

basisgegevens aardgassen

N. V. Nederlandse Gasunie



© 1980 N. V. Nederlandse Gasunie

Gehele of gedeeltelijke overname is alleen
geoorloofd na schriftelijke toestemming
van de N. V. Nederlandse Gasunie.

VOORWOORD

Uit de vele reacties op het handboek 'Basisgegevens over Gronings aardgas' is gebleken, dat een dergelijk naslagwerk in een behoefte voorziet. Behalve het Groningse aardgas zullen in de komende jaren toenemende hoeveelheden aardgas op de markt komen met een energie-inhoud en gebruikseigenschappen die afwijken van het Groningse aardgas. Hierdoor is een directe distributie niet zonder meer mogelijk.

Ook voor deze 'afwijkende' aardgassen bestaat een duidelijke behoefte aan gegevens, zoals die voor het Groningse aardgas voorhanden zijn. De Gasunie heeft daarom besloten een handboek uit te geven dat verder reikt dan de bovenbedoelde uitgave, die zich beperkte tot gegevens over het Groningse aardgas. Ook het formaat en de opzet van deze nieuwe uitgave zijn aangepast, waardoor een handzamer en overzichtelijker naslagwerk is verkregen.

Anders dan voor het Groningse aardgas is het echter niet altijd mogelijk gebleken de gegevens over de diverse grootheden van alle aardgassen in één enkele grafiek of tabel te 'vangen', daar het aantal variabelen door het verschil in samenstelling sterk toeneemt. In die gevallen is volstaan met de rekenwijze of de geldende formules.

Alle dimensies zijn uitsluitend in SI-eenheden gegeven. De benodigde omrekeningsfactoren zijn in de diverse tabellen terug te vinden.

Zoals uit het grote aantal literatuurverwijzingen blijkt, zijn vele van de vermelde gegevens het resultaat van een uitgebreide literatuurstudie, waarbij steeds getracht is een verantwoorde keuze te maken uit de grote hoeveelheid aan gegevens over de diverse onderwerpen. Een aantal formules werd uitgebreid en geschikt gemaakt voor niet-ideale gassen.

In hoofdstuk C 15 worden meetgegevens verstrekt over de explosiegrenzen van het Groningse aardgas en Ekofisk-gas. De metingen werden in opdracht van de N. V. Nederlandse Gasunie uitgevoerd door de afdeling MR (Milieu Research) van DSM.

Het voordeel van dit naslagwerk is, dat voor de gebruiker reeds een keuze is gemaakt uit een groot aantal basisgegevens en dat de resultaten in één werk zijn verzameld. Hierdoor is een vergaande uniformiteit verkregen.

Voor alle gegevens die uit een literatuurstudie zijn verkregen, draagt de N. V. Nederlandse Gasunie geen enkele verantwoordelijkheid.

In de literatuurvermeldingen wordt een aantal malen verwezen naar rapporten van de N. V. Nederlandse Gasunie. Deze rapporten zijn op aanvraag gratis te verkrijgen.

inhoud

HOOFDSTUK A

- 19 **A 1 Algemene gegevens**
 A 1a Calorie:
 thermochemische (cal_{tc})
 internationale (cal_{IT})
 A 1b Lichtsnelheid in vacuüm
 A 1c Normaal (molair) volume ideaal gas
 A 1d Absolute temperatuur
 A 1e Absolute (molaire) gasconstante
 A 1f Versnelling van de zwaartekracht (normversnelling)
 A 1g Atomaire massa
 A 1h Definitie m^3
- 20 **A 2 Grondeenheden van het SI-stelsel**
 A 2a Meter (m)
 A 2b Kilogram (kg)
 A 2c Seconde (s)
 A 2d Ampère (A)
 A 2e Kelvin (K)
 A 2f Mol (n)
 A 2g Candela (cd)
 A 2h Radiaal (rad)
 A 2i Steradiaal (sr)
- 21 **A 3 Grondeenheden en de meest gebruikte voorvoegsels**
 A 3a Voorvoegsels bij SI-eenheden
 A 3b Tijd (t)
 A 3c Lengte ($l, b, h, r, d, s, \lambda$)
 Oppervlak (A)
 Inhoud, volume (V)
 A 3d Temperatuur (T)
 A 3e Massa (m)
 A 3f Stof (M)
 A 3g Kracht (F)
 A 3h Druk, spanning (p)
 A 3i Energie (E, U, Q, W)
 A 3j Vermogen (P)
 A 3k Viscositeit:
 dynamische (μ)
 kinematische (ν)
 A 3l Elektriciteit:
 stroomsterkte (I)
 spanning (V)
 weerstand (R)
 A 3m Eenheden, die verbonden zijn met het SI-stelsel:

<i>pagina</i>	<i>rubriek</i>	<i>onderwerp</i>	7
		tijd (d, h, min)	
		oppervlak (a, ha)	
		volume (l, hl, dl, cl, ml)	
		temperatuur (°C)	
		massa (t)	
		druk (bar, mbar)	
		energie (kWh)	
25	A 4	Temperatuurherleiding	
		Graad Celsius (°C)	
		Kelvin (K)	
		Graad Fahrenheit (°F)	
		Graad Rankine (°R)	
26	A 5	Definities	
	A 5a	Aardgas	
	A 5b	Calorische waarde:	
		bovenwaarde (H_s)	
		onderwaarde (H_i)	
	A 5c	Dichtheid ten opzichte van lucht (d)	
	A 5d	Wobbe-index (W)	
		Erweiterte Wobbe-index (W_e)	
	A 5e	Gasmodulus (m)	
	A 5f	SRG-methode	
	A 5g	Stoichiometrische luchtbehoefte (l)	
	A 5h	Luchtfactor (n)	
	A 5i	Verbrandingspotentiaal van Delbourg (C)	
	A 5j	Roetindex (l)	
	A 5k	Laminaire verbrandingssnelheid (w)	
	A 5l	Explosiegrenzen:	
		onderste (L_o)	
		bovenste (L_b)	
	A 5m	Deflagratie	
	A 5n	Detonatie	
	A 5o	Kritische temperatuur (T_k)	
	A 5p	Retrograde condensatie	
	A 5q	Gashydraten	
	A 5r	Schoorsteenverlies	
		Stralings- en convectieverliezen	
		Stilstandsverliezen	
		Nuttige energie	
		Rendement (η):	
		algemeen	
		indirect (η_{ind})	
		direct (η_{dir})	
		gebruiks- (η_{gebr})	

<i>pagina</i>	<i>rubriek</i>	<i>onderwerp</i>
	A 5s	Gasconstante (P_a)
	A 5t	Bovenkritische uitstroming
	A 5u	Zelfontbrandingstemperatuur
	A 5v	Liter
30	A 6	Enkele veel voorkomende begrippen uit de buitenlandse gasindustrie
	A 6a	Calorische waarde: bovenwaarde (verbrandingswaarde) onderwaarde (stookwaarde)
	A 6b	Volumieke massa (dichtheid)
	A 6c	Dichtheid ten opzichte van lucht
	A 6d	Explosiegrenzen
	A 6e	Zelfontbrandingstemperatuur
	A 6f	Dauwpunt (water)
	A 6g	Soortelijke warmte
	A 6h	Viscositeit
	A 6i	Kookpunt
	A 6j	Luchtbehoefte
	A 6k	Zwavelvrij gas Zwavelrijk gas
	A 6l	Warmteoverdracht: geleiding convectorie straling
	A 6m	Stilstandsverliezen
32	A 7	Veel gebruikte afkortingen
36	A 8	Eenvoudig overzicht van de indeling van de diverse koolwaterstoffen
	A 8a	Paraffinen Olefinen Naftenen (cyclo-alkanen) Aromaten
	A 8b	Mercaptanen
	A 8c	Alcoholen
38	A 9	Volumeprocenten, molprocenten, massaprocenten
	A 9a	Volumeprocenten ↔ molprocenten
	A 9b	Molprocenten ↔ massaprocenten
40	A 10	Omrekeningstabellen
	A 10a	Engelse maten en gewichten
	A 10b	Kracht
	A 10c	Druk, spanning
	A 10d	Warmtehoeveelheid
	A 10e	Warmtestroom
	A 10f	Calorische waarden
	A 10g	Warmtegeleiding
	A 10h	Warmteoverdracht

<i>pagina</i>	<i>rubriek</i>	<i>onderwerp</i>
	A 10i	Viscositeit: kinematische dynamische
42	A 11	Tabel A 11: (52 componenten) – component – chemische formule – molaire massa (M) – molvolume (V) – volumieke massa (ρ) – dichtheid ten opzichte van lucht (d) – kritische grootheden (T_k, p_k) – kookpunt (T_b)
44	A 12	Tabel A 12: enkele belangrijke kengrootheden – Archimedes (Ar) – Damköhler (Da) I, II, III, IV – Fourier (Fo) – Froude (Fr) – Grashof (Gr) – Lewis (Le) – Mach (M) – Nusselt (Nu) – Peclet (Pe) – Prandtl (Pr) – Reynolds (Re) – Schmidt (Sc) – Sherwood (Sh) – Stanton (St) – Thring – Weber (We)
46	A 13	Enkele gegevens over LNG
		HOOFDSTUK B
49	B 1	Kritische druk en temperatuur van een gasmengsel
	B 1a	'Gewogen gemiddelde' methode (Kay-mengregel)
	B 1b	EMR-methode
56	B 2	Compressibiliteit en supercompressibiliteit
	B 2a	Compressibiliteit gasmengsels
	B 2a 1	NX-19 (AGA)
	B 2a 2	BWR (Benedict-Webb-Rubin)
	B 2b	Compressibiliteit enkelvoudige gassen
	B 2b 1	API (American Petroleum Institute)
	B 2b 2	DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.)
74	B 3	Warmtegeleidingscoëfficiënt

<i>pagina</i>	<i>rubriek</i>	<i>onderwerp</i>	10
77	B 4	Volumieke massa	
79	B 5	Viscositeit	
	B 5a	Dynamische (absolute) viscositeit	
	B 5b	Kinematische viscositeit	
83	B 6	Soortelijke warmte	
	B 6a	Soortelijke warmte bij constante druk	
	B 6b	Soortelijke warmte bij constant volume	
91	B 7	Constante van Poisson	
	B 7a	Ideale gassen	
	B 7b	Niet-ideale gassen	
	B 7b 1	Volumeverandering met de druk	
	B 7b 2	Temperatuurverandering met de druk	
	B 7b 3	Geluidssnelheid	
98	B 8	H-S-diagram	
	B 8a	Enthalpie	
	B 8b	Entropie	
	B 8c	H-S-diagram	
	B 8d	Isentropische expansie ($S = \text{constant}$)	
	B 8e	Isenthalpische expansie ($H = \text{constant}$; smoring)	
	B 8f	Enthalpie, druk, temperatuur	
	B 8f 1	Isotherme verandering ($T = \text{constant}$)	
	B 8f 2	Isobare verandering ($p = \text{constant}$)	
	B 8f 3	Isentrope compressie ($S = \text{constant}$)	
106	B 9	Kengrootheid van Reynolds	
108	B 10	Drukverlies in leidingen en bochten	
	B 10a	Drukverlies in leidingen	
	B 10b	Drukverlies in bochten	
115	B 11	Watergehalte van aardgassen	
		HOOFDSTUK C	
121	C 1	Calorische waarden	
125	C 2	Verbranding van aardgas	
129	C 3	Luchtbehoefte	
131	C 4	Samenstelling verbrandingsgassen	
137	C 5	Onvolledige verbranding	
	C 5a	Zuurstofgebrek	
	C 5b	Verbrandingstechnische oorzaken	
140	C 6	Voelbare warmte en gemiddelde soortelijke warmte van verbrandingsgassen	
143	C 7	Rendementsbepaling	
150	C 8	Waterdauwpunt en watergehalte van verbrandingsgassen	
154	C 9	Volumieke massa van verbrandingsgassen	
156	C 10	Viscositeit van verbrandingsgassen	

	C 10a	Dynamische viscositeit
	C 10a 1	De methode van Sutherland
	C 10a 2	De methode volgens API
	C 10a 3	Viscositeit voor gasmengsels
	C 10b	Kinematische viscositeit
164	C 11	'Ware' soortelijke warmte van verbrandingsgassen
166	C 12	Warmtegeleidingscoëfficiënt van verbrandingsgassen
169	C 13	Theoretische vlamtemperatuur
171	C 14	Warmteoverdrachtscoëfficiënt van verbrandingsgassen
174	C 15	Explosiegrenzen en zelfontbranding van gassen
	C 15a	Algemeen
	C 15b	Beïnvloedingsgrootheden:
		samenstelling
		temperatuur
		druk
		vochtigheid
		ontstekingsenergie
		turbulentie
		vorm verbrandingsruimte
	C 15c	Berekenen van de explosiegrenzen
	C 15d	Invloed druk en temperatuur op de explosiegrenzen:
		voor Gronings aardgas
		voor Ekofisk-gas

TABELLEN

Hoofdstuk A

39 **A 9** Gemiddelde samenstelling Gronings aardgas:
volumeprocenten (x_i)
molprocenten (n_i)
massaprocenten (g_i)

42 **A 11** Gegevens over 52 componenten:
– component
– chemische formule
– molaire massa (M)
– molvolume (V)
– volumieke massa (ρ)
– dichtheid ten opzichte van lucht (d)
– kritische temperatuur (T_k)
– kritische druk (p_k)
– kookpunt (T_b)

44 **A 12** Kengrootheden
– Archimedes (Ar)
– Damköhler (Da) I, II, III, IV
– Fourier (Fo)
– Froude (Fr)
– Grashof (Gr)
– Lewis (Le)
– Mach (M)
– Nusselt (Nu)
– Peclet (Pe)
– Prandtl (Pr)
– Reynolds (Re)
– Schmidt (Sc)
– Sherwood (Sh)
– Stanton (St)
– Thring
– Weber (We)

Hoofdstuk B

49 **B 1a** Pseudo-kritische druk en temperatuur van Gronings aardgas

52 **B 1b 1** EMR-waarden van Gronings aardgas

54 **B 1b 2** Kritische druk, kritische temperatuur en EMR-waarden

64 **B 2a 2** Coëfficiënten voor de BWR-vergelijking

72 **B 2b** Kritische druk, kritische temperatuur, acentric factor, compressibiliteitsfactor
en factor voor compressibiliteitsberekening

<i>pagina</i>	<i>tabel</i>	<i>onderwerp</i>	13
74	B 3	Warmtegeleidingscoëfficiënt van Gronings aardgas	
84	B 6a	c_p° bij 101,325 kPa en $200 \leq T \leq 450$ K	
90	B 6b	c_p° van Gronings aardgas	
110	B 10a	De 'absolute' ruwheidsfactor K	
		<i>Hoofdstuk C</i>	
122	C 1a	Calorische bovenwaarde en onderwaarde	
124	C 1b	Calorische bovenwaarde en onderwaarde van Gronings aardgas	
126	C 2a	Stoichiometrische verbranding van een gas	
128	C 2b	Stoichiometrische verbranding van Gronings aardgas	
129	C 3a	Samenstelling van 'droge' lucht	
130	C 3b	Samenstelling van 'natte' lucht	
132	C 4a	Samenstelling verbrandingsgassen bij stoichiometrische verbranding van een gas met 'droge' lucht	
134	C 4b	Samenstelling verbrandingsgassen bij stoichiometrische verbranding van een gas met 'natte' lucht	
136	C 4c	Stoichiometrische verbranding van Gronings aardgas met 'natte' lucht	
136	C 4d	Stoichiometrische verbranding van Gronings aardgas met 'droge' lucht	
141	C 6	c_{pm} bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 2400$ °C	
154	C 9	Volumieke massa bij 101,325 kPa en 0 °C	
156	C 10a	Dynamische viscositeit bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 1600$ °C	
158	C 10b	Sutherland-constante	
161	C 10c	Constanten voor de berekening van de dynamische viscositeit volgens API	
162	C 10d	Kinematische viscositeit bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 1600$ °C	
164	C 11	'Ware' soortelijke warmte bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 2400$ °C	
166	C 12	Warmtegeleidingscoëfficiënt bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 1200$ °C	
173	C 14	Vormconstante voor enkele 'gaslichamen'	
176	C 15a	Explosiegrenzen in lucht en zuurstof bij 20 °C en 101,325 kPa en de zelfontbrandingstemperatuur	
179	C 15b	Berekening explosiegrenzen in lucht van Gronings aardgas	
181	C 15c	Berekening explosiegrenzen in lucht van Gronings aardgas	
182	C 15d	Explosiegrenzen in lucht bij 101,325 kPa en $20 \leq T \leq 402$ °C	

FIGUREN

Hoofdstuk A

25	A 4	Temperatuurherleidingsschalen
36	A 8a	Structuur paraffinen, olefinen, naftenen en aromaten
37	A 8b	Structuur mercaptanen
37	A 8c	Structuur alcoholen

Hoofdstuk B

51	B 1b 1	EMR-waarden als functie van de kritische druk p_k en kritische temperatuur T_k
53	B 1b 2	EMR-waarden als functie van de kritische druk p_k en kritische temperatuur T_k
58	B 2a 1	De gereduceerde druk π als functie van de dichtheid ten opzichte van lucht d , het gehalte aan CO_2 en N_2 en de absolute druk p
60	B 2a 2	De gereduceerde temperatuur τ als functie van de dichtheid ten opzichte van lucht d , het gehalte aan CO_2 en N_2 en de temperatuur T
62	B 2a 3	De compressibiliteitsfactor z als functie van π en τ
68	B 2b 1	De compressibiliteitsfactor z als functie van de gereduceerde druk p_r , de gereduceerde temperatuur T_r en de acentric factor ω voor $0,3 \leq T_r \leq 0,7$
69	B 2b 2	De compressibiliteitsfactor z als functie van de gereduceerde druk p_r , de gereduceerde temperatuur T_r en de acentric factor ω voor $0,6 \leq T_r \leq 1,10$
70	B 2b 3	De compressibiliteitsfactor z als functie van de gereduceerde druk p_r , de gereduceerde temperatuur T_r en de acentric factor ω voor $1,0 \leq T_r \leq 1,60$
75	B 3a	De warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda_{t,i}$ als functie van de temperatuur T en de molaire massa M
76	B 3b	Het verhoudingsgetal $\varphi (= \lambda_{t,p}/\lambda_{t,i})$ als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r
78	B 4	De volumieke massa ρ als functie van de molaire massa M , de compressibiliteitsfactor z , de absolute druk p en de temperatuur T
80	B 5a 1	De dynamische viscositeit $\mu_{t,1}$ als functie van de temperatuur T en de molaire massa M met correcties voor N_2 , CO_2 en H_2S
81	B 5a 2	Het verhoudingsgetal $m (= \mu_{t,p}/\mu_{t,1})$ als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r
88	B 6a	Δc_p als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r ($0 \leq p_r \leq 5$)
89	B 6a 1	Δc_p als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r ($0 \leq p_r \leq 1,0$)
92	B 7a	De grootheid N_1 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de absolute druk p en de afgeleide $(\partial z/\partial p)_T$
93	B 7b	De grootheid N_2 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de temperatuur T en de afgeleide $(\partial z/\partial T)_p$

<i>pagina</i>	<i>figuur</i>	<i>onderwerp</i>	15
94	B 7c	De grootheid N_3 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de soortelijke warmte bij constante druk c_p en de grootheid N_2	
97	B 7d	Geluidssnelheid w als functie van de molaire massa M , de temperatuur T en de constante van Poisson k	
99	B 8a	De grootheid N_4 als functie van de temperatuur T , de absolute druk p en de afgeleide $\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p$	
101	B 8b	De grootheid N_5 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de temperatuur T , de absolute druk p en de afgeleide $\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p$	
103	B 8c	Hulpgrafiek voor de bepaling van $c_p (T_2 - T_1)$ en $c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	
107	B 9	De kengrootheid Re als functie van de gashoeveelheid $Q_{p,i}$, de leidingdiameter d en de kinematische viscositeit ν	
111	B 10a	De wrijvingscoëfficiënt λ' als functie van de kengrootheid Re en de ruwheidsfactor $\varepsilon (= \frac{K}{d})$	
112	B 10b	Het drukverlies per meter leidinglengte $\Delta p/l$ als functie van de verhouding λ'/d , de gassnelheid v en de volumieke massa ρ	
113	B 10c	De weerstandcoëfficiënt λ'_u als functie van de verhouding r/d en de hoek δ	
116	B 11a	Het watergehalte van aardgassen als functie van de absolute druk p en de temperatuur T	
117	B 11b	Correctie op watergehalte voor de aanwezigheid van CO_2 en H_2S	
<i>Hoofdstuk C</i>			
138	C 5a	Samenstelling verbrandingsgassen van Gronings aardgas bij 1200 °C en luchtfactoren $0,25 \leq n \leq 1,0$	
139	C 5b	Samenstelling verbrandingsgassen van Gronings aardgas bij onvolledige verbranding	
140	C 6a	De gemiddelde soortelijke warmte c_{pm} als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa	
142	C 6b	Warmte-inhoud (voelbare warmte) I van verbrandingsgassen als functie van de hoeveelheid verbrandingsgassen q_{tot} , de gemiddelde soortelijke warmte c_{pm} en de temperatuur T	
144	C 7	Het indirecte rendement op onderwaarde $\eta_{\text{ind},i}$ als functie van de calorische onderwaarde H_i en het warmteverlies I van verbrandingsgassen	
145	C 7a	De condensatiewarmte r (= verdampingswarmte) van water als functie van de temperatuur T	
146	C 7b	De verhouding $\Delta p (= \frac{p_d - p_t}{101,325 - p_t})$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T en de dauwpuntstemperatuur T_d	
147	C 7c	De integraal $\frac{1}{\Delta T_{T_d}} \int_{T_d}^T r(\tau) \Delta p(\tau) d\tau$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T en de dauwpuntstemperatuur T_d	

<i>pagina</i>	<i>figuur</i>	<i>onderwerp</i>	16
148	C 7d	De integraal $4,19 \int_{T_d}^T \Delta p(\tau) d\tau$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T en de dauwpuntstemperatuur T_d	
151	C 8a	Het watergehalte x' in de verbrandingslucht als functie van de temperatuur T , de relatieve luchtvochtigheid R_v en de totaaldruk p_o (barometerdruk)	
152	C 8 b	De verzadigingsdruk p van waterdamp als functie van de temperatuur T	
155	C 9	De volumieke massa $\rho_{v,t}$ van verbrandingsgassen als functie van de temperatuur T en de luchtfactor n	
157	C 10a	De dynamische viscositeit μ als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa	
158	C 10b	De grootheid Ω_v als functie van de verhouding $\frac{k \cdot T}{\varepsilon}$	
159	C 10c	De grootheid Ω_v als functie van de verhouding $\frac{k \cdot T}{\varepsilon}$	
160	C 10d	De grootheid Ω_v als functie van de verhouding $\frac{k \cdot T}{\varepsilon}$	
163	C 10e	De kinematische viscositeit ν als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa	
165	C 11	De ware soortelijke warmte c_p als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa	
167	C 12a	De warmtegeleidingscoëfficiënt λ als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa	
168	C 12b	De verfijningsfactor f als functie van x_p	
170	C 13	De vlamtemperatuur T als functie van de calorische onderwaarde H_i , de gemiddelde soortelijke warmte c_{pm} en de totale hoeveelheid verbrandingsgassen q_{tot}	
171	C 14a	De stralingscoëfficiënt van CO_2 $\alpha_{S(CO_2)}$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T_g , de wandtemperatuur T_w , de partiële CO_2 -druk p en de stralende laagdikte s	
172	C 14b	De stralingscoëfficiënt van H_2O $\alpha_{S(H_2O)}$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T_g , de wandtemperatuur T_w , de partiële H_2O -druk p en de stralende laagdikte s	
175	C 15a	Explosiegrenzen, zelfontbrandingstemperatuur en vlamtemperatuur van CH_4 als functie van het gehalte CH_4 in lucht bij 101,325 kPa	
180	C 15b	Explosiegrenzen van een ($N_2 + CH_4$) gasmengsel als functie van de mengseltemperatuur bij 101,325 kPa	
180	C 15c	Explosiegrenzen van een ($CO_2 + CH_4$) gasmengsel als functie van de mengseltemperatuur bij 101,325 kPa	
183	C 15d	Explosiegrenzen in lucht voor Gronings aardgas als functie van de absolute druk p en de temperatuur T	
184	C 15e	Explosiegrenzen in lucht voor Ekofisk-gas als functie van de absolute druk p en de temperatuur T	

A

A 1 ALGEMENE GEGEVENS

Ontleend aan: API/Selected values of properties of hydrocarbons and related compounds, Research Project 44, October 31, 1976.

- A 1a Thermochemische calorie:** $1 \text{ cal}_{\text{tc}} = 4,184 \text{ J}$
Internationale calorie: $1 \text{ cal}_{\text{IT}} = 4,186 \text{ J}$
 $1 \text{ cal}_{\text{tc}} = 0,999331 \text{ cal}_{\text{IT}}$

Opmerking: indien ergens in dit naslagwerk wordt vermeld 'cal' zal steeds sprake zijn van een cal_{IT} (IT = international steam tables).

- A 1b Lichtsnelheid in vacuüm:**
 $c = 299,79250 \cdot 10^6 \pm 0,00010 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

- A 1c Normaal (molair) volume ideaal gas:**
 $V = 22,4136 \cdot 10^{-3} \pm 0,0012 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$

- A 1d Absolute temperatuur (0 °C):**
 $T = 273,1500 \pm 0,0001 \text{ K}$

- A 1e Absolute (molaire) gasconstante ($R_a = \frac{p \cdot V}{T}$):**
 $R_a = 8,31434 \pm 0,00035 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$

- A 1f Versnelling van de zwaartekracht (normversnelling):**
 $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$

- A 1g Atomaire massa (gebaseerd op ^{12}C)**
- | | | |
|-----------|----|---------|
| argon | Ar | 39,948 |
| koolstof | C | 12,011 |
| waterstof | H | 1,0079 |
| helium | He | 4,0026 |
| stikstof | N | 14,0067 |
| zuurstof | O | 15,9994 |
| zwavel | S | 32,06 |

- A 1h Definitie m^3 .** Indien niet anders vermeld, wordt in dit naslagwerk steeds bedoeld 1 m^3 van de desbetreffende stof of materie bij een absolute druk van 101,325 kPa (1,01325 bar), een absolute temperatuur van 273,15 K (0 °C), droog.

A 2 GRONDEENHEDEN VAN HET SI-STELSEL

Ontleend aan: Eenheid in eenheden/Stichting Teleac, 1975.

- A 2a Meter (m).** De lengte gelijk aan 1 650 763,73 golflengten (in vacuüm) van de straling, overeenkomend met de overgang tussen de toestanden $2p_{10}$ en $5d_5$ van het atoom krypton 86 (Kr).
- A 2b Kilogram (kg).** Eenheid van massa, gelijk aan de massa van het prototype van platina-iridium, door de 3e Algemene Conferentie voor Maten en Gewichten tot eenheid van massa verklaard (wordt bewaard in het Internationaal Bureau voor Maten en Gewichten te Sèvres).
- A 2c Seconde (s).** Tijdsduur van 9 192 631 770 perioden van de straling overeenkomend met de overgang tussen de twee hyperfijne niveaus van de grondtoestand van het atoom cesium 133 (Cs).
- A 2d Ampère (A).** De constante elektrische stroom die, indien geleid door twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, geplaatst in het luchtledige op een onderlinge afstand van 1 meter, tussen deze twee geleiders voor elke meter lengte een kracht veroorzaakt gelijk aan $2 \cdot 10^{-7}$ newton (N).
- A 2e Kelvin (K).** Eenheid van thermodynamische temperatuur, gelijk aan het $1/273,16$ gedeelte van de thermodynamische temperatuur van het tripelpunt van water.
- A 2f Mol (n).** Hoeveelheid stof van een systeem, dat evenveel elementaire entiteiten bevat als er atomen zijn in 0,012 kg koolstof 12 (^{12}C). De elementaire entiteiten moeten worden gespecificeerd; deze kunnen zijn: atomen, moleculen, ionen, elektronen, andere deeltjes of bepaalde groeperingen van gelijke deeltjes.
- A 2g Candela (cd).** Lichtsterkte (in loodrechte richting) van een oppervlakte gelijk aan het $1/600\,000$ gedeelte van een vierkant met zijden van 1 meter van een integrale straler bij de stollingstemperatuur van platina onder een druk van 101,325 kPa.

Aanvullende eenheden

- A 2h Radiaal (rad).** De vlakke hoek tussen twee stralen van een cirkel die op de omtrek een boog afsnijden, die in lengte gelijk is aan de straal.
- A 2i Steradiaal (sr).** De ruimtehoek binnen een kegeloppervlak, dat op een bol, waarvan het middelpunt samenvalt met de top van de kegel, een oppervlakte uitsnijdt gelijk aan die van het vlakke vierkant, dat de straal van de bol als zijde heeft.

A 3 GRONDEENHEDEN EN DE MEEST GEBRUIKTE VOORVOEGSELS**A 3a Voorvoegsels bij SI-eenheden**

exa	E	10^{18}	atto	a	10^{-18}
peta	P	10^{15}	femto	f	10^{-15}
tera	T	10^{12}	pico	p	10^{-12}
giga	G	10^9	nano	n	10^{-9}
mega	M	10^6	micro	μ	10^{-6}
kilo	k	10^3	milli	m	10^{-3}
hekto	h	10^2	centi	c	10^{-2}
deca	da	10	deci	d	10^{-1}

A 3b Tijd: symbool t

seconde	$s = 1 \text{ s}$
kiloseconde	$ks = 10^3 \text{ s}$
milliseconde	$ms = 10^{-3} \text{ s}$
microseconde	$\mu s = 10^{-6} \text{ s}$
nanoseconde	$ns = 10^{-9} \text{ s}$

A 3c Lengte: symbolen $l, b, h, r, d, s, \lambda$

meter	$m = 1 \text{ m}$
kilometer	$km = 10^3 \text{ m}$
decimeter	$dm = 10^{-1} \text{ m}$
centimeter	$cm = 10^{-2} \text{ m}$
millimeter	$mm = 10^{-3} \text{ m}$
micrometer	$\mu m = 10^{-6} \text{ m}$
nanometer	$nm = 10^{-9} \text{ m}$

Oppervlak: symbool A

vierkante meter	$m^2 = 1 \text{ m}^2$
vierkante kilometer	$km^2 = 10^6 \text{ m}^2$
vierkante decimeter	$dm^2 = 10^{-2} \text{ m}^2$
vierkante centimeter	$cm^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$
vierkante millimeter	$mm^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$

Inhoud, volume: symbool V

kubieke meter	$m^3 = 1 \text{ m}^3$
kubieke decimeter	$dm^3 = 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ (1 liter)}^*)$
kubieke centimeter	$cm^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$
kubieke millimeter	$mm^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$

*) zie A 5v

A 3d	Temperatuur: symbool T kelvin	$K = 1 \text{ K}$
A 3e	Massa: symbool m kilogram megagram gram milligram microgram	$kg = 1 \text{ kg}$ $Mg = 10^3 \text{ kg}$ $g = 10^{-3} \text{ kg}$ $mg = 10^{-6} \text{ kg}$ $\mu g = 10^{-9} \text{ kg}$
A 3f	Stof: symbool M mol kilomol millimol micromol	$mol = 1 \text{ mol}$ $kmol = 10^3 \text{ mol}$ $mmol = 10^{-3} \text{ mol}$ $\mu mol = 10^{-6} \text{ mol}$
A 3g	Kracht: symbool F newton meganewton kilonewton	$N = 1 \text{ N}$ $MN = 10^6 \text{ N}$ $kN = 10^3 \text{ N}$
A 3h	Druk, spanning: symbool p pascal megapascal kilopascal millipascal micropascal	$Pa = 1 \text{ Pa}$ $MPa = 10^6 \text{ Pa}$ $kPa = 10^3 \text{ Pa}$ $mPa = 10^{-3} \text{ Pa}$ $\mu Pa = 10^{-6} \text{ Pa}$
A 3i	Energie: symbolen E, U, Q, W joule petajoule terajoule gigajoule megajoule kilojoule millijoule	$J = 1 \text{ J}$ $PJ = 10^{15} \text{ J}$ $TJ = 10^{12} \text{ J}$ $GJ = 10^9 \text{ J}$ $MJ = 10^6 \text{ J}$ $kJ = 10^3 \text{ J}$ $mJ = 10^{-3} \text{ J}$
A 3j	Vermogen: symbool P watt gigawatt megawatt kilowatt milliwatt microwatt	$W = 1 \text{ W}$ $GW = 10^9 \text{ W}$ $MW = 10^6 \text{ W}$ $kW = 10^3 \text{ W}$ $mW = 10^{-3} \text{ W}$ $\mu W = 10^{-6} \text{ W}$

A 3k	Dynamische viscositeit: symbool μ
	pascalseconde $\text{Pa} \cdot \text{s} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
	millipascalseconde $\text{mPa} \cdot \text{s} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

	kinematische viscositeit: symbool ν
	vierkante meter per seconde $\text{m}^2/\text{s} = 1 \text{ m}^2/\text{s}$
	vierkante millimeter per seconde $\text{mm}^2/\text{s} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

A 3l Elektriciteitstroomsterkte: symbool I

ampère	$\text{A} = 1 \text{ A}$
kilo-ampère	$\text{kA} = 10^3 \text{ A}$
milli-ampère	$\text{mA} = 10^{-3} \text{ A}$
micro-ampère	$\mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$
nano-ampère	$\text{nA} = 10^{-9} \text{ A}$
pico-ampère	$\text{pA} = 10^{-12} \text{ A}$

spanning: symbool V

volt	$\text{V} = 1 \text{ V}$
megavolt	$\text{MV} = 10^6 \text{ V}$
kilovolt	$\text{kV} = 10^3 \text{ V}$
millivolt	$\text{mV} = 10^{-3} \text{ V}$
microvolt	$\mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V}$

weerstand: symbool R

ohm	$\Omega = 1 \Omega$
giga-ohm	$\text{G}\Omega = 10^9 \Omega$
mega-ohm	$\text{M}\Omega = 10^6 \Omega$
kilo-ohm	$\text{k}\Omega = 10^3 \Omega$
milli-ohm	$\text{m}\Omega = 10^{-3} \Omega$
micro-ohm	$\mu\Omega = 10^{-6} \Omega$

A 3m Eenheden, die verbonden zijn met het SI-stelsel

tijd:

dag	$\text{d} = 24 \text{ h} = 86\,400 \text{ s}$
uur	$\text{h} = 60 \text{ min} = 3\,600 \text{ s}$
minuut	$\text{min} = 60 \text{ s}$

oppervlak:

are	$\text{a} = 10^2 \text{ m}^2$
hectare	$\text{ha} = 10^4 \text{ m}^2$

volume:

liter	$\text{l} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
-------	---

hectoliter	hl =	10^{-1} m^3
deciliter	dl =	10^{-4} m^3
centiliter	cl =	10^{-5} m^3
milliliter	ml =	10^{-6} m^3

temperatuur:

T graden Celsius

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = (273,15 + T) \text{ K (absolute temperatuur)}$$

1 graad Celsius

$$1 \text{ } ^\circ\text{C} = 1 \text{ K (temperatuurverschil)}$$

massa:

ton

$$t = 1 \text{ Mg} = 10^3 \text{ kg} = 10^6 \text{ g}$$

druk:

bar

$$\text{bar} = 10^2 \text{ kPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

millibar

$$\text{mbar} = 10^{-1} \text{ kPa} = 10^2 \text{ Pa}$$

energie:

kilowattuur

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ} = 3,6 \times 10^3 \text{ kJ} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

A 4 TEMPERATUURHERLEIDING

°C graad Celsius

K kelvin (thermodynamische temperatuur)

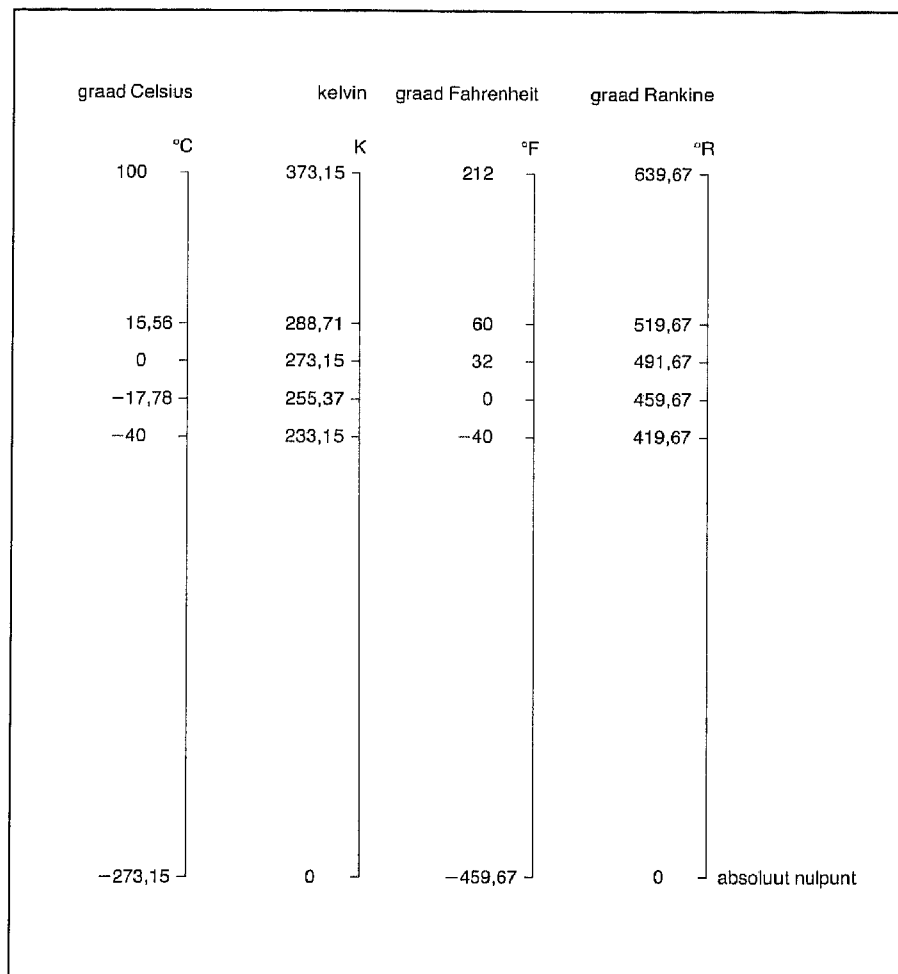
°F graad Fahrenheit

°R graad Rankine

$$T\text{ }^{\circ}\text{C} = (273,15 + T)\text{ K} = (1,8 \cdot T + 32)\text{ }^{\circ}\text{F} = 1,8 (273,15 + T)\text{ }^{\circ}\text{R}$$

$$T\text{ }^{\circ}\text{F} = (459,67 + T)\text{ }^{\circ}\text{R} = \left(\frac{T - 32}{1,8}\right)\text{ }^{\circ}\text{C} = \left(\frac{459,67 + T}{1,8}\right)\text{ K}$$

Figuur A 4. Temperatuurherleidingsschalen



A 5 DEFINITIES

A 5a Aardgas. In de natuur voorkomend complex mengsel van koolwaterstoffen en niet-koolwaterstoffen, dat zich bij kamertemperatuur en onder atmosferische druk geheel in de gasfase bevindt.

A 5b Calorische bovenwaarde H_s . De hoeveelheid warmte, die vrijkomt bij de volledige verbranding van een gegeven hoeveelheid droog gas met zuurstof, als de verbrandingsgassen weer naar de beginvoorwaarden worden afgekoeld. Het bij de verbranding gevormde water bevindt zich na de afkoeling in de vloeistoffase.

Calorische onderwaarde H_i . De hoeveelheid warmte, die vrijkomt bij de volledige verbranding van een gegeven hoeveelheid droog gas met zuurstof, als de verbrandingsgassen weer naar de beginvoorwaarden worden afgekoeld. Het bij de verbranding gevormde water bevindt zich na de afkoeling in de gasfase.

Internationaal worden als beginvoorwaarden toegepast:

een absolute druk van 101,325 kPa (1,01325 bar)

een temperatuur van 298,15 K (25 °C).

Het verschil tussen de calorische bovenwaarde en de calorische onderwaarde is de verdampingswarmte van het chemisch gevormde water.

Bij 298,15 K (25 °C) bedraagt deze: 2442,5 kJ/kg (583,38 kcal/kg).

Alleen gassen of gasmengsels waarin vrije of gebonden waterstof voorkomt, geven een verschil te zien tussen de calorische bovenwaarde en de calorische onderwaarde.

Opmerking:

a. De internationaal toegepaste beginvoorwaarden slaan alleen op de methode waarop de calorische waarde wordt bepaald, niet op de grootte van het gasvolume, dat voor de bepaling wordt gebruikt.

b. Over de definities van de 'calorische bovenwaarde' en de 'calorische onderwaarde' zal te zijner tijd een ISO-norm verschijnen.

A 5c Dichtheid ten opzichte van lucht d . Het quotiënt van de volumieke massa van een gas (ρ_g) en de volumieke massa van droge lucht (ρ_l) bij een absolute druk van 101,325 kPa (1,01325 bar) en een temperatuur van 273,15 K (0 °C):

$$d = \rho_g / \rho_l$$

A 5d Wobbe-index W . Het quotiënt van de calorische bovenwaarde H_s en de wortel uit de dichtheid ten opzichte van lucht d :

$$W = H_s / \sqrt{d}$$

De Wobbe-index is een maat voor de hoeveelheid energie die via een spuitstuk aan een brander wordt toegevoerd.

De energietoevoer is lineair afhankelijk van W . Twee gassen van verschillende samenstelling maar met gelijke Wobbe-index zullen voor hetzelfde spuitstuk bij dezelfde spuitstukdruk een gelijke hoeveelheid energie leveren.

Erweiterte Wobbe-index W_e . Naast de Wobbe-index W wordt de Erweiterte Wobbe-index W_e gehanteerd, waarbij ook de spuitstukdruk Δp in rekening wordt gebracht:
 $W_e = W \sqrt{\Delta p}$

- 5e Gasmodulus m .** De gasmodulus $m = \sqrt{\Delta p}/W$ is een maat voor de grootte van de primaire luchtaanzuiging van een branderinjecteur; m moet als vergelijkingswaarde worden gehanteerd en wordt als zodanig bij de uitwisseling van gasen gebruikt.
- 5f SRG-methode.** Bij toepassing van de SRG-methode (Sommers-Ruhrgas) wordt alle gasverbruiksapparatuur zodanig ingesteld, dat voor een gas met de hoogst voorkomende of maximaal toegestane Wobbe-index de nominale belasting wordt bereikt. Gassen met een lagere Wobbe-index kunnen zonder wijziging aan de gasverbruiksapparatuur worden toegevoerd, hetgeen echter een verlaging van de belasting tot gevolg heeft.
- 5g Stoichiometrische luchtbehoefte l .** De hoeveelheid lucht in m^3 , die nodig is om $1 m^3$ gas volledig te verbranden.
- 5h Luchtfactor n .** Het quotiënt van de werkelijk toegevoerde hoeveelheid verbrandingslucht en de stoichiometrisch benodigde hoeveelheid lucht.
 Stoichiometrische luchtbehoefte: $n = 1$
 Luchtvermaat^{*)}: $n > 1$
 Luchtondermaat: $n < 1$
- 5i Verbrandingspotentiaal van Delbourg C .** Dimensieloze grootheid, te berekenen uit de samenstelling van een gas. De verbrandingspotentiaal C is een maat voor de laminaire verbrandingssnelheid w van een gas.
- 5j Roetindex I .** Dimensieloze grootheid, die de neiging tot roetvorming bij verbranding aangeeft. De roetindex I kan worden berekend uit de samenstelling van een gas.
- 5k Laminaire verbrandingssnelheid w .** De maximum snelheid, die voor een gegeven gas-luchtmengsel aan de uitblaasopening van een ronde buis zal optreden (Bunsenbrander).
- 5l Explosiegrenzen L .** De concentratie van een gas in lucht of zuurstof, waarboven of waarbeneden het mengsel niet meer zelfstandig brandt, nadat het tot ontsteking is gebracht.
 De *onderste* explosiegrens L_o geeft de 'minimale' concentratie van een gas in lucht of zuurstof, waarbij het mengsel nog net zelfstandig brandt.
 De *bovenste* explosiegrens L_b geeft de 'maximale' concentratie van een gas in lucht of zuurstof, waarbij het mengsel nog net zelfstandig brandt.

^{*)} Voorbeeld: $n = 1,2$ betekent een luchtvermaat van 0,2 (= 20%)

De explosiegrenzen van een aardgas-lucht- of een aardgas-zuurstofmengsel kunnen met redelijke nauwkeurigheid worden berekend uit de samenstelling met behulp van de wet van Le Chatelier (zie C 15c).

- A 5m Deflagratie.** Snelle verbranding van een gas-luchtmengsel in het gebied tussen de onderste en bovenste explosiegrens. De maximale verbrandingssnelheid belooft enkele tientallen meters per seconde.
- A 5n Detonatie.** Verbranding van een gas-luchtmengsel in het gebied tussen de onderste en bovenste explosiegrens, waarbij verbrandingssnelheden optreden die boven de geluidssnelheid liggen en waarbij schokgolven optreden, die tot sterke drukverhoging leiden.
- A 5o Kritische temperatuur T_k .** Maximale temperatuur, waarbij gas en vloeistof naast elkaar kunnen bestaan. In het gebied boven de kritische temperatuur bestaat geen eenduidig verschil tussen gas en vloeistof.
- A 5p Retrograde condensatie.** Dit verschijnsel kan optreden binnen het tweefasen-gebied van een gasmengsel (het zogenaamde 'retrograde gebied'), waarbij drukverlaging of temperatuurverhoging leidt tot een 'abnormale' verschuiving van het gas-vloeistofevenwicht en wel van de gasfase naar de vloeistoffase (vloeistofhoeveelheid neemt toe, gashoeveelheid neemt af) in plaats van een (normale) verschuiving van de vloeistoffase naar de gasfase (vloeistofhoeveelheid neemt af, gashoeveelheid neemt toe).
- A 5q Gashydraten.** Verbindingen van de lichtere koolwaterstoffen uit een aardgas met water tot een substantie, waarvan de vorm kan variëren van natte sneeuw tot ijs. Hydraatvorming is afhankelijk van de druk, temperatuur en samenstelling van het aardgas.
- A 5r Schoorsteenverlies.** Hoeveelheid energie, die met de verbrandingsgassen via de schoorsteen van een installatie verloren gaat.

Stralings- en convectieverliezen. Hoeveelheid energie, die door straling en convectieve warmteoverdracht aan de omgeving wordt afgestaan en niet nuttig kan worden besteed.

Stilstandsverliezen. Hoeveelheid energie, die aan een installatie wordt toegevoerd om deze bedrijfsgereed te houden, zonder dat nuttige energie wordt geleverd.

Nuttige energie. Verschil tussen de hoeveelheid toegevoerde energie en de som van alle energieverliezen (schoorsteenverlies, stralings- en convectieverliezen en de stilstandsverliezen). Dit is de uiteindelijke hoeveelheid energie, die aan het medium van een verwarmingsinstallatie wordt afgegeven.

Rendement η . Quotiënt van de nuttig gebruikte energie en de toegevoerde energie. Het rendement kan zowel op de calorische bovenwaarde als op de calorische onderwaarde worden gebaseerd.

Enkele 'algemeen' gebruikte rendementen:

- a. *indirect rendement* η_{ind} (schoorsteenrendement): quotiënt van 'de toegevoerde energie verminderd met het schoorsteenverlies' en de toegevoerde energie;
- b. *direct rendement* η_{dir} (stookrendement): quotiënt van 'de toegevoerde energie verminderd met de som van de stralings- en convectieverliezen en het schoorsteenverlies' en de toegevoerde energie;
- c. *gebruiksrendement* η_{gebr} (jaarrendement): quotiënt van 'de toegevoerde energie verminderd met de som van de stralings- en convectieverliezen, het schoorsteenverlies en het stilstandsverlies' en de toegevoerde energie, gerekend over een gedefinieerde tijdsperiode.

A 5s Gasconstante. De absolute (molaire) gasconstante R_a is een 'proportionele' grootheid, die voor elk gas of gasmengsel dezelfde waarde heeft en onafhankelijk is van druk en temperatuur:

$$R_a = 8,314\,34 \pm 0,000\,35 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

A 5t Bovenkritische uitstroming. Bovenkritische uitstroming zal plaatsvinden voor een bepaalde verhouding van gasdruk en tegendruk (veelal atmosferisch), waarbij in de nauwste doorsnede van de uitstroomopening de geluidssnelheid optreedt. Verlaging van de tegendruk heeft geen invloed op de uitstromende gashoeveelheid.

A 5u Zelfontbrandingstemperatuur. Die temperatuur, waarbij een gas-luchtmengsel spontaan – zonder beïnvloeding van buitenaf – tot ontbranding komt. De zelfontbrandingstemperatuur is een functie van de druk en de samenstelling van het gasmengsel.

A 5v Liter. De liter is het volume van 1 kg zuiver water bij een temperatuur van grootste dichtheid (4 °C) en een druk van 101,325 kPa.
 $1\text{ l} = 1,000\,028\text{ dm}^3$. In 1964 werd de liter echter per definitie door de CGPM (zie A 7) gelijkgesteld aan 1 dm^3 ($1\text{ l} = 1\text{ dm}^3$).

A 6 ENKELE VEEL VOORKOMENDE BEGRIPPEN UIT DE BUITENLANDSE GASINDUSTRIE

A 6a	Calorische bovenwaarde: (verbrandingswaarde)	Gross heating value Gross calorific value Gross heat of combustion Oberer Heizwert Brennwert Pouvoir calorific supérieure
	Calorische onderwaarde: (stookwaarde)	Net heating value Net calorific value Net heat of combustion Heizwert Pouvoir calorific inférieure Chaleur de combustion
A 6b	Volumieke massa (dichtheid):	Density Dichte Masse spécifique Masse volumique
A 6c	Dichtheid t. o. v. lucht:	Specific gravity Relative Dichte Densité
A 6d	Explosiegrenzen:	Explosion limits Flammability limits Zündgrenze Limites d'inflammabilité
A 6e	Zelfontbrandingstemperatuur:	Auto-ignition temperature Selbstzündungstemperatur Température d'inflammation spontanée Température d'auto-inflammation
A 6f	Dauwpunt (water):	Dewpoint Taupunkt Point de rosée
A 6g	Soortelijke warmte:	Heat capacity Specific heat Spezifische Wärme Chaleur spécifique

A 6h	Viscositeit:	Viscosity Zähigkeit Viscosité
A 6i	Kookpunt:	Boiling point Siedepunkt Point d'ébullition
A 6j	Luchtbehoefte:	Air required for combustion Luftbedarf Air comburant
A 6k	Zwavelvrij gas:	Sweet gas
	Zwavelrijk gas:	Sour gas
A 6l	Warmteoverdracht	
	<i>geleiding:</i>	Heat conduction Wärmeleitung Conductibilité thermique
	<i>convector:</i>	Heat convection Wärmekonvektion Convection de chaleur
	<i>straling:</i>	Heat radiation Wärmestrahlung Radiation de chaleur
A 6m	Stilstandsverliezen:	Betriebsbereitschaftverluste

A 7 VEEL GEBRUIKTE AFKORTINGEN

ACI	Algemene Vereniging Centrale Verwarmingsindustrie
ACQ	Annual Contract Quantity
AEGPL	Association Européenne des Gaz de Petrole Liquefies
AER	Algemene Energie Raad
AG	Aktiengesellschaft
AGA	American Gas Association
ANG	Associate Natural Gas
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
ASA	American Standards Association
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAGS	Beleids-Advies Groep Stadsverwarming
BCGW	Beleids-Commissie Gas en Water NNI
BEB	Gewerkschaften Brigitta und Elwerath Betriebsführungs GmbH
BGC	British Gas Corporation
BNOC	British National Oil Corporation
BSI	British Standards Institute
Btu	British thermal unit
BTW	Belasting Toegevoegde Waarde
CBS	Centraal Bureau voor de Statistiek
CECA	Commission Européenne de Charbon et Acier
CEDIGAZ	Centre International d'Information sur le Gaz Naturel et tous Hydrocarbures Gazeux
CEE	Communauté Economique Européenne
CEN	Comité Européenne de Normalisation
CERN	Commission Européenne des Recherches Nucleaires
CET	Central European Time
CFP	Compagnie Française des Petroles
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mesures
CNG	Compressed Natural Gas
CODATA	Committee on Data for Science and Technology
CPB	Centraal Planbureau
CTI	Centraal Technisch Instituut (TNO)
DCQ	Daily Contract Quantity
DETG	Deutsche Erdgas Transport GmbH
DFTG	Deutsche Flüssigerdgas Terminal Gesellschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DOE	Department of Energy
DSM	Dutch State Mines (Staatsmijnen DSM)
DTZ	Distrigaz
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches

DVM	Deutscher Verband für Materialprüfung
ECE	Economic Commission for Europe
ECN	Energieonderzoekcentrum Nederland
ECSE	European Coal and Steel Community
EEG	Europese Economische Gemeenschap
EFTA	European Free Trade Association
EG	Europese Gemeenschap
EGKS	Europese Gemeenschap voor Kolen en Staal
ENI	Ente Nazionale Idrocarburi
ERDA	Energy Research and Development Administration
ERR	Economically Recoverable Reserves
ESC	Energie Studie Centrum
EWE	Energieversorgung Weser-Ems AG
FEA	Federal Energy Administration
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
FIGO	Fabrikanten en Importeurs van en Groothandelaars in gas- en olie- branders
FOM	Stichting Fundamenteel Onderzoek van de Materie
FPC	Federal Power Commission
FRIF	Fondation de Recherches Internationales sur les Flammes
GAVO	Gasinstallatievoorschriften
GDF	Gaz de France
GERG	Groupe Européen des Recherches Gazieres
GIVEG	Gasinstituut van de Vereniging van Exploitanten van Gasbedrijven
GNL	Gaz Naturel Liquefie
GPL	Gaz Propane Liquide
GU	N.V. Nederlandse Gasunie
ICB	Internationaal Octrooi Instituut
ICONA	Interdepartementale Coördinatiecommissie voor Noordzee Aangelegenheden
IFRF	International Flame Research Institute
IGT	Institute of Gas Technology
IGU	International Gas Union
INFAC	Informatiecentrum Airconditioning
IP	Institute of Petroleum
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
KDI	Stichting Kwaliteitsdienst
KEMA	Keuringsinstituut Elektrische Materialen
KIVI	Koninklijk Instituut van Ingenieurs
KOVI	Keuringsinstituut voor Onderdelen voor de Verwarmings- en lucht- behandelings-Industrie
KSLA	Koninklijke Shell Laboratorium Amsterdam
KVGN	Koninklijke Vereniging van Gasfabrikanten in Nederland

LCF	Liquid Chemical Fuel
LGN	Liquide de Gaz Naturel
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LSEO	Landelijke Stuurgroep Energie Onderzoek
LTD	Limited Liability Company
MAC	Maximum Allowable Concentration
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
MARCOGAZ	Union des Industries Gazières des Pays du Marché Commune
MCN	Methanol Chemie Nederland
METG	Mittel-Rheinische Erdgas Transport Gesellschaft
MIC	Maximum Immission Concentration
MIK	Maximale Immissions-Konzentration
MWS	Mehrwertsteuer
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NAM	Nederlandse Aardolie Maatschappij
NBS	National Bureau of Standards
NCB	National Coal Board
NEL	National Engineering Laboratory
NEN	Nederlandse Norm
NEOM	Nederlandse Energie Ontwikkelings Maatschappij
NETG	Nord-Rheinische Erdgas Transport Gesellschaft
NGL	Natural Gas Liquids
NGPA	Natural Gas Processors Association
NGPSA	Natural Gas Processors Suppliers Association
NIL	Nederlands Instituut voor Lastechniek
NNI	Nederlands Normalisatie Instituut
NPT	Normal Pressure and Temperature
OAPEC	Organization of Arabic Petroleum Exporting Countries
OE	Olie Equivalent
OESO	Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling
OPEC	Organization of Petroleum Exporting Countries
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
RCN	Reactorcentrum Nederland
RG	Ruhrigas AG
RWE	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG
SA	Société Anonyme
SEGEO	Société Européenne de Gaz Est-Ouest
SEP	Samenwerkende Electriciteits Productiebedrijven
SETG	Süd-Rheinische Erdgas Transport Gesellschaft
SI	Internationaal Stelsel van Eenheden
SIPM	Shell Internationale Petroleum Maatschappij
SKE	Steenkool Equivalent
SNAM	Societa Nazionale Azienda Metanodotti SPA

SNEA	Société Nationale Elf d'Aquitane
SNG	Substitute Natural Gas
SRG	Sommers Ruhrgas Methode
STUNET	Stuurgroep Studie Noordzee-eiland en Terminal
TAG	Trans Austrian Gas Pipeline
TCTD	Technische Commissie voor Toestellen onder Druk
TENP	Trans Europa Naturgas Pipeline
TNO	Stichting Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TVA	Tax Valeur Ajoutée
UCN	Ultra-Centrifuge Nederland
ULCC	Ultra-Large Crude Carriers
UT	Universal Time (Greenwich Mean Time)
VAT	Value-Added Tax
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VEGIN	Vereniging van Exploitanten van Gasbedrijven in Nederland
VEW	Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG
VISA	Veiligheid Industriële Stookinstallaties Aardgas
VLCC	Very Large Crude Carriers

A 8 EENVOUDIG OVERZICHT VAN DE INDELING VAN DE DIVERSE KOOLWATERSTOFFEN

A 8a Paraffinen: C_nH_{2n+2}

CH_4 – methaan

C_2H_6 – ethaan

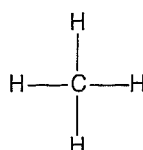
C_3H_8 – propaan

i- C_4H_{10} – iso-butaan

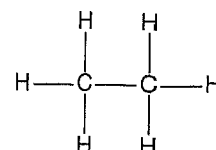
n- C_4H_{10} – normaal butaan

etcetera

CH_4 – methaan

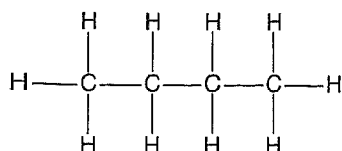


C_2H_6 – ethaan

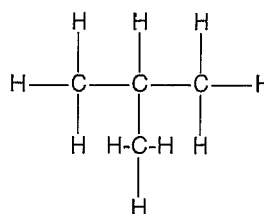


Butaan is de eerste component die een 'isomeer' kent. Isomeren hebben dezelfde chemische samenstelling en dezelfde molaire massa als het 'normale' molecuul, alleen een aantal eigenschappen verschilt.

n- C_4H_{10} – normaal butaan



i- C_4H_{10} – iso-butaan



Olefinen: C_nH_{2n}

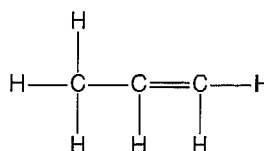
C_2H_4 – etheen

C_3H_6 – propen

C_4H_8 – buteen

etcetera

C_3H_6 – propen



Naftenen (cyclo - alkanen): C_nH_{2n}

C_3H_6 – cyclopropaan

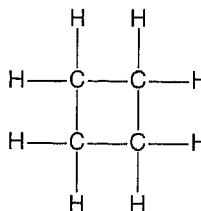
C_4H_8 – cyclobutaan

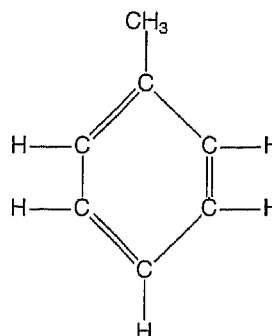
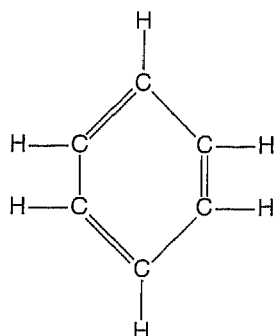
C_5H_{10} – cyclopentaan

C_6H_{12} – cyclohexaan

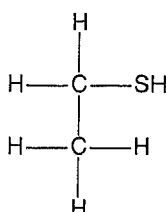
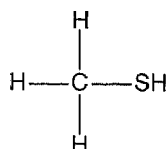
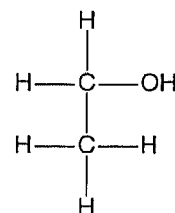
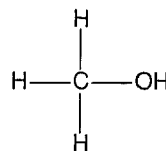
etcetera

C_4H_8 – cyclobutaan



Aromaten: C_6H_6 – benzeen C_6H_6 – benzeen C_7H_8 – toluen**A 8b****Mercaptanen: RSH**

R = (organische) alkylgroep

 CH_3 – methyl C_2H_5 – ethyl C_3H_7 – propyl CH_3SH – methylmercaptaan C_2H_5SH – ethylmercaptaan**A 8c****Alcoholen:** CH_3OH – methylalcohol (methanol) CH_3OH – methanol C_2H_5OH – ethanol C_2H_5OH – ethylalcohol (ethanol)n- C_3H_7OH – n-propylalcoholi- C_3H_7OH – iso-propylalcohol

A 9 VOLUMEPROCENTEN, MOLPROCENTEN, MASSAPROCENTEN**A 9a Volumeprocenten ↔ molprocenten (vol % ↔ mol %)**

$$n_i = \frac{x_i/V_i}{\sum_{i=1}^n x_i/V_i} \times 100 \text{ mol \%} = \frac{x_i/z_i}{\sum_{i=1}^n x_i/z_i} \times 100 \text{ mol \%}$$

$$x_i = \frac{n_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n n_i \cdot V_i} \times 100 \text{ vol \%} = \frac{n_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n n_i \cdot z_i} \times 100 \text{ vol \%}$$

waarin:

x_i = vol % component i

V_i = reële molvolume component i (zie tabel A 11)

n_i = mol % component i

z_i = compressibiliteitsfactor component i (0 °C; 101,325 kPa)

n = aantal componenten in gasmengsel.

