



Technische Hogeschool Delft
Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

Memorandum M-533

Drukdozen als krachtopnemers in weegsystemen;
toepassing in het verticale mini-weegsysteem

E. Dobbinga

Augustus 1985
Delft - Nederland

Samenvatting

In het lage snelheids windtunnel laboratorium zijn twee kleine weegsystemen aanwezig waarin met succes drukdozen als krachtopnemers zijn toegepast. Het rapport beschrijft die systemen, behandelt de berekening van drukdozen en geeft de resultaten van de ijking van het verticale mini-weegsysteem met een enkele drukdoos in combinatie met Mensor manometer VTH 42-028.

Indeling

	<u>Blz.</u>
Samenvatting	1
Indeling	2
Notaties	3
1. Inleiding	5
2. Beschrijving van de mini-weegsystemen	6
3. Berekening van drukdozen als krachtmeters	9
3.1. Algemeen	9
3.2. Systemen met een enkele drukdoos	12
3.3. Systemen met twee drukdozen	13
4. De verplaatsing van het weegplateau; meting en nacalculatie	14
4.1. De verplaatsing van het weegplateau van het verticale mini-weegsysteem	14
4.2. Verplaatsingen bij het horizontale mini-weegsysteem	15
4.3. Consequenties voor het ontwerp van een weegsysteem met drukdoos	15
5. IJking van het verticale mini-weegsysteem	17
5.1. Oriënterende ijkingen 1 en 2	17
5.2. Nauwkeuriger ijkingen 3 en 4	19
5.3. Het effect van kanteling van de drukdoos ten opzichte van de drukplaat	21
6. Ervaringen en conclusies	22
7. Literatuur	23
Tabellen 1 t/m 7	24
Figuren 1 t/m 10	31
 Toevoegsel A: Een enkele drukdoos als krachtopnemer	
TI-59 programma 2-1-1985	A-1 t/m A-7
 Toevoegsel B: Drukdozen als krachtopnemers	
TI-59 programma 8-1-1985	B-1 t/m B-6
 Toevoegsel C: Gedachtenspel ter bepaling van V_{*kr} voor de stroming door een smooropening	
TI-59 programma 7-1-1985	C-1 t/m C-8
 Toevoegsel D: Gebruiksvoorschrift en montage-aanwijzingen voor het verticale mini-weegsysteem	
	D-1 t/m D-3

Notaties

A	doortocht (m^2): $A_i = \pi d \cdot s_i$ = doortocht van de drukdoosspleet i $A_\ell = \pi d_\ell^2 / 4$ = doortocht van toevoerleiding $A_{*i} = \pi d_{*i}^2 / 4$ = doortocht van smooropening i
A_{doos}	= effectief oppervlak van de drukdoos = $\pi \cdot d^2 / 4$
D	te meten kracht (bijv. weerstand van een model)
d	effectieve diameter van drukdoos
d_ℓ	inw. diameter van lucht toevoerleiding
d_{*i}	diameter van smooropening in leiding i
F	totale door de drukdozen opgenomen kracht (= D + K_v)
f	veerconstante van voorspanveer
G	ijkgewicht
g	versnelling van de vrije val = 9,812414 m^2/sec
i	nummer van de drukdoos: I = "meet"drukdoos; II (indien aanwezig) = voorspandrukdoos
ΔK	= fout in de krachtaanwijzing ten opzichte van gemiddelde rechte ijklijn
K_v	door gewichtsbelasting en/of voorspanveer geleverde voorspankracht = $K_{v0} + f \cdot s_I$
K_{v0}	= K_v bij $s_I = 0$
L_ℓ	lengte van het deel van de toevoerleiding tussen de smooropening en de drukdoos
p	druk; p_{atm} atmosferische druk
p_i	druk in drukdoos i
Δp_v	overdruk in de toevoerleiding juist stroomopwaarts van de smooropeningen
s_i	effectieve spleetwijdte voor drukdoos i
s_{tot}	= $s_I + s_{II}$ = totale slag van het weegplateau
$\bar{u}_i$	gemiddelde snelheid in toevoerleiding i
V_i	snelheid in drukdoosspleet i
V_m	bovengrens van het gebied van toelaatbare waarden van V_i
V_{*i}	snelheid in smooropening i
V_{*kr}	kritieke (maximale) waarde van V_*
x	coördinaat van weegplateau en drukdoos; positief in de richting van +D
x_{ref}	constante referentiewaarde van x
ψ	in rekenprogramma: $\psi = 0$ voor een enkele drukdoos; $\psi = 1$ voor twee drukdozen
φ_w	ijkfactor van het weegsysteem (N/m^2 per grf)

ϕ	rendement van een sprongverwijding
λ	coëfficiënt voor het drukverlies door wandwrijving
ζ	verliescoëfficiënt = (het extra verlies door bochten) / ($\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$)
ν	kinematische viscositeit
ρ	luchtdichtheid

1. Inleiding

In het lage-snelheids windtunnellaboratorium van de afdeling L&R is reeds vele malen voor het meten van (kleine) luchtkrachten met succes gebruik gemaakt van apparaten met een of twee drukdozen als krachtopnemers.

In dit rapport worden twee van die apparaten kort beschreven, nl. een horizontaal mini-weegsysteem met twee drukdozen en een verticaal systeem met een enkele drukdoos.

Een eenvoudige methode voor de berekening van drukdozen als krachtmeters is aangegeven. Berekende resultaten zijn vergeleken met verplaatsingsmetingen.

Voorts is ingegaan op de ijking van het verticale mini-weegsysteem. In toevoegsel D is een gebruiksvoorschrift voor dit systeem opgenomen.

2. Beschrijving van de mini-weegsystemen

Sinds 1973 is bij practicum proeven een horizontaal mini-weegsysteem in gebruik; in fig. 2 is een schema van dit apparaat gegeven.

Het weegplateau waaraan de te meten kracht D (of de ijkkraft G) aangrijpen wordt ondersteund door twee assen met 25 mm diameter die tijdens elke aflezing met een toerental van $2/3$ omw/sec in draaiing worden gehouden *).

Aan beide zijden van het weegplateau zijn drukdozen I en II bevestigd; dozen met ongeveer 62 mm inwendige en 64 mm uitwendige diameter.

Op geringe afstand van de open kant van elke drukdoos bevindt zich een vaste zgn. "drukplaat". Uit een opening in het midden van de drukplaat wordt lucht in de drukdoos geblazen; deze lucht ontwijkt door de spleet tussen de drukdoosrand en de drukplaat met een snelheid V_I (bij doos I) resp. V_{II} bij doos II.

Naarmate de te meten kracht D groter wordt zal het weegplateau verder in $+x$ richting verschuiven waarbij de spleet bij I wordt verkleind en die bij II wijder wordt.

Als gevolg daarvan neemt de druk p_I in doos I toe en die in doos II af totdat een nieuw evenwicht wordt bereikt waarbij $(p_I - p_{II}) \cdot A_{doos}$ gelijk is aan de kracht K .

Om te bevorderen dat de druk op de drukdoosbodem in alle punten ongeveer even groot is en verstoring van die situatie door de centraal binnentredende luchtstraal te bestrijden is op ongeveer halve hoogte van de drukdoos een vast aan de drukplaat bevestigde afscherschijf aangebracht waarvan de diameter iets kleiner is dan de inwendige diameter van de drukdoos. De druk in de drukdoos wordt gemeten via een drukmeetgaatje dat zich in de afscherschijf bevindt in de naar de drukdoos toegekeerde kant.

Het drukverschil $p_I - p_{II}$ kan worden gemeten met behulp van een nauwkeurige manometer die bij aerodynamische proeven toch reeds voor het onderzoek nodig is. De relatie tussen $p_I - p_{II}$ en D moet door ijking worden bepaald. In beide toevoerleidingen zijn plaatselijk vernauwingen (smooropeningen met diameter d_*) aangebracht enerzijds om overbelasting van de manometer bij al te grote druk in de persluchtleiding te voorkomen, anderzijds ook met het doel een gelijkmatige luchttoevoer naar de drukdozen te verkrijgen **).

*) Door de ondersteuning op draaiende assen wordt een "wrijvingsloze" beweging van het weegplateau verkregen (lit. 1).

**) Normaal wordt gewerkt met smooropeningen met een diameter $d_* = 1,65$ mm in toevoerleidingen met 8 mm inw. diameter. In het in 4.2 besproken geval waarbij slechts met een enkele drukdoos werd gewerkt was $d_* = 3,5$ mm.

In de herft van 1984 is voor een speciale proef een verticaal mini-weegsysteem met een enkele drukdoos vervaardigd en gebruikt. Een schema van dat apparaat is in fig. 1 gegeven. De drukdoos is in dat geval niet vast gemaakt aan het weegplateau maar bevestigd aan de hefboom die toch nodig is voor (gedeeltelijke) compensatie van het eigen gewicht van het weegplateau en de eventueel daarop gemonteerde onderdelen. Een voordeel van deze opstelling is dat de lagering van het weegplateau niet aan hoge eisen behoeft te voldoen in die zin dat het niet nodig is de richting van de hartlijn van het weegplateau perfect gelijk te houden tijdens de meting; bovendien geeft de montage van de drukdoos op de hefboom de mogelijkheid van een eenvoudige instelling van de stand van de drukdoos ten opzichte van de drukplaat onder die doos. Het weegplateau wordt geleid door twee assen met 4,1 mm diameter die tijdens elke aflezing met een toerental van 2,5 omw/sec in draaiing worden gehouden.

Omdat het apparaat vooral voor onderwijs zal worden gebruikt leek het wenselijk het krachtopneemsysteem doorzichtig te houden. De drukdoos is een simpel plastic doosje (prijs: fl. 0,25); de drukplaat is uit perspex vervaardigd.

Een gevolg hiervan is dat de passing van de drukdoosrand op de drukplaat niet perfect is en dat, naar hierna zal worden toegelicht de effectieve gemiddelde spleetwijdte niet kleiner dan ongeveer 0,15 mm kan worden gemaakt zonder dat contact tussen drukdoos en drukplaat optreedt *). Voor de werking blijkt dit echter geen bezwaar te zijn.

Een iets meer gedetailleerde tekening van het systeem is als fig. D-1 in het gebruiksvoorschrift in toevoegsel D opgenomen.

Om de drukdoos te beveiligen tegen overbelasting is de drukplaat onder de doos niet vast gemonteerd maar wordt hij door veiligheidsveren naar boven tegen aanslagen aangedruk gehouden.

De diameter van de drukdoos is uitwendig 64 mm en inwendig ongeveer 62 mm.

De vrees zou kunnen bestaan dat de grootte van de voor de meting van belang zijnde effectieve diameter d afhankelijk zou zijn niet alleen van de vorm van de drukdoosrand maar ook van de spleetwijdte en van de overdruk in de drukdoos.

*) De drukdozen van het horizontale mini-systeem zijn blijkbaar van betere kwaliteit; in par. 4.2 wordt toegelicht dat bij doos I van dat systeem een gemiddelde spleetwijdte van ongeveer 0,07 mm kan worden ingesteld.

Vooruitlopend op de bespreking van de ijkingen in par. 5 kan worden vermeld dat bij alle ijkingen een vrijwel lineair verband tussen het gemeten drukverschil $p_I - p_{atm}$ en de te meten kracht is geconstateerd althans in het meetgebied, dat wil zeggen zolang de spleet niet zo klein wordt dat contact tussen drukdoosrand en drukplaat optreedt.

3. Berekening van drukdozen als krachtmeters

3.1. Algemeen

Bij de berekening komen de volgende vragen aan de orde:

- a. Wat is de waarde van de ijkfactor ϕ_w in N/m^2 per krachteenheid;
- b. Welke overdruk Δp_v in de persluchtleiding is nodig om bij een gegeven gemiddelde effectieve spleetwijdte s_I een bepaalde kracht D te kunnen opnemen.

De benodigde overdruk Δp_v zal groter zijn naarmate D groter is en kleiner naarmate s_I kleiner kan worden ingesteld voordat plaatselijk voor het eerst contact tussen drukdoosrand en drukplaat optreedt. De minimale waarde van s_I is niet alleen afhankelijk van de vlakheid van drukdoosrand en drukplaat maar vooral ook van de nauwkeurigheid waarmee de drukdoos in de praktijk ten opzichte van de drukplaat kan worden gesteld. De ervaring is dat $s_{I \text{ min}} = 0,1 \text{ mm}$ een redelijk uitgangspunt is.

- c. Een derde opgave is bij een gegeven waarde van Δp_v het verband tussen s_I en D te berekenen, onder meer ten behoeve van het ontwerp van de ondersteuning van het weegsysteem door draaiende assen.

Zolang het luchttransport door de drukdoos zo groot is dat bij de gegeven belasting geen contact tussen drukdoos en drukplaat bestaat geldt in de evenwichtsstand bij een wrijvingsloze geleiding van het weegplateau:

$$\text{bij een systeem met 1 drukdoos: } F_I = (p_I - p_{\text{atm}}) \cdot A_{\text{doos}} \quad (1a)$$

bij een apparaat met 2 drukdozen I en II;

$$F = (p_I - p_{II}) \cdot A_{\text{doos}} \quad (1b)$$

hierin is F = de door de drukdoos (resp. de twee drukdozen) geleverde resulterende kracht

p_i = de druk in drukdoos i

A_{doos} = het effectieve oppervlak van de drukdozen = $\pi d^2/4$

p_{atm} = de atmosferische druk

Voor de ijkfactor van het apparaat volgt daaruit:

$$\begin{aligned} \phi_w &= 1/F \text{ N/m}^2 \text{ per N of bij } d \approx 0,062 \text{ m: } \phi_w \approx 331 \text{ N/m}^2 \text{ per N of} \\ &\approx 3,3 \text{ N/m}^2 \text{ per grf.} \end{aligned}$$

Een nauwkeurige berekening van ϕ_w is niet mogelijk en ook niet zinrijk; bij gebruik van het weegsysteem is niet het aantal N/m^2 per krachtseenheid van belang maar alleen de (manometer-aanwijzing) per krachtseenheid. Deze verhouding zal bij elke toepassing opnieuw moeten worden bepaald, mede omdat hij niet alleen afhankelijk is van het weegsysteem maar evenzeer van de eigenschappen van de gebruikte manometer.

Voor resultaten van enkele ijkingen, die in dit rapport zijn herleid tot waarden van ϕ_w , wordt naar par. 5 verwezen.

Om de hierboven onder b. en c. bedoelde berekeningen enigszins overzichtelijk te houden is in het volgende gebruik gemaakt van betrekkingen die voor een onsamendrukbaar medium gelden met dien verstande overigens dat daarbij enkele grenzen zijn gehanteerd waardoor het optreden van te grote snelheden in de uitkomsten wordt voorkomen. In dit verband wordt op de situaties in de nauwste doorsneden van de luchtleiding gelet: de snelheid in de drukdoospleet mag niet groter zijn dan een zekere grenswaarde V_m en de snelheid in een eventuele smooropening (of in de toevoerleiding zelf) mag niet groter zijn dan een "kritieke waarde V_{*kr} ".

Nog afgezien van eventuele compressibiliteitsverschijnselen is het ongewenst dat de snelheid in de drukdoos-pleet een te grote waarde krijgt. Het lijkt gunstig het dwars uit de spleet tredende impulstransport klein te houden ten opzichte van de door de drukdoos op te nemen kracht F ; daartoe is het gunstig de verhouding d/s groot te houden. In dat verband is het wenselijk d niet te klein dus, bij gegeven F , de overdruk in de doos niet te groot en dus ook de snelheid V in de spleet niet te groot te doen zijn. In het rekenprogramma is voor V een bovengrens V_m aangehouden; de waarde hiervan kan nog vrij worden gekozen; gedacht kan worden aan de orde van 100 à 150 m/sec.

Aangenomen mag worden dat de doortocht van de toevoerleidingen groter is dan die van de drukdoospleet zodat in de leiding betrekkelijk lage-snelheden zullen optreden. Een uitzondering moet echter worden gemaakt voor de smooropeningen in het begin van de leiding.

Voorkomen dient te worden dat het rekenprogramma oplossingen zou leveren waarbij in de smooropeningen snelheden zouden voorkomen die groter zijn dan de geluidssnelheid.

Daartoe wordt in het programma de snelheid V_* in een smooropening een kritieke bovengrens V_{*kr} opgelegd.

De waarde hiervan (385 m/sec) is zo gekozen dat bij incompressibele berekening daarbij een drukverlies over de smooropening wordt verkregen dat ongeveer even groot is als het drukverlies dat zou gelden indien compressibele lucht met de

geluidssnelheid door de smooropening zou stromen. Een toelichting op de keuze van de waarde van V_{*kr} is in toevoegsel C gegeven.

Wordt in een toevoerleiding waarin een gemiddelde snelheid $\bar{u}$ heerst plaatselijk een vernauwing aangebracht waarin de snelheid tot V_* toeneemt dan vindt in die smooropening een drukverlaging plaats ter grootte $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_*^2 - \bar{u}^2)$.

Stroomafwaarts van de smooropening wordt bij de daar plaatsvindende straaluitbreiding weer een deel van die drukverlaging teruggewonnen. Volgens een impulsbeschouwing kan voor die drukwinst worden geschreven:

$$\phi \cdot \rho \cdot \bar{u} \cdot (V_* - \bar{u}).$$

Uit metingen zijn voor ϕ (het zgn. "rendement van de sprongverwijding") waarden gevonden tussen 0,75 voor twee-dimensionale sprongverwijdingen tot 0,9 bij sommige drie-dimensionale situaties (lit. 3).

