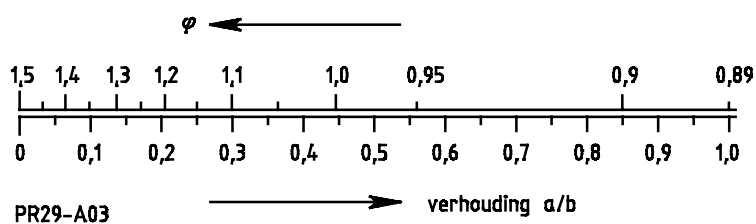
Voor leidingen met een rechthoekige doorsnede gelden voor φ de op de dubbelschaal in figuur 2.2 weergegeven waarden.



φ is

PR29-A05

Figuur 2.1



Figuur 2.2: Verband tussen φ en a/b in leidingen met rechthoekige doorsnede bij laminaire stroming.

2.2.2 Bij turbulente stroming verlopen de berekeningen hetzelfde als bij leidingen met ronde doorsnede (2.2.1), echter met dien verstande dat moet worden gerekend met de equivalente diameter D_{eq} . In figuur 2.3 moet dan D_i/k gelezen worden als D_{eq}/k .

Hydraulisch-equivalente ruwheid van pijpen

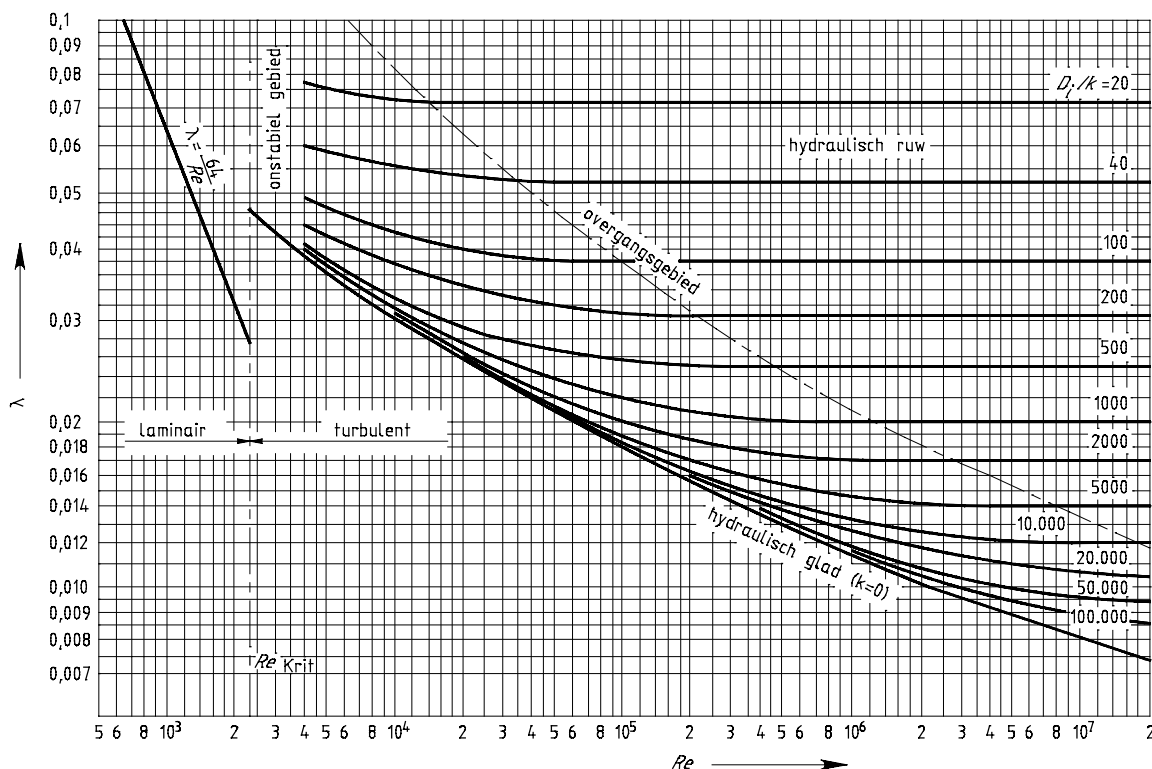
PIJPMATERIAAL EN WIJZE VAN VERVAARDIGING	TOESTAND	HYDRAULISCH- EQUIVALENTE RUWHEID k IN mm
<u>getrokken pijpen van:</u> glas, koper, brons, messing, lood, aluminium, andere lichtmetalen en kunststoffen	nieuw, technisch glad	$\leq 0,0015$
<u>stalen pijpen:</u> naadloze handelspijp en gelaste pijp	nieuw matig geroest, lichte korstvorming zware korstvorming	0,05 0,3 *) ≤ 3
verzinkte stalen pijp	nieuw	0,15
gebitumeerde stalen pijp	nieuw gebruikt met roestplekken meerdere jaren in gebruik matig geroest met lichte korstvorming met zware korstvorming	0,05 0,15 1 **) ≤ 3
<u>gietijzeren pijpen</u> (met flens- of mofverbindingen)	nieuw, gebitumeerd nieuw, niet bekleed matig geroest zware korstvorming	0,13 0,25 1,3 **) ≤ 3
<u>CrNi-stalen pijpen</u>		0,05
<u>betonnen leidingen</u>	nieuw, gewapend beton zorgvuldig afgesmeerd gewapend beton zorgvuldig afgesmeerd, na meerdere jaren in bedrijf te zijn geweest nieuw, zonder te zijn afgesmeerd ruw beton	0,25 0,50 1 **) ≤ 3
<u>asbestcement pijpen</u>	nieuw	0,1

*) Voor leidingen in niet corrosieve media wordt geadviseerd conform API en VDI als hydraulisch-equivalente ruwheid met $k = 0,05$ mm te rekenen.

**) Voor de doorsneesituatie wordt geadviseerd met deze waarde te rekenen.

Opmerking:

k is de hydraulisch-equivalente ruwheid die aan de hand van drukverliesmetingen is bepaald; k mag niet worden verward met de geometrische oppervlakteruwheid.



Figuur 2.3: Weerstandscoefficiënt λ als functie van Re en/of D_i/k

Opmerkingen

1. Voor leidingen met niet-ronde doorsnede moet worden gerekend met

$$Re = \frac{v \cdot D_{eq}}{\nu} \quad \text{en met } D_{eq}/k \quad (D_{eq} \text{ is de equivalente diameter, zie hiervoor hoofdstuk 2.2}).$$

2. Voor de bepaling van de verhouding D_i/k (resp. D_{eq}/k) moeten de beide grootheden in dezelfde eenheid worden uitgedrukt.
Dit betekent dat bij toepassing van het SI zowel D_i (resp. D_{eq}) als k in de eenheid m moet worden uitgedrukt.

HOOFDSTUK 3

INHOUD

3	De weerstandsfactor ζ voor de extra drukverliezen in bochten en spiraalvormig gebogen leidingen
3.1	Inleiding
3.2	Bochten met ronde doorsnede
3.2.1	Enkelvoudige bochten met verschillende ombuigingshoeken
3.2.2	Meerdere bochten achter elkaar
3.3	Uit secties gelaste bochten en dergelijke
3.3.1	Gelaste knik in leiding met ronde doorsnede
3.3.2	Uit secties gelaste bochten van 90 ° met ronde doorsnede
3.4	Spiraalvormig gebogen leidingen
3.5	Bijzondere bochtvormen
3.5.1	Bochten met niet-ronde doorsnede
3.5.2	Geplooid bochten

3 DE WEERSTANDSFACTOR ζ VOOR DE EXTRA DRUKVERLIEZEN IN BOCHTEN, SPIRAAL-VORMIG GEBOGEN LEIDINGEN EN DERGELIJKE

3.1 INLEIDING

De drukverliezen in bochten worden onderverdeeld in:

3.1.1 Wrijvingsverliezen

Hiermede is reeds rekening gehouden in de algemene weerstandsformule (1) door voor L de totale lengte in te vullen, waarbij de ontwikkelde lengten van bochten zijn inbegrepen.

3.1.2 Ombuigingsverliezen

Welke weer te splitsen zijn in:

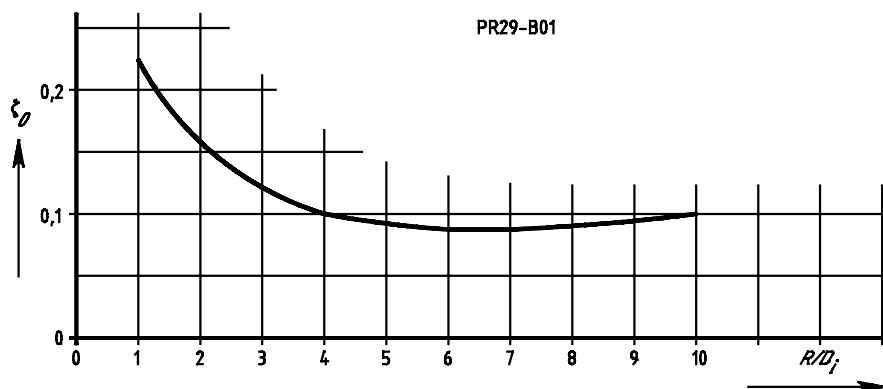
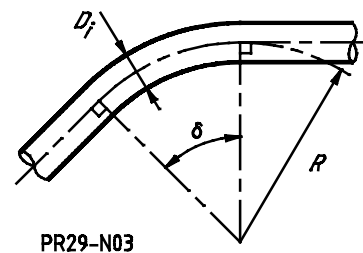
- verliezen door loslaten van de stroming aan de binnenzijde van de bocht;
- verliezen door dwarsstromingen.

De onder 3.1.2 genoemde ombuigingsverliezen zijn EXTRA DRUKVERLIEZEN, welke in rekening worden gebracht door de weerstandsfactor ζ .

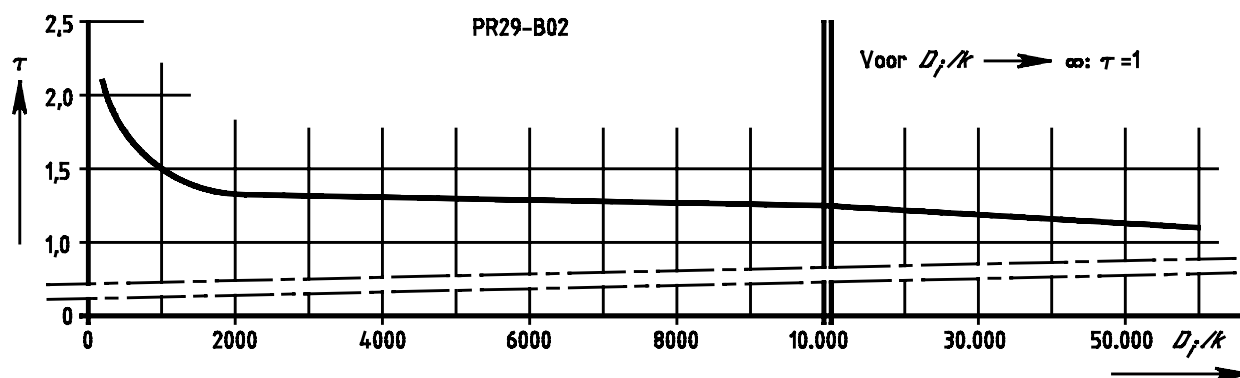
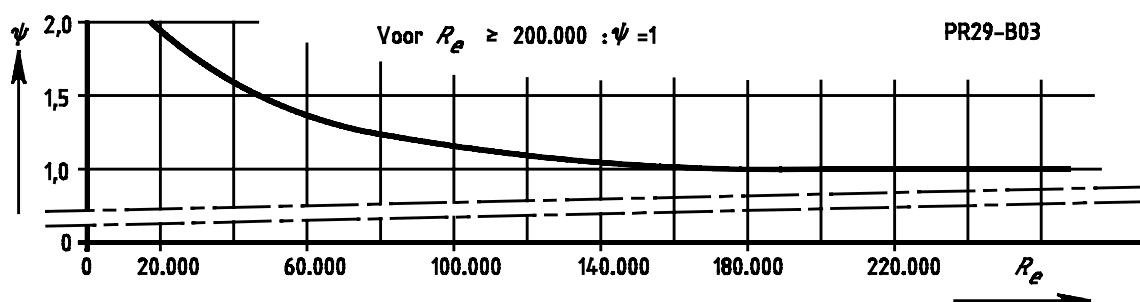
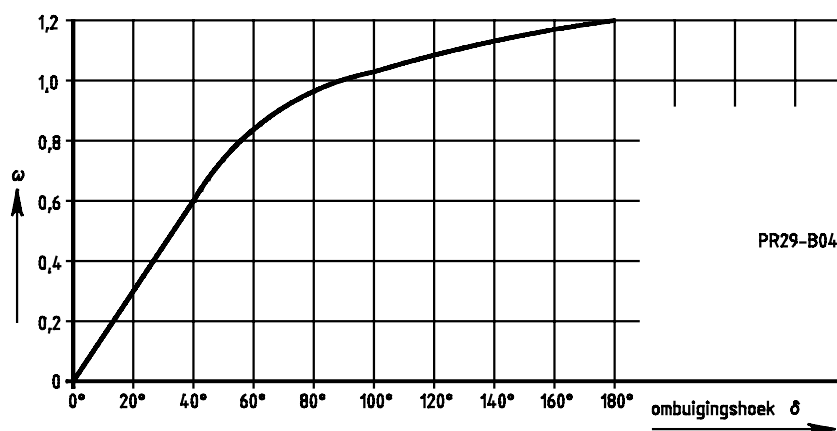
3.2 BOCHTEN MET RONDE DOORSNEDE

3.2.1 Enkelvoudige bochten met verschillende ombuigingshoeken

De weerstandsfactor ζ kan voor de verschillende bochten bepaald worden aan de hand van de figuren 3.1 tot en met 3.4. Het produkt van de afzonderlijke factoren ζ_o , τ , Ψ en ω geeft ζ .



