

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Luchtvaart- en
Ruimtevaarttechniek
Delft

Prins Maurits Laboratorium TNO
Organisatie voor Toegepast
Natuurwetenschappelijk Onderzoek
Rijswijk

Rapport LR- 552
Rapport PML 1988 - C 27
SFCC Publicatie no. 51

CALIBRATIE VAN SONISCHE MEET- EN REGELDOORSNEDE IN DE GASTOEVOERINSTALLATIE VOOR DE VASTE BRANDSTOF VERBRANDINGSKAMER

**G. Heppe
R.P. van den Berg**

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Luchtvaart- en
Ruimtevaarttechniek
Delft

Prins Maurits Laboratorium TNO
Organisatie voor Toegepast
Natuurwetenschappelijk Onderzoek
Rijswijk

Rapport LR- 552
Rapport PML 1988 - C 27
SFCC Publicatie no. 51

CALIBRATIE VAN SONISCHE MEET- EN REGELDOORSNEDE IN DE GASTOEVOERINSTALLATIE VOOR DE VASTE BRANDSTOF VERBRANDINGSKAMER

**G. Heppe
R.P. van den Berg**

SAMENVATTING

Door het Prins Maurits Laboratorium en de TU Delft is een apparaat ontwikkeld waarmee snel en nauwkeurig gasmassastromen kunnen worden geregeld en gemeten: een zogenaamde Sonische Meet- en RegelDoorsnede (SMRD). Er zijn drie SMRD's in gebruik: in de methaan-, lucht- en zuurstofleiding. Om met een SMRD de massastroom te kunnen meten en regelen, moet het verband tussen penstand en doorstroom oppervlak bekend zijn.

In dit rapport wordt een nieuwe snelle calibratie methode beschreven om tot dit verband tussen penstand en doorstrooppervlak te komen. Met deze nieuwe calibratie methode zijn de drie SMRD's gecalibreerd.

Het verband tussen penstand en massastroom blijkt door ten hoogste een tweede graads polynoom betrouwbaar weergegeven te worden terwijl de statische fout bij deze calibratie minder is dan 3,5 %.

NOTATIES

Romeinse symbolen:

Symbool	Grootheid	eenheid
A(k)	doorstroomoppervlakte	mm ²
B(x)	statische fout	%
m	massastroom	g/s
n	aantal experimenten	-
p(t)	totale druk	Mpa
R(s)	specifieke gasconstante	J/kg.K
t	toetsingsgrootheid voor de t-toets	-
T(t)	totale temperatuur	K
x(d)	peninsteeklengte	mm

Griekse symbolen:

Symbool	Grootheid	eenheid
Γ	VanderKerkhove funktie	-

Subriipten:

Aanduiding	Betekenis
()SMRD	betreffende de Sonische Meet- en Regel-Doorsnede
()SD	betreffende een Sonische Doorsnede

INHOUDSOPGAVE	Pag.
SAMENVATTING	1
NOTATIES	2
1. INLEIDING	4
2. CALIBRATIE VAN EEN SMRD MET BEHULP VAN EEN SONISCHE DOORSNEDE	5
2.1. Beschrijving van de SMRD	5
2.2. Calibratiemethode	6
3. UITVOERING VAN DE CALIBRATIES	8
3.1. Algemene opbouw van de proefopstelling	8
3.2. Calibratie zuurstof SMRD	11
3.2.1. Instelling van drukken en SMRD	11
3.2.2. Metingen en berekeningen	12
3.2.3. Bepaling van polynoom, statische fout- berekening	16
3.3. Calibratie methaan SMRD	21
3.3.1. Instelling van drukken en SMRD	21
3.3.2. Metingen en berekeningen	21
3.3.3. Bepaling van polynoom, statistische foutberekening	23
3.4. Calibratie lucht SMRD	27
3.4.1. Instelling van drukken en SMRD	27
3.4.2. Metingen en berekeningen	27
3.4.3. Bepaling van polynoom, statistische foutenberekening	29
4. CONCLUSIES	34
5. LITERATUUROVERZICHT	35

Bijlage 1

1. INLEIDING

Bij het Prins Maurits Laboratorium in Rijswijk, sectie raketvoortstuw-
wing, wordt onderzoek gedaan aan de zogenaamde Solid Fuel Combustion
Chamber (SFCC). Onderzocht worden het stromings- en verbrandingsgedrag
van de SFCC.

Hiervoor is een gastoevoersysteem gemaakt dat de verschillende gas-
stromen regelt. In dit systeem bevinden zich drie gastromen (lucht,
methaan en zuurstof) die nauwkeurig gemeten en geregeld dienen te
worden. Om dit te bereiken zijn in de betreffende leidingen Sonische
Meet- en RegelDoorsneden (SMRD) opgenomen.

Bij een sonische meet- en regeldoorsnede wordt de gasmassastroom geme-
ten door deze door een sonische doorsnede te laten stromen. Bij een
bekende doorstroomopening is uit de gemeten druk en temperatuur vóór
de doorstroomopening de gasmassastroom te berekenen. Door de druk voor
de sonische doorsnede te regelen met een reduceerventiel is een nauw-
keurige regeling van de gasmassastroom te realiseren.

Om de SMRD geschikt te maken voor een groot massastroombereik is deze
uitgerust met een conische pen welke in de doorstroomopening is ge-
positioneerd. Door deze pen te verplaatsen in de doorstroomopening kan
het doorstroomoppervlak worden veranderd. Bij het calibreren van de
SMRD wordt het doorstroomoppervlak als functie van de penstand be-
paald.

Het project "Investigation of a Solid Fuel Combustion Chamber" wordt
uitgevoerd door de afdeling Luchtvaart en Ruimtevaarttechniek aan de
Technische Universiteit Delft en het Prins Maurits Laboratorium TNO te
Rijswijk. Naast door de twee eerder genoemde instituten, wordt dit
onderzoek ook gefinancierd door de Stichting voor de Technische
Wetenschappen (STW), onder projectnummer DLR 15.0120.

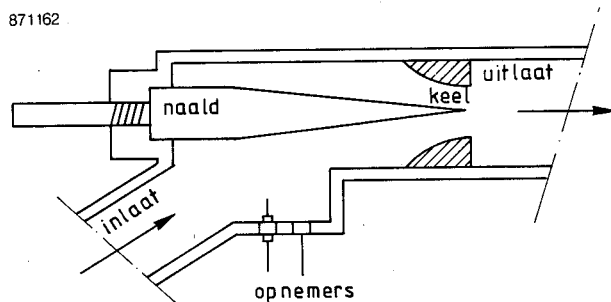
2. CALIBRATIE VAN EEN SMRD M.B.V. EEN SONISCHE DOORSNEDE

2.1. Beschrijving van de SMRD

De SMRD (zie figuur 1) bestaat uit:

- inlaat
- naald
- keel
- uitlaat
- opnemers (druk en temperatuur)

Voor een uitgebreid rapport over de ontwikkeling van de SMRD wordt verwezen naar [1].



Figuur 1. Dwarsdoorsnede van een SMRD.

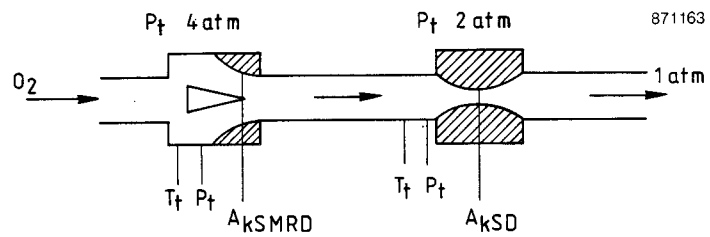
Wanneer er in de SMRD sonische condities heersen, geldt voor de massastroom door de SMRD:

$$\dot{m}_{SMRD} = \frac{\Gamma \cdot A_k \cdot P_{t, SMRD}}{R_s \cdot T_{t, SMRD}} \quad (1)$$