Voor aardgasmengsels heeft toepassing van x_i in plaats van n_i weinig invloed op het eindresultaat.

A 9b Molprocenten ↔ massaprocenten (mol % ↔ massa %)

$$g_i = \frac{n_i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n n_i \cdot M_i} \times 100 \text{ massa \%}$$

$$n_i = \frac{g_i/M_i}{\sum_{i=1}^n g_i/M_i} \times 100 \text{ mol \%}$$

waarin:

g_i = massa % component i

M_i = molaire massa component i (zie tabel A 11)

n_i = mol % component i.

De omrekening van volumeprocenten ↔ massaprocenten verloopt op dezelfde wijze.

Tabel A 9: voorbeeld – Gronings aardgas (gemiddelde samenstelling)

component	chemische formule	x_i vol %	n_i mol %	g_i massa %
methaan	CH ₄	81,30	81,29	69,97
ethaan	C ₂ H ₆	2,85	2,87	4,63
propaan	C ₃ H ₈	0,37	0,38	0,90
butaan	C ₄ H ₁₀	0,14	0,15	0,47
pentaan	C ₅ H ₁₂	0,04	0,04	0,16
hexaan	C ₆ H ₁₄	0,05	0,05	0,23
stikstof	N ₂	14,35	14,32	21,52
zuurstof	O ₂	0,01	0,01	0,02
kooldioxyde	CO ₂	0,89	0,89	2,10
		100	100	100

A 10 OMREKENINGSTABELLEN**A 10a Engelse maten en gewichten:**

1 inch (in)	=	0,025 4 m
1 foot (ft)	=	0,304 8 m
1 yard (yd)	=	0,914 4 m
1 mile	=	1609,34 m
1 square inch (in ²)	=	6,451 6 · 10 ⁻⁴ m ²
1 square foot (ft ²)	=	0,092 903 m ²
1 square yard (yd ²)	=	0,836 127 m ²
1 cubic inch (in ³)	=	16,387 064 · 10 ⁻⁶ m ³
1 cubic foot (ft ³)	=	28,316 847 · 10 ⁻³ m ³
1 Engelse gallon (UK gal)	=	4,546 · 10 ⁻³ m ³
1 Amerik. gallon (US gal)	=	3,785 · 10 ⁻³ m ³
1 grain (gr)	=	64,8 · 10 ⁻⁶ kg
1 ounce (oz)	=	28,35 · 10 ⁻³ kg
1 pound (lb)	=	0,453 592 kg
1 Engelse ton (UK ton)	=	1 016,05 kg (long ton)
1 Amerik. ton (US ton)	=	907,185 kg (short ton)

A 10b Kracht:

1 kg kracht (kgf)	=	9,806 65 N
1 pound force (lbf)	=	4,448 22 N

A 10c Druk, spanning:

1 bar	=	10 ⁵ Pa (N/m ²)
1 atm	=	101 325 Pa
1 kgf/cm ² (at)	=	98 066,5 Pa
1 lbf/in ² (psi)	=	6 894,75 Pa
1 mmwk (water)	=	9,806 65 Pa
1 mmHg (kwik) ^{*)}	=	133,322 Pa

10d Warmtehoeveelheid:

1 cal	=	4,186 8 J
1 therm (10 ⁵ Btu)	=	105,506 · 10 ⁶ J
1 thermie (1 Mcal ₁₅ ^{**)}	=	4,185 8 · 10 ⁶ J
1 kWh ^{***)}	=	3,6 · 10 ⁶ J
1 Btu	=	1055,06 J

^{*)} ρ = 13,595 1 kg/dm³ (zie lit (1))^{**) 1} Mcal₁₅ (c_p water bij 15 °C) = 0,999 76 Mcal (zie lit (2))^{***)} 1 W = 1 J/s

A 10e Warmtestroom:

1 W	=	1	J/s
1 cal/h	=	$1,163 \cdot 10^{-3}$	J/s
1 pk (paardekracht)	=	735,499	J/s
1 hp (horse power)	=	745,700	J/s
1 Btu/h	=	0,293 071	J/s

A 10f Calorische waarden:

1 cal/m ³	=	4,1868	J/m ³
1 Btu/ft ³ (ISC) dry	=	39 361,916	J/m ³
1 Btu/ft ³ (Int) dry	=	39 277,838	J/m ³
1 Btu/ft ³ (ISC) sat	=	40 059,783	J/m ³
1 Btu/ft ³ (Int) sat	=	39 972,701	J/m ³

ft³ (ISC = imperial standard conditions); 60 °F, 30 inches Hg = 101 374 Pa (g op 53 °N)

ft³ (Int = international cubic foot); 60 °F, 30 inches Hg = 101 591 Pa (g = 9,80665 m/s²)

Opmerking: bij de omrekening van 60 °F naar 0 °C wordt geen rekening gehouden met de compressibiliteit.

A 10g Warmtegeleiding:

1 kcal/m · h · K	=	1,163	W/m · K
1 Btu/ft · h · °F	=	1,732	W/m · K

A 10h Warmteoverdracht:

1 kcal/m ² · h · K	=	1,163	W/m ² · K
1 Btu/ft ² · h · °F	=	5,679	W/m ² · K

A 10i Viscositeit:

Kinematische viscositeit ν

1 St (Stokes)	=	10^{-4}	m ² /s
1 ft ² /s	=	0,0929	m ² /s

Dynamische viscositeit η

1 P (Poise)	=	0,1	N · s/m ² = 0,1 Pa · s
1 lb (mass)/ft · s	=	1,488	N · s/m ² = 1,488 Pa · s

Lit (1) Perry's Chemical Engineers Handbook, Fourth Edition

Lit (2) Handbook of Chemistry and Physics, 56th Edition, 1975–1976

A 11

Tabel A 11: gegevens over 52 componenten

nr.	component	chemische formule	molaire massa M kg/kmol	mol volume V $m^3/kmol$	volumieke massa ρ kg/ m^3	dichtheid t.o.v. lucht d	kritische grootheden		kookpunt (101,325 kPa) T_b K
							T_k K	p_k kPa	
1	methaan	CH_4	16,0426	22,3600	0,7175	0,5548	190,55	4604	111,66
2	ethaan	C_2H_6	30,0694	22,1874	1,3552	1,0481	305,43	4880	184,52
3	propaan	C_3H_8	44,0962	21,9297	2,0108	1,5550	369,82	4250	231,08
4	2-methylpropaan (isobutaan)	$i-C_4H_{10}$	58,1230	21,6104	2,6896	2,0800	408,13	3648	261,42
5	n-butaan	$n-C_4H_{10}$	58,1230	21,5205	2,7008	2,0886	425,16	3797	272,65
6	2,2-dimethylpropaan	C_5H_{12}	72,1498	21,2866	3,3894	2,6212	433,75	3199	282,65
7	2-methylbutaan (isopentaan)	$i-C_5H_{12}$	72,1498	21,0838	3,4220	2,6464	460,39	3381	301,00
8	n-pentaan	$n-C_5H_{12}$	72,1498	20,8907	3,4537	2,6709	469,7	3369	309,22
9	2,2-dimethylbutaan	C_6H_{14}	86,1766	20,5	4,204	3,251	488,73	3080	322,89
10	2,3-dimethylbutaan	C_6H_{14}	86,1766	20,5	4,204	3,251	499,93	3127	331,14
11	3-methylpentaan	C_6H_{14}	86,1766	20,5	4,204	3,251	504,4	3124	336,43
12	2-methylpentaan (isohexaan)	$i-C_6H_{14}$	86,1766	20,5	4,204	3,251	497,45	3010	333,42
13	n-hexaan	$n-C_6H_{14}$	86,1766	20,5	4,204	3,251	507,3	3012	341,89
14	2-methylhexaan (isoheptaan)	$i-C_7H_{16}$	100,2034	20,5	4,888	3,780	530,31	2734	363,20
15	n-heptaan	$n-C_7H_{16}$	100,2034	20,5	4,888	3,780	540,1	2736	371,58
16	n-octaan	$n-C_8H_{18}$	114,2302	20,5	5,572	4,309	568,76	2487	398,82
17	n-nonaan	$n-C_9H_{20}$	128,2570	20,5	6,256	4,838	594,56	2288	423,95
18	n-decaan	$n-C_{10}H_{22}$	142,2838	20,5	6,941	5,368	617,5	2104	447,27
19	n-undecaan	$n-C_{11}H_{24}$	156,3106	20,5	7,625	5,897	638,73	1966	469,0
20	n-dodecaan	$n-C_{12}H_{26}$	170,3374	20,5	8,309	6,426	658,2	1824	489,5
21	n-tridecaan	$n-C_{13}H_{28}$	184,3642	20,5	8,993	6,955	675,8	1723	508,6
22	n-tetradecaan	$n-C_{14}H_{30}$	198,3910	20,5	9,678	7,484	691,8	1621	526,8
23	cyclohexaan	C_6H_{12}	84,1608	20,5	4,105	3,175	553,4	4073	353,89
24	methylcyclohexaan	C_7H_{14}	98,1876	20,5	4,790	3,704	572,12	3471	374,08

25	benzeen	C ₆ H ₆	78,1134	20,5	3,810	2,947	562,09	4898	353,25
26	tolueen	C ₇ H ₈	92,1402	20,5	4,495	3,476	591,72	4109	383,77
27	xyleen (o)	C ₈ H ₁₀	106,1670	20,5	5,179	4,005	630,22	3733	409,34
28	methylmercaptopaan	CH ₃ SH	48,1026	21,7704	2,2095	1,7087	470	7235	280,8
29	ethylmercaptopaan	C ₂ H ₅ SH	62,1294	21,3681	2,9076	2,2485	499	5492	308,2
30	propylmercaptopaan	C ₃ H ₇ SH	76,1562	20,5250	3,7104	2,8694	528	3750	336
31	carbonylsulfide	COS	60,0704	22,0884	2,7195	2,1031	378	6590	223,0
32	zwavelwaterstof	H ₂ S	34,0758	22,1881	1,5358	1,1877	373,6	9008	211,4
33	zwaveldioxyde	SO ₂	64,0588	21,9274	2,9214	2,2592	430,7	7873	263,2
34	etheen	C ₂ H ₄	28,0536	22,2431	1,2612	0,9754	282,36	5032	169,44
35	propheen	C ₃ H ₆	42,0804	21,9895	1,9137	1,4799	364,75	4610	225,45
36	1-buteen	C ₄ H ₈	56,1072	21,6060	2,5968	2,0082	419,55	4023	266,89
37	1-penteen	C ₅ H ₁₀	70,1340	21,2177	3,3054	2,5562	464,78	4053	303,12
38	1,2-butadiene	C ₄ H ₆	54,0914	21,5612	2,5087	1,9401	444,15	4499	283,45
39	1-butyne	C ₄ H ₆	54,0914	21,3403	2,5347	1,9602	463,65	4712	281,85
40	methanol	CH ₃ OH	32,0420	21,0764	1,5203	1,1757	513,2	7954	337,8
41	ethanol	C ₂ H ₅ OH	46,0688	20,5555	2,2412	1,7332	516,3	6383	351,7
42	argon	Ar	39,9480	22,3925	1,7840	1,3796	150,71	4865	87,5
43	helium	He	4,0026	22,4248	0,1785	0,1380	5,21	229	4,3
44	kooldioxyde	CO ₂	44,0098	22,2461	1,9783	1,5299	304,26	7398	194,7
45	koolmonoxyde	CO	28,0104	22,3991	1,2505	0,9671	134,26	3516	81,7
46	waterstof	H ₂	2,0158	22,4354	0,0898	0,0695	33,26	1298	20,4
47	stikstof	N ₂	28,0134	22,4037	1,2504	0,9670	126,26	3399	77,3
48	zuurstof	O ₂	31,9988	22,3919	1,4290	1,1051	154,76	5082	90,0
49	stikstofmonoxyde	NO	30,0061	22,4002	1,3395	1,0359	180	6490	121,4
50	stikstofdioxyde	NO ₂	46,0055	21,8087	2,1095	1,6314	431	10130	294,5
51	waterdamp	H ₂ O	18,0152	21,629	0,833	0,644	647	22119	373,2
52	lucht (droog)	—	28,966	22,4003	1,2931	1,0000	132,45	3771	81,8

A 12 Tabel A 12: enkele belangrijke kengrootheden

kengrootheid van	afkorting	formule	toepassing
Archimedes	Ar	$\frac{g \cdot l \cdot \Delta \rho}{w^2 \cdot \rho}$	thermische opstijging
Damköhler	$Da I$	$\frac{U \cdot l}{w \cdot c}$	warmte- en stoftransport
	$Da II$	$\frac{U \cdot l^2}{D \cdot c}$	bij chemische reacties
	$Da III$	$\frac{H \cdot U \cdot l}{c_p \cdot w \cdot T \cdot \rho}$	
	$Da IV$	$\frac{H \cdot U \cdot l^2}{\lambda \cdot T}$	
Fourier	Fo	$\frac{\lambda \cdot t}{\rho \cdot c_p \cdot l^2}$	warmtetransport
Froude	Fr	$\frac{w^2}{g \cdot l}$	stijgkracht, pneumatisch transport
Grashof	Gr	$\frac{l^3 \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2 \cdot T}$	vrije convectie
Lewis	$Le = Sc/Pr$	$\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p \cdot D}$	koppeling warmte- en stoftransport
Mach	M	$\frac{w}{v_k}$	samendrukbare stroming
Nusselt	Nu	$\frac{h \cdot l}{\lambda}$	gedwongen convectie
Peclet	$Pe = Re \cdot Pr$	$\frac{w \cdot l \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}$	gedwongen convectie, vlamstabilisatie
Prandtl	Pr	$\frac{c_p \cdot \rho \cdot \nu}{\lambda}$	vrije en gedwongen convectie
Reynolds	Re	$\frac{w \cdot d}{\nu}$	wrijvingsweerstand
Schmidt	Sc	$\frac{\nu}{D}$	stoftransport
Sherwood	Sh	$\frac{k \cdot l}{D}$	stoftransport
Stanton	$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}$	$\frac{h}{c_p \cdot \rho \cdot w}$	gedwongen convectie
Thring		$\frac{\rho \cdot c_p \cdot w}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^3}$	warmtetransport door straling
Weber	We	$\frac{w^2 \cdot \rho \cdot l}{g \cdot \gamma}$	vloeistofverstuiving

Gebruikte symbolen tabel A 12

v_k	= geluidssnelheid	m/s
c_p	= soortelijke warmte bij constante druk	J/kg · K
g	= zwaarteveldsterkte	m/s ²
l	= lengte	m
t	= tijd	s
σ	= constante van Stefan – Boltzmann	W/m ² · K ⁴
w	= stromingssnelheid	m/s
γ	= oppervlaktespanning	N/m
c	= molaire concentratie	mol/m ³
D	= molaire diffusiecoëfficiënt	m ² /s
H	= enthalpie	J/mol
T	= temperatuur	K
ϱ	= volumieke massa	kg/m ³
U	= molaire reactiesnelheid	mol/m ³ · s
h	= warmteoverdrachtscoëfficiënt	W/m ² · K
k	= stofoverdrachtscoëfficiënt	m/s
ε	= stralingsgetal	–
λ	= warmtegeleidingscoëfficiënt	W/m · K
ν	= kinematische viscositeit	m ² /s
ΔT	= temperatuurverschil	K
d	= diameter	m

A 13 ENKELE GEGEVENS OVER LNG

Indien Gronings aardgas (zie tabel A 9) vloeibaar wordt gemaakt, kan voor het gevormde LNG globaal met de volgende gegevens worden gerekend:

– volumieke massa gas ρ_g bij 273,15 K (0 °C) en 101,325 kPa:	0,781 kg/m ³
– volumieke massa vloeibaar gas ρ_v bij 112 K (–161 °C) en 101,325 kPa:	453 kg/m ³
– kookpunt vloeistof T_b bij 101,325 kPa	112 K (–161 °C)
– volume verhouding 'vloeistof:gas'	1:580 ^{*)}
– samenstelling vloeistof mol %	
	CH ₄ 91,6
	C ₂ H ₆ 6,7
	C ₃ H ₈ 1,0
	C ₄ H ₁₀ 0,3
	N ₂ 0,4

De vloeibare stikstof (N₂) uit het Gronings aardgas wordt apart opgeslagen:

– volumieke massa N ₂ bij 273,15 K (0 °C) en 101,325 kPa (zie tabel A 11)	1,2504 kg/m ³
– volumieke massa vloeibare N ₂ bij 77,3 K (–195,9 °C) en 101,325 kPa	795 kg/m ³
– kookpunt vloeistof T_b bij 101,325 kPa	77,3 K (–195,9 °C)
– volume verhouding 'vloeistof:gas'	1:636 ^{*)}

^{*)} – 1 m³ LNG geeft bij verdamping 580 m³ (0 °C; 101,325 kPa) aardgas (zie samenstelling)
 – 1 m³ vloeibare N₂ geeft bij verdamping 636 m³ (0 °C; 101,325 kPa) N₂

B

B 1 KRITISCHE DRUK EN TEMPERATUUR VAN EEN GASMENGSEL

Een aantal grootheden voor een gasmengsel kan slechts dan worden berekend als de kritische druk en temperatuur van dat gasmengsel bekend zijn. Hoewel de kritische druk en temperatuur nauwkeurig bekend zijn voor de componenten waaruit het gasmengsel is opgebouwd, is het niet mogelijk hieruit ook voor het gasmengsel de 'werkelijke' kritische druk en temperatuur te berekenen. De veelvuldig toegepaste rekenmethoden leveren in dit geval slechts benaderingswaarden op. De op deze wijze berekende kritische grootheden worden dan ook 'pseudo-kritisch' genoemd.

B 1a 'Gewogen gemiddelde' methode (Kay-mengregel)

De pseudo-kritische druk p_k :

$$p_k = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot p_{k,i}}{100}$$

De pseudo-kritische temperatuur T_k :

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot T_{k,i}}{100}$$

waarin:

p_k = pseudo-kritische druk van het gasmengsel

n = aantal componenten

n_i = mol % component i

$p_{k,i}$ = kritische druk component i (zie tabel A 11)

T_k = pseudo-kritische temperatuur van het gasmengsel

$T_{k,i}$ = kritische temperatuur component i (zie tabel A 11).

Tabel B 1a: pseudo-kritische druk en temperatuur van Gronings aardgas

component	chemische formule	$n_i^{*)}$ mol %	$p_{k,i}$ kPa	$T_{k,i}$ K
methaan	CH ₄	81,29	4604	190,55
ethaan	C ₂ H ₆	2,87	4880	305,43
propaan	C ₃ H ₈	0,38	4250	369,82
butaan	C ₄ H ₁₀	0,15	3797	425,16
pentaan	C ₅ H ₁₂	0,04	3369	469,7
hexaan	C ₆ H ₁₄	0,05	3012	507,3
stikstof	N ₂	14,32	3399	126,26
zuurstof	O ₂	0,01	5082	154,76
kooldioxyde	CO ₂	0,89	7398	304,26
Gronings aardgas:		100	4460	186,95

^{*)} zie tabel A 9

Gronings aardgas:

pseudo-kritische druk = 4460 kPa (44,60 bar)

pseudo-kritische temperatuur = 186,95 K (−86,20 °C)

Om tot getalwaarden te komen, die de werkelijkheid – gemeten waarden – dicht benaderen, wordt onder andere door de N.V. Nederlandse Gasunie gebruik gemaakt van computerprogramma's, die met behulp van zogenaamde 'convergentie-technieken' het fase-diagram van een gasmengsel – waarin de kritische druk en temperatuur – berekenen. De op deze wijze berekende kritische druk en temperatuur worden veelal als de 'werkelijke' kritische druk en temperatuur beschouwd. Ook met de formule uit lit (1), bepaald met gegevens uit metingen aan een 25-tal aardgasen met een molaire massa $M < 30$, kan snel de kritische temperatuur worden berekend met een nauwkeurigheid gelijk aan die van de eerder genoemde computerprogramma's:

$$T_k = T'_k [1 + 0,03 (M-16)]$$

waarin:

T_k = 'werkelijk' kritische temperatuur

T'_k = pseudo-kritische temperatuur volgens de 'gewogen gemiddelde' methode

M = molaire massa van het gasmengsel.

Voor Gronings aardgas ($M = 18,637$ kg/kmol):

$$T_k = 201,74 \text{ K } (-71,41 \text{ °C})$$

Voor de kritische druk p_k kan uit de meetgegevens geen voldoende nauwkeurige correlatie worden bepaald.

B 1b EMR-methode

Ook met de EMR-methode (Eykmann Molecular Refraction) worden in wezen 'pseudo-kritische' waarden berekend, die echter de 'werkelijke' – zoals in B 1a omschreven – waarden dicht benaderen.

Rekenwijze (zie voorbeeld tabel B 1b 1):

– Verdeel het gasmengsel in twee groepen:

groep 1 – CH₄, CO₂, H₂S, N₂, H₂ en O₂

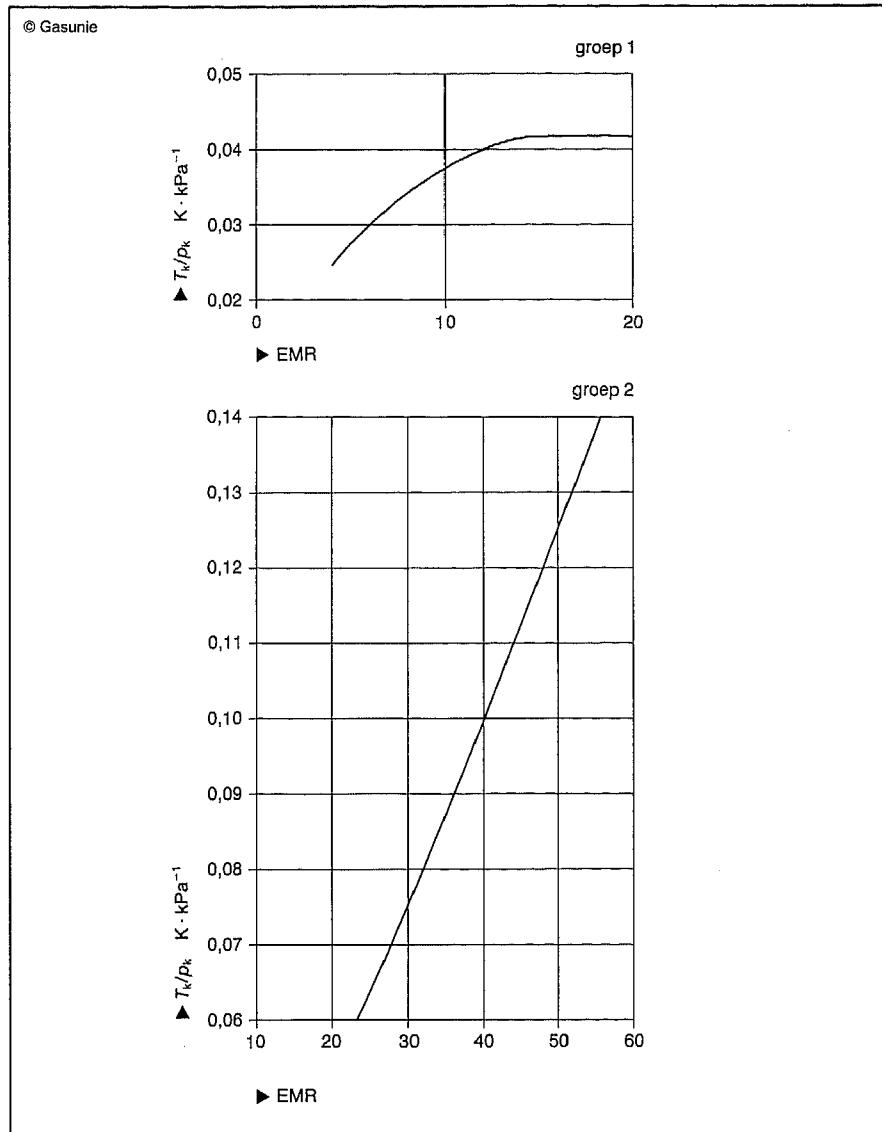
groep 2 – C₂H₆ en overige koolwaterstoffen

– breng de 'samenstelling' van beide groepen op 100 % (n_i^*)

– bereken voor beide groepen de EMR-waarde uit de 'samenstelling' en de 'EMR-waarden van de componenten' (zie tabel B 1b 2)

$$EMR_{1/2} = \sum_{i=1}^n n_i^* \cdot EMR_i / 100$$

– bepaal uit figuur B 1b 1 de waarde van $\left(\frac{T_k}{p_k}\right)_1$ en $\left(\frac{T_k}{p_k}\right)_2$



Figuur B 1b 1. EMR-waarden als functie van de kritische druk p_k en kritische temperatuur T_k

en bereken de gemiddelde waarde hiervan voor het gasmengsel:

$$\left(\frac{T_k}{p_k}\right)_m = n_1 \left(\frac{T_k}{p_k}\right)_1 + n_2 \left(\frac{T_k}{p_k}\right)_2$$

$$n_1 = \sum_{i=1}^n n_i/100 \text{ groep 1 (n componenten)}$$

$$n_2 = \sum_{i=1}^n n_i/100 \text{ groep 2 (n componenten)}$$

– bereken de EMR-waarde voor het gasmengsel

$$EMR_m = n_1 \cdot EMR_1 + n_2 \cdot EMR_2$$

en bepaal uit figuur B 1b 2 de waarde van $\left(\frac{T_k}{\sqrt{\rho_k}}\right)_m$

– uit $\left(\frac{T_k}{\rho_k}\right)_m$ en $\left(\frac{T_k}{\sqrt{\rho_k}}\right)_m$ kunnen de kritische druk en temperatuur voor het gasmengsel worden bepaald.

Tabel B 1b 1: EMR-waarden van Gronings aardgas

groep 1				groep 2			
compo- nent	$n_i^{*})$ mol %	n_i^*	EMR	compo- nent	$n_i^{*})$ mol %	n_i^*	EMR
CH ₄	81,29	84,23	14,115	C ₂ H ₆	2,87	82,23	24,365
N ₂	14,32	14,84	9,407	C ₃ H ₈	0,38	10,89	34,628
O ₂	0,01	0,01	8,495	C ₄ H ₁₀	0,15	4,30	44,243
CO ₂	0,89	0,92	15,750	C ₅ H ₁₂	0,04	1,15	55,267
				C ₆ H ₁₄	0,05	1,43	65,575
	$n_1 = 96,51$	$\Sigma = 100$			$n_2 = 3,49$	$\Sigma = 100$	

groep 1 – $EMR_1 = 13,431$

groep 2 – $EMR_2 = 27,282$

Uit figuur B 1b 1 volgt:

$$\text{voor } EMR_1 = 13,431 \rightarrow \left(\frac{T_k}{\rho_k}\right)_1 = 0,0410$$

$$\text{voor } EMR_2 = 27,282 \rightarrow \left(\frac{T_k}{\rho_k}\right)_2 = 0,0695$$

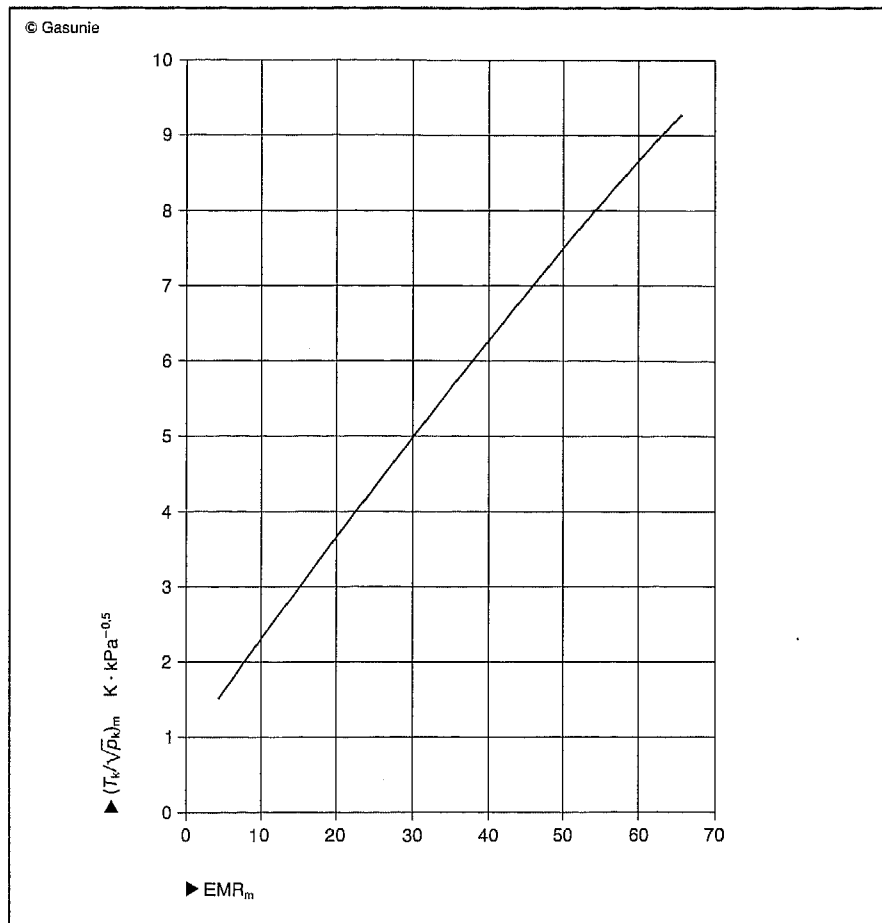
$\left(\frac{T_k}{\rho_k}\right)_1$ en $\left(\frac{T_k}{\rho_k}\right)_2$ kunnen ook worden berekend uit:

$$\left(\frac{T_k}{\rho_k}\right)_1 = 0,01204 + 3,5983 \cdot 10^{-3} \times EMR_1 - 1,0762 \cdot 10^{-4} \times EMR_1^2$$

$$\left(\frac{T_k}{\rho_k}\right)_2 = 0,01406 + 1,7781 \cdot 10^{-3} \times EMR_2 + 9,9172 \cdot 10^{-6} \times EMR_2^2 - 2,0102 \cdot 10^{-8} \times EMR_2^3$$

$n_i^* = \text{mol \% van de op 100 \% gebrachte deelmengsels}$

*) zie tabel A 9



Figuur B 1b 2. EMR-waarden als functie van de kritische druk p_k en kritische temperatuur T_k

Voor het gasmengsel geldt dus:

$$EMR_m = 13,914$$

$$\left(\frac{T_k}{\sqrt{p_k}}\right)_m = 0,0420$$

$$\text{Uit figuur B 1b 2 volgt voor } EMR_m = 13,914 \rightarrow \left(\frac{T_k}{\sqrt{p_k}}\right)_m = 2,846$$

$$\left(\frac{T_k}{\sqrt{p_k}}\right)_m \text{ kan ook worden berekend uit:}$$

$$\left(\frac{T_k}{\sqrt{p_k}}\right)_m = 0,89246 + 1,43757 \cdot 10^{-1} \times EMR_m - 2,4271 \cdot 10^{-4} \times EMR_m^2$$

Uit $\left(\frac{T_k}{p_k}\right)_m = 0,0420$ en $\left(\frac{T_k}{\sqrt{p_k}}\right)_m = 2,846$ volgt:

$$T_k = 192,85 \text{ K} \quad (-80,30 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$p_k = 4592 \text{ kPa} \quad (45,92 \text{ bar})$$

waarin:

EMR = Eykman Molecular Refraction

n_i^* = mol % component i uit op 100 % gebrachte deelmengsels

n_i = mol % component i

m = mengsel.

De EMR-waarden voor de componenten van een gasmengsel kunnen worden berekend volgens:

$$\text{EMR} = [(n^2 - 1)/(n + 0,4)] \frac{M}{\rho} \quad (\text{zie lit (1) en (2)})$$

Tabel B 1b 2: kritische druk, kritische temperatuur en EMR-waarden

component	chemische formule	$p_{k,i}^{*)}$ kPa	$T_{k,i}^{*)}$ K	EMR ^{**)}
methaan	CH ₄	4604	190,55	14,115
ethaan	C ₂ H ₆	4880	305,43	24,365
propaan	C ₃ H ₈	4250	369,82	34,628
2-methylpropaan	i-C ₄ H ₁₀	3648	408,13	44,741
n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	3797	425,16	44,243
2-methylbutaan	i-C ₅ H ₁₂	3381	460,39	55,302
n-pentaaan	n-C ₅ H ₁₂	3369	469,70	55,267
n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	3012	507,30	65,575
n-heptaan	n-C ₇ H ₁₆	2736	540,10	75,875
n-octaan	n-C ₈ H ₁₈	2487	568,76	86,200
n-nonaan	n-C ₉ H ₂₀	2288	594,56	96,529
n-decaan	n-C ₁₀ H ₂₂	2104	617,50	106,859
n-undecaan	n-C ₁₁ H ₂₄	1966	638,73	117,173
n-dodecaan	n-C ₁₂ H ₂₆	1824	658,20	127,499
stikstof	N ₂	3399	126,26	9,407
kooldioxyde	CO ₂	7398	304,26	15,750
zwavelwaterstof	H ₂ S	9008	373,60	19,828
zuurstof	O ₂	5082	154,76	8,495
waterstof	H ₂	1298	33,26	4,450

^{*)} zie tabel A 11

^{**)} zie lit (1) en (2)

waarin:

- n = brekingsindex van gas of vloeistof (zie lit (3), (4) en (5))
 M = molaire massa (zie tabel A 11)
 ϱ = volumieke massa (zie tabel A 11).

Voor de paraffinen (C_nH_{2n+2}) geldt:

$$EMR = 2,2842 + 0,7307 \times M + 0,2829 \cdot 10^{-4} \times M^2$$

Lit (1) J. M. Campbell / Gas conditioning and processing, vol 1, 1976

Lit (2) W. R. McLeod and J. M. Campbell / Simple method permits prediction of natural gas critical properties, Dallas – U.S.A., 1969

Lit (3) National Bureau of Standards / Selected values of properties of hydrocarbons, Circular C 461 (API Research project 44), 1947

Lit (4) ASTM / Physical constants of hydrocarbons C_1 to C_{10} , publication DS 4A

Lit (5) Handbook of Chemistry and Physics, 56th edition, 1975 – 1976

B 2 COMPRESSIBILITEIT EN SUPERCOMPRESSIBILITEIT

Ideale gassen voldoen aan de wet van Boyle – Gay Lussac:

$$p \cdot V = n \cdot R_a \cdot T$$

waarin:

p = absolute druk	N/m ² = Pa
V = volume	m ³
R_a = absolute (molaire) gasconstante (zie A 1e)	J/mol · K
T = absolute gastemperatuur	K
n = aantal mol.	

Voor niet-ideale gassen – waaronder alle aardgassen – wordt aan de wet van Boyle – Gay Lussac een dimensieloze factor z toegevoegd:

$$p \cdot V = z \cdot n \cdot R_a \cdot T$$

z is de 'compressibiliteitsfactor'.

De naam 'compressibiliteitsfactor' die aan z werd toegekend, werkt verwarrend, daar z weinig te maken heeft met de samendrukbaarheid van een gas. Door middel van z wordt de afwijking ten opzichte van de ideale gaswet in rekening gebracht. De Duitse naam voor z 'Realgasfaktor' is in dat opzicht veel duidelijker. De 'supercompressibiliteit' wordt gedefinieerd als:

$$F_{pv} = \frac{1}{\sqrt{z}}$$

Zie opmerking onder B 2a 1

B 2a Compressibiliteit gasmengsels

In de literatuur worden diverse methoden gegeven voor het berekenen van de compressibiliteitsfactor voor een gasmengsel. Voor zover nu bekend is, kan er niet één specifieke methode worden aangegeven, die voor alle aardgassamenstellingen een even grote nauwkeurigheid bezit (zie lit (3)).

Onderstaand volgen twee berekeningsmethoden die veel worden toegepast, waarvan AGA NX-19 wel de bekendste en meestgebruikte is.

B 2a 1 NX-19

AGA PAR Researchproject NX-19, 1962

Methode voor het berekenen van z en/of F_{pv} voor aardgassen. Deze methode is weinig geschikt voor gebruikers die niet over computerfaciliteiten beschikken of die slechts voor een klein aantal 'druk- en temperatuurvoorwaarden' de compressibiliteit moeten bepalen. Ter ondervanging van dit probleem worden de NX-19 formules grafisch weergegeven in de figuren B 2a 1 tot en met B 2a 3. De afleesnauwkeurigheid wijkt weinig af van de 'berekende' resultaten.

Geldigheidsgebied:

druk	– 100 tot 35 000 kPa (1 tot 350 bar)
temperatuur	– 233 tot 388 K (– 40 tot 115 °C)
dichtheid t.o.v. lucht	– 0,554 tot 1,000
CO ₂ -gehalte	– 0 tot 15 mol %
N ₂ -gehalte	– 0 tot 15 mol %

Voor puur methaan (CH₄) en aardgasen met een hoog N₂-gehalte (tot 18 mol %) is proefondervindelijk gebleken, dat deze methode 'zeer goed' voldoet; voor aardgasen met een hoog CO₂-gehalte (tot 28 mol %) 'redelijk goed' en voor aardgasen met een hoog C₂H₆-gehalte (tot 10 mol %) en een hoog C₃H₈-gehalte (tot 5 mol %) 'zeer matig'.

Berekeningsmethode:

$$F_p = \frac{156,47}{160,8 - 7,22 \cdot d + \text{CO}_2 - 0,392 \cdot \text{N}_2} \quad (\text{zie figuur B 2a 1})$$

$$F_t = \frac{226,29}{99,15 + 211,9 \cdot d - \text{CO}_2 - 1,681 \cdot \text{N}_2} \quad (\text{zie figuur B 2a 2})$$

$$(F_p = F_t = 1 \text{ voor } \text{CO}_2 = \text{N}_2 = 0 \text{ en } d = 0,6)$$

$$p_{\text{adj}} = \frac{14,50376 \cdot p \cdot F_p}{100} \quad (p = \text{absolute druk kPa})$$

$$t_{\text{adj}} = 1,8 \cdot T \cdot F_t - 460 \quad (T = \text{temperatuur K})$$

$$\pi = \frac{p_{\text{adj}} + 14,7}{1000} \quad (\text{zie figuur B 2a 1 en B 2a 3})$$

$$\tau = \frac{t_{\text{adj}} + 460}{500} \quad (\text{zie figuur B 2a 2 en B 2a 3})$$

$$m = 0,0330378 \cdot \tau^{-2} - 0,0221323 \cdot \tau^{-3} + 0,0161353 \cdot \tau^{-5}$$

$$n = \frac{0,265827 \cdot \tau^{-2} + 0,0457697 \cdot \tau^{-4} - 0,133185 \cdot \tau^{-1}}{m}$$

$$B = \frac{3 - m \cdot n^2}{9 \cdot m \cdot \pi^2}$$

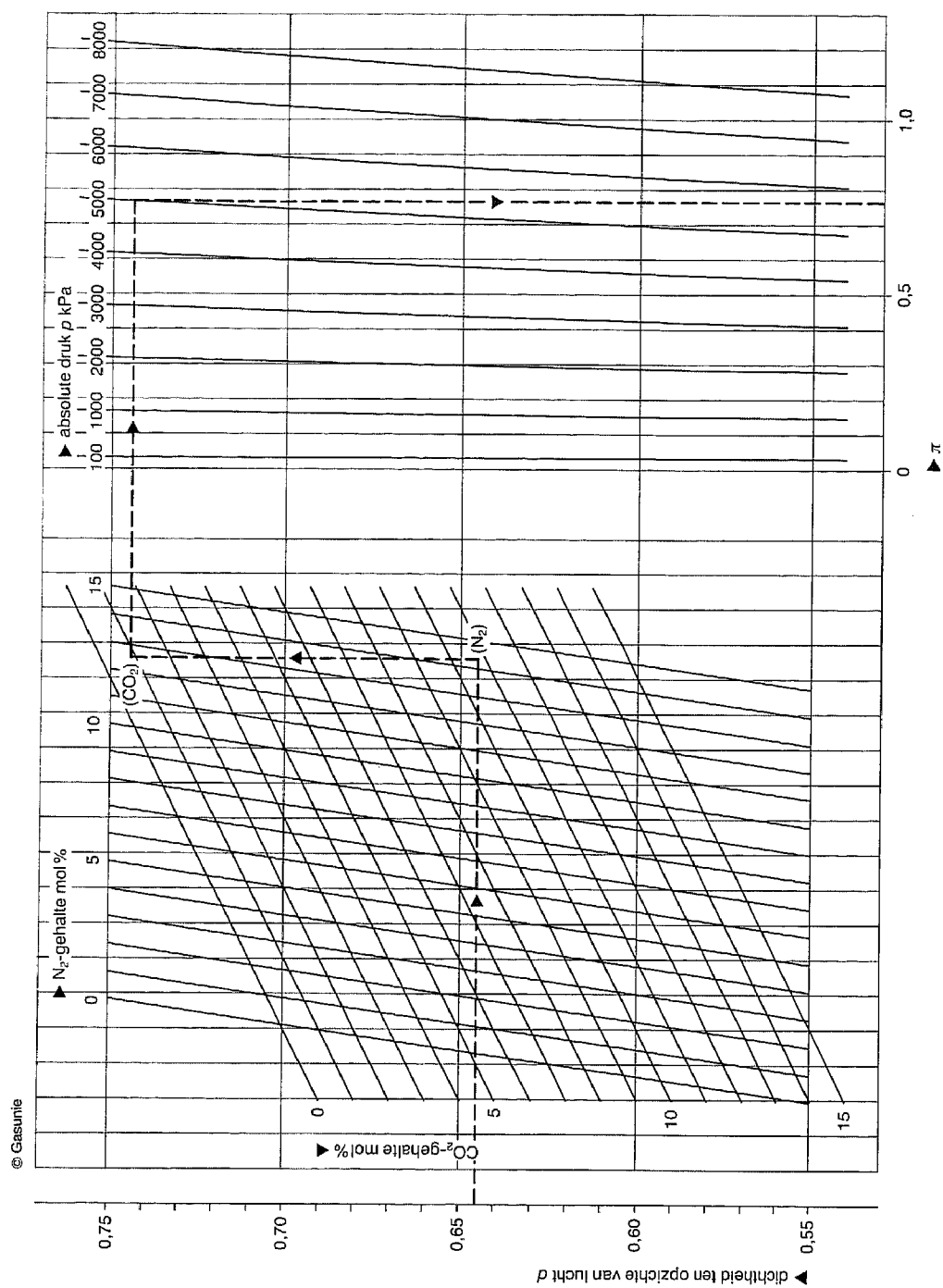
$$b = \frac{9 \cdot n - 2 \cdot m \cdot n^3}{54 \cdot m \cdot \pi^3} \quad E^*)$$

$$D = (b + \sqrt{b^2 + B^3})^{1/3}$$

$$F_{\text{pv}} = \frac{\sqrt{\frac{B}{D} - D + \frac{n}{3 \cdot \pi}}}{1 + \frac{0,00132}{\tau^{3,25}}}$$

$$z = \frac{1}{F_{\text{pv}}^2} \quad (\text{zie figuur B 2a 3})$$

*) E is een functie van π en τ



waarin:

- d = dichtheid ten opzichte van lucht
 CO_2 = mol % CO_2 in aardgas
 N_2 = mol % N_2 in aardgas
 p = absolute druk kPa (zie opmerking hieronder)
 T = temperatuur K.

Voorbeeld: Gronings aardgas

$$T = 15^\circ\text{C}$$

$$p = 5000 \text{ kPa}$$

(zie figuur B 2a 1, B 2a 2 en B 2a 3)

$$z = 0,9117 \text{ (berekend: } 0,9116)$$

Opmerking: volgens AGA dient hier 'overdruk' te worden ingevuld. De definitie van de supercompressibiliteit blijkt dan anders te zijn dan onder B 2 wordt gegeven

(zie lit (4)). In dit geval $-F_{pv} = \frac{1}{\sqrt{z}}$ – is een modificatie toegepast volgens

Herning en Wolowsky (zie lit (5)), die in veel aardgascontracten voorkomt.

E voor de diverse geldigheidsgebieden:

$$1,09 < \tau < 1,4$$

$$0 < \pi < 2$$

$$E_1 = 1 - 0,00075 \pi^{2,3} e^{-20(\tau-1,09)} - 0,0011 (\tau-1,09)^{0,5} \times \pi^2 [2,17 + 1,4 (\tau-1,09)^{0,5} - \pi]^2$$

$$0,84 < \tau < 1,09$$

$$0 < \pi < 1,3$$

$$E_2 = 1 - 0,00075 \pi^{2,3} [2 - e^{-20(1,09-\tau)}] + -1,313 (1,09 - \tau)^4 \pi (1,69 - \pi^2)$$

$$0,88 < \tau < 1,09$$

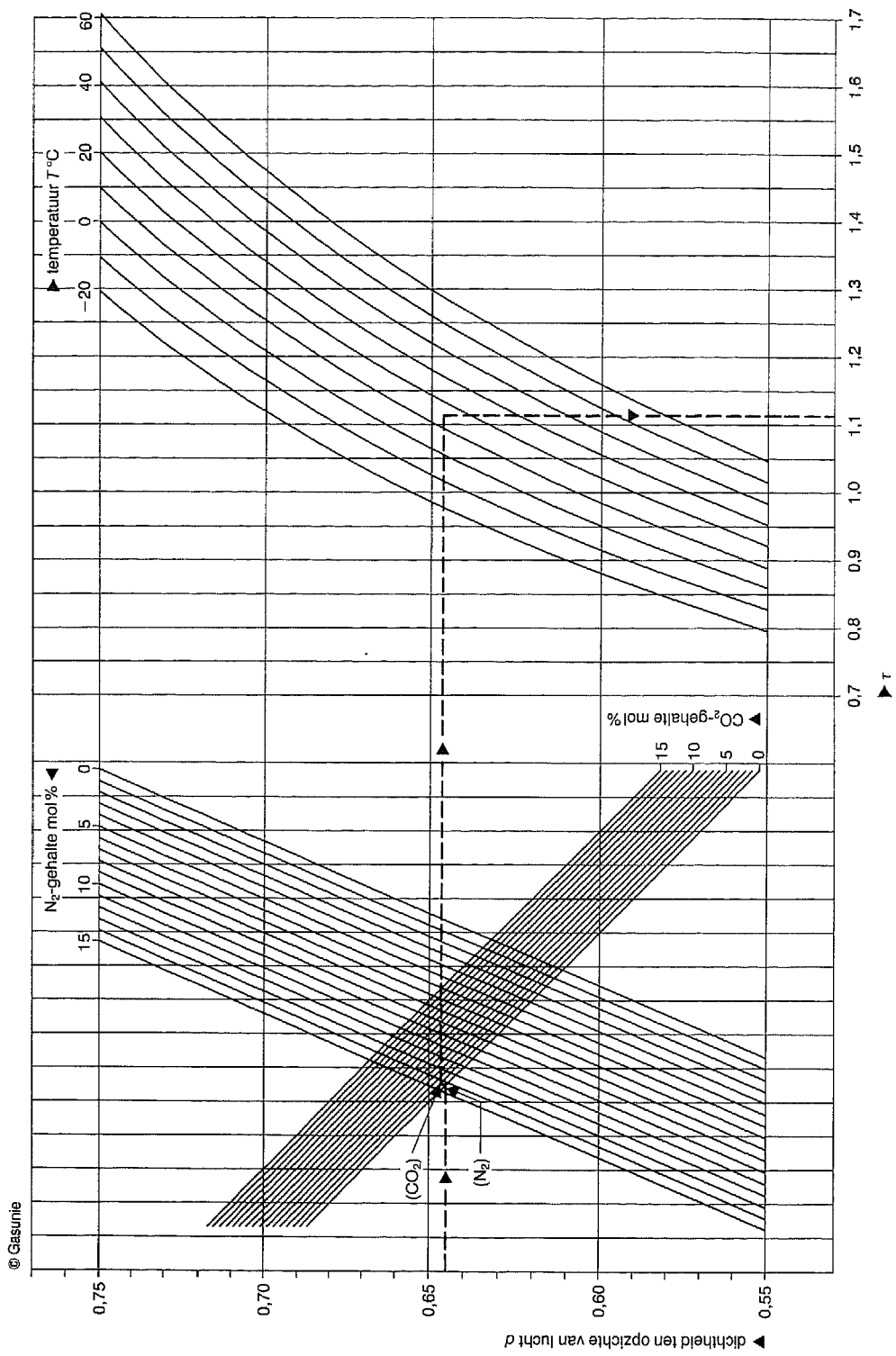
$$1,3 < \pi < 2,0$$

$$E_3 = 1 - 0,00075 \pi^{2,3} [2 - e^{-20(1,09-\tau)}] + + 0,455 [200 (1,09 - \tau)^6 - 0,03249 (1,09 - \tau) + 2,0167 (1,09 - \tau)^2 + -18,028 (1,09 - \tau)^3 + 42,844 (1,09 - \tau)^4] (\pi - 1,3) (1,69 \cdot 2^{1,25} - \pi^2)$$

◁ *Figuur B 2a 1. De gereduceerde druk π als functie van de dichtheid ten opzichte van lucht d , het gehalte aan CO_2 en N_2 en de absolute druk p*

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

$$\left. \begin{array}{l} d = 0,645 \\ \text{N}_2 = 14,32 \text{ mol \%} \\ \text{CO}_2 = 0,89 \text{ mol \%} \\ p = 5000 \text{ kPa} \end{array} \right\} \pi = 0,763 \text{ (berekend: } 0,764)$$



$$0,84 < \tau < 0,88$$

$$1,3 < \pi < 2,0$$

idem als E_3 , behalve de laatste term:

$$(1,69 \cdot 2^{1,25} - \pi^2) \text{ wordt } (1,69 \cdot 2^{[1,25 + 80(0,88 - \tau)^2]} - \pi^2)$$

$$0,84 < \tau < 0,88$$

$$2,0 < \pi < 5,0$$

$$E_{5a} = E_4 - Y$$

$$0,88 < \tau < 1,09$$

$$2,0 < \pi < 5,0$$

$$E_{5b} = E_3 - Y$$

$$1,09 < \tau < 1,32$$

$$2,0 < \pi < 5$$

$$E_{5c} = E_1 - Y$$

$$1,32 < \tau < 1,40$$

$$2,0 < \pi < 5,0$$

$$E_6 = E_{5c} - U$$

Voor E_{5a} tot en met E_{5c} :

$$A = 1,71720 - 2,33123 \tau - 1,56796 \tau^2 + 3,47644 \tau^3 - 1,28603 \tau^4$$

$$A_1 = 0,016299 - 0,028094 \tau + 0,48782 \tau^2 - 0,728221 \tau^3 + 0,27839 \tau^4$$

$$A_2 = -0,35978 + 0,51419 \tau + 0,16453 \tau^2 - 0,52216 \tau^3 + 0,19687 \tau^4$$

$$A_3 = 0,075255 - 0,10573 \tau - 0,058598 \tau^2 + 0,14416 \tau^3 - 0,054533 \tau^4$$

$$Y = A(\pi - 2) + A_1(\pi - 2)^2 + A_2(\pi - 2)^3 + A_3(\pi - 2)^4$$

Voor E_6 :

$$U = (\tau - 1,32)^2 (\pi - 2) [3 - 1,483 (\pi - 2) - 0,10 (\pi - 2)^2 + 0,0833 (\pi - 2)^3]$$

B 2a 2 BWR

Met de Benedict-Webb-Rubin-toestandsvergelijking kan z worden berekend uit de samenstelling van een aardgas. Deze methode is alleen geschikt voor gebruikers die over computerfaciliteiten beschikken.