Voor het totale drukverlies als gevolg van de aanwezigheid van de smooropening kan worden geschreven:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_*^2 - \bar{u}^2) - \phi \cdot \rho \cdot \bar{u} \cdot (V_* - \bar{u}).$$

Bij de berekening van de overdruk Δp_v , het verschil tussen de druk in de persluchtleiding stroomopwaarts van de smooropeningen en de atmosferische druk waarbij de lucht uit de drukdoosspelen blaast, is de volgende vergelijking gebruikt:

$$\Delta p_v = \underbrace{\left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_{*i}^2 - \bar{u}_i^2) - \phi \cdot \bar{u}_i \cdot \rho \cdot (V_{*i} - \bar{u}_i) \right]}_{\text{(verlies door de smooropening)}} + \underbrace{\lambda (L_\ell / d_\ell) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{u}_i^2}_{\text{verlies door wandwrijving}} + \underbrace{\zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{u}_i^2}_{\text{verlies in bochten}} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_i^2}_{\text{verlies in drukdoospleet}} \quad (2)$$

Na enige herleiding volgt daaruit:

$$\Delta p_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{*i}^2 \underbrace{\left[1 - 2 \cdot \phi \cdot \frac{A_*}{A_\ell} + \left[\frac{A_*}{A_\ell} \right]^2 \cdot \left\{ 2 \cdot \phi + \zeta - 1 + \frac{\lambda L_\ell}{d_\ell} \right\} + \left[\frac{A_*}{A_i} \right]^2 \right]}_{C_i} \quad (3)$$

of ook:

$$\Delta P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_i^2 \cdot \left[\frac{A_i}{A_*} \right]^2 \cdot C_i \quad (4)$$

$$\Delta P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q_i^2 \cdot \frac{C_i}{A_*^2} \quad (5)$$

hierin is:

- i = het nummer van de drukdoos (leiding)
- Q_i = het volumetransport door drukdoos i
- V_i = de snelheid in de spleet van drukdoos i
- A_i = de doortocht van spleet i = $\pi \cdot s_i \cdot d$
- $\bar{u}_i$ = de gemiddelde snelheid in toevoerleiding i
- A_ℓ = de doortocht van de toevoerleiding = $\pi d_\ell^2 / 4$
- λ = coëfficiënt voor het drukverlies door wandwrijving in de toevoerleiding *)
- L_ℓ = lengte van een toevoerleiding; d_ℓ = diameter van die leiding
- V_{*i} = de snelheid in de smooropening in leiding i (V_* niet groter dan V_{*kr})
- A_* = de doortocht van een smooropening; d_* = de diameter ervan
(is geen vernauwing aanwezig dan moet in de vergelijking $A_* = A_\ell$ worden ingevoerd)
- ϕ = rendement van de sprongverwijding (hierna 0,85 gesteld)
- ζ = (het extra drukverlies in bochten) / $(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{u}^2)$

3.2. Systemen met een enkele drukdoos I

Het type van de hier bedoelde opstelling is in fig. 1 aangegeven.

Een voor de berekening van Δp_V , s_I en F_I bruikbaar TI-59 programma is in toevoegsel A opgenomen. De gevolgde rekenmethode is eveneens in dat toevoegsel toegelicht.

*) Voor een turbulente stroming: $\lambda = 0,316 \cdot (\bar{u} \cdot d_\ell / \nu)^{-0,25}$; bij de berekening is ter vereenvoudiging voor λ en constante waarde 0,03 aangehouden. Dit lijkt toelaatbaar omdat het wrijvingsverlies in de leiding normaal klein is ten opzichte van de drukverliezen in de spleet en de smooropening.

Indien slechts een enkele drukdoos aanwezig is kan, bij constant gehouden overdruk Δp_v , de waarde van F niet tot 0 worden verkleind: de spleetwijdte s_I zou dan immers tot ∞ moeten toenemen. De opstelling moet dus zo worden gemaakt dat indien de te meten kracht nul is toch nog op de drukdoos een zekere voorspankracht K_v werkt. Bij een verticale opstelling levert dit uiteraard geen enkele moeilijkheid op; daarbij kan een passende voorspankracht worden verkregen door het eigen gewicht van het weegplateau niet volledig te balanceren.

Bij een horizontale opstelling moeten speciale maatregelen worden genomen. Gedacht kan bijv. worden aan gebruik van een voorspanveer die een kracht $K_v = K_{v0} + f \cdot s_I$ levert.

Bij het bestaande horizontale mini-weegsysteem is de benodigde voorspankracht verkregen door toepassing van een tweede drukdoos (fig. 2).

3.3. Systemen met twee drukdozen

Een opstelling met twee tegen elkaar in werkende drukdozen is in fig. 2 aangegeven. Daarbij kan I als de hoofd-meetdoos worden beschouwd en II als een hulpdoos die de benodigde voorspanning levert.

De som s_{tot} van de spleetwijdten s_I en s_{II} is daarbij constant.

Het is in dat geval niet eenvoudig bij gegeven waarden van Δp_v en F de bijbehorende waarde van de spleetwijdten te berekenen; in het volgende is volstaan met een berekening waarbij bij een gegeven waarde van de beschikbare overdruk Δp_v bij een willekeurige waarde van de wijdte s_I van de spleet van drukdoos I de waarde van de opgenomen kracht $F(=F_I - F_{II})$ wordt bepaald benevens andere interessante grootheden zoals de snelheden in verschillende delen, het drukverschil $p_I - p_{II}$, het totale volume luchttransport Q_{tot} en bovendien een schatting van de zgn. benodigde waarde van Δp_v ook in die gevallen waarin de ingevoerde waarde van Δp_v zo groot is dat daarbij in de nauwste leidingdoorsneden de "geluidssnelheid" wordt bereikt.

Een TI-59 programma waarmee de berekening kan worden uitgevoerd is in toevoegsel B opgenomen; de gang van de berekening wordt in dat toevoegsel nader toegelicht.

4. De verplaatsing van het weegplateau; meting en nacalculatie

4.1. De verplaatsing van het weegplateau van het verticale mini-weegsysteem

Gegevens omtrent de verplaatsing van de drukdoos van het verticale mini-weegsysteem zijn verzameld in tabel 1 en fig. 3.

De lijnen in fig. 3 hebben betrekking op het berekende verloop van de spleetwijdte s_I met de grootte van het ijkgewicht G bij Δp_V waarden van 550 en 650 mm H₂O; daarbij is het in toevoegsel A gegeven programma gebruikt.

De door kruisjes aangegeven meetpunten in fig. 3 hebben betrekking op met een kruisdraadkijker gemeten verplaatsingen van het weegplateau bij Δp_V van ongeveer 600 mm H₂O. Het is niet mogelijk bij de meting na te gaan welke waarde van x bij een spleetwijdte $s_I = 0$ behoort. Daarom is niet $-x$ maar $x_{ref}-x$ uitgezet waarin x_{ref} een nog nader te kiezen constante referentie waarde is.

Het bleek mogelijk door passende keuze van x_{ref} te bereiken dat het gemeten verloop redelijk goed overeenkomt met het berekende verloop van s_I . Dit geeft enig vertrouwen in de gevolgde rekenmethode.

Aangezien de rand van de drukdoos en de "drukplaat" aan de andere zijde van de spleet noch perfect vlak noch evenwijdig zijn kan de effectieve waarde van s_I niet willekeurig klein worden. De bovengrens van het meetgebied wordt bereikt op het moment dat voor het eerst contact ontstaat tussen de drukplaat en een punt van de drukdoosrand. In dit verband is het interessant te letten op de cirkeltjes in fig. 3. Die hebben betrekking op meetpunten bij $\Delta p_V = 0$ waarbij het weegplateau uiteraard zoveel is gedaald dat de drukdoosrand op de drukplaat rust. Uit de gemiddelde waarde van $x_{ref}-x$ bij $G = 0$ en $\Delta p_V = 0$ zou volgen dat bij $\Delta p_V = 600$ mm H₂O contact tussen drukdoos en drukplaat zou optreden bij $G = 360$ grf, tenminste wanneer de drukplaat onder invloed van 360 gram extra belasting niet enigszins is doorgeveerd. In feite kan het bruikbare meetgebied iets groter zijn dan 360 grf. (Uit de in par. 5 te bespreken ijkingen volgt een waarde van ongeveer 400 grf).

De minimale waarde van s_I is in het geval waarop fig. 3 betrekking heeft blijkbaar van de orde van 0,14 mm.

Uit de ligging van de cirkeltjes bij $G = 400$ grf ten opzichte van die bij $G = 0$ volgt dat bij $G = 400$ grf en $\Delta p_V = 0$ een vervorming van drukdoosrand en/of drukplaat optreedt van zodanige grootte dat het weegplateau daarbij ongeveer 0,06 mm daalt. In hoeverre dit met vervorming van de doos of met die van de drukplaat samenhangt kan uit de metingen niet worden afgeleid.

De voorspanning van de veiligheidsveren onder de drukplaat was in dit geval zo groot dat het verschil tussen $x_{ref}-x$ bij $G = 0$ en $G = 400$ grf bij $\Delta p_V = 0$ niet aan vervorming van die veren kan worden toegeschreven.

4.2. Verplaatsingen bij het horizontale mini-weegsysteem

Voor de verplaatsingen van het weegplateau van het horizontale mini-weegsysteem wordt verwezen naar fig. 4 die van hetzelfde type is als fig. 3.

Figuur 4 is gelijk aan fig. 11 van lit. 2. Tijdens de in dat rapport beschreven bijzondere metingen werd slechts aan één drukdoos (I) lucht toegevoerd; daarbij werd een smooropening met $d_* = 3,5$ mm gebruikt.

Bij die metingen is bij twee verschillende waarden van Δp_v gemeten over welke afstand het weegplateau zich verplaatste als gevolg van verandering van de kracht G die door de drukdoos werd opgenomen.

Voor dat geval is een nacalculatie uitgevoerd met het in toevoegsel A gegeven programma; berekend werd daarbij het verloop van de spleetwijdte s_I met de grootte van de op het plateau werkende kracht G . *)

Het resultaat van de berekening is in fig. 4 door getrokken lijnen aangegeven.

In die figuur zijn ook de gemeten waarden van $x_{ref}-x$ aangeduid waarbij x_{ref} een constante referentie grootte is waarvan de waarde zo is gekozen dat de verzamelingen meetpunten zo goed mogelijk samenvallen met de berekende lijnen. Hoewel op deze wijze geen perfecte overeenstemming tussen meting en berekening blijkt te kunnen worden verkregen zijn de afwijkingen niet zo groot dat aan de bruikbaarheid van de rekenmethode moet worden getwijfeld.

De bovengrens van het lineaire deel van het meetgebied is niet precies bekend; de indruk wordt echter verkregen dat s_I in dit geval zeker kan worden verkleind tot ongeveer 0,07 mm voordat plaatselijk contact tussen drukdoos I en de bijbehorende drukplaat optreedt.

4.3. Consequenties voor het ontwerp van een weegapparaat met drukdoos

De verplaatsing die de drukdoos bij verandering van de opgenomen kracht F ondergaat is betrekkelijk gering en als het om kleine veranderingen van F gaat dikwijls zeer gering. Uit berekening van s_I voor het verticale mini-weegsysteem volgt bijvoorbeeld dat een verandering van F van 400 naar 400,1 grf bij $\Delta p_v = 600$ mm water overeenkomt

*) Bij de berekening werd uitgegaan van:

$d = 0,062$ m; $L_\ell = 0,7$; $d_\ell = 0,008$ m; $\lambda = 0,03$; $d_* = 0,0035$ m; $\phi = 0,85$; $\zeta = 1$
en $\rho = 1,225$ kg/m³.

met een verkleining van de spleetwijdte s_1 met slechts 0,000 024 mm! waarbij de afstand tussen weegplateau en drukplaat dus slechts 0,02 micron verandert.

Het is in dit verband duidelijk dat wanneer prijs wordt gesteld op de mogelijkheid F in 0,1 grf nauwkeurig te meten het frame van het weegapparaat betrekkelijk stijf moet zijn. Dit moet niet zo worden begrepen dat de stand van de drukplaat ten opzichte van de draaiende geleidingsassen nooit meer dan 0,02 micron zou mogen veranderen; het weegplateau kan nl. langs de geleidingsassen heen en weer glijden, zodat de benodigde waarde van s_1 steeds kan worden bereikt mits tenminste daarvoor voldoende tijd beschikbaar is.

Een nauwkeurige metingen wordt onmogelijk wanneer tijdens een waarneming door vormverandering van het frame de afstand tussen drukplaat en assen zo snel en zo veel verandert dat het weegplateau dit niet kan volgen.

Bij het ontwerp van het verticale mini-weegsysteem werd daarmee aanvankelijk niet voldoende rekening gehouden. De bevestiging van de drukplaat bleek bij de eerste metingen voor praktisch gebruik veel te slap te zijn. Dit is verholpen door toevoeging van een stijvere kokerbalk onder de grondplaat; de steunpunten onder het frame zijn daarbij zo geplaatst dat het deel van de kokerbalk die de drukplaat draagt vrij uitsteekt buiten het gebied waarin de drie steunpunten onder het frame zich bevinden.

Het frame dat uit 18 mm spaanplaat is vervaardigd blijkt na deze wijziging voldoende stijf te zijn.

5. IJking van het verticale mini-weegsysteem

5.1. Oriënterende ijkingen 1 en 2

Direct nadat de in par. 4.3 bedoelde kokerbalk onder het frame was toegevoegd is ijking 1 uitgevoerd.

Het resultaat daarvan is als lijn 1 in fig. 5 gegeven. Op het eerste gezicht lijkt het verloop bevredigend lineair te zijn. Nadere beschouwing leert echter dat het gemeten verloop in de buurt van $G = 400$ grf een (zwakke) knik vertoont.

De door lineaire regressie uit de meetpunten voor $G = 0$ t/m 400 grf afgeleide "gemiddelde rechte ijklijn 1" wordt gegeven door:

$$P_I - P_{atm} = (G + K_V) \cdot \varphi_w = (G + 71,30) \cdot 3,2508 \text{ N/m}^2$$

De ijkfactor is daarbij $\varphi_w = 3,2508 \text{ N/m}^2$ per grf.

De ijkfactor die op overeenkomstige wijze uit de verzameling meetpunten voor $G = 500$ t/m 800 wordt afgeleid is iets verschillend nl. $3,23 \text{ N/m}^2$ per grf.

Omdat werd gevreesd dat door het aanbrengen van de verstijvingskoker de aanvankelijke afstelling van de stand van de drukdoos ten opzichte van de drukplaat zou kunnen zijn verstoord werd de stand van de drukdoos na ijking 1 opnieuw ingesteld tot bij de voorspankracht K_V die bij $\Delta p_V = 0$ door het eigen gewicht van het weegplateau en de hefboom wordt geleverd ($K_V \sim 70$ grf) met behulp van voelers de indruk was verkregen dat de spleetwijdte nergens groter was dan $0,1 \text{ mm}$. Nadat daarbij bleek dat de spanning van de veiligheidsveren onder de drukplaat te klein was voor de grootste bij ijking 1 toegepaste belasting werd de veerspanning passend verhoogd zodat wegveren van de drukplaat onder invloed van normale belastingen niet meer behoefde te worden gevreesd. Daarna werd ijking 2 uitgevoerd. Het resultaat is de lijn 2 in fig. 5 die bij $G = 400$ grf een duidelijke knik vertoont.

Uit de verzameling meetpunten bij $G = 0$ t/m 400 grf volgt bij lineaire regressie een gemiddelde ijkfactor van $\varphi_w = 3,2499$ die goed overeenkomt met die van het eerste deel van ijklijn 1. De meetpunten bij $G > 400$ volgen echter een gemiddelde ijklijn 2b die zou wijzen op een ijkfactor van $2,50 \text{ N/m}^2$ per grf. Vermoed kan worden dat de knik in de ijklijnen bij een waarde van G van ongeveer 400 grf erop wijst dat bij die belasting de bovengrens van het normale meetgebied wordt bereikt en dat bij verdere vergroting van de last bij de gebruikte overdruk Δp_V die last niet meer volledig door de overdruk in de drukdoos kan worden gedragen zodat de rand van de drukdoos in direct contact komt met de drukplaat eronder.

De situatie wordt duidelijker wanneer niet zoals in fig. 5 de gemeten drukverschillen $P_I - P_{atm}$ zelf worden beschouwd maar de afwijkingen tussen de afzonderlijke meetpunten ten opzichte van de door lineaire regressie uit de verzameling meetpunten afgeleide "gemiddelde rechte ijklijn". (fig. 6 en 7).

Deze afwijkingen worden hierna gegeven in de vorm van ΔK een grootte die als volgt is gedefinieerd:

$$\Delta K = \frac{(P_I - P_{atm})_{\text{gemeten bij } G} - (P_I - P_{atm})_{\text{volgens de "ijklijn" bij } G \text{ behorend}}}{\varphi_w}$$

hierin is φ_w de ijkfactor (de helling van de ijklijn) in N/m^2 per grf.

In fig. 6 zijn voor ijking 1 de afwijkingen gegeven ten opzichte van de "gemiddelde ijklijn" die uit de verzameling meetpunten van $G = 0$ t/m 350 grf is afgeleid.

Bij $G < 400$ zijn de afwijkingen max. ongeveer 0,2 grf; boven 400 grf treedt een duidelijke verslechtering op.

In fig. 7 is een soortgelijke presentatie gegeven voor ijking 2 met dien verstande dat daarbij van twee verschillende "gemiddelde ijklijnen" is uitgegaan. Voor $G < 400$ zijn de afwijkingen gegeven ten opzichte van de "echte" gemiddelde ijklijn voor het gebied $G = 0$ t/m 350 grf.

Voor $G > 400$ zijn de afwijkingen berekend ten opzichte van de "gemiddelde ijklijn" die uit de meetpunten tussen $G = 400$ en 900 grf is afgeleid.