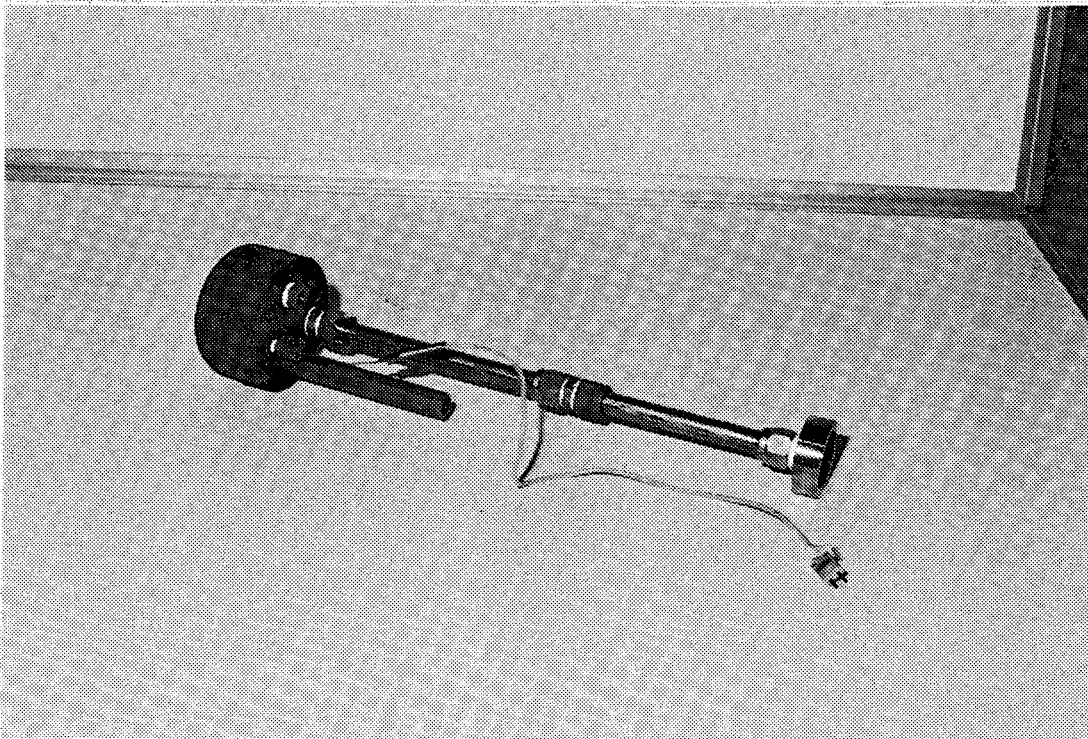
Voor de gebruikte gassen is een verhouding tussen druk voor en na de SMRD van een factor twee voldoende voor het berekenen van sonische condities.

2.2. Calibratie methode

Door achter de SMRD een sonische doorsnede met bekende keeldiameter te plaatsen, zie figuur 2 en 3 is de massastroom door de SMRD te bepalen.



Figuur 2. Calibratie van een SMRD met behulp van een sonische doorsnede



Figuur 3. Foto van het calibratievatje met de sonische doorsnede

Wel dient er voor gezorgd te worden dat zowel in de SMRD als in de sonische doorsnede sonische condities heersen. Dus beide drukvallen over de SMRD en de sonische doorsnede moeten minstens een factor 2 bedragen.

Aangezien de massastroom door de SMRD gelijk is aan de massastroom door de sonische doorsnede geldt:

$$\dot{m}_{SMRD} = \dot{m}_{SD} = \frac{\Gamma \cdot A_{k SD} \cdot P_t SD}{R_s \cdot T_t SD} \quad (2)$$

De Vandenkerekhove functie en de specifieke gasconstante zijn alleen afhankelijk van het soort gas. Het doorstroomoppervlak is een geometrische grootte. Om de massastroom te kunnen berekenen hoeft nu alleen nog maar de totale druk en de totale temperatuur voor de sonische doorsnede gemeten te worden. Als de relatie tussen penstand en doorstroomopening van de SMRD bepaald is, kan met relatie (1) de massastroom bepaald worden.

Uit relatie (2) volgt:

$$A_{k \text{ SMRD}} = A_{k \text{ SD}} \cdot \frac{P_{t \text{ SD}}}{P_{t \text{ SMRD}}} \cdot \frac{T_{t \text{ SMRD}}}{T_{t \text{ SD}}} \quad (3)$$

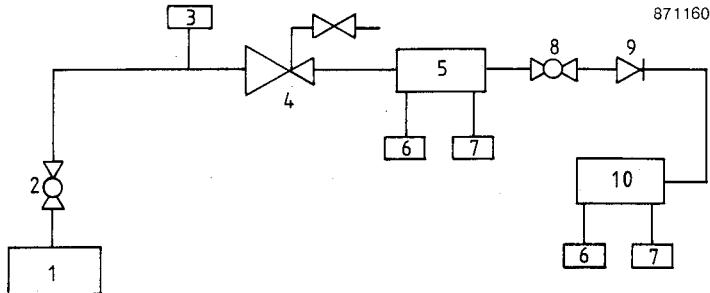
Met deze relatie kan direct het keeloppervlak van de SMRD berekend worden.

3. UITVOERING VAN DE CALIBRATIES

3.1. Algemene opbouw van de proefopstelling

In figuur 4 is de proefopstelling schematisch weergegeven. Hieronder volgt een verklaring van de namen behorend bij de gebruikte cijfers:

1. buffervaten
2. kleppen tussen opslag en leiding
3. drukopnemer
4. reduceerventiel
5. SMRD
6. drukopnemer
7. thermokoppel
8. centraal te regelen klep
9. terugslagklep
10. ijkvaatje met sonische doorsnede



Figuur 4. Schematische overzicht van de proefopstelling

Bij het calibreren wordt gebruik gemaakt van de volgende apparatuur:

- de procescomputer, welke zorgt voor het regelen van de massastromen naar de SFCC en presentatie van de gemeten drukk en temperaturen in de SMRD en de SD.
- het ijkvaatje, waarop een thermokoppel en een drukopnemer aangesloten worden. Er kunnen verschillende sonische doorsneden in het ijkvaatje worden gemonteerd. Voor het calibreren van de lucht-SMRD wordt de vitiator als ijkvat gebruikt omdat de massastroom dan te groot is voor het ijkvaatje.
- Een UV-recorder, waarmee het verloop van druk en temperatuur in de tijd wordt weergegeven.

Het programma "VALVES" voor het besturen van alle gasstromen in de SFCC moet als volgt worden aangepast:

Tijdens de uitvoering van de experimenten moet de druk in de SMRD constant zijn. Dit wordt op de volgende wijze bereikt:

- voer in dat massastroomregeling gewenst is.

De procescomputer zal nu vragen de massastroom voor lucht, methaan en zuurstof in te voeren. De computer geeft de maximale en minimale massastroom aan.

- Voer voor het gebruikte gas de grootst mogelijke massastroom in.

Vervolgens vraagt de computer naar de gewenste penstanden van de lucht, methaan en zuurstof SMRD's.

- Voer een zodanige penstand in dat het doorstroomoppervlak heel klein is. Dit houdt in dat er voor methaan en lucht een grote, en voor zuurstof een kleine penstand ingevoerd moet worden.

Dan geeft de computer aan dat de massastroom ingesteld kan worden. Regel nu met de handbediening de druk in de betreffende SMRD naar de gewenste waarde. Zorg ervoor dat de stikstofdruk van het regelventiel even hoog is als de gewenste druk in de SMRD.

Het volgende is nu bereikt:

De computer wil nu een grote massastroom regelen bij een klein doorstroomoppervlak. Hiervoor zal de computer de druk in de SMRD willen verhogen met behulp van het reduceerventiel.

Omdat de stuudruk van het regelventiel even hoog is als de druk in de SMRD kan de druk niet hoger worden en blijft de druk in de SMRD constant.

Voor de resterende invoer wordt naar bijlage A verwezen waarin in een "printout" alle fasen die doorlopen worden, getoond zijn.

De te calibreren penstand wordt ingesteld en met het reduceerventiel wordt de druk in de SMRD ingesteld. Dan wordt door de procescomputer de laatste klep enige tijd geopend.

Gedurende deze tijd wordt ook een UV-uitdraai gemaakt met de druk en temperatuur van de SMRD als functie van de tijd. Hieraan kunnen we zien wanneer de druk in het ijkvaatje constant is. De gegevens die gebruikt worden bij de berekening van het doorstroomoppervlak en massastroom, moeten gekozen worden op een tijdstip waarop de druk constant verondersteld kan worden.

3.2. Calibratie van zuurstof SMRD

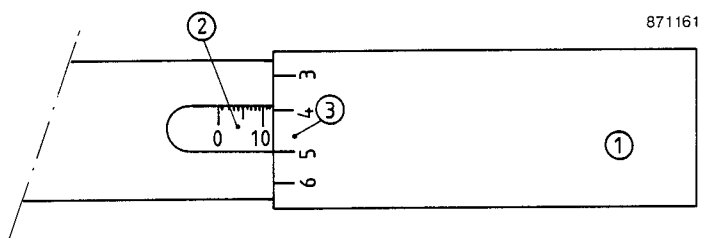
3.2.1. Instelling van drukken en SMRD-penstanden

Bij verschillende penstanden, variërend van 2 tot 24 mm, worden een aantal metingen gedaan met verschillende massastromen.

Omdat de druk en temperatuur in het ijkvaatje zich moet instellen, is de duur van de proeven 30 seconden. Voor iedere instelling van de SMRD worden 4 proeven genomen bij ingestelde SMRD-drukken van achtereenvolgens ongeveer 1, 2, 3 en 4 MPa. Om sonische condities te waarborgen in de SMRD en het ijkvaatje is de meting overgedaan met een andere nozzle in de sonische doorsnede in het geval de drukverhouding tussen beide onder delen ongeveer 2 werd.

De penstand wordt als volgt ingesteld:

met de 5 op de schaalverdeling van de nonius wordt een geheel aantal millimeters afgelezen. Zie figuur 5.