Figuur 3.1: Ongecorrigeerde weerstandsfactor ζ_o van een 90°-bocht met ronde doorsnede, als functie van de buigstraal

Figuur 3.2: Correctiefactor τ voor de (hydraulisch-equivalente) ruwheidFiguur 3.3: Correctiefactor ψ voor het getal van ReynoldsFiguur 3.4: Correctiefactor ω voor de ombuigingshoek

De weerstandsfactor van een bocht bedraagt aldus: $\zeta = \zeta_o \cdot \tau \cdot \psi \cdot \omega$

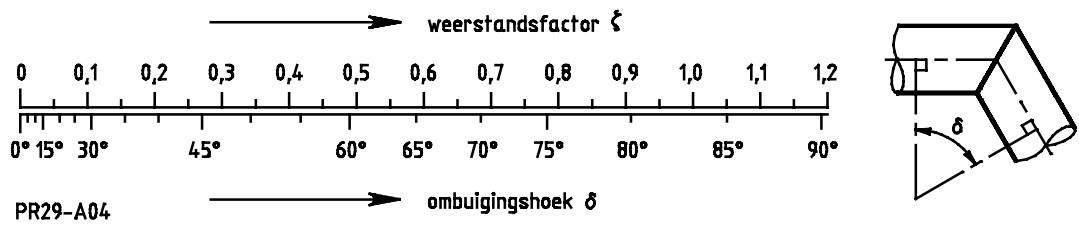
3.2.2 Meerdere bochten achter elkaar

Wanneer twee bochten achter elkaar worden geplaatst is de totale weerstandsfactor $\zeta_{\text{tot.}}$ meestal wat lager dan de som van de weerstandsfactoren van de afzonderlijke bochten. Bij normale berekeningen kan echter worden volstaan met het optellen van de weerstandsfactoren $\zeta_1 + \zeta_2$ enz. Voor meer nauwkeurige berekeningen wordt verwezen naar rapportnummer 4569 CL-APS 1.

3.3 UIT SECTIES GELASTE BOCHTEN E.D.

3.3.1 Gelaste knik in leiding met ronde doorsnede

De weerstandsfactor kan worden afgelezen in de dubbelschaal van figuur 3.5.



Figuur 3.5:

Verband tussen de weerstandsfactor ζ en de ombuigingshoek δ

3.3.2 Uit secties gelaste bochten van 90 ° met ronde doorsnede

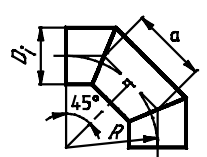
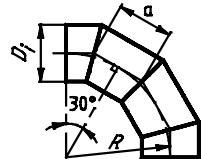
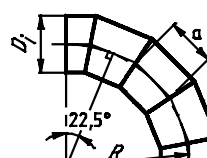
De in tabel 3.1 gegeven weerstandsfactoren ζ zijn de gemiddelden van de ζ -waarden voor gladde en ruwe bochten. Deze zijn voldoende nauwkeurig voor normale berekeningen. Voor meer nauwkeurige gegevens zie rapportnummer 4569 CL-APS 1.

In de tabel is ζ gegeven afhankelijk van R/D_i . Zonodig kan R/D_i uit a/D_i worden berekend met de formule:

$$R/D_i = \frac{a/D_i}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{45^\circ}{n-1}\right)}$$

, waarin n het aantal secties is

(11)

 uit 3 secties gelaste bocht	R/D_i	1	1,5	2	3	7
	ζ	0,45	0,33	0,32	0,40	0,42
 uit 4 secties gelaste bocht	R/D_i	2	3	5	11	
	ζ	0,28	0,23	0,26	0,28	
 uit 5 secties gelaste bocht	R/D_i	3	4	11	15	
	ζ	0,21	0,18	0,23	0,23	

PR29-C01

Tabel 3.1: Weerstandsfactoren ζ voor uit secties gelaste bochten

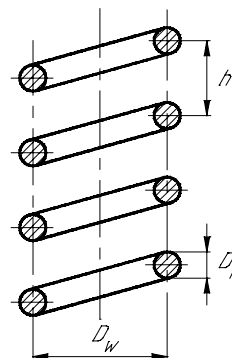
3.4 SPIRAALVORMIG GEBOGEN LEIDINGEN

Wanneer $h/D_w \leq 0,5$ bedraagt de weerstandsfactor ζ voor het extra drukverlies in een spiraalvormig gebogen leiding:

$$\zeta = (n + 1) \cdot b \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \frac{D_w}{D_i} \quad (12)$$

Hierin is n het aantal windingen en λ de weerstandscoefficiënt van de rechte leiding (zie hoofdstuk 2). In tabel 3.2 is b gegeven voor verschillende D_w/D_i verhoudingen en verschillende getallen van Reynolds.

Voor $h/D_w > 0,5$ zie rapportnr. 4569 CL-APS 1.



$D_w/D_i \rightarrow$	15	20	30	40	100	250	650
$Re \downarrow$	Toeslagfactor b						
10^4	0,22	0,17	0,11	0,09	0,03	0,01	0
$2 \cdot 10^4$	0,28	0,23	0,18	0,15	0,07	0,03	0,01
10^5	0,35	0,30	0,24	0,20	0,11	0,06	0,03
$3 \cdot 10^5$	0,40	0,35	0,29	0,25	0,15	0,09	0,05
10^6	0,54	0,48	0,42	0,37	0,24	0,15	0,10

Tabel 3.2: Toeslagfactor b voor het extra drukverlies in spiraalvormig gebogen leidingen

3.5 BIJZONDERE BOCHTVORMEN

3.5.1 Bochten met niet-ronde doorsnede

In de meeste gevallen kan worden volstaan met het bepalen van de equivalente diameter

$$D_{eq} = \frac{4A}{O} = \frac{4 \times \text{doorstroomde oppervlak}}{\text{natte omtrek}} \quad (7)$$

$$\text{en de verhouding } R/D_{eq} = \frac{\text{buigstraal}}{\text{equivalente diameter}} \quad (13)$$

De weerstandsfactor kan vervolgens op dezelfde wijze worden bepaald als bij bochten met ronde doorsnede.

Voor bijzondere uitvoeringsvormen, onder andere bochten met leidschoepen, en voor meer nauwkeurige berekeningen wordt verwezen naar rapportnummer 4569 CL-APS 1.

3.5.2 Geplooid bochten

Voor normale weerstandsberekeningen mag worden aangenomen dat de weerstandsfactor ζ voor het extra drukverlies in geplooid bochten ongeveer het viervoudige bedraagt van de weerstandsfactor van gladde bochten (figuur 3.1, 3.3 en 3.4).

HOOFDSTUK 4

- 4 De weerstandsfactor ζ voor de extra drukverliezen in expansiestukken
 4.1 Balgcompensatoren

4 DE WEERSTANDSFACITOR ζ VOOR DE EXTRA DRUKVERLIEZEN IN EXPANSIESTUKKEN

4.1 BALGCOMPENSATOREN

Over balgcompensatoren zijn zeer weinig gegevens bekend. Indien geen gegevens van de fabrikant beschikbaar zijn, kan als richtlijn dienen dat de stromingsweerstand voor een compensator met inwendige geleidingspijp praktisch gelijk is aan die van de rechte leiding (met andere woorden $\zeta = 0$). Zonder inwendige geleidingspijp is de weerstandsfactor ζ ongeveer gelijk aan $3 \cdot \lambda \cdot L/D_i$, waarbij λ en D_i betrekking hebben op de rechte leiding.

Als het doorstroomoppervlak van de balgcompensator meer dan 15% kleiner is dan dat van de leiding, moet met de vernauwing rekening worden gehouden (hoofdstuk 7).

HOOFDSTUK 5

INHOUD

- 5 De weerstandsfactor ζ voor de extra drukverliezen in appendages
 5.1 Afsluiters
 5.2 Vlinderkleppen
 5.3 Terugslagkleppen
 5.3.1 Terugslagkleppen schotel-type
 5.3.2 Terugslagkleppen met verticale geleiding en veerbelaste terugslagklep
 5.3.3 Scharnierende terugslagkleppen

5 DE WEERSTANDSFACITOR ζ VOOR DE EXTRA DRUKVERLIEZEN IN APPENDAGES

Opmerking vooraf:

De weerstandsfactor ζ van appendages (afsluiters, vlinderkleppen, terugslagkleppen enzovoort), hangt sterk af van de vorm en de afmetingen.

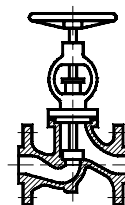
5.1 AFSLUITERS (in geheel geopende stand)

Door het grote aantal uitvoeringsmogelijkheden is het noodzakelijk dat hier wordt volstaan met het noemen van enkele globale en oriënterende waarden, zie de figuren 5.1...5.8.

Voor hogedruk-schuifafsluiters met vernauwde doorlaat wordt verwezen naar rapportnummer 4569 CL-APS 1.

Figuur 5.1: Klepafsluiters volgens de DSM-normen 91-260-... en 91-261-...

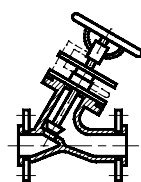
$\zeta = 1...9$



PR29-D02

Figuur 5.2: Vrijstroomafsluiters volgens de DSM-normen 91-260-... en 91-261-...

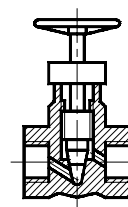
$\zeta = 1...3$



PR29-D06

Figuur 5.3: Naaldafsluiters en kleine klepafsluiters volgens de DSM-normen 91-260-... en 91-261-...

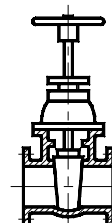
$$\zeta = 1...3$$



PR29-D05

Figuur 5.4: Schuifafsluiters (met volle doorlaat) volgens de DSM-normen 91-250-... en 91-251-...

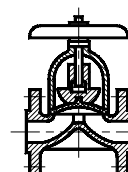
$$\zeta = 0,2...0,5$$



PR29-D03

Figuur 5.5: Membraanafsluiters volgens de DSM-normen 91-270-...

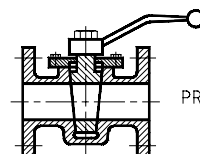
$$\zeta = 2...2,5$$



PR29-D08

Figuur 5.6: Plugafsluiters volgens de DSM-normen 91-220-... t.m. 91-225-...

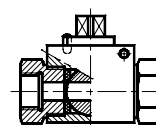
$$\zeta = 0,1...0,15$$



PR29-D04

Figuur 5.7: Kogelafsluiters volgens de DSM-normen 91-201-... t.m. 91-204-... en 91-211-... t.m. 91-214-...

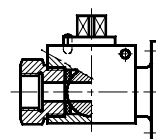
$$\zeta = 0,1...0,15$$



PR29-D09

Figuur 5.8: Kogelafsluiters volgens de DSM-normen 91-201-... t.m. 91-204-... en 91-211-... t.m. 91-214-...

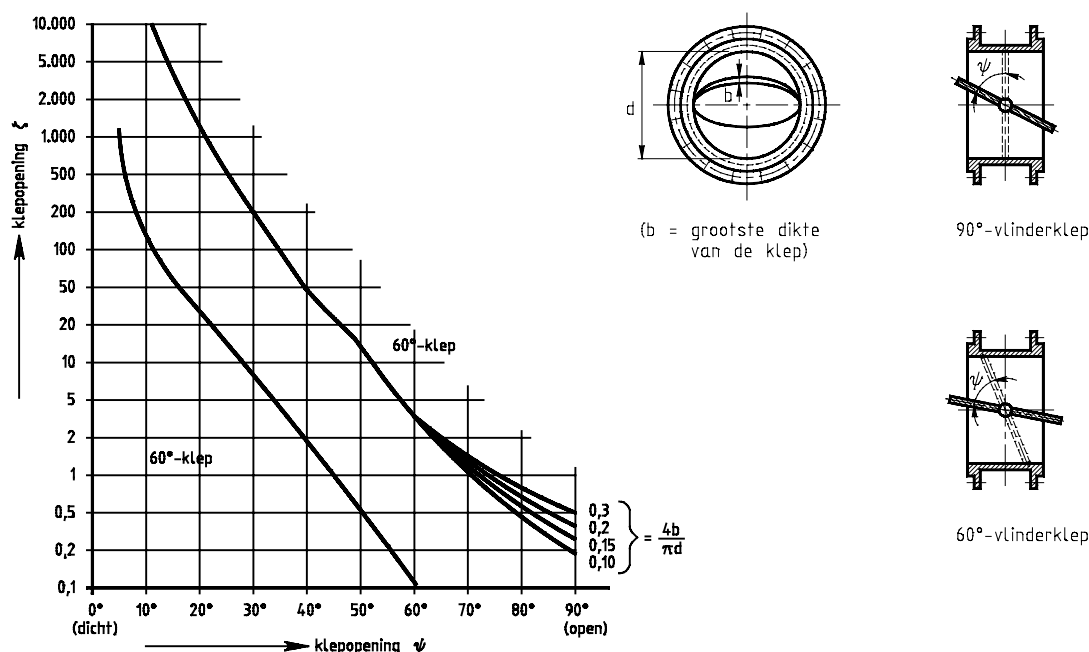
$$\zeta = 0,1...0,15$$



PR29-D10

5.2 VLINDERKLEPPEN

In figuur 5.9 is voor een 90°- en een 60°-vlinderklep de weerstandsfactor ζ gegeven afhankelijk van de klepopening ψ in graden (bij een 60°-vlinderklep maakt de klep in gesloten toestand een hoek van 60° met de as van de leiding. De regeltechnische eigenschappen van een dergelijke klep zijn beter dan die van een 90°-klep).

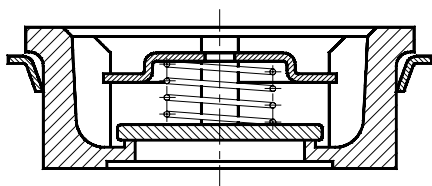


Figuur 5.9: Verband tussen de weerstandsfactor ζ en de opening van vlinderkleppen

5.3 TERUGSLAGKLEPPEN

Evenals bij afsluiters geldt de weerstandsfactor ζ van terugslagkleppen alleen bij geheel geopende klep. In gesloten toestand is de weerstandsfactor $\zeta = \infty$. Tijdens het openen daalt deze tot een constante waarde (bij geheel geopende klep). Deze waarde (ζ) is niet afhankelijk van de veerspanning of het gewicht van de klep, doch wordt alleen bepaald door de stromingstechnische uitvoering. Wel hoort bij elke veer een bepaalde minimale dynamische druk waarbij deze waarde wordt bereikt; voor een klep met zware veer b.v. zal een grote dynamische druk vereist zijn om deze geheel te openen. Hieruit volgt dat naast de weerstandsfactor van elke klep de minimale dynamische druk gegeven zou moeten worden, waarvoor deze geldt. Voor globale berekeningen kunnen de hierna volgende gegevens enig houvast bieden (voor meer nauwkeurige gegevens wordt verwezen naar de opgaven van fabrikanten).

5.3.1 Terugslagklep schotel type



Figuur 5.10: Terugslagklep schotel type volgens de DSM-normen in de groep-soort 91-29-

Nominale diameter (in mm)	15	20	25	32	40	50	65	80	100
ζ	2	2	2,5	2,5	3,5	3	3	4,5	6

5.3.2 Terugslagklep met verticale geleiding en veerbelaste terugslagklep

Hiervoor gelden dezelfde weerstandsfactoren als voor de afsluiters met overeenkomstige vorm (zie hoofdstuk 5.1).