Uit deze figuren blijkt duidelijk dat niet alleen bij ijking 2 maar ook bij 1 bij $G = 400$ grf een kritieke situatie wordt gepasseerd. Dit is geheel in overeenstemming met fig. 3 waaruit blijkt dat bij $\Delta p_v = 600$ mm H_2O bij $G = 400$ grf voor het eerst contact tussen drukdoosrand en drukplaat ontstaat zodat bij $G > 400$ grf geen ordelijk verloop meer mag worden verwacht.

Dat ijking 1 bij $G > 400$ grf een "ordelijker" indruk maakt dan ijking 2 kan samenhangen met het feit dat de veren onder de drukplaat bij 1 te slap waren zodat de drukplaat enigszins kon wegveren onder invloed van de door de drukdoosrand uitgeoefende kracht.

De nauwkeurigheid van de ijkingen 1 en 2 werd ongunstig beïnvloed door de volgende omstandigheden:

- 1e. het gewicht van de gebruikte ijkgewichten was niet nauwkeurig bekend; aangezien enkele van die gewichten inmiddels uit het laboratorium blijken te zijn ontvreemd kunnen zij ook achteraf niet meer gewogen worden.
- 2e. de waarde van Δp_v vertoonde enige variatie; bij latere metingen is de waarde van Δp_v beter bijgesteld.

3e. vrij veel storing werd ondervonden door de roerige omgeving; als gevolg van de in werking zijnde S-tunnel met open straal en door een betrekkelijk druk verkeer van passerende personen was er betrekkelijk veel tocht. Bij de ijking was het weegplateau niet voorzien van de normale stuwschijf maar de vaste eindflens van het weegplateau meet zelf 120 x 120 mm en bij een verticale tochtstroom van 1 m/sec kan op een dergelijke flens reeds een stoorkracht van 0,9 grf worden uitgeoefend!

Achteraf zijn daarom nog de ijkingen 3 en 4 uitgevoerd.

5.2. Nauwkeurige ijkingen; de invloed van Δp_v

Bij de ijkingen 3 en 4 werden ijkgewichten gebruikt waarvan het gewicht nauwkeurig bekend was (nauwkeuriger dan 0,01 gram).

De omstandigheden waren betrekkelijk rustig en er is voor gezorgd dat de afwijkingen van de gewenste waarde van Δp_v niet groter dan ongeveer 20 mm H₂O zijn geweest.

Er is dan ook reden aan te nemen dat de metingen 3 en 4 betrouwbaar zijn.

IJking 3 is uitgevoerd bij $\Delta p_v = 600$ mm H₂O; ijking 4 bij $\Delta p_v = 300$ mm H₂O.

Voor de resultaten kan naar tabel 3 en naar de figuren 8 en 9 worden verwezen.

Bij de uitwerking van ijking 3 ($\Delta p_v = 600$ mm H₂O) werd door lineaire regressie uit alle meetpunten, verkregen bij $G = 0$ t/m 300 grf, een "gemiddelde rechte ijklijn" bepaald.

De daarbij behorende ijkfactor is $\phi_{w3} = 3,2466$ N/m² per grf. Extrapolatie naar $P_I - P_{atm} = 0$ levert voor de voorspankracht K_v de waarde 103,50 grf.

De afwijkingen tussen de meetpunten en de "gemiddelde ijklijn" zijn in fig. 8 tegen G uitgezet. Uit die figuur blijkt dat de meetpunten bij $G = 350$ grf terecht buiten beschouwing zijn gelaten.

Gesteld kan worden dat bij $\Delta p_v = 600$ mm H₂O de bovengrens van het meetgebied gelegen is tussen $G = 300$ en 350 grf dus tussen $F = 403$ en 453 grf.

De bovengrens ligt hier lager dan bij de ijkingen 1 en 2 waarbij het lineaire F -meetgebied zeker groter was dan $400 + 75 = 475$ grf.

Dat verschil lijkt niet verontrustend; tussen de ijkingen (1 en 2) en de ijkingen (3 en 4) is het systeem nl. geheel gedemonteerd geweest en is de dwarsbalk waarop de hefboom steunt iets ingekort omdat hij aanvankelijk tegen de zijwand aanliep. Bovendien zijn toen twee trekveren aangebracht waarmee de stelschroeven van deze balk sterker tegen de aanslag worden getrokken. Het is zeer wel denkbaar dat de stand van de hefboom en daarmee die van de drukdoos daarna iets verschilde van die bij de ijkingen (1 en 2).

Er is geen reden om aan te nemen dat de ijkfactor daarbij ook is veranderd: uit de oriënterende ijkings 1 en 2 werd $\varphi_w \approx 3,25$ afgeleid, een waarde die slechts 0,1% verschilt van die voor ijking 3.

Omdat bij ijking 4 de waarde van Δp_v de helft is van die bij 3 kan ervan worden uitgegaan dat het meetgebied bij ijking 4 ook half zo groot is als dat bij 3, dat wil zeggen tussen $F = 202$ en 227 grf. Rekening houdend met een voorspankracht K_v van ongeveer 103 gram zijn bij de uitwerking alleen de metingsresultaten bij $G = 0$ t/m 100 grf gebruikt voor de bepaling van de "gemiddelde ijklijn".

De afwijkingen tussen de meetpunten en de "gemiddelde ijklijn" zijn in fig. 9 tegen G uitgezet. De afwijkingen zijn van de orde van $0,1$ grf.

Extrapolatie van de ijklijn naar $p_I - p_{atm} = 0$ levert voor de voorspankracht K_v in dit geval de waarde $103,24$ grf dus $0,26$ grf minder dan bij ijking 3 terwijl in werkelijkheid K_v in beide gevallen gelijk is geweest, nl. gelijk aan het gewicht van het weegplateau met koppelstang en het ongebalanceerde deel van het gewicht van de hefboom. Op zichzelf zou hieraan niet veel aandacht behoeven te worden geschonken, het verschil is betrekkelijk klein en het is zeer de vraag of de hier bedoelde extrapolatie toelaatbaar is. Opgemerkt moet echter worden dat bij ijking 4 niet alleen K_v maar ook de helling van de ijklijn kleiner is dan bij ijking 3: bij $\Delta p_v = 300$ mm H_2O is voor φ_w de waarde $3,2369$ N/m² per grf gevonden die ongeveer 0,3% kleiner is dan de ijkfactor voor de ijking 3 bij $\Delta p_v = 600$ mm H_2O . Het blijkt dat de waarde van Δp_v althans bij de hier behandelde opstelling een geenszins verwaarloosbare invloed heeft op de bij eenzelfde waarde van K afgelezen waarde van de overdruk in de drukdoos.

In dit verband is een vergelijking van de tweede en de vierde kolom van tabel 3 leerzaam. Daarbij blijkt dat een verkleining van Δp_v van 600 tot 300 mm H_2O tot gevolg heeft dat bij $G = 99,73$ grf het drukverschil $p_I - p_{atm}$ gemiddeld $2,85$ N/m² verandert hetgeen overeenkomt met $0,88$ grf verschil, een verschil dat veel groter is dan de volgens de figuren 8 en 9 bij de afzonderlijke ijkings geconstateerde afwijkingen. Het is dan ook noodzakelijk een meting en de bijbehorende ijking bij eenzelfde waarde van Δp_v uit te voeren. Bij nauwkeurige metingen moet ervoor worden gezorgd dat de Δp_v -waarden voor bij elkaar behorende waarnemingen zeker niet meer dan 5% van elkaar verschillen.

Bij de huidige opstelling waarbij de lucht via een drukreducerapparaat direct uit de persluchtleiding van het laboratorium wordt afgetapt en waarbij zich in de toevoerleiding naar de drukdoos geen vernauwing bevindt blijft Δp_v niet automatisch constant, integendeel. Bijzonder hinderlijk was dat de waarde van Δp_v bij de ijkings mede enigszins bleek te worden beïnvloed door de grootte van de last op

het weegplateau.

Hierin dient verbetering te worden gebracht door toepassing van een smooropening met passend kleine diameter d_* . Uiteraard moet in dat geval een grotere waarde van Δp_v worden ingesteld. Een indruk van de toeneming van de benodigde Δp_v als functie van de diameter d_* kan uit tabel 7 worden verkregen.

5.3. Effect van kanteling van de drukdoos ten opzichte van de drukplaat

De stand van de drukdoos ten opzichte van de drukplaat kan worden gewijzigd door verdraaiing van de stelschroeven (1 en 2 in fig. D-1) onder de dwarsbalk die de draaipunten van de hefboom draagt. Door beide schroeven in gelijke richting te draaien wordt de langshelling veranderd; door verdraaiing in tegengestelde richting wordt de dwarshelling gewijzigd.

Door een serie metingen waarvan het resultaat in tabel 4 en fig. 10 is gegeven is het effect van de helling van de drukdoos op de "ijkfactor" nagegaan.

De "ijkfactor" is daarbij steeds uit slechts twee meetpunten afgeleid, nl. uit die bij $G = 0$ en $G = 200$ gram.

De helling van de drukdoos mag uiteraard niet zo groot worden dat bij de ingestelde waarde $\Delta p_v = 600 \text{ mm H}_2\text{O}$ en bij $G = 200 \text{ grf}$ contact tussen drukdoos rand en drukplaat ontstaat. Uit fig. 10 blijkt dat bij overschrijding van een bepaalde "toelaatbare" kantelhoek de ijkfactor een sterkte verandering ondergaat. Interessant is dat de krommen in fig. 10 in het middengebied een vlak stuk vertonen. Blijkbaar wordt de ijkfactor niet merkbaar beïnvloed door hellingveranderingen zolang daarbij geen contact tussen drukdoos en drukplaat optreedt.

Opmerkelijk is wel dat in langsrichting het toelaatbare kantelgebied groter is dan in dwarsrichting. Kennelijk passen drukdoosrand en drukplaat niet zo goed bij elkaar dat de spleetwijdte overal tegelijkertijd nul kan worden gemaakt. Ook uit vergelijking van de minimale gemiddelde spleetwijdte s_I van de drukdozen van het horizontale en het verticale weegsysteem wordt de indruk verkregen dat de kwaliteit van de drukdoos-eenheid van het verticale systeem nog aanzienlijk zou kunnen worden verbeterd.

Voor het toepassingsgebied waarvoor het apparaat thans wordt gebruikt is een dergelijke verbetering overigens niet nodig.

6. Ervaringen en conclusies

Het verticale weegsysteem werkt bevredigend in combinatie met een Mensor manometer. Hoewel het toerental van de assen in de huidige toestand zo hoog is (2,5 omw/sec) dat de demping door de wrijving van de geleidingsassen uiterst klein is is de demping voldoende.

Het aanbrengen van een demper in de drukleiding tussen drukdoos en manometer bleek zeer ongunstig te werken. Indien bij bepaalde toepassingen behoefte aan meer demping zou ontstaan dan dient hieraan alleen te worden voldaan door verkleining van het toerental van de geleidingsassen *).

Bij nauwkeurige metingen moet ervoor worden gezorgd dat de waarde van Δp_v zowel bij de ijking als bij de meting niet meer dan 5% van de gemiddelde waarde verschilt. Het verdient aanbeveling in de toevoerleiding naar de drukdoos een smooropening op te nemen.

Bij de ijking van het systeem moet ter bepaling van de grootte van het meetgebied zowel bij toenemende als bij afnemende belasting worden gemeten. Alleen dat deel van het doorlopen gebied waarin de afwijkingen van de "gemiddelde rechte ijking" kleiner zijn dan ong. 0,2 à 0,3 grf mag als bruikbaar meetgebied worden beschouwd. Indien dit gebied te klein is kan vergroting ervan worden bereikt door vergroting van de overdruk Δp_v .

Bij $\Delta p_v = 600 \text{ mm H}_2\text{O}$ is de maximaal toelaatbare belasting van de drukdoos ongeveer 400 grf. De ijkfactor is ongeveer $3,25 \text{ N/m}^2$ per grf.

De gegeven eenvoudige rekenmethode voor drukdozen blijkt bruikbare resultaten te leveren.

*) En/of door vergroting van de wrijving tussen weegplateau en geleidingsassen.

7. Literatuur

1. E. Dobbinga: L&R Memorandum M-516: "Over de ondersteuning van een weegplateau door middel van draaiende of oscillerende assen".
2. E. Dobbinga: L&R Memorandum M-528: "Over het gebruik van het horizontale mini-weegsysteem met draaiende assen bij de meting van de weerstandscoefficiënt van een cilinder in de grote L&R windtunnel".
3. E. Dobbinga: Intern Rapport LSW 81-3: "Over de druktoeneming bij sprongverwijdingen".

Tabel 1

Berekend verloop van G met de spleetwijdte s_I voor het verticale mini-weegsysteem ter vergelijking met de gemeten verplaatsing van het weegplateau *); zie fig. 3.

spleet- wijdte s_I mm	$\Delta p_v = 550$		600		650 mm H ₂ O	
	N	G **) grf	N	G grf	N	G grf
10-40	15,559	1586	17,040	1736,57	18,521	1888
0,01	15,313	1561	16,772	1709	18,231	1858
0,02	14,619	1490	16,015	1632	17,411	1774
0,025	14,137	1441	15,489	1579	16,841	1716
0,03	13,587	1385	14,889	1517	16,191	1650
0,04	12,354	1259	13,544	1380	14,735	1502
0,05	11,051	1126	12,122	1235	13,194	1345
0,075	8,022	818	8,818	899	9,614	980
0,1	5,705	581	6,291	641	6,876	701
0,125	4,070	415	4,507	459	4,944	504
0,15	2,932	299	3,266	333	3,599	367
0,175	2,130	217	2,391	244	2,651	270
0,2	1,553	158	1,761	179	1,969	201
0,225	1,127	115	1,297	132	1,466	149
0,25	0,807	82	0,947	97	1,087	111
0,275	0,560	57	0,678	69	0,796	81
0,3	0,367	37	0,468	48	0,568	58
0,325	0,214	22	0,300	31	0,386	39
0,35	0,089	9	0,164	17	0,240	24
0,375	-0,012	-1	0,054	6	0,119	12
0,4	-0,096	-10	-0,038	-4	0,020	2
0,45	-0,226	-23	-0,180	-18	-0,134	-14

*) Berekend met TI-59 programma 2-1-85: (toevoegsel A)

d berekend uit de ijkfactor van ijking 2: $\omega_{v2} = 3,2499 \text{ N/m}^2 \text{ per grf}$ en
 $g = 9,812414 \text{ m}^2/\text{sec}$: $d_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001 \cdot 9,812414}{\pi \cdot 3,2499}} = 0,062 \text{ 002 m}$

$L_\ell = 2,45 \text{ m}$; $d_\ell = 0,08 \text{ m}$; $\lambda = 0,03$; $d_* = 0,008 \text{ m}$; $\zeta = 1$; $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

$K_{v0} = 75 \text{ grf} = 0,736 \text{ N}$; $f = 0$.

**) $G = \text{ijkgewicht} = (F \text{ op doos}) - K_{v0}$.

Tabel 2

Gemeten verplaatsingen van het weegplateau van het verticale mini-weegsysteem

Δp_v mm H ₂ O	G *) grf	$x_{ref}-x$ mm			
600	0	0,38	0,375	0,36	0,37
	100	0,245	0,24	0,24	
	50	0,27+	0,29	0,28	
	100	0,24	0,24		
	150	0,21	0,21		
	200	0,19	0,19	0,19	
	250	0,16	0,17	0,18	0,17
	300	0,17	0,17-	0,15	0,17-
	350	0,14	0,16	0,15	
	400	0,15+	0,17	0,15+	
	300	0,17-	0,17+		
	200	0,19			
	150	0,22	0,21+	0,23	0,22+
	100	0,24			
	50	0,28			
	0	0,36	0,36+	0,38+	
	20	0,33	0,33		
	200	0,19			
	400	0,14	0,15		
	0	0,37			
0	0	0,15	0,14+		
	400	0,10	0,09-	0,07+	0,08
	0	0,14	0,15		
600	0	0,37+			
	400	0,14+	0,15+		
0	400	0,08			
	0	0,13	0,16		

*) $K_v = 75$ grf; $F =$ kracht op drukdoos $= K_v + G$

*) $x_{ref} =$ constante referentie waarde, zo gekozen dat het gemeten verloop van x_{ref} met G redelijk goed overeenkomt met het berekende verloop (zie fig. 3)

Tabel 3

Oriënterende ijkingen 1 en 2 bij Δp_v ongeveer 600 mm H₂O.
Verticaal mini-weegsysteem + manometer Mensor VTH 42-028.

Ijking 1:

G	PI-Patm	ΔK	PI-Patm	ΔK
grf	N/m ²	grf	N/m ²	grf
0	231,7	- 0,02	231,3	-0,15
100	557,5	0,20	556,7	-0,05
200	882,1	0,05	882,3	0,11
300	1206,9	- 0,04	1206,9	-0,04
400	1531,9	- 0,06	1532,1	0,00
500	1855,5	- 0,52	1855,4	-0,55
600	2178,6	- 1,13	2178,6	-1,13
700	2501,2	- 1,89	2501,5	-1,80
800	2824,2	- 2,53	2824,8	-2,34
900	3144,0	- 4,15	3133,5	-7,38
1000	3099,3	-117,90		

ΔK t.o.v. ijklijn j = 1;
uit G = 0 t/m 400 grf:

$$G + K_v = \frac{PI-Patm}{\varphi_{w1}}$$

$$G + 71,3 = \frac{PI-Patm}{3,2508} \text{ grf}$$

waarin (PI-Patm) in N/m²

(fig. 5 en 6)

IJking 2:

0	229,9	- 0,19	230,0	-0,16
100	556,0	0,15	555,9	0,12
200	881,2	0,21	880,9	0,12
300	1205,3	- 0,06	1205,6	0,03
400	1530,2	- 0,09	1530,1	-0,12
500	1806,4	0,07	1832,3	10,41
600	2043,7	- 5,18	2070,3	5,44
700	2280,8	- 10,52	2315,6	3,37
800	2536,2	- 8,55	2564,1	2,58
900	2796,9	- 4,47	2813,3	2,08
1000	3042,0	- 6,61	3064,9	2,53
1100	3311,7	1,06		
1200	3576,5	6,79		
1300	3812,5	1,01		
1400	4011,4	- 19,58		

ΔK t.o.v. ijklijn j = 2:
uit G = 0 t/m 400 grf

$$G + K_v = \frac{PI-Patm}{\varphi_{w2}}$$

$$G + 70,9 = \frac{PI-Patm}{3,2499} \text{ grf}$$

waarin (PI-Patm) in N/m²

ΔK t.o.v. gemiddelde lijn 2b
voor G = 500 t/m 1300 grf
("φ_{w2b}" = 2,50 N/m² per grf)
(fig. 5 en 7).