Figuur 5. Instellen van de zuurstof SMRD

- Hierin is
- 1- Kop waarmee de penstand ingesteld wordt
 - 2- Schaalverdeling in millimeters
 - 3- Schaalverdeling in tiende millimeters

3.2.2. Metingen en berekeningen

In tabel 1 op pagina's 13, 14 en 15 staan de gemeten drukken en temperaturen van de metingen vermeld. Met gebruikmaking van de specifieke gasconstante en de Vandenkerckhove-functie voor zuurstof zijn de massastromen door en de keeloppervlakken van de SMRD berekend.

Deze constanten zijn voor zuurstof:

$$R_s = 259.83 \text{ J/kg.K}$$

$$\Gamma = 0.68473$$

Met relatie (2) is de massastroom berekend en met (3) de oppervlakte van de keel.

Tabel 1. Calibratie van de zuurstof SMRD

Column	1	2	3	4	5	6	7	8
Testnr.	D SD	XD	TtSD	PtSD	TtSMRD	PtSMRD	m	AkSMRD
-	mm	mm	K.	MPa.	K.	MPa.	g/s	mm ²
D861222-01	2.5	2.0	281.688	0.2682	279.484	1.1539	3.332	1.136
D861222-02	2.5	2.0	281.688	0.5061	279.545	2.1529	6.288	1.150
D861222-03	2.5	2.0	281.688	0.7344	279.850	3.0736	9.124	1.169
D861222-04	2.5	2.0	283.204	1.0015	279.240	4.0727	12.409	1.199
D861222-05	2.5	2.0	283.204	1.0063	278.996	4.1117	12.469	1.192
D861222-06	2.5	2.0	284.718	0.7538	278.508	3.0932	9.315	1.183
D861222-07	2.5	2.0	284.718	0.5401	278.019	2.2509	6.674	1.164
					averag.	throat	area	1.170
D861215-01	2.5	3.0	280.169	1.9873	274.846	4.1901	24.757	2.306
D861215-02	4.0	3.0	281.688	0.7910	275.578	4.1632	25.158	2.362
D861215-03	4.0	3.0	281.688	0.5887	275.334	3.0989	18.724	2.360
D861215-04	4.0	3.0	281.688	0.4055	275.090	2.1620	12.897	2.329
D861215-05	4.0	3.0	281.688	0.1980	274.358	1.0574	6.297	2.322
D861215-06	4.0	3.0	281.688	0.7449	276.799	3.9355	23.692	2.358
D861215-07	4.0	3.0	281.688	0.5734	276.311	3.0638	18.237	2.329
D861215-08	4.0	3.0	281.688	0.3833	276.067	2.0354	12.191	2.343
					averag.	throat	area	2.339
D861215-09	4.0	5.0	283.204	0.4017	273.626	1.0952	12.742	4.531
D861215-10	4.0	5.0	283.204	0.7713	271.062	2.0942	24.466	4.528
D861215-11	4.0	5.0	281.688	1.1229	270.696	3.0540	35.714	4.529
D861215-13	4.0	5.0	281.688	1.5065	270.452	4.0824	47.915	4.544
D861215-14	4.0	5.0	281.688	1.1364	270.574	3.0997	36.144	4.515
D861215-15	4.0	5.0	281.688	0.8043	270.696	2.1803	25.581	4.544
D861216-02	4.0	5.0	284.718	1.0957	277.348	3.0001	34.663	4.530
D861216-03	4.0	5.0	284.718	0.7790	277.287	2.1334	24.644	4.528
					averag.	throat	area	4.531
D861217-02	4.0	7.0	284.718	2.2106	280.216	4.1313	69.934	6.671
D861217-04	5.0	7.0	284.718	1.0965	274.602	3.0820	54.201	6.860
D861217-05	5.0	7.0	284.718	0.7136	274.785	2.0116	35.274	6.843
D861217-06	4.0	7.0	285.475	0.6267	276.128	1.1148	19.800	6.948
D861218-01	5.0	7.0	284.718	0.3954	279.606	1.1539	19.545	6.668
D861218-02	5.0	7.0	286.230	0.7120	278.019	2.0726	35.102	6.648
D861218-03	5.0	7.0	284.718	1.1229	278.019	3.2148	55.506	6.777
D861218-04	5.0	7.0	284.718	1.4573	278.508	4.1852	72.035	6.762
					averag.	throat	area	6.772

Column	1	2	3	4	5	6	7	8
Testnr.	D SD	XD	TtSD	PtSD	TtSHRD	PtSHRD	m	AkSHRD
-	mm	mm	K.	MPa.	K.	MPa.	g/s	mm ²
D861218-05	5.0	9.0	284.718	1.8027	278.508	3.9410	89.109	8.883
D861218-07	4.0	9.0	284.718	2.1932	274.114	3.1103	69.383	8.694
D891219-01	5.0	9.0	284.718	0.5013	275.334	1.1148	24.780	8.683
D861219-02	5.0	9.0	284.718	0.9286	274.357	2.0550	45.901	8.710
D861219-03	5.0	9.0	281.688	1.3754	274.114	3.0344	68.352	8.779
D861219-04	5.0	9.0	281.688	1.8451	273.137	4.0530	91.695	8.802
					averag.	throat	area	8.759
D861219-05	5.0	10.0	281.688	0.5686	274.846	1.1343	28.257	9.722
D861219-06	5.0	10.0	281.688	1.0937	274.846	2.1649	54.352	9.798
D861219-10	5.0	10.0	281.688	1.5308	275.456	3.0540	76.074	9.732
D861222-09	5.0	10.0	281.688	0.3972	272.649	0.7818	19.739	9.814
D861222-10	5.0	10.0	281.688	0.5984	271.429	1.1931	29.738	9.667
D861222-11	5.0	10.0	281.688	1.0646	270.818	2.0942	52.906	9.787
D861222-12	5.0	10.0	280.169	1.5502	270.452	3.0736	77.247	9.730
D861222-13	5.0	10.0	278.648	2.0414	271.429	4.0530	102.001	9.761
					averag.	throat	area	9.751
D870421-01	6.0	12.0	284.720	0.5207	277.040	1.2323	37.063	11.785
D870421-02	6.0	12.0	284.720	0.9092	276.310	2.1138	64.717	11.981
D870421-03	6.0	12.0	281.690	1.3171	276.310	3.0981	94.254	11.905
D870421-04	6.0	12.0	281.690	1.7445	276.800	4.1020	124.840	11.920
					averag.	throat	area	11.898
D870415-04	7.0	14.0	290.750	0.7538	293.640	2.1333	72.270	13.666
D870415-05	7.0	14.0	290.750	0.4041	293.400	1.1539	38.743	13.539
D870415-06	7.0	14.0	290.750	1.1229	293.150	3.1127	107.657	13.940
D870415-07	7.0	14.0	290.750	1.4725	293.520	4.1117	141.174	13.848
					averag.	throat	area	13.748
D870415-02	7.0	16.0	290.750	0.4429	293.880	1.0951	42.463	15.648
D870415-08	7.0	16.0	290.750	0.4624	291.690	1.1539	44.332	15.447
D870415-09	7.0	16.0	290.750	0.8703	291.450	2.1333	83.439	15.719
D870415-03	7.0	16.0	290.750	1.2831	293.640	3.1715	123.016	15.647
D870415-10	7.0	16.0	290.750	1.6328	292.670	3.9942	156.543	15.784
D870416-21	7.0	16.0	287.740	1.7056	287.300	4.1313	164.376	15.878
					averag.	throat	area	15.687

Column	1	2	3	4	5	6	7	8
Testnr.	D SD	KD	TtSD	PtSD	TtSMRD	PtSMRD	m	AkSMRD
-	mm	mm	K.	MPa.	K.	MPa.	g/s	mm ²
D870416-01	7.0	18.0	287.740	0.5013	285.340	1.0952	48.312	17.542
D870416-02	7.0	18.0	287.740	0.9675	284.610	2.1138	93.242	17.519
D870416-03	7.0	18.0	287.740	1.3948	285.340	3.0736	134.423	17.391
D870416-20	7.0	18.0	287.740	1.8999	288.520	4.1313	183.101	17.722
					averag.	throat	area	17.543
D870416-07	8.0	20.0	287.740	0.4236	286.560	1.0952	53.321	19.402
D870416-06	8.0	20.0	287.740	0.8315	285.100	2.1138	104.666	19.682
D870416-04	7.0	20.0	284.720	1.5502	285.340	3.0932	150.189	19.308
D870416-05	8.0	20.0	284.720	1.2297	286.690	3.1127	155.609	19.926
D870416-18	7.0	20.0	286.230	2.0796	285.100	4.1117	200.948	19.426
					averag.	throat	area	19.549
D870416-08	8.0	22.0	287.740	0.4624	286.320	1.0952	58.205	21.170
D870416-09	8.0	22.0	285.470	0.8898	286.810	2.0942	112.449	21.407
D870416-10	8.0	22.0	287.790	1.3171	288.030	3.1030	165.777	21.345
D870416-16	8.0	22.0	282.450	1.7639	281.930	4.1117	224.103	21.544
					averag.	throat	area	21.366
D870416-11	8.0	24.0	287.740	0.5207	287.780	1.1343	65.544	23.076
D870416-12	8.0	24.0	287.740	0.9675	288.030	2.1333	121.785	22.808
D870416-13	8.0	24.0	287.740	1.4045	289.490	3.0736	176.793	23.039
D870416-14	8.0	24.0	287.740	1.4385	282.780	3.1127	181.073	23.029
D870416-15	8.0	24.0	284.720	1.9581	282.170	4.2489	247.782	23.061
					averag.	throat	area	23.002