5.3.3 Scharnierende terugslagklep

Nominale diameter (in mm)	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
ζ	1,9	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8

HOOFDSTUK 6

INHOUD

6	De weerstandsfactor voor de extra drukverliezen bij instromingen en uitstromingen
6.1	Instromingen
6.2	Uitstromingen
6.2	Recht uitmondende leiding
6.2.2	Diffusor aan het einde van een leiding

6 DE WEERSTANDSFACITOR VOOR DE EXTRA DRUKVERLIEZEN BIJ INSTROMINGEN EN UITSTROMINGEN

6.1 INSTROMINGEN

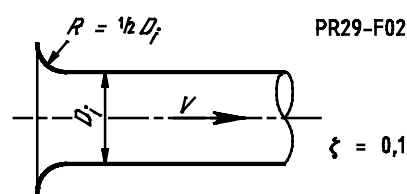
De weerstandsfactor ζ wordt bepaald door de contractiecoëfficiënt α, welke afhankelijk is van de vorm van de instroomopening.

Voor ζ geldt:

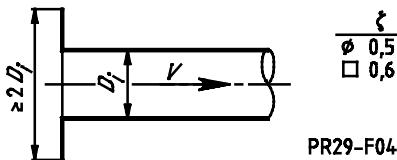
$$\zeta = \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^2$$

(14)

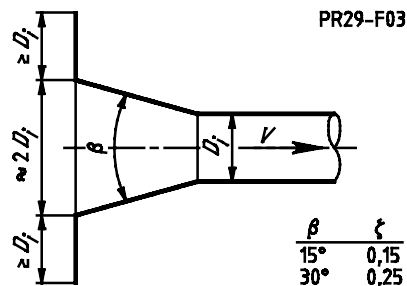
Hierop wordt nader ingegaan onder hoofdstuk 7.2 van Vernauwingen (hoofdstuk 7).
In de figuren 6.1...6.5 zijn de weerstandsfactoren gegeven van enkele vormen van instroomopeningen.



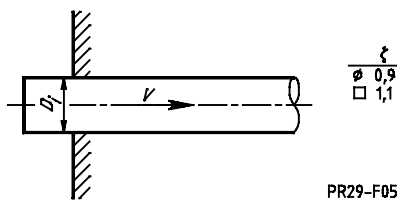
Figuur 6.1



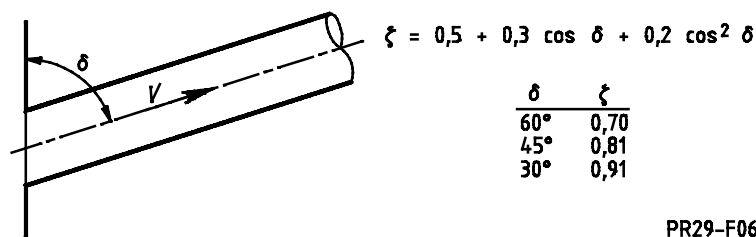
Figuur 6.2



Figuur 6.3



Figuur 6.4



Figuur 6.5

De weerstandsfactoren kunnen worden verminderd door de instroomopeningen een weinig af te ronden. Voor een indruk van de grootte van de invloed zie figuur 7.1, hoofdstuk 7.

Bij instromingen is $m = 0$. (15)

Opmerking:

De hier aan de orde zijnde weerstandsfactor mag alleen in rekening worden gebracht als de leiding gevoed wordt vanuit een grote ruimte. Wordt de leiding voorafgegaan door een leiding van andere diameter, dan goeft geen instroomverlies in rekening te worden gebracht. Dit is namelijk al verrekend in het eindverlies van de voorafgaande leiding.

6.2 UITSTROMINGEN

6.2.1 Recht uitmondende leiding

Bij een recht uitmondende leiding is het drukverlies gelijk aan de dynamische druk ter plaatse

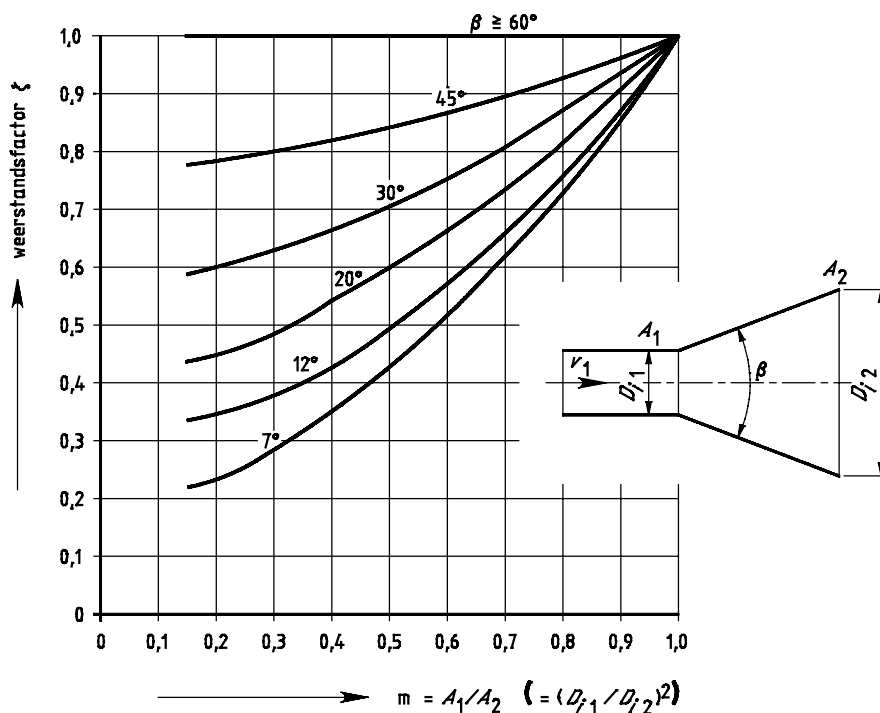
$$\Delta p = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (16)$$

dit wil zeggen:

de weerstandsfactor voor het eindverlies $\zeta_e = 1$. Dit verlies kan alleen worden verminderd door een diffusor aan te brengen. Afrondingen hebben bij een uitstroming geen effect.

6.2.2 Diffusor aan het einde van een leiding

Het eindverlies kan worden verminderd door uitstroming via een diffusor te doen geschieden. De weerstandsfactoren ζ van diffusoren zijn weergegeven in figuur 6.6 (dit is inclusief het uitstroomverlies).



Figuur 6.6: Weerstandsfactor ζ van een diffusor (inclusief uitstroomverlies) (ζ heeft betrekking op de snelheid V_1 in de leiding)

HOOFDSTUK 7

INHOUD

7	De weerstandsfactor ζ_e voor de drukverliezen in vernauwingen en verwijdingen
7.1	Inleiding
7.2	Vernauwingen
7.2.1	Plotselinge vernauwing
7.2.2	Conische vernauwing
7.3	Verwijdingen
7.3.1	Plotselinge verwijding
7.3.2	Conische verwijding

7 DE WEERSTANDSFACITOR ζ_e VOOR DE DRUKVERLIEZEN IN VERNAUWINGEN EN VERWIJDINGEN

7.1 INLEIDING

Vernauwingen en verwijdingen zijn overgangen tussen leidingstukken van verschillende diameter, van welke stukken (zoals is aangegeven in de hoofdstuk 1.4 van hoofdstuk 1) de drukverliezen afzonderlijk dienen te worden berekend.

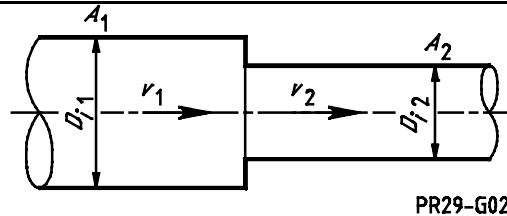
Het met de vernauwing of verwijding samenhangende drukverlies wordt in de algemene weerstandsformule tot uiting gebracht in de term ζ_e , dat wil zeggen het wordt beschouwd als het eindverlies van het voorafgaande leidingstuk en moet dus altijd op V_1 worden betrokken.

7.2 VERNAUWINGEN

Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen plotselinge vernauwingen en geleidelijke vernauwingen. Bij een plotselinge vernauwing treedt alleen wervelverlies op; bij een geleidelijke vernauwing domineert het wrijvingsverlies.

7.2.1 Plotselinge vernauwing

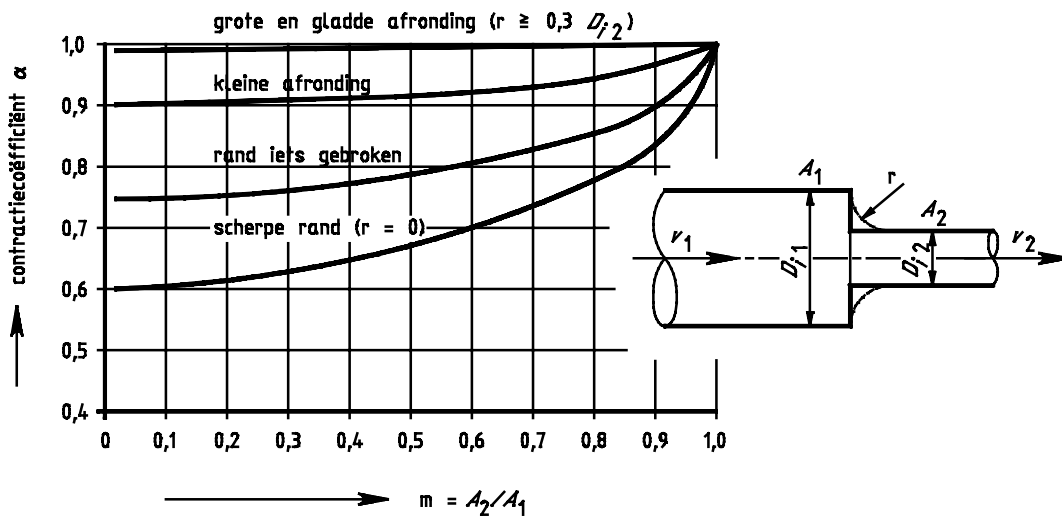
$$\zeta_e = \left(\frac{1 - \alpha}{m \cdot \alpha} \right)^2 \quad (17)$$



$$m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\text{kleinste doorstroomoppervlak}}{\text{grootste doorstroomoppervlak}} \quad (18)$$

De contractiecoëfficiënt α is in figuur 7.1 weergegeven als functie van m .

Aangenomen mag worden dat deze waarden bij benadering ook gelden voor vernauwingen in rechthoekige kanalen en dergelijke.



Figuur 7.1: De contractiecoëfficiënt α bij een vernauwing

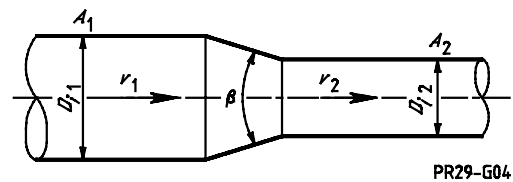
7.2.2 Conische vernauwing

Bij grotere conushoeken (β) is de weerstand ten gevolge van de wrijving in het algemeen verwaarloosbaar klein en zijn alleen de wervelverliezen van belang.

Voor $\beta = 60^\circ$ is $\zeta_e = 0,06$

Wordt β kleiner, dan zijn de wervelverliezen te verwaarlozen; hierbij wordt echter de conus langer, waardoor de wrijving van invloed kan worden. De weerstandsfactor kan dan worden berekend uit:

$$\zeta_e = \frac{\lambda_R}{8 \cdot m^2 \cdot \tan(\beta/2)} \cdot (1 - m^2) \quad (19)$$



$$m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\text{kleinste doorstroomoppervlak}}{\text{grootste doorstroomoppervlak}} \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_{A1} + \lambda_{A2}}{2} \quad (20)$$

(20) = het gemiddelde van de weerstandscoefficienten van de twee leidingen, die op de conus aansluiten. De bepaling van λ_{A1} en λ_{A2} kan geschieden aan de hand van figuur 2.3, uit hoofdstuk 2.

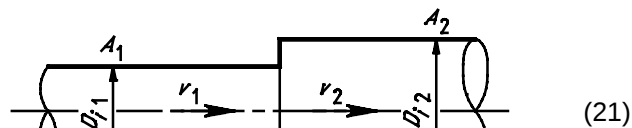
7.3 VERWIJDINGEN

Ook hier wordt onderscheid gemaakt tussen plotselinge - en geleidelijke verwijdingen. Bij plotselinge verwijding treedt alleen wervelverlies op, bij een geleidelijke verwijding wervelverlies en wrijvingsverlies. Het verlies bij een geleidelijke verwijding is praktisch altijd minder dan bij een plotselinge verwijding.

7.3.1 Plotselinge verwijding

$$\zeta_e = (1 - m)^2$$

$$m = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\text{kleinste doorstroomoppervlak}}{\text{grootste doorstroomoppervlak}}$$



PR29-H01

(21)

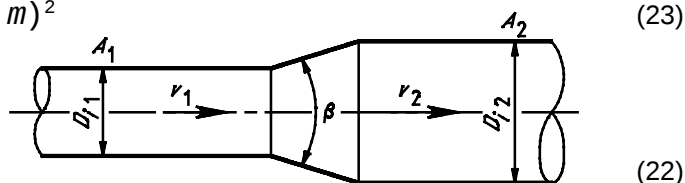
(22)

Bij plotselinge verwijdingen heeft het afronden van scherpe randen (zoals bij plotselinge vernauwingen) geen zin.

7.3.2 Conische verwijding

$$\zeta_e = \frac{\lambda_R}{8 \cdot \tan(\beta/2)} \cdot (1 - m^2) + \varphi \cdot (1 - m)^2$$

$$m = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\text{kleinste doorstroomoppervlak}}{\text{grootste doorstroomoppervlak}}$$

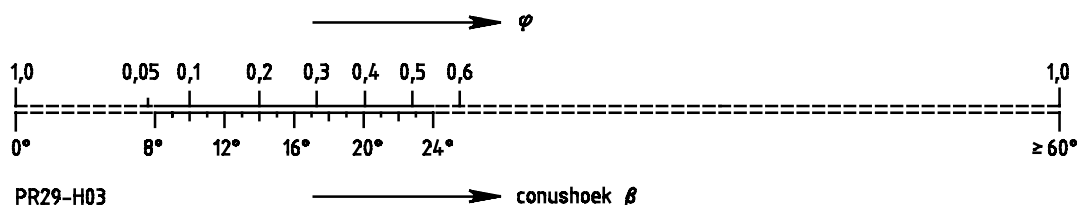


PR29-H02

(23)

(22)

Voor λ_R zie hoofdstuk 7.2.2. Voor φ zie figuur 7.2.