*) $\Delta K = \frac{(PI-Patm)_{\text{gemeten}} - (PI-Patm)_{\text{volgens "gemiddelde rechte ijklijn j"}}}{\varphi_{wj}}$

Tabel 4

Nauwkeurige ijkingen 3 en 4 bij $\Delta p_v = 600$ en $300 \text{ mm H}_2\text{O}$
Verticaal mini-weegsysteem + manometer Mensor VTH 42-028
(zie ook fig. 8 en 9).

G grf	ijking 3: $p_v \text{ mm H}_2\text{O}$		ijking 4: $p_v = 300 \text{ mm H}_2\text{O}$	
	PI-Patm gemeten N/m^2	ΔK *) grf	PI-Patm gemeten N/m^2	ΔK *) grf
0	336,0	-0,01	334,1	- 0,02
49,7089	497,4	-0,01	495,2	0,04
99,7347	660,1	0,08	657,0	0,00
149,6102	822,6	0,26	817,8	- 0,20
199,5191	984,2	0,13	977,7	- 0,71
249,5098	1146,0	-0,03	1096,5	-14,00
299,0665	1306,9	-0,02	1187,6	-35,41
348,9053	1467,7	-0,33		
398,2601	1628,0	-0,31		
448,0003	1788,9	-0,50		
497,9880	1936,4	-5,05		
448,0003	1789,7	-0,25		
398,2601	1627,5	-0,47		
348,9053	1467,3	-0,46		
299,0665	1306,9	-0,02		
249,5098	1145,7	-0,12	1086,8	-16,99
199,5191	983,5	-0,09	977,7	- 0,71
149,6102	822,0	0,07	817,7	- 0,23
99,7347	659,6	-0,07	657,0	0,00
49,7089	497,0	-0,13	495,0	- 0,02
0	335,9	-0,04	334,1	- 0,02
149,6102			817,7	- 0,23
99,7347			656,8	- 0,06
49,7089			495,4	0,10
0			334,1	- 0,02

Uit de meetpunten bij $G = 0 \text{ t/m } 300 \text{ grf}$:
"gemiddelde ijklijn 3":

$$G + K_v = \frac{PI-Patm}{\varphi_{w3}}$$

$$G + 103,50 = \frac{PI-Patm}{3,2466} \text{ grf}$$

waarin $(PI-Patm)$ in N/m^2

Uit de meetpunten bij $G = 0 \text{ t/m}$
100 grf:

"gemiddelde ijklijn 4":

$$G + K_v = \frac{PI-Patm}{\varphi_{w4}}$$

$$G + 103,24 = \frac{PI-Patm}{3,2369} \text{ grf}$$

waarin $(PI-Patm)$ in N/m^2

$$*) \Delta K = \frac{(PI-Patm)_{\text{gemeten}} - (PI-Patm)_{\text{volgens "gemiddelde ijklijn"}}}{\varphi_w}$$

Tabel 5

Effect van kanteling van de drukdoos in dwarsrichting (fig. 10)

serie no.	verdraaiing van stel- schroeven; graden *)	Δs mm **)	PI-Patm bij G = 0 N/m ² ***)	PI-Patm bij G = 199,5191 grf N/m ² ***)	φ = ****)
1	0	0	335,6	983,7	3,2483
2	45	0,034	335,6	983,8	3,2488
3	90	0,069	334,9	982,9	3,2478
4	135	0,103	334,7	979,4	3,2313
5	180	0,138	334,6	957,7	(3,1230)
6	225	0,172	334,3	851,7	(2,5932)
7	180	0,138	334,6	966,9	(3,1691)
8	135	0,103	334,8	980,2	3,2348
9	90	0,069	335,6	982,3	3,2413
10	45	0,034	335,3	983,1	3,2468
11	0	0	335,4	984,1	3,2513
12	-45	-0,034	335,8	983,7	3,2473
13	-90	-0,069	335,4	828,1	(2,4694)
14	-135	-0,103	335,4	688,5	(1,7698)
15 = 13	-90	-0,069	335,6	835,7	(2,5065)
16 = 12	-45	-0,034	335,8	984,0	3,2488
17 = 11	0	0	335,4	984,0	3,2508
18 = 15	-90	-0,069	335,6	836,0	(2,5080)

*) Schroeven M5 met 0,8 mm spoed op afstand 180 mm uit elkaar in tegengestelde richting verdraaid. Positief indien in vooraanzicht de rechterkant van de drukdoos omhoog gaat.

**) Δs = verandering van de spleetwijdte opzij (zie fig. 10).

***) Manometer: Mensor VTH 42-028.

****) hier: $\varphi = [(PI-Patm)_{G = 199,5} - (PI-Patm)_{G = 0}] / G$ N/m² per grf.

Tabel 6

Gemeten effect van kanteling van de drukdoos in langsrichting (zie fig. 10)

$\Delta p_v = \text{ong. } 600 \text{ mm H}_2\text{O}.$

serie no.	verdraaiing van de stel- schroeven graden *)	Δs mm **)	PI-Patm bij $G = 0$ N/m^2 ***)	PI-Patm bij $G =$ 199,5191 grf N/m^2 ***)	φ_w ****)
B1	0	0	335,6	984,1	3,2403
B2	45	0,010	335,7	985,7	3,2528
B3	90	0,021	335,7	983,0	3,2443
B4	135	0,031	335,4	983,1	3,2463
B5	180	0,041	335,3	984,2	3,2523
B6	360	0,083	335,4	982,3	3,2423
B7	540	0,124	334,9	978,0	(3,2233)
B8	720	0,165	334,7	838,8	(2,5266)
B9	540				
B10	360	0,083	334,9	982,3	3,2448
B11	180				
B12	0	0	335,6	984,3	3,2513
B13	-180	-0,041	335,6	984,5	3,2523
B14	-360	-0,083	335,6	984,3	3,2513
B15	-540	-0,124	335,1	950,5	(3,0844)
B16	-720	-0,165	334,1	893,5	(2,8037)
B17	-540				
B18	-360				
B19	-180				
B20	0	0	335,7	984,0	3,2493

*) Schroeven M5 met 0,8 mm spoed in gelijke richting verdraaid. Positief indien de hefboom omhoog gaat.

**) Δs = verandering van de spleetwijdte voor en achter (zie fig. 10)

***) Manometer: Mensor VTH 42-028.

****) hier: $\varphi_w = [(\text{PI-Patm})_{G=199,\dots} - (\text{PI-Patm})_{G=0}] / G \text{ N/m}^2 \text{ per grf}.$

Tabel 7

Het verband tussen de diameter d_* van de smooropening en de benodigde overdruk Δp_v voor het verticale mini-weegsysteem (schatting volgens programma 2-1-85 van toevoegsel A) *)

Beschouwde situatie: spleetwijdte $s_I = 0,15$ mm bij $K = 4$ N

d_* mm	Δp_v benodigd		snelheden			K
			in smoor- opening	in leiding	in spleet	
	N/m ²	mm H ₂ O	V_* m/sec	V_ℓ m/sec	V_I m/sec	N
8(=d)	5885,1	600	27,0	27,0	46,5	4
7	5968	608	35,3			
6	6260	638	48,1			
5	7184	732	69,2			
4	10316	1051	108,1			
3	23422	2387	192,2			
2,5	45343	4621	276,8			
2,4	53005	5402	300,4			
2,3	62510	6370	327,1			
2,2	74404	7583	357	27,0	46,5	4
2,1	(86122)	(8777)	(385)	(26,5)	(45,6)	(3,85)

*) $d_{eff} = 0,062$ m; $L_\ell = 2,45$ m; $d_\ell = 0,008$ m; $\lambda = 0,03$; $\phi = 0,85$; $\zeta = 1$

Fig. 1: Verticaal mini-weegsysteem
met 1 drukdoos

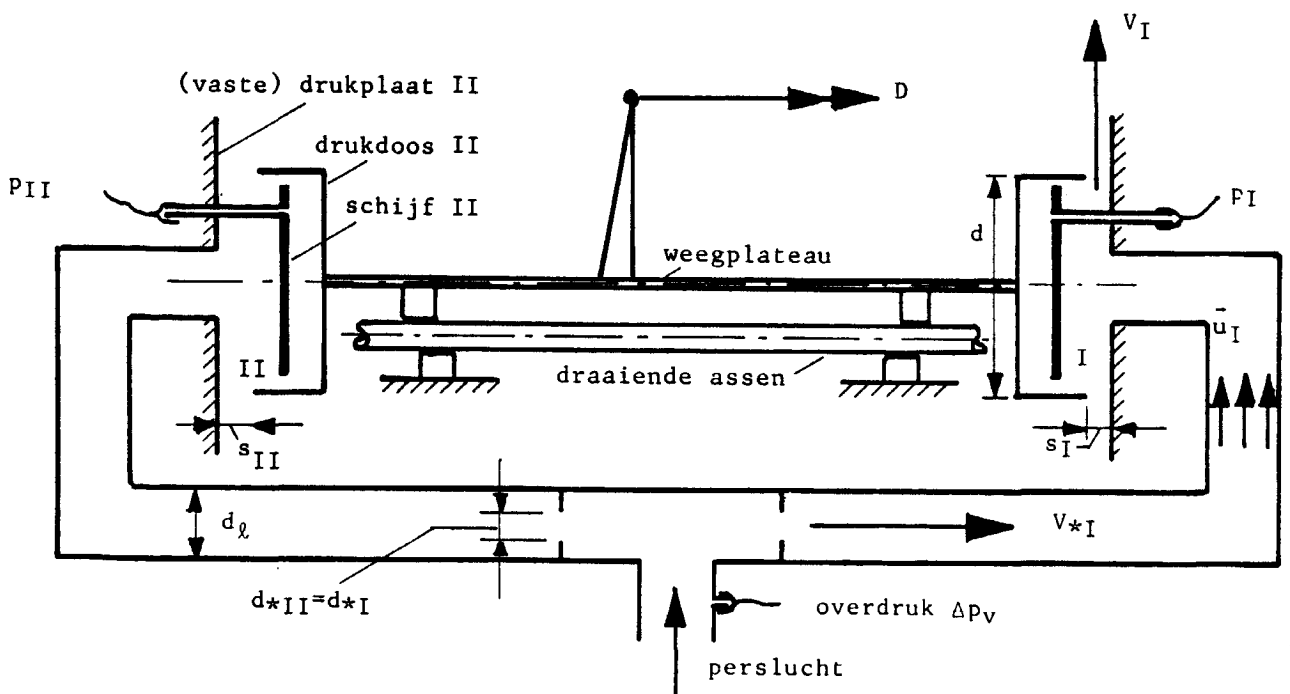
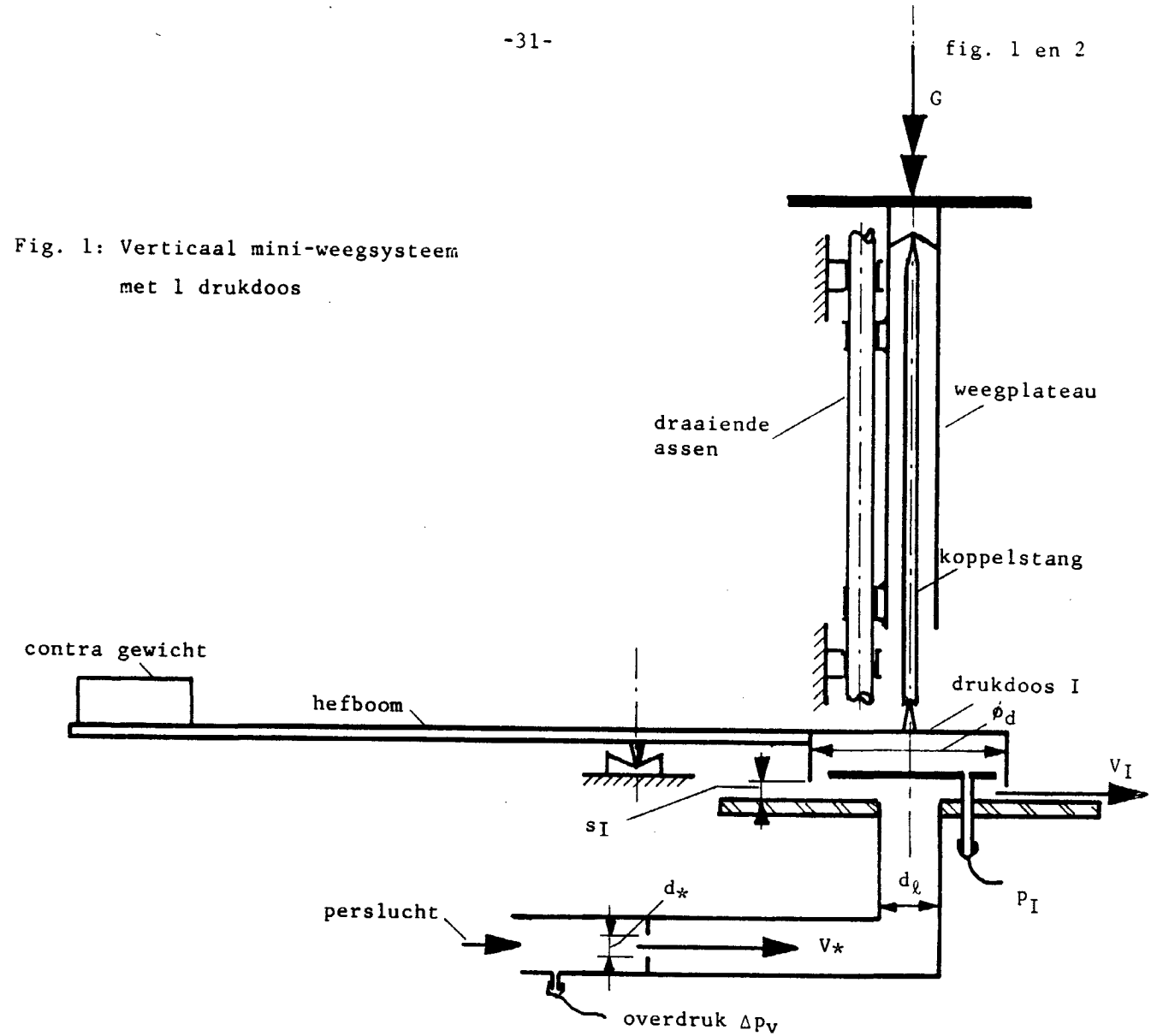


Fig. 2: Horizontaal mini-weegsysteem met 2 drukdozen.

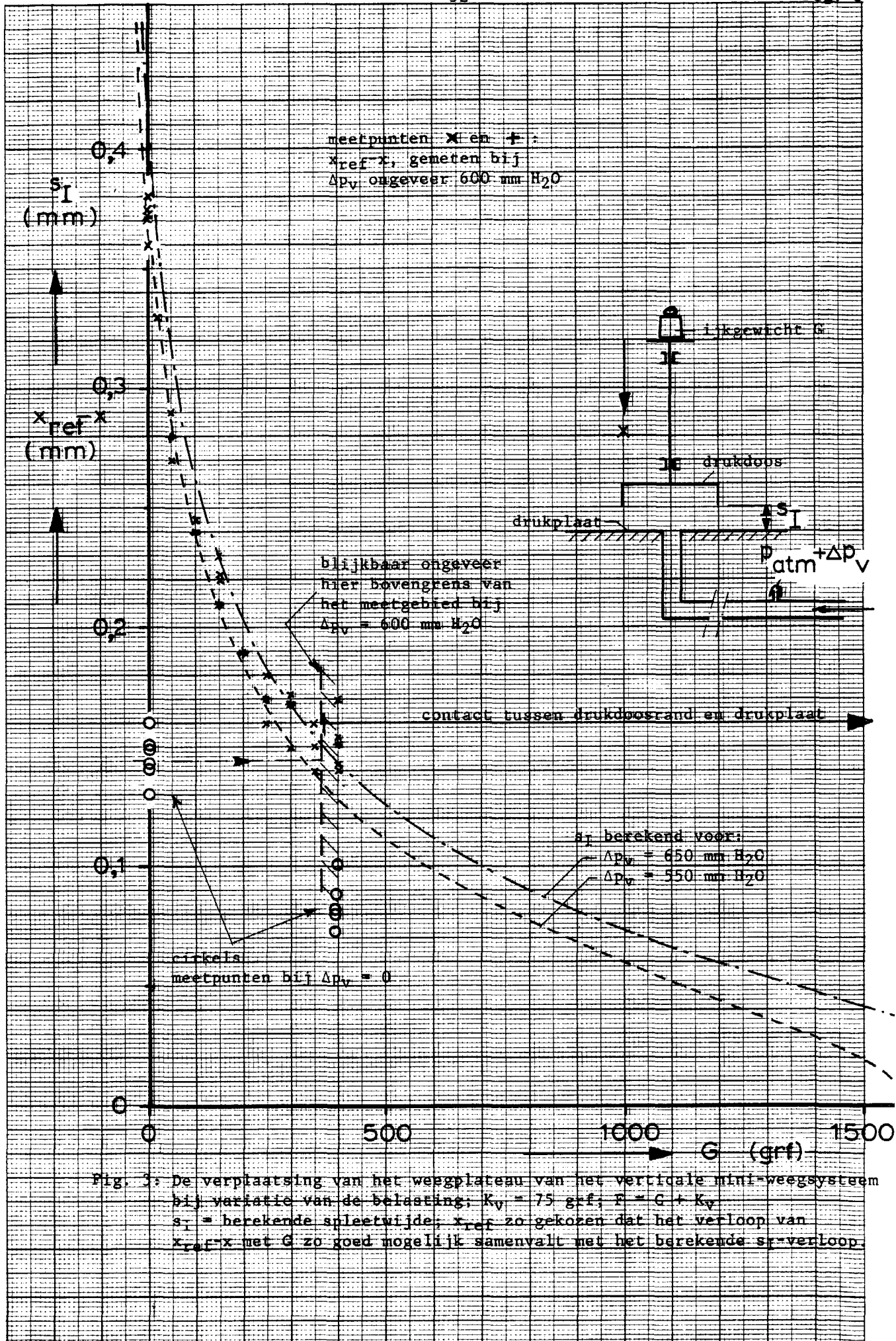


Fig. 3: De verplaatsing van het weegplateau van het verticale mini-weegsysteem bij variatie van de belasting; $K_v = 75$ grf; $F = G + K_v$
 s_I = berekende spleetwijde; x_{ref} zo gekozen dat het verloop van $x_{ref} - x$ met G zo goed mogelijk samenvalt met het berekende s_I -verloop.