3.2.3. Bepaling van de polynoom en statistische foutenberkening

Voor het bepalen van het verband tussen en peninsteeklengte en het daarbijbehorende keelopperlvak wordt bij elke penstand de gemiddelde waarde van de berekende doorstroomoppervlakken bepaald. Zo is er voor elke insteeklengte slechts één keeloppervlak. Met het stelsel puntenparen (penstand, oppervlakte) is volgens de kleinste kwadratenmethode de volgende polynoom bepaald:

$$AK_{SMRD} = -5.6697361156 \cdot 10^{-3} \cdot X_d^2 + 1.1390659742 X_d - 1.0307097374$$

Deze polynoom is weergegeven in figuur 6 op blz.18. De gemiddelde keeloppervlakken zijn als meetpunten weergegeven. Het verschil tussen de gemiddelde keeloppervlakken en de polynoom is minder dan 1 %. De polynoom benadering is berekend voor penstanden variërend van 2 tot 24 mm.

Met relatie (2) kan het verband tussen de massastroom, druk en penstand bepaald worden. De invloed van de temperatuur wordt hierin geëliminieerd door de aanname van een standaardtemperatuur van 270 K. Het grafische verband is gepresenteerd in de figuren 7 en 8 op blz.19 en 20 voor een maximale zuurstofmassastroom van respectievelijk 250 en 100 g/s.

Op de berekende keeloppervlakken is een statistische foutenmethode toegepast voor een 95 % betrouwbaarheidsinterval.

Het fouteninterval $B(x)$ is met behulp van de gemiddelde statistische afwijking $S(x)$ bepaald volgens relatie (4) en in procenten van het gemiddelde keeloppervlak weergegeven.

$$B(x) = \frac{t \cdot S(x)}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Hierin stelt t een toetsfactor voor die samen met het aantal metingen de excentriciteit bepaald van de kansdichtheidsfunctie.

In tabel 2 is een statistische foutentabel gegeven voor de gemeten keeloppervlakken.

Tabel 2: Procentuele statistische fout (95%) van het gemeten keelopervlak bij verschillende penstanden van de zuurstof SMRD.

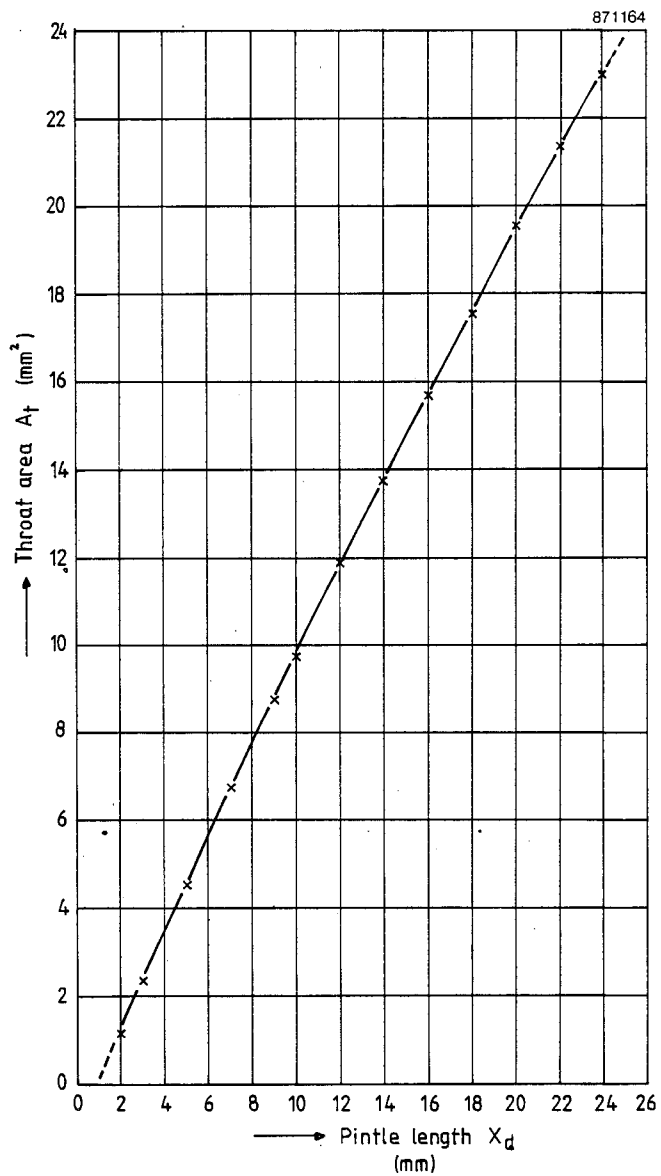
X(d) mm	A(t) mm ²	S(x) mm ²	B(x) %
2.0	1.170	0.0226	1.7905
3.0	2.339	0.0203	0.7278
5.0	4.531	0.0094	0.1730
7.0	6.772	0.1072	1.3265
9.0	8.759	0.0775	0.9289
10.0	9.751	0.0483	0.4150
12.0	11.898	0.0819	1.0946
14.0	13.748	0.1803	2.0851
16.0	15.687	0.1463	0.9787
18.0	17.543	0.1363	1.2353
20.0	19.549	0.2525	1.6056
22.0	21.366	0.1551	1.1545
24.0	23.002	0.1102	0.5959

Calibration : O₂ SCMC

Testruns : D861215-01 - D861222-13

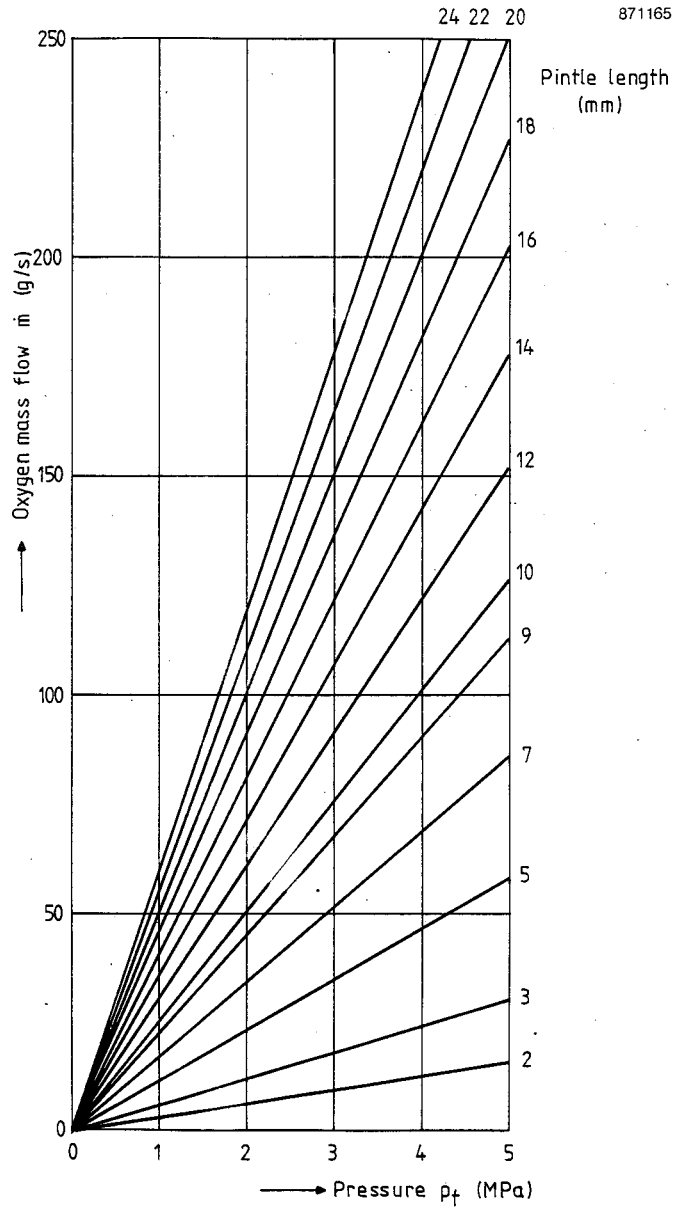
D870415-02 - D870421-04

$$A_t = -5,6697361156 \cdot 10^{-3} (x_d)^2 + 1,1390659742 (x_d) - 1,0307097374$$