PR29-H03

conushoek β

Figuur 7.2: Correctiefactor φ

HOOFDSTUK 8

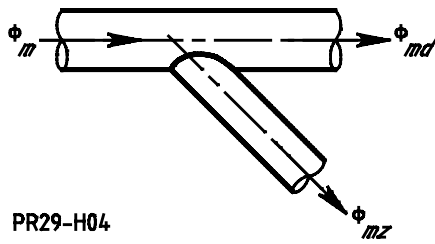
INHOUD

- 8 Weerstandsfactor voor de extra drukverliezen bij vertakkingen (splitsingen en samenvloeiingen van stromen in leidingen met ronde doorsneden)
 - 8.1 Inleiding
 - 8.2 Splitsing van stromen
 - 8.3 Samenvloeiing van stromen

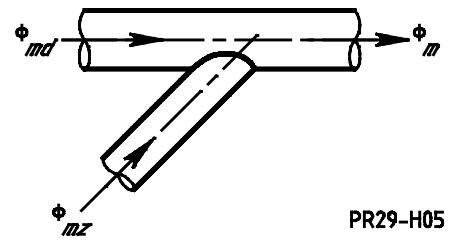
8 DE WEERSTANDSFACITOR VOOR DE EXTRA DRUKVERLIEZEN BIJ VERTAKKINGEN (SPLITSINGEN EN SAMENVLOEIINGEN VAN STROMEN IN LEIDINGEN MET RONDE DOORSNEDEN)

8.1 INLEIDING

Vertakkingen zijn knooppunten van leidingstukken met verschillende snelheid en/of diameter. Het ermee samenhangende drukverlies (een enkele maal drukwinst) wordt tot uiting gebracht in de weerstandsfactor ζ_d of ζ_z (d = doorgaand, z = zijtak).



splitsing van stromen



samenvloeiing van stromen

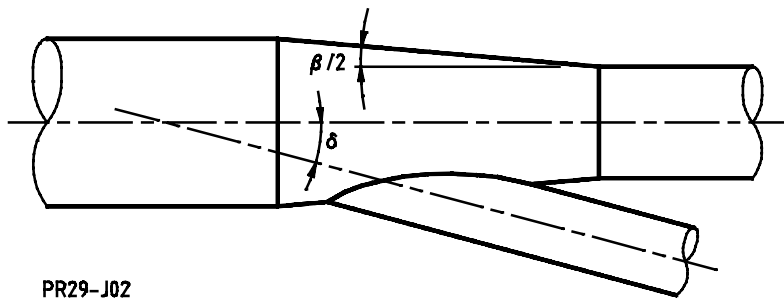
Figuur 8.1: Vertakkingen van stromen

Zoals in hoofdstuk 1 (algemene weerstandsformule) is gezegd, eindigt elk leidingstuk met een eindverlies, dat tot uiting wordt gebracht in de weerstandsfactor ζ_e . Voor het daarop aansluitende leidingstuk wordt dan geen beginverlies in rekening gebracht.

Een uitzondering hierop wordt gevormd door de stroomsplitsing; hier wordt voor de uitstromende tak gerekend met $\zeta_e = 0$. Voor de doorgaande tak en de zijtak wordt nu wél een instroomverlies in rekening gebracht, en wel door middel van respectievelijk ζ_{di} en ζ_{zi} .

In de volgende paragrafen worden voor verschillende vertakkingen de weerstandsfactoren gegeven. In het algemeen kan worden gezegd dat aanpassing van de diameter zowel als afronden van scherpe hoeken weerstandsvermindering geeft.

In figuur 8.2 is een uitvoering van een vertakking gegeven met de zo laag mogelijke weerstandsfactor. Hierbij zijn de diameters zodanig gekozen (aangepast) dat in alle takken dezelfde snelheid heerst. De richtingsverandering wordt zo klein mogelijk gehouden.



$$\beta/2 = 4^\circ \dots 6^\circ$$

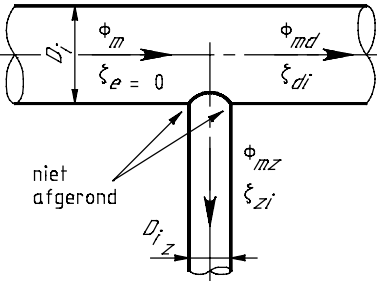
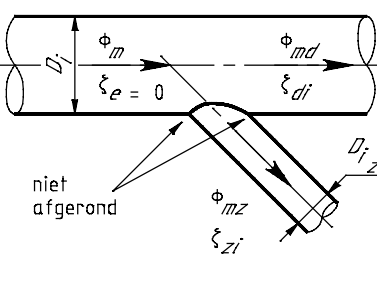
δ zo klein mogelijk

Figuur 8.2: Gunstige splitsing of samenvloeiing van twee stromen

8.2 SPLITSING VAN STROMEN

Weerstandsverlies betrokken op de snelheid in de gezamenlijke leiding.

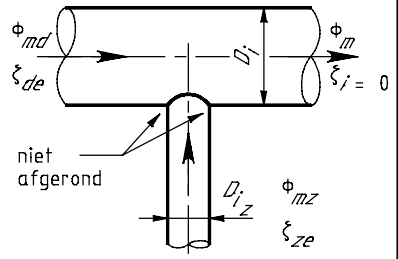
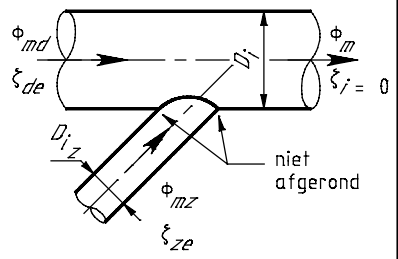
8.2.1 Leidingen met ronde doorsnede

PR29-J01		ϕ_{mz} / ϕ_m	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
		D_i / d											
haakse splitsing 	ξ_{di}	0,349	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
		0,581	0,15	-0,14	-0,15	-0,1	-0,05	0,0	0,05	0,13	0,2	0,25	0,3
		1,0	0,03	-0,01	-0,03	-0,03	-0,02	0,02	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35
	ξ_{zi}	0,349	1,0	1,6	3,0	5,3	8,9	13,8	19,5	25,3	31,3	38,8	46,4
		0,581	1,3	1,4	1,5	1,8	2,4	3,2	4,3	5,6	7,2	9,0	10,8
		1,0	0,98	0,92	0,87	0,84	0,84	0,87	0,93	1,00	1,08	1,18	1,27
splitsing onder 45° 	ξ_{di}	0,349	-0,01	-0,03	-0,04	-0,02	0,01	0,05	0,09	0,15	0,21	0,27	0,34
		0,581	0,0	-0,04	-0,05	-0,04	-0,02	0,01	0,07	0,13	0,20	0,28	0,35
		1,0	0,04	-0,04	-0,06	-0,06	-0,04	0,01	0,07	0,14	0,20	0,27	0,33
	ξ_{zi}	0,349	1,0	0,5	0,9	2,5	5,5	9,2	14,0	20,0	27,1	35,0	44,6
		0,581	0,90	0,65	0,49	0,45	0,57	0,86	1,35	2,00	2,78	3,74	5,00
		1,0	0,90	0,78	0,68	0,59	0,50	0,42	0,38	0,35	0,34	0,38	0,47

Tabel 8.1: Splitsing van stromen

8.3 SAMENVLOEIING VAN STROMEN

Weerstandsverlies betrokken op de snelheid in de gezamenlijke leiding.

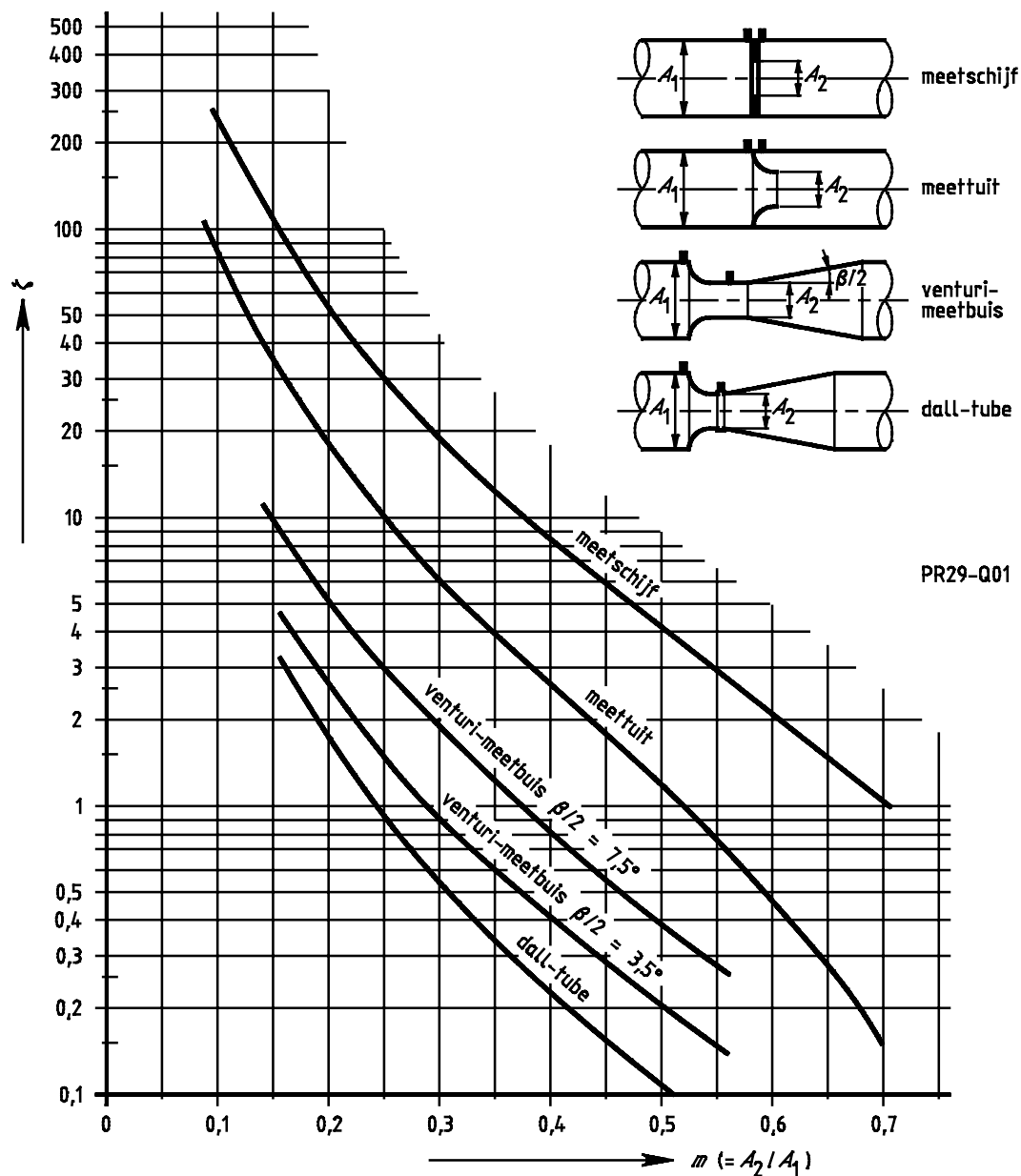
PR29-M01		ϕ_{mz} / ϕ_m D_{iZ} / D_i	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
haakse samenvloeiing 	ξ_{de}	0,349	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8
		0,581	0,28	0,40	0,52	0,64	0,77	0,89	1,00	1,13	1,26	1,38	1,50
		1,0	0,0	0,18	0,30	0,40	0,47	0,52	0,55	0,56	0,57	0,57	0,56
	ξ_{ze}	0,349	-0,9	-0,2	2,0	5,9	11,4	18,6	28,4	41,5	58,3	81,3	112,5
		0,581	-0,7	-0,25	0,2	0,7	1,25	1,9	2,75	3,7	4,75	6,0	7,25
		1,0	-0,98	-0,60	-0,25	0,03	0,26	0,45	0,62	0,78	0,90	1,02	1,12
samenvloeiing onder 45° 	ξ_{de}	0,349	0,0	0,1	-0,1	-0,54	-1,1	-1,9	-2,9	-4,2	-5,7	-7,5	-9,6
		0,581	0,0	0,1	0,1	0,0	-0,15	-0,4	-0,7	-1,05	-1,5	-2,1	-2,9
		1,0	0,05	0,12	0,18	0,20	0,18	0,13	0,07	-0,03	-0,17	-0,34	-0,54
	ξ_{ze}	0,349	-0,94	0,0	1,6	4,4	8,3	13,4	19,6	26,6	34,5	43,8	54,0
		0,581	-1,0	-0,88	-0,46	0,31	0,75	1,38	2,07	2,91	3,78	4,64	5,51
		1,0	-0,91	-0,62	-0,37	-0,16	0,0	0,12	0,22	0,30	0,37	0,39	0,38

Tabel 8.2: Samenvloeiing van stromen

HOOFDSTUK 9

9 DE WEERSTANDSFACITOR ζ VOOR DE EXTRA DRUKVERLIEZEN OVER MEETSCHIJVEN, IN MEETTUITEN, VENTURIMEETBUIZEN EN DALL-TUBES

De weerstandsfactor ζ van de verschillende meetelementen, betrokken op de snelheid in de leiding, is weergegeven in onderstaande figuur als functie van m .