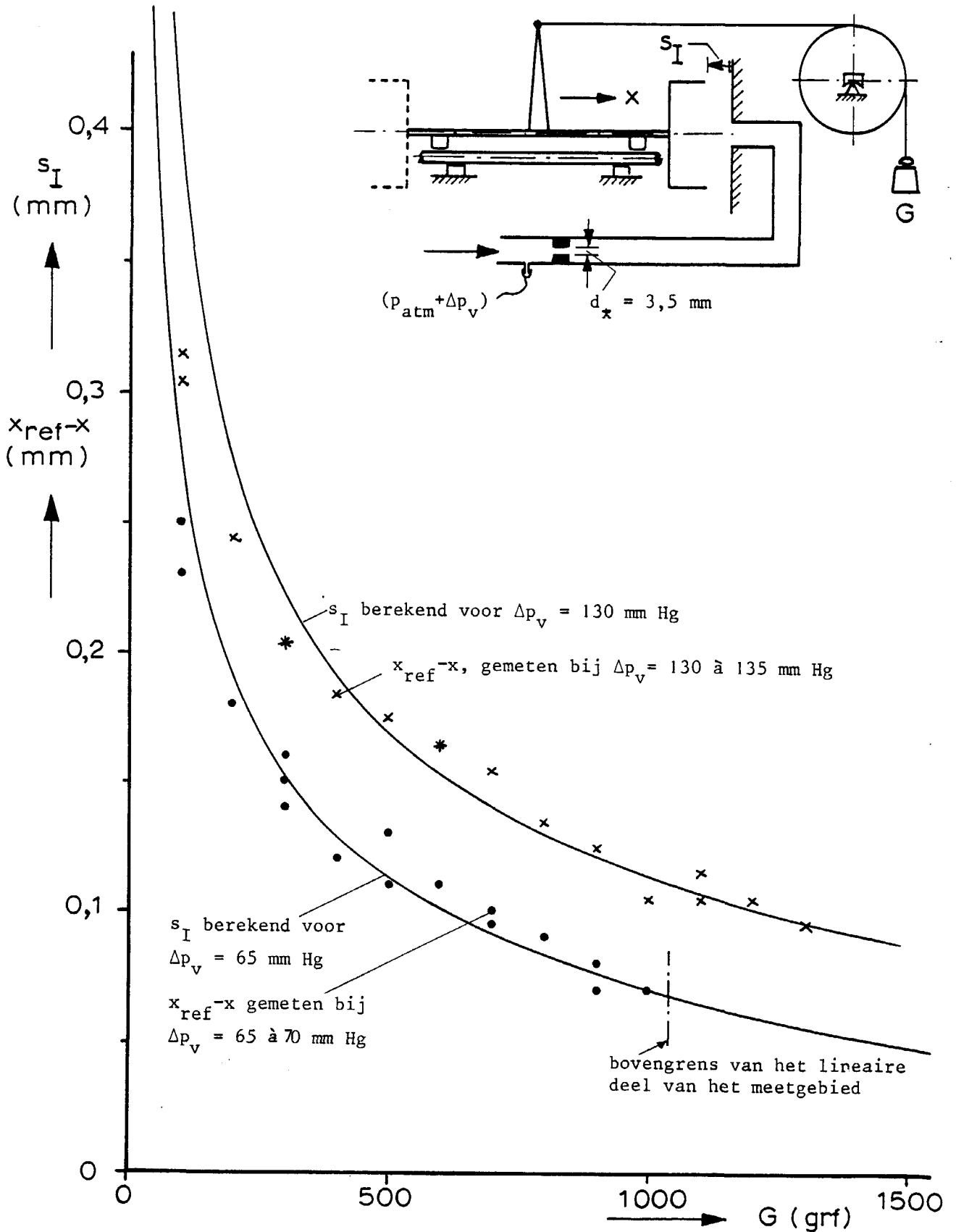


Fig. 4 : De verplaatsing van de drukdoos van het horizontale mini-weegsysteem bij variatie van de belasting.
 s_I = berekende spleetwijdte; x_{ref} zo gekozen dat het verloop van $x_{ref}-x$ met G zo goed mogelijk samenvalt met het berekende s_I verloop

$p_I - p_{atm}$
(N/m²)



ijking 1
(drukplaat mogelijk
meeverend met de
er tegen drukkende
drukdoos bij
 $G > 400$ grf)

ijking 2b
(drukplaat vast
grote voorspanning door
veiligheidsveren onder
de drukplaat)

1 en 2

contact tussen drukdoosrand en drukplaat

ongeveer hier bovengrens
van het meetgebied bij
 $\Delta p_v = 600$ mm H₂O

1000

2000

3000

4000

500

1000

1500

G (grf)

Fig. 5: Oriënterende ijkingen 1 en 2 van het verticale mini-weegsysteem + manometer VTH 42-026 bij $\Delta p_v = 600$ mm H₂O.

Zie hierbij ook fig. 6 en 7.

ΔK
(grf)

10

5

0

-5

-10

blijkbaar ligt ongeveer
hier de bovengrens van het
meetgebied bij $\Delta p_v = 600 \text{ mm H}_2\text{O}$

ijking 1

0

500

1000

1500

G (grf)

Fig. 6- Oriënterende ijking 1 van het verticale mini-weegsysteem bij $\Delta p_v = 600 \text{ mm H}_2\text{O}$; gemeten afwijkingen ten opzichte van de "gemiddelde rechte ijklijn" die is afgeleid uit de meetpunten bij $G = 0 \text{ t/m } 350 \text{ grf}$.

$$F = G + K_v = G + 71 \text{ grf}$$

ΔK
(grf)

10

5

0

-5

-10

In het gebied $G > 400$ grf is ΔK niet bepaald ten opzichte van de echte ijklijn (voor $G < 425$ grf), maar ten opzichte van de gemiddelde ijklijn die volgt uit de meetpunten bij $G = 500$ t/m 800 grf.

blijkbaar ongeveer hier bovengrens van het meetgebied bij $\Delta p_v = 600$ mm H_2O

ijkling 2

0

500

1000

1500

 G (grf)

Fig. 7: Oriënterende ijkling 2 van het verticale mini-weegsysteem bij $\Delta p_v = 600$ mm H_2O ; gemeten afwijkingen ten opzichte van "gemiddelde rechte ijklijnen".

$$F = G + K_v = G + 71 \text{ grf.}$$

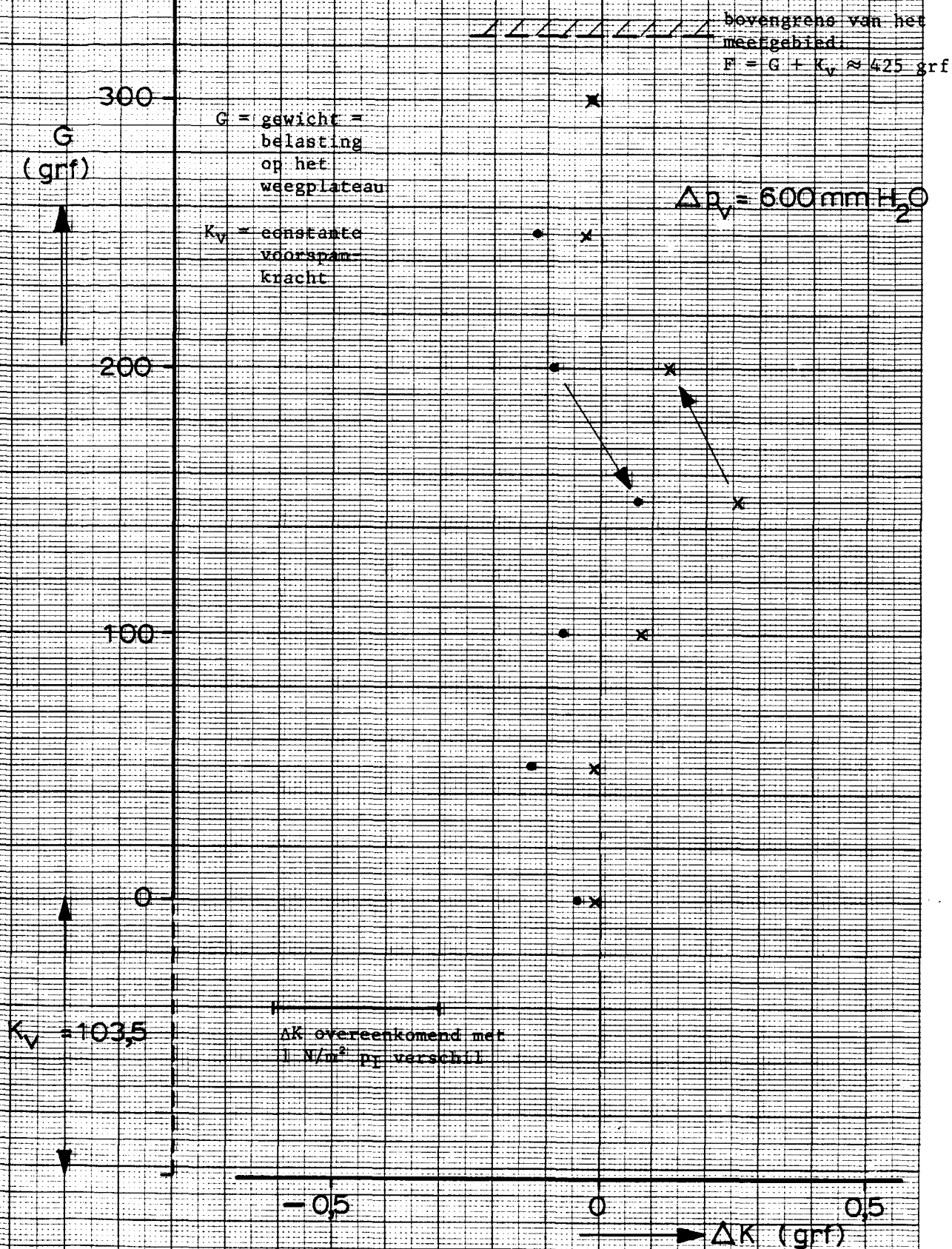


Fig. 8: Afwijkingen van de "gemiddelde rechte lijn" bij de nauwkeurige ijking 3 van het verticale mini-weegsysteem + manometer Mensor VTH 42-028 (zie ook tabel 4).

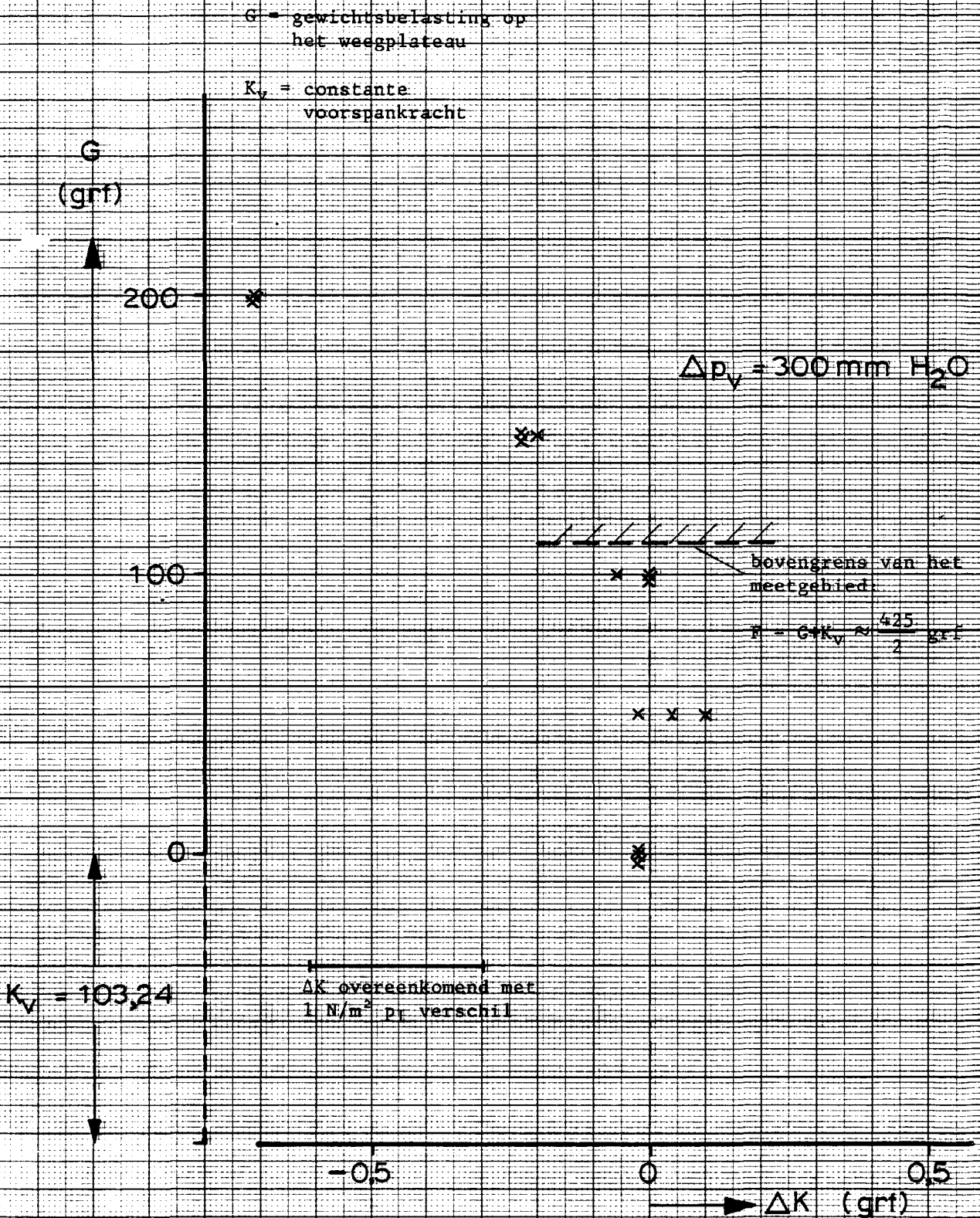


Fig. 9: Afwijkingen van de "gemiddelde rechte lijn" bij de nauwkeurige ijking 4 van het verticale mini-weegsysteem + manometer Mensor VTH 42-028 (zie ook tabel 4).

$$\phi = \text{"ijkfactor"} = \frac{(p_i - p_{atm})_{G=199,5 \text{ grf}} - (p - p_{atm})_{G=0}}{I/G} \quad \text{N/m}^2 \text{ per grf}$$

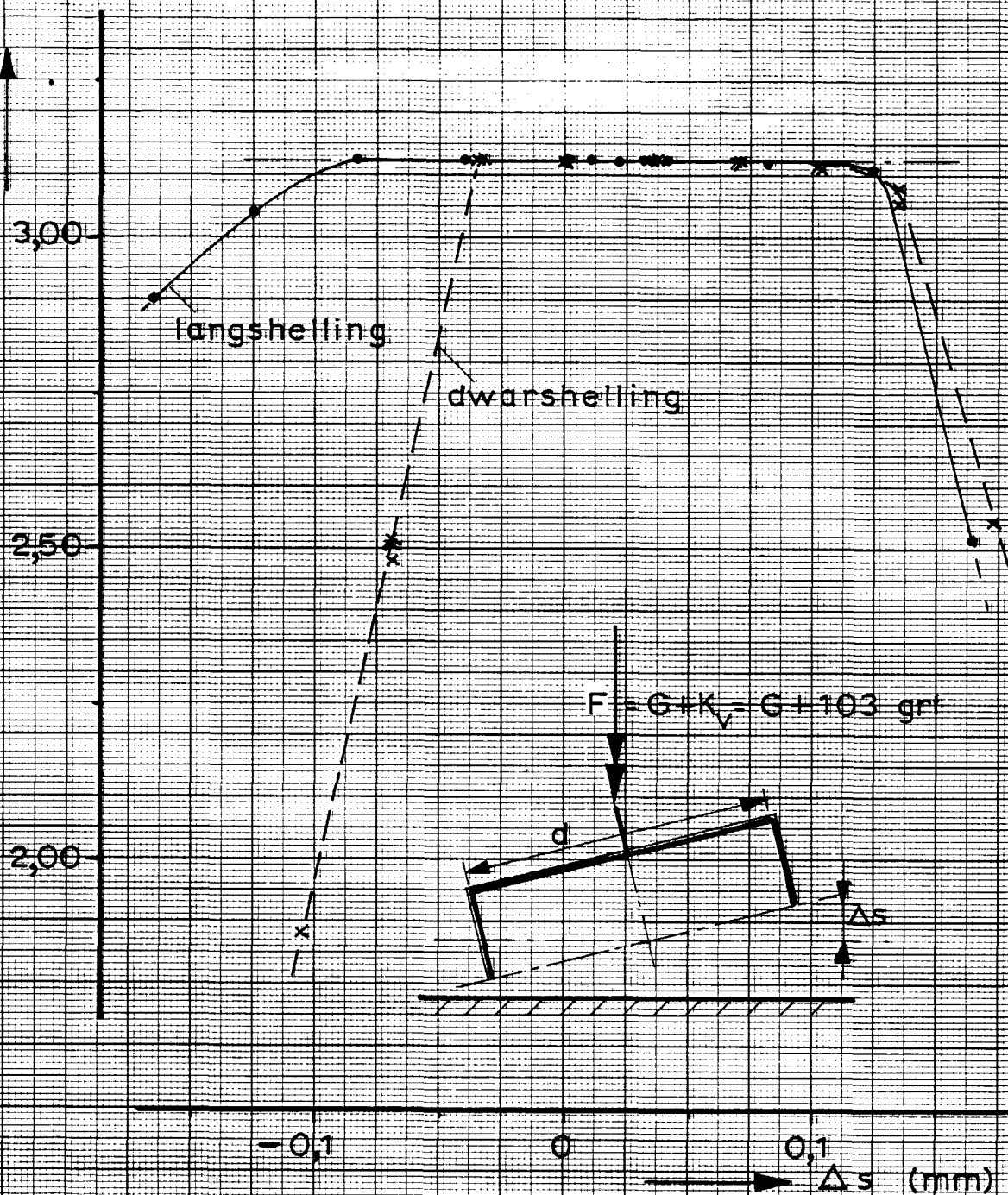


Fig. 10: Effect van kanteling van de drukdoos ten opzichte van de drukplaat op de ijkfactor.