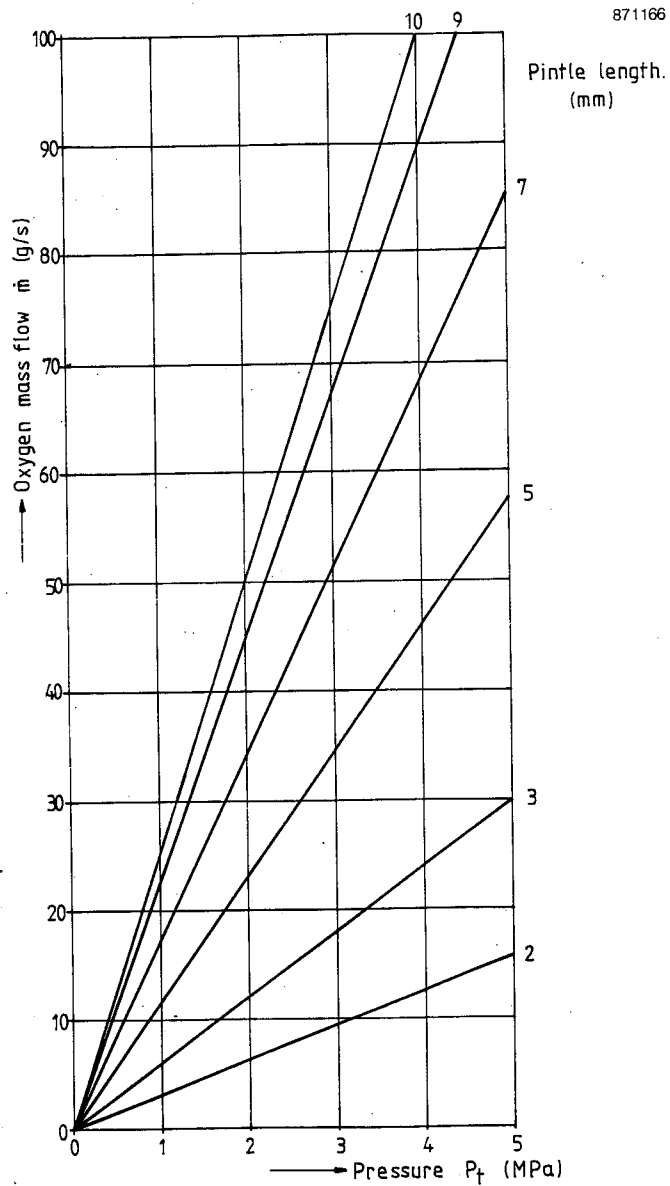
Figuur 6 Het verband tussen penstand en keeloppervlak bij de zuurstof SMRD

Calibratie : O₂ SMC
Teststruns : D861215-01 - D861222-13
D870415-02 - D870421-04
Ref. temp. : 270 K



Figuur 7 Het verband tussen druk in de SMRD, penstand en massastroom door de SMRD in het gebied tot 250 gram per seconde

Calibration : O₂ SMC
Testruns : D861215-01 - D861222-13
 : D870415-02 - D870421-04
Ref.temp : 270 K



Figuur 8 Het verband tussen druk in de SMRD, penstand en massastroom door de SMRD in het gebied tot 100 gram per seconde

3.3. Calibratie methaan SMRD

3.3.1. Instelling van drukken en SMRD-penstanden

Bij verschillende penstanden tussen 35 en 41.5 worden een aantal proeven gedaan met verschillende massastromen.

Omdat de druk in het ijkvaatje zich moet instellen, moeten de proeven minimaal 20 seconden duren. Bij elke penstand worden verschillende proeven gedaan, en wel bij drukken tussen 1.5 en 4 MPa in de SMRD.

Tijdens instellen van de penstand van de methaan SMRD moet in acht genomen worden dat 1 slag overeenkomt met een penverplaatsing van 2 mm.

3.3.2. Metingen en berekeningen

In tabel 3 op pagina's 22 en 23 staan de gemeten drukken en temperaturen vermeld. Voor het berekenen van de massastroom wordt gebruik gemaakt van relatie (2).

Voor methaan geldt: $R(s) = 518.25 \text{ J/kg.K}$

$$\Gamma = 0.66960$$

Het doorstroomoppervlak wordt berekend met relatie (3).

Tabel 3: Calibratie van de methaan SMRD

Column	1	2	3	4	5	6	7	8
Testnr.	D SD	XD	TtSD	PtSD	TtSMRD	PtSMRD	m	AkSMRD
-	mm	mm	K.	MPa.	K.	MPa.	g/s	mm ²
D860908-01	4.0	35.0	285.0	2.07	271.0	3.82	45.707	6.697
D860908-02	4.0	35.0	285.0	1.74	275.0	3.26	38.421	6.645
D860908-03	4.0	35.0	286.0	1.47	278.0	2.75	32.402	6.679
D860908-04	4.0	35.0	288.0	1.16	283.0	2.18	25.480	6.685
D860908-05	4.0	35.0	294.0	0.87	292.0	1.66	18.914	6.619
D860908-06	4.0	35.0	291.0	0.71	274.0	1.30	15.515	6.716
					averag.	throat	area	6.674
D860910-01	4.0	37.5	279.0	1.82	273.0	4.55	40.617	5.015
D860910-02	4.0	37.5	279.0	1.45	274.0	3.63	32.360	5.017
D860910-03	4.0	37.5	279.0	1.22	276.0	3.08	27.082	4.966
D860910-04	4.0	37.5	282.0	0.93	266.0	2.28	20.644	5.021
D860910-05	4.0	37.5	282.0	0.81	266.0	1.97	17.980	5.061
					averag.	throat	area	5.016
D860909-01	2.5	40.0	285.0	1.05	272.0	4.28	8.980	1.176
D860909-02	2.5	40.0	285.0	0.91	272.0	3.67	7.783	1.189
D860909-12	2.5	40.0	287.0	0.73	280.0	2.96	6.222	1.196
D860909-03	2.5	40.0	282.0	0.70	272.0	2.82	6.019	1.197
					averag.	throat	area	1.189
D860827-03	2.5	40.5	291.0	2.95	280.0	5.15	24.968	2.758
D860827-04	2.5	40.5	288.0	2.10	279.0	3.53	17.866	2.871
D860827-06	2.5	40.5	291.0	2.02	283.0	3.53	17.097	2.770
D860827-11	2.5	40.5	291.0	1.63	276.0	2.77	13.796	2.811
D860827-12	2.5	40.5	291.0	1.24	278.0	2.08	10.495	2.860
D860827-13	2.5	40.5	291.0	0.83	278.0	1.38	7.025	2.888
					averag.	throat	area	2.821
D860825-02	2.5	41.0	293.0	2.15	273.0	4.45	18.135	2.288
D860825-05	2.5	41.0	293.0	1.74	278.0	3.60	14.677	2.311
D860825-07	2.5	41.0	294.0	1.56	279.0	3.18	13.136	2.341
D860825-09	2.5	41.0	294.0	1.32	284.0	2.73	11.115	2.331
D860825-11	2.5	41.0	294.0	1.12	278.0	2.26	9.431	2.361
D860826-01	2.5	41.0	291.0	0.91	274.0	1.79	7.702	2.421
D860826-03	2.5	41.0	291.0	0.70	276.0	1.36	5.925	2.461
					averag.	throat	area	2.361

Column	1	2	3	4	5	6	7	8
Testnr.	D SD	XD	TtSD	PtSD	TtSMRD	PtSMRD	m	AkSMRD
-	mm	mm	K.	MPa.	K.	MPa.	g/s	mm ²
D860901-05	2.5	41.5	291.0	1.34	278.0	3.19	11.342	2.015
D860901-06	2.5	41.5	291.0	1.20	278.0	2.87	10.157	2.006
D860901-07	2.5	41.5	291.0	1.08	277.0	2.56	9.141	2.020
D860901-08	2.5	41.5	291.0	0.95	278.0	2.23	8.041	2.044
D860901-09	2.5	41.5	291.0	0.83	279.0	1.91	7.025	2.089
D860901-10	2.5	41.5	291.0	0.70	280.0	1.63	5.925	2.068
					average.	throat	area	2.040

3.3.3. Bepaling van de polynoom en statistische foutenberekening

Voor het bepalen van het verband tussen peninsteeklengte en het daarbij corresponderende keeloppervlak, wordt bij elke penstand de gemiddelde waarde van de berekende doorstroomoppervlakken bepaald. Zo is er voor elke insteeklengte slechts één keeloppervlak. Met lineaire regressie wordt vervolgens de best passende kromme bepaald. Dit blijkt de volgende 2^e graads polynoom te zijn:

$$A_{k \text{ SMRD}} = 17.24059 + 5.27756 \cdot 10^{-2} \cdot x_d - 1.0126652 \cdot 10^{-2} \cdot x_d^2$$

Deze polynoom is getekend in figuur 9 op blz. 25. De punten die in de grafiek getekend staan, zijn de gemiddelde doorstroomoppervlakken. Het verschil tussen de gemiddelde keeloppervlakken en de polynoom is maximaal ongeveer 2 %. De polynoombenadering is geldig voor penstanden in het gebied tussen 35.0 en 42.0 mm. Tevens is bij elk gemiddeld doorstroomoppervlak de statistische fout berekend, voor een 95 % betrouwbaarheidsinterval volgens relatie (4).