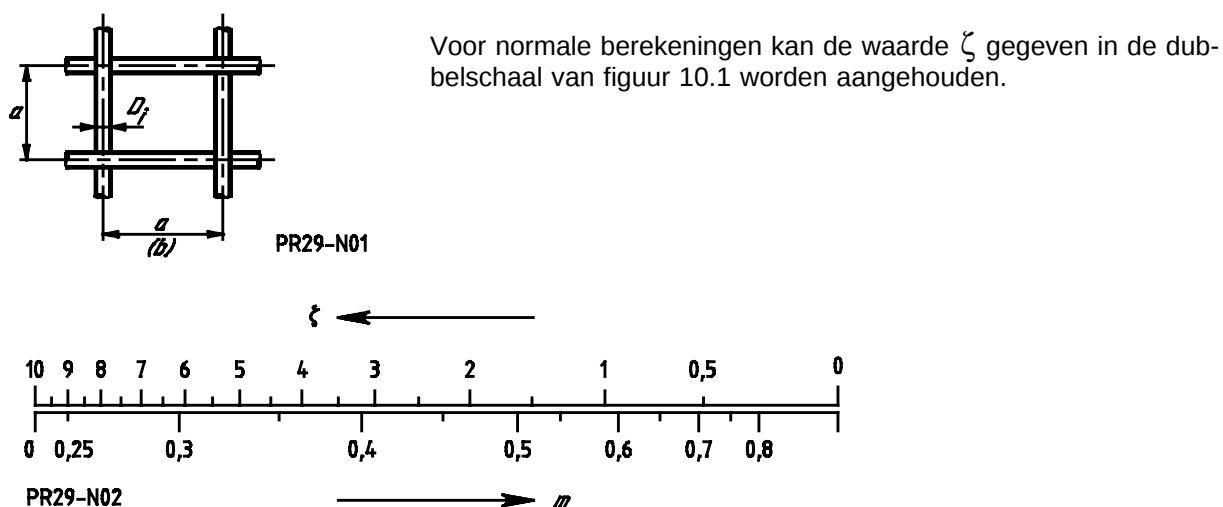
HOOFDSTUK 10

INHOUD

- 10 De weerstandsfactor ζ voor de drukverliezen over zeefgazen, smoorplaten, geperforeerde platen en pijpenbundels
- 10.1 Zeefgazen
- 10.2 Smoorplaten en geperforeerde platen
- 10.3 Pijpenbundels

10 DE WEERSTANDSFACITOR ζ VOOR DE DRUKVERLIEZEN OVER ZEEFGAZEN, SMOORPLATEN, GEPERFOREERDE PLATEN EN PIJPENBUNDELS

10.1 ZEEFGAZEN MET RONDE DRAADDOORSNEDE



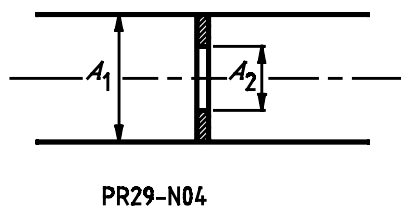
Figuur 10.1: De weerstandsfactor ζ voor zeefgazen

$$m = \frac{\text{vrije oppervlak}}{\text{totale oppervlak}} \quad (24)$$

$$\text{Bij vierkante mazen: } m = \frac{(a - D)^2}{a^2} \quad (25)$$

$$\text{Bij rechthoekige mazen: } m = \frac{(a - D) \cdot (b - D)}{ab} \quad (26)$$

10.2 SMOORPLATEN EN GEPERFOREERDE PLATEN



$$\zeta = \left(\frac{1 - \alpha m}{\alpha m} \right)^2 \quad (27)$$

$$m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\text{vrije oppervlak}}{\text{totale oppervlak}} \quad (28)$$

α is gegeven in figuur 7.1, hoofdstuk 7 (in het algemeen kromme voor 'scherpe rand').

Daar een GEPERFOREERDE PLAAT kan worden opgevat als een aantal parallel geplaatste smoorplaten, geldt voor de weerstandsfactor van een geperforeerde plaat eveneens:

$$\zeta = \left(\frac{1 - \alpha m}{\alpha m} \right)^2 \quad (27)$$

10.3 PIJPENBUNDELS

Voor het berekenen van de weerstandsfactoren van in dwarsrichting doorstroomde pijpenbundels (warmtewisselaars en dergelijke) wordt verwezen naar rapport nummer 4569 CL-APS 1.

HOOFDSTUK 11

INHOUD

- 11 Viscositeiten
- 11.1 Verband tussen de dynamische en de kinematische viscositeit
- 11.2 Omrekeningsfactoren voor het omrekenen van diverse viscositeiteenheden
- 11.3 Viscositeit van emulsies (niet mengbare vloeistoffen)
- 11.4 Viscositeit van gasmengsels
- 11.5 Invloed van druk en temperatuur op de viscositeit
- 11.5.1 Invloed van de druk
- 11.5.2 Invloed van de temperatuur
- 11.6 Nomogrammen en bijbehorende tabellen ter bepaling van de viscositeit en massadichtheid van vloeistoffen en gassen

11 VISCOSITEITEN

11.1 VERBAND TUSSEN DE DYNAMISCHE EN DE KINEMATISCHE VISCOSITEIT

$$\text{Kinematische viscositeit} = \frac{\text{dynamische viscositeit}}{\text{massadichtheid}}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (29)$$

waarin

η in Pa·s
 ρ in kg/m³
 ν in m²/s

11.2 OMREKENINGSFACTOREN VOOR HET OMREKENEN VAN DIVERSE VISCOSITEIT-EENHEDEN

Dynamische viscositeit η

1 kgf·s/m² $\approx$ 9,81 Pa·s (= 9,81 N·s/m²)
 1 P = 0,1 Pa·s
 1 cP = 0,001 Pa·s (= 1 mPa·s)

Kinematische viscositeit ν

$$1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} (= 1 \text{ mm}^2/\text{s})$$

Opmerking:

Soms vindt men de viscositeit uitgedrukt in graden Engler, seconden Redwood of seconden Saybolt. De herleiding van deze viscositeitswaarden naar de eenheid m^2/s is als volgt:

$$1 \text{ graad Engler} \approx 7,58 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (mits graden Engler} > 4,5)$$

$$1 \text{ seconde Redwood} \approx 0,247 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (mits seconden Redwood} > 100)$$

$$1 \text{ seconde Saybolt} \approx 0,220 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (mits seconden Saybolt} > 120)$$

Omrekeningstabel voor kinematische viscositeiten

mm ² /s (cSt)	Saybolt Seconds Universal	Engler graden	Redwood no. 1 Seconds	mm ² /s (cSt)	Saybolt Seconds Universal	Engler graden	Redwood no. 1 Seconds	mm ² /s (cSt)	Saybolt Seconds Universal	Engler graden	Redwood no. 1 Seconds
2,0	32,6	1,140	30,35	25,0	118,9	3,455	104,3	80,0	369,6	10,53	324,4
2,5	34,4	1,182	31,60	26,0	123,3	3,575	108,2	82,0	378,8	10,79	332,5
3,0	36,0	1,224	32,85	27,0	127,7	3,695	112,0	84,0	388,1	11,05	340,6
3,5	37,6	1,266	34,15	28,0	132,1	3,820	115,9	86,0	397,3	11,32	348,7
4,0	39,1	1,308	35,43	29,0	136,5	3,945	119,8	88,0	406,6	11,58	356,8
4,5	40,7	1,350	36,68	30,0	140,9	4,070	123,8	90,0	415,8	11,84	365,0
5,0	42,3	1,400	38,01	31,0	145,3	4,195	127,7	92,0	425,0	12,11	373,1
5,5	43,9	1,441	39,32	32,0	149,7	4,320	131,7	94,0	434,3	12,37	381,2
6,0	45,5	1,481	40,61	33,0	154,2	4,445	135,6	96,0	443,5	12,63	389,3
6,5	47,1	1,521	41,96	34,0	158,7	4,570	139,5	98,0	452,8	12,90	397,4
7,0	48,7	1,563	43,30	35,0	163,2	4,695	143,5	100	462,0	13,16	405,5
7,5	50,3	1,605	44,64	36,0	167,7	4,825	147,4	110	508,2	14,48	446,1
8,0	52,0	1,653	46,07	37,0	172,2	4,955	151,5	120	554,4	15,79	486,6
8,5	53,7	1,700	47,47	38,0	176,7	5,080	155,4	130	600,6	17,11	527,2
9,0	55,4	1,746	48,91	39,0	181,2	5,205	159,4	140	646,8	18,42	567,7
9,5	57,1	1,791	50,31	40,0	185,7	5,334	163,4	150	693,0	19,74	608,3
10,0	58,8	1,837	51,76	41,0	190,2	5,465	167,4	160	739,2	21,06	648,7
10,5	60,6	1,882	53,30	42,0	194,7	5,590	171,4	170	785	22,37	689
11,0	62,3	1,928	54,80	43,0	199,2	5,720	175,4	180	832	23,69	730
11,5	64,1	1,973	56,39	44,0	203,8	5,845	179,4	190	878	25,00	771
12,0	65,9	2,020	57,94	45,0	208,4	5,975	183,5	200	924	26,32	811
12,5	67,8	2,070	59,49	46,0	213,0	6,105	187,5	250	1155	32,90	1014
13,0	69,6	2,120	61,10	47,0	217,6	6,235	191,5	300	1386	39,48	1217
13,5	71,5	2,170	62,74	48,0	222,2	6,365	195,6	350	1617	46,06	1419
14,0	73,4	2,220	64,39	49,0	226,8	6,495	199,5	400	1848	52,64	1622
14,5	75,3	2,270	66,05	50,0	231,4	6,630	203,6	450	2079	59,22	1825
15,0	77,2	2,323	67,75	52,0	240,6	6,890	211,6	500	2310	65,80	2028
15,5	79,2	2,378	69,49	54,0	249,8	7,106	219,6	550	2541	72,38	2230
16,0	81,1	2,434	71,20	56,0	259,0	7,370	227,7	600	2772	78,96	2433
16,5	83,1	2,490	72,90	58,0	268,2	7,633	235,8	650	3003	85,54	2636
17,0	85,1	2,540	74,69	60,0	277,4	7,896	243,9	700	3234	92,12	2839
17,5	87,1	2,590	76,45	62,0	286,8	8,16	251,9	800	3696	105,3	3244
18,0	89,2	2,644	78,17	64,0	295,8	8,42	260,0	900	4158	118,4	3650
18,5	91,2	2,700	79,97	66,0	305,0	8,69	268,1	1000	4620	131,6	4055
19,0	93,3	2,755	81,78	68,0	314,2	8,95	276,2	1100	5082	144,8	4461
20,0	97,5	2,870	85,47	70,0	323,4	9,21	284,3	1200	5544	157,9	4866
21,0	101,7	2,984	89,26	72,0	332,6	9,48	292,3	1400	6468	184,2	5677
22,0	106,0	3,100	92,97	74,0	341,9	9,74	300,4	1600	7392	210,6	6488
23,0	110,3	3,215	96,77	76,0	351,1	10,00	308,4	1800	8316	236,9	7299
24,0	114,6	3,335	100,5	78,0	360,4	10,26	316,4	2000	9240	263,2	8110

11.3 VISCOSITEIT VAN EMULSIES (NIET MENGWARE VLOEISTOFFEN)

Een goede benadering geeft de formule:

$$\eta_m = \eta_1^{\frac{n_1}{n_1+n_2+\dots}} \cdot \eta_2^{\frac{n_2}{n_1+n_2+\dots}} \cdot \dots \quad (30)$$

Hierin is:

η_m = dynamische viscositeit van het mengsel
 $\eta_1, \eta_2, \text{ enz.}$ = dynamische viscositeiten van de afzonderlijke vloeistoffen
 $n_1, n_2, \text{ enz.}$ = volumefracties van de afzonderlijke vloeistoffen
 $(n_1 + n_2 + \dots = 1)$

11.4 VISCOSITEIT VAN GASMENGSELS

Een goede benadering geeft de formule van Mann:

$$\frac{1}{\nu_m} = \frac{n_1}{\nu_1} + \frac{n_2}{\nu_2} + \dots \quad (31)$$

Hierin is:

ν_m = kinematische viscositeit van het mengsel
 $\nu_1, \nu_2, \text{ enz.}$ = kinematische viscositeiten van de afzonderlijke gassen
 $n_1, n_2, \text{ enz.}$ = volumefracties van de afzonderlijke gassen
 $(n_1 + n_2 + \dots = 1)$

11.5 INVLOED VAN DRUK EN TEMPERATUUR OP DE VISCOSITEIT

11.5.1 Invloed van de druk

De viscositeit van vloeistoffen is weinig afhankelijk van de druk. Een uitzondering vormen o.a. smeeroïlen, waarvan bij hogere drukken de viscositeit aanzienlijk kan toenemen.

Voor gassen geldt onder omstandigheden waarbij de wetten voor ideale gassen van toepassing zijn, dat de dynamische viscositeit constant, en de kinematische viscositeit omgekeerd evenredig met de druk is. Als het gas de wetten voor ideale gassen niet meer volgt - in het algemeen dus bij hogere drukken en in het coëxistentiegebied - moeten experimentele gegevens worden gebruikt.

11.5.2 Invloed van de temperatuur

De dynamische viscositeit η van vloeistoffen neemt af bij stijgende temperatuur.

De dynamische viscositeit η van gassen neemt toe bij stijgende temperatuur.

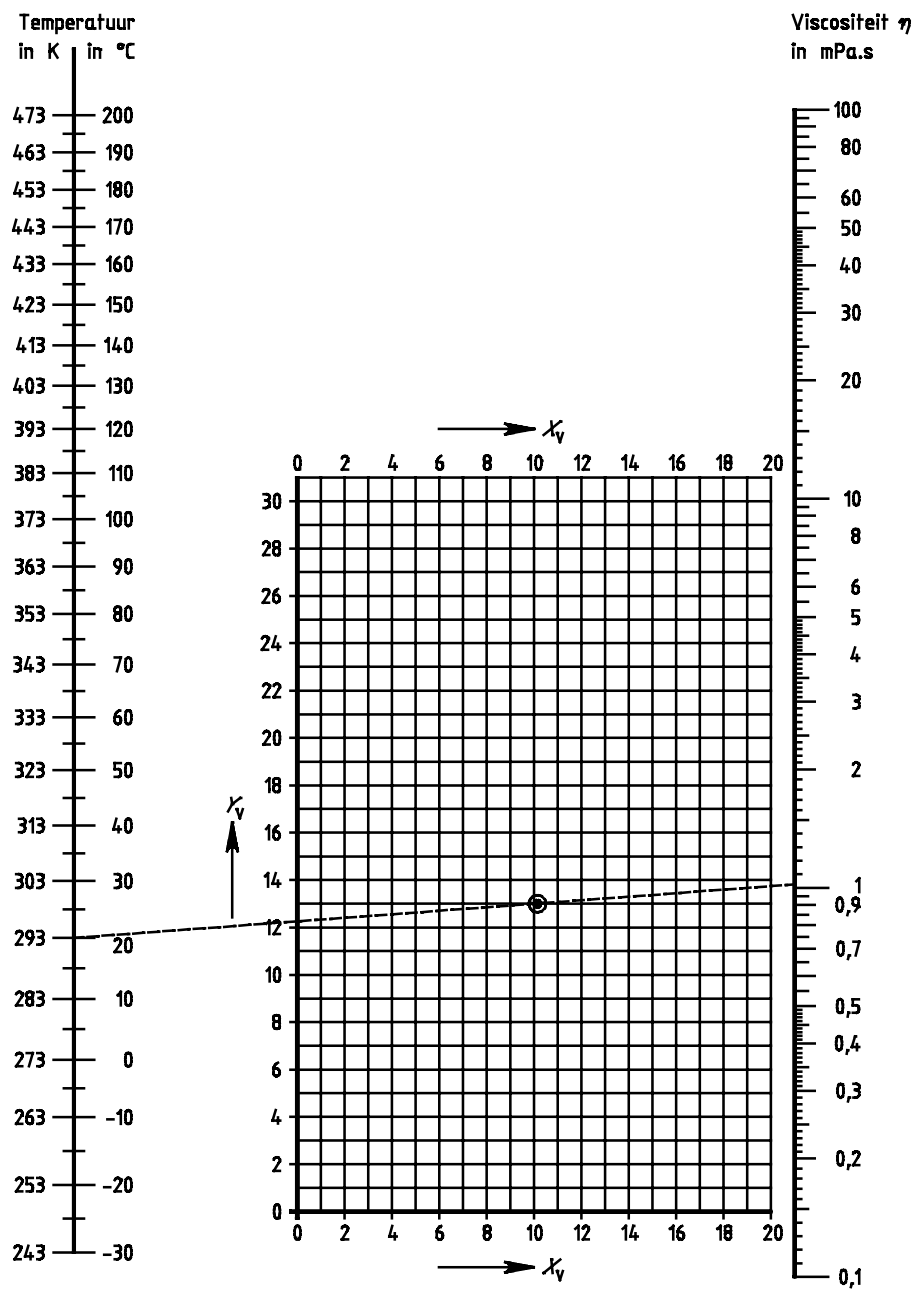
11.6 NOMOGRAMMEN EN BIJBEHORENDE TABELLEN TER BEPALING VAN DE VISCOSITEIT EN MASSADICHTHEID VAN VLOEISTOFFEN EN GASEN

Het verdient aanbeveling bij de berekeningen zoveel mogelijk gebruik te maken van praktijkgegevens betreffende de viscositeit. In veel gevallen kan worden volstaan met het bepalen van de viscositeit aan de hand van de op de volgende bladzijden gegeven nomogrammen en bijbehorende tabellen.