◁ *Figuur B 2a 2. De gereduceerde temperatuur τ als functie van de dichtheid ten opzichte van lucht d , het gehalte aan CO_2 en N_2 en de temperatuur T*

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

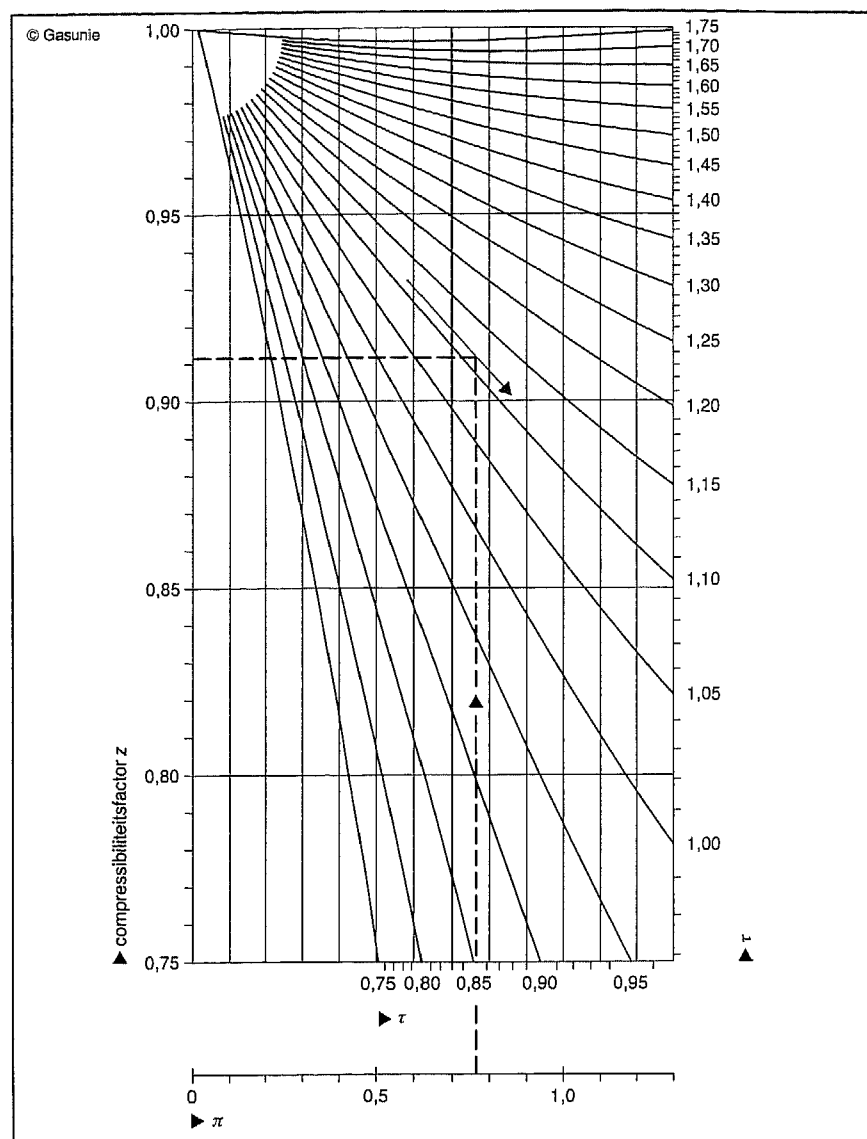
$$d = 0,645$$

$$N_2 = 14,32 \text{ mol\%}$$

$$CO_2 = 0,89 \text{ mol\%}$$

$$T = 15^\circ\text{C} (288,15 \text{ K})$$

$$\tau = 1,113 \text{ (berekend: 1,113)}$$



Figuur B 2a 3. De compressibiliteitsfactor z als functie van π en τ

Voorbeeld: $\pi = 0,763$ (zie figuur B 2a 1)
 $\tau = 1,113$ (zie figuur B 2a 2)
 $z = 0,9117$ (berekend: 0,9116)

Berekeningsmethode:

$$p = R \cdot T \cdot \varrho + (B_0 \cdot R \cdot T - A_0 - C_0 / T^2) \varrho^2 + (b \cdot R \cdot T - a) \varrho^3 + a \cdot \alpha \cdot \varrho^6 + \frac{C \cdot \varrho^3}{T^2} (1 + \gamma \cdot \varrho^2) e^{-\gamma \cdot \varrho^2}$$

waarin:

p	= absolute druk	atm
T	= absolute temperatuur	K
R	= molaire gasconstante (= 0,08206)	$\frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$
ϱ	= volumieke massa ($= \frac{p}{Z \cdot R \cdot T}$)	$\frac{\text{mol}}{\text{l}}$

Mengregels: zie tabel B 2a 2 voor de coëfficiënten.

$$B_{0,m} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n n_i \cdot B_{0,i} + \frac{3}{4} \sum_{i=1}^n n_i \cdot B_{0,i}^{1/3} \times \sum_{i=1}^n n_i \cdot B_{0,i}^{2/3}$$

$$A_{0,m} = \left[\sum_{i=1}^n n_i \cdot A_{0,i}^{1/2} \right]^2$$

$$C_{0,m} = \left[\sum_{i=1}^n n_i \cdot C_{0,i}^{1/2} \right]^2$$

$$a_m = \left[\sum_{i=1}^n n_i \cdot a_i^{1/3} \right]^3$$

$$b_m = \left[\sum_{i=1}^n n_i \cdot b_i^{1/3} \right]^3$$

$$c_m = \left[\sum_{i=1}^n n_i \cdot c_i^{1/3} \right]^3$$

$$\alpha_m = \left[\sum_{i=1}^n n_i \cdot \alpha_i^{1/3} \right]^3$$

$$\gamma_m = \left[\sum_{i=1}^n n_i \cdot \gamma_i^{1/2} \right]^2$$

waarin:

n_i = molfractie component i
 n = aantal componenten
 m = mengsel.

Tabel B 2a 2: de grootte van de coëfficiënten voor de verschillende componenten (zie lit (1) en (2)).

De hier gebruikte 'coëfficiënten-set' is slechts één van de 'sets' die in omloop is.

Tabel B 2a 2: coëfficiënten voor de BWR-vergelijking

nr.	component	chemische formule	$A_0 \times 10^{-1*})$	$B_0 \times 10$
1	methaan	CH_4	0,18712416	0,43203053
2	ethaan	C_2H_6	0,33694517	0,47836255
3	propaan	C_3H_8	0,59995798	0,73771408
4	2-methylpropaan (isobutaan)	$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0,99391990	1,3149901
5	n-butaan	$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	1,0196945	1,2786628
6	2,2-dimethylpropaan	C_5H_{12}		
7	2-methylbutaan (isopentaan)	$i\text{-C}_5\text{H}_{12}$	1,3850687	1,7226312
8	n-pentaan	$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	1,1961292	1,2292766
9	2,2-dimethylbutaan	C_6H_{14}	1,1842	1,9214
10	2,3-dimethylbutaan	C_6H_{14}	1,3828	0,9209
11	3-methylpentaan	C_6H_{14}	1,7973	1,7900
12	2-methylpentaan (isohexaan)	$i\text{-C}_6\text{H}_{14}$		
13	n-hexaan	$n\text{-C}_6\text{H}_{14}$	1,7242174	2,1381624
14	2-methylhexaan (isoheptaan)	$i\text{-C}_7\text{H}_{16}$		
15	n-heptaan	$n\text{-C}_7\text{H}_{16}$	1,7400941	2,1174513
16	n-octaan	$n\text{-C}_8\text{H}_{18}$	2,5770533	3,9840039
17	n-nonaan	$n\text{-C}_9\text{H}_{20}$	3,4572536	5,5673163
18	n-decaan	$n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}$	3,9375142	6,1734390
19	n-undecaan	$n\text{-C}_{11}\text{H}_{24}$		
20	n-dodecaan	$n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$		
21	n-tridecaan	$n\text{-C}_{13}\text{H}_{28}$		
22	n-tetradecaan	$n\text{-C}_{14}\text{H}_{30}$		
23	cyclohexaan	C_6H_{12}		
24	methylcyclohexaan	C_7H_{14}		
25	benzeen	C_6H_6	0,651013	0,503020
26	tolueen	C_7H_8		
27	xyleen (o)	C_8H_{10}		
28	methylmercaptaan	CH_3SH		
29	ethylmercaptaan	$\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$		
30	propylmercaptaan	$\text{C}_3\text{H}_7\text{SH}$		
31	carbonylsulfide	COS		
32	zwavelwaterstof	H_2S	0,37652960	0,52078546
33	zwaveldioxyde	SO_2	0,212054	0,261827

*¹) *Opmerking:* de notatie $A_0 \times 10^{-1}$ betekent, dat de getalwaarde voor A_0 met 10^{-1} is vermenigvuldigd. De werkelijke waarde voor A_0 is dus 10 x zo groot. Voorbeeld: voor $\text{CH}_4 - A_0 = 1,8712416$

D	$C_0 \times 10^{-5}$	$a \times 10$	$b \times 10^2$	$c \times 10^{-4}$	$\alpha \times 10^4$	$\gamma \times 10^2$	toepassingsgebied	
							max. druk bar	temperatuur K
33053	0,23500139	0,69197996	0,39787382	0,30179295	0,96835765	0,57118125	689	165 – 623
36255	2,1242566	4,3040066	1,2548604	3,6099896	2,1688803	1,0970452	709	264 – 548
71408	5,0824370	9,3265688	2,4228587	11,187364	4,8673088	1,8911758	689	273 – 510
3901	9,0456865	23,336257	4,8755556	33,096106	9,9851955	3,4889348	345	244 – 573
3628	9,9892910	19,385909	4,0737290	32,335018	10,442644	3,3385434	689	310 – 573
3312	16,060581	31,995467	5,9691011	63,969012	19,622886	5,0483466	213	294 – 573
2766	17,211571	47,865495	9,2539518	69,983519	13,043829	4,3925926	689	294 – 573
1	33,595	101,08	14,000	174,83	21,890	5,6500	–	–
3	18,670	55,238	10,994	85,505	22,759	6,5044	–	–
3	18,861	43,546	8,637	89,829	30,450	7,2131	–	–
624	32,118381	72,566978	11,287862	160,71350	26,553281	6,6797489	674	310 – 573
1513	51,337115	122,92505	17,644551	277,93572	33,896262	7,9043803	689	311 – 623
1039	75,734303	148,23592	16,594366	450,73712	61,241114	10,301145	304	294 – 569
1163	107,48997	192,71408	21,684926	657,78328	75,142491	10,770395	689	293 – 511
1390	133,85286	244,35467	26,569730	883,88508	101,13456	13,081063	689	311 – 511
120	34,3016	557,7047	7,66343	117,652	7,00159	2,93016	–	–
8546	2,0278814	2,5665687	0,63514110	2,9086082	0,52722820	0,45739050	689	277 – 411
27	7,93879	84,4395	1,46542	11,3362	0,719604	0,592390	–	–

nr.	component	chemische formule	$A_0 \times 10^{-1}$ *	$B_0 \times 10$
34	etheen	C_2H_4	0,333958	0,556833
35	propeen	C_3H_6	0,611220	0,850647
36	1-buteen	C_4H_8	0,895325	1,16025
37	1-penteen	C_5H_{10}		
38	1,2-butadiene	C_4H_6		
39	1-butyne	C_4H_6		
40	methanol	CH_3OH		
41	ethanol	C_2H_5OH		
42	argon	Ar		
43	helium	He		
44	kooldioxyde	CO_2	0,18367101	0,32014927
45	koolmonoxyde	CO	0,12211169	0,45809483
46	waterstof	H_2		
47	stikstof	N_2	0,12654834	0,47170114
48	zuurstof	O_2		
49	stikstofmonoxyde	NO		
50	stikstofdioxyde	NO_2		
51	waterdamp	H_2O		
52	lucht (droog)	—		

*1) *Opmerking:* de notatie $A_0 \times 10^{-1}$ betekent, dat de getalwaarde voor A_0 met 10^{-1} is vermenigvuldigd. De werkelijke waarde voor A_0 is dus 10 x zo groot. Voorbeeld: voor CH_4 — $A_0 = 1,8712416$

B 2b Compressibiliteit enkelvoudige gassen

B 2b 1 $AP/$

Voor koolwaterstoffen en 'niet-polaire' gassen kan de compressibiliteitsfactor z worden berekend volgens:

$$z = 1 + p_r \cdot T_r^{-1} [(0,1445 + 0,073 \cdot \omega) - (0,330 - 0,46 \cdot \omega)T_r^{-1} + (0,1385 + 0,50 \cdot \omega)T_r^{-2} - (0,0121 + 0,097 \cdot \omega)T_r^{-3} + 0,0073 \cdot \omega \cdot T_r^{-8}] \quad (\text{zie lit (6) en (7)})$$

waarin:

p_r = gereduceerde druk (= p/p_k)
 p = absolute druk

$C_0 \times 10^{-5}$	$a \times 10$	$b \times 10^2$	$c \times 10^{-4}$	$\alpha \times 10^4$	$\gamma \times 10^2$	toepassingsgebied	
						max. druk bar	tempera- tuur K
1,31140 4,39182 9,27280	2,59000 7,74056 16,9270	0,8600 1,87059 3,48156	2,1120 10,2611 27,4920	1,78000 4,55696 9,10889	0,923000 1,82900 2,95945	— — —	— — —
1,7602805 0,076831753	2,4204855 0,23439776	0,62536078 0,21683496	1,9008120 0,073332301	0,48784066 2,0968189	0,42808218 0,67019093	608 785	273 – 523 273 – 473
0,048361433	0,23094543	0,25483185	0,057755739	0,98032114	0,52104571	689	77 – 423

- p_k = kritische druk (zie tabel A 11)
 T_r = gereduceerde temperatuur ($= T/T_k$)
 T = absolute temperatuur
 T_k = kritische temperatuur (zie tabel A 11)
 ω = acentric factor (zie lit (2) en (6)).

Deze formule is beperkt geldig: $0 < p_r < 0,2$.

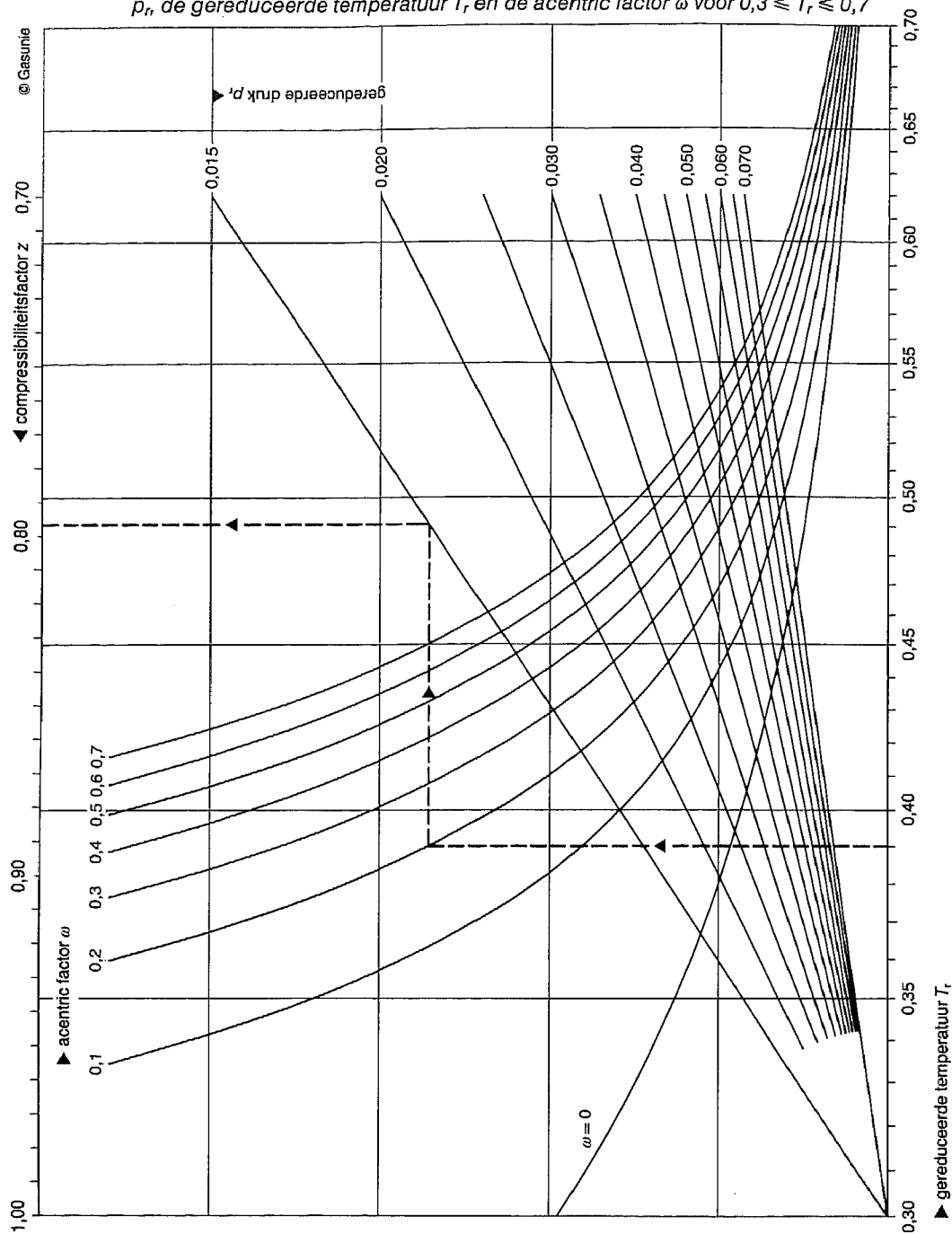
In figuur B 2b 1 tot en met B 2b 3 wordt deze formule grafisch weergegeven.

In tabel B 2b wordt z gegeven voor een aantal enkelvoudige gassen.

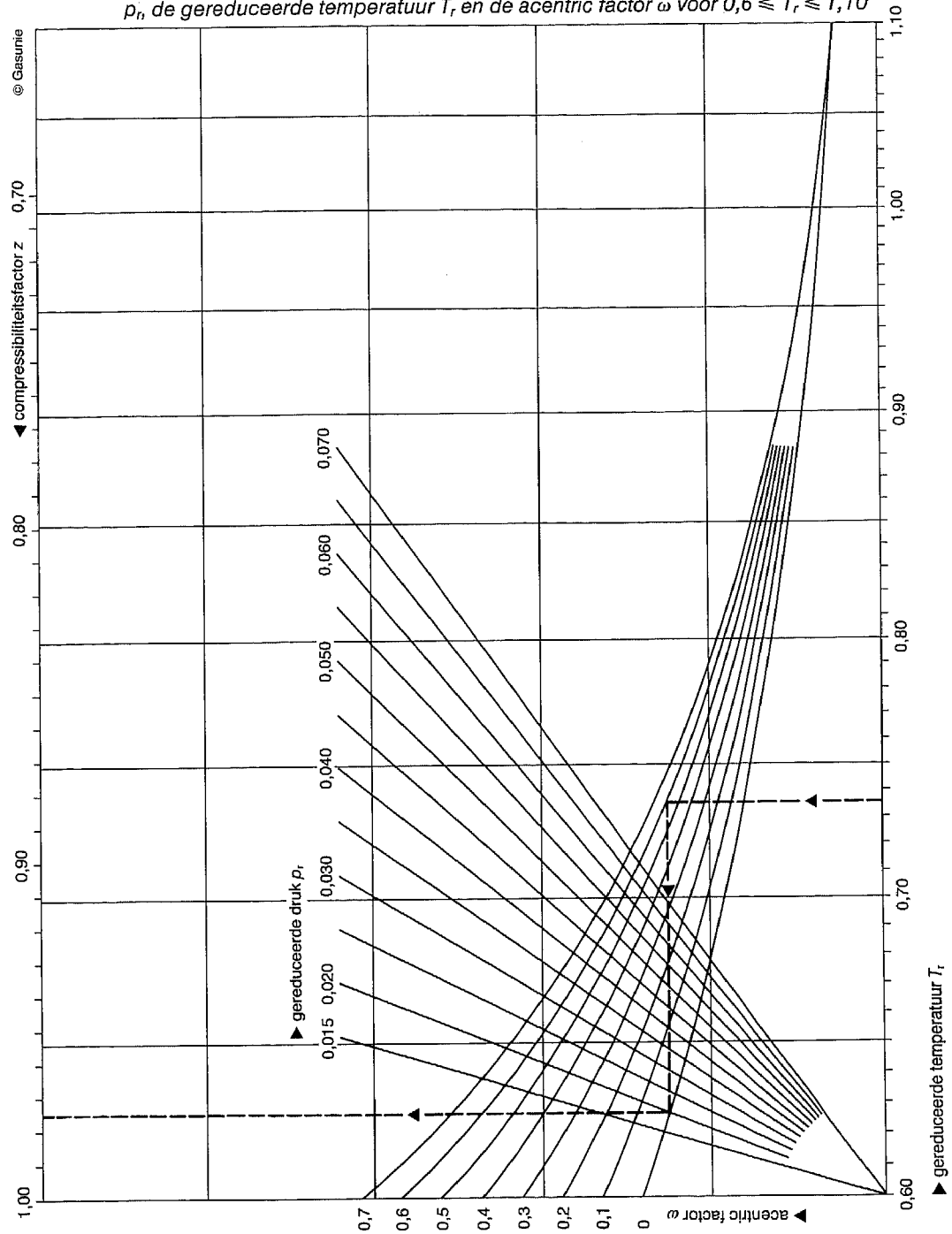
B 2b 2 DIN

Lit (8) geeft de berekeningsmethode volgens DIN van de compressibiliteitsfactor z bij 0 °C en 101,325 kPa voor enkelvoudige gassen:

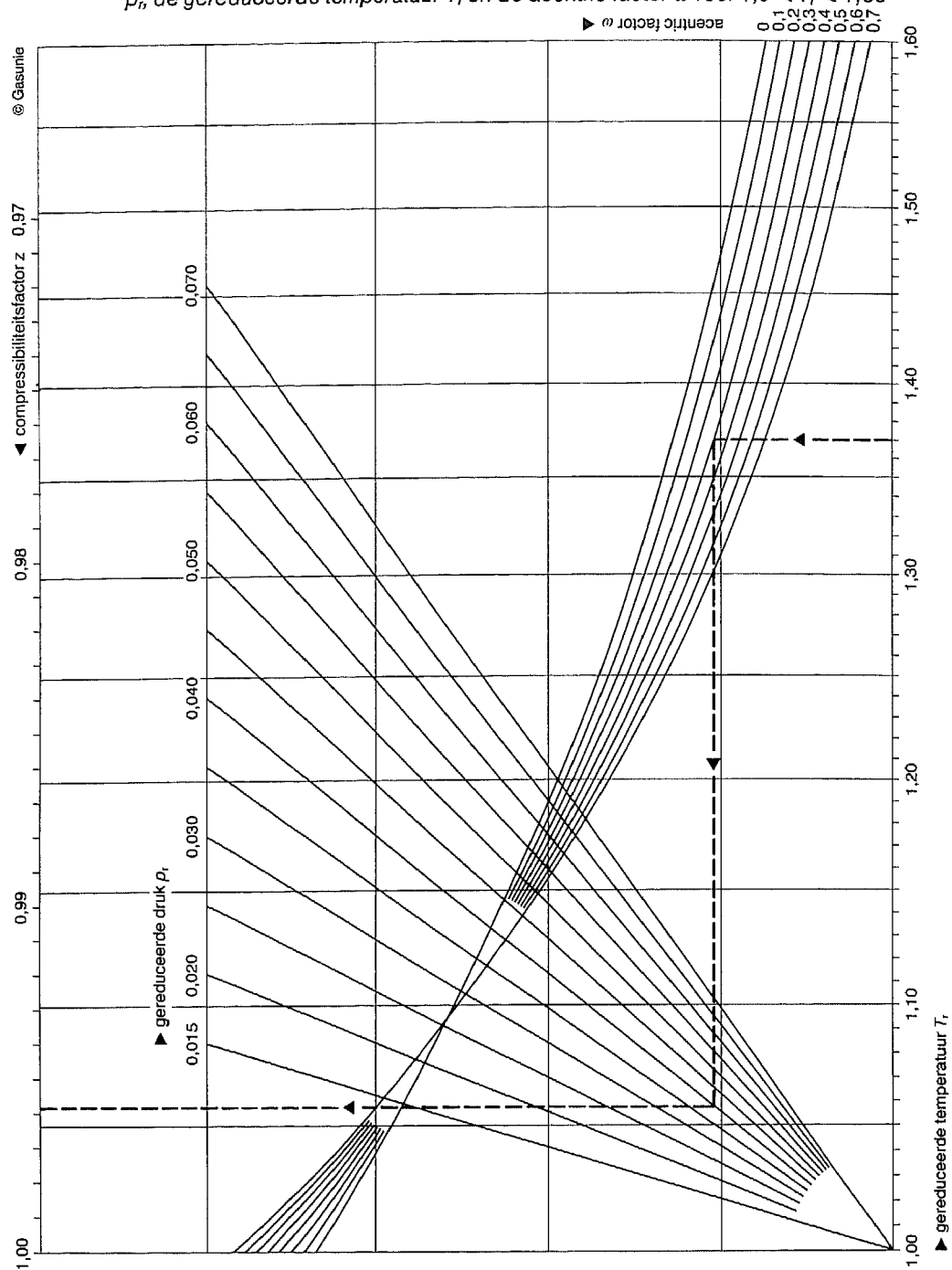
Figuur B 2b 1. De compressibiliteitsfactor z als functie van de gereduceerde druk p_r , de gereduceerde temperatuur T_r , en de acentric factor ω voor $0,3 \leq T_r \leq 0,7$



Figuur B 2b 2. De compressibiliteitsfactor z als functie van de gereduceerde druk p_r , de gereduceerde temperatuur T_r en de acentric factor ω voor $0,6 \leq T_r \leq 1,10$



Figuur B 2b 3. De compressibiliteitsfactor z als functie van de gereduceerde druk p_r , de gereduceerde temperatuur T_r en de acentric factor ω voor $1,0 \leq T_r \leq 1,60$



$$z = 1 + p \cdot B_n \quad (\text{zie tabel B 2b})$$

waarin:

$$p = 1,01325 \text{ bar}$$

B_n = viriaalcoëfficiënt (zie lit (9)).

De viriaalcoëfficiënt is slechts voor een gering aantal gassen bekend (zie tabel B 2b).

- Lit (1) P. R. Bishnoi, R.D. Miranda, D.B. Robinson/BWR applied to NG/SNG needs, HP, November 1974
Lit (2) R.C. Reid, T.K. Sherwood / Properties of gases and liquids, second edition, 1968
Lit (3) R. Snijder / Onderzoek toepassing NX-19, N.V. Nederlandse Gasunie, 1978
Lit (4) J.A. Bonner, R. Snijder / Compressibility factors for gas measurement in Europe, AGA Operating Section Proceedings 1978, T 410 – T 413
Lit (5) F. Herning, E. Wolowski / Kompressibilitaeten und Realgasfaktoren von Erdgasen nach neuen Amerikanischen Berechnungsunterlagen, Gas Ber. Ruhrgas AG, 1966
Lit (6) API / Technical Data Book, 1966
Lit (7) I. M. Lorenz / Numerical values of properties of combustible gases and related materials, IGU/E 17-73
Lit (8) DIN 1871, Dec. 1976 (ontwerpnorm)
Lit (9) Taschenbuch für Physiker und Chemiker, Bd 1/1976, 3. Aufl.

Tabel B 2b: kritische druk, kritische temperatuur, acentric factor, compressibiliteitsfactor en factor voor compressibiliteitsberekening

nr.	component	chemische formule	kritische grootheden		API		DIN	
			T_k K 1)	p_k kPa 1)	acentric factor ω 2)	compressibiliteitsfactor z	$B_n \times 10^3$ 3)	compressibiliteitsfactor z
1	methaan	CH ₄	190,55	4604	0,013	0,9976	- 2,4	0,9976
2	ethaan	C ₂ H ₆	305,43	4880	0,105	0,9899	- 9,5	0,9904
3	propaan	C ₃ H ₈	369,82	4250	0,152	0,9784	- 21	0,9787
4	2-methylpropaan (isobutaan)	i-C ₄ H ₁₀	408,13	3648	0,192	0,9642	- 35	0,9645
5	n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	425,16	3797	0,201	0,9602	- 40	0,9595
6	2,2-dimethylpropaan	C ₅ H ₁₂	433,75	3199	0,195	0,9497		
7	2-methylbutaan (isopentaan)	i-C ₅ H ₁₂	460,39	3381	0,206	0,9407		
8	n-pentaan	n-C ₅ H ₁₂	469,7	3369	0,252	0,9321		0,937
9	2,2-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	488,73	3080	0,266	0,9118		
10	2,3-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	499,93	3127	0,257	0,9062		
11	3-methylpentaan	C ₆ H ₁₄	504,4	3124	0,277	0,8998		
12	2-methylpentaan (isohexaan)	i-C ₆ H ₁₄	497,45	3010	0,295	0,8993		
13	n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	507,3	3012	0,290	0,8916		0,915*
14	2-methylhexaan (isohexptaan)	i-C ₇ H ₁₆	530,31	2734	0,340	0,8445		
15	n-heptaan	n-C ₇ H ₁₆	540,1	2736	0,352	0,8279		0,870*
16	n-octaan	n-C ₈ H ₁₈	568,76	2487	0,408	0,7348		0,848*
17	n-nonaan	n-C ₉ H ₂₀	594,56	2288	0,441	0,6155		
18	n-decaan	n-C ₁₀ H ₂₂	617,5	2104	0,486	0,4431		
19	n-undecaan	n-C ₁₁ H ₂₄	638,73	1966	0,530	0,2172		
20	n-dodecaan	n-C ₁₂ H ₂₆	658,2	1824	0,553	-		
21	n-tridecaan	n-C ₁₃ H ₂₈	675,8	1723	0,593	-		
22	n-tetradecaan	n-C ₁₄ H ₃₀	691,8	1621	0,626	-		

23	cyclohexaan	C ₆ H ₁₂	553,4	4073	0,186	0,9031			
24	methylcyclohexaan	C ₇ H ₁₄	572,12	3471	0,244	0,8517			0,959*
25	benzeen	C ₆ H ₆	562,09	4898	0,215	0,9085			0,937*
26	tolueen	C ₇ H ₈	591,72	4109	0,279	0,8417			0,937*
27	xyleen (o)	C ₈ H ₁₀	630,22	3733	0,300	0,7447			
28	methylmercaptaan	CH ₃ SH	470	7235	0,177	0,9713			
29	ethylmercaptaan	C ₂ H ₅ SH	499	5492	0,173	0,9534			0,9849*)
30	propylmercaptaan	C ₃ H ₇ SH	528	3750	0,170	0,9157			0,9798
31	carbonylsulfide	COS	378	6590	0,120	0,9855			0,9757
32	zwavelwaterstof	H ₂ S	373,6	9008	0,100	0,9899		-19,9	
33	zwaveldioxyde	SO ₂	430,7	7873	0,273	0,9783		-24	
34	etheen	C ₂ H ₄	282,36	5032	0,073	0,9924		-7,6	
35	propeen	C ₃ H ₆	364,75	4610	0,143	0,9811		-18	
36	1-buteen	C ₄ H ₈	419,55	4023	0,203	0,9640		-36	
37	1-penteen	C ₅ H ₁₀	464,78	4053	0,238	0,9466			0,9635
38	1,2-butadiene	C ₄ H ₆	444,15	4499	0,179	0,9620			
39	1-butyne	C ₄ H ₆	463,65	4712	0,280	0,9521			
40	methanol **)	CH ₃ OH	513,2	7954	0,556	0,9403			
41	ethanol **)	C ₂ H ₅ OH	516,3	6383	0,635	0,9171			
42	argon	Ar	150,71	4865	-0,002	0,9991		-0,95	0,9990
43	helium	He	5,21	229	0	1,0012		0,52	1,0005
44	kooldioxyde	CO ₂	304,26	7398	0,420	0,9925		-6,6	0,9933
45	kooldioxyde	CO	134,26	3516	0,041	0,9994		-0,64	0,9994
46	waterstof	H ₂	33,26	1298	0	1,0010		0,61	1,0006
47	stikstof	N ₂	126,26	3399	0,040	0,9996		-0,45	0,9995
48	zuurstof	O ₂	154,76	5082	0,021	0,9990		-0,97	0,9990
49	stikstofmonoxyde	NO	180	6490	0,600	0,9994		-1,05	0,9989
50	stikstofdioxyde	NO ₂	431	10130	0,850	0,9730			
51	waterdamp **)	H ₂ O	647	22119	0,348	0,9445			
52	lucht (droog)	-	132,45	3771	0,036 ***)	0,9994		-0,59	0,9994

*) zie lit (8)

**) polair

****) gemiddeld uit 'N₂' en 'O₂'

1) zie tabel A 11

2) zie lit (2) en (6)

3) zie lit (8) en (9)

B 3 WARMTEGELEIDINGSCOEFFICIENT

De warmtegeleidingscoëfficiënt λ van een gasmengsel is een functie van druk en temperatuur. Het verloop met de temperatuur is praktisch lineair. De meest eenvoudige bepalingsmethode wordt in lit (1) gegeven. Hierin is λ opgebouwd uit 2 delen:

$\lambda_{t,1}$ = warmtegeleidingscoëfficiënt in $W/m \cdot K$ bij een temperatuur van T °C en een druk van 101,325 kPa (zie figuur B 3a)

$\lambda_{t,p}$ = warmtegeleidingscoëfficiënt in $W/m \cdot K$ bij een temperatuur van T °C en een druk van p kPa

$\varphi = \lambda_{t,p}/\lambda_{t,1}$; verhoudingsgetal waarin de gasdruk tot uiting komt (zie figuur B 3b).

Uit $\lambda_{t,1}$ (zie figuur B 3a) en φ (zie figuur B 3b) wordt $\lambda_{t,p}$ berekend.

Deze methode is geldig voor gasmengsels tot 35 mol% N_2 en/of CO_2 .

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

T_k = 186,95 K (zie tabel B 1 a)

p_k = 4460 kPa (zie tabel B 1 a)

T_r = $288,15/186,95 = 1,54$

M = 18,637 kg/kmol

$\lambda_{t,1}$ = 0,0299 $W/m \cdot K$ (zie figuur B 3a)

$\lambda_{t,p}$ (zie tabel B 3)

Tabel B 3: warmtegeleidingscoëfficiënt van Gronings aardgas

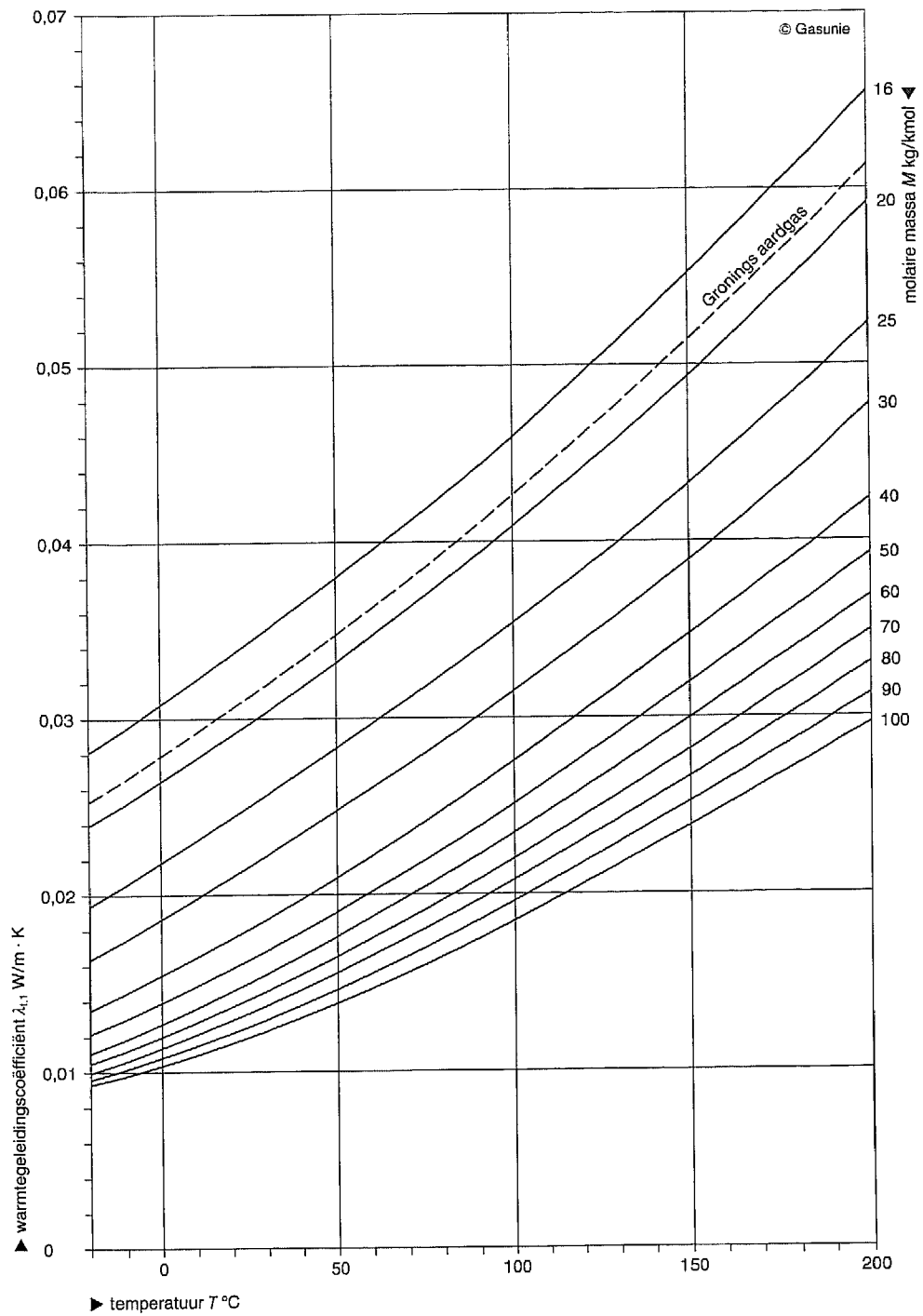
absolute druk kPa	$p_r = p/p_k$	$\varphi^*)$	$\lambda_{t,p}$ $W/m \cdot K$
100	0,022	1,002	0,0300
1 000	0,224	1,027	0,0307
2 000	0,448	1,061	0,0317
3 000	0,673	1,093	0,0327
4 000	0,897	1,122	0,0335
5 000	1,121	1,14	0,0341
6 000	1,345	1,20	0,0359
7 000	1,570	1,24	0,0371
8 000	1,794	1,28	0,0383
9 000	2,018	1,37	0,0410
10 000	2,242	1,44	0,0431

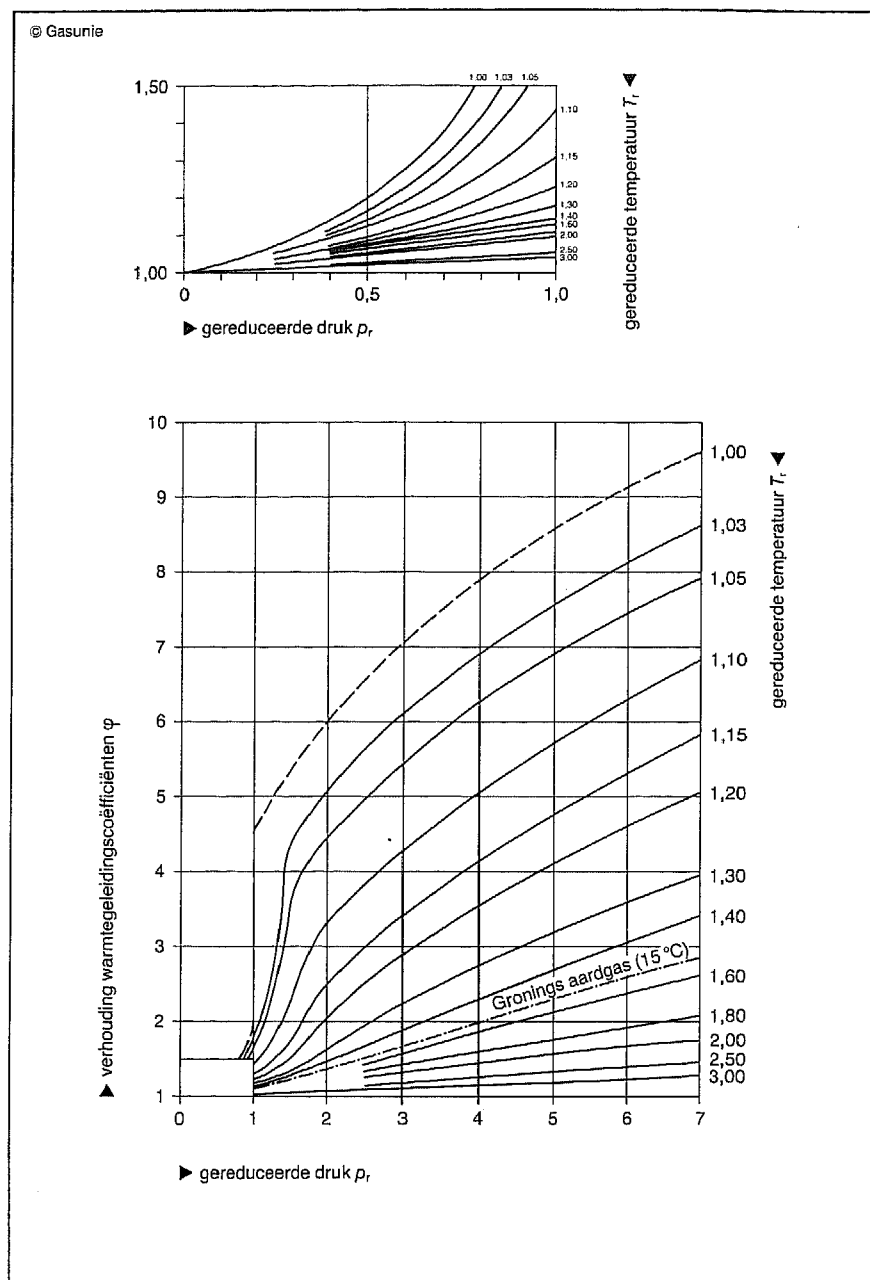
Lit (1) Katz e. a. / Handbook of natural gas engineering, 1959

Lit (2) R. C. Reid, T. K. Sherwood / Properties of gases and liquids, second edition, 1968

▷ *Figuur B 3a. De warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda_{t,1}$ als functie van de temperatuur T en de molaire massa M*

^{*)} zie figuur B 3b





Figuur B 3b. Het verhoudingsgetal φ ($= \lambda_{t,p}/\lambda_{t,i}$) als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r

B 4 VOLUMIEKE MASSA

De volumieke massa ϱ van een niet-ideaal gas of gasmengsel – waaronder alle aardgassen – kan worden bepaald uit:

$$\varrho = \frac{p \cdot M}{z \cdot R_a \cdot T}$$

waarin:

ϱ	= volumieke massa	kg/m ³
p	= absolute druk	N/m ² (= Pa)
z	= compressibiliteitsfactor	(zie B 2)
R_a	= absolute (molaire) gasconstante	J/mol · K (zie A 1 e)
T	= absolute temperatuur	K
M	= molaire massa	kg/mol.

Figuur B 4 geeft de mogelijkheid om ϱ grafisch te bepalen. De nauwkeurigheid is redelijk goed (zie voorbeeld).

De omrekening van bedrijfsomstandigheden (p_1 , T_1) naar normale omstandigheden (101,325 kPa en 273,15 K) verloopt volgens:

$$\varrho_0 = \varrho_1 \frac{p_0}{p_1} \frac{T_1}{T_0} \frac{z_1}{z_0} \text{ kg/m}^3$$

waarin:

index 0 – normale omstandigheden (101,325 kPa en 273,15 K)

index 1 – bedrijfsomstandigheden (p_1 en T_1)

ϱ	= volumieke massa	kg/m ³
p	= absolute gasdruk	kPa
T	= absolute gastemperatuur	K
z	= compressibiliteitsfactor	(zie B 2).

▷ *Figuur B 4. De volumieke massa ϱ als functie van de molaire massa M , de compressibiliteitsfactor z , de absolute druk p en de temperatuur T*

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

$$p = 5000 \text{ kPa} (= 10 \times 500 \text{ kPa})$$

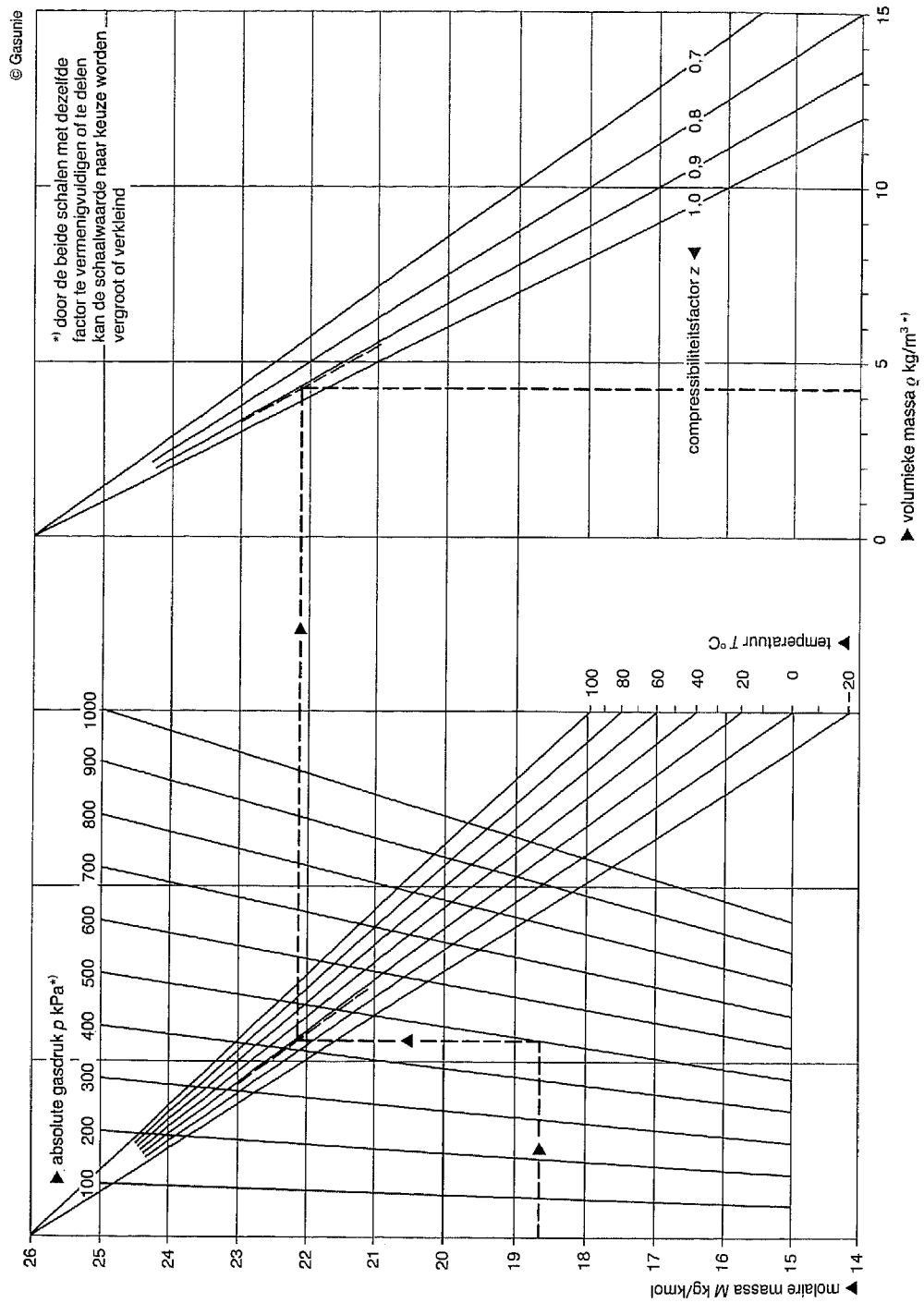
$$T = 15^\circ\text{C} (288,15 \text{ K})$$

$$z = 0,9117 \text{ (zie figuren B 2a 1, B 2a 2, B 2a 3)}$$

$$M = 18,637 \text{ kg/kmol}$$

$$\varrho = 10 \times 4,26 = 42,6 \text{ kg/m}^3 \text{ (berekend: } 42,64 \text{ kg/m}^3)$$

Figuur B 4. De volumieke massa ρ als functie van de molaire massa M , de compressibiliteitsfactor z , de absolute druk p en de temperatuur T



B 5 VISCOSITEIT**B 5a Dynamische (absolute) viscositeit**

Uit een aantal methoden voor het berekenen van de dynamische viscositeit van een gasmengsel komt de methode van Herning en Zipperer (zie lit (1) en (2)) als de meest geschikte naar voren. De afwijking ten opzichte van meetresultaten ligt veelal beneden 3 %.

Voor gasmengsels waarin 'veel' waterstof voorkomt, geldt:

$n_{H_2} < 10 \text{ mol } \%$ – valt binnen meetnauwkeurigheid

$n_{H_2} > 25 \text{ mol } \%$ – niet meer toepasbaar.

$$\mu_{t,1} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot \mu_i \sqrt{M_i}}{\sum_{i=1}^n n_i \sqrt{M_i}}$$

waarin:

$\mu_{t,1}$ = dynamische viscositeit gasmengsel bij T °C en 101,325 kPa

μ_i = dynamische viscositeit component i bij T °C en 101,325 kPa

n_i = mol % component i

M_i = molaire massa component i .

Figuur B 5a 1 geeft $\mu_{t,1}$ bij T °C en 101,325 kPa als functie van de molaire massa M van een gasmengsel. Oorspronkelijk is deze figuur alleen geschikt voor mengsels van koolwaterstoffen. Door het aanbrengen van correcties voor de aanwezigheid van N_2 , CO_2 en H_2S – zie ingevoegde grafiek in figuur B 5a 1 – kan deze figuur voor alle aardgassen worden gebruikt. De berekeningsmethode van Herning en Zipperer komt goed overeen met figuur B 5a 1 (zie lit (1)). Figuur B 5a 2 geeft de invloed van de druk weer op de viscositeit van een gasmengsel (zie lit (1)), waarbij geldt:

$$\mu_{t,p} = m \cdot \mu_{t,1}$$

waarin:

$\mu_{t,p}$ = dynamische viscositeit bij T °C en p kPa Pa · s

m = verhouding tussen $\mu_{t,p}$ en $\mu_{t,1}$ (drukinvloed)

$\mu_{t,1}$ = dynamische viscositeit bij T °C en 101,325 kPa Pa · s.

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

M = 18,637 kg/kmol

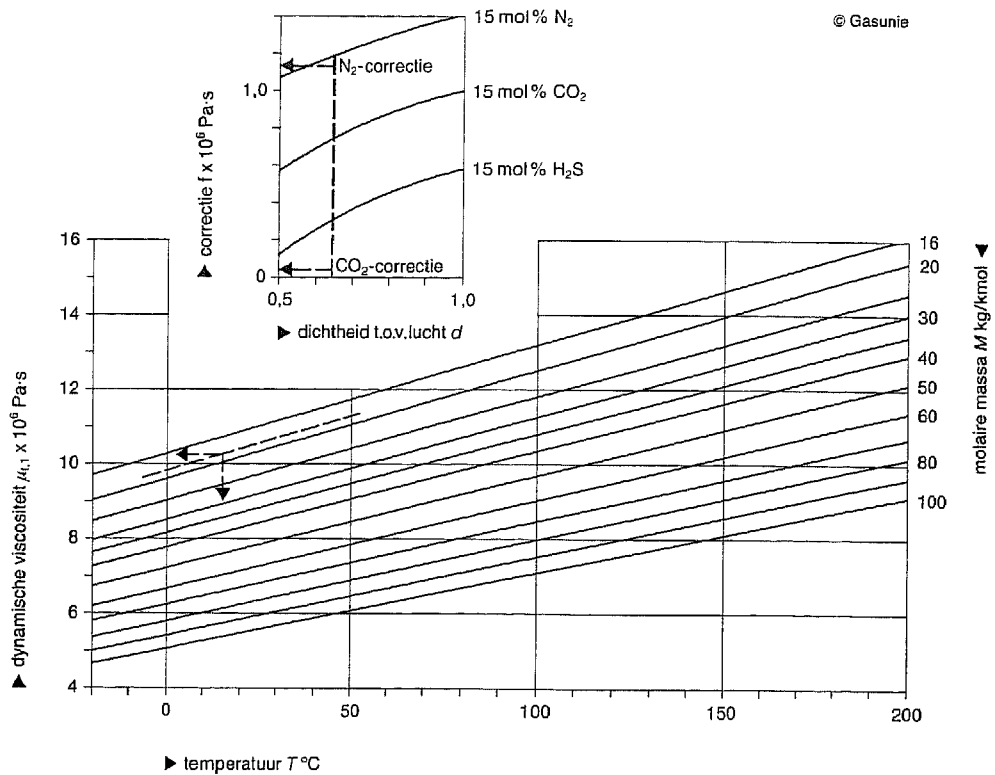
d = 0,645

CO_2 = 0,89 mol %

N_2 = 14,32 mol %

T_k = 186,95 K (zie tabel B 1a)

p_k = 4460 kPa (zie tabel B 1a)



Figuur B 5a 1. De dynamische viscositeit $\mu_{t,1}$ als functie van de temperatuur T en de molaire massa M met correcties voor N_2 , CO_2 en H_2S

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

$$T = 15^\circ\text{C} (288,15\text{ K})$$

$$M = 18,637\text{ kg/kmol}$$

$$d = 0,645$$

$$N_2 = 14,32\text{ mol\%}$$

$$CO_2 = 0,89\text{ mol\%}$$

$$\mu_{t,1} = 10,25 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$1,13 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s} (N_2\text{-correctie})$$

$$0,04 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s} (CO_2\text{-correctie})$$

$$11,42 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Gevraagd: bepaal dynamische viscositeit bij 15°C en 5000 kPa

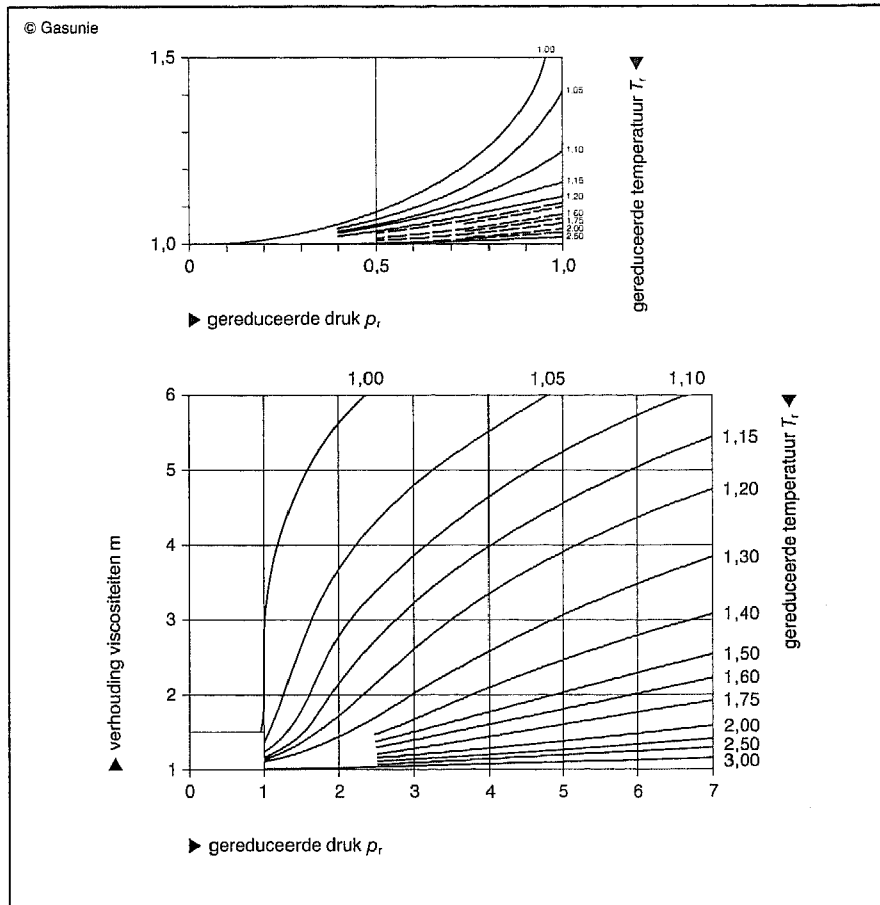
Oplossing: zie figuur B 5a 1

$$\mu_{t,1} = 10,25 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$N_2\text{-correctie} = 1,13 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$CO_2\text{-correctie} = 0,04 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\mu_{t,1} = 11,42 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$$



Figuur B 5a 2. Het verhoudingsgetal m ($= \mu_{t,p}/\mu_{t,1}$) als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r .