In tabel 4 op blz. 24 staat de statistische fout bij elk keeloppervlak vermeld. Met relatie (2) wordt het verband tussen massastromen, druk en penstand bepaald. Voor de temperatuur is een referentiewaarde van 270 k aangenomen.

De relatie is getekend in figuur 10 op blz. 26.

Toetsfactoren bij 95 % betrouwbaarheids interval.

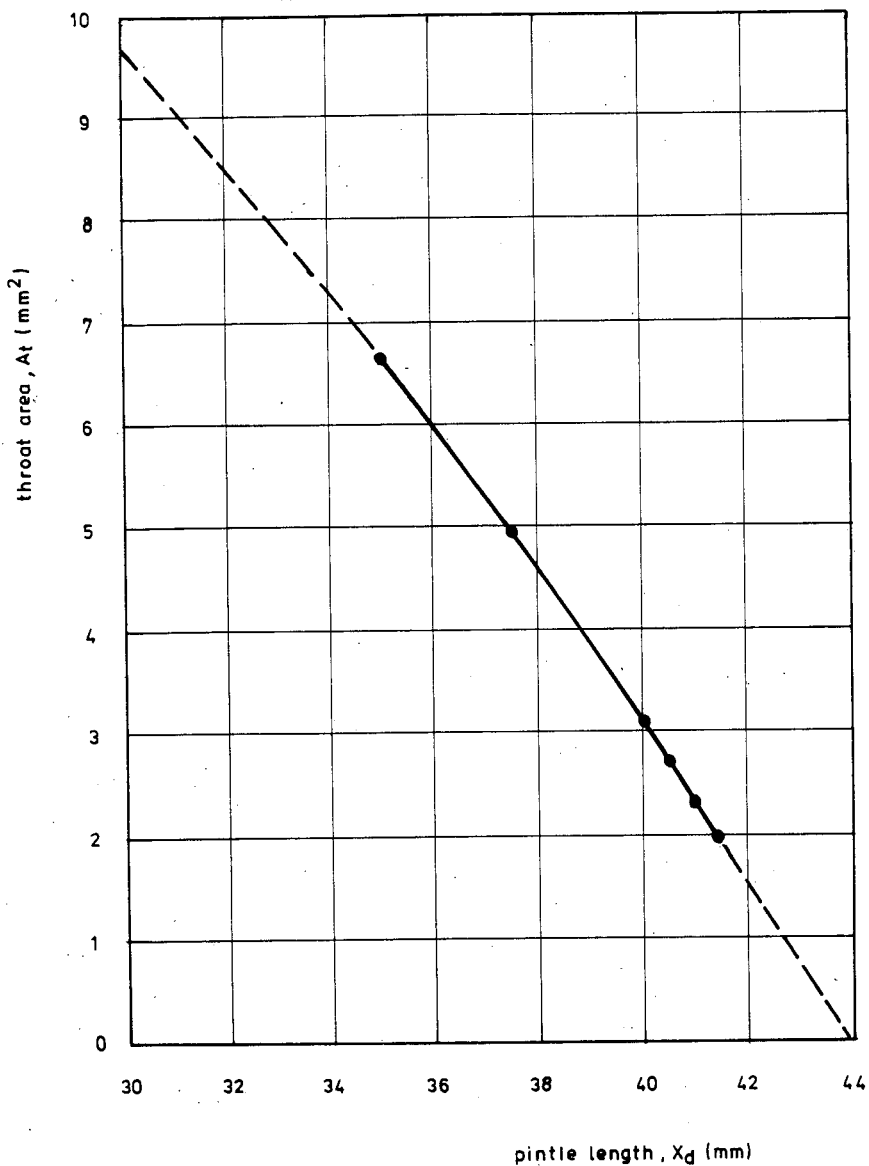
Tabel 4: Procentuele statistische fout (95%) van het gemeten keelopervlak bij verschillende penstanden van de methaan SMRD.

Xd mm	A(t) mm ²	S(x) mm ²	E(x) %
35.0	6.674	0.0355	0.5579
37.5	5.016	0.0336	0.8324
40.0	1.189	0.0093	1.2463
40.5	2.827	0.0547	2.0294
41.0	2.361	0.0609	2.3896
41.5	2.040	0.0325	1.6737

CALIBRATION : Methane-SCMC 870212

TESTRUNS : D 86082501 - D 86091017

$$A_t = 17,24059 + 5,2775621E-2*x_d - 1,0126652E-2*x_d*x_d$$

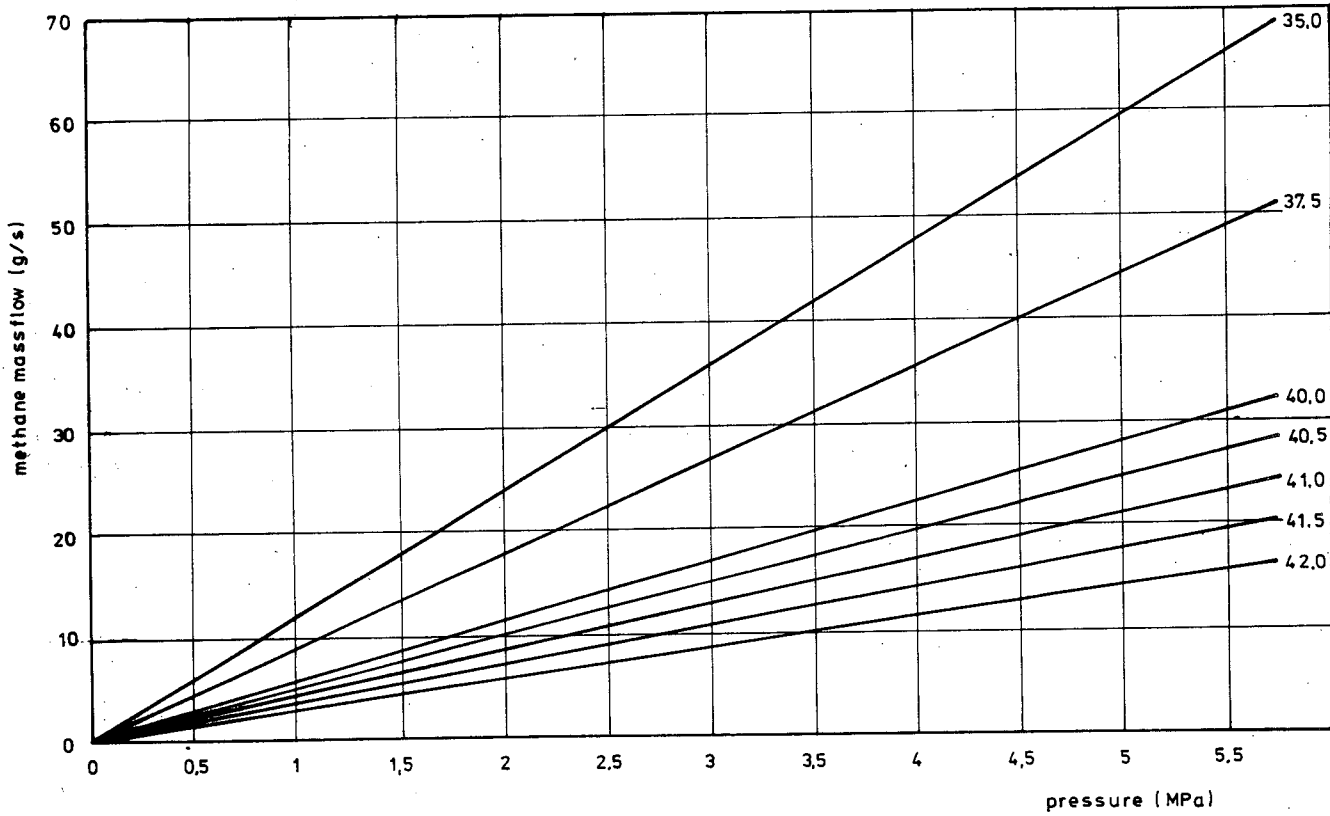


Figuur 9 De relatie tussen penstand en keeloppervlak voor de CH_4 SMRD

CALIBRATION : Methane-SCMC
TESTRUNS : D 86082501 - D 86091017
REF. TEMPERATURE : 270 K

870213

pintle length(mm)



Figuur 10 Relatie tussen penstand CH₄ SMRD druk en massastroom

3.4. Calibratie van lucht SMRD

3.4.1. Instelling van drukken en SMRD

Bij verschillende penstanden, variërend van 64 en 74 mm, worden een aantal proeven gedaan met verschillende massastromen. Omdat de druk in de vitiator zich moet instellen, moeten de proeven minimaal 20 seconden duren. Bij elke penstand worden verschillende proeven gedaan, namelijk bij drukken tussen 1 en 4 MPa in de SMRD.