In de meeste gevallen kan voor vloeistoffen en gassen worden volstaan met de nomogrammen in figuur 11.1, figuur 11.2 en figuur 11.3. De gevonden waarden uit deze figuren kunnen circa 10% afwijken.

Figuur 11.1 Nomogram ter bepaling van de dynamische viscositeit van vloeistoffen.
(Voor de waarden van X_v en Y_v zie tabel 11.1)

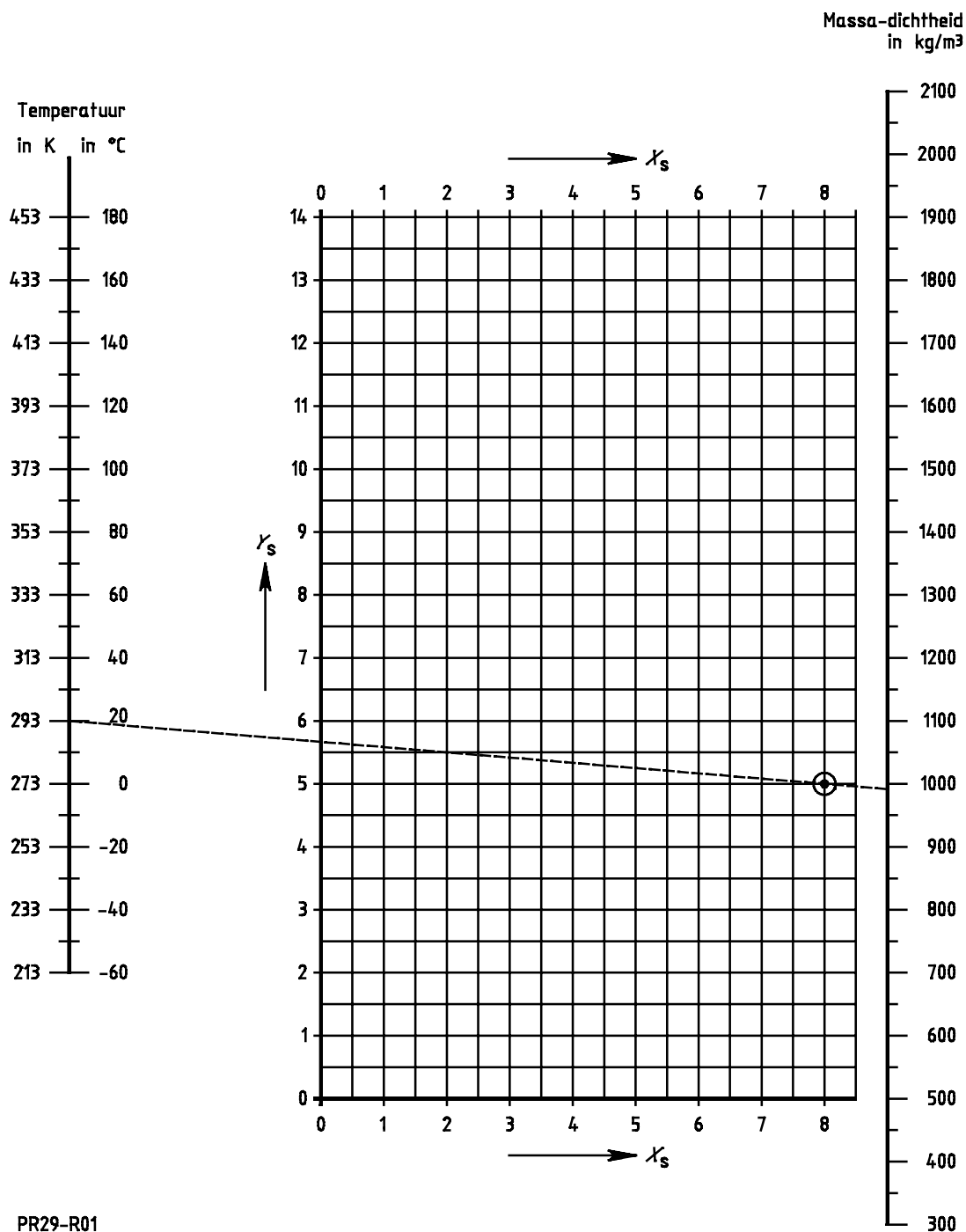
Als voorbeeld is de viscositeit van water van 293 K = 20 °C bepaald ($X_v = 10,1$; $Y_v = 13,0$).



PR29-S01

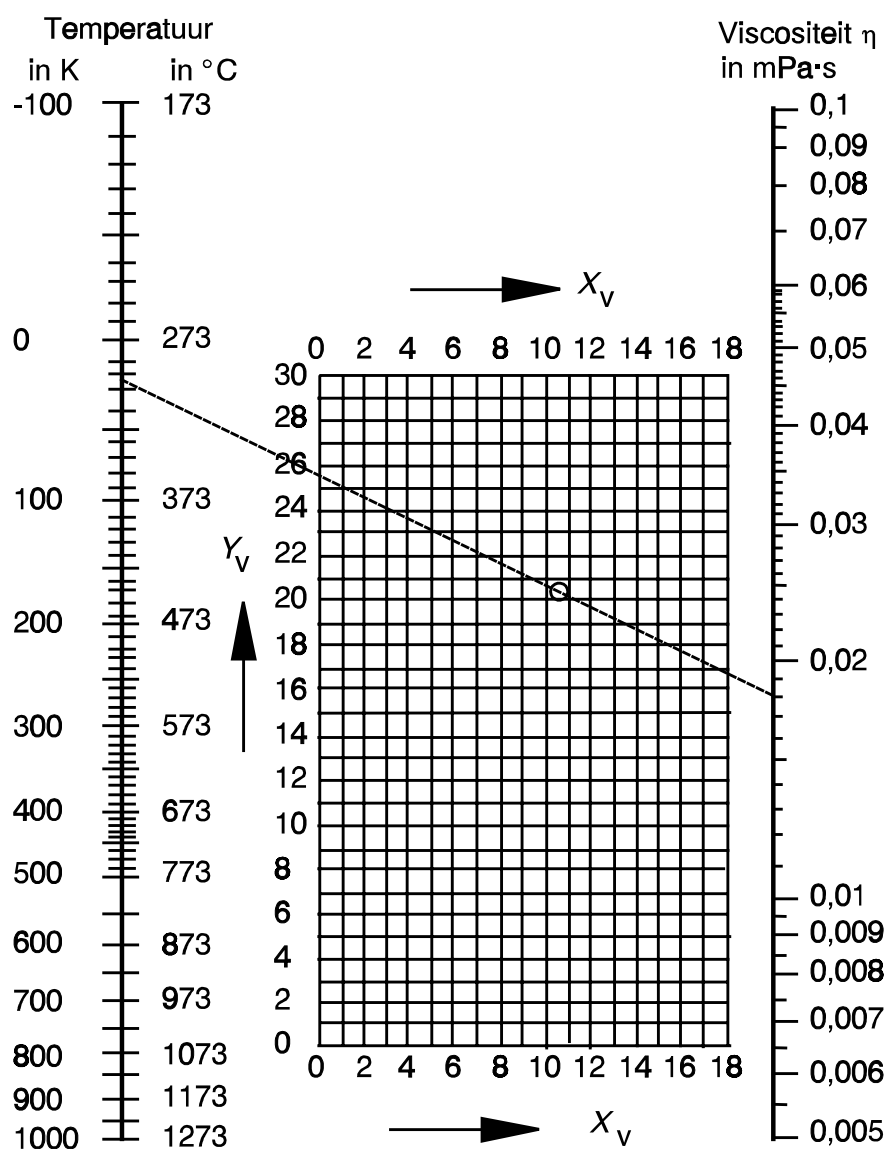
Figuur 11.2 Nomogram ter bepaling van de massadichtheid van vloeistoffen.
(Voor de waarden van X_s en Y_s zie tabel 11.1)

Als voorbeeld is de massadichtheid van water van 293 K = 20 °C bepaald ($X_s = 8$; $Y_s = 5$).



Figuur 11.3 Nomogram ter bepaling van de dynamische viscositeit van gassen.
(Voor de waarden van X_v en Y_v zie tabel 11.2)

Als voorbeeld is de viscositeit van lucht van 293 K = 20 °C bepaald ($X_v = 10,7$; $Y_v = 20,3$).



Tabel 11.1 X_v , Y_v , X_s en Y_s -waarden voor het bepalen van de dynamische viscositeit en massadichtheid van vloeistoffen (behoort bij de figuren 11.1 en 11.2)

MEDIUM	FORMULE	DYNAMISCHE VISCOSITEIT			MASSADICHTHEID			TEMPERATUURGRENZEN	
		X_v	Y_v	TEMPERATUURGRENZEN		X_s	Y_s	IN K	IN °C
				IN K	IN °C				
Acetaldehyde	CH_3CHO	14,5	5,0	273...293	0...20	6,3	3,45	273...291	0...18
Aceton 100 %	CH_3COCH_3	14,0	7,0	243...333	-30...+60	6,65	3,5	183...333	-90...+60
Acroleïne	CH_2CHCOH	13,1	7,3	253...333	-20...+60	-	-	862 ^{273 K 1)}	862 ^{0 °C 1)}
Acrylonitril	CH_2CHCN	14,8	7,4	273...298	0...25	-	-	828 ^{273 K 1)}	828 ^{0 °C 1)}
Adiponitril	$\text{NC}(\text{CH}_2)_4\text{CN}$	10,5	20,2	298...408	25...135	-	-	951 ^{292 K 1)}	951 ^{19 °C 1)}
Aminolactam, DL		-	-	18,0 ^{363 K 2)}	18,0 ^{80 °C 2)}	-	-	1054 ^{353 K 1)}	1054 ^{80 °C 1)}
Ammoniak	NH_3	14,2	2,5	233...298	-40...+25	6,2	2,15	198...243	-75...-30
Ammoniakwater 50 %	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	9,2	12,5	283...363	10...90	6,95	3,70	273...333	0...60
Ammoniakwater 30 %	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	8,0	13,6	283...323	10...50	7,7	4,15	263...293	-10...+20
Ammoniakwater 25 %	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	11,0	12,8	323...413	50...140	7,6	4,3	263...293	-10...+20
Ammoniakwater 9 %	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	9,8	13,2	283...363	10...90	8,4	4,7	263...293	-10...+20
Ammoniakwater 4 %	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	9,5	11,0	283...363	10...90	8,8	4,82	263...293	-10...+25
Ammoniumchloride 24 %	$\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	11,2	13,0	273...348	0...75	8,0	5,7	273...373	0...100
Ammoniumchloride 12 %	$\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	10,6	13,0	273...348	0...75	8,0	5,4	273...373	0...100
Ammoniumchloride 12 %	$\text{NH}_4\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$	9,7	13,0	273...348	0...75	7,9	5,15	273...373	0...100
Ammoniumsulfaat 50 %	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	7,9	7,7	273...373	0...100
Ammoniumsulfaat 40 %	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$	11,5	17,1	298...353	25...80	7,95	7,15	273...373	0...100
Ammoniumsulfaat 20 %	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$	10,3	14,7	273...353	0...80	7,9	6,1	273...373	0...100
Ammoniumsulfaat 12 %	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$	10,1	13,9	273...353	0...80	7,9	5,7	273...373	0...100
Ammoniumnitraat 100 %	NH_4NO_3	11,8	26,8	433...458	160...185	-	-	-	-
Ammoniumnitraat 90 %	$\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	7,65	9,17	373...453	100...180
Ammoniumnitraat 80 %	$\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	7,65	8,61	333...453	60...180
Ammoniumnitraat 66 %	$\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{H}_2\text{O}$	11,8	16,3	298...368	25...95	7,50	8,0	313...-	40...-
Ammoniumnitraat 60 %	$\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{H}_2\text{O}$	11,8	15,4	283...368	10...95	7,45	7,61	291...453	18...180
Ammoniumnitraat 50 %	$\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{H}_2\text{O}$	12,8	14,0	283...373	10...100	7,5	7,1	273...353	0...80
Aniline	$\text{C}_6\text{H}_7\text{N}$	5,3	17,6	268...313	-5...40	7,7	5,3	273...323	0...50
Azijszuur 100 %	CH_3COOH	12,2	14,0	283...383	10...110	6,6	5,6	273...373	0...100
Azijszuur 70 %	$\text{CH}_3\text{COOH}/\text{H}_2\text{O}$	8,5	16,6	293...303	20...30	6,9	5,75	273...313	0...40
Azijszuuranhydride	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$	13,0	12,7	273...393	0...120	-	-	1082 ^{293 K 1)}	1082 ^{20 °C 1)}
Adipinezuur	$\text{HOOC}(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$	8,3	30,6	433...473	160...200	-	-	-	-
Benzaldehyde	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$	-	-	1,40 ^{298 K 2)}	1,40 ^{25 °C 2)}	6,8	5,6	273...293	0...20
Benzeen	-	12,4	10,9	285...333	12...60	-	-	732 ^{286,5 K 1)}	732 ^{15,5 °C 1)}
Benzeen (Benzol)	C_6H_6	13,0	10,9	283...463	10...190	6,7	4,2	273...343	0...70
Benzoezuur	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_2$	10,2	22,4	403...423	130...150	6,85	6,7	403...453	130...180
Benzylalcohol	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH}$	6,0	19,2	288...303	15...30	7,4	5,5	273...323	0...50
Bicyclohexyl	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}$	9,5	18,8	273...373	0...100	7,4	4,1	293...323	20...50
Brine calciumchloride 25 %	$\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$	7,5	16,1	263...293	-10...+20	7,75	7,15	273...373	0...100
Brine natriumchloride 26 %	$\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	7,6	6,85	273...373	0...100
Brine natriumchloride 24 %	$\text{NaCl}/\text{H}_2\text{O}$	10,0	15,5	277...355	4...82	-	-	-	-

1) Massadichtheid in kg/m^3 bij de aangegeven temperatuur;2) Viscositeit in $\text{mPa}\cdot\text{s}$ bij de aangegeven temperatuur.