Δs positief: bij langshelling als de spleet achter wijder is
bij dwarsshelling als de spleet in vooraanzicht rechts groter is dan links.

(Tabel 5 en 6).

Toevoegsel A bij memorandum M-533

"Een enkele drukdoos als krachtopnemer"; TI-59 programma 2-1-1985.

De beschouwde opstelling is in fig. 1 geschetst.

Rekening houdend met de in par. 3.1. genoemde snelheidsgrenzen is bij de berekening gewerkt met de volgende betrekkingen:

$$F_I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_I^2 \cdot A_{\text{drukdoos}} \quad (\text{A-1})$$

of

$$V_I = \sqrt{\frac{F_I}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{\text{doos}}}} \quad (\text{A-2})$$

Verder geldt:

$$Q = V_I \cdot A_I = V_* \cdot A_* \quad (\text{A-3})$$

waarin: A_I = de doortocht van de spleet = $\pi \cdot s_I \cdot d$

A_* = de doortocht van de smooropening = $\pi d_*^2 / 4$

Volgens (3) geldt verder:

$$\Delta p_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_*^2 \cdot C_I \quad (\text{A-4}) = 3$$

$$\Delta p_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_I^2 \cdot C_I \cdot \left[\frac{A_*}{A_I} \right]^2 \quad (\text{A-5})$$

waarin:

$$C_I = 1 - 2 \cdot \phi \cdot \frac{A_*}{A_\ell} + \left[\frac{A_*}{A_\ell} \right]^2 \cdot \left\{ 2 \cdot \phi + -1 + \lambda \frac{L_\ell}{d_\ell} + \left[\frac{A_*}{A_I} \right]^2 \right\} \quad (\text{A-6})$$

Uit (A-4) volgt:

$$V_* = \sqrt{\frac{\Delta p_V}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_I}} \quad (\text{A-7})$$

Eliminatie van $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_*^2$ uit (A-1) en (A-5) leidt voor $\Delta p_V \cdot A_{\text{doos}} > F$ tot de betrekking:

$$A_I = \pi \cdot s_I \cdot d = A_* \cdot \sqrt{\frac{\frac{\Delta p_v \cdot A_{doos}}{F_I} - 1}{C_I - (A_*/A_I)^2}} \quad (A-8)$$

Deze betrekkingen mogen alleen worden gebruikt voor zover daarbij

$$V_I < V_m \quad \text{en} \quad V_* < V_{*kr}.$$

De berekening van Δp_v , s_I en/of F_I kan geschieden met behulp van het programma TI-59 2-1-85. Voor het gebruik daarvan wordt verwezen naar de "Instructie voor gebruik" en het bijgevoegde schema.

Hieronder volgt nog een korte toelichting:

Drie soorten berekeningen worden onderscheiden:

- de berekening van " Δp_v benodigd" bij gegeven: s en F
- de berekening van s (en " Δp_v benodigd") bij: F en " Δp_v beschikbaar"
- de berekening van F (en " Δp_v benodigd") bij: " Δp_v beschikbaar" en s

ad a. Berekening van de minimaal benodigde overdruk Δp_v :

Na invoer van s_I wordt de maximaal verwerkbare waarde van F berekend: de waarde waarbij V nog niet groter is dan de voorgeschreven grenswaarde V_m .

Na invoer van F wordt eerst gecontroleerd of V inderdaad niet te groot wordt (anders llllll knipperend in display); daarna wordt nagegaan of de bij de ingevoerde F behorende waarde van V_* in de smooropening kleiner is dan V_{*kr} . Als dat het geval is wordt Δp_v benodigd berekend. Blijkt de aanvankelijk berekende waarde van V_* te groot te zijn dan wordt V_* gelijk genomen aan V_{*kr} en wordt de bijbehorende nieuwe waarde van de bij de gegeven s_I nog juist meetbare F berekend benevens de daarbij behorende waarde van Δp_v $_{kr}$ (het code nr. wordt dan llllllllll in plaats van l).

ad b. Berekening van de spleetwijdte s_I :

Na invoer van F wordt eerst nagegaan of die waarde toelaatbaar is, dat wil zeggen of V niet groter wordt dan V_m . Is V klein genoeg dan wordt de minimaal bij $s = 0$ benodigde overdruk berekend.

Na invoer van " Δp_v beschikbaar" wordt (als deze waarde tenminste groter is dan de minimaal bij $s = 0$ benodigde waarde) de snelheid V_{*I} in de smooropening berekend. Indien deze waarde kleiner is dan V_{*kr} wordt de berekening voortgezet en de waarde van s bepaald. Is de aanvankelijk berekende waarde van V_* niet kleiner dan V_{*kr} dan wordt V_* gelijk genomen aan V_{*kr} en wordt de nieuwe waarde Δp_v $_{kr}$ en de daarbij behorende waarde van s_I afgeleid.

ad c. Berekening van de kracht F op de drukdoos:

Na invoer van " Δp_v beschikbaar" en s wordt de uit (A-7) volgende waarde van V_* afgeleid. Is $V_* < V_{*kr}$ dan wordt de bijbehorende waarde van V_I berekend. Is deze waarde kleiner dan V_m dan volgt berekening van F .

Indien de aanvankelijk verkregen waarde van V_* niet kleiner is dan V_{*kr} wordt V_* gelijk genomen aan V_{*kr} en wordt, in het geval de bijbehorende waarde van V_I kleiner is dan V_m , niet alleen F berekend maar ook de bij de situatie passende nieuwe waarde van " Δp_v kr".

TI-59 programma: 2-1-1985: "Een enkele drukdoos als krachtopnemer"

Instructie voor gebruik:

eenheden: m; sec; N en kg massa

	invoer	toetsen	display
I. Programma laden ; eerst mach.instellen 4 kaartkanten lezen	3 0	2nd Op 17 lezen	719.29 1 t/m 4
II. Invoer van gegevens: effectieve doosdiameter lengte van toevoerleiding inw.diameter van leiding coëff. voor wrijvingsverlies diameter van smooropening *) rendement van sprongverwijding coëff. voor extra verlies in bochten kritieke (max.)waarde voor V_* toegelaten max.waarde voor V_I luchtdichtheid/2	d L_ℓ d_ℓ λ d_* ϕ ζ V_{*kr} V_m $\rho/2$	STO 00 STO 01 STO 02 STO 03 STO 04 STO 07 STO 08 STO 09 STO 10 STO 11	
III. Voorbereiding (steeds na wijziging v.II) Hierna of IV, of V of VI		SBR EE	d_*
IV. Berekening van Δp_v ; invoer spleetwijdte invoer kracht op doos	s_I F_I	C 2nd C'	max.toel. F_I of **) of
V. Berekening van s_I ; invoer kracht op doos invoer beschikbare p_v	F_I Δp_v	D 2nd D'	of **) of $\Delta p_{vmin.}$ of ***) of
VI. Berekening van F: invoer beschikbare Δp_v invoer s_I	Δp_v s_I	E 2nd E'	Δp_v beschikb. of *** *) of *** **) of
) indien geen vernauwing aanwezig is dan $d_ = d_\ell$ **) 1111111 knipperend als $V_I \geq V_m$ (F te groot) ***) 9999999 knipperend als $\Delta p_v < p_v$ minimum **** *) 333333 knipperend als $V \geq V_m$ $V_* < V_{*kr}$ **** **) 444444 knipperend als $V \geq V_m$ bij $V_* = V_{*kr}$ **** ***) herkenningcode:			
voor berekening:	IV.	V.	VI
normaal: $V_* < V_{*kr}$	1	2	3
bij grote overdruk: $V_* = V_{*kr}$ gesteld en aangepaste F en/of Δp_v ingevoerd	11111111	22222222	33333333
			R/S R/S R/S R/S R/S R/S R/S R/S R/S R/S F_I s_I Δp_v code nr *** ***) d_* V_* u V_I PI-Patm Q m ³ /sec .0000000000

K_{max} die behoort bij $V_I = V_m$ kan worden opgeroepen via SBR SBR

Na afloop van de berekening kunnen resultaten worden opgeroepen via SBR RCL

TI-programma 2-1-85 (vervolg 2)

)		+	(	R/S
$\sqrt{x}$		RCL 16	RCL 21	RCL 23 ΔP_v
)		:	x^2	2nd Fix 1
STO 19 A_I		RCL 19	x	R/S
(		x^2	RCL 05	RCL 29 code nr.
CE		))	)	2nd Fix 0
:		STO 23 $\Delta P_{v\text{nieuw}}$	STO 20 K	R/S
2nd π		GTO RCL	GTO RCL	
:				
RCL 00		<u>2nd Lbl E</u>	<u>2nd Lbl 2nd B'</u>	RCL 04 d*
)		STO 06	SBR 1/x	2nd Fix 4
STO 18 s_I		STO 23 ΔP_v	STO 29	R/S
(		R/S	RCL 10	RCL 22 V_*
RCL 21 V_I			x $\blacktriangle$ t	2nd Fix 1
x		<u>2nd Lbl 2nd E'</u>	RCL 09	R/S
RCL 19		STO 18 s_I	STO 22 $V_{I\text{nieuw}}$	(
)		(	(	RCL 24
STO 24 Q_I		CE	CE	:
(		x	x	RCL 14
CE		RCL 00	RCL 15	)
:		x	)	STO 25 $\bar{u}$
RCL 15		2nd π	STO 24 $Q_{I\text{nieuw}}$	R/S
)		)	(	RCL 21 V_I
STO 22 V_{*I}		STO 19 A_I	CE	R/S
2nd $x \geq t$ B		3	:	(
GTO RCL		STO 29	RCL 19	RCL 20
		RCL 09	)	:
<u>2nd Lbl B</u>		x $\blacktriangle$ t	STO 21 $V_{I\text{nieuw}}$	RCL 13
SBR $\sqrt{x}$		(	2nd $x \geq t$ SUM	)
STO 29 code		RCL 23	(	STO 26 $PI\text{-}Patm$
RCL 09		:	CE	2nd Fix 2
STO 22 $V_{*I\text{nieuw}}$		RCL 11	x^2	R/S
(		:	x	RCL 24 Q
CE		(	RCL 05	2nd Fix 6
x		RCL 17	)	R/S
RCL 15		+	STO 20 $K_{I\text{nieuw}}$	0 00000000
)		RCL 16	(	2nd Fix 8
STO 24 $Q_{I\text{nieuw}}$		:	RCL 11	R/S
(		RCL 19	x	GTO RCL
CE		x^2	RCL 22	
:		))	x^2	<u>2nd Lbl x^2</u>
RCL 21		$\sqrt{x}$	x	RCL 12 x) 11111111
)		STO 22 V_{*I}	(	INV SBR
STO 19 $A_{I\text{nieuw}}$		2nd $x \geq t$ 2nd B'	RCL 17	
(		RCL 10	+	<u>2nd Lbl x</u>
CE		x $\blacktriangle$ t	RCL 16	2 x RCL 12 x) 22222222
:		(	:	INV SBR
RCL 00		RCL 22	RCL 19	
:		x	x^2	<u>2nd Lbl 1/x</u>
2nd π		RCL 15	))	3 x RCL 12 x) 33333333
)		)	STO 23 ΔP_v nieuw	INV SBR
STO 18 $s_{I\text{nieuw}}$		STO 24 Q_I	GTO RCL	
(		(	<u>2nd Lbl RCL</u>	<u>2nd Lbl SUM</u>
RCL 11		CE	RCL 20 K	4 x RCL 12 x) 44444444
x		:	2nd Fix 3	INV SBR
RCL 22		RCL 19	R/S	
x^2		)	RCL 18 s_I	<u>2nd Lbl A</u>
x		STO 21 V_I	2nd Fix 6	9 x RCL 12 x) 99999999
(		2nd $x \geq t$ 1/x		INV SBR
RCL 17				eind

Toevoegsel B bij memorandum M-533

"Drukdozen als krachtopnemers"; TI-59 programma 8-1-1985

Hoewel het programma ook kan worden gebruikt voor apparaten met een enkele drukdoos is het vooral bedoeld voor systemen met twee drukdozen volgens het schema van fig. 2. Berekend wordt de resultante F van de door de beide drukdozen geleverde kracht bij gegeven waarden van de overdruk Δp_v en de spleetwijdte s_I van de meet-drukdoos. Voor het gebruik kan worden verwezen naar de "instructie voor gebruik" en het bijgevoegde schema.

Enkele toelichtingen volgen hieronder:

Indien $\psi = 0$ wordt ingevoerd heeft de werking van het programma betrekking op een systeem met een enkele drukdoos; de berekening verloopt op dezelfde wijze als bij punt VI van het programma in toevoegsel A.

Bij $\psi = 1$ geldt de berekening voor twee drukdozen. Een complicatie ten opzichte van de situatie bij slechts een doos is dat de druk in de ene drukdoos kan worden beïnvloed door de stand van de andere. Bij de uitwerking is aangenomen dat zowel de beide drukdozen I en II als de toevoerleidingen en eventueel aanwezige smooropeningen voor beide drukdozen gelijk zijn.

Met betrekking tot de bij de berekening toelaatbare bovengrenzen voor de snelheden in nauwe leidingdelen kan het volgende worden opgemerkt. Aangezien de spleetwijdte van doos II altijd groter is dan die van doos I behoeft niet speciaal op de snelheid V_{II} van doos II te worden gelet; indien $V_I < V_m$ wordt gehouden is V_{II} automatisch klein genoeg. Met betrekking tot de smooropeningen is de situatie iets ingewikkelder. Op grond van het feit dat s_{II} altijd groter is dan s_I zal, als d_{II} tenminste gelijk is aan d_I , de snelheid V_{II} in smooropening II altijd groter zijn dan V_I .

Bij toeneming van Δp_v kunnen achtereenvolgens drie gebieden worden onderscheiden:

1. het subsone gebied: zowel V_I als V_{II} kleiner dan V_{kr}
2. een tussengebied: $V_{II} = V_{kr}$ maar V_I nog kleiner dan V_{kr}
3. het boven-kritieke gebied: zowel V_{II} als V_I is gelijk aan V_{kr} .

Bij de berekening van de waarde van de overdruk benodigd om deze toestand te bereiken moet worden uitgegaan van de situatie waarbij V_I juist gelijk wordt aan V_{kr} .

Bij de berekening waarbij is uitgegaan van betrekkingen die voor een incompressibel medium gelden moet er voor worden gezorgd dat noch V_{II} noch V_I groter wordt dan V_{kr} . In het programma wordt, indien een aanvankelijk berekende waarde van V de waarde V_{kr} overschrijdt, bij de voortzetting van de berekening uitgegaan van een

situatie waarbij $V_* = V_{*kr}$ is genomen. Bovendien wordt de berekening afgebroken indien V_I groter dreigt te worden dan de grenswaarde V_m . Een overzicht van de gang van de berekening is in het bijgevoegde schema gegeven. Bij de berekening is onder meer gebruik gemaakt van de volgende betrekkingen:

$$F = D + K_{VO} + f \cdot s_I = (P_I - P_{II}) \cdot A_{doos} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{doos} \cdot (V_I^2 - V_{II}^2) \quad (B-1)$$

De berekening van V_{*i} uit Δp_V geschiedt met (3):

$$\Delta p_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{*i}^2 \cdot C_i \quad (B-2) = 3$$

waarin:

$$C_i = 1 - 2 \cdot \phi \cdot \frac{A_*}{A_\ell} + \left[\frac{A_*}{A_\ell} \right]^2 \cdot \left\{ 2 \cdot \phi + \zeta - 1 + \lambda \frac{L_\ell}{d_\ell} + \left[\frac{A_*}{A_\ell} \right]^2 \right\} \quad (B-3)$$

hierin is: ϕ = het rendement van de sprongverwijding achter een vernauwing

ζ = (het extra drukverlies door bochten) / $(\frac{1}{2} \rho \bar{u}^2)$

λ = coëfficiënt voor het leidingverlies door wandrijving

Dezelfde vergelijking wordt gebruikt voor de berekening van Δp_{Vkr} in die gevallen waarin V_{*i} gelijk aan V_{*kr} moet worden genomen.