Tijdens het instellen van de penstand van de lucht SMRD dient erop gelet te worden dan 1 slag correspondeert met een penverplaatsing van 2 mm.

3.4.2. Metingen en berekeningen

In tabel 5 op pagina's 28 en 29 staan de gemeten drukken en temperaturen vermeld. Voor het berekenen van de massastroom wordt gebruik gemaakt van relatie (2).

Voor lucht geldt: $R(s) = 287.04 \text{ J/kg.K}$

$$\Gamma = 0.68490$$

Het doorstroomoppervlak wordt berekend met relatie (3).

Tabel 5: Calibratie van de lucht SMRD

Column	1	2	3	4	5	6	7	8
Testnr.	D SD	XD	TtSD	PtSD	TtSMRD	PtSMRD	m	AkSMRD
	mm	mm	K.	MPa.	K.	MPa.	g/s	mm ²
D870223-01	25.0	62.0	275.6	0.500	256.0	1.18	597.663	200.465
D870223-02	25.0	62.0	275.6	0.440	255.8	1.04	525.943	200.078
D870223-03	25.0	62.0	269.5	0.970	257.5	2.35	1172.514	198.054
D870223-04	25.0	62.0	267.9	0.810	257.2	2.00	982.029	194.793
					Averag.	throat	area	198.348
D870219-05	25.0	64.0	280.2	0.400	257.5	1.10	474.189	171.116
D870219-06	25.0	64.0	269.5	0.730	251.3	2.04	882.408	169.621
D870219-07	25.0	64.0	266.4	1.080	251.6	3.01	1313.054	171.165
D870219-08	25.0	64.0	260.2	1.380	253.3	3.93	1697.662	170.067
					Averag.	throat	area	170.492
D870219-09	25.0	66.0	260.2	1.120	252.2	4.02	1377.813	134.642
D870219-10	25.0	66.0	258.6	0.850	250.4	3.09	1048.891	132.872
D870219-11	25.0	66.0	263.3	0.580	249.9	2.06	709.297	134.644
D870219-12	25.0	66.0	266.4	0.310	250.4	1.08	376.895	136.602
					Averag.	throat	area	134.690
D860512-06	25.0	66.8	275.6	1.045	274.0	4.23	1249.115	120.773
D860512-07	25.0	66.8	278.6	1.278	277.6	5.03	1519.379	124.594
D860512-08	25.0	66.8	278.6	1.550	281.3	6.02	1842.752	126.935
D860513-05	25.0	66.8	284.7	0.715	274.3	2.70	840.888	127.594
D860513-06	25.0	66.8	278.6	0.696	269.9	2.74	827.455	122.727
					Averag.	throat	area	124.525
D870223-05	25.0	69.0	272.5	0.420	259.4	2.07	504.884	97.174
D870223-06	25.0	69.0	272.5	0.440	260.4	2.15	528.926	98.202
D870223-07	25.0	69.0	272.5	0.600	262.1	2.95	721.263	97.915
D870223-08	25.0	69.0	270.2	0.590	262.6	2.95	712.254	96.784
					Averag.	throat	area	97.519

Column	1	2	3	4	5	6	7	8
Testnr.	D SD	XD	TtSD	PtSD	TtSMRD	PtSMRD	m	AkSMRD
	mm	mm	K.	MPa.	K.	MPa.	g/s	mm ²
D870219-01	15.0	72.0	281.7	0.330	270.7	1.08	140.459	52.931
D870219-02	15.0	72.0	281.7	0.630	267.8	2.07	268.149	52.439
D870219-03	15.0	72.0	278.6	0.880	261.6	2.94	376.635	51.255
D870219-04	15.0	72.0	275.6	1.220	259.2	4.08	524.987	51.245
					Averag.	throat	area	51.968
D860317-01	10.0	72.6	278.6	1.318	262.6	2.49	250.709	40.426
D860317-02	10.0	72.6	280.2	0.793	263.3	1.47	150.413	41.099
D860317-03	10.0	72.6	281.7	0.405	265.9	0.75	76.614	41.481
D860314-19	15.0	72.6	272.5	0.929	264.7	3.99	402.032	40.531
D860314-20	15.0	72.6	275.6	0.483	265.5	2.01	207.843	41.741
					Averag.	throat	area	41.056
D860314-22	15.0	73.8	274.6	0.580	270.1	4.43	250.038	22.962
D860314-23	15.0	73.8	275.6	0.298	270.2	2.23	128.235	23.361
D860317-04	10.0	73.8	278.6	1.318	266.1	4.40	250.709	22.977
D860317-05	10.0	73.8	278.6	0.793	262.3	2.64	150.844	22.874
D860317-06	10.0	73.8	280.2	0.269	266.4	0.88	51.023	23.356
					Averag.	throat	area	23.106

3.4.3. Bepaling van de polynoom en statistische foutenberekening

Voor het bepalen van het verband tussen peninsteeklengte en het daarbij behorende keeloppervlak, wordt bij elke penstand de gemiddelde waarde van de berekende doorstroomoppervlakken bepaald. Zo is er voor elke insteeklengte een keeloppervlak. Met lineaire regressie wordt vervolgens de best passende polynoom bepaald. Dit blijkt de volgende 1^e graads polynoom te zijn:

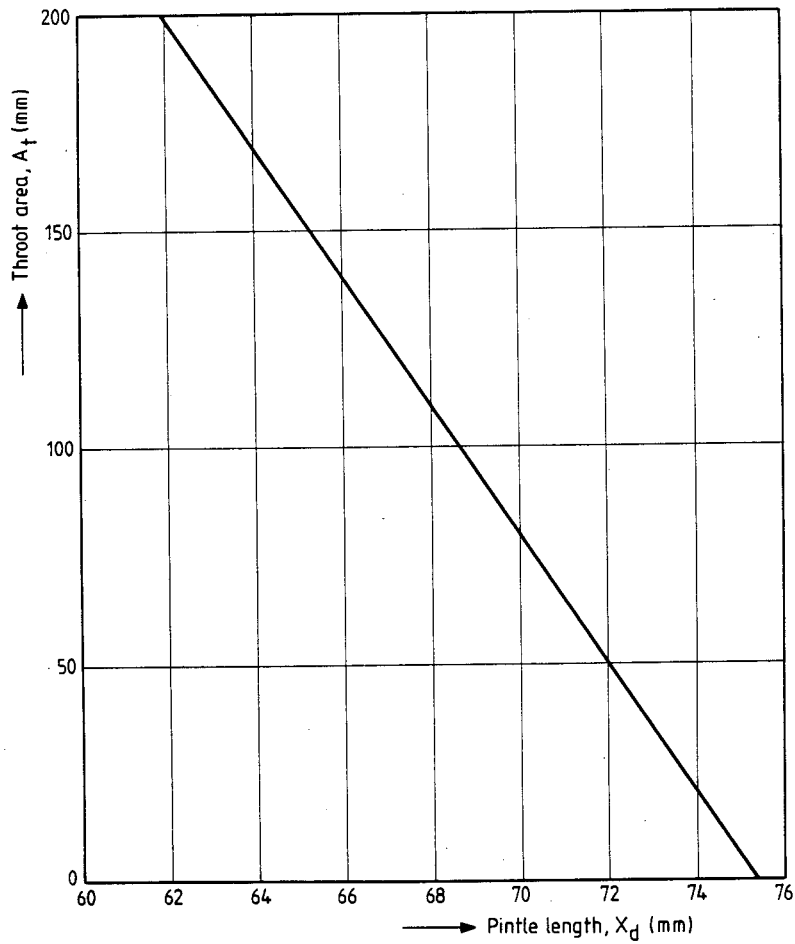
$$A_{k \text{ SMRD}} = 1.1160506002 \cdot 10^3 - 1.4801282979 \cdot 10^1 \cdot x_d$$

Tabel 4: Procentuele statistische fout (95%) van het gemeten keelopervlak bij verschillende penstanden van de lucht SMRD.