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

$$T = 15^\circ\text{C} (288,15\text{ K})$$

$$T_k = 186,95\text{ K (zie tabel B 1a)}$$

$$p = 5000\text{ kPa}$$

$$p_k = 4460\text{ kPa (zie tabel B 1a)}$$

$$T_r = 1,54$$

$$p_r = 1,12$$

$$m = \mu_{t,p}/\mu_{t,1} = 1,10$$

Uit figuur B 5a 2 volgt:

$$m = \frac{\mu_{t,p}}{\mu_{t,1}} = 1,10$$

De dynamische viscositeit $\mu_{t,p}$ wordt dus:

$$\mu_{t,p} = m \cdot \mu_{t,1} = 1,10 \times 11,42 \cdot 10^{-6} = 12,56 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

B 5b Kinematische viscositeit

De kinematische viscositeit ν is de verhouding van de dynamische viscositeit μ en de volumieke massa ϱ van een gasmengsel:

$$\nu = \mu / \varrho$$

waarin:

ν	= kinematische viscositeit	m^2/s
μ	= dynamische viscositeit (zie B 5a)	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ϱ	= volumieke massa (zie B 4)	kg/m^3 .

Uiteraard geldt, dat druk en temperatuur voor elk der genoemde grootheden dezelfde zijn.

Lit (1) Katz e.a. / Handbook of natural gas engineering, 1959

Lit (2) R.C. Reid, T. K. Sherwood / Properties of gases and liquids, second edition, 1968

B 6 SOORTELIJKE WARMTE**B 6a Soortelijke warmte bij constante druk**

De soortelijke warmte bij constante druk c_p van een gasmengsel bij p kPa en T °C is opgebouwd uit een 'ideaal deel' c_p° – alleen een functie van de temperatuur – en een 'reëel deel' Δc_p – een functie van druk en temperatuur:

$$c_p = c_p^\circ + \Delta c_p$$

waarin:

c_p	= soortelijke warmte bij constante druk bij p kPa en T °C	$\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$
c_p°	= 'ideale deel' bij T °C en 101,325 kPa (zie tabel B 6a)	$\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$
Δc_p	= 'reële deel' bij p kPa en T °C (zie figuur B 6a en B 6a 1)	$\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$

Het 'ideale deel' van de soortelijke warmte bij constante druk wordt bepaald uit de samenstelling van het gasmengsel, door de gewogen gemiddelde waarde te nemen van de soortelijke warmte (ideale deel) van de componenten:

$$c_p^\circ = \sum_{i=1}^n n_i \cdot c_{p,i}^\circ / 100$$

waarin:

c_p°	= soortelijke warmte bij constante druk bij T °C en 101,325 kPa	$\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$
n_i	= mol % component i	
$c_{p,i}^\circ$	= soortelijke warmte bij constante druk component i bij T °C en 101,325 kPa (zie tabel B 6a)	$\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$
n	= aantal componenten in gasmengsel.	

Het 'reële deel' Δc_p wordt bepaald uit figuur B 6a (zie lit (3)), waarin Δc_p wordt gegeven

als functie van de gereduceerde druk $p_r \left(= \frac{p}{p_k} \right)$ en de gereduceerde temperatuur $T_r \left(= \frac{T}{T_k} \right)$.

B 6b Soortelijke warmte bij constant volume

Over de soortelijke warmte bij constant volume c_v wordt in de literatuur beduidend minder informatie gegeven dan over de soortelijke warmte bij constante druk c_p (zie B 6a). c_v kan echter eenvoudig worden berekend uit de algemeen geldende formule (zie lit (6), (7), (8)):

$$c_p - c_v = -T \frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p^2}{\left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T}$$

Voor 'niet-ideale' gassen kan hieruit worden afgeleid:

Tabel B 6a: c_p° bij 101,325 kPa en $200 \leq T \leq 450$ K

nr.	component	chemische formule	molaire massa M kg/kmol	c_p° kJ/kmol · K bij
				temperatuur K
				200
1	methaan	CH ₄	16,0426	33,536
2	ethaan	C ₂ H ₆	30,0694	42,287
3	propaan	C ₃ H ₈	44,0962	56,103
4	2-methylpropaan (isobutaan)	i-C ₄ H ₁₀	58,1230	71,887
5	n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	58,1230	76,493
6	2,2-dimethylpropaan	C ₅ H ₁₂	72,1498	80,596
7	2-methylbutaan (isopentaan)	i-C ₅ H ₁₂	72,1498	84,992
8	n-pentaan	n-C ₅ H ₁₂	72,1498	93,616
9	2,2-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	86,1766	101,530
10	2,3 dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	86,1766	93,198
11	3-methylpentaan	C ₆ H ₁₄	86,1766	98,976
12	2-methylpentaan (isohexaan)	i-C ₆ H ₁₄	86,1766	101,404
13	n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	86,1766	103,121
14	2-methylhexaan (isoheptaan)	i-C ₇ H ₁₆	100,2034	127,028
15	n-heptaan	n-C ₇ H ₁₆	100,2034	127,739
16	n-octaan	n-C ₈ H ₁₈	114,2302	144,863
17	n-nonaan	n-C ₉ H ₂₀	128,2570	162,029
18	n-decaan	n-C ₁₀ H ₂₂	142,2838	179,195
19	n-undecaan	n-C ₁₁ H ₂₄	156,3106	196,361
20	n-dodecaan	n-C ₁₂ H ₂₆	170,3374	213,527
21	n-tridecaan	n-C ₁₃ H ₂₈	184,3642	230,693
22	n-tetradecaan	n-C ₁₄ H ₃₀	198,3910	247,859
23	cyclohexaan	C ₆ H ₁₂	84,1608	50,660
24	methylcyclohexaan	C ₇ H ₁₄	98,1876	72,850
25	benzeen	C ₆ H ₆	78,1134	44,805
26	tolueen	C ₇ H ₈	92,1402	61,338
27	xyleen (o)	C ₈ H ₁₀	106,1670	89,789
28	methylmercaptaan	CH ₃ SH	48,1026	
29	ethylmercaptaan	C ₂ H ₅ SH	62,1294	
30	propylmercaptaan	C ₃ H ₇ SH	76,1562	
31	carbonylsulfide	COS	60,0704	
32	zwavelwaterstof	H ₂ S ³⁾	34,0758	33,369
33	zwaveldioxyde	SO ₂ ³⁾	64,0588	36,048
34	etheen	C ₂ H ₄	28,0536	32,652

*) geïnterpoleerd

2), 3), 4), 5) zie lit lijst

5) uit lit (5) bij 288,7 K (60 °F)

101,325 kPa (zie lit (1))						
	250 ^{*)}	273,15	300	350 ^{*)}	400	450 ^{*)}
	34,311	34,876	35,797	38,058	40,654	43,564
	47,018	49,572	52,754	59,118	65,523	71,762
	64,686	68,789	73,981	84,364	94,077	103,498
	84,029	89,974	97,218	111,453	124,515	136,971
	87,127	92,361	99,018	112,332	124,850	136,866
	102,325	111,704	121,627	139,588	156,084	171,784
	102,325	110,448	119,575	136,992	152,986	168,435
	106,219	112,625	120,705	136,992	152,651	167,849
	121,961	131,424 ^{*)}	142,351	162,950	183,256	202,725
	117,105	127,865 ^{*)}	140,300	162,113	181,833	200,422
	120,203	129,791 ^{*)}	140,970	161,527	181,288	200,255
	122,296	131,800 ^{*)}	143,105	163,871	183,633	202,474
	125,269	133,057 ^{*)}	143,356	163,201	181,665	199,794
	145,366	154,493 ^{*)}	165,462	189,243	212,103	231,614
	144,193	153,237 ^{*)}	166,090	189,955	210,805	233,414
	165,546	175,846 ^{*)}	188,825	215,285	239,904	263,559
	185,266	196,905 ^{*)}	211,559	241,453	269,002	295,672
	204,735	217,923 ^{*)}	234,335	267,327	298,184	327,826
	224,831	239,066	257,111	293,495	327,366	360,065
	244,090	260,000 ^{*)}	279,888	319,872	356,548	392,303
	263,768	280,725 ^{*)}	302,664	346,039	385,730	424,123
	283,446	301,868 ^{*)}	325,440	372,207	414,912	455,943
	81,852	94,203 ^{*)}	107,098	128,953	149,971	170,403
	106,973	120,999 ^{*)}	136,113	161,610	185,685	208,712
	64,686	73,060 ^{*)}	82,271	97,762	111,955	124,767
	84,155	93,784 ^{*)}	104,461	122,464	139,211	154,912
	113,253	123,301 ^{*)}	134,061	153,446	171,784	188,825
		49,523 ⁵⁾	50,451 ⁴⁾			
		71,300 ⁵⁾	73,018 ⁴⁾			
		92,817 ⁵⁾	95,250 ⁴⁾			
	33,829	34,055	34,336	35,006	35,718	36,517
	37,949	38,895	39,917	41,788	43,543	45,217
	38,393	40,947 ^{*)}	43,752	49,069	54,010	58,741

nr.	component	chemische formule	molaire massa M kg/kmol	c_p° kJ/kmol · K bij
				temperatuur K 200
35	propeen	C_3H_6	42,0804	46,864
36	1-buteen	C_4H_8	56,1072	59,902
37	1-penteen	C_5H_{10}	70,1340	77,814
38	1,2-butadiene	C_4H_6	54,0914	61,147
39	1-butyne	C_4H_6	54,0914	62,732
40	methanol	CH_3OH	32,0420	
41	ethanol	C_2H_5OH	46,0688	
42	argon	Ar ²⁾	39,9480	20,914
43	helium	He	4,0026	
44	kooldioxyde	CO_2	44,0098	32,377
45	koolmonoxyde	CO	28,0104	29,128
46	waterstof	H_2	2,0158	27,470
47	stikstof	N_2	28,0134	29,128
48	zuurstof	O_2	31,9988	29,149
49	stikstofmonoxyde	NO	30,0061	30,446
50	stikstofdioxyde	NO_2	46,0055	34,734
51	waterdamp	H_2O	18,0152	33,365
52	lucht (droog)	— ²⁾	28,966	29,152

^{*)} geïnterpoleerd

^{2), 3), 4), 5)} zie lit lijst

⁵⁾ uit lit (5) bij 288,7 K (60 °F)

$$c_p - c_v = z \cdot R_a \frac{\left[1 + \frac{T}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]^2}{\left[1 - \frac{p}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T \right]} = z \cdot R_a \frac{N_2^2}{N_1}$$

waarin:

c_v = soortelijke warmte bij constant volume kJ/kmol · K

c_p = soortelijke warmte bij constante druk (zie B 6a) kJ/kmol · K

z = compressibiliteitsfactor bij T en p (zie B 2a 1) —

R_a = gasconstante (zie A 1e) kJ/kmol · K

p = absolute druk kPa

T = absolute temperatuur K.

$\left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T$ = verandering compressibiliteit met de druk bij temperatuur T kPa⁻¹

$\left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p$ = verandering compressibiliteit met de temperatuur bij druk p K⁻¹

101,325 kPa (zie lit (1))						
250 ^{*)}	273,15	300	350 ^{*)}	400	450 ^{*)}	
55,978	59,955 ^{*)}	64,226	72,348	79,968	87,379	
76,283	82,815 ^{*)}	89,807	101,865	112,792	123,008	
98,432	106,470 ^{*)}	115,388	129,791	143,189	156,168	
73,150	75,414 ^{*)}	80,397	89,682	98,288	106,667	
72,557	76,953 ^{*)}	81,810	90,728	99,939	107,894	
	43,345 ⁵⁾	43,961 ⁴⁾				
	64,094 ⁵⁾	65,733 ⁴⁾				
20,859	20,845	20,833	20,819	20,810	20,804	
		20,797 ⁴⁾				
34,850	35,981	37,237	39,450	41,349	43,050	
29,135	29,149	29,165	29,240	29,362	29,540	
28,760	28,948	28,868	29,020	29,203	29,265	
29,133	29,136	29,144	29,180	29,270	29,400	
29,230	29,291	29,404	29,725	30,128	30,595	
30,030	29,944	29,873	29,865	29,998	30,235	
36,120	36,827	37,706	39,430	41,127	42,775	
33,430	33,499	33,607	33,900	34,273	34,735	
29,123	29,128	29,149	29,233	29,377	29,580	

$$N_1 = 1 - \frac{p}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T \quad (\text{zie figuur B 7a})$$

$$N_2 = 1 + \frac{T}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \quad (\text{zie figuur B 7b})$$

Substitutie van N_1 en N_2 geeft:

$$c_v = c_p - z \cdot R_a \frac{N_2^2}{N_1}$$

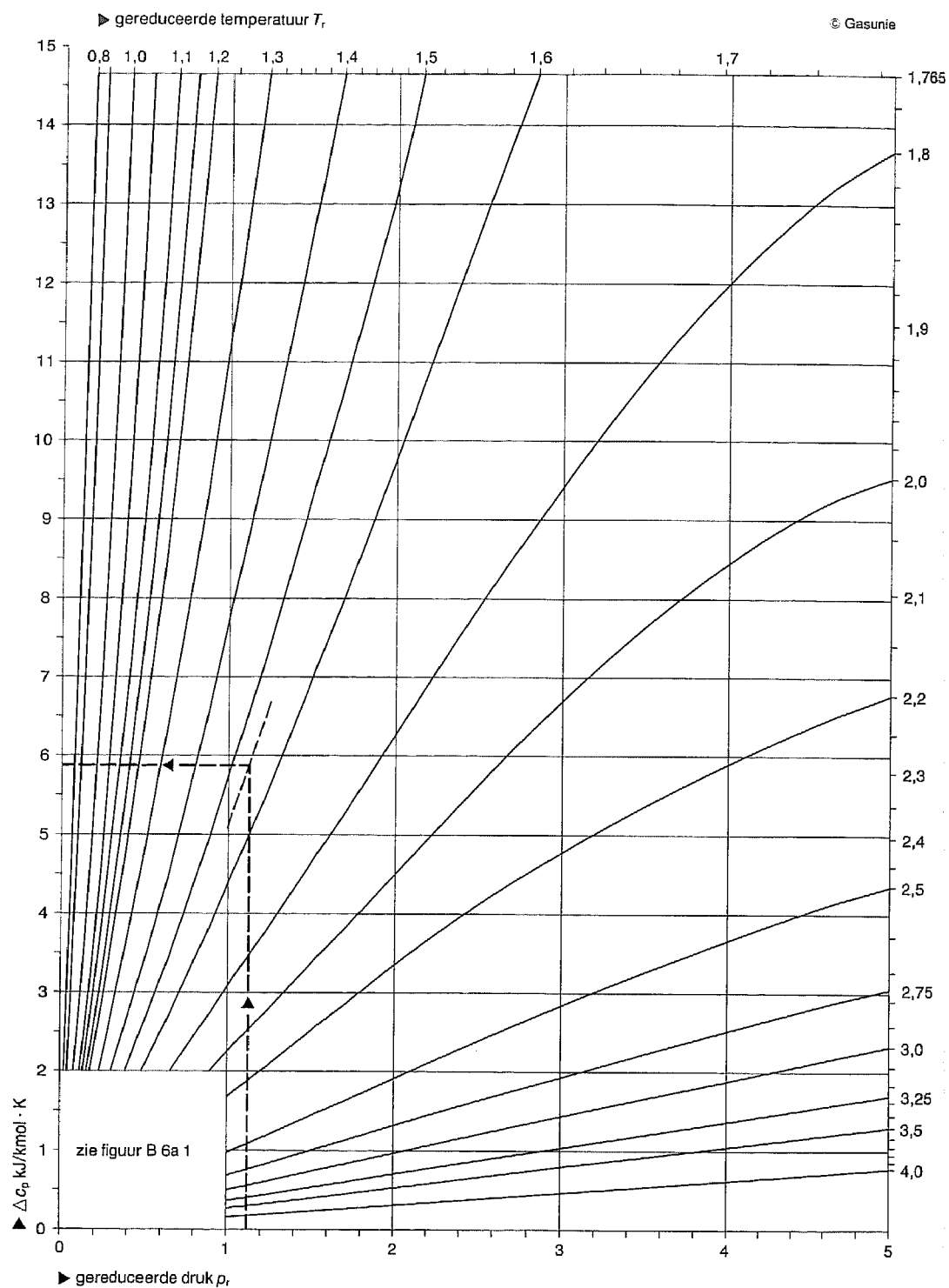
Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

$$T = 15^\circ\text{C} \quad (288,15 \text{ K})$$

$$p = 5000 \text{ kPa} \quad (50 \text{ bar})$$

$$M = 18,637 \text{ kg/kmol}$$

$$z = 0,9122 \quad (\text{zie lit (8)})$$



$$\left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p = 0,001215 \text{ K}^{-1} \quad (\text{zie lit (8)})$$

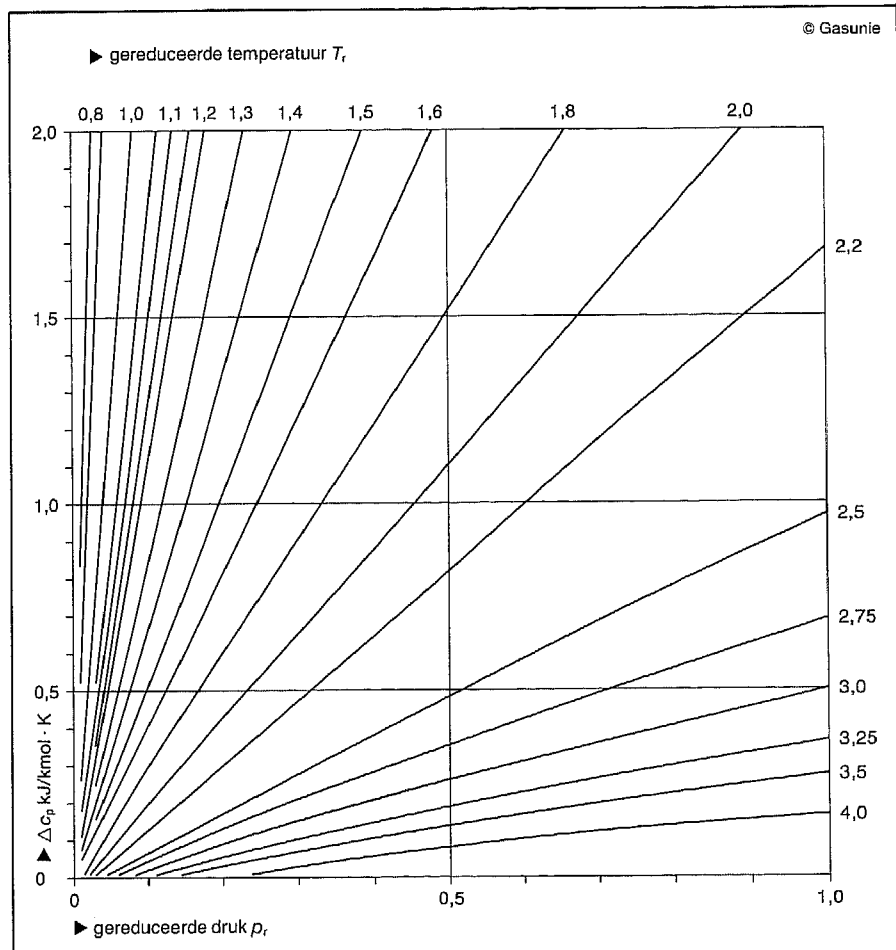
$$\left(\frac{\partial z}{\partial p}\right)_T = -0,001615 \text{ bar}^{-1} \quad (\text{zie lit (8)})$$

$$N_1 = 1,0885 \text{ (berekend)}$$

$$N_2 = 1,3838 \text{ (berekend)}$$

◁ *Figuur B 6a. Δc_p als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r ($0 \leq p_r \leq 5$)*

▽ *Figuur B 6a 1. Δc_p als functie van de gereduceerde druk p_r en de gereduceerde temperatuur T_r ($0 \leq p_r \leq 1,0$)*



Tabel B 6b: c_p° van Gronings aardgas

component	chemische formule	n_i *) mol %	$c_{p,i}^\circ$ **) kJ/kmol · K
methaan	CH ₄	81,29	35,370
ethaan	C ₂ H ₆	2,87	51,325
propaan	C ₃ H ₈	0,38	71,650
butaan	C ₄ H ₁₀	0,15	95,970
pentaan	C ₅ H ₁₂	0,04	116,925
hexaan	C ₆ H ₁₄	0,05	138,750
stikstof	N ₂	14,32	29,139
zuurstof	O ₂	0,01	29,348
kooldioxyde	CO ₂	0,89	36,680
		100	35,260

$c_p^\circ = 35,260 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ (zie tabel B 6b)

$T_r = 1,54$ (zie tabel B 1a)

$p_r = 1,12$ (zie tabel B 1a)

$\Delta c_p = 5,885 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ (zie figuur B 6a)

Hieruit volgt:

$$c_p = c_p^\circ + \Delta c_p = 41,145 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} = 2,208 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Voor c_v kan dan worden berekend:

$$c_v = 41,145 - 13,342 = 27,803 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} = 1,492 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Lit (1) National Bureau of Standards / Selected values of properties of hydrocarbons and related compounds, Circular C 461 (API Research Project 44), October 31, 1976

Lit (2) Tables of thermodynamic and transport properties, 1960

Lit (3) W.C. Edmister / Applied hydrocarbon thermodynamics, vol 1, 1961

Lit (4) Handbook of Chemistry and Physics, 56th edition, 1975–1976

Lit (5) API / Technical Data Book – Petroleum refining, 1966

Lit (6) R. Kronig/Leerboek der Natuurkunde, 1966

Lit (7) W. C. Edmister/Applied hydrocarbon thermodynamics, vol 1, 1961

Lit (8) T. M. Geerssen/De soortelijke warmte en de constante van Poisson van Gronings aardgas, N.V. Nederlandse Gasunie

*) zie tabel A 9

**) zie tabel B 6a (door interpolatie verkregen)

B 7 CONSTATE VAN POISSON**B 7a Ideale gassen**

De constante van Poisson κ voor ideale gassen is de verhouding van de soortelijke warmte bij constante druk c_p en de soortelijke warmte bij constant volume c_v :

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

κ is dimensieloos.

B 7b Niet-ideale gassen

Voor niet-ideale gassen moet rekening worden gehouden met het doel waarvoor de formule van Poisson wordt gebruikt.

B 7b 1 Volumeverandering met de druk

Volgens Poisson geldt voor een adiabatische toestandsverandering:

$$p \cdot V^\kappa = \text{constant}$$

Hieruit kan worden afgeleid (zie onder andere lit (1) en (2)):

$$k = \frac{-V}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_S$$

of (zie lit (3)):

$$k = \frac{z}{\left[z - p \left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T \right] - \frac{R_a}{c_p} \left[z + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]^2}$$

Na herleiding:

$$k = \frac{1}{\left[1 - \frac{p}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T \right] - \frac{R_a \cdot z}{c_p} \left[1 + \frac{T}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]^2} = \frac{1}{N_1 - N_3}$$

(zie figuur B 7a, B 7b en B 7c)

waarin:

z = compressibiliteitsfactor bij p en T

p = absolute druk kPa

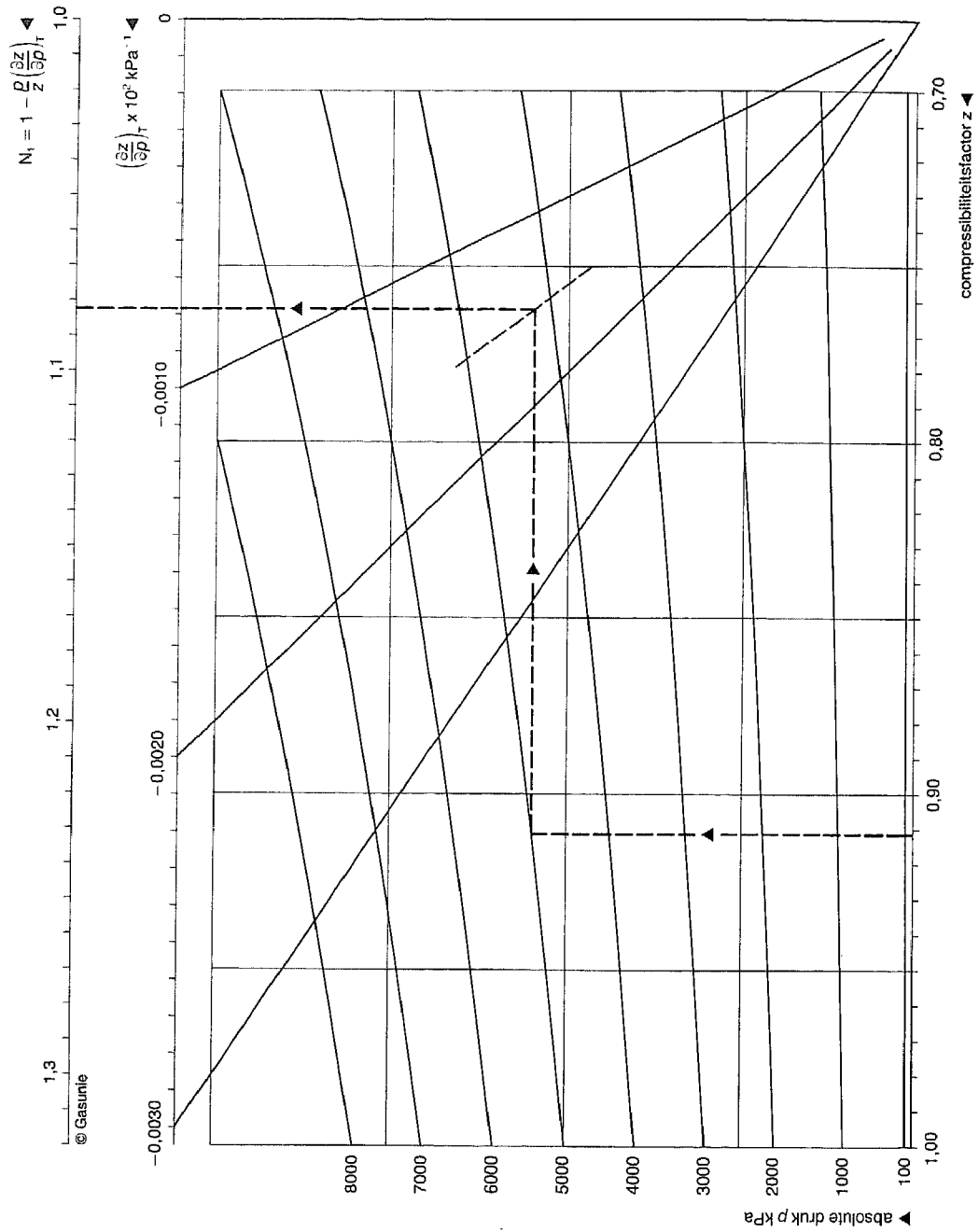
T = absolute temperatuur K

R_a = gasconstante (zie A 1e) kJ/kmol · K

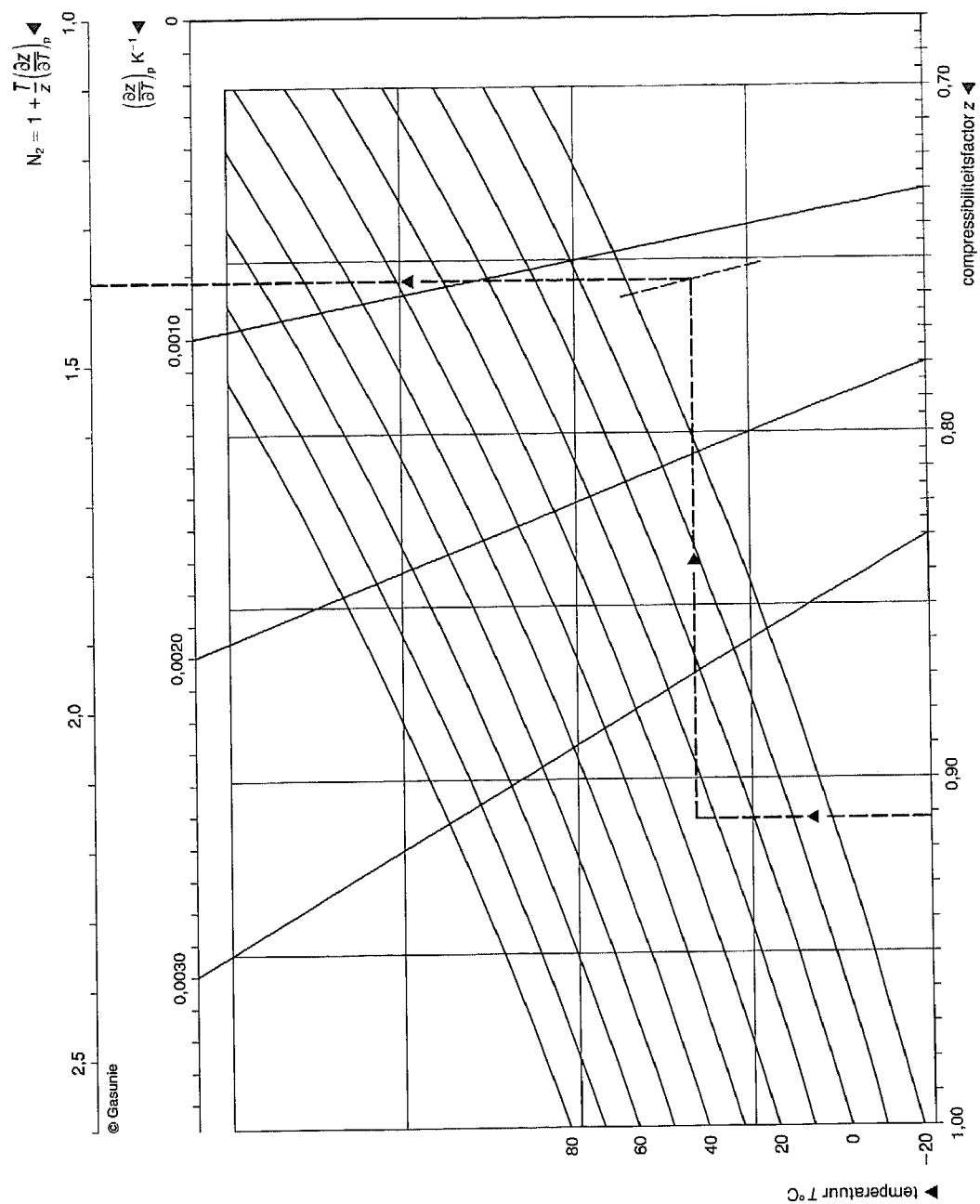
c_p = soortelijke warmte bij constante druk kJ/kmol · K

$\left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T$ = verandering compressibiliteit met de druk bij temperatuur T kPa⁻¹

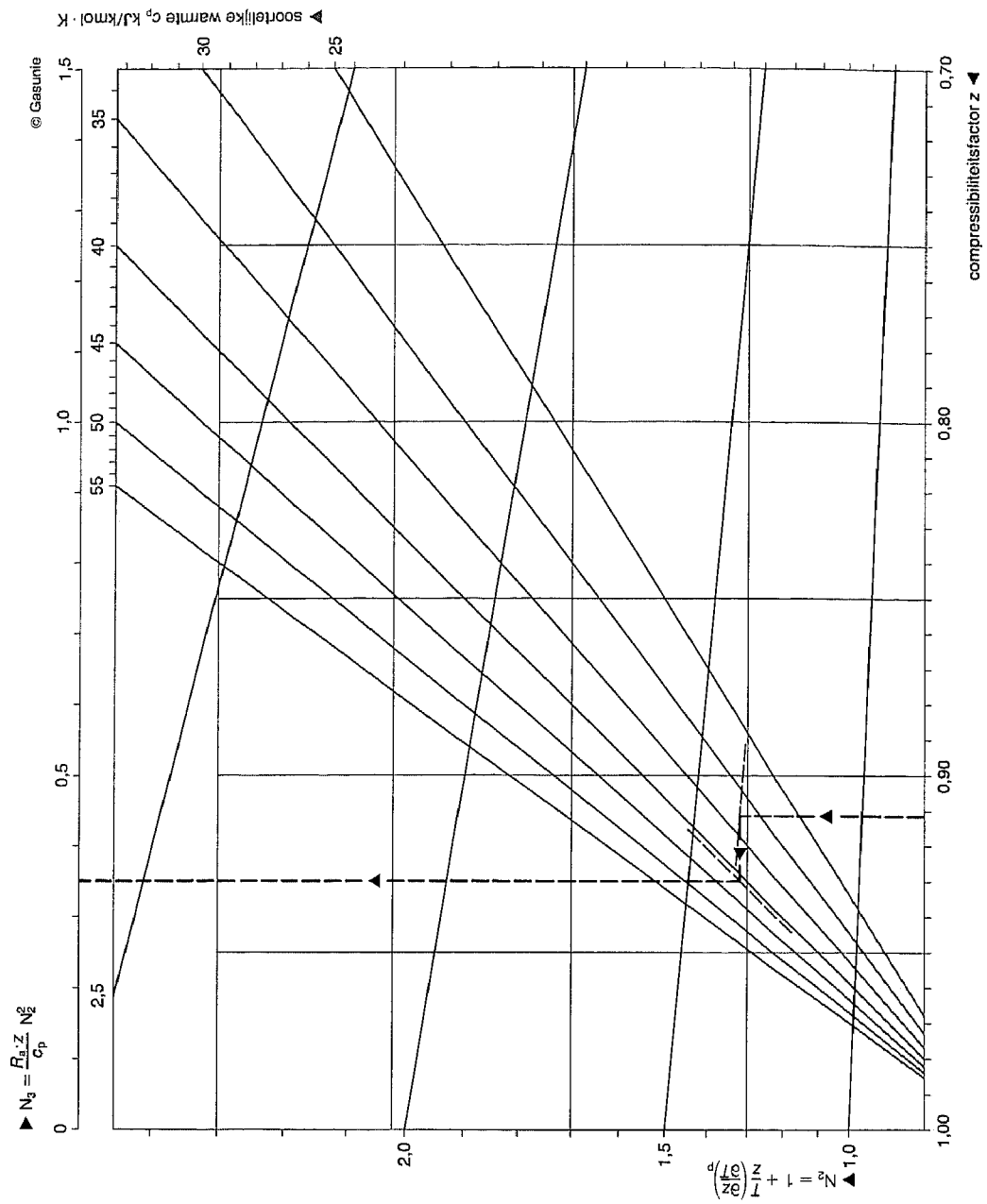
$\left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p$ = verandering compressibiliteit met de temperatuur bij druk p K⁻¹.



Figuur B 7a. De grootte N_1 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de absolute druk p en de afgeleide $(\partial z / \partial p)_T$



Figuur B 7b. De grootheid N_2 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de temperatuur T en de afgeleide $(\partial z / \partial T)_p$



Figuur B 7c. De grootheid N_3 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de soortelijke warmte bij constante druk c_p en de grootheid N_2

B 7b 2 *Temperatuurverandering met de druk*

Volgens Poisson geldt voor een adiabatische toestandsverandering:

$$T \cdot p^{\frac{1-k'}{k'}} = \text{constant}$$

Hieruit kan worden afgeleid (zie onder andere lit (1) en (2)):

$$\frac{k'-1}{k'} = \frac{p}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s$$

of

$$k' = \frac{1}{1 - \frac{R_a}{c_p} \left[z + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]} = \frac{1}{1 - \frac{R_a \cdot z}{c_p} \left[1 + \frac{T}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]} = \frac{N_2}{N_2 - N_3}$$

(zie figuur B 7b en B 7c)

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

absolute druk $p = 5000 \text{ kPa}$

temperatuur $T = 15^\circ\text{C}$

$z = 0,9117$ (zie B 2a 1)

$$\left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T = -0,00164 \cdot 10^{-2} \text{ kPa}^{-1} \text{ (zie onder andere B 2a 1)}$$

$$\left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p = 0,00120 \text{ K}^{-1} \text{ (zie onder andere B 2a 1)}$$

$$c_p = 41,145 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \text{ (zie B 6)}$$

Oplossing:

$$N_1 = 1,0897 \quad \text{(zie figuur B 7a)} \quad \left[N_1 = 1 - \frac{p}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial p} \right)_T \right]$$

$$N_2 = 1,378 \quad \text{(zie figuur B 7b)} \quad \left[N_2 = 1 + \frac{T}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]$$

$$N_3 = 0,350 \quad \text{(zie figuur B 7c)} \quad \left[N_3 = \frac{R_a \cdot z}{c_p} N_2^2 \right]$$

$$k = \frac{1}{(N_1 - N_3)} = 1,352 \text{ (berekend } 1,360 - \text{zie lit (3))}$$

$$\text{De afwijking bedraagt } \frac{1,360 - 1,352}{1,352} \times 100 \% = 0,59 \%$$

De grafische methode zal in de meeste gevallen voldoende nauwkeurig zijn.

Voor k' kan worden berekend (zie B 7b 2):

$$k' = \frac{N_2}{N_2 - N_3} = 1,340$$

Voor κ kan worden berekend (zie B 7a):

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{41,145}{27,803} = 1,480$$

B 7b 3 Geluidssnelheid

Onder de geluidssnelheid (kritische snelheid) w wordt die snelheid verstaan, waarmee een drukverandering zich voortplant in een medium (zie lit (4)).

In een samendrukbaar medium wordt de geluidssnelheid voorgesteld door:

$$w = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}$$

Voor een niet-ideaal gas kan hieruit worden afgeleid (zie lit (5)):

$$w = \sqrt{k \cdot z \cdot R_a \frac{T}{M}} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}$$

waarin:

w	= geluidssnelheid bij p en T	m/s
k	= constante van Poisson (zie B 7b 1)	—
z	= compressibiliteitsfactor bij p en T	—
R_a	= absolute (molaire)gasconstante (zie A1 e)	J/(mol · K)
T	= absolute temperatuur	K
M	= molaire massa	kg/mol
p	= absolute druk	Pa
ρ	= volumieke massa bij p en T	kg/m ³ .

R. L. Andsager en R. M. Knapp (lit (6)) hebben de resultaten van bovenstaande formule vergeleken met 42 series aan meetgegevens. Hieruit is gebleken dat de berekende geluidssnelheid steeds $\sqrt{z}$ maal de gemeten geluidssnelheid bedroeg. Door z uit bovenstaande formule te schrappen, komen gemeten en berekende waarde goed overeen. De formule luidt dan (zie figuur B 7d):

$$w = \sqrt{\frac{k \cdot R_a \cdot T}{M}} = \sqrt{\frac{k \cdot p}{\rho}}$$

Lit (1) W. C. Edmister / Applied hydrocarbon thermodynamics, vol 1, 1961

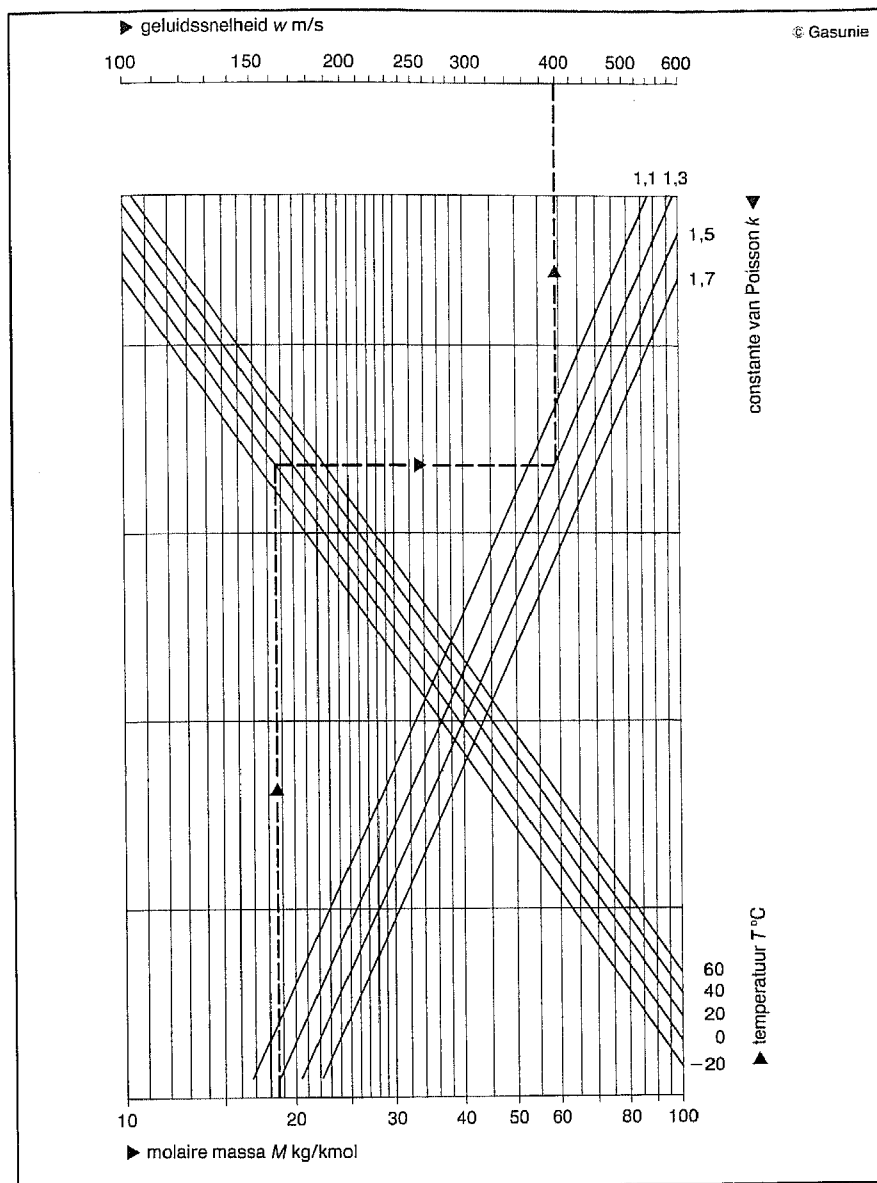
Lit (2) R. Kronig / Leerboek der natuurkunde, 1966

Lit (3) T.M. Geerssen / De soortelijke warmte en de constante van Poisson van Gronings aardgas, N.V. Nederlandse Gasunie

Lit (4) A. Antonelli / Geluidssnelheid in gassen, PT 1972

Lit (5) L. K. Thomas, R. W. Hankinson, K. A. Phillips / Determination of acoustic velocities for natural gas, Journal of Petroleum Technology, July 1970

Lit (6) R. L. Andsager, R. M. Knapp / Acoustic measurement of distance in natural gas systems, Society of Petroleum Engineers of AIME, paper SPE 1640, 1966



Figuur B 7d. Geluidssnelheid w als functie van de molaire massa M , de temperatuur T en de constante van Poisson k

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)
 $T = 0$ °C (273,15 K)
 $M = 18,637$ kg/kmol
 $k = 1,315$ (0 °C; 101,325 kPa)
 $w = 400$ m/s

B 8 H-S-DIAGRAM**B 8a Enthalpie**

Het enthalpieverschil ($H_2 - H_1$) van een gasmengsel wordt berekend met de algemeen geldende formule (zie onder andere lit (1) en (2)):

$$dH = c_p dT + \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp$$

Na integratie volgt hieruit voor het enthalpieverschil:

$$\Delta H = H_2 - H_1 = c_p (T_2 - T_1) - R_a \cdot T^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

waarin:

p_1, p_2	= absolute druk	kPa
T_1, T_2	= absolute temperatuur	K
H_1	= enthalpie bij T_1 en p_1	kJ/kmol
H_2	= enthalpie bij T_2 en p_2	kJ/kmol
R_a	= absolute gasconstante (zie A 1e)	kJ/kmol · K
T	= gemiddelde absolute temperatuur $\left(= \frac{T_1 + T_2}{2} \right)$	K
c_p	= gemiddelde soortelijke warmte bij T en $p \left(= \frac{p_2 + p_1}{2} \right)$	kJ/kmol · K
$\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p$	= gemiddelde verandering compressibiliteit met de temperatuur bij de gemiddelde druk $p \left(= \frac{p_2 + p_1}{2} \right)$	K ⁻¹ .

Grafische oplossing:

$$\Delta H = c_p (T_2 - T_1) - R_a \cdot T^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

of:

$$\Delta H = c_p (T_2 - T_1) - N_4$$

Voor $c_p (T_2 - T_1)$ zie figuur B 8c

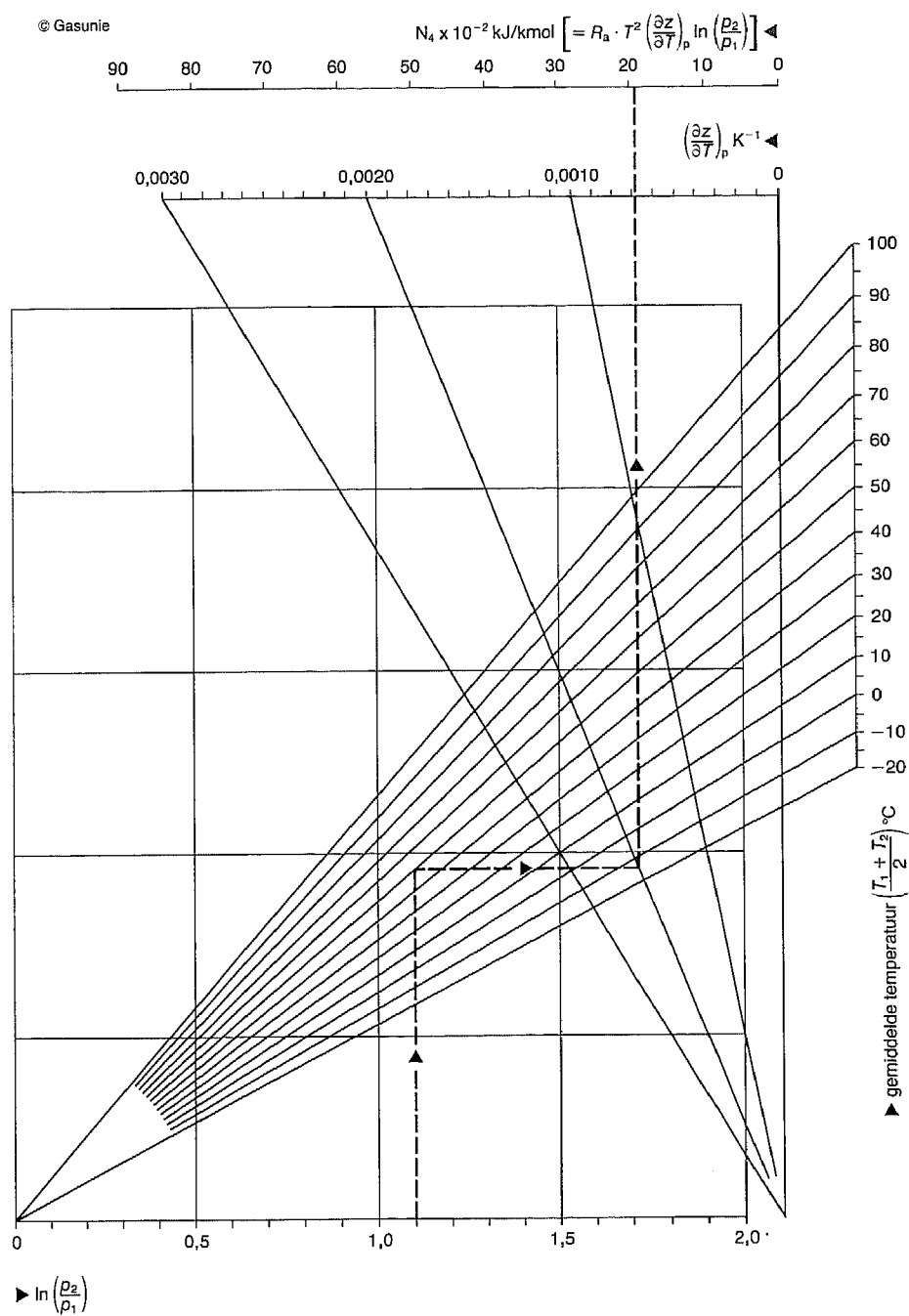
Voor $N_4 = R_a \cdot T^2 \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$ zie figuur B 8a

B 8b Entropie

Het entropieverschil ($S_2 - S_1$) van een gasmengsel wordt berekend met de algemeen geldende formule (zie onder andere lit (1) en (3)):

$$dS = c_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dp$$

▷ Figuur B 8a. De grootheid N_4 als functie van de temperatuur T , de absolute druk p en de afgeleide $\left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p$



Na integratie volgt hieruit voor het entropieverschil:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R_a \left[z + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right] \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

waarin:

S_1 = entropie bij T_1 en p_1 kJ/kmol · K

S_2 = entropie bij T_2 en p_2 kJ/kmol · K

z = gemiddelde compressibiliteit.

(Zie verder B 8a)

Grafische oplossing:

$$\Delta S = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R_a \left[z + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right] \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

of:

$$\Delta S = c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - N_5$$

Voor $c_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$ zie figuur B 8c

Voor $N_5 = R_a \left[z + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right] \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$ zie figuur B 8b

B 8c H-S-diagram

Het H-S-diagram wordt samengesteld door $\Sigma \Delta H$ uit te zetten tegen $\Sigma \Delta S$. Het nulpunt van zowel enthalpie als entropie wordt vastgelegd bij 0 °C en 101,325 kPa. Het diagram wordt dus stap voor stap opgebouwd.

De waarden voor $(p_2 - p_1)$ en $(T_2 - T_1)$ mogen niet te groot worden genomen; voor c_p , z en $(\partial z / \partial T)_p$ moet het gemiddelde worden genomen van de betreffende waarden behorende bij (T_1, p_1) en (T_2, p_2) .

B 8d Isentropische expansie ($S = \text{constant}$)

Isentropische expansie wordt voorgesteld door (zie lit (1) en (3)):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

Na herleiding:

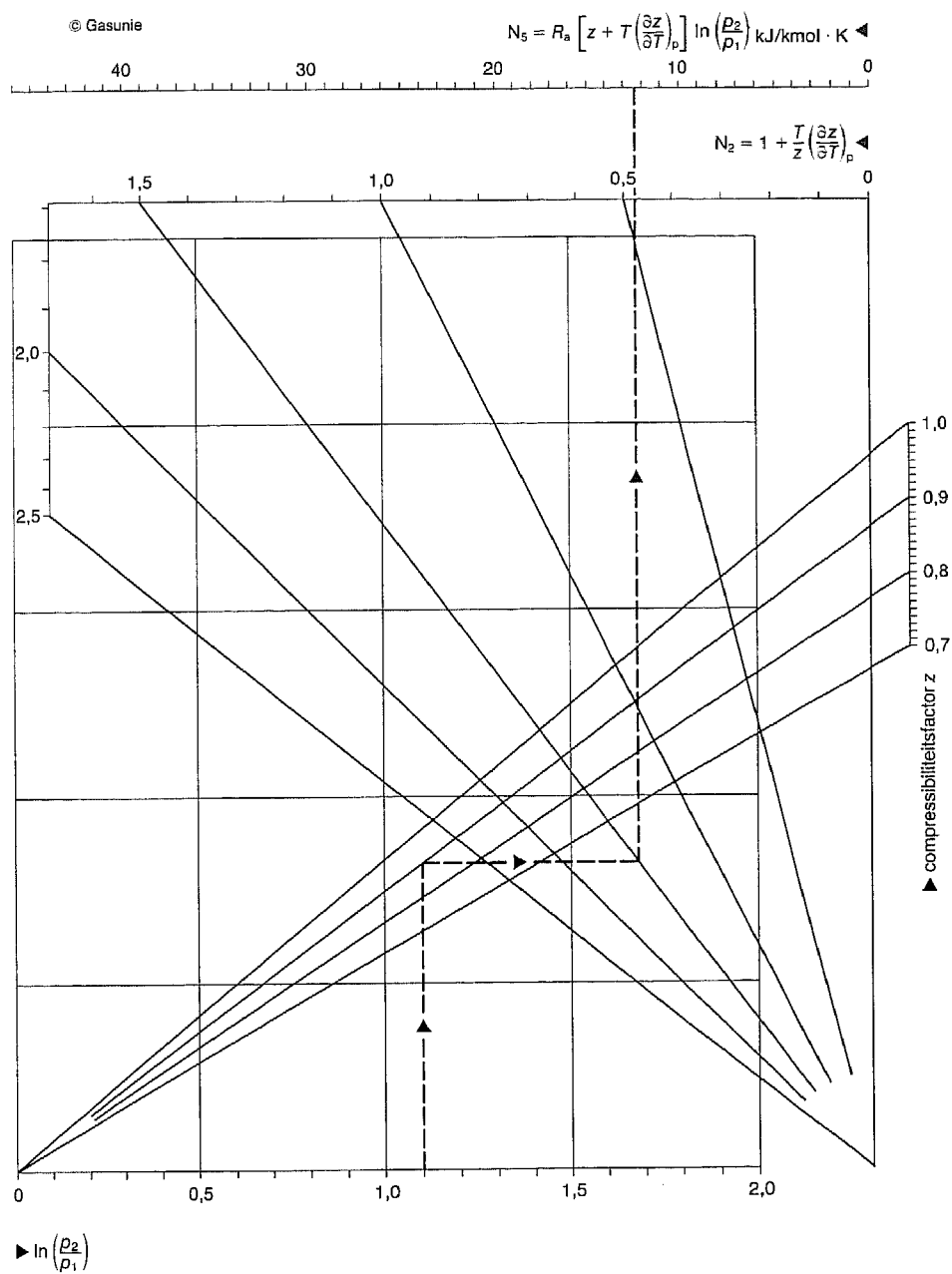
$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = \frac{R_a \cdot T}{p \cdot c_p} \left[z + T \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \right]$$

of: (zie B 7b 2)

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = \frac{k' - 1}{k'} \frac{T}{p}$$

waarin:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_S = \text{temperatuurverandering met de druk bij constante entropie} \quad \text{K/kPa}$$



Figuur B 8b. De grootheid N_5 als functie van de compressibiliteitsfactor z , de temperatuur T , de absolute druk p en de afgeleide $\left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p$

k'	= constante van Poisson (zie B 7b 2)	
T	= absolute temperatuur	K
p	= absolute druk	kPa.