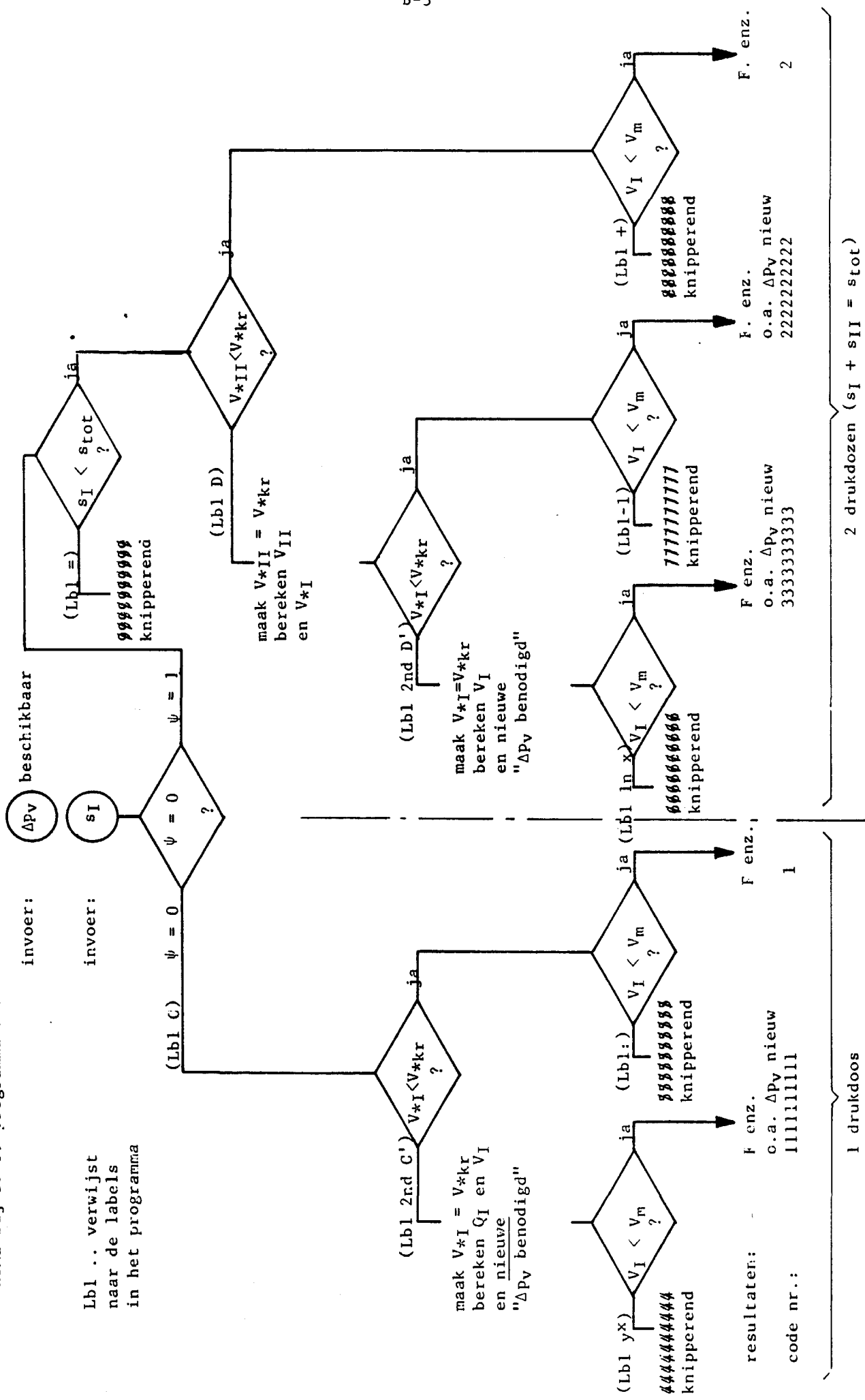
Uit (B-2) volgt voor de waarde van de snelheid V_i in spleet i:

$$V_i^2 = V_{*i}^2 \cdot \left[\frac{A_*}{A_i} \right]^2 = \frac{\Delta p_V}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_i} \cdot \left[\frac{A_*}{A_i} \right]^2 \quad (B-4)$$

of na substitutie in (B-1):

$$F = D + K_{VO} + f \cdot s_I = \Delta p_V \cdot A_{doos} \cdot \left[\frac{(A_*/A_I)^2}{C_I} - \frac{(A_*/A_{II})^2}{C_{II}} \right] \quad (B-5)$$

Hiermee kan o.a. bij gegeven waarden van Δp_V en s_I de waarde van de door de drukdozen opgenomen kracht F worden berekend. Daarbij moet worden overwogen dat bij een systeem met twee drukdozen bij de beweging van het plateau de som van de spleetwijdte I en II gelijk blijft aan de ingestelde constante waarde s_{tot} zodat bij elke waarde s_I de bijbehorende waarde van s_{II} ook bekend is.



Lb1 .. verwijst naar de labels in het programma

resultaten:
code nr.:

1 drukdoos

2 drukdozen (sI + sII = stot)

[illegible]

TI-59 programma 8-1-85 (vervolg 1)

d	STO 00	x^2	CE	((
L_θ	STO 01	:	x	RCL 20
d_θ	STO 02	4	RCL 05	x^2
λ	STO 03	)	-	x
d_*	STO 04	STO 15	A_*	RCL 06
ψ	STO 05	x^2	)	RCL 22
s_{tot}	STO 06	STO 16	A_*^2	2nd CP
ϕ	STO 07	(	2nd $x \gg t =$	1/x
ζ	STO 08	1	+/-	-
V_{kr}	STO 09	-	STO 19	RCL 05
V_m	STO 10	2	(	:
$\rho/2$	STO 11	x	CE	RCL 21
1111111	STO 12	RCL 07	ϕ	x^2
		x		:
		RCL 15	RCL 00	RCL 23
2nd Lbl (		:	x	))
(		RCL 14	2nd π	STO 26
CE		+	)	Δp_v
:		RCL 16	STO 21	
RCL 11		:	(	2nd Lbl GTO
:		RCL 14	RCL 18	STO 26
RCL 22		x^2	x	Δp_v
)		x	RCL 00	R/S
$\sqrt{x}$	V_{*I}	x	x	2nd Lbl SBR
INV SBR		(	2nd π	STO 18
	uit Δp_v	2	)	s_I
2nd Lbl)		x	STO 20	SBR SUM
(		RCL 07	ϕ	2
CE		+	(	STO 39
x		RCL 08	RCL 17	RCL 05
RCL 15		-	+	2nd $x=t$ C
:		1	RCL 16	RCL 09
RCL 20		+	:	$x \blacktriangle t$
)	V_I	RCL 03	RCL 20	(
INV SBR		x	x^2	RCL 26
	uit V_{*I}	RCL 01	)	:
2nd Lbl EE		:	STO 22	RCL 11
(		RCL 02	(	:
2nd π		))	RCL 17	RCL 23
x		STO 17	+	)
RCL 00		RCL 04	RCL 16	$\sqrt{x}$
x^2		2nd Fix 4	:	STO 32
:		R/S	RCL 21	2nd $x \gg t$ D
4			x^2	RCL 26
)			)	SBR (
STO 13	A_{doos}	2nd Lbl A	STO 23	STO 29
(		SBR SUM	INV SBR	V_{*I}
2nd π		(		SBR)
x		RCL 10	2nd Lbl B	STO 27
RCL 02		x^2	STO 25	RCL 10
x^2		x	((	$x \blacktriangle t$
:		RCL 11	CE	RCL 27
4		x	+	2nd $x \gg t$ +
)		RCL 13	RCL 24	2nd Lbl STO
STO 14		)	)	(
(		R/S	:	RCL 32
2nd π			RCL 13	x
x		2nd Lbl SUM	:	RCL 15
RCL 04		STO 18	RCL 16	)
		(	:	STO 31
				Q_{II}

TI-59 programma 8-1-85 (vervolg 2)

(	RCL 39	code	$\frac{2nd\ Lbl\ +}{8\ x\ RCL\ 12\ x\)}$	$\frac{2nd\ Lbl\ 2nd\ D'}{RCL\ 10}$
CE	R/S		INV SBR	$x \blacktriangleleft t$
:	RCL 04	d*		RCL 09
RCL 21	2nd Fix 4			STO 29
)	R/S		$\frac{2nd\ Lbl\ =}{0}$	V*I _n ieuw
STO 30	RCL 29	V*I	1/x	SBR)
(	2nd Fix 1		R/S	STO 27
RCL 31	R/S			V _I nieuw
:	RCL 32	V*II		2nd x $\geq$ t ln x
RCL 14	R/S		$\frac{2nd\ Lbl\ C}{1}$	(
)	RCL 35	$\bar{u}_I$	STO 39	RCL 29
STO 36	R/S		RCL 09	x^2
(	RCL 36	$\bar{u}_{II}$	$x \blacktriangleleft t$	x
RCL 29	R/S		0	RCL 11
x	RCL 27	V _I	STO 32	x
RCL 15	R/S		V*II	RCL 22
)	RCL 30	V _{II}	RCL 26	)
STO 28	R/S		SBR (	STO 26
(	RCL 33	PI-PII	STO 29	Δp_v nieuw
CE	2nd Fix 2		V*I	SBR 1/x
:	R/S			STO 39
RCL 14	RCL 37	Q _{tot}	2nd x $\geq$ t 2nd C'	GRO STO
)	2nd Fix 6		SBR)	
STO 35	R/S		STO 27	V _I
(	0		RCL 10	
RCL 11	2nd Fix 8		$x \blacktriangleleft t$	
x	R/S		RCL 27	
(	GTO RCL		2nd x $\geq$ t :	
RCL 27			GTO STO	EIND.
x^2	$\frac{2nd\ Lbl\ x^2}{RCL\ 12\ x\)}$		$\frac{2nd\ Lbl\ 2nd\ C'}{RCL\ 10}$	
-	INV SBR		$x \blacktriangleleft t$	
RCL 30			RCL 09	
x^2	$\frac{2nd\ Lbl\ \sqrt{x}}{2\ x\ RCL\ 12\ x\)}$		STO 29	V*I _n ieuw
))	INV SBR		SBR)	
STO 33			STO 27	V _I nieuw
(	$\frac{2nd\ Lbl\ 1/x}{3\ x\ RCL\ 12\ x\)}$		2nd x $\geq$ t y^x	
CE	INV SBR		SBR x^2	
x			STO 39	
RCL 13			GTO STO	
)	$\frac{2nd\ Lbl\ y^x}{4\ x\ RCL\ 12\ x\)}$		$\frac{2nd\ Lbl\ D}{RCL\ 09}$	
STO 34	INV SBR		STO 32	V*I _I nieuw
(			RCL 26	Δp_v oud
RCL 28	$\frac{2nd\ Lbl\ :}{5\ x\ RCL\ 12\ x\)}$		SBR (	
+	INV SBR		STO 29	V*I
RCL 31			2nd x $\geq$ t 2nd D'	
)			RCL 10	
STO 37	$\frac{2nd\ Lbl\ ln\ x}{6\ x\ RCL\ 12\ x\)}$		$x \blacktriangleleft t$	
	INV SBR		RCL 29	
$\frac{2nd\ Lbl\ RCL}{RCL\ 34\ F}$			SBR)	
2nd Fix 3	$\frac{2nd\ Lbl\ -}{7\ x\ RCL\ 12\ x\)}$		STO 27	V _I
R/S	INV SBR		2nd x $\geq$ t -	
RCL 18			SBR $\sqrt{x}$	
2nd Fix 6			STO 39	
R/S			GTO STO	
RCL 26				
Δp_v				
2nd Fix 0				
R/S				

Toevoegsel C bij Memorandum M-533

"Gedachtenspel ter bepaling van V_{*kr} voor de stroming door een smooropening";
 TI-59 programma 7-1-1985

Ter verkrijging van een indruk van de waarde van de in de rekenprogramma's gehanteerde bovengrens V_{*kr} voor de snelheid in een smooropening is het volgende gedachtenspel gespeeld. Het heeft betrekking op de in fig. C-1 geschetste situatie.

Vergeleken zijn twee stromingen door een leidingelement waarin zich een vernauwing (smooropening) bevindt en wel:

- A. een werkelijke stroming van (compressibele) lucht, en
- B. een vergelijksstroming van een incompressibel medium.

De inwendige diameter d_l van de leiding is voor A en B gelijk; op enige afstand stroomafwaarts van de smooropeningen, in doorsnede a (achter) is ook de waarde van de druk (p_a), de dichtheid (ρ_a) en de snelheid (u_a) gelijk voor A en B.

In de nauwste doorsnede van de vernauwing in leiding A, de keel, waarvan de diameter d_k bedraagt is de luchtsnelheid V_k m/sec; de druk in doorsnede v op enige afstand voor de vernauwing wordt met p_v aangeduid; de dichtheid is daar ρ_v , de snelheid u_v .

Gevraagd wordt nu in eerste instantie: welke diameter d_* aan de smooropening in het incompressibele geval B moet worden gegeven en welke snelheid V_* in die opening moet worden ingesteld om te bereiken dat bij eenzelfde massa-transport als in geval A ook de in doorsnede v benodigde druk gelijk is aan die in de werkelijke stroming A. Daarna, en dat is het eigenlijk beoogde doel, zal worden nageaan welke kritieke waarde V_* bereikt indien V_k gelijk wordt aan de kritieke geluidssnelheid a^* in de keel van de werkelijke stroming A en welke waarde van d_* daarbij behoort.

Bij de berekening zijn o.m. de volgende vereenvoudigingen toegepast:

- a. In geval A is aangenomen dat de temperatuur T_v stroomopwaarts gelijk is aan de temperatuur T_a stroomafwaarts na het mengproces;
- b. Er is geen rekening gehouden met een terugwinning van druk in het gebied stroomafwaarts van de smooropeningen. Aangenomen is dat zowel bij stroming A als bij B de druk in de nauwste doorsnede gelijk is aan de druk p_a ver stroomafwaarts in doorsnede a.

Voor de werkelijke stroming tussen de doorsneden v en k geldt:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_v}{\rho_v} + \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot u_v^2 = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_k}{\rho_k} + \frac{1}{2} \cdot V_k^2 \quad (C-1)$$

waarin voor p_k ook p_a kan worden geschreven:

Na enige herleiding volgt:

$$V_k^2 = u_v^2 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot R.T. \left[1 - \left\{ \frac{p_a}{p_k} \right\}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (C-2)$$

De hierin voorkomende grootheden kunnen worden opgevat als functies van de snelheid V_* in het incompressibele geval B.

De betrekking tussen (p_v/p_a) en V_* volgt uit de eis dat het drukverlies in de vergeleken stromingen A en B gelijk moet zijn.

Voor stroming B kan bij verwaarlozing van een eventuele drukstijging stroomafwaarts van de smooropening worden geschreven:

$$p_v - p_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot (V_*^2 - u_a^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V_*^2 (1 - (d_*/d_l)^4) \quad (C-3)$$

Hieruit volgt dat voor die stroming en dus ook voor de werkelijke stroming A geldt:

$$\frac{p_v}{p_a} = 1 + \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot V_*^2 (1 - (d_*/d)^4)}{p_a} \quad (C-4)$$

Aangezien voor de werkelijke stroming is aangenomen dat T_a gelijk is aan $T_v = T$ geldt voor de dichtheden:

$$\rho_v = \rho_a \cdot \frac{p_v}{p_a} \quad (C-5)$$

Uit de eis dat het massatransport in de stromingen A en B gelijk moet zijn volgt dus:

$$u_v = u_a \cdot \frac{\rho_a}{\rho_v} \text{ of ook: } u_v = V_* \cdot (d_*/d_l)^2 \cdot \frac{p_a}{p_v} \quad (C-6)$$

Substitutie van (C-4) in (C-6) en daarna van (C-4) en (C-6) in (C-2) levert een vergelijking waarmee bij een gegeven verhouding (d_*/d_l) bij elke waarde van V_* de bijbehorende waarde van V_k in de werkelijke stroming kan worden berekend.

Vooral van belang is de vraag welke de kritieke waarde V_{*kr} van V_* is, dat wil zeggen de waarde waarbij de bijbehorende V_k in werkelijkheid gelijk wordt aan de kritieke geluidssnelheid a^* in de keel.

De waarde van a^* kan worden afgeleid uit de betrekking:

$$\frac{1}{2} \cdot u_v^2 + \frac{1}{\gamma-1} \cdot a_{voor}^2 = \frac{1}{2} \cdot V_k^2 + \frac{1}{\gamma-1} \cdot a_{keel}^2 \quad (C-7)$$

hierin is $a_v^2 = \gamma \cdot R \cdot T_v$ waarin T_v gelijk aan $T_a = T$ is gesteld.

Voor de kritieke geluidssnelheid, de waarde van V_k waarbij V_k gelijk wordt aan de plaatselijke geluidssnelheid a_{keel} volgt uit (C-7)

$$a^{*2} = \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \cdot u_v^2 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} \cdot R \cdot T \quad (C-8)$$

Gelijkstelling van (C-8) en (C-2) levert een betrekking tussen u_v en p_v/p_a in de kritieke toestand; na enige herleiding volgt:

$$u_v^2 \cdot \frac{2}{\gamma+1} + 2 \cdot R \cdot T \left\{ \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left\{ \frac{p_a}{p_v} \right\}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] - \frac{\gamma}{\gamma+1} \right\} = 0 \quad (C-9)$$

Na substitutie van (C-4) en (C-6) in (C-9) wordt een vergelijking verkregen waaruit de waarde van V_{*kr} bij gegeven d_*/d_ℓ kan worden opgelost.