Vervolg tabel 11.1

MEDIUM	FORMULE	DYNAMISCHE VISCOSITEIT			MASSADICHTHEID			TEMPERATUURGRENZEN		
		X _v	Y _v	TEMPERATUURGRENZEN		X _s	Y _s	IN K	IN °C	
				IN K	IN °C					
Calciumnitraat 40 %	Ca(NO ₃) ₂ /H ₂ O	8,9	17,8	293...333	20...60	-	-	1365 ^{291 K 1)}	1365 ^{18 °C 1)}	
Calciumnitraat 40 %	Ca(NO ₃) ₂ /H ₂ O	10,0	15,3	293...333	20...60	7,7	6,95	279...303	6...30	
Calciumnitraat 40 %	Ca(NO ₃) ₂ /H ₂ O	10,4	13,9	293...333	20...60	7,95	6,25	279...303	6...30	
Chloroform	CHCl ₃	14,2	10,0	273...333	0...60	5,50	8,83	223...323	-50...+50	
Chloorsulfonzuur	SO ₃ HCl	11,3	17,7	273...333	0...60	-	-	1784 ^{273 K 1)}	1784 0 °C 1)	
Chloortolueen-ortho	C ₇ H ₇ Cl	12,7	13,2	273...353	0...80	-	-	1082 ^{293 K 1)}	1082 20 °C 1)	
Chloortolueen-meta	C ₇ H ₇ Cl	13,0	12,3	273...353	0...80	-	-	1072 ^{293 K 1)}	1072 20 °C 1)	
Chloortolueen-para	C ₇ H ₇ Cl	13,0	12,5	283...353	10...80	-	-	1070 ^{293 K 1)}	1070 20 °C 1)	
(ortho)		9,1	20,1	313...433	40...160	-	-	1031 ^{313 K 1)}	1031 40 °C 1)	
(meta)		7,4	21,8	313...433	40...160	-	-	1035 ^{293 K 1)}	1035 20 °C 1)	
(para)		8,0	21,9	313...433	40...160	-	-	1018 ^{313 K 1)}	1018 40 °C 1)	
Cyclohexaan	C ₆ H ₁₂	11,5	13,0	273...373	0...100	6,85	3,30	273...473	0...200	
Cyclohexanol t > 82 °C	C ₆ H ₁₂ O	7,2	23,1	355...433	82...160	7,05	4,75	298...423	25...150	
Cyclohexanol t < 82 °C	C ₆ H ₁₂ O	2,9	23,8	293...355	20...82	7,05	4,85	298...423	25...150	
Cyclohexanon	C ₆ H ₁₀ O	11,2	16,6	293...363	20...90	7,10	4,69	283...363	10...90	
Cyclohexylacetaat	C ₈ H ₁₄ O ₂	10,6	16,5	283...348	10...75	6,9	4,9	273...333	0...60	
Caprolactam (E)	C ₆ H ₁₀ ONH	5,7	26,8	353...373	80...100	7,0	5,70	343...373	70...100	
Caprolactamwater 80 %	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ O	3,1	21,9	293...323	20...50	7,1	5,62	293...353	20...80	
Caprolactamwater 65 %	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ O	4,3	20,2	293...323	20...50	7,2	5,55	293...353	20...80	
Caprolactamwater 50 %	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ O	7,0	19,0	293...323	20...50	7,25	5,5	293...353	20...80	
Caprolactamwater 35 %	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ O	6,6	17,1	293...323	20...50	7,3	5,48	293...353	20...80	
Caprolactamwater 20 %	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ O	6,8	15,2	293...323	20...50	7,6	5,25	293...353	20...80	
Chinoline	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ O	9,0	18,3	282...298	9...25	7,25	5,95	273...473	0...200	
Caprolactamsulfaat	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ SO ₄	5,9	35,8	353...423	80...150	7,5	9,1	293...373	20...100	
(mol. verhouding 1,5)										
Caprolactamsulfaat	C ₆ H ₁₀ ONH/H ₂ SO ₄	8,0	33,0	353...423	80...150	7,6	9,6	293...373	20...100	
(mol. verhouding 2)										
Cyclohexanonoxim	C ₆ H ₁₀ NON	4,3	26,5	358...383	85...110	6,7	5,6	353...383	80...110	
Diethylether (ether)	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	14,4	5,3	273...373	0...100	6,4	2,9	273...343	0...70	
Dimethyltereftaat (DMT)	C ₄ H ₆ O ₄	13,0	19,5	453...473	180...200	-	-	1067 ^{423 K 1)}	1067 ^{150 °C 1)}	
Dibroomethaan	CH ₂ BrCH ₂ Br	12,6	15,7	273...403	0...130	5,0	13,5	273...303	0...30	
Diethyloxalaat	C ₆ H ₁₀ O ₄	11,5	16,3	273...433	0...160	6,5	5,8	293...433	20...160	
Dimethyloxalaat	C ₄ H ₆ O ₄	12,3	15,7	333...413	60...140	6,05	6,9	333...413	60...140	
Diphenyl	C ₁₂ H ₁₀	12,5	17,5	383...473	110...200	7,2	5,4	383...473	110...200	
Dipropyloxaat	C ₈ H ₁₄ O ₄	10,0	17,6	273...393	0...120	6,75	5,35	273...393	0...120	
Dichloorethaan	CH ₂ ClCH ₂ Cl	12,6	12,1	273...353	0...80	5,9	7,2	273...348	0...75	
Diphenyloxide	C ₁₂ H ₈ O	11,0	18,1	298...313	25...40	-	-	1066 ^{303 K 1)}	1066 ^{30 °C 1)}	

1) Massadichtheid in kg/m³ bij de aangegeven temperatuur;

MEDIUM	FORMULE	DYNAMISCHE VISCOSITEIT				MASSADICHTHEID				TEMPERATUURGRENZEN	
		X _v	Y _v	TEMPERATUURGRENZEN		X _s	Y _s			IN K	IN °C
				IN K	IN °C						
Ethylacetaat	CH ₃ COOC ₂ H ₅	13,6	8,9	293...463	20...190	6,6	4,4			273...313	0...40
Ethylalcohol 100 %	C ₂ H ₅ OH	10,5	13,7	273...348	0...75	7,0	3,3			273...313	0...40
Ethylalcohol 90 %	C ₂ H ₅ OH/H ₂ O	8,9	14,9	273...348	0...75	7,0	3,6			283...313	10...40
Ethylalcohol 40 %	C ₂ H ₅ OH/H ₂ O	6,5	16,6	273...353	0...80	7,4	4,55			283...313	
Ethylbenzeen	C ₆ H ₁₀	13,3	1,2	253...403	-20...130	7,0	4,0			253...403	
Ethylbromide	C ₂ H ₅ Br	14,3	8,1	293...433	20...160	5,25	8,60			173...303	
Ethylchloride	C ₂ H ₅ Cl	14,8	5,75	273...433	0...25	5,4	4,45			273...283	
Ethylether	C ₄ H ₁₀ O	15,2	5,0	273...298	0...25	6,4	2,90			273...373	
Ethylformaat	HCOOCH ₂ CH ₃	14,0	8,2	273...298	0...55	6,25	4,60			273...373	
Ethyljodide	C ₂ H ₅ I	14,7	10,2	273...328	15...30	5,1	11,87			273...303	
Ethyleenglycol	C ₂ H ₆ O ₂	6,0	23,1	288...303	15...90	7,25	6,12			273...453	
		9,7	22,3	364...453	91...180						
Ethylbenzooat	C ₂ H ₅ CO ₂ C ₂ H ₅	8,4	15,9	288...338	15...65	7,0	5,64			273...343	
Fosgeen	COCl ₂	16,2	9,2	253...248	-20...+5	4,75	7,8			253...333	
Freon-11	CCl ₃ F	15,2	8,6	283...363	10...90	-	-			1537 ^{273 K 1)}	
Freon-12	CCl ₂ F ₂	17,9	4,9	283...363	10...90	-	-			1403 ^{273 K 1)}	
Freon-21	CHCl ₂ F	16,2	7,0	283...363	10...90	-	-			1425 ^{273 K 1)}	
Freon-22	CHClF ₂	18,4	4,2	283...363	10...90	-	-			1282 ^{273 K 1)}	
Freon-113	CCl ₂ F-CClF ₂	13,7	10,4	283...363	10...90	-	-				
Ftaalzuuranhydride	C ₈ H ₄ O ₃	14,6	19,0	403...493	130...220	7,0	7,8				
Glycerol 100 % 3)	C ₃ H ₈ O ₃	1,0	30,0	293...303	20...30	7,4	7,4				
Glycerol 50 %	C ₃ H ₈ O ₃ /H ₂ O	6,0	19,0	293...303	20...30	8,0	6,22				
Glutaarzuur	C ₅ H ₈ O ₄	7,45	31,0	373...473	100...200	7,0	7,55				
Hexamethyleendiamine (HMD)	C ₆ H ₁₆ N ₂	11,0	17,0	323...393	50...120	7,31	3,81				
Hydroxylamine (Hyam)	NH ₂ OH	8,2	17,2	283...363	10...90	7,1	7,01				
Hydroxylamine (Hadsa)	NH ₂ OH(SO ₃) ₂	6,2	14,6	273...333	0...60	7,15	7,05				
Hexaan	C ₆ H ₁₄	14,6	7,0	273...338	0...65	6,88	2,32				
Heptanon-2	C ₇ H ₁₄ O	11,7	11,85	288...303	15...30	6,9	3,6				
Isobutylalcohol	(CH ₃) ₂ C ₂ H ₃ OH	6,6	17,8	283...323	10...50	7,3	3,4				
Indeen	C ₉ H ₈	11,0	15,8	273...373	0...100	6,5	5,12				
Kooldioxyde	CO ₂	11,5	0,3	263...283	-10...+10	2,9	4,65				
Kwik 4)	Hg	18,3	16,2	253...613	-20...+340	8,4	8,4				

1) Massadichtheid in kg/m³ bij de aangegeven temperatuur;
3) Viscositeit is 2x de gevonden waarde uit het nomogram
4) Massadichtheid is 10x de gevonden waarde uit het nomogram

Vervolg tabel 11.1

MEDIUM	FORMULE	DYNAMISCHE VISCOSITEIT				MASSADICHTHEID				TEMPERATUURGRENZEN	
		X _v	Y _v	TEMPERATUURGRENZEN		X _s	Y _s			IN K	IN °C
				IN K	IN °C						
Maleinezuuranhydride	C ₂ H ₂ C ₂ O ₃	10,8	18,8	333...373	60...100	-	-			1306 ^{333 K 1)}	
Maleinezuur-water 2 %	C ₂ H ₂ (COOH) ₂	8,5	15,5	293...333	20...60	-	-			1005 ^{293 K 1)}	
Maleinezuur-water 4 %	C ₂ H ₂ (COOH) ₂	8,5	15,8	293...333	20...60	-	-			1013 ^{293 K 1)}	
Methanol 100 %	CH ₃ OH	12,2	10,3	278...338	5...65	7,1	3,3			273...333	
Methanol 90 %	CH ₃ OH/H ₂ O	11,1	12,1	298...323	25...50	6,9	3,65			273...293	
Methanol 40 %	CH ₃ OH/H ₂ O	8,3	15,0	298...323	25...50	7,5	4,55			273...293	
Methylacetaat	CH ₃ COOCH ₃	14,0	7,9	273...328	0...55	6,30	4,65			273...293	
Methylchloride	CH ₃ Cl	14,5	3,8	273...363	0...90	-	-			911 ^{298 K 1)}	
Mierezuur	HCOOH	10,0	15,4	283...323	10...50	6,0	6,9			283...323	
1-methylnafteen	C ₁₁ H ₁₀	9,5	18,1	278...373	5...100	7,4	5,3			273...373	
2-methylnafteen	C ₁₁ H ₁₀	11,7	16,8	313...373	40...100	7,2	5,2			313...448	
Methylbenzooat	C ₆ H ₅ CO ₂ CH ₃	9,5	15,85	288...303	15...30	6,9	5,9			273...303	
Nafteen	C ₁₀ H ₈	8,7	17,8	353...425	80...152	7,2	5,3			353...425	
Natriumcarbonaat 30 %	Na ₂ CO ₃ /H ₂ O	8,1	19,6	293...373	20...100	-	-			1327 ^{303 K 1)}	
Natriumcarbonaat 20 %	Na ₂ CO ₃ /H ₂ O	9,1	17,4	293...373	20...100	-	-			1209 ^{303 K 1)}	
Natriumcarbonaat 10 %	Na ₂ CO ₃ /H ₂ O	9,5	15,3	293...373	20...100	7,7	6,0			273...373	
Natriumchloride 20 %	NaCl/H ₂ O	10,1	15,0	273...363	0...90	7,7	6,45			273...373	
Natriumchloride 10 %	NaCl/H ₂ O	10,2	13,8	273...363	0...90	7,8	5,75			273...373	
Natriumchloride 5 %	NaCl/H ₂ O	10,0	13,3	273...363	0...90	7,9	5,35			273...373	
Natriumhydroxyde 50 %	NaOH/H ₂ O	4,0	24,9	313...343	40...70	7,35	9,7			273...373	
Natriumhydroxyde 20 %	NaOH/H ₂ O	7,6	18,6	293...343	20...70	7,60	7,05			273...373	
Natriumhydroxyde 10 %	NaOH/H ₂ O	8,8	15,4	293...343	20...70	7,80	5,85			273...373	
Natriumnitrat 45 %	NaNO ₃ /H ₂ O	20	20,1	303...323	30...50	7,3	8,3			273...373	
Natriumnitrat 20 %	NaNO ₃ /H ₂ O	20	15,2	303...323	30...50	7,55	6,35			273...373	
Natriumnitrat 8 %	NaNO ₃ /H ₂ O	20	14,0	303...323	30...50	7,80	5,55			273...373	
Nitrobenzeen	C ₆ H ₅ NO ₂	10,25	16,0	273...303	0...30	-	-			1213 ^{283 K 1)}	
Octaan	C ₈ H ₁₈	13,5	9,9	273...393	0...120	7,07	2,63			273...403	
Oleum 10 %)	~102 % H ₂ SO ₄	6,8	25,2	293...348	20...75	5,8	11,85			288...318	
Oleum 12 %) H ₂ S ₂ O ₇	~104,5 % H ₂ SO ₄	6,5	25,5	293...348	20...75	6,55	12,6			288...318	
Oleum 25 %)	~105,6 % H ₂ SO ₄	6,5	25,6	293...348	20...75	6,6	12,8			288...318	
Oleum 45 %)	~110 % H ₂ SO ₄	6,0	26,5	308...348	35...75	6,2	12,95			288...318	
Pentaaan	C ₅ H ₁₂	14,9	5,0	273...303	0...30	6,90	2,03			223...373	
Phenol	C ₆ H ₅ OH	6,7	19,9	323...373	50...100	6,9	5,8			323...373	
Pyridine	C ₅ H ₅ N	13,0	12,7	293...363	20...90	6,8	5,0			293...363	
Propionzuur	C ₂ H ₅ CO ₂ H	13,0	13,45	288...363	15...90	6,7	5,1			273...303	