Deze bewerking kan eenvoudig in een H - S -diagram worden uitgevoerd.

Grafische oplossing:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \frac{z \cdot R_a \cdot T}{p \cdot c_p} \left[1 + \frac{T}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p \right]$$

of:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \frac{T}{p} \frac{N_3}{N_2}$$

$$\text{Voor } N_2 = 1 + \frac{T}{z} \left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p \text{ zie figuur B 7b}$$

$$\text{Voor } N_3 = \frac{R_a \cdot z \cdot N_2^2}{c_p} \text{ zie figuur B 7c}$$

B 8e Isenthalpische expansie ($H = \text{constant}$; smoring)
Isenthalpische expansie – Joule-Kelvin-effect – wordt voorgesteld door (zie lit (1) en (2)):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - \frac{V}{c_p}$$

Na herleiding:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{R_a \cdot T^2}{p \cdot c_p} \left(\frac{\partial z}{\partial T}\right)_p$$

of (zie B 8d):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{T}{p} \frac{k' - 1}{k'} - \frac{z \cdot R_a \cdot T}{p \cdot c_p}$$

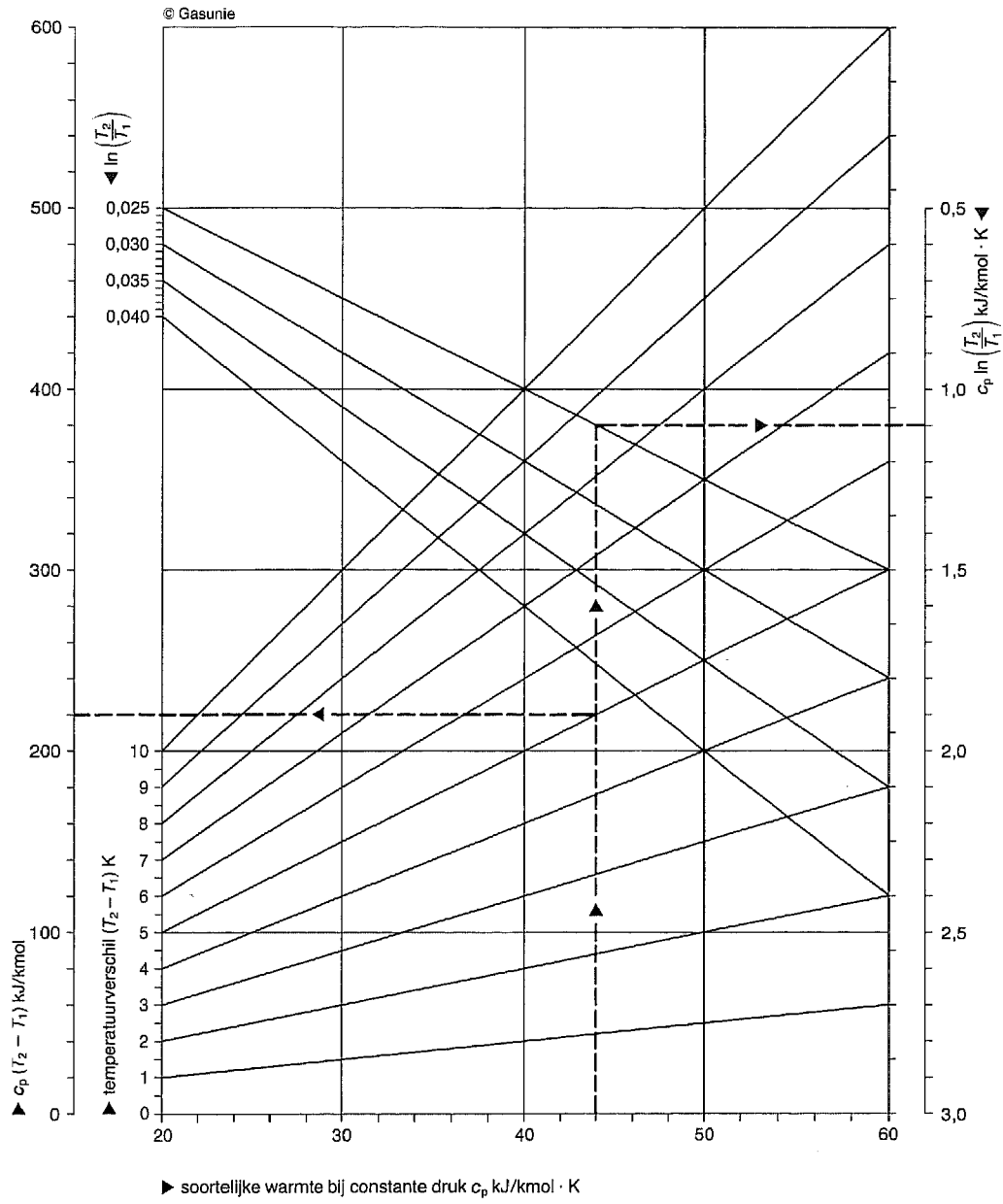
waarin:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \text{temperatuurverandering met de druk bij constante enthalpie} \quad \text{K/kPa}$$

$$\frac{T}{p} \frac{k' - 1}{k'} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s \quad (\text{zie B 8d})$$

$$\frac{z \cdot R_a \cdot T}{p} = \frac{1}{\varrho} \quad (\text{zie figuur B 4; } \varrho = \text{volumieke massa})$$

c_p = soortelijke warmte bij constante druk (zie B 6a).



Figuur B 8c. Hulpgrafiek voor de bepaling van $c_p (T_2 - T_1)$ en $c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$

Deze bewerking kan eenvoudig in een H - S -diagram worden uitgevoerd.

B 8f Enthalpie, druk, temperatuur

De invloed van druk en temperatuur op de enthalpie wordt voorgesteld door:

$$H_2 - H_1 = c_p (T_2 - T_1) - R_a \cdot T^2 \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \quad (\text{zie B 8a})$$

B 8f 1 Isotherme verandering ($T = \text{constant}$)

Bij constante temperatuur ($T_2 = T_1$) wordt de enthalpieverandering met de druk voorgesteld door:

$$H_2 - H_1 = -R_a \cdot T^2 \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Grafische oplossing:

voor $H_2 - H_1 = -N_4$ kJ/kmol zie figuur B 8a

$$N_4 = R_a \cdot T^2 \left(\frac{\partial z}{\partial T} \right)_p \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

B 8f 2 Isobare verandering ($p = \text{constant}$)

Bij constante druk ($p_2 = p_1$) wordt de enthalpieverandering met de temperatuur voorgesteld door:

$$H_2 - H_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

Grafische oplossing:

voor $H_2 - H_1 = c_p (T_2 - T_1)$ kJ/kmol zie figuur B 8c

B 8f 3 Isentrope compressie ($S = \text{constant}$)

Het benodigde vermogen voor het comprimeren van gasen kan worden berekend volgens:

$$P = \frac{q_0 \cdot Q_0 \cdot z_i \cdot R_a \cdot T_i \cdot k}{\eta_{ad} \cdot 3600 \cdot M (k-1)} \left[\frac{k-1}{C_r^k} - 1 \right]$$

waarin:

P	= aan compressor toegevoerd vermogen	W
q_0	= volumieke massa (zie B 4) van het gas (0 °C; 101,325 kPa)	kg/m ³
η_{ad}	= adiabatisch rendement	—
Q_0	= gashoeveelheid (0 °C; 101,325 kPa)	m ³ /h
R_a	= absolute (molaire) gaskonstante (zie A 1e)	J/mol · K
M	= molaire massa (zie tabel A 11)	kg/mol
z_i	= compressibiliteitsfactor bij inlaatcondities p_i en T_i (zie B 2)	—
k	= constante van Poisson (zie B 7b 1) — gemiddelde waarde over in- en uitlaatcondities	—
C_r	= compressieverhouding (= p_u/p_i)	—

u = uitlaat compressor

i = inlaat compressor.

De temperatuurstijging als gevolg van de isentrope compressie wordt voorgesteld door:

$$\Delta T_{is} = T_i \left[C_r^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Onder de aanname, dat het 'niet rendabele' deel van de aan de compressor toegevoerde energie in warmte wordt omgezet en deze warmtehoeveelheid geheel door het gas wordt opgenomen, kan worden afgeleid dat:

$$\Delta T_{extra} = \frac{1 - \eta_{ad}}{\eta_{ad}} \frac{Z_i \cdot R_a \cdot T_i}{c_p \cdot M} \cdot \frac{k}{(k-1)} \left[C_r^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

waarin:

c_p = soortelijke warmte bij constante druk (zie B 6a)

J/kg · K.

De totale temperatuurstijging bedraagt dus:

$$\Delta T_{tot} = \Delta T_{is} + \Delta T_{extra} = T_i \left[C_r^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \left[1 + \frac{1 - \eta_{ad}}{\eta_{ad}} \frac{Z_i \cdot R_a \cdot k}{c_p \cdot M (k-1)} \right]$$

waarin:

ΔT_{tot} = totale temperatuurstijging als gevolg van de compressie

°C.

De afleiding van bovenstaande formules wordt gegeven in lit (4).

Lit (1) W. C. Edmister / Applied hydrocarbon thermodynamics, vol 1, 1961

Lit (2) Katz e. a. / Handbook of natural gas engineering, 1959

Lit (3) Kronig / Leerboek der natuurkunde, 1966

Lit (4) L. Oranje / Gastemperaturen en transportcapaciteit, N.V. Nederlandse Gasunie

B 9 KENGROOTHEID VAN REYNOLDS

De kengrootheid van Reynolds Re is een dimensieloze grootheid, die de aard van de stroming in een leiding weergeeft:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Re = kengrootheid van Reynolds (zie figuur B 9)

$$v = \text{stromingssnelheid} \left(= \frac{Q_{p,t}}{3600 \frac{\pi}{4} d^2} \right) \quad \text{m/s}$$

$$Q_{p,t} = \text{doorstromende hoeveelheid bij } p \text{ en } T \quad \text{m}^3/\text{h}$$

$$d = \text{inwendige leidingdiameter} \quad \text{m}$$

$$\nu = \text{kinematische viscositeit (zie B 5b)} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

Voorbeeld:

$$Q_{p,t} = 4000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$d = 1000 \text{ mm}$$

$$\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Uit figuur B 9 volgt:

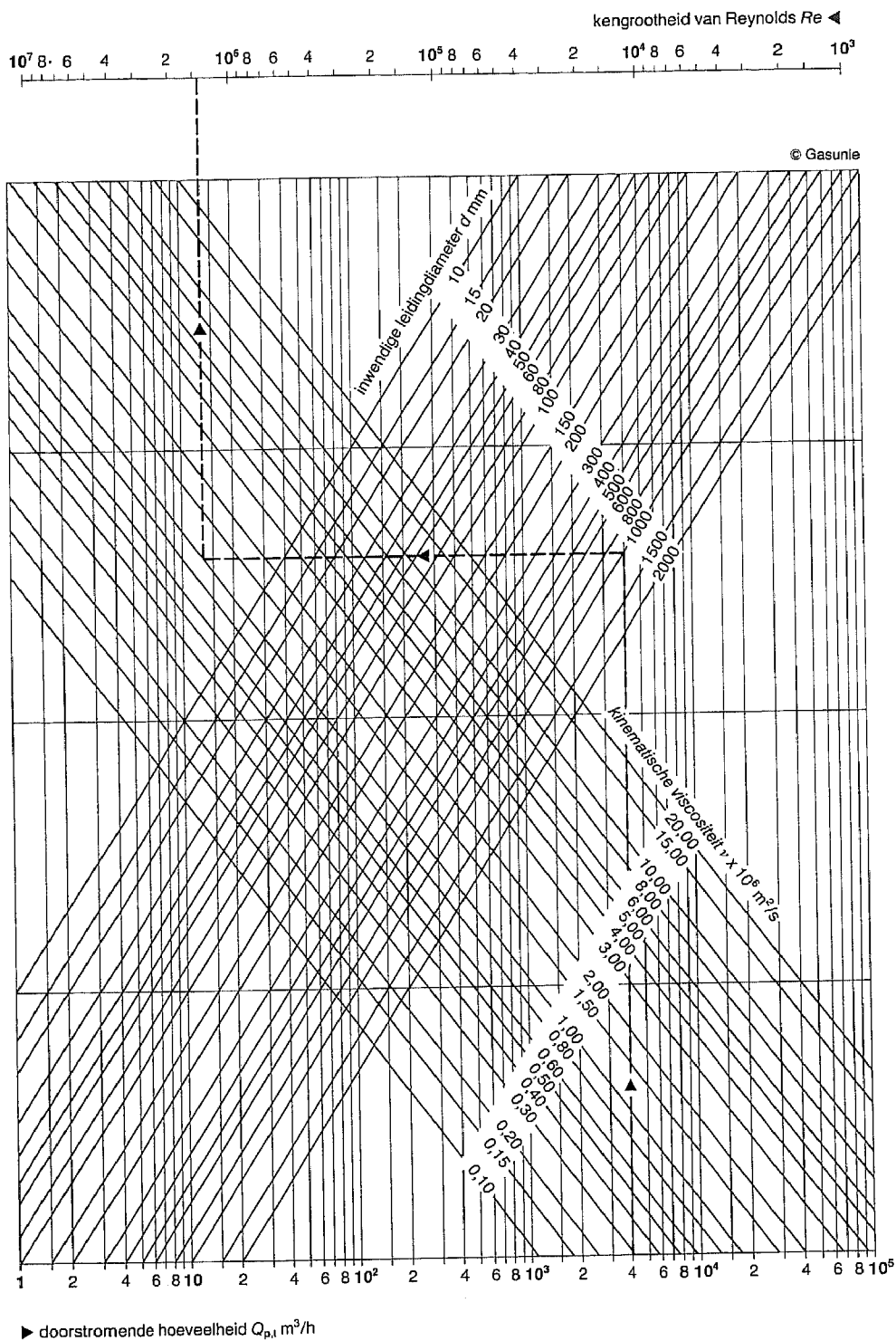
$$Re = 1,4 \cdot 10^6$$

Dit betekent, dat de aard der stroming in deze leiding 'turbulent' is.

In tegenstelling tot 'turbulente' stroming staat 'laminaire' stroming. Een duidelijke overgang van het laminaire naar het turbulente stromingsgebied is nauwelijks vast te stellen. In de literatuur worden de volgende waarden gegeven:

$Re < 2000$	stroming laminair
$2000 < Re < 40000$	overgangsgebied, waarin stroming zowel laminair als turbulent kan zijn
$Re > 40000$	stroming turbulent

▷ *Figuur B 9. De kengrootheid Re als functie van de gashoeveelheid $Q_{p,t}$, de leidingdiameter d en de kinematische viscositeit ν*



B 10 Drukverlies in leidingen en bochten**B 10a Drukverlies in leidingen**

Het drukverlies in een leiding wordt algemeen weergegeven door:

$$\frac{dp}{dl} = -\frac{\lambda'}{d} \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

waarin:

dp	= drukverlies over lengte dl	Pa/m
λ'	= wrijvingscoëfficiënt (dimensieloos)	
d	= inwendige leidingdiameter	m
ρ	= volumieke massa (zie B 4)	kg/m ³
v	= gemiddelde stromingssnelheid	m/s.

In Amerikaanse literatuur (bijvoorbeeld AGA Gas Flow Formulas) wordt λ' voorgesteld door f_D – de 'Darcy-Weisbach friction factor' – waarbij geldt:

$$f_D = 4 \cdot f$$

waarin:

f = 'Fanning friction factor'.

Na herleiding en integratie (zie figuur B 10b):

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \lambda' \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

of:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{\lambda' \cdot l \cdot z \cdot R_a \cdot T \cdot \rho_o^2 \cdot Q_o^2}{d \cdot M \cdot A^2}$$

waarin:

p_1	= absolute druk aan begin leidinglengte l	Pa
p_2	= absolute druk aan einde leidinglengte l	Pa
λ'	= wrijvingscoëfficiënt (dimensieloos)	
l	= leidinglengte	m
d	= inwendige leidingdiameter	m
z	= gemiddelde compressibiliteitsfactor over leidinglengte l	
R_a	= absolute (molaire) gasconstante (zie A 1e)	J/mol · K
M	= molaire massa	kg/mol
T	= gemiddelde temperatuur over leidinglengte l	K
A	= oppervlakte leidingdoorsnede (voor cilindrische buis $\frac{\pi \cdot d^2}{4}$)	m ²
ρ_o	= volumieke massa (101,325 kPa; 273,15 K)	kg/m ³
Q_o	= doorstromende hoeveelheid (101,325 kPa; 273,15 K)	m ³ /s.

De wrijvingscoëfficiënt λ' is afhankelijk van de kengrootte van Reynolds (Re). Hiervoor gelden de volgende regels:

1. laminaire stroming: volgens Hagen-Poiseuille

$$\lambda' = 64/Re \quad (Re < 2320)$$

2. turbulente stroming:

a) volgens Blasius:

$$\lambda' = 0,3164/\sqrt[4]{Re} \quad (3000 < Re < 100\,000)$$

b) volgens Von Hermann:

$$\lambda' = 0,00540 + 0,3964/Re^{0,3} \quad (2 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^6)$$

c) volgens Prandtl en Von Karmann:

$$1/\sqrt{\lambda'} = -0,8 + 2 \log (Re \sqrt{\lambda'}) \quad (Re > 10^6)$$

In formule c wordt λ' 'impliciet' gegeven; een oplossing is alleen door 'trial and error' te vinden. R. Techo (zie lit (1)) geeft een eenvoudiger formule met overeenkomstige resultaten:

$$\lambda' = \left[0,8685 \ln \left(\frac{Re}{1,964 \ln Re - 3,8215} \right) \right]^{-2} \quad (10^4 < Re < 2,5 \cdot 10^8)$$

Bovenstaande regels gelden alleen voor 'technisch gladde pijpen'.

De overgang van laminaire naar turbulente stroming geschiedt normaal bij $Re \approx 2000$. Deze waarde noemt men het kritische Reynoldsgetal (Re_k). Deze waarde moet echter niet al te strak worden gehanteerd.

Voor 'technisch ruwe pijpen' is de weerstand over een groot Reynolds-gebied niet alleen afhankelijk van de kengrootheid van Reynolds, maar tevens van een bepaalde ruwheidsfactor; voor hoge Reynoldswaarden is de weerstand alleen nog maar afhankelijk van de ruwheidsfactor.

De 'relatieve' ruwheid wordt gedefinieerd als:

$$\varepsilon = \frac{K}{d}$$

waarin:

ε = relatieve ruwheid (dimensieloos)

K = gemiddelde hoogte van alle uitsteeksels in de leiding

mm

d = inwendige leidingdiameter

mm.

Voor een ruwe leiding geldt volgens Prandtl en Von Karmann:

$$1/\sqrt{\lambda'} = 2 \log \left(\frac{d}{K} \right) + 1,14 = 2 \log \left(3,715 \frac{d}{K} \right)$$

Voor de overgang van een 'gladde' leiding naar een 'ruwe' leiding geldt volgens Colebrook en White:

$$1/\sqrt{\lambda'} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda'}} + \frac{K}{3,71 \cdot d} \right)$$

Ook in deze formule wordt λ' 'impliciet' gegeven. R. Techo (zie lit (1)) geeft hiervoor:

$$\lambda' = \left[-0,8685 \ln \left(\frac{1,964 \ln Re - 3,8215}{Re} + \frac{K}{3,71 \cdot d} \right) \right]^{-2}$$

Tabel B 10a geeft enkele waarden voor de 'absolute' ruwheidsfactor K .

Figuur B 10a geeft de wrijvingscoëfficiënt λ' als functie van de kengrootte van

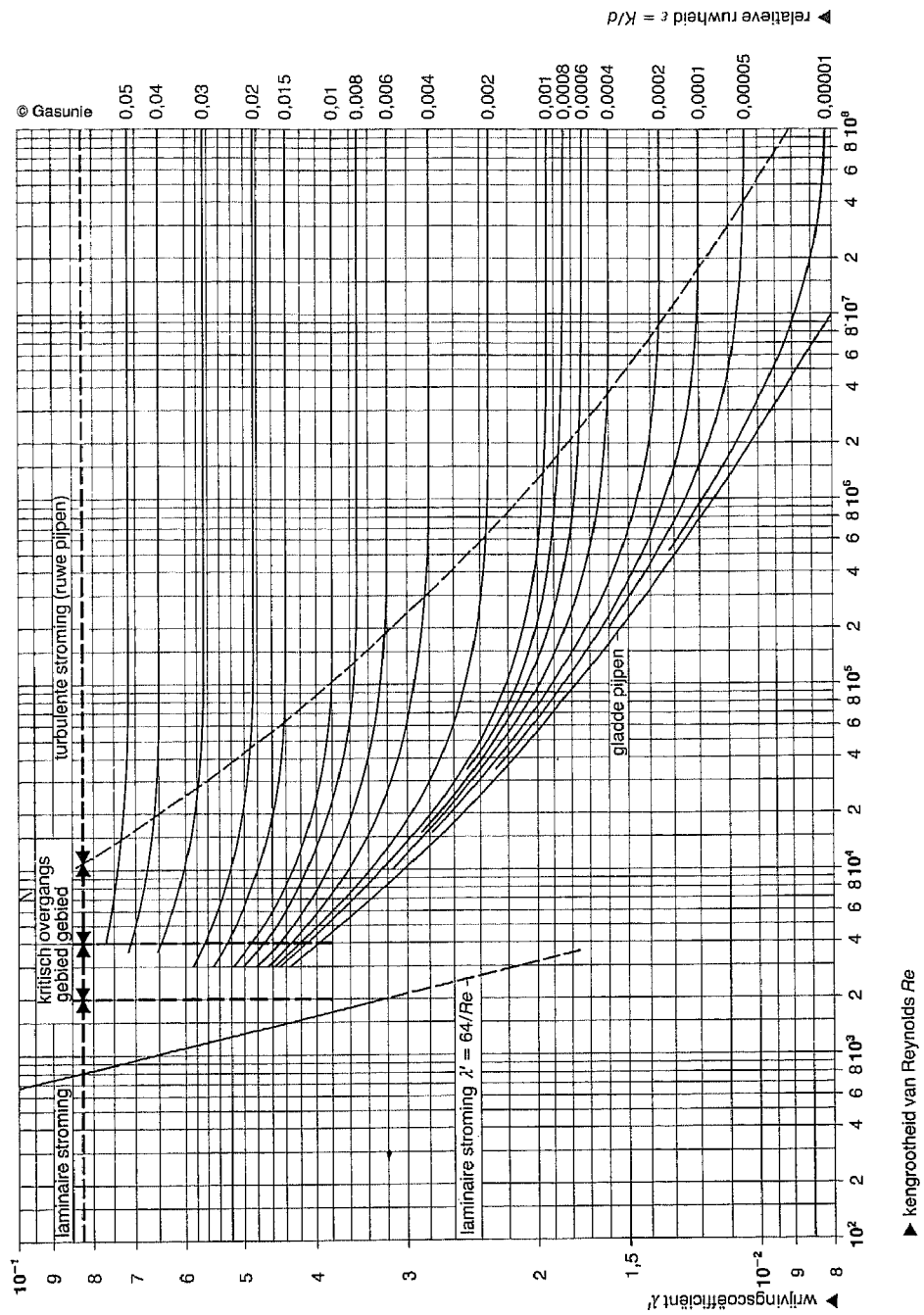
Reynolds Re en de 'relatieve' ruwheid $\varepsilon \left(= \frac{K}{d} \right)$ volgens Colebrook en White.

Figuur B 10b werd berekend volgens vergelijking:

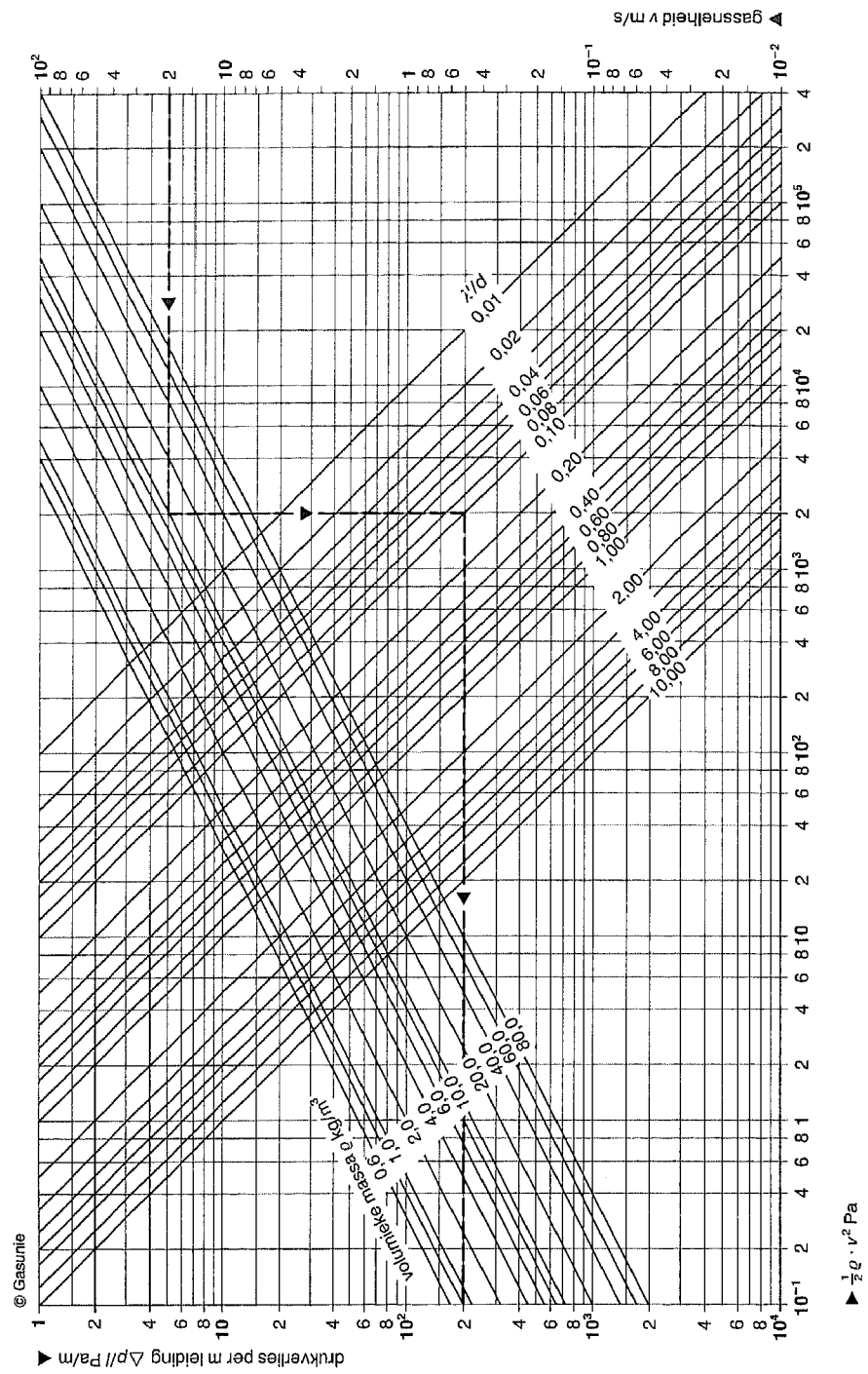
$$\Delta p = \lambda' \frac{l}{d} \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

Tabel B 10a: de 'absolute' ruwheidsfactor K

materiaalsoort	aard van het materiaal	K mm
glas-, lood-, koper- en messing-pijp		0 – 0,0015
getrokken stalen pijp	nieuw	0,04 (0,02 – 0,1)
	gebruikt (gereinigd)	0,15 – 0,20
	licht gecorrodeerd	tot 0,40
	sterk gecorrodeerd	tot 3,0
blik	glad	0,07
stalen pijp (verzinkt)	normaal gegalvaniseerd	0,15
gelaste stalen pijp	nieuw	0,05 – 0,1
	nieuw (gebitumineerd)	0,05
	gebruikt (gereinigd)	0,15 – 0,20
	gelijkmatig gecorrodeerd	tot 0,40
	lichte korstvorming	1 – 1,5
	sterke korstvorming	2 – 4
geklonken stalen pijp		0,9 (0,5 – 10)
gietijzeren pijp	nieuw	0,26 – 1
	nieuw (gebitumineerd)	0,10 – 0,15
	gecorrodeerd	1,0 – 1,5
	met korstvorming	1,5 – 4,0
betonnen pijp	gladgestreken	0,3 – 0,8
	ruw	1,2 – 3
asbest-cement pijp	eterniet	0,05 – 0,1
houtwerk	geschaafd	0,2
	ongeschaafd	0,7
metselwerk (bakstenen)	normaal gevoegd	1,3

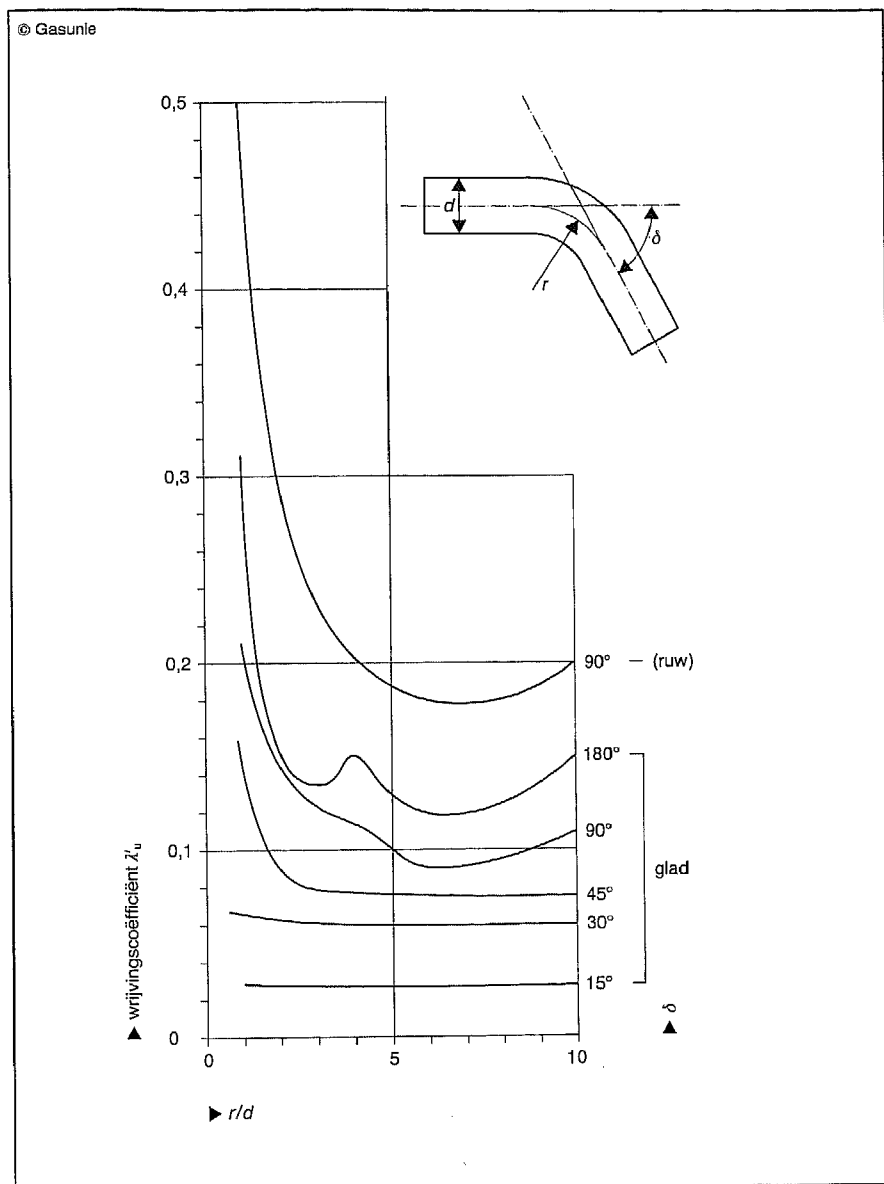


Figuur B 10a. De wrijvingscoëfficiënt λ' als functie van de kengroothed Re en de ruwheidsfactor $\varepsilon (= \frac{K}{d})$



◁ *Figuur B 10b. Het drukverlies per meter leidinglengte $\Delta p/l$ als functie van de verhouding λ'/d , de gassnelheid v en de volumieke massa ρ*

▽ *Figuur B 10c. De weerstandscoefficiënt λ'_u als functie van de verhouding r/d en de hoek δ*



B 10b Drukverlies in bochten

Voor bochten in leidingen ligt de waarde voor de wrijvingscoëfficiënt hoger dan voor de rechte gedeelten, als gevolg van wervelingen en eventueel loslaten van de wand. Noemen we de wrijvingscoëfficiënt voor een bocht λ'_b en betrekken we deze op de wrijvingscoëfficiënt van een rechte leiding, dan geldt volgens Hausen voor laminaire stroming:

$$\frac{\lambda'_b}{\lambda'} = 0,805 + 0,0448 \left(Re \sqrt{\frac{d}{D}} \right)^{0,6}$$

(D = kromtediameter van de bocht m).

Voor turbulente stroming geven Jeschke (metingen) en Hausen:

$$\frac{\lambda'_b}{\lambda'} = 1 + 3,74 \frac{d}{D}$$

Voor $Re < 10^5$ zijn de drukverliezen groter dan uit voornoemde vergelijking kan worden berekend:

voor $Re = 80\,000$ geldt dat $(\lambda'_b - \lambda')$ een factor 1,5 maal zo groot is

voor $Re = 40\,000$ is $(\lambda'_b - \lambda')$ circa 4 maal zo groot

voor $Re = 20\,000$ is $(\lambda'_b - \lambda')$ circa 7 maal zo groot.

De beide bovengenoemde vergelijkingen gelden niet voor leidingbochten met zeer kleine kromtestraal. Hoffmann en Wasielewski geven behalve de normale wrijvingsverliezen (zie B 10a) voor bochten in leidingen nog extra verliezen op voor wervelvorming en loslaten van de stroming een en ander volgens vergelijking:

$$\Delta p = \lambda'_u \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad \text{N/m}^2$$

Figuur B 10c geeft enkele waarden voor λ'_u als functie van de verhouding $\frac{r}{d}$ en de hoek δ , waaronder de kromming verloopt. Deze waarden gelden alleen voor $Re > 10^5$.

Opmerking: bovenstaande theorie werd geheel ontleend aan de VDI-Wärmeatlas, 1963.

Lit (1) R. Techo / Journal of Applied Mechanics, 1965

B 11 WATERGEHALTE VAN AARDGASSEN

De waterdampconcentratie – watergehalte of absolute vochtigheid – in een gasmengsel is in hoofdzaak een functie van de partiële waterdampdruk, die weer afhankelijk is van de mengseltemperatuur. Daarnaast wordt de waterdampconcentratie nog in zekere mate beïnvloed door:

1. het Poynting-effect: de invloed van de systeemdruk op de waterdampspanning
2. het oplosbaarheidseffect: de invloed van de intermoleculaire energiewisselwerking
3. de samenstelling: deze heeft echter nauwelijks invloed en wordt veelal verwaarloosd.

De onder punt 1 en 2 genoemde effecten zijn moeilijk in een eenvoudige formule onder te brengen (zie lit (1)).

Figuur B 11a geeft het watergehalte van verzadigde 'niet-zure' aardgassen (zie lit (2)).

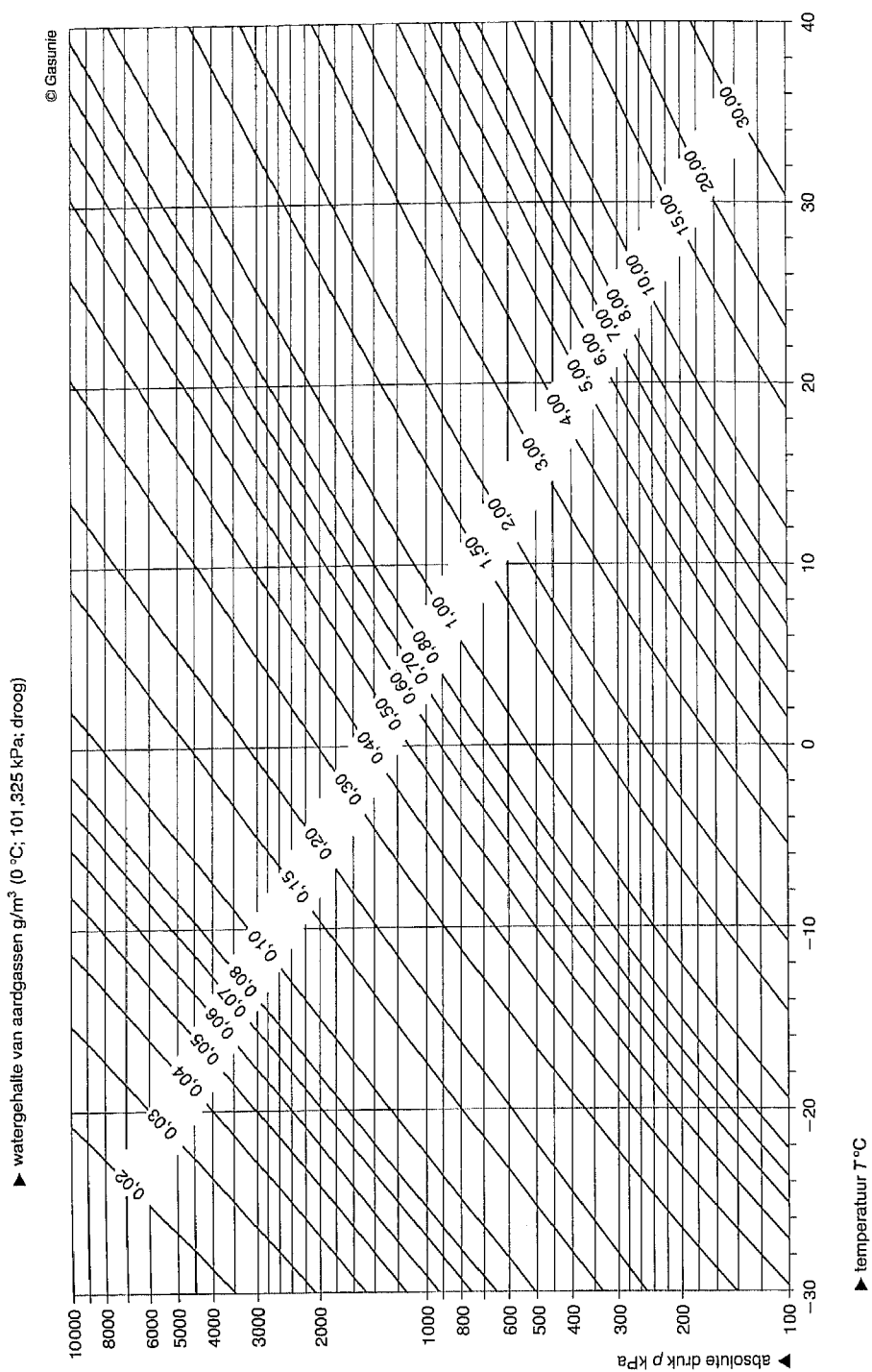
De invloed van H_2S en CO_2 op het watergehalte wordt gegeven in figuur B 11b (zie lit (3)). Het CO_2 -gehalte wordt hierbij omgerekend naar H_2S door vermenigvuldiging met een factor 0,75.

Voorbeeld: een aardgas met 10 mol % H_2S en 15 mol % CO_2 wordt in figuur B 11b voorgesteld door een aardgas met $(0,75 \times 15 + 10 =) 21,25$ mol % H_2S . Het werkelijke watergehalte van een 'zuur' aardgas is dus de som van het watergehalte volgens figuur B 11a en het gehalte Δg volgens figuur B 11b.

Lit (1) T. M. Geerssen / Het watergehalte van verzadigd aardgas als functie van druk en temperatuur, N.V. Nederlandse Gasunie

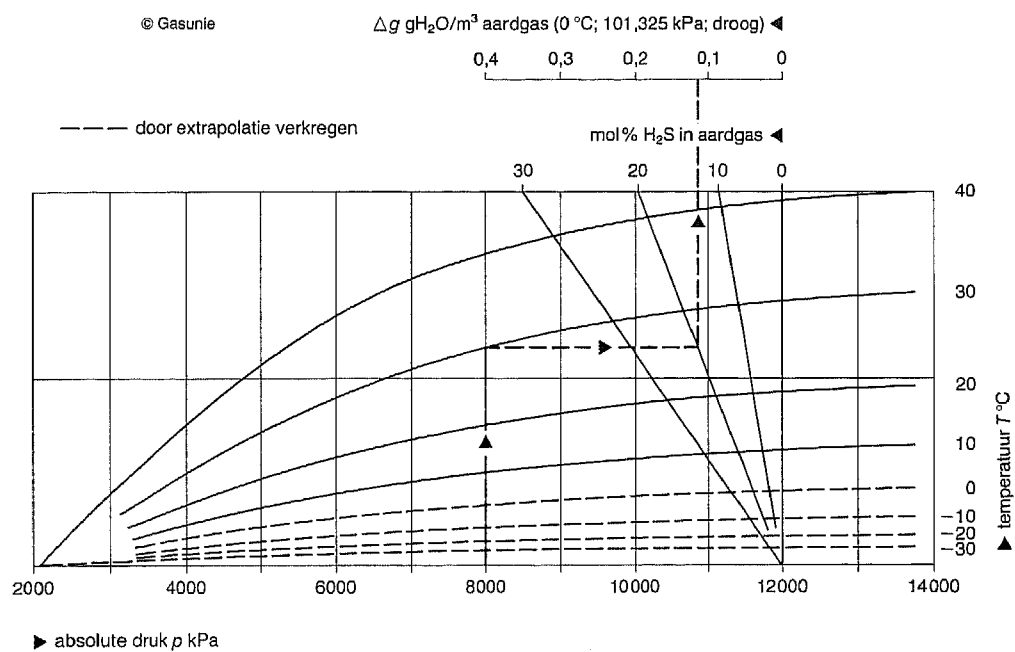
Lit (2) J. M. Campbell / Gasconditioning and processing, vol 2, 1976

Lit (3) J. N. Robinson, R. G. Moore / Charts help estimate H_2O – content of sour gases, 1978



◁ Figuur B 11a. Het watergehalte van aardgassen als functie van de absolute druk p en de temperatuur T

▽ Figuur B 11b. Correctie op watergehalte voor de aanwezigheid van CO_2 en H_2S



C

C 1 CALORISCHE WAARDEN

De definitie van de calorische bovenwaarde H_s en de calorische onderwaarde H_i wordt gegeven onder A 5b.

Voor een aantal koolwaterstoffen en andere brandbare gassen geeft tabel C 1a de calorische waarden (zie lit (1)) zoals onder A 5b gedefinieerd. Internationaal bestaan er momenteel plannen (ISO-voorstellen) om de calorische bovenwaarde H_s als volgt weer te geven:

$$H_s [T_a, V(T_b; p_b)]$$

waarin:

H_s = calorische bovenwaarde

T_a = temperatuur, waarnaar de verbrandingsgassen worden afgekoeld (zie A 5b)

T_b = temperatuur, waaronder de m^3 is gedefinieerd

p_b = druk, waaronder de m^3 is gedefinieerd.

De calorische waarde van gasmengsels kan worden berekend uit de samenstelling en de calorische waarde van de componenten (zie tabel C 1a):

$$H_s = \sum_{j=1}^n n_j \cdot H_{s,j} / 100$$

$$H_i = \sum_{j=1}^n n_j \cdot H_{i,j} / 100$$

waarin:

H_s = calorische bovenwaarde gasmengsel

n_j = mol % component j

$H_{s,j}$ = calorische bovenwaarde component j

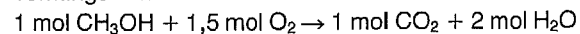
H_i = calorische onderwaarde gasmengsel

$H_{i,j}$ = calorische onderwaarde component j

n = aantal componenten.

Hierbij wordt geen rekening gehouden met een mogelijke intermoleculaire beïnvloeding van de aanwezige componenten. In de gevallen, waarin de geraadpleegde literatuur geen directe waarde geeft voor de calorische waarde, kan deze worden berekend door gebruik te maken van de 'vormingswarmte' (zie onder andere lit (1), (2) en (3)).

Voorbeeld: berekening calorische waarden van methanol (CH_3OH) uit de vormingswarmten



vormingswarmten:

CH_3OH $-201,1667 \text{ MJ/kmol}$ (zie lit (2))

Tabel C 1a: calorische bovenwaarde en onderwaarde

nr.	component	chemische formule	calorische bovenwaarde H_s			calorische onderwaarde H_i		
			MJ/kmol	MJ/m ³	kcal/m ³	MJ/kmol	MJ/m ³	kcal/m ³
1	methaan	CH ₄	890,30	39,816	9510	802,32	35,882	8570
2	ethaan	C ₂ H ₆	1559,88	70,305	16792	1427,83	64,353	15371
3	propaan	C ₃ H ₈	2220,03	101,234	24179	2044,01	93,207	22262
4	2-methylpropaan (isobutaan)	i-C ₄ H ₁₀	2868,72	132,747	31706	2648,68	122,565	29274
5	n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	2877,09	133,691	31931	2657,05	123,466	29489
6	2,2-dimethylpropaan	C ₅ H ₁₂	3516,61	165,203	39458	3252,56	152,798	36495
7	2-methylbutaan (isopentaan)	i-C ₅ H ₁₂	3528,12	167,338	39968	3264,06	154,814	36977
8	n-pentaan	n-C ₅ H ₁₂	3536,15	169,269	40429	3272,10	156,629	37410
9	2,2-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	4177,89	203,800	48677	3869,78	188,770	45087
10	2,3-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	4185,97	204,194	48771	3877,86	189,164	45181
11	3-methylpentaan	C ₆ H ₁₄	4189,82	204,382	48816	3881,71	189,352	45226
12	2-methylpentaan (isohexaan)	i-C ₆ H ₁₄	4187,18	204,253	48785	3879,07	189,223	45195
13	n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	4194,92	204,630	48875	3886,81	189,601	45285
14	2-methylhexaan (isohexptaan)	i-C ₇ H ₁₆	4846,49	236,414	56467	4494,37	219,238	52364
15	n-heptaan	n-C ₇ H ₁₆	4853,57	236,760	56549	4501,44	219,582	52446
16	n-octaan	n-C ₈ H ₁₈	5511,71	268,864	64217	5115,57	249,540	59602
17	n-nonaan	n-C ₉ H ₂₀	6170,98	301,024	71898	5730,87	279,555	66770
18	n-decaan	n-C ₁₀ H ₂₂	6829,71	333,157	79573	6345,54	309,538	73932
19	n-undecaan	n-C ₁₁ H ₂₄	7488,44	365,290	87248	6960,25	339,525	81094
20	n-dodecaan	n-C ₁₂ H ₂₆	8147,21	397,425	94923	7575,01	369,513	88257
21	n-tridecaan	n-C ₁₃ H ₂₈	8805,94	429,558	102598	8189,72	399,499	95419
22	n-tetradecaan	n-C ₁₄ H ₃₀	9464,67	461,691	110273	8804,43	429,485	102581
23	cyclohexaan	C ₆ H ₁₂	3952,92	192,825	46056	3688,87	179,945	42979
24	methylcyclohexaan	C ₇ H ₁₄	4600,64	224,422	53602	4292,57	209,394	50013
25	benzeen	C ₆ H ₆	3301,51	161,049	38466	3169,46	154,608	36928
26	tolueen	C ₇ H ₈	3947,94	192,582	45998	3771,88	183,994	43946

27	xyleen (o)	C ₈ H ₁₀	4 596,29	224,209	53 552	4 376,21	213,474	50 987
28	methylmercaptiaan	CH ₃ SH	1 249,59	57,399	13 709	1 161,54	53,354	12 743
29	ethylmercaptiaan	C ₂ H ₅ SH	1 899,80	88,908	21 235	1 767,79	82,730	19 760
30	propylmercaptiaan	C ₃ H ₇ SH	2 548,31	124,156	29 654	2 372,45	115,589	27 608
31	carbonylsulfide	COS	548,76	24,844	5 934	548,76	24,844	5 934
32	zwavelwaterstof	H ₂ S	562,71	25,361	6 057	518,70	23,377	5 584
33	zwaveldioxyde	SO ₂	-	-	-	-	-	-
34	etheen	C ₂ H ₄	1 410,97	63,434	15 151	1 322,94	59,476	14 206
35	propeen	C ₃ H ₆	2 058,49	93,612	22 359	1 926,44	87,607	20 925
36	1-buteen	C ₄ H ₈	2 717,30	125,766	30 039	2 541,24	117,617	28 092
37	1-penteen	C ₅ H ₁₀	3 375,73	159,100	38 000	3 155,70	148,730	35 523
38	1,2-butadiene	C ₄ H ₆	2 593,79	120,299	28 733	2 461,74	114,175	27 270
39	1-butyne	C ₄ H ₆	2 596,76	121,683	29 064	2 464,71	115,496	27 586
40	methanol	CH ₃ OH	764,03	36,251	8 658	676,00	32,074	7 661
41	ethanol	C ₂ H ₅ OH	1 426,02	69,374	16 570	1 293,97	62,950	15 035
42	argon	Ar	-	-	-	-	-	-
43	helium	He	-	-	-	-	-	-
44	kooldioxyde	CO ₂	-	-	-	-	-	-
45	koolmonoxyde	CO	282,989	12,634	3 018	282,989	12,634	3 018
46	waterstof	H ₂	285,840	12,741	3 043	241,827	10,779	2 575
47	stikstof	N ₂	-	-	-	-	-	-
48	zuurstof	O ₂	-	-	-	-	-	-
49	stikstofmonoxyde	NO	-	-	-	-	-	-
50	stikstofdioxyde	NO ₂	-	-	-	-	-	-
51	waterdamp	H ₂ O	-	-	-	-	-	-
52	lucht (droog)	-	-	-	-	-	-	-

CO ₂	-393,5127 MJ/kmol (zie lit (1))
H ₂ O (gas)	-241,8264 MJ/kmol (zie lit (1))
H ₂ O (vl.)	-285,8400 MJ/kmol (zie lit (1))

Calorische bovenwaarde:

$$-201,1667 - (-393,5127 - 2 \times 285,8400) = 764,0260 \text{ MJ/kmol (zie tabel C 1 a)}$$

Calorische onderwaarde:

$$-201,1667 - (-393,5127 - 2 \times 241,8264) = 675,9988 \text{ MJ/kmol (zie tabel C 1 a)}$$

Tabel C 1b: *Voorbeeld*: berekening calorische waarden van Gronings aardgas (zie tabel A 9)

$$M = 18,637 \text{ kg/kmol}$$

$$V = 22,3559 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Tabel C 1b: calorische bovenwaarde en onderwaarde van Gronings aardgas

component	chemische formule	n_j *) mol %	calorische waarde MJ/kmol	
			$H_{s,j}$ **)	$H_{i,j}$ **)
methaan	CH ₄	81,29	890,30	802,32
ethaan	C ₂ H ₆	2,87	1 559,88	1 427,83
propaan	C ₃ H ₈	0,38	2 220,03	2 044,01
n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	0,15	2 877,09	2 657,05
n-pentaaan	n-C ₅ H ₁₂	0,04	3 536,15	3 272,10
n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	0,05	4 194,92	3 886,81
stikstof	N ₂	14,32	—	—
zuurstof	O ₂	0,01	—	—
kooldioxyde	CO ₂	0,89	—	—
		100	784,76	708,19

bw $H_s = 784,76 \text{ MJ/kmol} = 35,103 \text{ MJ/m}^3$ 35,1

ow $H_i = 708,19 \text{ MJ/kmol} = 31,678 \text{ MJ/m}^3$ 31,7

Deze 'gewogen gemiddelde' berekeningsmethode houdt geen rekening met eventuele intermoleculaire beïnvloeding.

Lit (1) National Bureau of Standards/Selected values of properties of hydrocarbons, Circular C 461 (API Researchproject 44), 1947

Lit (2) Perry e.a./Perry's chemical engineers handbook, fourth edition

Lit (3) R. C. Reid, T. K. Sherwood/Properties of gases and liquids, second edition

Lit (4) Handbook of Chemistry and Physics, 56th edition, 1975-1976

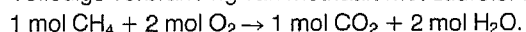
Lit (5) H. M. Spiers/ Technical data on fuel, 6th edition, 1962

*) zie tabel A 9

**) zie tabel C 1 a

C 2 VERBRANDING VAN AARDGAS

Volledige verbranding van methaan met zuurstof wordt voorgesteld door:



Voor elke brandbare component van een gasmengsel kan een dergelijke reactievergelijking worden opgesteld. Samentelling van de hoeveelheid zuurstof uit de reactievergelijking voor elk van de aanwezige brandbare componenten geeft uiteindelijk de totale hoeveelheid zuurstof die nodig is voor volledige – stoichiometrische (zie A 5g) – verbranding van 1 m³ gasmengsel. Rekening moet worden gehouden met de hoeveelheid zuurstof die reeds in een gasmengsel aanwezig is. Gelijktijdig kan de totale hoeveelheid bij de verbranding gevormd CO₂ en H₂O – en SO₂ bij aanwezigheid van zwavelverbindingen – worden bepaald door sommatie van de gevormde hoeveelheden uit elk der reactievergelijkingen. Aangenomen wordt dat bij de verbranding geen stikstofoxyden worden gevormd.

Tabel C 2a geeft de theoretische behoefte aan zuurstof (O₂) – waaruit de 'droge' en 'natte' luchtbehoefte kan worden bepaald – en de theoretisch gevormde hoeveelheid kooldioxyde (CO₂), water (H₂O) en zwaveldioxyde (SO₂) voor een aantal brandbare gassen bij stoichiometrische verbranding van 1 m³ gas met zuurstof (O₂).

Tabel C 2b geeft een voorbeeld van de verbranding van 1 m³ Gronings aardgas. De benodigde gegevens komen uit tabel C 2a.