X(d) mm	A(t) mm ²	S(x) mm ²	B(x) %
62.0	198.348	2.5947	2.0800
64.0	170.492	0.7708	0.7188
66.0	134.690	1.5239	1.7989
66.8	124.525	2.8526	2.8481
69.0	97.519	0.6538	1.0660
72.0	51.965	0.8527	2.6090
72.6	41.056	0.5754	1.7425
73.8	23.106	0.2342	1.2600

Calibration : Air SMC
Testruns : D86031419-D87022308
 $A_t = 1116,0506002 - 14,801282979 \cdot X_d$

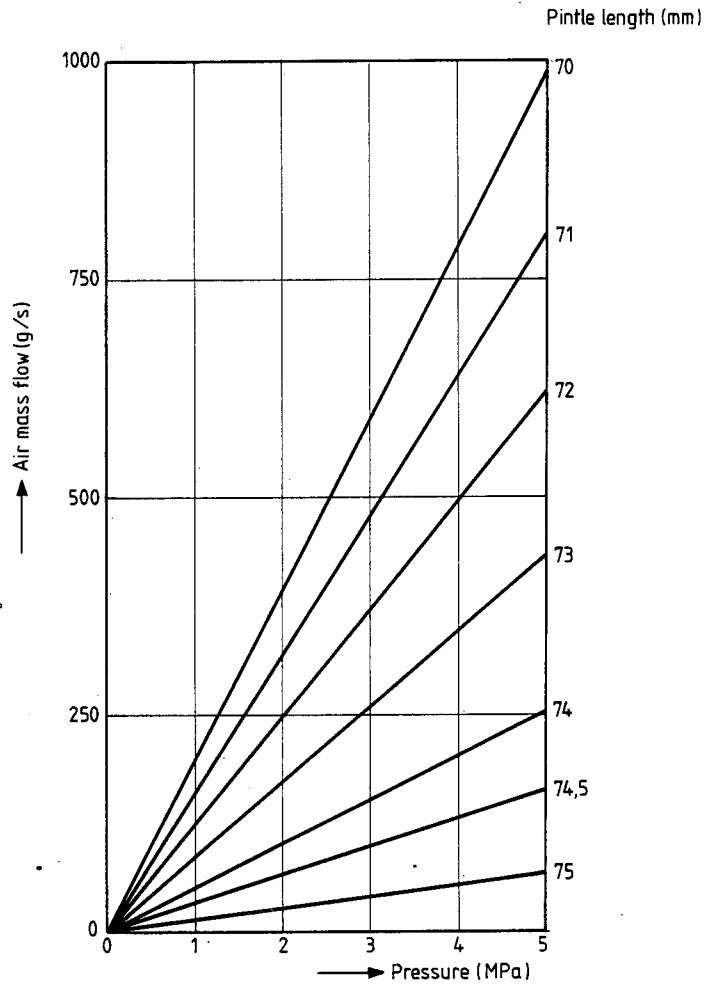
870388



Figuur 11 De relatie tussen penstand en keeloppervlak voor de lucht SMRD

Calibration : Air SMC
Testruns : D86031419-D87022308
Ref. Temp. : 270K

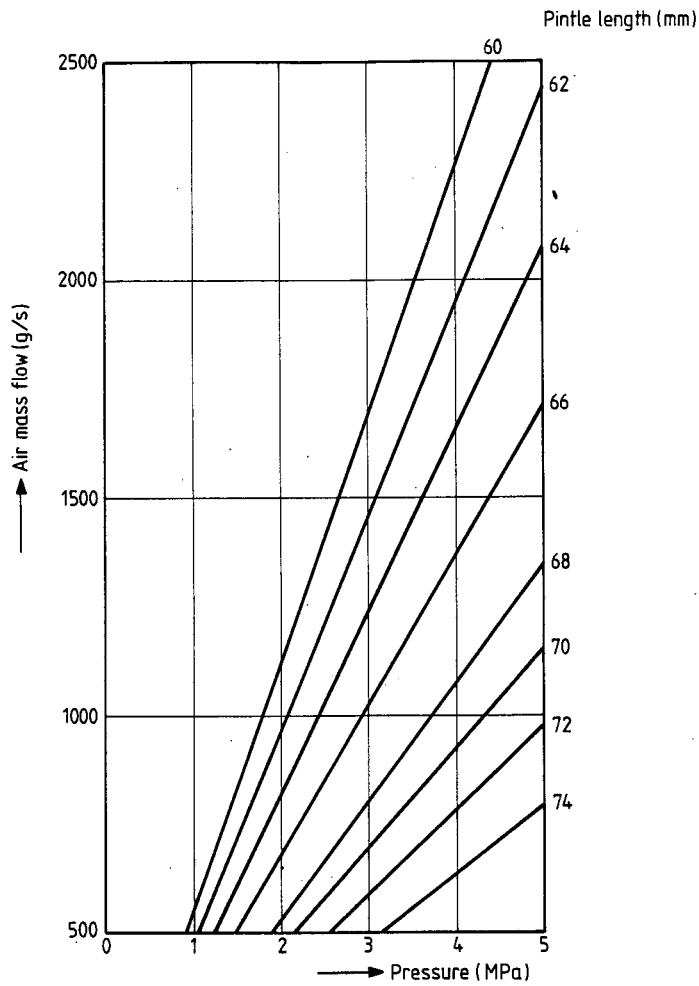
870386



Figuur 12 De relatie tussen de penstand lucht SMRD, druk en massastroom

Calibration : Air SCMC
Testruns : D86031419-D87022308
Ref. Temp : 270K

870387



Figuur 13 De relatie tussen de penstand lucht SMRD, druk en massa-
stroom

4. CONCLUSIE

Doel van deze calibratie was het verband vast te stellen tussen de penstand en het doorstroomoppervlak van de methaan, lucht en zuurstof SMRD.

Geconcludeerd kan worden dat deze relatie, voor de zuurstof en methaan SMRD, betrouwbaar kan worden benaderd met een 2^e graads polynoom. Voor de lucht SMRD is dit verband met een 1^e graads polynoom benaderd. De statistische fout in de calibraties blijkt kleiner dan 3 % te zijn, terwijl de benadering door de polynoom minder dan 3.5 % verschilt met de meetpunten.

Dit betekent dat de toegestane onnauwkeurigheid van 2 % voor de SMRD's wordt overschreden. Toch worden de calibraties gehandhaafd, omdat in de praktijk ondanks de genoemde onnauwkeurigheid goed met deze calibraties te werken is.

5. LITERATUUROVERZICHT

1. P.A.O.G. Korting en H.R.F. Schoyer,

A sonic control and measuring choke for the precise control and measurement of gas (oxygen) massflow rates.

Report LR V-02, report PML 1084-C59, SFCC publication no. 16, Department of Aerospace Engineering Delft University of Technology, Prins Maurits Laboratory TNO, Delft/Rijswijk, The Netherlands, Aug.

84. CONFIDENTIEEL

CORRECT (Y OR N)? * Y

THE MASSFLOW-VALUES OF THE SCMC-DEVICES USED IN THE LAST EXPERIMENT :

MASSFLOW OF THE AIR-SCMC 146.7 G/S
MASSFLOW OF THE O2-SCMC 2.8 G/S
MASSFLOW OF THE CH4-SCMC 0.5 G/S

CORRECT (Y OR N)? * Y

PENETRATION LENGTH OF THE LINES USED IN THE LAST EXPERIMENT

PENETRATION LENGTH OF AIR LINE 74.50 MM
PENETRATION LENGTH OF O2 LINE 1.30 MM
PENETRATION LENGTH OF CH4 LINE 43.80 MM

CORRECT (Y OR N) ? * Y

ADJUST MASSFLOW

PAUSE --

ENTER <C>, <D>, <A>, <N>, <T> OR <?> * T

VALVE SETTINGS FOR THIS TEST

TIME S	VALVE	ACTIVATION
0.000	5	ON
0.000	SAF. DEV.	ON
0.000	SP. VITI.	ON
0.000	7	ON
1.000	12	ON
1.000	11	ON
3.000	9	ON
3.000	1	ON
3.000	4	ON
3.000	10	ON
6.000	5	OFF
6.000	SAF. DEV.	OFF
6.000	SP. VITI.	OFF
8.000	12	OFF
8.000	11	OFF
30.000	2	ON
45.000	8	ON
45.000	6	ON
45.000	SP. SFCC	ON
48.000	7	OFF
48.000	8	OFF
48.000	6	OFF
48.000	SP. SFCC	OFF
77.000	2	OFF
86.000	9	OFF
86.000	4	OFF
86.000	10	OFF

ENTER <C>, <D>, <A>, <N>, <T> OR <?> * N

AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL OF VITIATOR/VBVK (Y OR N) ? * Y

REQUIRED TEMPERATURE VITIATOR = 400.0 +- 15.0 K AT 7.00 S
REQUIRED TEMPERATURE VBVK = 400.0 +- 15.0 K AT 31.00 S
IF DEVIATION IS LESS THAN 50.0 DECREASE SAMPLE TIME TO 0.20 S
TAKE MEAN OF 1 SAMPLE(S)

CORRECT (Y OR N)? * Y

VBVK-NOZZLE DIAMETER (0-85MM) ? * 21

VITIATOR-NOZZLEDIAMETER (0-65MM) ? * 8

DATA-STORAGE FOR PRINT-OUT EVERY 11.00 S

USE OF SIRENE (Y OR N) ? * N

USE OF DATA-ACQUISITION SYSTEM (Y OR N) ? * N

NO USE OF DATA-ACQUISITION-SYSTEM !

NO CHECK ON DOORS ETC. OF THE TEST ROOM !

CORRECT (Y OR N) ? * Y

TOTAL INPUT CORRECT (Y OR N) ? * Y

SWITCH ON POWER SUPPLY

SWITCH ON GASS SUPPLY SAFETY DEVICE

PUSH START BUTTON TO CONTINUE

BIJLAGE 1 : Voorbeeld van een procescomputer-uitdra

Rapport 552



60141080601