1) Massadichtheid in kg/m³ bij de aangegeven temperatuur;

Vervolg tabel 11.1

MEDIUM	FORMULE	DYNAMISCHE VISCOSITEIT				MASSADICHTHEID				TEMPERATUURGRENZEN	
		X _v	Y _v	TEMPERATUURGRENZEN		X _s	Y _s	IN K	IN °C	IN K	IN °C
				IN K	IN °C						
Salpeterzuur 100 %	HNO ₃	12,3	12,3	283...313	10...40	5,6	9,1	283...313	10...40	283...313	10...40
Salpeterzuur 90 %	HNO ₃ /H ₂ O	10,5	14,2	283...313	10...40	5,7	8,9	283...313	10...40	283...313	10...40
Salpeterzuur 80 %	HNO ₃ /H ₂ O	9,5	15,5	283...313	10...40	5,9	8,7	283...313	10...40	283...313	10...40
Salpeterzuur 60 %	HNO ₃ /H ₂ O	9,0	15,8	283...313	10...40	6,2	8,1	283...313	10...40	283...313	10...40
Salpeterzuur 40 %	HNO ₃ /H ₂ O	9,9	14,8	283...313	10...40	6,8	7,2	283...313	10...40	283...313	10...40
Salpeterzuur 20 %	HNO ₃ /H ₂ O	10,0	13,4	283...313	10...40	7,4	6,1	283...313	10...40	283...313	10...40
Salpeterzuur 10 %	HNO ₃ /H ₂ O	9,7	13,0	283...313	10...40	8,2	5,55	283...313	10...40	283...313	10...40
Terpetijn	-	11,6	15,0	273...358	0...85	-	-	866 ^{2885 K 1)}	866 ^{155 °C 1)}	866 ^{2885 K 1)}	866 ^{155 °C 1)}
Tetrachloorkoolstof	CCl ₄	12,6	13,0	273...373	0...100	5,35	9,57	273...313	0...40	273...313	0...40
Tolueen	C ₆ H ₅ CH ₃	13,8	10,4	273...463	0...190	7,05	4,00	273...373	0...100	273...373	0...100
Titaantetrachloride	TiCl ₄	14,2	12,0	263...303	-10...+30	-	-	-	-	-	-
Ureumwater 99 %	CH ₄ N ₂ O	12,0	23,7	403...423	130...150	-	-	1297 ^{298 K 1)}	1297 ^{25 °C 1)}	1297 ^{298 K 1)}	1297 ^{25 °C 1)}
Ureumwater 95 %	CH ₄ N ₂ O	12,0	22,7	393...423	120...150	-	-	1283 ^{298 K 1)}	1283 ^{25 °C 1)}	1283 ^{298 K 1)}	1283 ^{25 °C 1)}
Ureumwater 90 %	CH ₄ N ₂ O	11,8	21,5	378...423	105...150	-	-	1266 ^{298 K 1)}	1266 ^{25 °C 1)}	1266 ^{298 K 1)}	1266 ^{25 °C 1)}
Ureumwater 85 %	CH ₄ N ₂ O	11,4	20,9	373...423	100...150	-	-	1250 ^{298 K 1)}	1250 ^{25 °C 1)}	1250 ^{298 K 1)}	1250 ^{25 °C 1)}
Ureumwater 75 %	CH ₄ N ₂ O	11,1	19,1	353...423	80...150	-	-	1217 ^{298 K 1)}	1217 ^{25 °C 1)}	1217 ^{298 K 1)}	1217 ^{25 °C 1)}
Vinylacetaat	C ₄ H ₆ O ₂	14,3	8,3	293...333	20...60	6,6	4,63	282...293	9...20	282...293	9...20
Vinylchloride	CH ₂ =CHCl	14,8	3,8	263...243	-10...-30	-	-	983 ^{253 K 1)}	983 ^{-20 °C 1)}	983 ^{253 K 1)}	983 ^{-20 °C 1)}
Water	H ₂ O	10,1	13,0	273...373	0...100	8,0	5,0	273...373	0...100	273...373	0...100
Xyleen-ortho	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	13,0	12,0	273...413	0...140	7,1	4,1	253...423	-20...+150	253...423	-20...+150
Xyleen-meta	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	13,8	10,6	273...413	0...140	7,0	4,0	273...373	0...1000	273...373	0...1000
Xyleen-para	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	13,7	10,8	273...413	0...140	7,0	4,0	273...403	0...130	273...403	0...130
Zwavelzuur	H ₂ SO ₄	6,0	23,7	288...328	15...55	6,9	12,2	273...353	0...80	273...353	0...80
Zwavelzuur 99,6 %	H ₂ SO ₄ /H ₂ O	10,0	25,1	328...353	55...80	6,8	12,2	298...348	25...75	298...348	25...75
Zwavelzuur 95 %	H ₂ SO ₄ /H ₂ O	7,1	25,0	298...348	25...75	7,0	12,2	273...348	0...75	273...348	0...75
Zwavelzuur 80 %	H ₂ SO ₄ /H ₂ O	7,3	24,5	273...348	0...75	6,85	11,2	298...348	25...75	298...348	25...75
Zwavelzuur 60 %	H ₂ SO ₄ /H ₂ O	7,5	24,0	298...348	25...75	7,1	9,6	273...248	0...75	273...248	0...75
Zwavelzuur 40 %	H ₂ SO ₄ /H ₂ O	9,5	20,8	273...348	0...75	7,3	7,8	273...248	0...75	273...248	0...75
Zwavelzuur 20 %	H ₂ SO ₄ /H ₂ O	10,0	17,5	273...348	0...75	7,6	6,35	273...248	0...75	273...248	0...75
Zwavelzuur 10 %	H ₂ SO ₄ /H ₂ O	9,8	14,9	273...348	0...75	8,1	5,7	273...348	0...75	273...348	0...75
Zwavelzuur 30 %	HCl/H ₂ O	9,7	14,0	273...348	0...75	7,6	6,45	268...373	-5...+100	268...373	-5...+100
Zoutzuur 30 %	HCl/H ₂ O	-	-	1.584 ^{283 K 1)}	1.584 ^{20 °C 2)}	7,8	5,95	268...373	-5...+100	268...373	-5...+100
Zoutzuur 20 %	HCl/H ₂ O	-	-	1.334 ^{293 K 2)}	1.334 ^{20 °C 2)}	7,9	5,45	268...373	-5...+100	268...373	-5...+100
Zoutzuur 10 %	HCl/H ₂ O	-	-	1.155 ^{293 K 2)}	1.155 ^{20 °C 2)}	5,9	7,25	273...323	0...50	273...323	0...50
Zwavelkoolstof	CS ₂	15,7	7,3	273...323	0...50	4,7	7,9	223...263	-50...-10	223...263	-50...-10
Zwavedioxyde	SO ₂	15,2	7,1	263...383	-10...+10	4,7	7,9	223...263	-50...-10	223...263	-50...-10

1) Massadichtheid in kg/m³ bij de aangegeven temperatuur

2) Viscositeit in mPa.s bij de aangegeven temperatuur

Tabel 11.2: X_v - en Y_v -waarden voor het bepalen van de dynamische viscositeit, alsmede massadichtheden

MEDIUM	FORMULE	RELATIEVE MOLECUULMASSA	DYNAMISCHE VISCOSITEIT				MASSADICHTHEID IN kg/m ³ 1)
			X _v	Y _v	TEMPERATUURGRENZEN		
					IN K	IN °C	
Acetaldehyde	CH ₃ CHO	44,05	8,7	14,4	308...351	35...78	1,173 0,771 1,783
Acetyleen	C ₂ H ₂	26,04	9,3	15,3	293...393	20...120	
Acetongas	CH ₃ COCH ₃	58,08	8,1	13,4	373...598	100...325	
Ammoniakgas	NH ₃	17,03	8,0	16,2	273...723	0...450	
Argon	Ar	39,91	10,8	22,6	273...1073	0...800	7,139 2,599 2,60
Benzeen	C ₆ H ₆	78,11	8,5	13,2	293...523	20...250	
Broomgas	Br ₂	159,83	9,0	19,8	293...773	20...500	
Butaan	C ₄ H ₁₀	58,08	8,0	13,5	293...393	20...120	
Buteen	C ₄ H ₈	56,10	8,6	13,4	293...393	20...120	3,214 4,35 ³³⁴ K = 61 °C 2) 2,335
Chloorgas	Cl ₂	70,91	9,1	18,1	273...773	0...500	
Chloroform	CHCl ₃	119,39	8,8	15,7	293...623	20...350	
Chloroformgas	C ₂ H ₂	52,02	8,75	15,75	288...373	15...100	
Cyclohexaan	C ₆ H ₁₂	84,16	9,0	12,0	323...573	50...300	1,252 1,6392
Cyaaanwaterstof	HCN	27,03	7,25	14,25	293...623	20...350	
Chloorwaterstof	HCl	36,47	8,5	18,5	283...323	10...50	
Dimethylether	CH ₃ OCH ₃	46,07	8,4	15,2	293...393	20...120	
Diëthylether	C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅	74,12	8,9	13,0	398...573	125...300	2,110 1,978
Distikstofoxyde	N ₂ O	44,02	9,3	18,9	293...548	20...275	
Ethylacetaatgas	CH ₃ COOC ₂ H ₅	88,10	8,5	13,2	398...598	125...325	
Ethylalcoholgas	C ₂ H ₅ OH	46,07	8,7	14,3	383...573	110...300	
Ethylchloride	C ₂ H ₅ Cl	64,52	8,5	15,6	273...323	0...50	2,87 1,260 1,3566
Ethyleen	C ₂ H ₄	28,06	9,6	15,3	193...523	-80...+250	
Ethaan	C ₂ H ₆	30,05	9,4	14,4	293...523	20...250	
Fluor	F ₂	38,00	7,6	23,3	273...323	0...50	
Freon-11	CCl ₃ F	137,37	9,8	15,7	233...389	-40...116	3,0 ³⁵³ K = 80 °C 2)
Freon-12	CCl ₂ F ₂	120,92	10,4	16,4	233...389	-40...116	
Freon-21	CHCl ₂ F	102,93	10,4	15,7	233...389	-40...116	
Freon-22	CHClF ₂	86,47	10,1	17,0	273...353	0...80	
Freon-113 ³⁾	CCl ₂ F-CClF ₂	101,92 - 85,46	11,3	13,75	273...353	0...80	0,1785
Freon-113 ⁴⁾	CCl ₂ F-CClF ₂	101,92 - 85,46	10,7	14,4	303...353	30...80	
Helium	He	4,00	11,3	21,0	173...1073	-100...+800	
Hexaan	C ₆ H ₁₄	86,17	8,7	11,9	398...573	125...300	
Jodiumdamp	J ₂	253,84	8,8	18,7	373...773	100...500	5,789
Joodwaterstof	HJ	127,93	9,0	18,6	323...523	50...250	

1) De massadichtheid mag in vele gevallen niet zonder meer met de wetten voor ideale gassen worden omgerekend naar andere temperaturen en drukken. 2) Massadichtheid in kg/m³ bij de aangegeven temperatuur en absolute druk van 1,013 bar. 3) Dampspanning 0,101 bar (absolute druk) 4) Dampspanning 0,304 bar (absolute druk)

Vervolg tabel 11.2

MEDIUM	FORMULE	RELATIEVE MOLECUULMASSA	DYNAMISCHE VISCOSITEIT				MASSADICHTHEID IN kg/m ³ 1)
			X _v	Y _v	TEMPERATUURGRENZEN		
					IN K	IN °C	
Koolzuurgas	CO ₂	44,01	9,7	18,6	173...1073	-100...+800	1,977
Koolmonoxyde	CO	28,01	10,5	19,9	198...523	-75...+250	1,250
Lucht (CO ₂ -vrije)	-	-	10,7	20,3	173...973	-100...+700	1,293
Methaan	CH ₄	16,04	10,0	15,5	293...773	20...500	0,717
Methylalcohol	CH ₃ OH	32,04	8,5	15,6	393...593	120...320	2,308
Methylchloride	CH ₃ Cl	50,48	8,5	16,3	293...403	20...130	2,020
Propan	C ₃ H ₈	44,09	9,2	13,5	293...548	20...275	1,915
Pentaan	C ₅ H ₁₂	72,15	9,0	12,0	398...573	125...300	1,251
Propylalcohol	C ₃ H ₇ OH	60,09	8,2	13,5	398...548	125...275	1,340
Propyleen	C ₃ H ₆	42,08	8,8	14,1	293...523	20...250	1,978
Stikstof	N ₂	28,02	10,9	19,7	193...1073	-80...+800	0,576 ^{373 K = 100 °C} 2) 0,0899
Stikstofmonoxide	NO	30,01	10,8	20,7	293...523	20...250	
Stikstofdioxyde	NO ₂	46,01	9,3	18,9	293...548	20...275	
Stikstofoxydul	N ₂ O	44,02	11,15	17,0	273...323	0...50	
Synthesemengsel	3 H ₂ + N ₂	-	8,6	12,5	333...523	60...250	
Tolueen	C ₆ H ₅ CH ₃	92,13	8,0	16,0	373...773	100...500	5,851
Waterdamp	H ₂ O	18,02	11,1	12,4	173...1073	-100...+800	
Waterstof	H ₂	2,016	11,0	22,15	273...284	0...11	
Xenon	Xe	131,20	8,5	17,75	273...323	0...50	
Zwavelwaterstof	H ₂ S	34,08	8,5	15,8	373...573	100...300	
Zwavelkoolstof	CS ₂	76,13	9,3	18,0	283...1173	10...900	1,539
Zwaveldioxyde	SO ₂	64,06	10,5	21,5	293...523	20...250	3,40
Zuurstof	C ₂	32,00					2,927
							1,429

1) De massadichtheid mag in vele gevallen niet zonder meer met de wetten voor ideale gassen worden omgerekend naar andere temperaturen en drukken.
2) Massadichtheid in kg/m³ bij de aangegeven temperatuur en een absolute druk van 1,013 bar.

12 VERMELDE NORMATIEVE DOCUMENTEN

- Rapport nummer 4569 CL-APS 1.