Tabel C 2a: stoichiometrische verbranding van een gas

nr.	component	chemische formule	stoichiometrische verbranding van 1 m ³ gas met zuurstof						
			behoefte:			gevormd:			
			O ₂ m ³	droge lucht *) m ³	natte lucht *) m ³	CO ₂ m ³	H ₂ O m ³	opmerking	
1	methaan	CH ₄	2,0029	9,5649	9,6712	0,9949	1,9346		
2	ethaan	C ₂ H ₆	3,5323	16,8687	17,0560	2,0053	2,9245		
3	propaan	C ₃ H ₈	5,1054	24,3811	24,6519	3,0433	3,9452		
4	2-methylpropaan (isobutaan)	i-C ₄ H ₁₀	6,7351	32,1638	32,5210	4,1177	5,0043		
5	n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	6,7632	32,2980	32,6567	4,1349	5,0252		
6	2,2-dimethylpropaan	C ₅ H ₁₂	8,4154	40,1882	40,6345	5,2254	6,0965		
7	2-methylbutaan (isopentaan)	i-C ₅ H ₁₂	8,4963	40,5745	41,0251	5,2756	6,1552		
8	n-pentaan	n-C ₅ H ₁₂	8,5749	40,9499	41,4046	5,3244	6,2120		
9	2,2-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	10,3767	49,5544	50,1048	6,5111	7,3855		
10	2,3-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	10,3767	49,5544	50,1048	6,5111	7,3855		
11	3-methylpentaan	C ₆ H ₁₄	10,3767	49,5544	50,1048	6,5111	7,3855		
12	2-methylpentaan (isohexaan)	i-C ₆ H ₁₄	10,3767	49,5544	50,1048	6,5111	7,3855		
13	n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	10,3767	49,5544	50,1048	6,5111	7,3855		
14	2-methylhexaan (isohexptaan)	i-C ₇ H ₁₆	12,0152	57,3792	58,0164	7,5962	8,4406		
15	n-heptaan	n-C ₇ H ₁₆	12,0152	57,3792	58,0164	7,5962	8,4406		
16	n-octaan	n-C ₈ H ₁₈	13,6536	65,2034	65,9276	8,6814	9,4957		
17	n-nonaan	n-C ₉ H ₂₀	15,2920	73,0277	73,8387	9,7666	10,5507		
18	n-decaan	n-C ₁₀ H ₂₂	16,9305	80,8524	81,7504	10,8518	11,6058		
19	n-undecaan	n-C ₁₁ H ₂₄	18,5689	88,6767	89,6615	11,9369	12,6609		
20	n-dodecaan	n-C ₁₂ H ₂₆	20,2073	96,5010	97,5727	13,0221	13,7160		
21	n-tridecaan	n-C ₁₃ H ₂₈	21,8458	104,3257	105,4843	14,1073	14,7710		
22	n-tetradecaan	n-C ₁₄ H ₃₀	23,4842	112,1500	113,3955	15,1925	15,8261		
23	cyclohexaan	C ₆ H ₁₂	9,8306	46,9465	47,4679	6,5111	6,3304		

24	methylcyclohexaan	C ₇ H ₁₄	11,4690	54,7708	55,3790	7,5962	7,3855	
25	benzeen	C ₆ H ₆	8,1922	39,1223	39,5567	6,5111	3,1652	
26	tolueen	C ₇ H ₈	9,8306	46,9465	47,4679	7,5962	4,2203	
27	xyleen (o)	C ₈ H ₁₀	11,4690	54,7708	55,3790	8,6814	5,2754	
28	methylmercaptaan	CH ₃ SH	3,0856	14,7354	14,8991	1,0219	1,9870	SO ₂ : 1,0072 m ³
29	ethylmercaptaan	C ₂ H ₅ SH	4,7156	22,5196	22,7697	2,0822	3,0366	SO ₂ : 1,0262 m ³
30	propylmercaptaan	C ₃ H ₇ SH	6,5457	31,2593	31,6065	3,2516	4,2152	SO ₂ : 1,0683 m ³
31	carbonylsulfide	COS	1,5206	7,2617	7,3423	1,0071	—	SO ₂ : 0,9927 m ³
32	zwavelwaterstof	H ₂ S	1,5138	7,2292	7,3095	—	0,9748	SO ₂ : 0,9883 m ³
33	zwaveldioxyde	SO ₂	—	—	—	—	—	
34	etheen	C ₂ H ₄	3,0201	14,4226	14,5828	2,0003	1,9448	
35	propeen	C ₃ H ₆	4,5823	21,8830	22,1260	3,0350	2,9508	
36	1-buteen	C ₄ H ₈	6,2182	29,6953	30,0251	4,1185	4,0043	
37	1-penteen	C ₅ H ₁₀	7,9151	37,7989	38,2187	5,2423	5,0969	
38	1,2-butadiene	C ₄ H ₆	5,7119	27,2775	27,5804	4,1271	3,0094	
39	1-butyne	C ₄ H ₆	5,7710	27,5597	27,8658	4,1698	3,0406	
40	methanol	CH ₃ OH	1,5936	7,6103	7,6948	1,0555	2,0524	
41	ethanol	C ₂ H ₅ OH	3,2467	15,5048	15,6770	2,1645	3,1567	
42	argon	Ar	—	—	—	—	—	
43	helium	He	—	—	—	—	—	
44	kooldioxyde	CO ₂	—	—	—	—	—	
45	koolmonoxyde	CO	0,4998	2,3868	2,4133	0,9932	—	
46	waterstof	H ₂	0,4990	2,3830	2,4095	—	0,9641	
47	stikstof	N ₂	—	—	—	—	—	
48	zuurstof	O ₂	—	—	—	—	—	
49	stikstofmonoxyde	NO	0,4998	2,3868	2,4133	—	—	NO ₂ : 0,9736 m ³
50	stikstofdioxyde	NO ₂	—	—	—	—	—	
51	waterdamp	H ₂ O	—	—	—	—	—	
52	lucht (droog)	—	—	—	—	—	—	

*) zie C3

Tabel C 2b: stoichiometrische verbranding van Gronings aardgas

component	chemische formule	x_i *) vol %	benodigde hoeveelheid O_2 m ³	gevormde hoeveel- heid m ³	
				CO ₂	H ₂ O
methaan	CH ₄	81,30	1,6284	0,8089	1,5728
ethaan	C ₂ H ₆	2,85	0,1007	0,0572	0,0833
propaan	C ₃ H ₈	0,37	0,0189	0,0113	0,0146
n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	0,14	0,0095	0,0058	0,0070
n-pentaaan	n-C ₅ H ₁₂	0,04	0,0034	0,0021	0,0025
n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	0,05	0,0052	0,0033	0,0037
stikstof	N ₂	14,35			
zuurstof	O ₂	0,01	-0,0001		
kooldioxyde	CO ₂	0,89		+0,0089	
		100	1,7660	0,8975	1,6839

Verbranding van 1 m³ Gronings aardgas met zuurstof vraagt dus:
1,7660 m³ O₂

en levert op:
0,8975 m³ CO₂
1,6839 m³ H₂O
0,1435 m³ N₂ (zie samenstelling).

*) zie tabel A 9

C 3 LUCHTBEHOEFTE

De luchtbehoefte voor de verbranding van een gas wordt berekend uit de benodigde hoeveelheid zuurstof (zie tabel C 2a) en het zuurstofgehalte van de 'verbrandingslucht' (zie tabel C 3a en C 3b). Als gemiddelde samenstelling van 'droge' lucht wordt gekozen voor de versie uit lit (1).

Daar 'droge' lucht in de praktijk nooit voorkomt, wordt aangenomen dat de verbrandingslucht een gemiddelde relatieve vochtigheid bezit van 50 % bij een temperatuur van 20 °C en een druk van 101,325 kPa. Het watergehalte van deze 'natte' lucht kan worden berekend volgens:

$$x = 1000 \frac{R_{dl}}{R_{wd}} \frac{\Phi \cdot p}{p_o - \Phi \cdot p} = 7,256 \text{ g H}_2\text{O/kg droge lucht}$$

waarin:

- x = watergehalte van 'natte' lucht ($\Phi = 0,5$ bij 20 °C en 101,325 kPa)
g H₂O/kg droge lucht
- R_{dl} = gasconstante droge lucht (= 8314,34/28,966) J/kg · K
- R_{wd} = gasconstante waterdamp (= 8314,34/18,0152) J/kg · K
- Φ = relatieve vochtigheid
- p = verzadigingsdruk waterdamp bij 20 °C (= 2,337) (zie lit (2)) kPa
- p_o = totale druk van het systeem (in dit geval 101,325) kPa.

(Bovenstaande formule voor het watergehalte kan eenvoudig worden afgeleid.)

Omrekening naar vol % geeft voor het watergehalte van 'natte' lucht (zie tabel C 3b):

$$x' = \frac{7,256/0,833}{1000/1,2931 + 7,256/0,833} \times 100 \text{ vol \%} = 1,11 \text{ vol \%}$$

In tabel C 2a worden de 'droge' en 'natte' (theoretische) luchtbehoeften gegeven voor een aantal brandbare gasen – componenten van aardgasen of andere

Tabel C 3a: samenstelling van 'droge' lucht

component	chemische formule	$n_i^{*)}$ mol %	mol volume ^{**) V}	x_i vol %
stikstof	N ₂	78,09	22,4037	78,10
zuurstof	O ₂	20,95	22,3919	20,94
argon	Ar	0,93	22,3925	0,93
kooldioxyde	CO ₂	0,03	22,2461	0,03
		100		100

*) zie lit (1)

**) zie tabel A 11

Tabel C 3b: samenstelling van 'natte' lucht

component	chemische formule	x_i vol %	mol volume V	n_i mol %
stikstof	N ₂	77,23	22,4037	77,19
zuurstof	O ₂	20,71	22,3919	20,71
argon	Ar	0,92	22,3925	0,92
kooldioxyde	CO ₂	0,03	22,2461	0,03
waterdamp	H ₂ O	1,11	21,629	1,15
		100		100

gasmengsels – waarbij het zuurstofgehalte van 'droge' lucht uit tabel C 3a en het zuurstofgehalte van 'natte' lucht uit tabel C 3b wordt genomen.

Voor gasmengsels kan de stoichiometrische luchtbehoefte dus op twee manieren worden berekend en wel volgens:

$$l = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot O_{2,i}}{O_{2, \text{lucht}}}$$

of

$$l = \sum_{i=1}^n x_i \cdot l_i / 100$$

waarin:

l = theoretische luchtbehoefte m³/m³ gas

x_i = vol % component i

$O_{2,i}$ = zuurstofbehoefte voor volledige verbranding component i m³/m³ gas
(zie tabel C 2a)

$O_{2, \text{lucht}}$ = vol % O₂ van 'droge' of 'natte' lucht (zie tabel C 3a of C 3b)

l_i = theoretische luchtbehoefte m³/m³ gas component i (zie tabel C 2a)

n = aantal componenten.

De stoichiometrische luchtbehoefte l voor de verbranding van 1 m³ Gronings aardgas bedraagt:

'droge' lucht (zie tabel C 2b en C 3a) = 8,433 6 m³

'natte' lucht (zie tabel C 2b en C 3b) = 8,527 3 m³.

De definitie van de luchtfactor n wordt onder A 5h gegeven.

Opmerking: in dit naslagwerk zal onder 'natte' lucht steeds worden bedoeld lucht met een watergehalte dat overeenkomt met een relatieve vochtigheid van 50 % bij 20 °C en 101,325 kPa.

Lit (1) J. Hilsenrath e.a./Tables of thermodynamic and transport properties, 1960

Lit (2) Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau, Band 1, 1966

C 4 SAMENSTELLING VERBRANDINGS GASSEN

De samenstelling van de verbrandingsgassen is geheel afhankelijk van de samenstelling van het brandbare gas en zal veelal uit de volgende componenten bestaan:

stikstof	N ₂
argon	Ar
kooldioxyde	CO ₂
koolmonoxyde	CO
waterdamp	H ₂ O
waterstof	H ₂
zuurstof	O ₂
zwaveldioxyde	SO ₂

(Zie tabel C 4a en C 4b)

De totale hoeveelheid verbrandingsgas per m³ brandbaar gas q_{tot} bestaat uit de som van de verbrandingsproducten bij stoichiometrische verbranding q_{st} (zie tabel C 4a en C 4b) en de overmaat $(n-1)$ aan toegevoerde verbrandingslucht l , die niet aan de verbrandingsreactie deelneemt:

$$q_{\text{tot}} = q_{\text{st}} + (n-1) l \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ gas}$$

waarin:

q_{tot} = totale hoeveelheid verbrandingsgassen m³/m³ gas

q_{st} = hoeveelheid verbrandingsgassen bij stoichiometrische verbranding ($n = 1$) (zie tabel C 4a en C 4b) m³/m³ gas

n = luchtfactor

$n-1$ = luchtovermaat

l = stoichiometrische luchtbehoefte (zie tabel C 2 a) m³/m³ gas.

Voor gasmengsels geldt:

$$q_{\text{st}} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot q_{\text{st},i} / 100 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ gas}$$

waarin:

x_i = vol % component i

n = aantal componenten.

Voor $q_{\text{st},i}$ zie tabel C 4a en C 4b.

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

Benodigde hoeveelheid zuurstof (O₂): 1,7660 m³/m³ aardgas (zie tabel C 2b)

Hieruit kan de verbrandingsgassamenstelling worden berekend voor stoichiometrische verbranding.

Tabel C 4a: samenstelling verbrandingsgassen bij stoichiometrische verbranding van een gas met 'droge' lucht

nr.	component	chemische formule	samenstelling verbrandingsgassen bij stoichiometrische verbranding van 1 m ³ gas met 'droge' lucht					
			CO ₂ m ³	N ₂ m ³	Ar m ³	H ₂ O m ³	totaal m ³	opmerking
1	methaan	CH ₄	0,9978	7,4702	0,0890	1,9346	10,4916	
2	ethaan	C ₂ H ₆	2,0104	13,1745	0,1569	2,9245	18,2663	
3	propaan	C ₃ H ₈	3,0506	19,0416	0,2267	3,9452	26,2641	
4	2-methylpropaan (isobutaan)	i-C ₄ H ₁₀	4,1273	25,1199	0,2991	5,0043	34,5506	
5	n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	4,1446	25,2247	0,3004	5,0252	34,6949	
6	2,2-dimethylpropaan	C ₅ H ₁₂	5,2375	31,3870	0,3738	6,0965	43,0948	
7	2-methylbutaan (isopentaan)	i-C ₅ H ₁₂	5,2878	31,6887	0,3773	6,1552	43,5090	
8	n-pentaan	n-C ₅ H ₁₂	5,3367	31,9819	0,3808	6,2120	43,9114	
9	2,2-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	6,5260	38,7020	0,4609	7,3855	53,0744	
10	2,3-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	6,5260	38,7020	0,4609	7,3855	53,0744	
11	3-methylpentaan	C ₆ H ₁₄	6,5260	38,7020	0,4609	7,3855	53,0744	
12	2-methylpentaan (isohexaan)	i-C ₆ H ₁₄	6,5260	38,7020	0,4609	7,3855	53,0744	
13	n-hexaan	n-C ₆ H ₁₄	6,5260	38,7020	0,4609	7,3855	53,0744	
14	2-methylhexaan (isoheptaan)	i-C ₇ H ₁₆	7,6134	44,8132	0,5336	8,4406	61,4008	
15	n-heptaan	n-C ₇ H ₁₆	7,6134	44,8132	0,5336	8,4406	61,4008	
16	n-octaan	n-C ₈ H ₁₈	8,7010	50,9239	0,6064	9,4957	69,7270	
17	n-nonaan	n-C ₉ H ₂₀	9,7885	57,0346	0,6792	10,5507	78,0530	
18	n-decaan	n-C ₁₀ H ₂₂	10,8761	63,1457	0,7519	11,6058	86,3795	
19	n-undecaan	n-C ₁₁ H ₂₄	11,9635	69,2565	0,8247	12,6609	94,7056	
20	n-dodecaan	n-C ₁₂ H ₂₆	13,0511	75,3673	0,8975	13,7160	103,0319	
21	n-tridecaan	n-C ₁₃ H ₂₈	14,1386	81,4784	0,9702	14,7710	111,3582	
22	n-tetradecaan	n-C ₁₄ H ₃₀	15,2261	87,5892	1,0430	15,8261	119,6844	
23	cyclohexaan	C ₆ H ₁₂	6,5252	36,6652	0,4366	6,3304	49,9574	
24	methylcyclohexaan	C ₇ H ₁₄	7,6126	42,7760	0,5094	7,3855	58,2835	

25	benzeen	C_6H_6	6,5228	30,5545	0,3638	3,1652	40,6063	
26	tolueen	C_7H_8	7,6103	36,6652	0,4366	4,2203	48,9324	
27	xyleen (o)	C_8H_{10}	8,6978	42,7760	0,5094	5,2754	57,2586	
28	methylmercaptaan	CH_3SH	1,0263	11,5083	0,1370	1,9870	15,6658	SO_2 : 1,0072 m ³
29	ethylmercaptaan	C_2H_5SH	2,0890	17,5878	0,2094	3,0366	23,9490	SO_2 : 1,0262 m ³
30	propylmercaptaan	C_3H_7SH	3,2610	24,4135	0,2907	4,2152	33,2487	SO_2 : 1,0683 m ³
31	carbonylsulfide	COS	1,0093	5,6714	0,0675	—	7,7409	SO_2 : 0,9927 m ³
32	zwavelwaterstof	H_2S	0,0022	5,6460	0,0672	0,9748	7,6785	SO_2 : 0,9883 m ³
33	zwaveldioxyde	SO_2	—	—	—	—	—	
34	etheen	C_2H_4	2,0046	11,2641	0,1341	1,9448	15,3476	
35	propeen	C_3H_6	3,0416	17,0906	0,2035	2,9508	23,2865	
36	1-butteen	C_4H_8	4,1274	23,1920	0,2762	4,0043	31,5999	
37	1-penteen	C_5H_{10}	5,2536	29,5209	0,3515	5,0969	40,2229	
38	1,2-butadiene	C_4H_6	4,1353	21,3037	0,2537	3,0094	28,7021	
39	1-butyne	C_4H_6	4,1781	21,5241	0,2563	3,0406	28,9991	
40	methanol	CH_3OH	1,0578	5,9436	0,0708	2,0524	9,1246	
41	ethanol	C_2H_5OH	2,1692	12,1092	0,1442	3,1567	17,5793	
42	argon	Ar	—	—	—	—	—	
43	helium	He	—	—	—	—	—	
44	kooldioxyde	CO_2	—	—	—	—	—	
45	koolmonoxyde	CO	0,9939	1,8641	0,0222	—	2,8802	
46	waterstof	H_2	0,0007	1,8611	0,0222	0,9641	2,8481	
47	stikstof	N_2	—	—	—	—	—	
48	zuurstof	O_2	—	—	—	—	—	
49	stikstofmonoxyde	NO	0,0007	1,8641	0,0222	—	2,8606	NO_2 : 0,9736 m ³
50	stikstofdioxyde	NO_2	—	—	—	—	—	
51	waterdamp	H_2O	—	—	—	—	—	
52	lucht (droog)	—	—	—	—	—	—	

Tabel C 4b: samenstelling verbrandingsgassen bij stoichiometrische verbranding van een gas met 'natte' lucht

nr.	component	chemische formule	samenstelling verbrandingsgassen bij stoichiometrische verbranding van 1 m³ gas met 'natte' lucht					
			CO₂ m³	N₂ m³	Ar m³	H₂O m³	totaal m³	opmerking
1	methaan	CH₄	0,9978	7,4691	0,0890	2,0420	10,5979	
2	ethaan	C₂H₆	2,0104	13,1723	0,1569	3,1138	18,4534	
3	propan	C₃H₈	3,0507	19,0387	0,2268	4,2188	26,5350	
4	2-methylpropan (isobutaan)	i-C₄H₁₀	4,1275	25,1160	0,2992	5,3653	34,9080	
5	n-butaan	n-C₄H₁₀	4,1447	25,2208	0,3004	5,3877	35,0536	
6	2,2-dimethylpropan	C₅H₁₂	5,2376	31,3820	0,3738	6,5475	43,5409	
7	2-methylbutaan (isopentaan)	i-C₅H₁₂	5,2879	31,6837	0,3774	6,6106	43,9596	
8	n-pentaan	n-C₅H₁₂	5,3368	31,9768	0,3809	6,6716	44,3661	
9	2,2-dimethylbutaan	C₆H₁₄	6,5261	38,6959	0,4610	7,9417	53,6247	
10	2,3-dimethylbutaan	C₆H₁₄	6,5261	38,6959	0,4610	7,9417	53,6247	
11	3-methylpentaan	C₆H₁₄	6,5261	38,6959	0,4610	7,9417	53,6247	
12	2-methylpentaan (isohexaan)	i-C₆H₁₄	6,5261	38,6959	0,4610	7,9417	53,6247	
13	n-hexaan	n-C₆H₁₄	6,5261	38,6959	0,4610	7,9417	53,6247	
14	2-methylhexaan (isoheptaan)	i-C₇H₁₆	7,6136	44,8061	0,5338	9,0846	62,0380	
15	n-heptaan	n-C₇H₁₆	7,6136	44,8061	0,5338	9,0846	62,0380	
16	n-octaan	n-C₈H₁₈	8,7012	50,9159	0,6065	10,2275	70,4511	
17	n-nonaan	n-C₉H₂₀	9,7888	57,0256	0,6793	11,3703	78,8640	
18	n-decaan	n-C₁₀H₂₂	10,8763	63,1358	0,7521	12,5132	87,2775	
19	n-undecaan	n-C₁₁H₂₄	11,9638	69,2456	0,8249	13,6561	95,6904	
20	n-dodecaan	n-C₁₂H₂₆	13,0514	75,3554	0,8977	14,7991	104,1035	
21	n-tridecaan	n-C₁₃H₂₈	14,1389	81,4655	0,9705	15,9419	112,5168	
22	n-tetradecaan	n-C₁₄H₃₀	15,2265	87,5753	1,0432	17,0848	120,9299	
23	cyclohexaan	C₆H₁₂	6,5253	36,6595	0,4367	6,8573	50,4788	
24	methylcyclohexaan	C₇H₁₄	7,6128	42,7692	0,5095	8,0002	58,8917	

25	benzeen	C ₆ H ₆	6,5230	30,5496	0,3639	3,6043	41,0408	
26	tolueen	C ₇ H ₈	7,6104	36,6595	0,4367	4,7472	49,4538	
27	xyleen (o)	C ₈ H ₁₀	8,6980	42,7692	0,5095	5,8901	57,8668	
28	methylmercaptiaan	CH ₃ SH	1,0264	11,5066	0,1371	2,1524	15,8296	SO ₂ : 1,0072 m ³
29	ethylmercaptiaan	C ₂ H ₅ SH	2,0890	17,5850	0,2095	3,2893	24,1991	SO ₂ : 1,0262 m ³
30	propylmercaptiaan	C ₃ H ₇ SH	3,2611	24,4097	0,2908	4,5660	33,5959	SO ₂ : 1,0683 m ³
31	carbonylsulfide	COS	1,0093	5,6705	0,0675	0,0815	7,8215	SO ₂ : 0,9927 m ³
32	zwavelwaterstof	H ₂ S	0,0022	5,6451	0,0672	1,0559	7,7588	SO ₂ : 0,9883 m ³
33	zwaveldioxyde	SO ₂	—	—	—	—	—	
34	etheen	C ₂ H ₄	2,0047	11,2623	0,1342	2,1067	15,5078	
35	propeen	C ₃ H ₆	3,0416	17,0879	0,2036	3,1964	23,5295	
36	1-buteen	C ₄ H ₈	4,1275	23,1884	0,2767	4,3376	31,9297	
37	1-penteen	C ₅ H ₁₀	5,2538	29,5163	0,3516	5,5211	40,6428	
38	1,2-butadiene	C ₄ H ₆	4,1354	21,3003	0,2537	3,3155	29,0050	
39	1-butyne	C ₄ H ₆	4,1782	21,5208	0,2564	3,3499	29,3052	
40	methanol	CH ₃ OH	1,0578	5,9427	0,0708	2,1378	9,2091	
41	ethanol	C ₂ H ₅ OH	2,1692	12,1073	0,1442	3,3907	17,7515	
42	argon	Ar	—	—	—	—	—	
43	helium	He	—	—	—	—	—	
44	kooldioxyde	CO ₂	—	—	—	—	—	
45	koolmonoxyde	CO	0,9939	1,8638	0,0222	0,0268	2,9067	
46	waterstof	H ₂	0,0007	1,8609	0,0222	0,9908	2,8746	
47	stikstof	N ₂	—	—	—	—	—	
48	zuurstof	O ₂	—	—	—	—	—	
49	stikstofmonoxyde	NO	0,0007	1,8638	0,0222	0,0268	2,8871	NO ₂ : 0,9736 m ³
50	stikstofdioxyde	NO ₂	—	—	—	—	—	
51	waterdamp	H ₂ O	—	—	—	—	—	
52	lucht (droog)	—	—	—	—	—	—	

Tabel C 4c: stoichiometrische verbranding van Gronings aardgas met 'natte' lucht

component	chemische formule	'natte' lucht		verbrandingsgassen		
		vol %	m ³	zie tabel C 2b	totaal	vol %
stikstof	N ₂	77,23	6,5856	0,1435	6,7291	70,93
zuurstof	O ₂	20,71	1,7660	—	—	—
argon	Ar	0,92	0,0784	—	0,0784	0,83
kooldioxyde	CO ₂	0,03	0,0026	0,8975	0,9001	9,49
waterdamp	H ₂ O	1,11	0,0947	1,6839	1,7786	18,75
		100	8,5273		9,4862	100

Tabel C 4d: stoichiometrische verbranding van Gronings aardgas met 'droge' lucht

component	chemische formule	'droge' lucht		verbrandingsgassen		
		vol %	m ³	zie tabel C 2b	totaal	vol %
stikstof	N ₂	78,10	6,5867	0,1435	6,7302	71,66
zuurstof	O ₂	20,94	1,7660	—	—	—
argon	Ar	0,93	0,0784	—	0,0784	0,83
kooldioxyde	CO ₂	0,03	0,0025	0,8975	0,9000	9,58
waterdamp	H ₂ O	—	—	1,6839	1,6839	17,93
		100	8,4336		9,3925	100

C 5 ONVOLLEDIGE VERBRANDING

Onvolledige verbranding kan optreden door:

- zuurstofgebrek (inertgasfabricage);
- verbrandingstechnische oorzaken, hoewel voldoende zuurstof aanwezig is voor volledige verbranding.

C 5a Zuurstofgebrek

Bij de fabricage van schermgassen wordt bewust minder zuurstof toegevoerd dan voor volledige verbranding nodig is. De samenstelling van de verbrandingsgassen is hierbij een functie van de samenstelling van het brandbare gasmengsel en de reactietemperatuur. Deze samenstelling kan worden berekend uit de volgende vergelijkingen:

$$1. V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^n C_i$$

$$2. V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{H}_2} + 2 V_{\text{CH}_4} = \sum_{i=1}^n H_{2,i}$$

$$3. V_{\text{CO}_2} + 0,5 V_{\text{CO}} + 0,5 V_{\text{H}_2\text{O}} = \sum_{i=1}^n O_{2,i}$$

$$4. \frac{V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{CO}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}} = k \quad \text{'homogene watergasreactie'}$$

$$5. \frac{V_{\text{CH}_4} \cdot V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{H}_2}^2 \cdot V_{\text{CO}}^2} = l \quad \text{'homogene methaanvormingsreactie'}$$

$$6. V_{\text{CO}_2} + V_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{H}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{CH}_4} = 1$$

waarin:

V_{CO_2} etc. = volumefractie CO_2

C_i = koolstofgehalte (C) van alle koolstofhoudende componenten

$H_{2,i}$ = waterstofgehalte (H_2) van alle waterstofhoudende componenten

$O_{2,i}$ = zuurstofgehalte (O_2) van alle zuurstofhoudende componenten

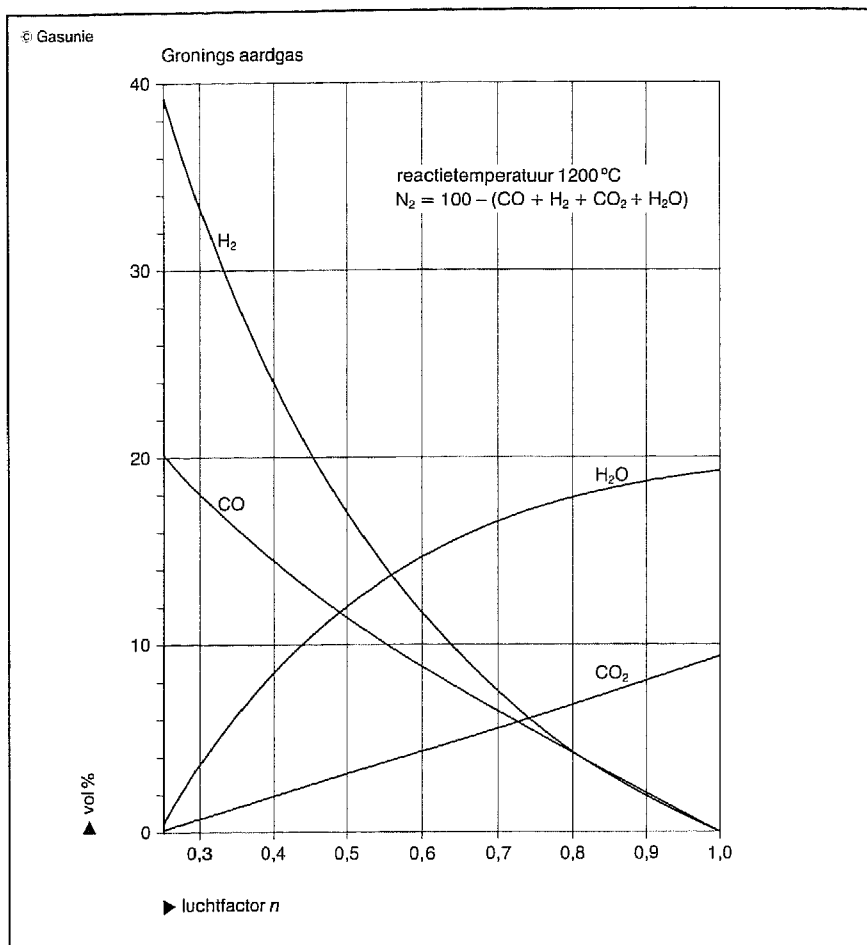
k = evenwichtsconstante voor de 'homogene watergasreactie' (functie van de reactietemperatuur)

l = evenwichtsconstante voor de 'homogene methaanvormingsreactie' (functie van de reactietemperatuur)

n = aantal componenten.

Oplossing van de zes bovenstaande vergelijkingen geeft de samenstelling van de verbrandingsgassen (= schermgassen). k en l zijn beide een functie van de reactietemperatuur.

$\sum_{i=1}^n C_i$, $\sum_{i=1}^n H_{2,i}$ en $\sum_{i=1}^n O_{2,i}$ worden bepaald uit de gassamenstelling en de diverse



Figuur C 5a. Samenstelling verbrandingsgassen van Gronings aardgas bij 1200 °C en luchtfactoren $0,25 \leq n \leq 1,0$

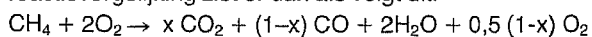
verbrandingsreactievergelijkingen (zie C 2). Bovenstaand stelsel van vergelijkingen is toepasbaar voor luchtfactoren van $0,25 < n < 1$.

De N. V. Nederlandse Gasunie beschikt over een computerprogramma, waarmee de samenstelling van de verbrandingsgassen en het waterdauwpunt kunnen worden berekend uit de samenstelling van het gasmengsel en de reactietemperatuur, waarna het geheel direct kan worden 'geplot'.

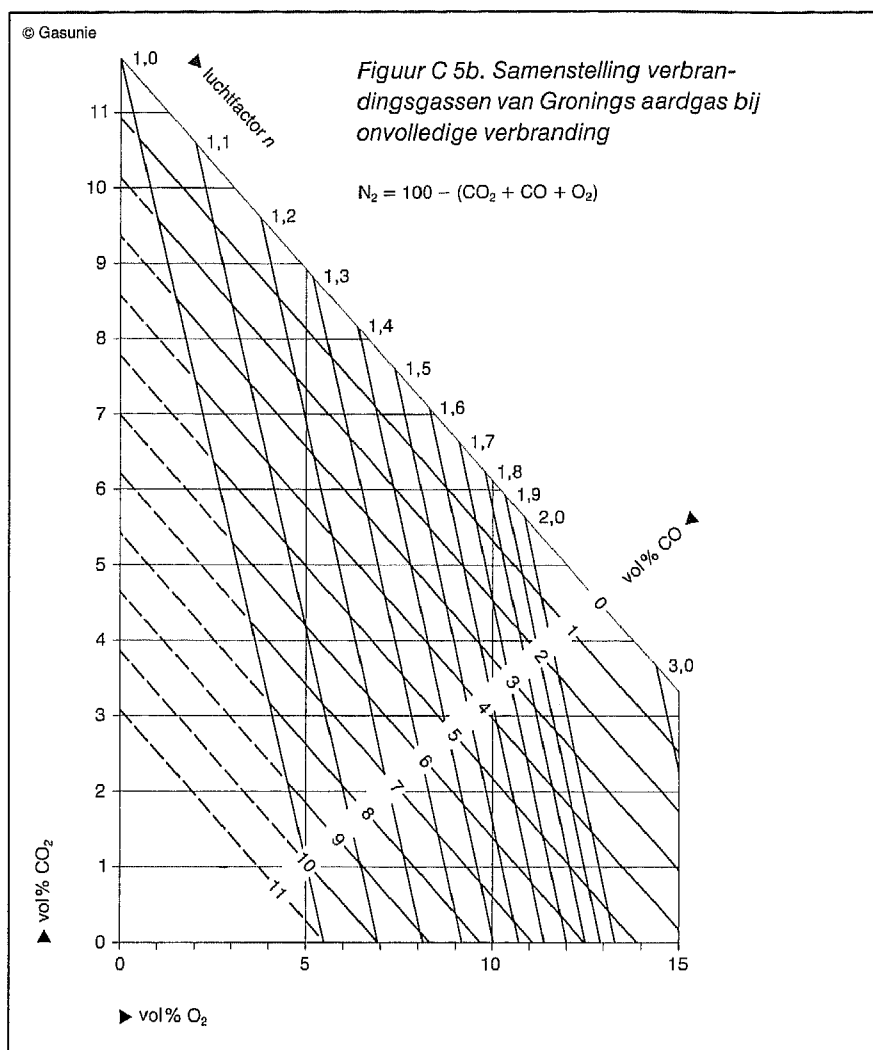
Figuur C 5a geeft de 'natte' verbrandingsgassamenstelling voor Gronings aardgas bij een reactietemperatuur van 1200 °C en luchtfactoren van $0,25 \leq n \leq 1$.

C 5b Verbrandingstechnische oorzaken

Hieronder valt bijvoorbeeld een te korte 'uitbrandlengte' van een gasvlam. De reactievergelijking ziet er dan als volgt uit:



Dat gedeelte van het methaan (CH_4) dat niet 'volledig' wordt omgezet in kool-dioxyde (CO_2) wordt dan omgezet in koolmonoxyde (CO), waarbij een kleine hoeveelheid zuurstof (O_2) overblijft. Op bovenstaande wijze kan voor Gronings aardgas figuur C 5b worden berekend.



C 6 VOELBARE WARMTE EN GEMIDDELDE SOORTELIJKE WARMTE VAN VERBRANDINGS-GASSEN

De voelbare warmte van verbrandingsgassen kan worden berekend uit:

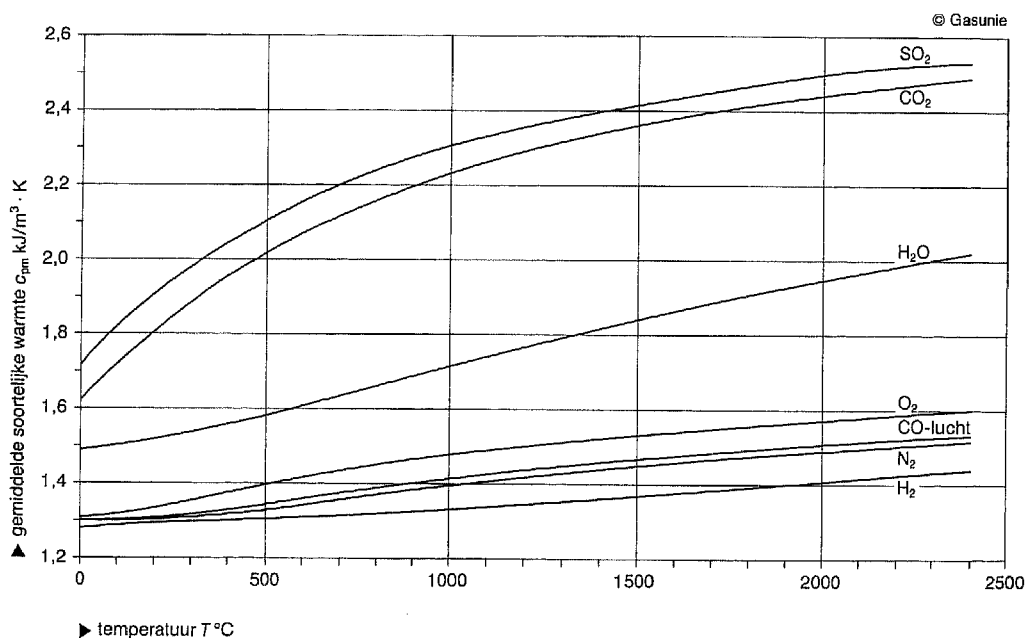
$$I = q_{\text{tot}} \cdot c_{\text{pm}} \cdot \Delta T$$

waarin:

I	= voelbare warmte verbrandingsgassen	$\text{kJ/m}^3 \text{ gas}$
q_{tot}	= totale hoeveelheid verbrandingsgassen (zie C 4)	$\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ gas}$
c_{pm}	= gemiddelde soortelijke warmte bij constante druk van de verbrandingsgassen over het temperatuurtraject $(0 - T)^\circ\text{C}$ (zie tabel C 6)	$\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$
ΔT	= temperatuurtraject $(0 - T)^\circ\text{C}$	K

Tabel C 6 (zie figuur C 6a) geeft de gemiddelde soortelijke warmte bij constante druk c_{pm} van de meest voorkomende verbrandingsgas-componenten over het temperatuurtraject $(0 - T)^\circ\text{C}$. Per definitie stelt c_{pm} de gemiddelde hoeveelheid warmte voor nodig om $1 \text{ m}^3 \text{ gas}$ – tussen 0 en $T^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}$ in temperatuur te verhogen (zie lit (1)). c_{pm} kan uit c_p – 'ware' soortelijke warmte bij constante druk – worden bepaald volgens de integraal:

Figuur C 6a. De gemiddelde soortelijke warmte c_{pm} als functie van de temperatuur T bij $101,325 \text{ kPa}$



$$c_{pm} = \frac{1}{T} \int_0^T c_p \cdot dT$$

Voor gasmengsels wordt c_{pm} bepaald volgens:

$$c_{pm} = \sum_{i=1}^n X_i \cdot c_{pm,i} / 100$$

waarin:

c_{pm}	= gemiddelde soortelijke warmte gasmengsel	$\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$
X_i	= vol % component i	
$c_{pm,i}$	= gemiddelde soortelijke warmte component i	$\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$
n	= aantal componenten.	

Figuur C 6b geeft de voelbare warmte van verbrandingsgassen / als de hoeveelheid q_{tot} en de gemiddelde soortelijke warmte c_{pm} bekend zijn.

Tabel C 6: c_{pm} bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 2400^\circ\text{C}$

temperatuur traject (0 – T) °C	$c_{pm} \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$							
	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	SO ₂ ^{*)}	CO	H ₂	lucht ^{**)}
0	1,620	1,310	1,302	1,491	1,712	1,302	1,281	1,302
0 – 100	1,721	1,319	1,302	1,503	1,822	1,306	1,290	1,306
0 – 200	1,809	1,336	1,306	1,520	1,908	1,310	1,298	1,310
0 – 300	1,884	1,357	1,310	1,541	1,981	1,319	1,298	1,319
0 – 400	1,955	1,377	1,319	1,562	2,043	1,331	1,302	1,331
0 – 500	2,018	1,398	1,331	1,587	2,104	1,344	1,306	1,344
0 – 600	2,068	1,419	1,344	1,612	2,153	1,361	1,310	1,357
0 – 700	2,119	1,436	1,361	1,637	2,202	1,373	1,315	1,373
0 – 800	2,160	1,453	1,373	1,662	2,238	1,390	1,319	1,386
0 – 900	2,198	1,470	1,386	1,687	2,275	1,403	1,327	1,398
0 – 1000	2,232	1,482	1,398	1,717	2,312	1,415	1,331	1,411
0 – 1200	2,290	1,503	1,424	1,767	2,361	1,440	1,344	1,436
0 – 1400	2,336	1,524	1,440	1,817	2,397	1,461	1,361	1,457
0 – 1600	2,378	1,541	1,461	1,863	2,434	1,478	1,377	1,474
0 – 1800	2,412	1,557	1,478	1,905	2,471	1,495	1,394	1,491
0 – 2000	2,441	1,574	1,491	1,947	2,495	1,507	1,407	1,503
0 – 2200	2,466	1,587	1,503	1,985	2,520	1,520	1,424	1,516
0 – 2400	2,491	1,599	1,516	2,018	2,532	1,532	1,440	1,528

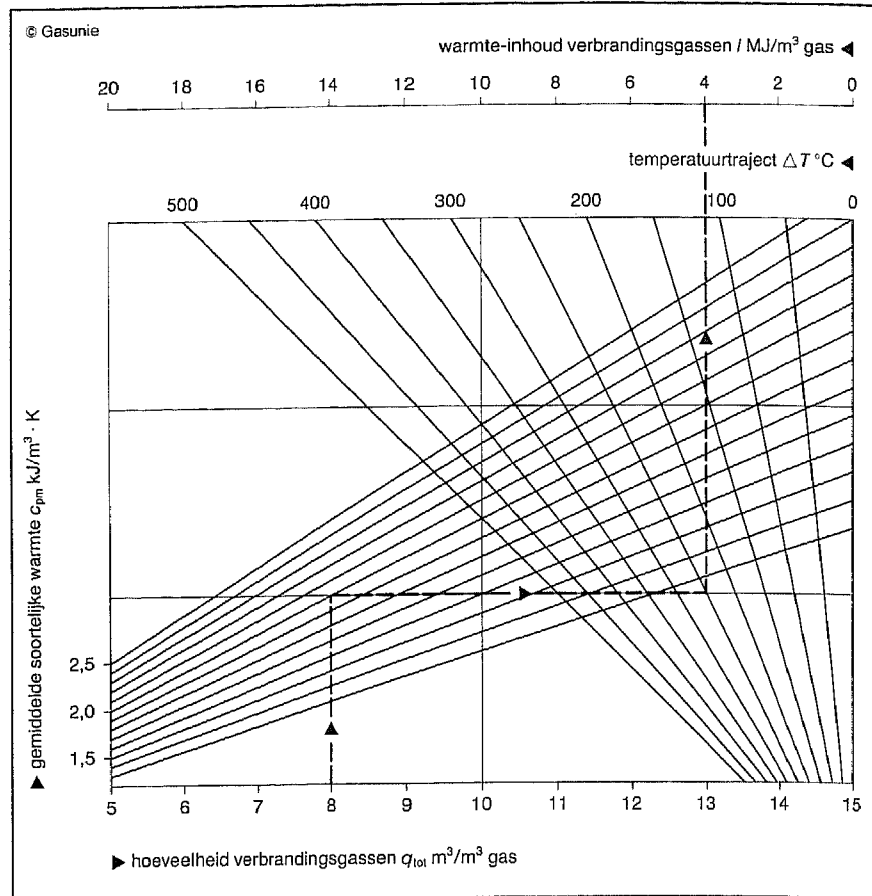
Opmerking: c_{pm} voor argon (Ar) is constant over het gehele temperatuurgebied en bedraagt $0,926 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$.

Lit (1) W. Heiligenstaedt/Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen, 4. Aufl., 1966

Lit (2) VDI – Wärmeatlas, 1963

*) bepaald uit c_p (zie lit (2))

**) zie ook CO



Figuur C 6b. Warmte-inhoud (voelbare warmte) I van verbrandingsgassen als functie van de hoeveelheid verbrandingsgassen q_{tot} , de gemiddelde soortelijke warmte c_{pm} en de temperatuur T

C 7 RENDEMENTSBEPAALING

Het rendement kan eenvoudig worden gedefinieerd als het quotiënt van de hoeveelheid nuttig gebruikte energie en de totaal toegevoerde hoeveelheid energie. Onder A 5r worden een aantal 'rendementen' gedefinieerd, die in de gaswereld worden gehanteerd.

Het rendement kan worden betrokken op de calorische bovenwaarde H_s of op de calorische onderwaarde H_i van een gas.

Het 'indirecte' rendement η_{ind} is wel de meest gebruikte rendementsvorm en ook het eenvoudigst te bepalen.

De schoorsteenverliezen – warmte- of energie-inhoud van de verbrandingsgassen die de installatie via de schoorsteen verlaten – kunnen eenvoudig worden berekend uit:

$$I = q_{tot} \cdot c_{pm} \cdot \Delta T \quad (\text{zie C 6 en figuur C 6b})$$

waarin:

I	= warmte- of energie-inhoud van de verbrandingsgassen in de schoorsteen (zie figuur C 6b)	MJ/m ³ gas
q_{tot}	= totale hoeveelheid verbrandingsgassen (zie C 4)	m ³ /m ³ gas
c_{pm}	= gemiddelde soortelijke warmte bij constante druk	kJ/m ³ · K
ΔT	= temperatuurverschil tussen buitenlucht en verbrandingsgassen in de schoorsteen	K.

Voor het indirecte rendement op onderwaarde respectievelijk bovenwaarde geldt:

$$\eta_{ind,i} = \frac{H_i - I}{H_i} \times 100 \%$$

$$\eta_{ind,s} = \frac{H_s - I - (H_s - H_i)}{H_s} \times 100 \% = \frac{H_i - I}{H_s} \times 100 \%$$

De term $(H_s - H_i)$ stelt de verdampingswarmte voor van de chemisch gevormde waterdamp. Deze staat niet 'ter beschikking' en moet dus als verliespost worden afgetrokken. De verhouding tussen de genoemde indirecte rendementen bedraagt dus:

$$\frac{\eta_{ind,s}}{\eta_{ind,i}} = \frac{H_i - I}{H_s} \cdot \frac{H_i}{H_i - I} = \frac{H_i}{H_s}$$

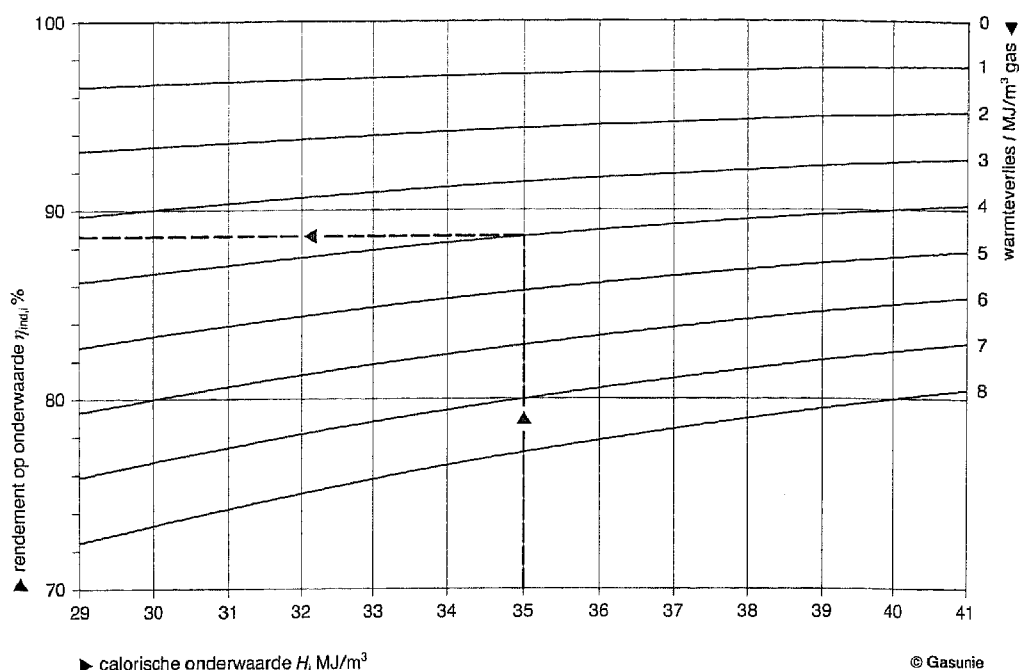
Voor de meeste aardgassen en de componenten daarvan (zie tabel C 1a) geldt bij benadering:

$$\frac{\eta_{ind,s}}{\eta_{ind,i}} = \frac{H_i}{H_s} = 0,9.$$

Figuur C 7 geeft $\eta_{ind,s}$ en $\eta_{ind,i}$ indien het 'warmte-verlies door de schoorsteen' I bekend is.

Voor Gronings gas kan worden afgeleid:

$$\eta_{ind,s} = 90 - (0,303/\text{CO}_2 + 0,01371) \Delta T \quad (\text{zie lit (1)})$$



► calorische onderwaarde H_i MJ/m³

© Gasunie

Figuur C 7. Het indirecte rendement op onderwaarde $\eta_{ind,i}$ als functie van de calorische onderwaarde H_i en het warmteverlies I van verbrandingsgassen

Voorbeeld: $H_i = 35$ MJ/m³
 $I = 4$ MJ/m³
 $\eta_{ind,s} = 0,9 \cdot \eta_{ind,i} = 79,7\%$

of volgens VEG-Gasinstituut:

$$\eta_{ind,s} = 90 - (0,34/\text{CO}_2 + 0,0077) \Delta T$$

waarin:

CO_2 = CO_2 -gehalte in de verbrandingsgassen

vol %

ΔT = temperatuurverschil tussen buitenlucht en verbrandingsgassen

K.

De toenemende energieschaarste maakt dat er steeds meer aandacht wordt besteed aan een betere benutting van de gebruikte energie. Beschouwing van de eerder vermelde rendementsformules toont aan, dat een 'eventuele' rendementsverbetering alleen kan worden behaald door verlaging van het warmteverlies I ($= q_{tot} \cdot c_{pm} \cdot \Delta T$) dus door verkleining van ΔT . De minimumwaarde voor ΔT wordt echter vastgelegd door het waterdauwpunt van de verbrandingsgassen. Onderschrijding van het waterdauwpunt geeft condensatie van de aanwezige waterdamp.

Nieuwe ontwikkelingen op dit gebied maken gebruik van dit condensatieverschijnsel, waarbij 'terugwinning' van de grote hoeveelheid condensatiewarmte van water een stevige 'rendementswinst' oplevert.

Bij benutting van de condensatiewarmte gaan de bovengenoemde rendementsformules er als volgt uitzien:

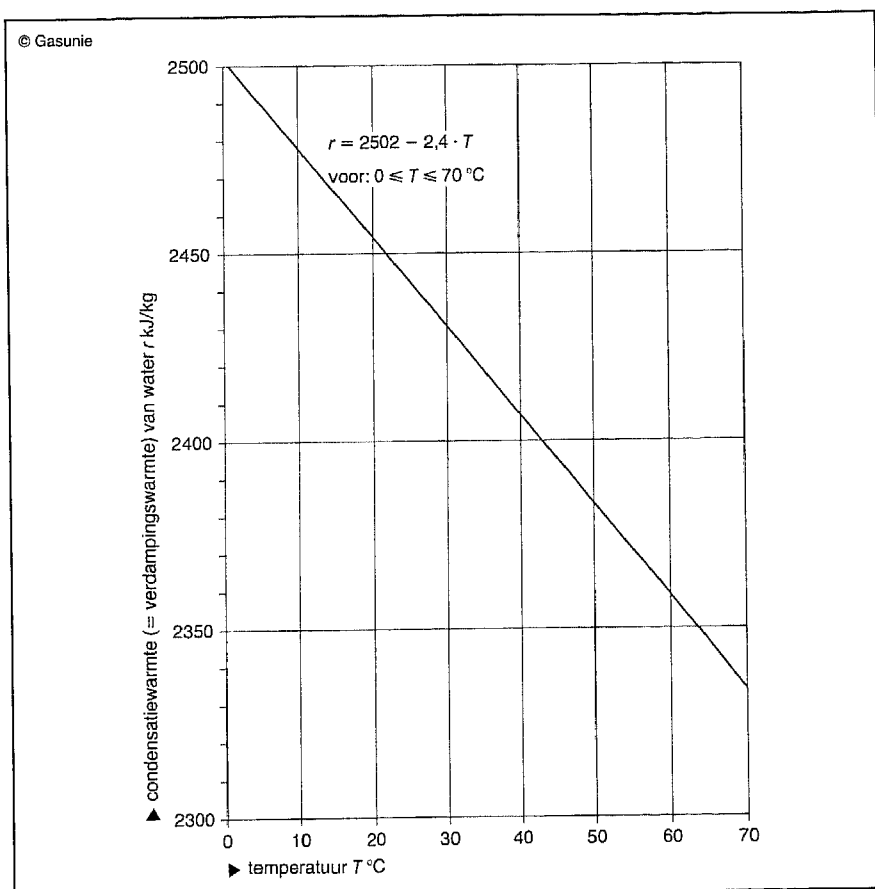
$$\eta_{\text{ind,i}} = \frac{H_i - I + Q_{\text{cond}}}{H_i} \times 100\%$$

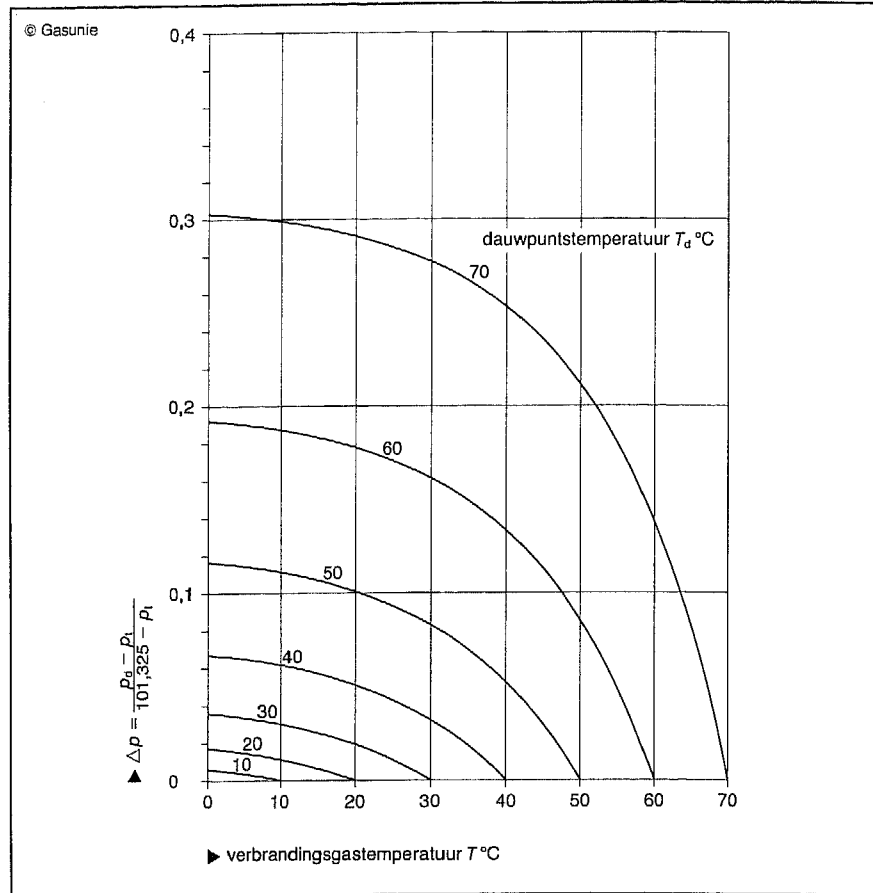
$$\eta_{\text{ind,s}} = \frac{H_i - I + Q_{\text{cond}}}{H_s} \times 100\%$$

waarin:

Q_{cond} = totale hoeveelheid warmte als gevolg van condensatie van waterdamp uit de verbrandingsgassen en de afkoeling van het gevormde water
kJ/m³ gas.

Figuur C 7a. De condensatiewarmte r (= verdampingswarmte) van water als functie van de temperatuur T





Voor Q_{cond} kan worden afgeleid:

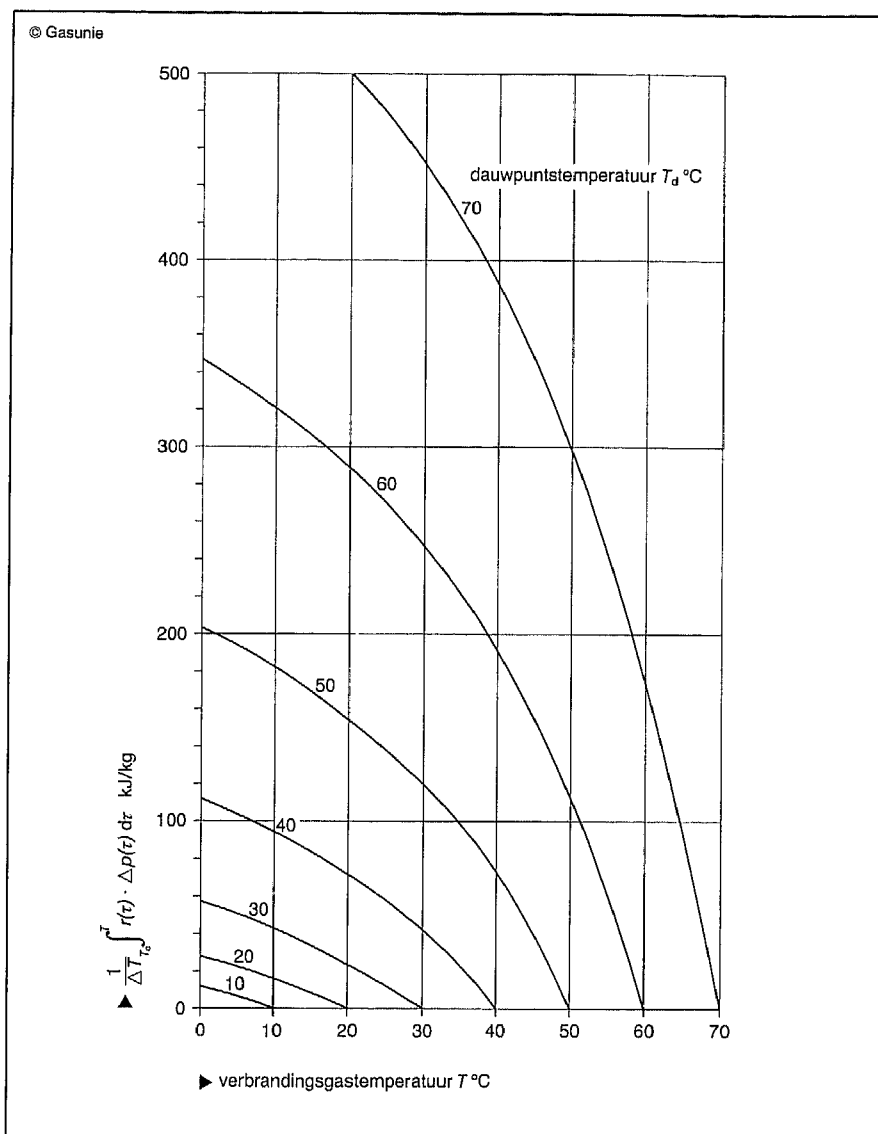
$$Q_{\text{cond}} = 0,833 \cdot q_{\text{tot}} \left[\frac{1}{\Delta T} \int_{T_d}^T r(\tau) \cdot \Delta p(\tau) d\tau + 4,19 \int_{T_d}^T \Delta p(\tau) d\tau \right]$$

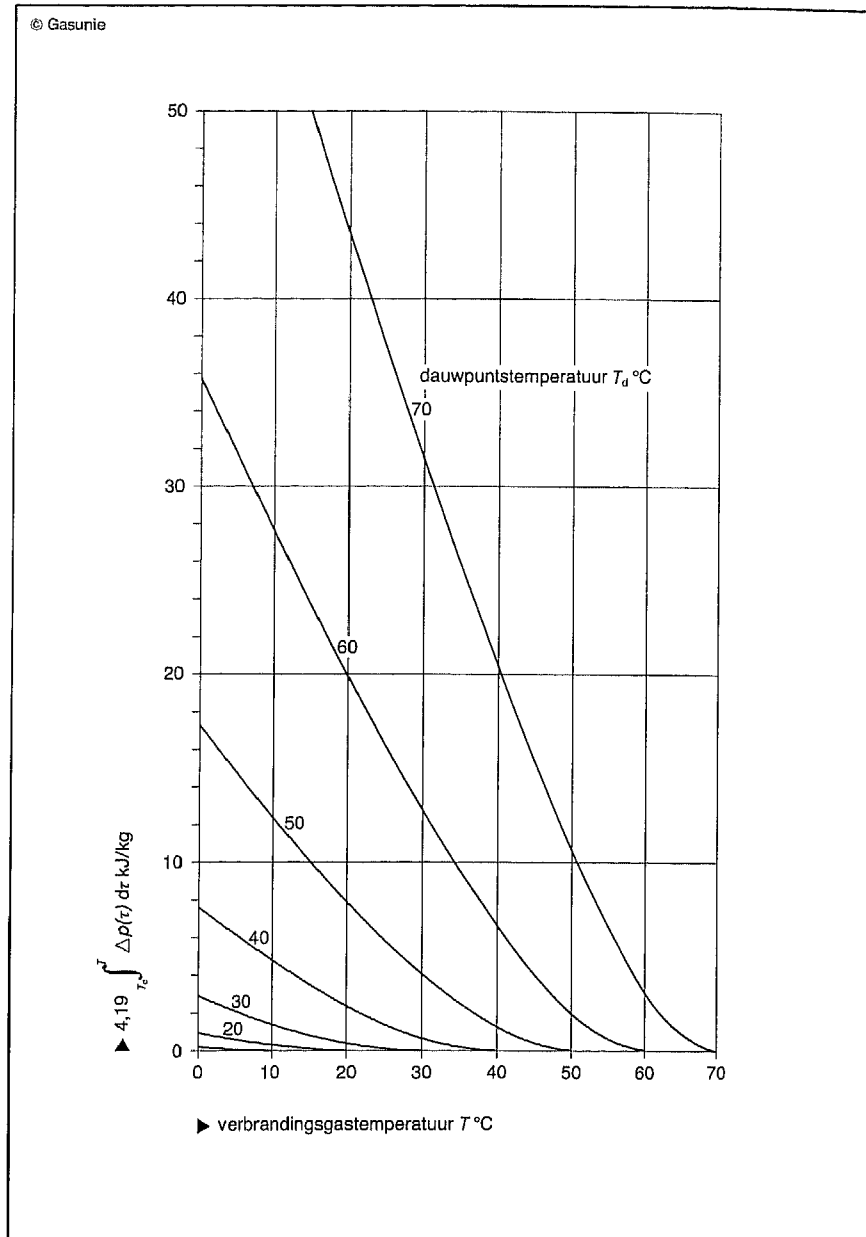
waarin:

q_{tot}	= totale hoeveelheid verbrandingsgassen (zie C 4)	$\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ gas}$
r	= condensatiewarmte (= verdampingswarmte) water (zie figuur C 7a)	kJ/kg
Δp	= $(p_d - p_t) / (p_{\text{tot}} - p_t)$ (zie figuur C 7b)	
p_d	= verzadigingsdruk waterdamp bij temperatuur T_d °C (zie figuur C 8b)	kPa
p_t	= verzadigingsdruk waterdamp bij temperatuur T °C (zie figuur C 8b)	kPa

◁ Figuur C 7b. De verhouding $\Delta p (= \frac{p_d - p_t}{101,325 - p_t})$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T en de dauwpuntstemperatuur T_d

▽ Figuur C 7c. De integraal $\frac{1}{\Delta T_{T_d}} \int_{T_d}^T r(\tau) \Delta p(\tau) d\tau$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T en de dauwpuntstemperatuur T_d





Figuur C 7d. De integraal $4,19 \int_{T_d}^T \Delta p(\tau) d\tau$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T en de dauwpunttemperatuur T_d

T_d	= dauwpuntstemperatuur	°C
T	= verbrandingsgastemperatuur	°C
p_{tot}	= totale druk van het systeem. Bij normale verbrandingssystemen stelt p_{tot} de barometerdruk (veelal 101,325 kPa) voor	kPa
τ	= variabele temperatuur $T \leq \tau \leq T_d$	°C.

Figuur C 7b geeft Δp als functie van T_d en T waarbij $p_{\text{tot}} = 101,325 \text{ kPa}$

Figuur C 7c geeft de oplossing van de integraal $\frac{1}{\Delta T} \int_{T_d}^T r(\tau) \cdot \Delta p(\tau) d\tau$

Figuur C 7d geeft de oplossing van de integraal $4,19 \int_{T_d}^T \Delta p(\tau) d\tau$

De formule voor Q_{cond} kan ook eenvoudig worden voorgesteld door:

$$Q_{\text{cond}} = 0,833 \cdot q_{\text{tot}} \cdot r_{\text{gem}} \cdot \Delta p_{\text{gem}} \quad \text{kJ/m}^3 \text{ gas}$$

waarbij r_{gem} en Δp_{gem} worden bepaald uit figuur C 7a respectievelijk figuur C 7b voor een verbrandingsgastemperatuur $T_{\text{gem}} = (T_d + T)/2 \text{ } ^\circ\text{C}$. Voor het temperatuurgebied 25–60 °C geldt dat substitutie van Q_{cond} volgens laatstgenoemde formule een waarde voor $\eta_{\text{ind,s}}$ geeft, die maximaal 0,3 % hoger ligt dan wanneer Q_{cond} volgens de 'geïntegreerde' formule wordt gesubstitueerd.

Lit (1) Basisgegevens over Gronings aardgas, N.V. Nederlandse Gasunie, 1968

C 8 WATERDAUWPUNT EN WATERGEHALTE VAN VERBRANDINGS GASSEN

Het waterdauwpunt is afhankelijk van de verhouding van de werkelijk aanwezige hoeveelheid waterdamp en de maximaal mogelijke hoeveelheid waterdamp bij de heersende druk en temperatuur van een gasmengsel.

Zoals uit C 3 blijkt, kan het watergehalte van lucht worden berekend volgens:

$$x = 1000 \frac{R_{dl}}{R_{wd}} \frac{\phi \cdot p}{p_0 - \phi \cdot p}$$

en

$$x' = \frac{V_{wd}}{V_{dl} + V_{wd}} \times 100 \text{ vol } \%$$

Na herleiding volgt hieruit:

$$x' = \frac{1}{1,0358 \frac{p_0}{\phi \cdot p} - 0,0358} \times 100 \text{ vol } \% \text{ (zie figuur C 8a)}$$

waarin:

x' = watergehalte 'natte' lucht vol %

V_{wd} = volume waterdamp (= x/ρ_{wd})

ρ_{wd} = volumieke massa waterdamp (zie tabel A 11)

V_{dl} = volume 1 kg droge lucht (= $1000/\rho_{dl}$)

ρ_{dl} = volumieke massa droge lucht (zie tabel A 11).

Zie C 3 voor de overige notaties.

p is de verzadigingsdruk van waterdamp. Deze is alleen afhankelijk van de temperatuur (figuur C 8b – lit (1)). In figuur C 8a wordt dan ook alleen de temperatuur T ingevoerd.

De totale hoeveelheid waterdamp, die in de verbrandingsgassen aanwezig is, kan worden onderverdeeld in:

a. de hoeveelheid chemisch gevormde waterdamp (= q_{chem})

b. de hoeveelheid waterdamp die met de verbrandingslucht wordt toegevoerd

$$\left(= \frac{x'}{100} n \cdot l \right)$$

$$q_{H_2O} = q_{chem} + \frac{x'}{100} n \cdot l$$

waarin:

q_{H_2O} = totale hoeveelheid waterdamp in de verbrandingsgassen $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ gas}$

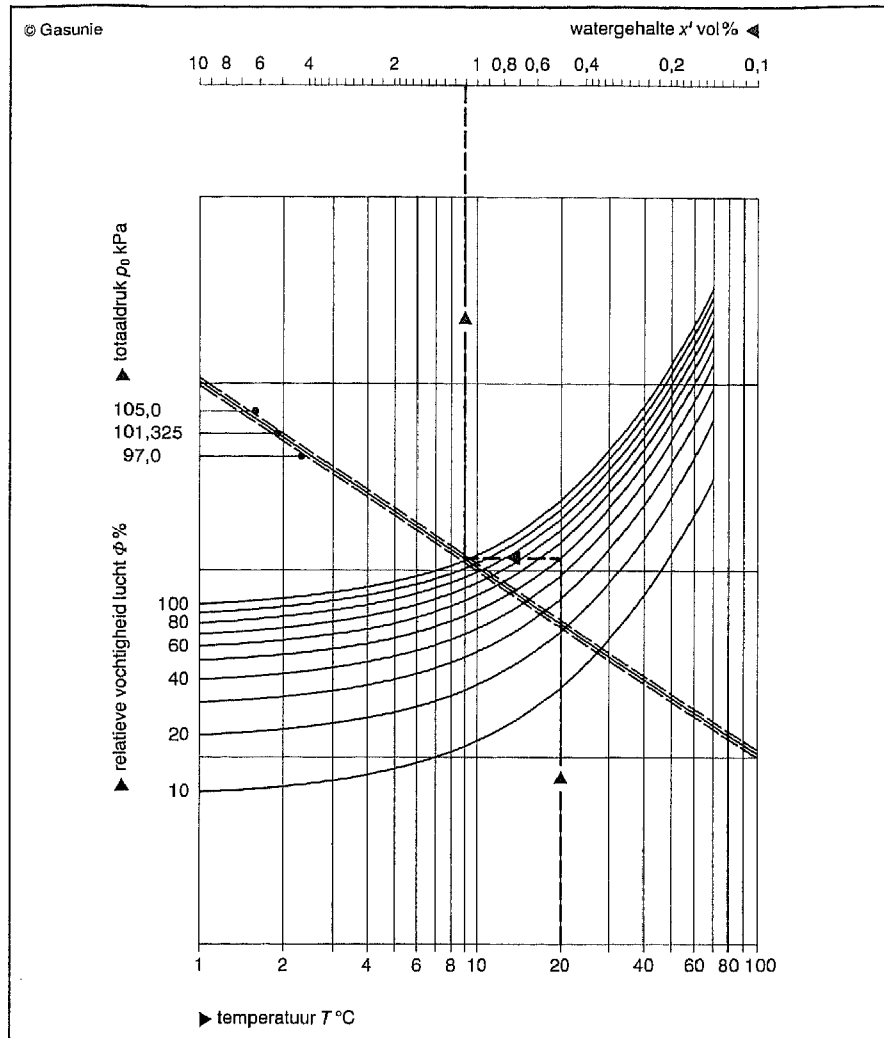
q_{chem} = chemisch gevormde waterdamp (zie C 2) $\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ gas}$

x' = vol % waterdamp in verbrandingslucht

n = luchtfactor (zie A 5h)

l = 'natte' luchtbehoefte (zie C 3).

De partiële druk van de waterdamp in de verbrandingsgassen volgt uit:



Figuur C 8a. Het watergehalte x' in de verbrandingslucht als functie van de temperatuur T , de relatieve luchtvochtigheid R_v en de totaaldruk p_o (barometerdruk)

$$p_{\text{part}} = \frac{q_{\text{H}_2\text{O}}}{q_{\text{tot}}} p_o$$

waarin:

p_{part} = partiële druk van de waterdamp

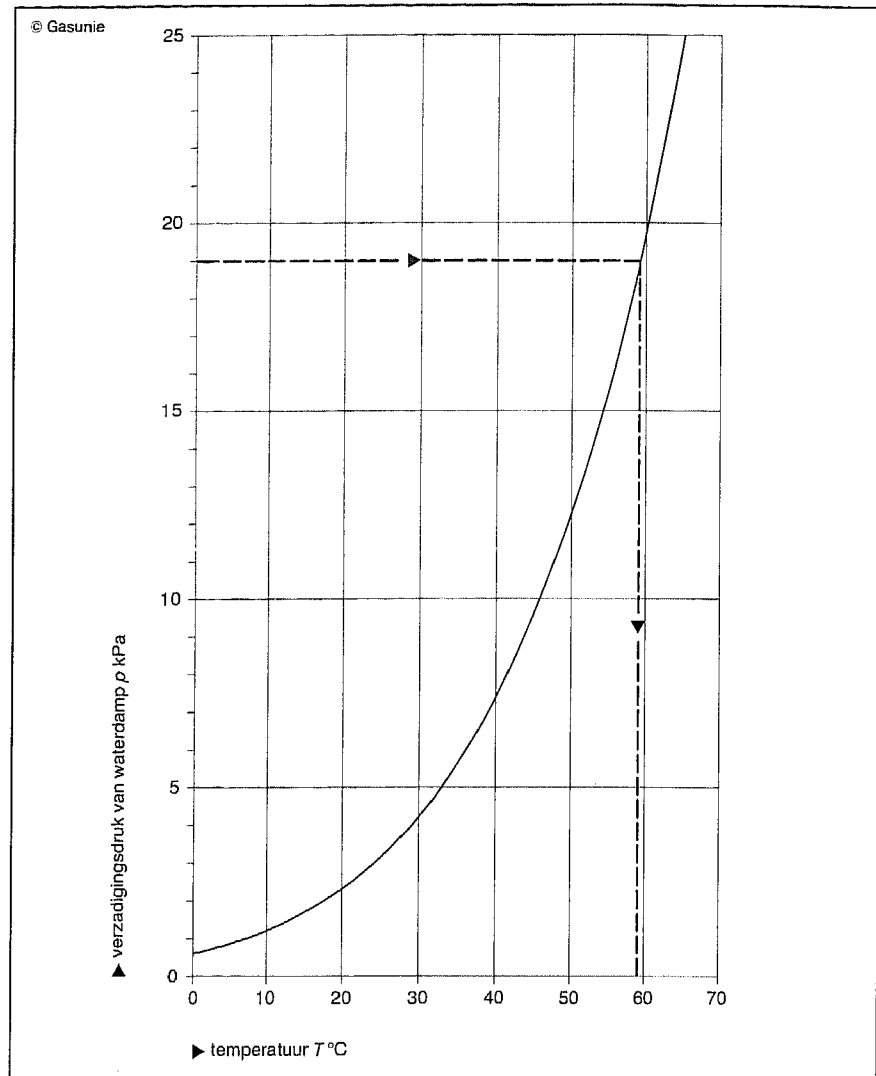
q_{tot} = totale hoeveelheid verbrandingsgassen (zie C 4)

p_o = totale druk van het systeem (veelal 101,325 kPa)

kPa

m^3/m^3 gas

kPa.



Figuur C 8b. De verzadigingsdruk p van waterdamp als functie van de temperatuur T

Het waterdauwpunt is alleen afhankelijk van de waterdampdruk p_{part} en kan uit figuur C 8b worden bepaald.

Voorbeeld: verbranding van Gronings aardgas met 'natte' lucht ($R_v = 50\%$ bij 20°C en $101,325\text{ kPa}$).
Luchtfactor $n = 1$.

Oplossing:

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = q_{\text{chem}} + \frac{x'}{100} n \cdot l \quad \text{m}^3\text{H}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{ gas}$$

$$q_{\text{chem}} = 1,6839 \text{ m}^3\text{H}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{ gas (zie tabel C 2b)}$$

$$x' = 1,11 \text{ vol\% H}_2\text{O in 'natte' lucht (zie C 3)}$$

$$l = 8,5273 \text{ m}^3 \text{ lucht}/\text{m}^3 \text{ gas (zie C 3)}$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 1,6839 + \frac{1,11}{100} 1 \cdot 8,5273 = 1,7786 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ gas}$$

$$p_{\text{part}} = \frac{q_{\text{H}_2\text{O}}}{q_{\text{tot}}} p_o$$

$$q_{\text{tot}} = 9,4862 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ gas (zie tabel C 4c)}$$

$$p_o = 101,325 \text{ kPa}$$

$$p_{\text{part}} = \frac{1,7786}{9,4862} 101,325 = 19,0 \text{ kPa}$$

Uit figuur C 8b volgt dan voor het waterdauwpunt:

$$T_d = 59,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Lit (1) Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau, Band 1, 1966

C 9 VOLUMIEKE MASSA VAN VERBRANDINGS GASSEN

De volumieke massa wordt berekend volgens:

$$\rho_{v,0} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \rho_i / 100$$

waarin:

- $\rho_{v,0}$ = volumieke massa van de verbrandingsgassen (0 °C; 101,325 kPa) kg/m³
 x_i = vol % component i
 ρ_i = volumieke massa component i (0 °C; 101,325 kPa) (zie tabel A 11) kg/m³
 n = aantal componenten.

Voor hogere temperaturen wordt ρ_v berekend volgens:

$$\rho_{v,t} = \rho_{v,0} \frac{273,15}{T + 273,15} \quad \text{kg/m}^3 \quad (T + 273,15) \text{ K; } 101,325 \text{ kPa}$$

waarin:

T = temperatuur verbrandingsgassen °C.

Luchtfactoren $n > 1$ hebben weinig invloed op de volumieke massa van verbrandingsgassen, daar deze voor het grootste gedeelte uit stikstof bestaan.

Figuur C 9 geeft $\rho_{v,t}$ voor Gronings aardgas.

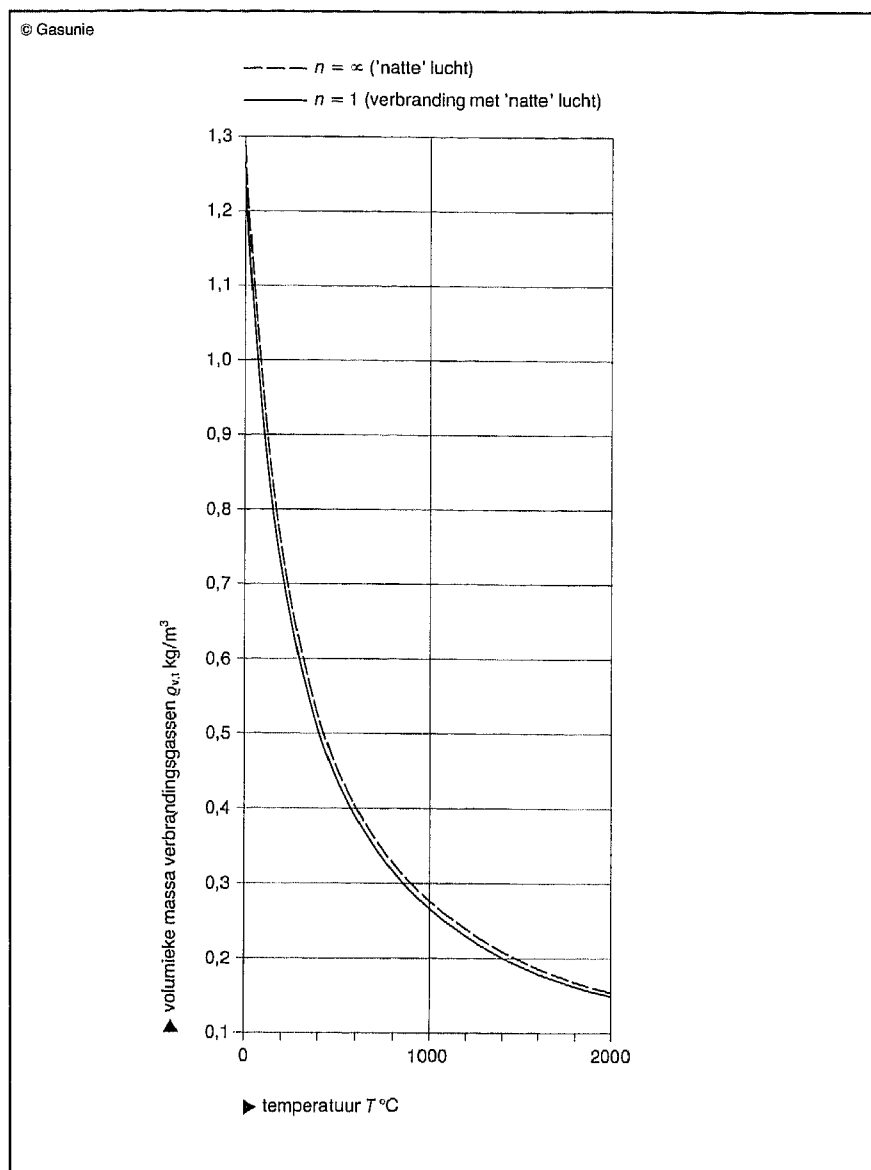
De samenstelling van de verbrandingsgassen wordt gegeven in de tabellen C 4c en C 4d.

Daarnaast geeft figuur C 9 de volumieke massa $\rho_{v,t}$ voor 'natte' lucht (zie tabel C 4c).

Tabel C 9: volumieke massa bij 101,325 kPa en 0 °C

component	chemische formule	volumieke massa kg/m ³ *)
stikstof	N ₂	1,2504
argon	Ar	1,7840
kooldioxyde	CO ₂	1,9783
koolmonoxyde	CO	1,2505
waterdamp	H ₂ O	0,833
waterstof	H ₂	0,0898
zuurstof	O ₂	1,4290
zwaveldioxyde	SO ₂	2,9214

*) zie tabel A 11



Figuur C 9. De volumieke massa $q_{v,t}$ van verbrandingsgassen als functie van de temperatuur T en de luchtfactor n

C 10 VISCOSITEIT VAN VERBRANDINGS- GASEN**C 10a Dynamische viscositeit**

Tabel C 10a geeft de dynamische viscositeit μ van de componenten van verbrandingsgassen over een temperatuurgebied van 0 – 1600 °C (zie lit (1)).

In de literatuur (zie onder andere lit (2)) zijn allerlei ingewikkelde vergelijkingen te vinden, waarmee de viscositeit van genoemde componenten kan worden berekend. Een tweetal van deze methoden zal hierna worden vermeld.

C 10a 1 De methode van Sutherland

De eenvoudigste vergelijking is wel de formule van Sutherland (zie onder andere lit (3)):

$$\frac{\mu_t}{\mu_o} = \left(\frac{T}{273,15} \right)^{3/2} \frac{273,15 + C_s}{T + C_s}$$

waarin:

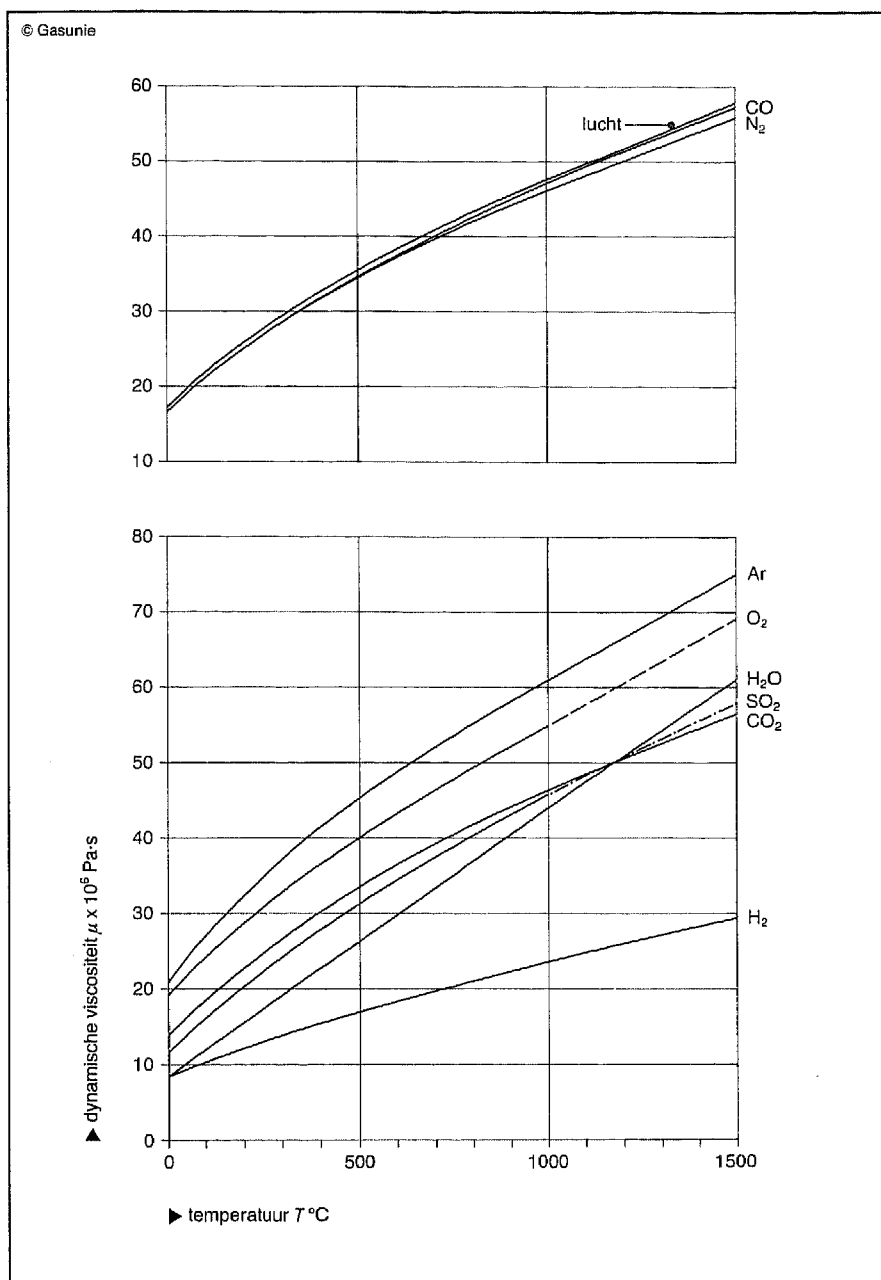
- μ_t = dynamische viscositeit bij T K en 101,325 kPa Pa · s
 μ_o = dynamische viscositeit bij 273,15 K en 101,325 kPa Pa · s
 (zie tabel C 10a en figuur C 10a)
 C_s = Sutherland constante (zie tabel C 10b)
 T = absolute temperatuur K.

De nauwkeurigheid is beter dan 5 %.

Tabel C 10a: dynamische viscositeit bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 1600$ °C

temperatuur °C	dynamische viscositeit $\mu \times 10^6$ Pa·s								
	N ₂	Ar	CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	O ₂	SO ₂	lucht
0	16,63	20,93	13,80	16,60	8,66	8,41	19,19	11,63	17,16
100	20,95	27,00	18,40	20,97	12,13	10,38	24,22	16,06	21,65
200	24,82	32,38	22,65	24,89	15,65	12,17	28,73	20,27	25,65
300	28,30	37,15	26,57	28,43	19,20	13,85	32,81	24,22	29,26
400	31,48	41,41	30,16	31,66	22,77	15,43	36,55	27,91	32,53
500	34,38	45,24	33,45	34,64	26,35	16,93	40,00	31,33	35,52
600	37,05	48,74	36,47	37,40	29,92	18,36	43,24	34,53	38,27
700	39,53	51,98	39,24	39,97	33,49	19,74	46,31	37,53	40,82
800	41,86	55,03	41,80	42,44	37,04	21,08	49,26	40,38	43,20
900	44,05	57,99	44,18	44,79	40,56	22,36	52,14	43,11	45,46
1000	46,14	60,91	46,41	47,06	44,07	23,61	54,99	45,77	47,61
1100	48,15	63,78	48,53	49,2 ^{*)}	47,54	24,82	57,7 ^{*)}	48,3 ^{*)}	49,69
1200	50,11	66,59	50,57	51,3 ^{*)}	51,00	26,01	60,6 ^{*)}	50,75 ^{*)}	51,73
1300	52,04	69,37	52,54	53,3 ^{*)}	54,37	27,16	63,5 ^{*)}	53,2 ^{*)}	53,74
1400	53,96	72,13	54,49	55,3 ^{*)}	57,78	28,29	66,3 ^{*)}	55,5 ^{*)}	55,76
1500	55,89	74,92	56,44	57,2 ^{*)}	61,10	29,39	69,2 ^{*)}	57,9 ^{*)}	57,80
1600	57,84	77,74	58,41	59,2 ^{*)}	64,39	30,47	71,9 ^{*)}	60,2 ^{*)}	59,89

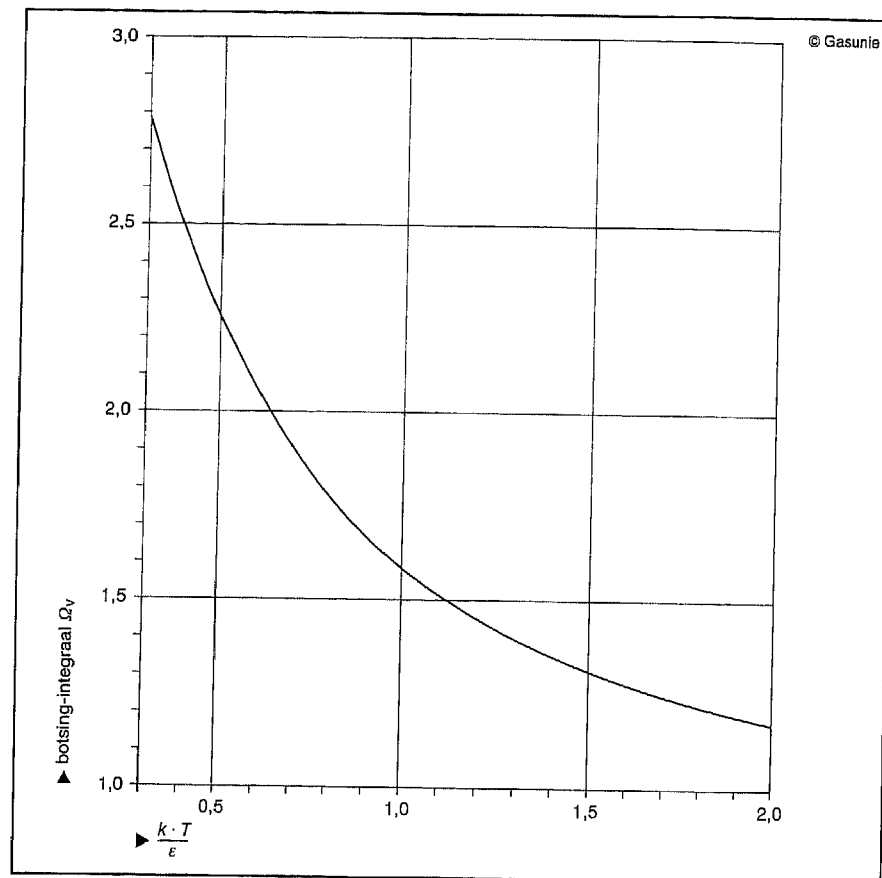
^{*)} door extrapolatie verkregen (zie figuur C 10a)



Figuur C 10a. De dynamische viscositeit μ als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa

Tabel C 10b: Sutherland-constante

component	C_s
N ₂	112
Ar	164
CO ₂	266
CO	104
H ₂ O	673
H ₂	90
O ₂	131
SO ₂	416
lucht	116

Figuur C 10b. De grootte Ω_v als functie van de verhouding $\frac{k \cdot T}{\varepsilon}$ 

C 10a 2 *De methode volgens API*

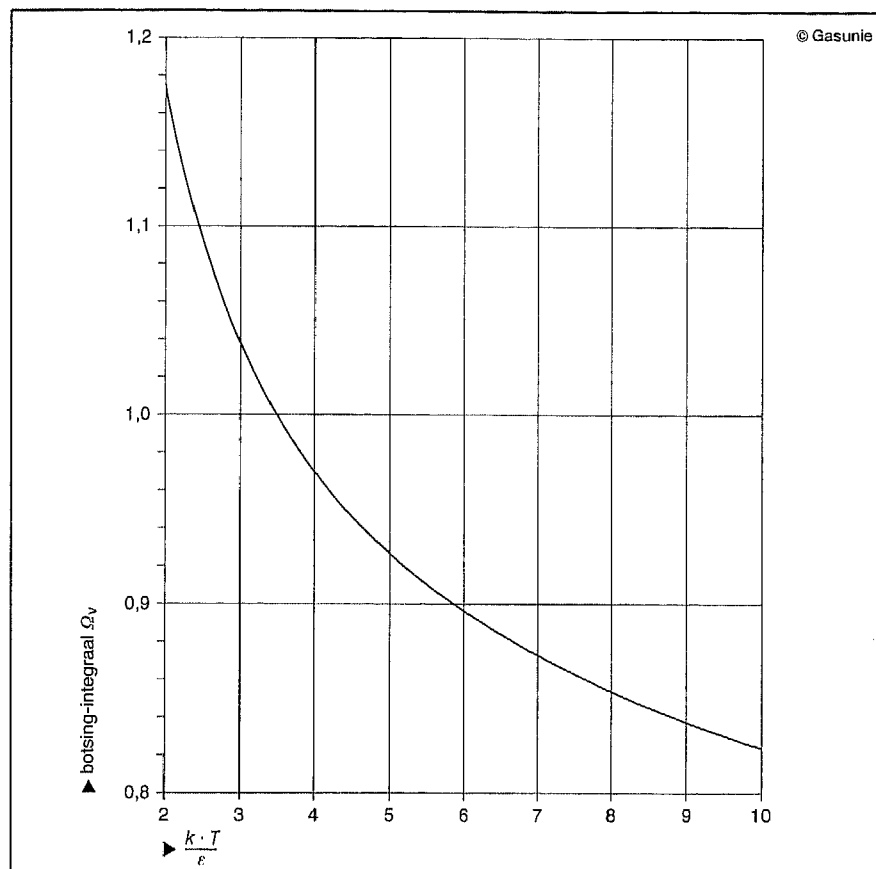
Lit (3) geeft een minder eenvoudige methode voor het berekenen van μ voor de componenten van verbrandingsgassen:

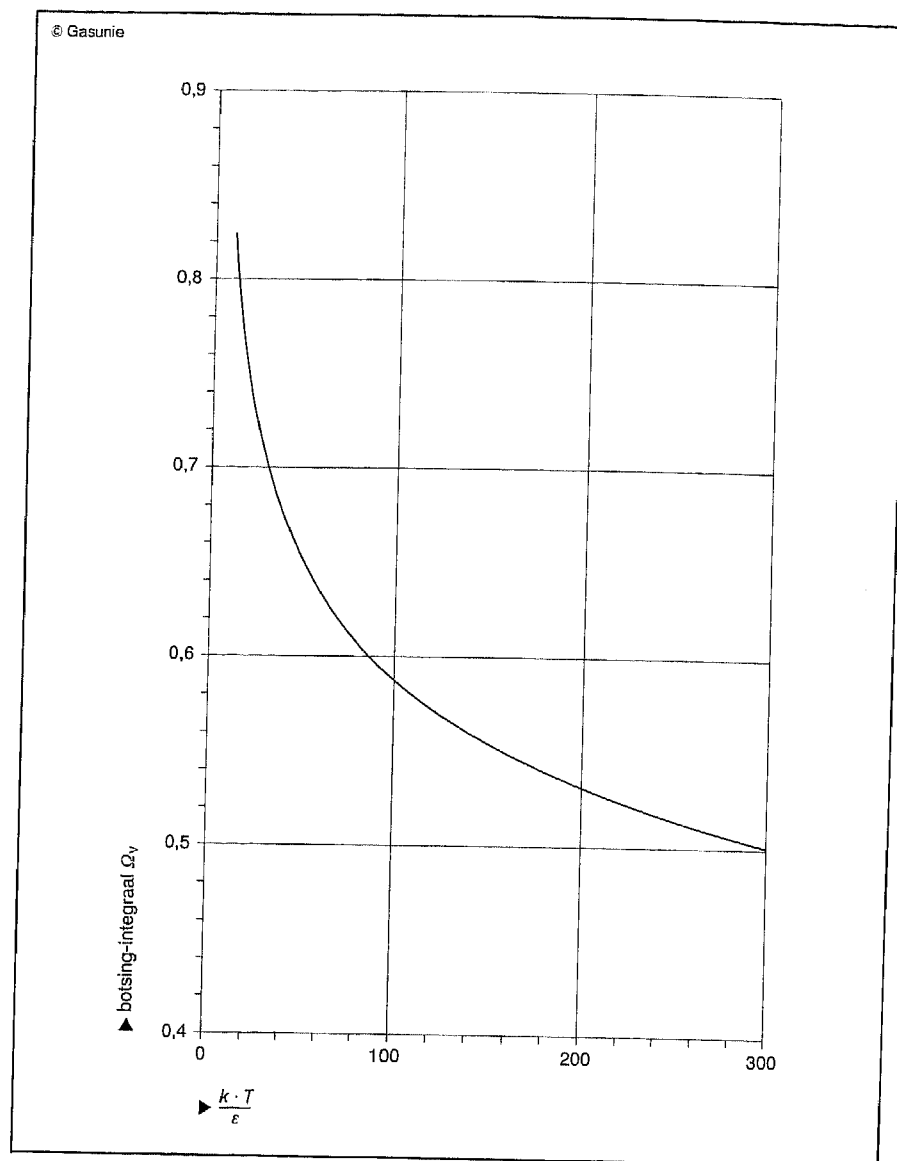
$$\mu = 1,989 \cdot 10^{-6} \frac{(M \cdot T)^{0,5}}{\sigma^2 \cdot \Omega_v}$$

waarin:

μ	= dynamische viscositeit bij T K en 101,325 kPa	Pa · s
M	= molaire massa	kg/kmol
T	= absolute temperatuur	K
σ	= Lennard-Jones 'botsing-diameter'	Å (ångström)
Ω_v	= 'botsing-integraal' voor viscositeit.	

Figuur C 10c. De grootte Ω_v als functie van de verhouding $\frac{k \cdot T}{\epsilon}$





Figuur C 10d. De grootte Ω_v als functie van de verhouding $\frac{k \cdot T}{\epsilon}$

Tabel C 10c geeft waarden voor ϵ/k , σ en M voor de diverse componenten (zie lit (3)). De waarde voor Ω_v volgt uit de figuren C 10b, C 10c en C 10d, waarin Ω_v wordt gegeven als functie van $k \cdot T/\epsilon$ (zie tabel C 10c voor ϵ/k).

Tabel C 10c: constanten voor de berekening van de dynamische viscositeit volgens API

component	ε/k	σ 'ångström'	$M^{**})$ kg/kmol
N ₂	85,7	3,85	28,0134
Ar	224,8	3,423	39,9480
CO ₂	342,0	4,00	44,0098
CO	59,0	3,92	28,0104
H ₂ O ^{*)}	383,1	4,18	18,0152
H ₂	66,7	2,959	2,0158
O ₂	88,0	3,541	31,9988
SO ₂	453,6	4,290	64,0588
lucht	151,2	3,689	28,966

C 10a 3 Viscositeit voor gasmengsels

Voor gasmengsels geven lit (2) en lit (3) de methode van 'Herning en Zipperer':

$$\mu_{t,1} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot \mu_i \sqrt{M_i}}{\sum_{i=1}^n n_i \sqrt{M_i}}$$

(zie B 5a voor beperkingen in gebruik)

waarin:

$\mu_{t,1}$	= dynamische viscositeit van gasmengsel bij T K en 101,325 kPa	Pa · s
n_i	= mol % component i	
μ_i	= dynamische viscositeit component i bij T K en 101,325 kPa (zie tabel C 10a)	Pa · s
M_i	= molaire massa component i	kg/kmol
n	= aantal componenten.	

Als ν en ϱ bekend zijn, kan de dynamische viscositeit μ ook worden berekend uit:

$$\mu = \nu \cdot \varrho$$

waarin:

μ	= dynamische viscositeit	Pa · s
ν	= kinematische viscositeit (zie C 10b)	m ² /s
ϱ	= volumieke massa (zie C 9)	kg/m ³ .

^{*)} berekend met gegevens uit lit (5)

^{**)} zie tabel A 11

C 10b Kinematische viscositeit

De kinematische viscositeit ν van verbrandingsgassen kan worden berekend volgens de 'reciproke formule van Mann' (zie onder andere lit (6)):

$$\frac{1}{\nu_m} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{100 \cdot \nu_i}$$

waarin:

- ν_m = kinematische viscositeit gasmengsel m^2/s
 ν_i = kinematische viscositeit component i
 (tabel C 10d en figuur C 10e) m^2/s
 x_i = vol % component i
 n = aantal componenten.

Daarnaast kan de viscositeit ook worden berekend uit:

$$\nu = \mu/\rho \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (\text{zie C 10a})$$

Tabel C 10d: kinematische viscositeit bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 1600^\circ\text{C}$

temperatuur $^\circ\text{C}$	kinematische viscositeit $\nu \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$								
	N ₂	Ar	CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	O ₂	SO ₂	lucht
0	13,30	11,73	6,98	13,28	10,77	93,58	13,44	3,97	13,27
100	22,89	20,68	12,72	22,92	20,61	157,8	23,15	7,50	22,87
200	34,38	31,44	19,85	34,49	33,72	234,6	34,83	12,00	34,37
300	47,49	43,70	28,20	47,72	50,11	323,4	48,18	17,37	47,49
400	62,04	57,20	37,60	62,42	69,79	423,1	63,03	23,50	62,01
500	77,82	71,78	47,90	78,44	92,77	533,2	79,23	30,30	77,77
600	94,71	87,34	58,97	95,64	119,0	653,1	96,73	37,72	94,63
700	112,6	103,8	70,72	113,9	148,4	782,6	115,5	45,69	112,5
800	131,5	121,2	83,08	133,4	181,0	921,5	135,4	54,21	131,3
900	151,3	139,6	95,99	153,9	216,7	1069	156,7	63,27	151,0
1000	172,0	159,2	109,4	175,5	255,5	1225	179,4	72,90	171,7
1100	193,0	179,7	123,3	199 ^{*)}	297,3	1388	204 ^{*)}	84 ^{*)}	193,2
1200	216,1	201,4	137,8	224 ^{*)}	342,1	1561	230 ^{*)}	95 ^{*)}	215,8
1300	239,7	224,0	153,1	250 ^{*)}	389,5	1741	258 ^{*)}	107 ^{*)}	239,4
1400	264,3	247,7	168,9	277 ^{*)}	440,2	1928	288 ^{*)}	120 ^{*)}	264,2
1500	290,1	272,6	185,3	307 ^{*)}	493,3	2123	319 ^{*)}	133 ^{*)}	290,2
1600	317,2	298,8	202,6	338 ^{*)}	549,2	2325	353 ^{*)}	146 ^{*)}	317,7

Lit (1) W. Gumz/Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik, 3. Aufl., Berlin, 1962

Lit (2) R. C. Reid, T. K. Sherwood/Properties of gases and liquids, second edition, 1968

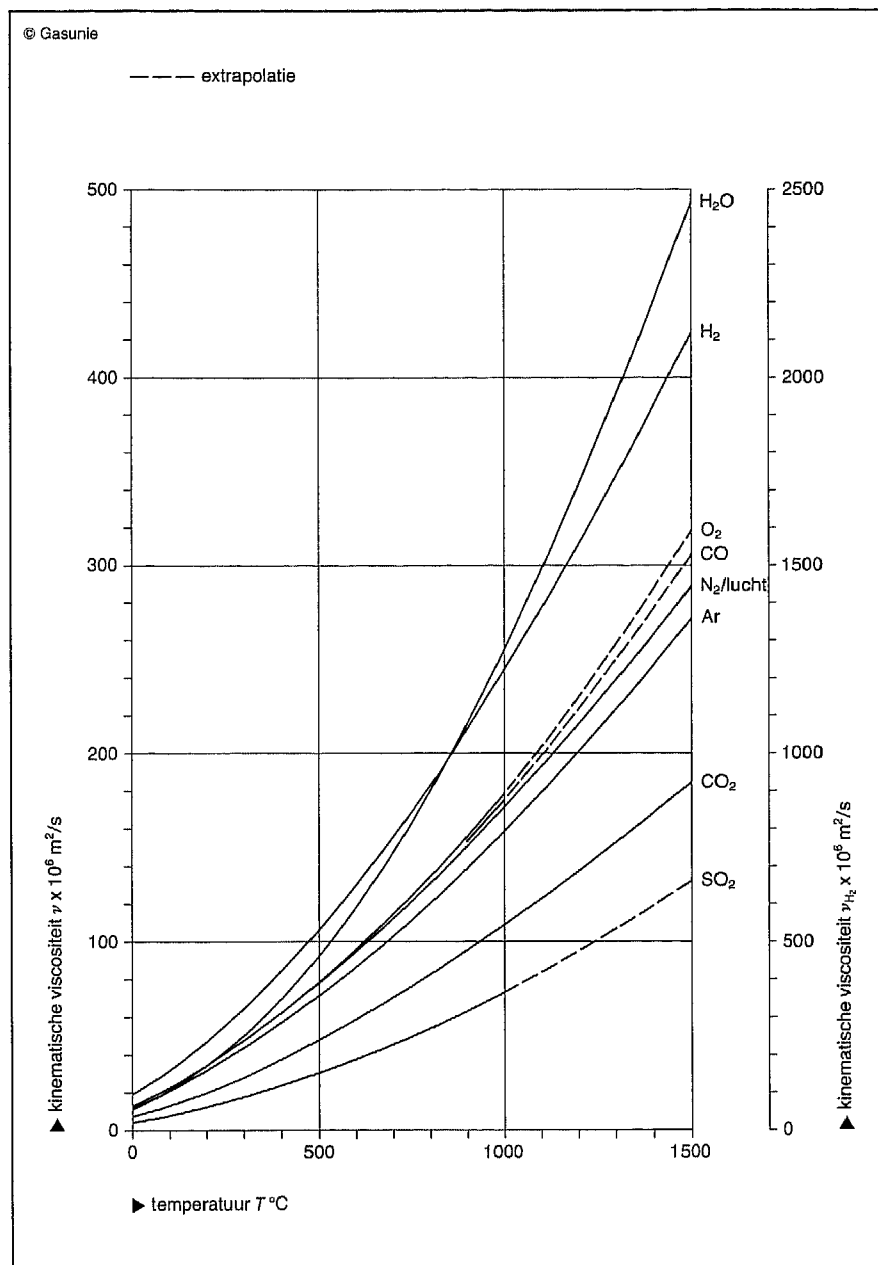
Lit (3) API/Technical Databook, Petroleum refining, 1966

Lit (4) Messer Griesheim/Gas Handbuch

Lit (5) L. C. Canjar, F. S. Manning/Thermodynamic properties and reduced correlations for gases, 1967

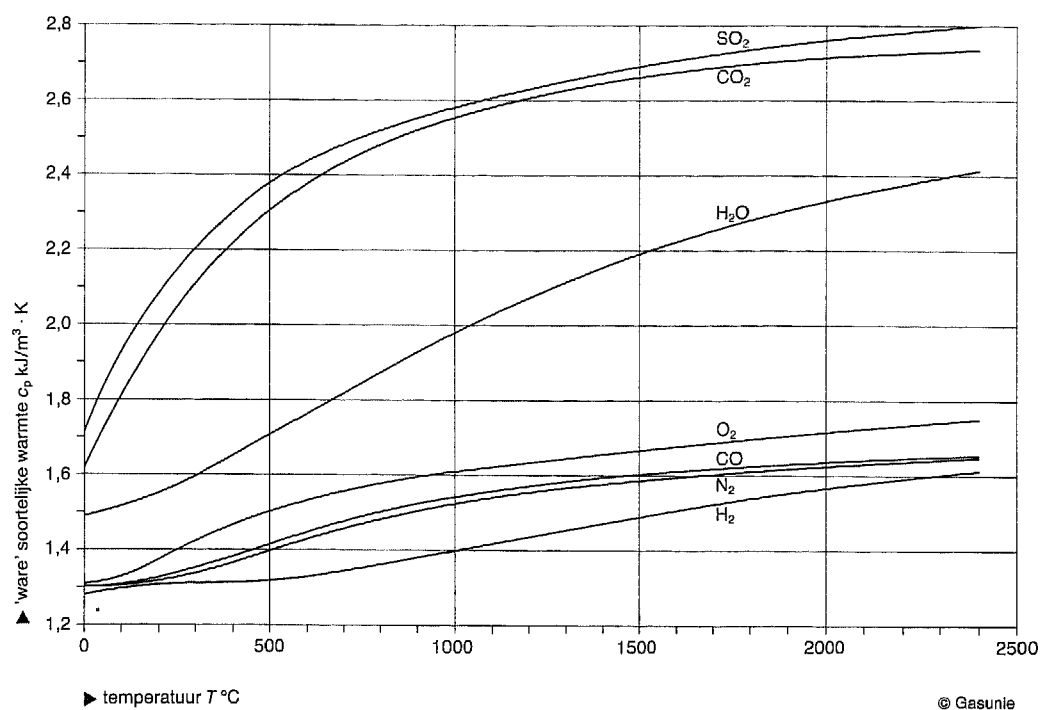
Lit (6) H. Brückner/Gastafeln, 1952

^{*)} door extrapolatie verkregen (zie figuur C 10e)



Figuur C 10e. De kinematische viscositeit ν als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa

***) zie lit (2)



Figuur C 11. De ware soortelijke warmte c_p functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa

Opmerking: de 'ware' soortelijke warmte c_p van Argon (Ar) is constant over het gehele temperatuurgebied en bedraagt 0,926 kJ/m³ · K.

- Lit (1) W. Heiligenstaedt/Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen, 4. Aufl., 1966
 Lit (2) VDI-Wärmeatlas, 1963

C 12 WARMTEGELEIDINGSCOEFFICIENT VAN VERBRANDINGS GASSEN

Tabel C 12 geeft de warmtegeleidingscoëfficiënt λ van de componenten die in verbrandingsgassen voorkomen. In de literatuur worden sterk uiteenlopende waarden gegeven. Bij gebrek aan beter zullen de waarden uit lit (1), aangevuld met waarden uit lit (2), worden gegeven.

Uit de basiswaarden van tabel C 12 kan de warmtegeleidingscoëfficiënt voor verbrandingsgassen worden berekend met behulp van de empirische formule uit lit (3):

$$\lambda = \left[1 + \frac{\left(\frac{x_p}{100} \right) - \left(\frac{x_p}{100} \right)^2}{3,5} \right] \sum_{i=1}^n x_i \cdot \lambda_i / 100$$

waarin:

- λ = warmtegeleidingscoëfficiënt van de verbrandingsgassen W/m · K
- x_i = vol % component i
- λ_i = warmtegeleidingscoëfficiënt component i W/m · K
- x_p = som vol % van de 'polaire' of de 'niet-polaire' componenten
- n = aantal componenten.

De factor $\left[1 + \frac{\left(\frac{x_p}{100} \right) - \left(\frac{x_p}{100} \right)^2}{3,5} \right]$ geldt als verfijningsfactor (zie figuur C 12b).

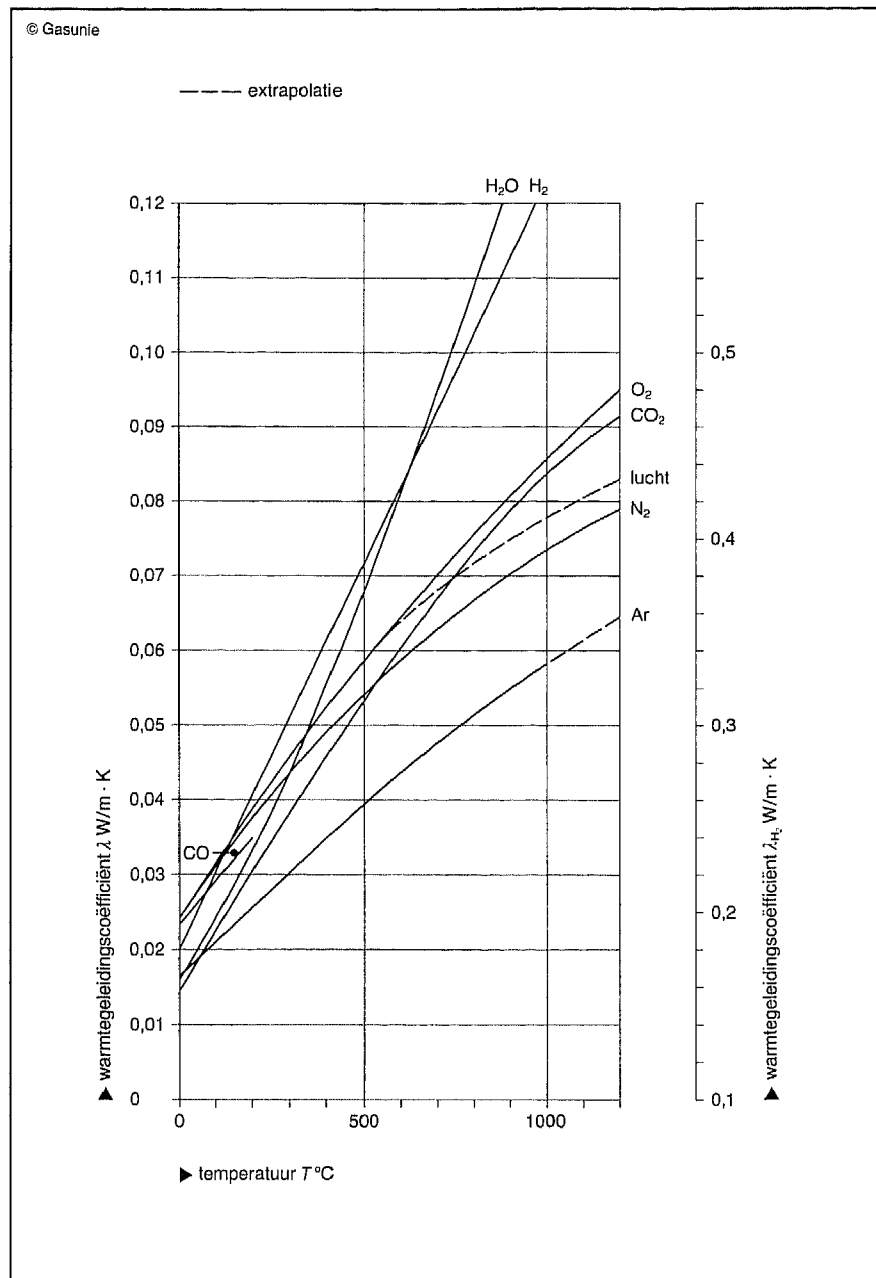
Tabel C 12: warmtegeleidingscoëfficiënt bij 101,325 kPa en $0 \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$

temperatuur °C	λ W/m · K							
	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	CO ^{*)}	H ₂ ^{*)}	Ar ^{*)}	lucht
0	0,0145	0,0242	0,0242	0,0159	0,0233	0,1756	0,0163	0,0244
100	0,0223	0,0315	0,0311	0,0248	0,0291	0,2245	0,0221	0,0314
200	0,0301	0,0387	0,0376	0,0328	0,0349	0,2663	0,0256	0,0384
300	0,0379	0,0456	0,0436	0,0434	—	0,2966	0,0302	0,0465
400	0,0456	0,0523	0,0490	0,0548	—	0,3431	0,0349	0,0523
500	0,0543	0,0586	0,0543	0,0692	—	0,3838	0,0395	0,0582
600	0,0605	0,0644	0,0587	0,0802	—	0,427 ^{*)}	0,0437	0,0637
700	0,0672	0,0700	0,0628	0,0959	—	0,468 ^{*)}	0,0477	0,0682
800	0,0733	0,0756	0,0666	0,1073	—	0,510 ^{*)}	0,0514	0,0717
900	0,0789	0,0808	0,0704	0,1229	—	0,551 ^{*)}	0,0550	0,0750
1000	0,0835	0,0858	0,0733	0,1372	—	0,5931	0,0582	0,0779
1200	0,0913	0,0951	0,0791	0,1582	—	0,676 ^{*)}	0,0647	0,0832

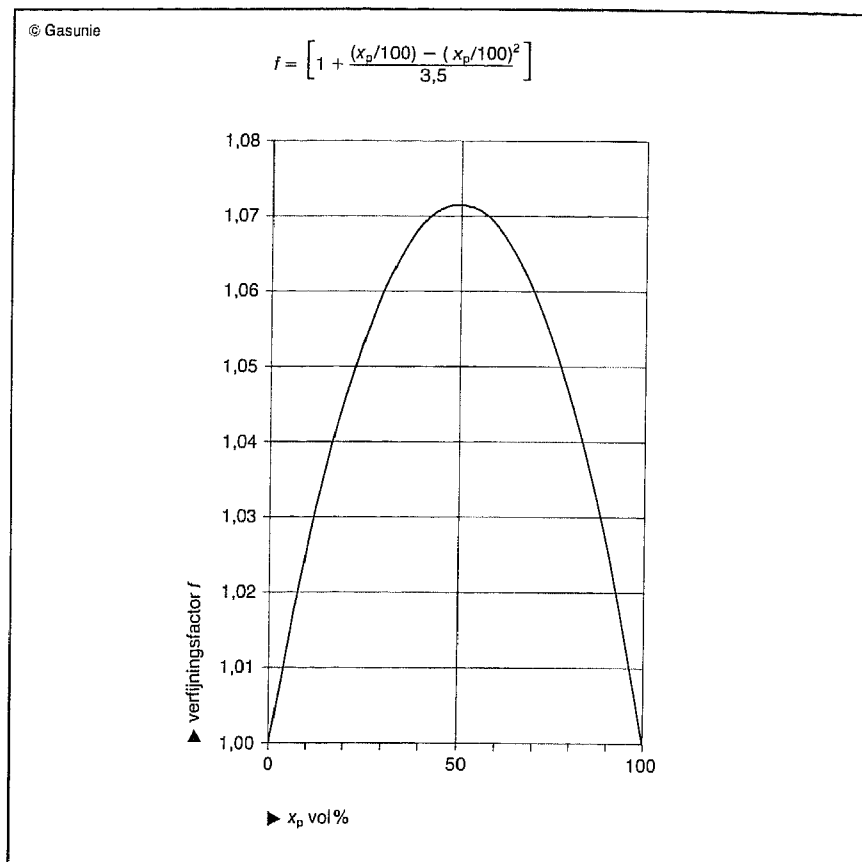
Voor SO₂^{*)} geldt: $\lambda = 0,0081$ W/m · K bij 0 °C

^{*)} door extrapolatie verkregen (zie figuur C 12a)

^{**)} zie lit (2)



Figuur C 12a. De warmtegeleidingscoëfficiënt λ als functie van de temperatuur T bij 101,325 kPa



Figuur C 12b. De verfijningsfactor f als functie van x_p

Van de in tabel C 12 genoemde componenten is alleen water 'polair' zodat voor x_p in bovenstaande vergelijking het volumepercentage H_2O in de verbrandingsgassen kan worden ingevoerd.

Lit (1) Basisgegevens over Gronings aardgas, N.V. Nederlandse Gasunie, 1968

Lit (2) VDI-Wärmeatlas, 1963

Lit (3) H. Lehmann/Wärmeleitfähigkeit von Gasgemischen, Wärmetechnischen Berechnungsbüro der VEB Leunawerke 'Walter Ulbricht'

C 13 THEORETISCHE VLAMTEMPERATUUR

Indien geen rekening wordt gehouden met dissociatie – dit is het uiteenvallen van een aantal gasmoleculen in andere moleculen, atoomgroepen, ionen en atomen (de zogenaamde vrije radicalen) als gevolg van hoge gastemperaturen ($> 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) – kan de vlamtemperatuur (theoretische) worden berekend uit:

$$I = H_i = q_{\text{tot}} \cdot c_{\text{pm}} \cdot T \quad (\text{zie C 6})$$

of

$$\frac{H_i}{q_{\text{tot}}} = c_{\text{pm}} \cdot T$$

waarin:

T = theoretische vlamtemperatuur $^{\circ}\text{C}$

$I = H_i$ = warmte-inhoud (voelbare warmte) van de verbrandingsgassen (zie C 6) kJ/m^3

Bij volledige verbranding van 1 m^3 gas is deze warmte-inhoud gelijk aan de calorische onderwaarde (zie C 1)

c_{pm} = gemiddelde soortelijke warmte bij constante druk over het temperatuurtraject $(0 - T)\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zie C 6) $\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}$

q_{tot} = hoeveelheid verbrandingsgassen (zie C 4) $\text{m}^3/\text{m}^3\text{ gas}$.

Daar c_{pm} een functie is van T kan bovenstaande vergelijking alleen door 'trial and error' worden opgelost, waarbij figuur C 13 als hulpmiddel kan worden gebruikt.

Voorbeeld: Gronings aardgas (zie tabel A 9)

H_i = $31,678\text{ MJ/m}^3$ gas (zie tabel C 1b)

q_{tot} = $9,4862\text{ m}^3/\text{m}^3$ gas (zie tabel C 4c)

De waarde van H_i/q_{tot} bedraagt dus $3,34\text{ MJ/m}^3$ (zie figuur C 13).

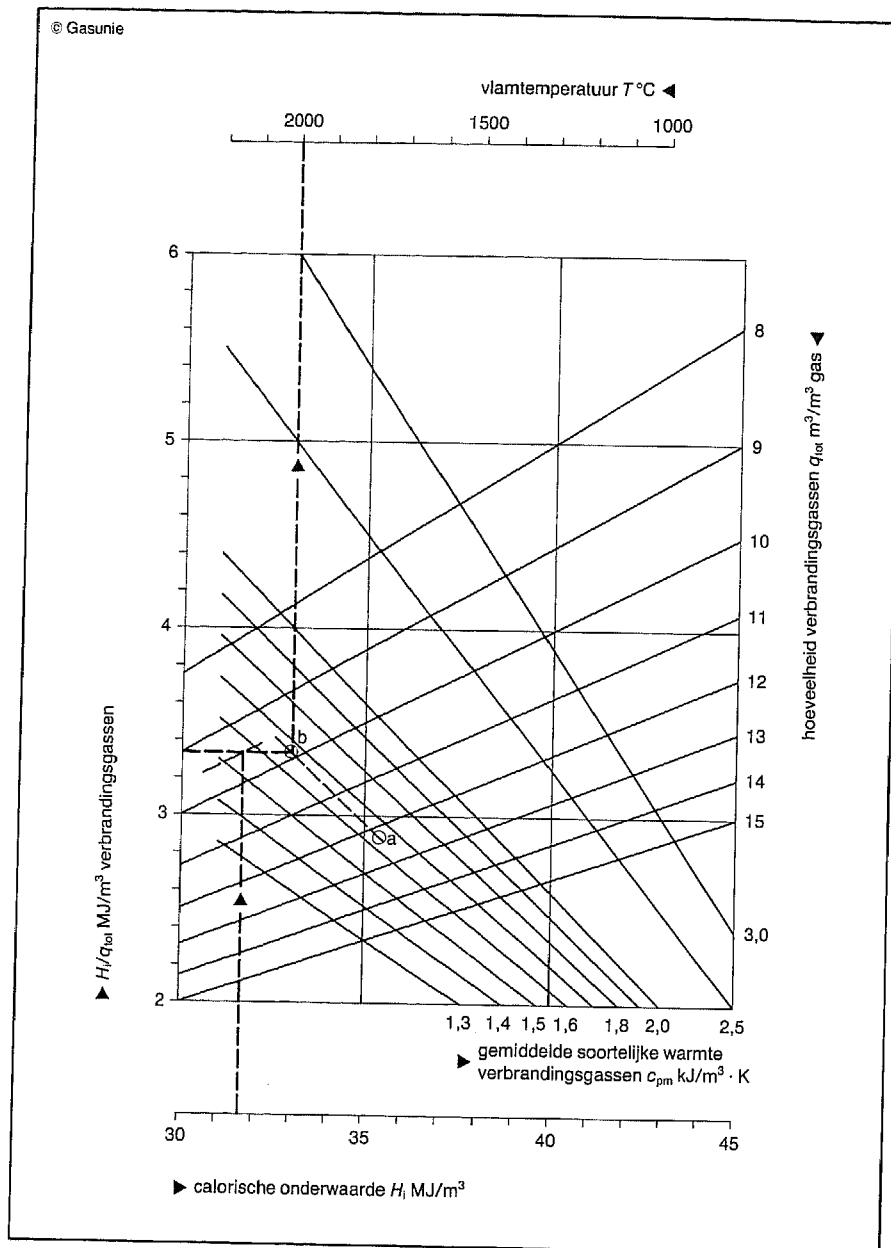
Uit lit (1) wordt gevonden:

a. $c_{\text{pm}} = 1,641\text{ kJ/m}^3$ bij $T = 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $n = 1$

b. $c_{\text{pm}} = 1,667\text{ kJ/m}^3$ bij $T = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $n = 1$.

Het snijpunt van de rechte door a – b en de lijn $H_i/q_{\text{tot}} = 3,34$ levert een waarde $T = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ op. Dit is toevallig de waarde die uit punt b volgt.

Lit (1) Basisgegevens over Gronings aardgas, N.V. Nederlandse Gasunie, 1968



Figuur C 13. De vlamtemperatuur T als functie van de calorische onderwaarde H_i , de gemiddelde soortelijke warmte c_{pm} en de totale hoeveelheid verbrandingsgassen q_{tot}

C 14 WARMTEOVERDRACHTSCOEFFICIENT VAN VERBRANDINGS-GASSEN

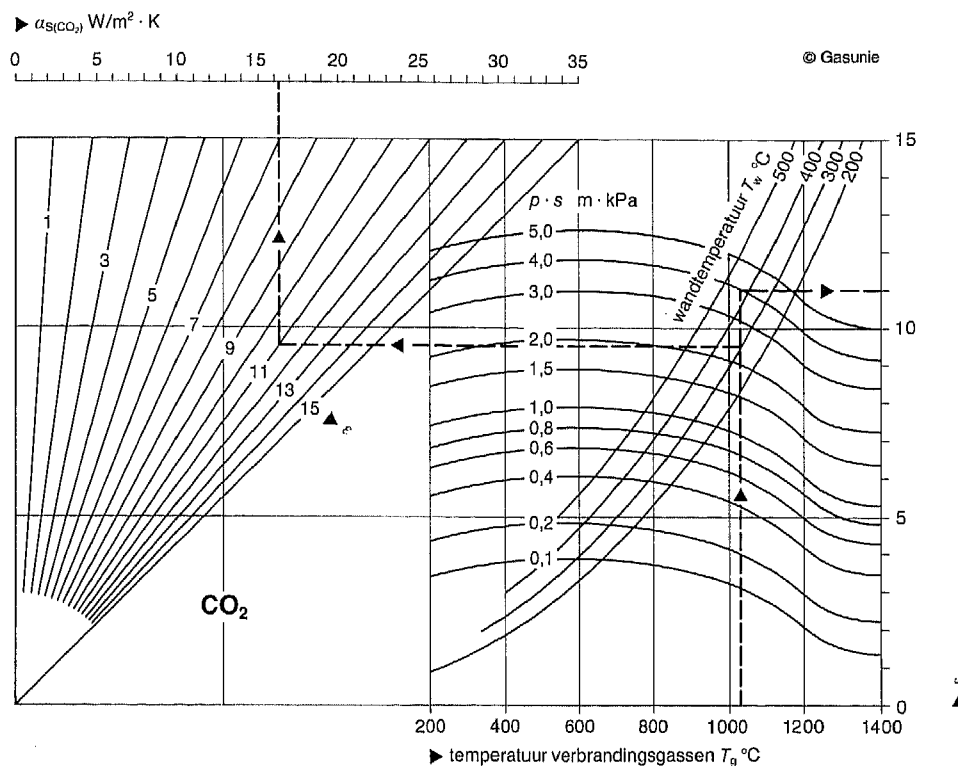
De warmteoverdrachtscoëfficiënt α_{tot} wordt gegeven door:

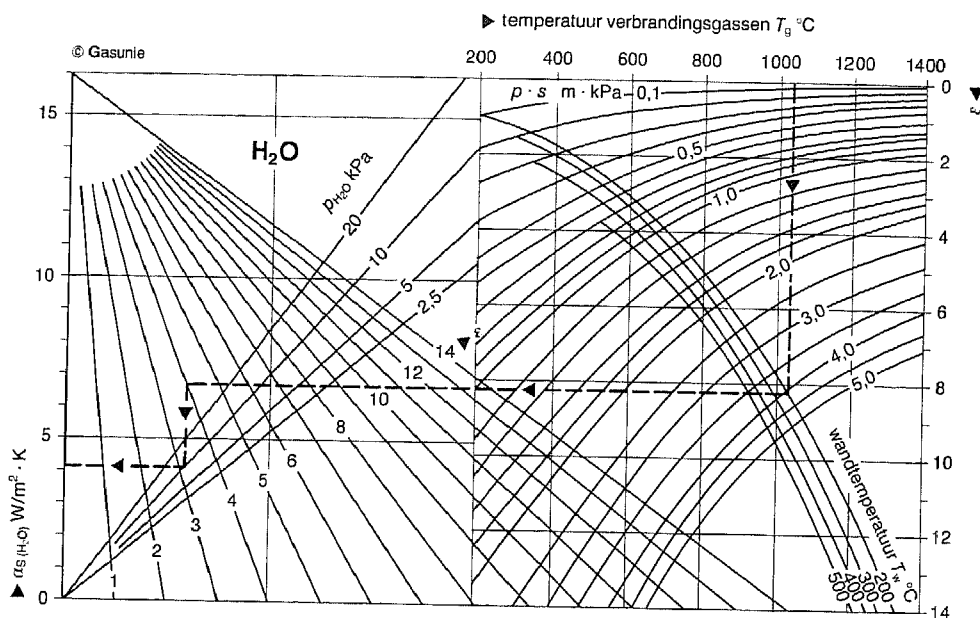
$$\alpha_{\text{tot}} = \alpha_c + \alpha_s$$

De convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt α_c kan veelal worden berekend uit een aantal formules, die slechts onder bepaalde voorwaarden geldig zijn. Hierop zal niet verder worden ingegaan. Voor de berekening van de warmteoverdracht door straling kan gebruik worden gemaakt van eenvoudige, empirische formules. Met de hierna beschreven methode is het mogelijk de stralingscoëfficiënt α_s (een schijnbare warmteoverdrachtscoëfficiënt voor straling) te bepalen.

Gassen zijn selectieve stralers, dat wil zeggen zij stralen of absorberen slechts in bepaalde golflengtebereiken. Bovendien zijn er slechts twee gassen waarmee bij stralingsverschijnselen in hoofdzaak rekening dient te worden gehouden, namelijk H_2O en CO_2 . Beide gassen komen in de verbrandingsgassen voor. Figuur C 14a en

Figuur C 14a. De stralingscoëfficiënt van CO_2 $\alpha_{s(\text{CO}_2)}$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T_g , de wandtemperatuur T_w , de partiële CO_2 -druk p en de stralende laagdikte s





Figuur C 14b. De stralingscoëfficiënt van H_2O $\alpha_{s(H_2O)}$ als functie van de verbrandingsgastemperatuur T_g , de wandtemperatuur T_w , de partiële H_2O -druk p en de stralende laagdikte s

C 14b (lit (1)) geven α_s voor respectievelijk CO_2 en H_2O als functie van T_g , T_w , p en s , waarbij:

α_s	= stralingscoëfficiënt voor CO_2 of H_2O	W/m ² · K
T_g	= temperatuur verbrandingsgassen	°C
T_w	= wandtemperatuur	°C
p	= partiële druk van CO_2 of H_2O	kPa
s	= stralende laagdikte	m.

De partiële druk p van CO_2 en H_2O in de verbrandingsgassen kan worden berekend uit:

$$\frac{p}{p_{\text{tot}}} = \frac{q}{q_{\text{st}} + (n-1)I}$$

waarin:

p	= partiële druk van CO_2 respectievelijk H_2O	kPa
p_{tot}	= totale druk van de verbrandingsgassen (veelal 101,325 kPa)	kPa
q	= hoeveelheid ontwikkelde CO_2 respectievelijk H_2O (zie C 4)	m ³ /m ³ gas

q_{st}	= hoeveelheid verbrandingsgassen bij stoichiometrische ($n = 1$) verbranding (zie C 4)	m^3/m^3 gas
n	= luchtfactor ($(n - 1) =$ luchtvermaat)	
l	= stoichiometrische luchtbehoefte (zie C 3)	m^3/m^3 gas.

Voor α_s geldt:

$$\alpha_s = \alpha_{s(CO_2)} + \alpha_{s(H_2O)}$$

Voor de laagdikte s geldt (zie lit (2)):

$$s = f \cdot D$$

waarin:

f	= factor, die de vorm van het gaslichaam in rekening brengt	
D	= pijp- of vuurhaarddiameter	m.

Tabel C 14 geeft enkele waarden voor de factor f (voor pijpen $f = 0,9$). Voor willekeurig gevormde gaslichamen kan gebruik worden gemaakt van de volgende vergelijking voor s (zie lit (3)):

$$s = 3,25 \frac{V}{F}$$

waarin:

V	= volume	m^3
F	= totale wandoppervlak	m^2 .

Tabel C 14: vormconstante voor enkele 'gaslichamen'

vorm gaslichaam	f
oneindig lange cilinder met diameter D (straling op de wand)	0,9
oneindig lange cilinder met diameter D (straling op midden grondvlak)	0,9
cilinder waarvoor geldt $h = D$ (straling op omringend oppervlak)	0,6
cilinder waarvoor geldt $h = D$ (straling op midden grondvlak)	0,77

Lit (1) W. Gumz/Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik, 3. Aufl., Berlin, 1962

Lit (2) Schack/Der Industrielle Wärmeübergang, 6. Aufl., Düsseldorf, 1962

Lit (3) Claus/Warmteoverdracht door straling in met gasgestookte vuurhaarden, Verwarming en Ventilatie, dec. 1964, nr. 12

C 15 EXPLOESIEGRENZEN EN ZELFONTBRANDING VAN GASSEN**C 15a Algemeen**

Figuur C 15a – samengesteld met gegevens uit diverse literatuurbronnen – geeft een beeld van de mogelijke reacties van een methaan-luchtmengsel. In het gebied tussen de 'onderste en bovenste explosiegrens' (zie A 5l) en beneden de 'zelfontbrandings-temperatuur' (zie A 5u) zal het gas-luchtmengsel tot explosie komen, wanneer het op de een of andere wijze tot ontbranding wordt gebracht. In het gebied tussen de 'onderste en bovenste explosiegrens' en boven de 'zelfontbrandingstemperatuur' treedt zelfontbranding op.

Tabel C 15a geeft de explosiegrenzen in lucht en zuurstof en de zelfontbrandings-temperatuur voor pure gassen (zie lit (2) en (5)). De hoogste temperatuur die bij de verbranding optreedt (theoretische vlamtemperatuur) – hierbij wordt geen rekening gehouden met eventuele dissociatie van het brandbare gas – wordt gegeven door de lijnen boven de 'zelfontbrandingstemperatuur'.

Algemeen geldt, dat wanneer een brandbaar gas met lucht of zuurstof in een gesloten ruimte wordt samengebracht, er een exotherme reactie zal optreden tussen het brandbare gas en de aanwezige zuurstof. De reactiesnelheid is een functie van de mengseltemperatuur.

Bij kamertemperatuur verloopt deze reactie – de zogenaamde 'langzame verbranding' – zo goed als onmerkbaar. Bij toenemende temperatuur neemt ook de reactiesnelheid toe.

Bij het bereiken van de 'zelfontbrandingstemperatuur' komt het gasmengsel spontaan tot ontbranding, indien tenminste de gas-luchtverhouding binnen bepaalde grenzen ligt (zie figuur C 15a).

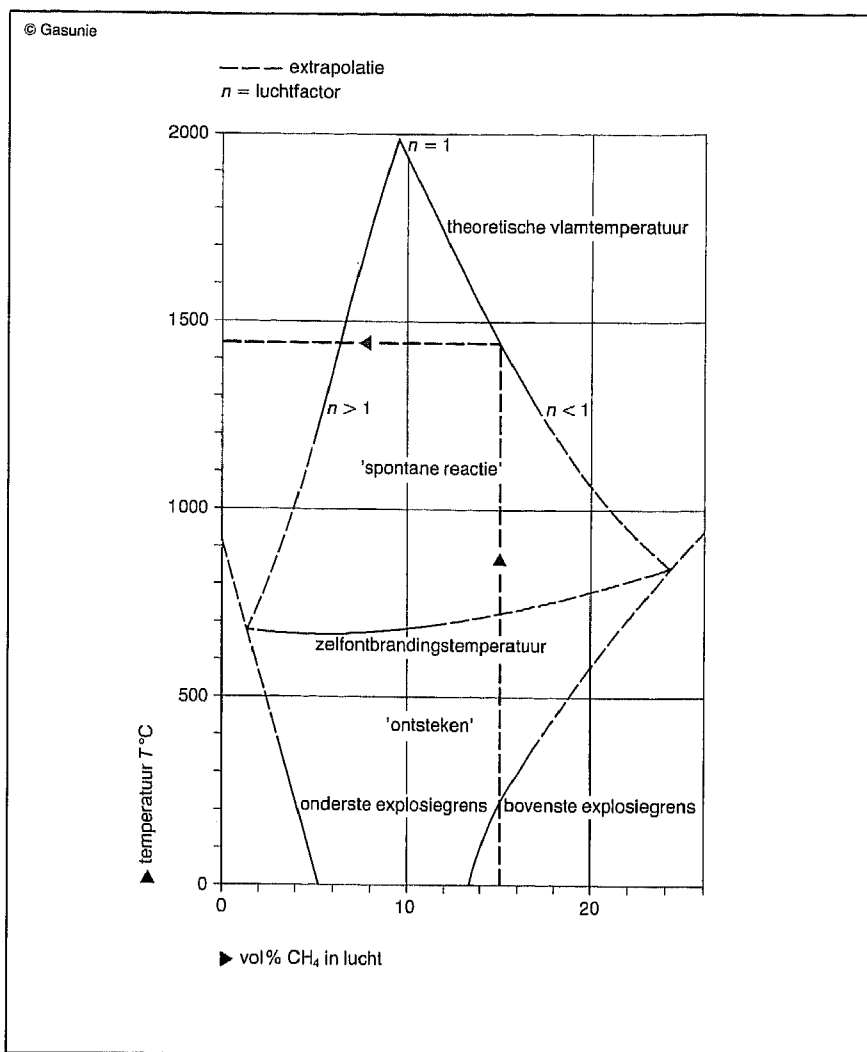
Ligt de temperatuur van het gasmengsel beneden de 'zelfontbrandingstemperatuur', dan zal dit mengsel op de een of andere wijze ontstoken moeten worden om tot een 'explosie' te komen. Ook hier geldt, dat de gas-luchtverhouding binnen bepaalde grenzen moet liggen (zie figuur C 15a). Onder 'explosie' wordt hier verstaan 'deflagratie' (zie A 5m) – een exotherme reactie, die verloopt met een snelheid kleiner dan de heersende geluidssnelheid.

Naast deflagratie staat detonatie (zie A 5n); dit is een exotherme reactie, waarbij schokgolven optreden en waarbij het verbrandingsfront zich voortplant met een snelheid gelijk aan of groter dan de heersende geluidssnelheid. De hierbij optredende explosiedrukken liggen aanzienlijk hoger dan voor deflagratie het geval is (zie lit (1) en (3)).

Een aantal gassen en dampen reageert – vóór het bereiken van de zelfontbrandings-temperatuur – met een zogenaamde 'koude vlam' (nauwelijks zichtbare vlam).

Elk brandbaar gas bezit twee grenzen, de 'onderste' en de 'bovenste' explosiegrens (zie A 5l), meestal uitgedrukt in volumeprocenten brandbaar gas in lucht of zuurstof (zie tabel C 15a). Ligt de gas-luchtverhouding binnen genoemde grenzen, dan zal na ontsteking voldoende warmte worden ontwikkeld om het gas-luchtmengsel zelfstandig verder te doen branden (zie lit (2)).

De ligging van de explosiegrenzen van een gasmengsel is van een aantal factoren



Figuur C 15a. Explosiegrenzen, zelfontbrandingstemperatuur en vlamtemperatuur van CH_4 als functie van het gehalte CH_4 in lucht bij 101,325 kPa

afhankelijk en kan worden gemeten of berekend met behulp van empirisch bepaalde formules.

De snelheid waarmee een vlamfront zich verplaatst – verbrandingssnelheid – is onder andere afhankelijk van de temperatuur en de gassamenstelling. Er bestaan diverse meetmethoden en empirische formules om de verbrandingssnelheid van een gasmengsel te bepalen.

Tabel C 15a: explosiegrenzen in lucht en zuurstof bij 20 °C en 101,325 kPa en de zelfontbrandingstemperatuur

1 methaan
 2 ethaan
 3 propaan
 4 2-methylpropaan (isobutaan)
 5 n-butaan
 6 2,2-dimethylpropaan
 7 2-methylbutaan (isopentaan)
 8 n-pentaan
 9 2,2-dimethylbutaan
 10 2,3-dimethylbutaan
 11 3-methylpentaan
 12 2-methylpentaan (isohexaan)
 13 n-hexaan
 14 2-methylhexaan (isoheptaan)
 15 n-heptaan
 16 n-octaan
 17 n-nonaan
 18 n-decaan
 19 n-undecaan
 20 n-dodecaan
 21 n-tridecaan
 22 n-tetradecaan
 23 cyclohexaan
 24 methylcyclohexaan
 25 benzeen

nr.	component	chemische formule	explosiegrenzen (20 °C; 101,325 kPa)				zelfontbrandings-temperatuur K
			vol % gas in lucht		vol % gas in zuurstof		
			onderste L_o	bovenste L_b	onderste L_o	bovenste L_b	
1	methaan	CH_4	5,3	14,0	5,1	61,0	813
2	ethaan	C_2H_6	3,0	12,5	3,0	66,0	788
3	propaan	C_3H_8	2,2	9,5	2,3	55,0	723
4	2-methylpropaan (isobutaan)	$i-C_4H_{10}$	1,8	8,4	1,8	48,0	733
5	n-butaan	$n-C_4H_{10}$	1,9	8,5	1,8	49,0	678
6	2,2-dimethylpropaan	C_5H_{12}	1,4	7,5			723
7	2-methylbutaan (isopentaan)	$i-C_5H_{12}$	1,4	7,7			533
8	n-pentaan	$n-C_5H_{12}$	1,5	7,8			
9	2,2-dimethylbutaan	C_6H_{14}	1,2	7,0			
10	2,3-dimethylbutaan	C_6H_{14}	1,2	7,0			
11	3-methylpentaan	C_6H_{14}	1,2	7,0			
12	2-methylpentaan (isohexaan)	$i-C_6H_{14}$	1,2	7,0			
13	n-hexaan	$n-C_6H_{14}$	1,2	7,5			498
14	2-methylhexaan (isoheptaan)	$i-C_7H_{16}$	1,1	6,7			488
15	n-heptaan	$n-C_7H_{16}$	1,2	6,7			493
16	n-octaan	$n-C_8H_{18}$	1,0				478
17	n-nonaan	$n-C_9H_{20}$	0,85				483
18	n-decaan	$n-C_{10}H_{22}$	0,75	5,6			478
19	n-undecaan	$n-C_{11}H_{24}$					483
20	n-dodecaan	$n-C_{12}H_{26}$	0,6				478
21	n-tridecaan	$n-C_{13}H_{28}$					473
22	n-tetradecaan	$n-C_{14}H_{30}$	0,5				518
23	cyclohexaan	C_6H_{12}	1,3	8,0			523
24	methylcyclohexaan	C_7H_{14}	1,1	6,7			833
25	benzeen	C_6H_6	1,4	7,1			

26	tolueen	C ₇ H ₈	1,2	7,1			753
27	xyleen (o)	C ₈ H ₁₀	1,0	6,7			703
28	methylmercaptaan	CH ₃ SH					
29	ethylmercaptaan	C ₂ H ₅ SH	2,8	18,0			573
30	propylmercaptaan	C ₃ H ₇ SH					
31	carbonylsulfide	COS	4,0	44,0			
32	zwavelwaterstof	H ₂ S	—	—			—
33	zwaveldioxyde	SO ₂	—	—			
34	etheen	C ₂ H ₄	3,1	32,0	3,0	—	763
35	propeen	C ₃ H ₆	2,4	10,3	2,1	80,0	733
36	1-buteen	C ₄ H ₈	1,6	9,3	1,8	53,0	658
37	1-penteen	C ₅ H ₁₀				58,0	
38	1,2-butadiene	C ₄ H ₆					
39	1-butyne	C ₄ H ₆					
40	methanol	CH ₃ OH	6,7	36,0			658
41	ethanol	C ₂ H ₅ OH	3,3	19,0			638
42	argon	Ar	—	—	—	—	—
43	helium	He	—	—	—	—	—
44	kooldioxyde	CO ₂	—	—	—	—	—
45	kooldimonoxyde	CO	12,5	74,0	15,5	94,0	
46	waterstof	H ₂	4,0	75,0	4,0	94,0	673
47	stikstof	N ₂	—	—	—	—	—
48	zuurstof	O ₂	—	—	—	—	—
49	stikstofmonoxyde	NO	—	—	—	—	—
50	stikstofdioxyde	NO ₂	—	—	—	—	—
51	waterdamp	H ₂ O	—	—	—	—	—
52	lucht (droog)	—	—	—	—	—	—

C 15b Beïnvloedingsgrootheden

Het al of niet explosief zijn van een gas-luchtmengsel wordt door een aantal factoren beïnvloed:

1. *samenstelling*. Inerte componenten verkleinen het explosiegebied (dit is het gebied tussen de bovenste en onderste explosiegrenzen – zie figuur C 15a).
2. *temperatuur*. Bij toenemende temperatuur wordt het explosiegebied groter. Bij het bereiken van de zelfontbrandingstemperatuur zal het gas-luchtmengsel spontaan – zonder energietoevoer van buiten af – ontbranden.
3. *druk*. De normale veranderingen in de barometerstand hebben geen merkbare invloed op de explosiegrenzen. Voor geringe drukken ($\ll 101,325$ kPa) vallen de explosiegrenzen samen. Drukverhoging geeft een verwijding van de explosiegrenzen te zien, behalve voor CO-luchtmengsels, waarvoor juist een vernauwing optreedt (zie lit (2)).
4. *vochtigheid*. De toename van het watergehalte (vochtigheid) brengt de explosiegrenzen dichterbij elkaar, waarbij de invloed op de bovenste explosiegrens het grootste is. Ook hier worden CO-luchtmengsels het sterkst beïnvloed (zie lit (2)).
5. *ontstekingsenergie*. De hoeveelheid ontstekingsenergie heeft invloed op de explosiegrenzen. In de literatuur is hierover weinig te vinden.
6. *turbulentie*. De invloed van turbulentie op de explosiegrenzen wordt in de literatuur slechts terloops genoemd. Deze invloed wordt algemeen verwaarloosd.
7. *vorm verbrandingsruimte*. De explosiegrenzen worden veelal bepaald met behulp van een buis, waarbij diameter en stand worden gevarieerd. Tegenwoordig worden veel experimenten uitgevoerd in een bolvormige verbrandingskamer. De voordelen liggen in de kleinere warmteverliezen naar buiten en minder wandinvloeden op de vlamvoortplanting.

C 15c Berekenen van de explosiegrenzen

Het meten van de explosiegrenzen van een gasmengsel is een tijdrovende en kostbare zaak. In de praktijk wordt daarom gebruik gemaakt van empirische formules, die het mogelijk maken de explosiegrenzen te berekenen uit de samenstelling van het gasmengsel. De te bereiken nauwkeurigheid is ruim voldoende, daar in de praktijk meestal ruime veiligheidsmarges worden aangehouden.

Le Chatelier (zie lit (2)) geeft voor de explosiegrenzen van een gasmengsel onder atmosferische druk de volgende betrekking:

$$L_m = \frac{100}{\sum x_i/L_i} \quad \text{vol \%}$$

waarin:

- L_m = bovenste respectievelijk onderste explosiegrens van gasmengsel in vol % gas in lucht
 L_i = bovenste respectievelijk onderste explosiegrens component i in vol % gas in lucht (zie tabel C 15a)
 x_i = vol % component i in gasmengsel.

Bovengenoemde formule geldt niet zonder meer voor elk gewenst gasmengsel. Vooral de aanwezigheid van dampen – bijvoorbeeld aceton (C_3H_6O) – heeft grote invloed op het eindresultaat (zie C 15a – koude vlam).

Voor aardgassen geeft deze formule veelal goede resultaten. Ook voor aardgassen waarin inerten (CO_2 en N_2) en eventueel zuurstof (O_2) voorkomen, kan gebruik worden gemaakt van bovenstaande formule. De berekening loopt dan als volgt (zie voorbeeld):

- indien zuurstof (O_2) aanwezig is, wordt het gas eerst 'lucht vrij' gemaakt, waarna de samenstelling opnieuw wordt berekend
- de brandbare componenten worden willekeurig gekoppeld aan de aanwezige inerten. Lit (2), (4) en (5) geven voor een aantal combinaties van 'brandbare gassen en inerten' de explosiegrenzen in lucht (zie figuren C 15b en C 15c).
- voor deze combinaties (brandbare gassen en inerten) en de overblijvende componenten kunnen de explosiegrenzen in lucht worden berekend met de formule van Le Chatelier.

Tabel C 15b: berekening explosiegrenzen in lucht van Gronings aardgas

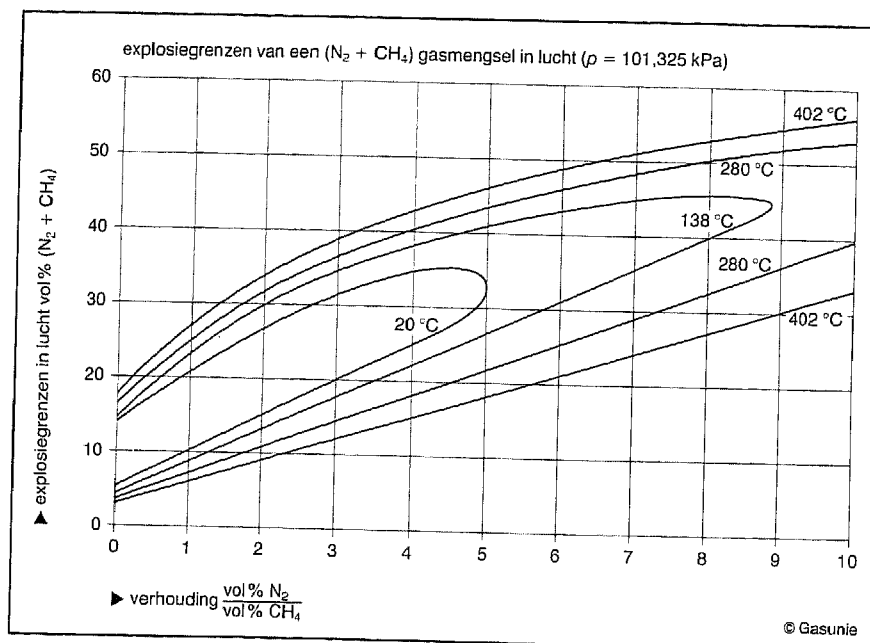
component	chemische formule	samenstelling	luchtvrije samenstelling
methaan	CH_4	81,30	81,34
ethaan	C_2H_6	2,85	2,85
propaan	C_3H_8	0,37	0,37
butaan	C_4H_{10}	0,14	0,14
pentaan	C_5H_{12}	0,04	0,04
hexaan	C_6H_{14}	0,05	0,05
stikstof	N_2	14,35	14,32
zuurstof	O_2	0,01	–
kooldioxyde	CO_2	0,89	0,89
		100	100

Voorbeeld: de hoeveelheid lucht ($O_2 + N_2$) die door 0,01 vol % zuurstof (O_2) wordt vertegenwoordigd, bedraagt 0,05 vol %, namelijk:

0,01 vol % O_2

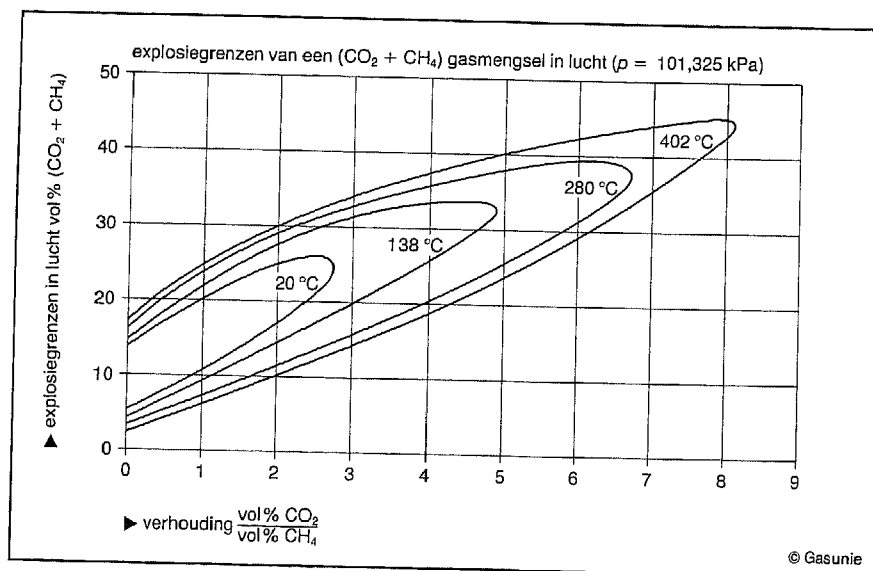
0,04 vol % N_2 .

Het luchtvrije gasmengsel bedraagt dus 99,95 vol % van het oorspronkelijke gasmengsel. Voor het N_2 -gehalte ziet de berekening er als volgt uit:



△ Figuur C 15b. Explosiegrenzen van een ($N_2 + CH_4$) gasmengsel als functie van de mengseltemperatuur bij 101,325 kPa

▽ Figuur C 15c. Explosiegrenzen van een ($CO_2 + CH_4$) gasmengsel als functie van de mengseltemperatuur bij 101,325 kPa



rest in gasmengsel – $(14,35 - 0,04) = 14,31$ vol %.

Na aanvulling tot 100 procent ziet 'luchtvrige gasmengsel' eruit zoals in tabel C 15b gegeven.

Tabel C 15c geeft een overzicht van de combinaties 'brandbaar gas en inert' en de resterende brandbare componenten met de erbij behorende explosiegrenzen in lucht.

Tabel C 15c: berekening explosiegrenzen in lucht van Gronings aardgas

brandbare componenten		inerten in vol %		Σx_i	verhouding	explosiegrenzen*)	
component	vol %	N ₂	CO ₂	vol %	inert/ brandbaar	L _{b,i}	L _{o,i}
CH ₄	80	14,32		94,32	0,18	15,0**)	6,1**)
CH ₄	1,34		0,89	2,23	0,66	18,1***)	8,9***)
C ₂ H ₆	2,85			2,85		12,5	3,0
C ₃ H ₈	0,37			0,37		9,5	2,2
C ₄ H ₁₀	0,14			0,14		8,5	1,9
C ₅ H ₁₂	0,04			0,04		7,8	1,5
C ₆ H ₁₄	0,05			0,05		7,5	1,2
				100			

Uit tabel C 15c kan voor Gronings aardgas worden berekend:

$$L_o = \frac{100}{\Sigma x_i / L_{o,i}} = 5,9 \text{ vol \% gas in lucht}$$

$$L_b = \frac{100}{\Sigma x_i / L_{b,i}} = 14,9 \text{ vol \% gas in lucht.}$$

Dit berekende resultaat moet nog worden gecorrigeerd voor de aanwezigheid van 0,01 vol % zuurstof (O₂) in het oorspronkelijke gasmengsel. De werkelijke waarden bedragen:

$$L_o = 5,9 \cdot 100 / 99,95^{****}) = 5,9 \text{ vol \% gas in lucht}$$

$$L_b = 14,9 \cdot 100 / 99,95^{****}) = 14,9 \text{ vol \% gas in lucht.}$$

De invloed van 0,01 vol % O₂ in het gasmengsel is dus verwaarloosbaar.

Opmerking:

1. Wanneer het niet mogelijk is de 'brandbare componenten' zodanig te koppelen aan de 'inerten' dat hieruit weer explosieve mengsels ontstaan (zie voorbeeld), dan is het oorspronkelijke gasmengsel *niet* explosief.

*) zie tabel C 15a

**) zie figuur C 15b (lit (4))

***)) zie figuur C 15c (lit (4))

****)) luchtvrige gasmengsel

2. Wanneer het 'luchtvrije' gasmengsel wel explosief blijkt, maar de explosiegrenzen na de correctie voor de aanwezige zuurstof boven 100 % komen te liggen, dan is het oorspronkelijke gasmengsel *niet* explosief, daar het reeds te veel lucht bevat.

3. Wanneer de onderste explosiegrens van het oorspronkelijke gasmengsel 'beneden' 100 % ligt, maar de bovenste explosiegrens 'boven' 100 % ligt, dan is het gasmengsel zonder meer explosief.

C 15d Invloed druk en temperatuur op de explosiegrenzen

Voor een aantal brandbare gassen zijn empirische formules ontwikkeld, waarmee het mogelijk is de explosiegrenzen te berekenen als functie van druk of temperatuur. In de geraadpleegde literatuur zijn geen formules te vinden die de invloed van druk en temperatuur gelijktijdig in rekening brengen.

In lit (4) wordt wel aangetoond dat het mogelijk is de wet van Le Chatelier toe te passen voor het berekenen van de explosiegrenzen van gasmengsels als functie van de temperatuur (0 – 400 °C) bij een druk van 101,325 kPa.

Figuur C 15d geeft de resultaten voor Gronings aardgas (zie tabel C 15c) weer, waarbij gebruik wordt gemaakt van de figuren C 15b en C 15c en tabel C 15d.

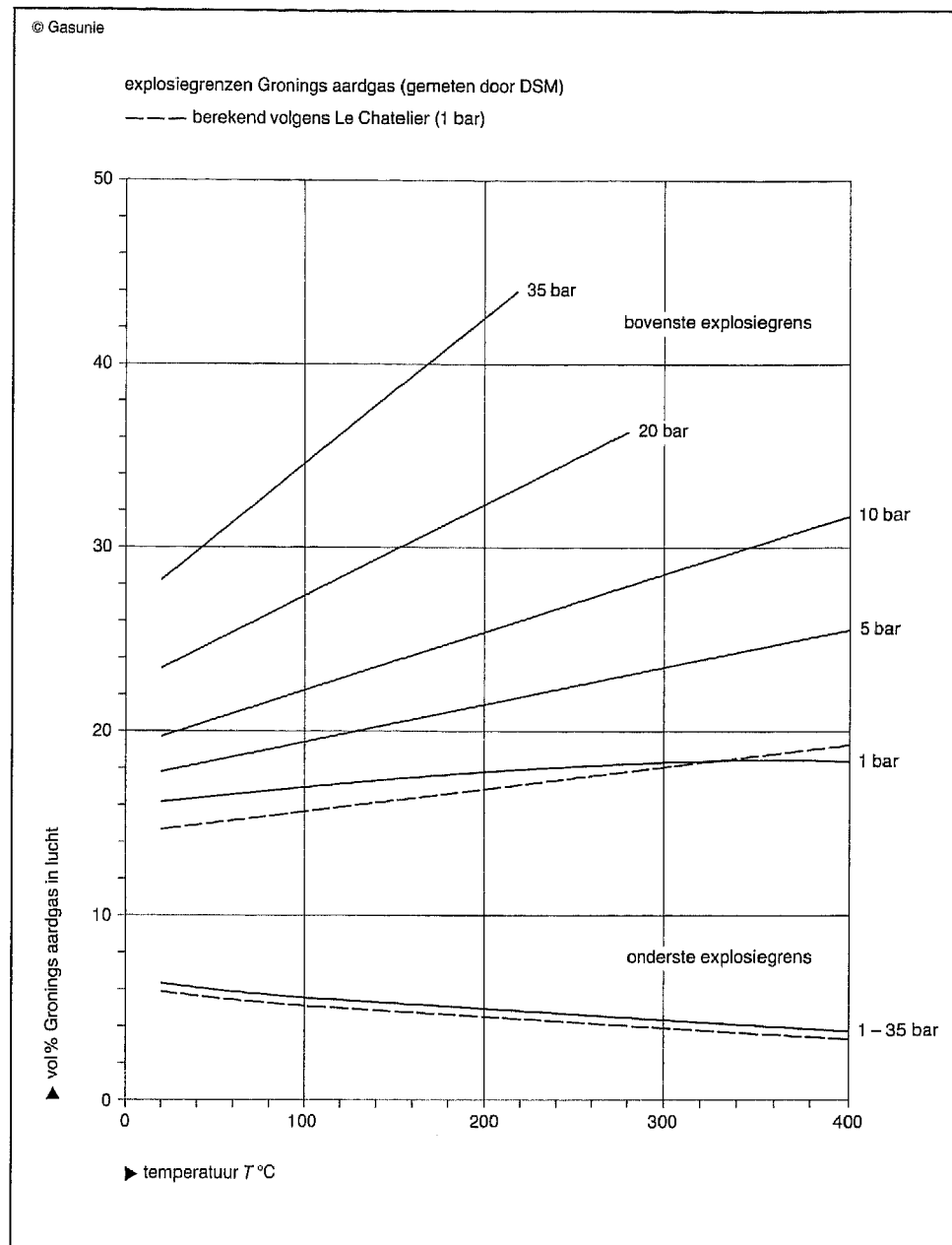
Tabel C 15d: explosiegrenzen in lucht bij 101,325 kPa en $20 \leq T \leq 402$ °C

component	chemische formule	138 °C		280 °C		402 °C	
		L_o	L_b	L_o	L_b	L_o	L_b
methaan	CH ₄	4,4	14,1	3,6	15,7	3,0	17,3
ethaan	C ₂ H ₆	2,5	12,3	2,1	14,1	1,7	16,0
propaan	C ₃ H ₈	2,1	9,3	1,8	9,7	1,3	11,1
butaan	C ₄ H ₁₀	1,6	7,9	1,4	7,8	1,2	7,5
etheen	C ₂ H ₄	2,5	20,8	2,0	27,3	1,5	34,7
propeen	C ₃ H ₆	2,1	10,7	1,6	11,4	1,4	12,8
koolmonoxyde	CO	16,2	77,0	12,7	81,3	10,8	85,2
waterstof	H ₂	3,6	75,4	3,1	82,3	2,7	86,5

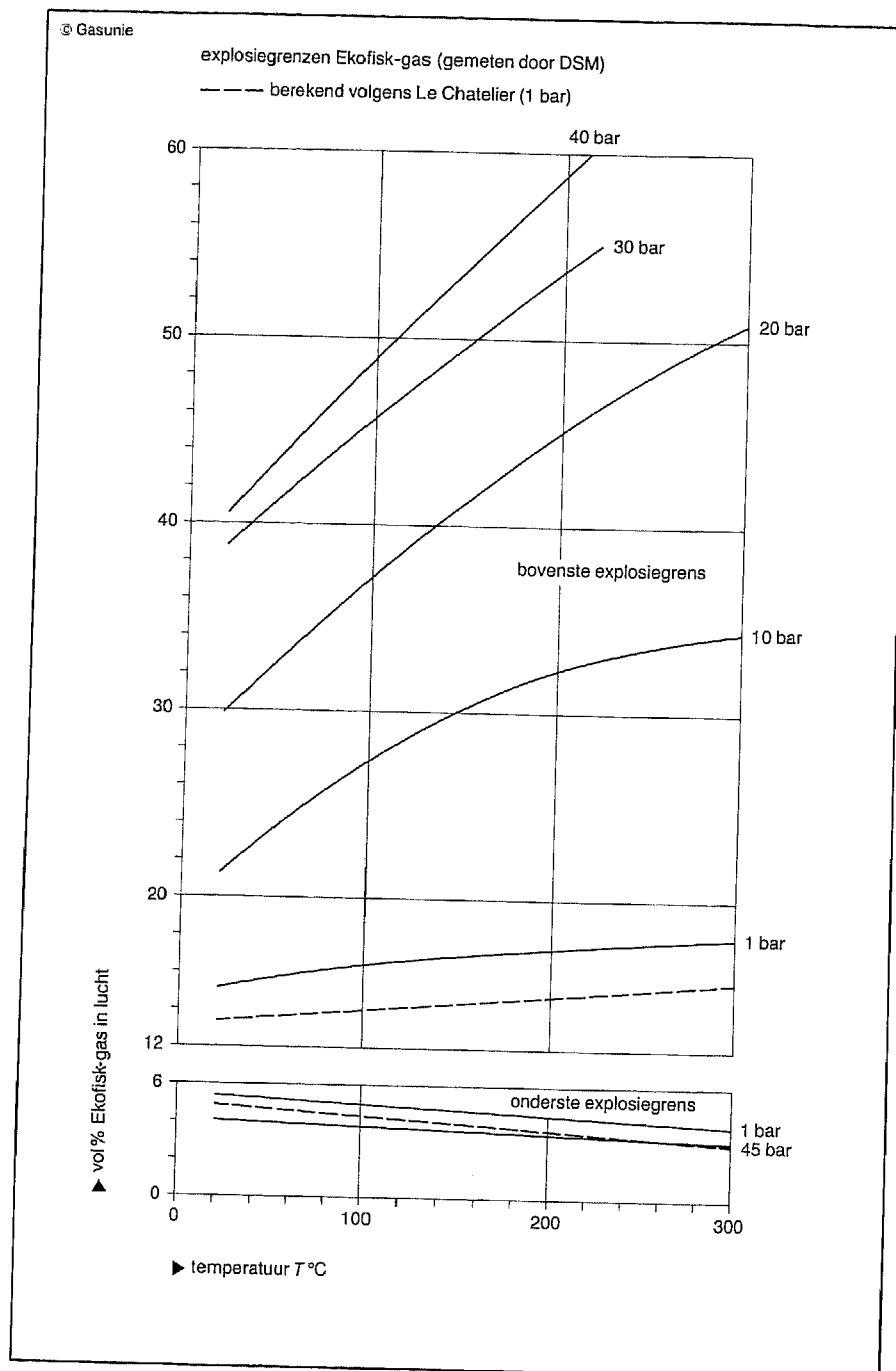
Opmerking: daar de explosiegrenzen voor de hogere temperaturen slechts tot en met C₄H₁₀ bekend zijn, worden alle componenten boven C₄H₁₀ tot C₄H₁₀ gerekend. Voor een aantal toepassingen – onder andere luchtinjectie in hoogcalorische gassen en toepassing van aardgas in gasmotoren – is de kennis van de explosiegrenzen als functie van druk en temperatuur vereist.

In opdracht van Gasunie werden door DSM metingen verricht aan twee aardgassen, namelijk Gronings aardgas – het meest voorkomende gas met een 'relatief' lage calorische waarde – en Ekofisk-gas – het gas met de hoogste calorische waarde. De figuren C 15d en C 15e geven de meetresultaten voor respectievelijk Gronings aardgas en Ekofisk-gas.

Tijdens de door DSM verrichte metingen van de explosiegrenzen van zowel



Figuur C 15d. Explosiegrenzen in lucht voor Gronings aardgas als functie van de absolute druk p en de temperatuur T



Gronings aardgas als Ekofisk-gas werd de meetploeg diverse malen 'verrast' door zelfontbrandingsverschijnselen van het gas-luchtmengsel. Verdere bestudering van dit probleem heeft slechts een beperkte hoeveelheid informatie opgeleverd over het optreden van zelfontbranding als functie van de gas-luchtverhouding en de druk- en temperatuurcondities. Deze beperking werd opgelegd door de toegepaste meetapparatuur.

Meer informatie hierover kan bij de N.V. Nederlandse Gasunie worden verkregen.

Lit (1) W. Maas/Explosies, de Veiligheid 46, 1970

Lit (2) H. F. Coward, G. W. Jones/Limits of flammability of gases and vapors, Bulletin 503, Bureau of Mines, 1952

Lit (3) B. Lewis, G. von Elbe/Combustion, flames and explosions of gases, New York, 1961

Lit (4) K. von Kwiatkowski/Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die Gültigkeit der Regel von Le Chatelier zur Berechnung der Grenzen der Flammenausbreitung von Brenngas-Luftgemischen, Dissertatie 1966

Lit (5) M. G. Zabetakis/Flammability characteristics of combustible gases and vapors, Bulletin 627, Bureau of Mines, 1965

◁ *Figuur C 15e. Explosiegrenzen in lucht voor Ekofisk-gas als functie van de absolute druk p en de temperatuur T*



Uitgave:
N. V. Nederlandse Gasunie
Postbus 19
9700 MA Groningen

Voor inlichtingen over 'Basisgegevens Aardgassen' kan men zich
wenden tot de afdeling Procestechniek, de heer T.M. Geerssen,
telefoon 050 - 21 23 21

December 1980