Een daartoe bruikbaar TI-59 programma 7-1-85 is in dit toevoegsel opgenomen.

Enkele resultaten zijn in tabel C-1 en figuur C-2 gegeven.

De waarde van V_{*kr} is blijkbaar afhankelijk van de verhouding d_*/d_ℓ dus van de relatieve grootte van de smooropening. In het voor de praktijk van belang zijnde gebied van openingsverhoudingen: d_* zeker kleiner dan $\frac{1}{2}d_\ell$ is het verloop echter gering. In de programma's van de toevoegsels A en B is voor V_{*kr} een waarde 385 m/sec aangehouden.

Tot slot moet er nog op worden gewezen dat de diameter d_k van de keel in stroming A kan verschillen van de diameter d_* in het incompressibele geval B.

De waarde van d_k kan worden afgeleid uit de continuïteitswet toegepast op de doorsneden v en k van de werkelijke stroming A:

$$\left[\frac{d_k}{d_\ell} \right]^2 = \frac{u_v \cdot \rho_v}{V_k \cdot \rho_k} = \frac{u_v}{V_k} \left[\frac{p_v}{p_a} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (C-10)$$

De waarde van p_v/p_a kan met (C-4) uit V_* worden afgeleid.

Voor de berekening van d_k/d_* wordt verder naar het TI-59 programma verwezen. Uit tabel C-1 en fig. C-2 blijkt dat d_k/d_* in het interessante gebied van kleine waarden van d_*d_g zo weinig van 1 afwijkt dat dit verschil, gelet op de beperkte nauwkeurigheid van de berekening als geheel, wel buiten beschouwing kan worden gelaten.

TI-59 programma 7-1-1985: "Berekening van V_{*kr} voor een smooropening"

Instructie voor gebruik:

snelheden in m/sec

	invoer	toetsen	display
I. Laden van het programma (2 kaartkanten)			
II. Voorbereiding door invoer van de luchttemperatuur (K) Hierdoor worden voor de berekening van V_{*kr} o.a. ingevoerd: bovengrens 500 (m/sec) in reg. 30 stapgrootte 100 in reg. 31 nauwkeurigheid 0,1 in reg. 32 (In die registers kunnen na III. indien gewenst andere waarden worden ingevoerd)	T	SBR EE	1.
III. Invoer van de verhouding: <u>diameter van smooropening</u> voor het leiding diameter incompressibel stromingsmodel B Hierna of IV. of V.:	d_{*}/d_l	SBR SBR	2.
IV. Start van berekening van V_{*kr} daarna berekening van d_k/d_{*} en V_k ($=a^{*}$) door intoetsen van	→	SBR (	V_{*kr}
	→	R/S	
V. Berekening van d_k/d_{*} en V_k bij een willekeurige waarde van V_{*}	V_{*}	SBR GTO R/S	d_k/d_{*} V_k

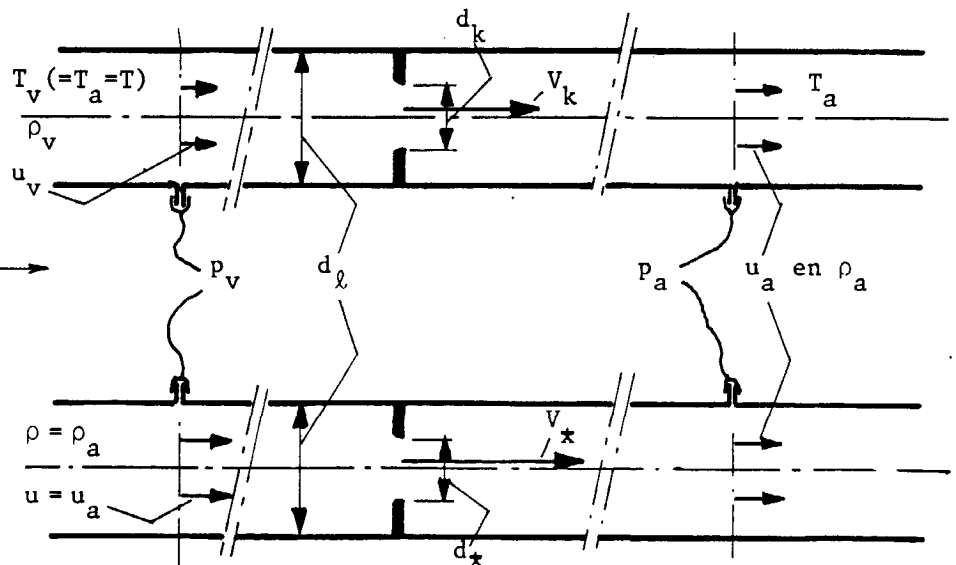
fig. C-1: Bij incompressibele berekening B wordt bij een snelheid V_{*} in de smooropening met diameter d_{*} dezelfde drukverhouding p_v/p_a en eenzelfde massa-transport verkregen als in een werkelijke stroming A met een smoorgatdia d_k waarbij zich een snelheid V_k instelt. Bij V_{*kr} wordt $V_k = a^{*}$ = de geluidssnelheid in de keel.

Fig. C-1:

A. Werkelijke stroming

gelijk voor A en B: →

B. Incompressibel model



TI-59 programma 7-1-85 (vervolg 1)

<u>2nd Lbl EE</u>		<u>2nd Lbl SBR</u>		))	
STO 10	T	STO 18	(d^*/d_ℓ)	STO 26	V_k^2
(		x^2		INV SBR	
CE		STO 19	$(d^*/d_\ell)^2$		
x		x^2		<u>2nd Lbl 2nd A'</u>	
287,05		STO 20	$(d^*/d_\ell)^4$	SBR SUM	
)		((		(	
STO 11	R.T	1		RCL 26	
1,4		-		-	
STO 12	γ	RCL 20)		RCL 15	
((		:		x	
CE		2		RCL 25	
-		:		-	
1		RCL 11	$\frac{1}{2} \cdot \rho_a \{1 - (\frac{d^*}{d_\ell})^4\}$	RCL 17	
)		)		)	
:		STO 21	$\frac{\quad}{P_a}$	INV SBR	
RCL 12		2		2nd Lbl A	
)		2nd Fix 0		2nd Pgm 08 A	
STO 13	$\frac{\gamma-1}{\gamma}$	R/S		INV SBR	
(				2nd Lbl B	
RCL 12		<u>2nd Lbl SUM</u>		2nd Pgm 08 B	
+		STO 22	V_*	INV SBR	
1		(		2nd Lbl C	
)		1		2nd Pgm 08 C	
STO 14	$\gamma+1$	+		INV SBR	
((		RCL 22		2nd Lbl D	
RCL 12		x^2		2nd Pgm 08 D	
-		x		INV SBR	
1		RCL 21		2nd Lbl E	
)		)	$\frac{P_v}{P_a}$	2nd Pgm 08 E	
:		STO 23		INV SBR	
RCL 14		(		<u>2nd Lbl (</u>	
)		CE		0	
STO 15	$\frac{\gamma-1}{\gamma+1}$	y^x		A	
(		RCL 13		RCL 30	
2		)		B	
:		1/x	$\left[\frac{P_a}{P_v} \right] \frac{\gamma}{\gamma-1}$	RCL 31	
RCL 13		STO 24		C	
x		(		RCL 32	
RCL 11		RCL 22		D	
)		x		E	
STO 16	$\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot RT$	RCL 19		STO 27	V_{*kr}
(		:		2nd Fix 1	
CE		RCL 23		R/S	
x		)			
RCL 15		x^2		<u>2nd Lbl GTO</u>	
)		STO 25	U_v^2	STO 28	V_*
STO 17	$\frac{2\gamma}{\gamma+1} \cdot RT$	(		SBR SUM	
500 STO 30		CE		((	
100 STO 31		+		RCL 25	u_v^2
0,1 STO 32		RCL 16		:	
1		x		RCL 26	V_k^2
2nd Fix 0		(		)	
R/S		1		$\sqrt{x}$	
		-		x	
		RCL 24			

TI-59 programma 7-1-85 (vervolg 2)

```
(
RCL 23      Pv/Pa
yx
RCL 12
1/x
))
√x
STO 28      dk/dℓ
(
CE
:
RCL 18
)
STO 29      dk/d*
2nd Fix 3
R/S
RCL 26
√x
2nd Fix 1   Vk
R/S
```

eind

Tabel C-1

Berekende waarden van V^*_{kr} en d^*_{kr} voor de stroming door een smooropening
bij $T = 288,15 \text{ K}$

d^*/d_ℓ	d_k/d^*	V^*_{kr} m/sec	$V_k = a^*$ m/sec
0,01	1,015	384,3	310,6
0,1	1,015	384,3	310,6
0,2	1,016	384,5	310,7
0,3	1,017	385,1	310,8
0,4	1,019	386,7	310,9
0,5	1,024	390,0	311,4
0,6	1,033	395,9	312,3
0,7	1,048	404,9	314,0
0,75	1,057	410,2	315,6
0,8	1,067	414,6	317,8
0,81	1,068	415,1	318,4
0,82	1,070	415,5	319,0
0,829	1,071	415,611	319,611
0,830	1,071	415,612	319,681
0,831	1,071	415,611	319,752
0,835	1,072	415,576	320,041
0,84	1,072	415,5	320,4
0,85	1,073	415,0	321,2
0,9	1,069	405,2	326,3
0,95	1,044	379,0	333,1
1	1	340,292	340,292

= a bij $T = 288,15 \text{ K}$

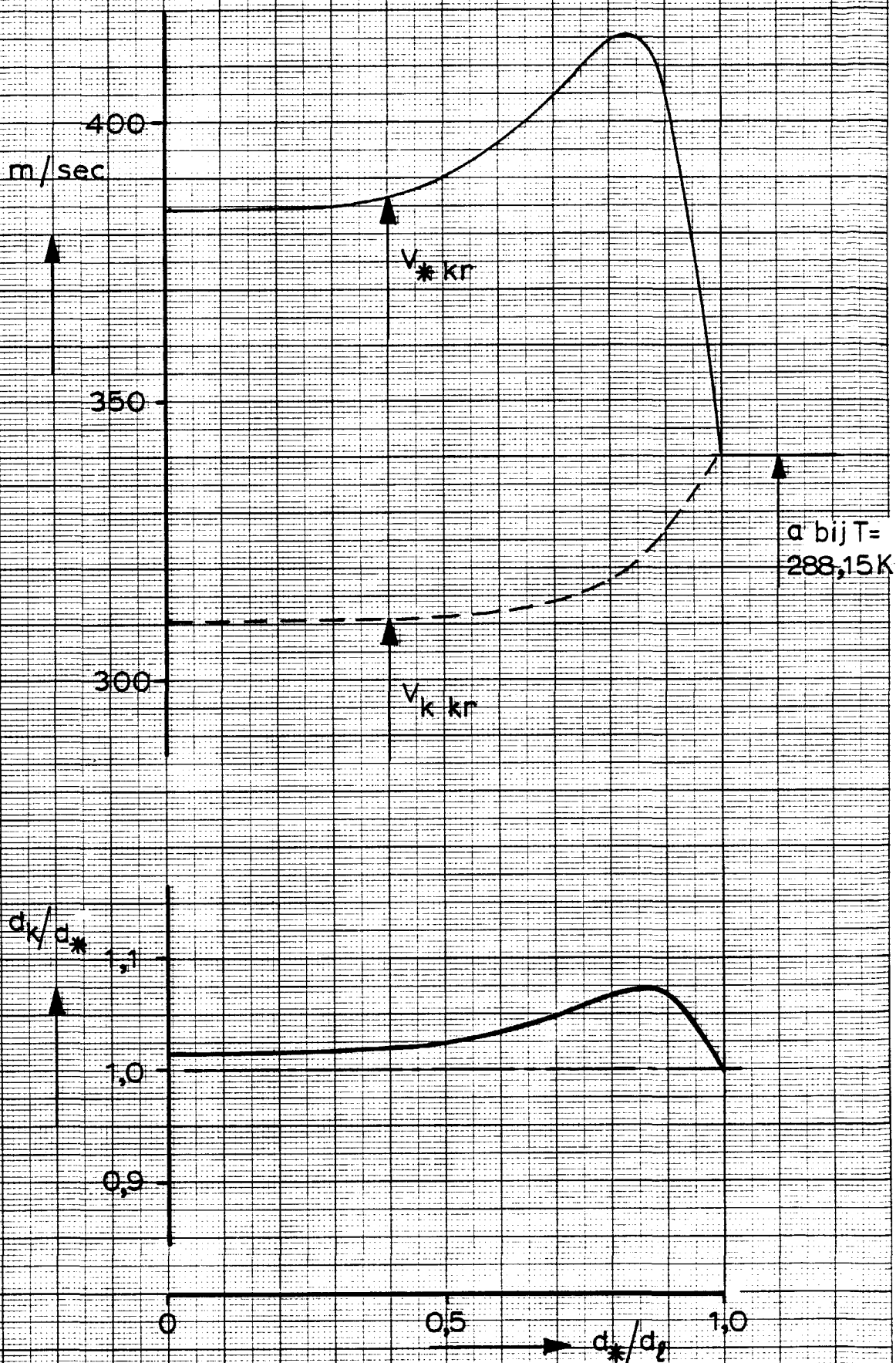


Fig. C-2: Het berekende verloop van V_{*kr} , V_{kkr} en d_k/d_* en d_*/d_k (uit tabel C-1)

Toevoegsel D bij Memorandum M-533

Gebruiksvoorschrift en montage-aanwijzingen voor het verticale mini-weegsysteem

1. Er dient voor te worden gezorgd dat bij $D = 0$ op de drukdoos nog een voorspankracht K_v van passende grootte wordt uitgeoefend; bijv. 50 à 100 grf, overeenkomend met een overdruk in de drukdoos van ongeveer 162 à 325 N/m². Bij aanwezigheid van hulpapparatuur op het weegplateau dienen daartoe op het lange eind van de hefboom passende contragewichten te worden bevestigd.
2. Ter bescherming van de punten van de naalden waarop de hefboom rust dient bij de montage van contragewichten (en ook bij het vervoer van het apparaat) de veiligheidsklep onder het hefboomeind in hoogste stand te worden geplaatst waarbij de naalden uit de pannen zijn gelicht.
3. De glijlagers tussen weegplateau en geleidingsassen moeten droog worden gehouden. Eventueel kan droog grafietpoeder worden toegepast maar zeker geen olie en be-slist geen vet.
De lagers van de geleidingsassen in de stalen strippen dienen wel enigszins ge-smeerd te zijn maar bij het invetten van die punten moet er zorgvuldig tegen worden gewaakt dat smeermiddel in de buurt van de lagers van het weegplateau zou komen.
4. Demontage van de hefboom: (fig. D-1)
Bij demontage van de hefboom met drukdoos dienen de volgende handelingen te worden verricht:
 - a. verwijder de perspex frontplaat;
 - b. neem de M4 boutjes in de zijkanten van het boven uitstekende deel van het weegplateau los;
 - c. trek het drukstuk boven uit het weegplateau;
 - d. trek de koppelstang omhoog en laat hem rusten op het onderste dwarsschot van het weegplateau (dit dwarsschot is niet vastgelijmd; het kan eventueel uit het weegplateau worden gedrukt);
 - e. Licht de hefboom op tot de drukdoos vrij komt van de zich erin bevindende afscherm-schijf en verwijder de hefboom met drukdoos.

Hierna kan de horizontale perspex afschermplaat worden weggenomen door de voorkant ervan eerst zover omhoog te brengen dat de plaat vrijkomt van de bovenkant van de drie verticale M5 schroefstangen en de plaat daarna naar voren weg te trekken.

Montage geschiedt in omgekeerde volgorde. Let er daarbij op dat men de drukstang niet op de scherpe punt van de naald boven de drukdoos laat vallen; houdt de stang met de vingers door de openingen in het weegplateau vast en laat hem voorzichtig zakken.

De naald boven het midden van de drukdoos is vervaardigd uit een 4,1 mm boor; hij is niet vastgelijmd maar bevestigd met een stelschroefje.

5. Afstelling van de drukdoos:

Stel eerst de drukplaat zo goed mogelijk in door verstelling van de dubbele moeren boven de drukplaat (de spanning van de veiligheidsveren onder de plaat moet zo groot worden gehouden dat de drukplaat in het gehele meetgebied zeker vast tegen de moeren boven blijft aangedrukt).

Stel daarna de drukdoos zo goed mogelijk evenwijdig aan de drukplaat door passende verdraaiing van de stelschroeven 1 en 2 van de dwarsbalk waarop de hefboom rust.

6. De geleidingsassen:

Voor een goede werking van het systeem is het noodzakelijk dat de geleidingsassen tijdens de meting beslist niet in verticale richting verschuiven.

Zij dienen te rusten op de strip onder het ondereind van de assen en niet op de naaf van de snaarschijven boven. Deze snaarschijven dienen zo hoog te worden geplaatst dat a. enige ruimte tussen die schijven en de stalen lagerstrip aanwezig is, b. de snaren naar de motor toe enigszins hellend naar beneden lopen zodat op de geleidingsassen een zekere extra kracht naar beneden wordt uitgeoefend zodat zij steeds onder goed aanliggen. De neiging zou kunnen bestaan de hier bedoelde extra voorspankracht te verkrijgen door de stelringen onder de bovenste lagerstrip stijf tegen die strip aan te monteren, maar daaraan moet niet worden toegegeven: de stelringen dienen alleen om te voorkomen dat de assen zover zouden kunnen worden opgelicht dat zij uit hun onderlagers zouden glippen. Indien de stelringen stijf tegen de bovenstrip worden gekonteerd wordt de wrijving zo groot dat de aandrijving door de dunnesnaren niet meer betrouwbaar werkt. Het is beter enige speling tussen de stelringen en de lagerstrip te houden.

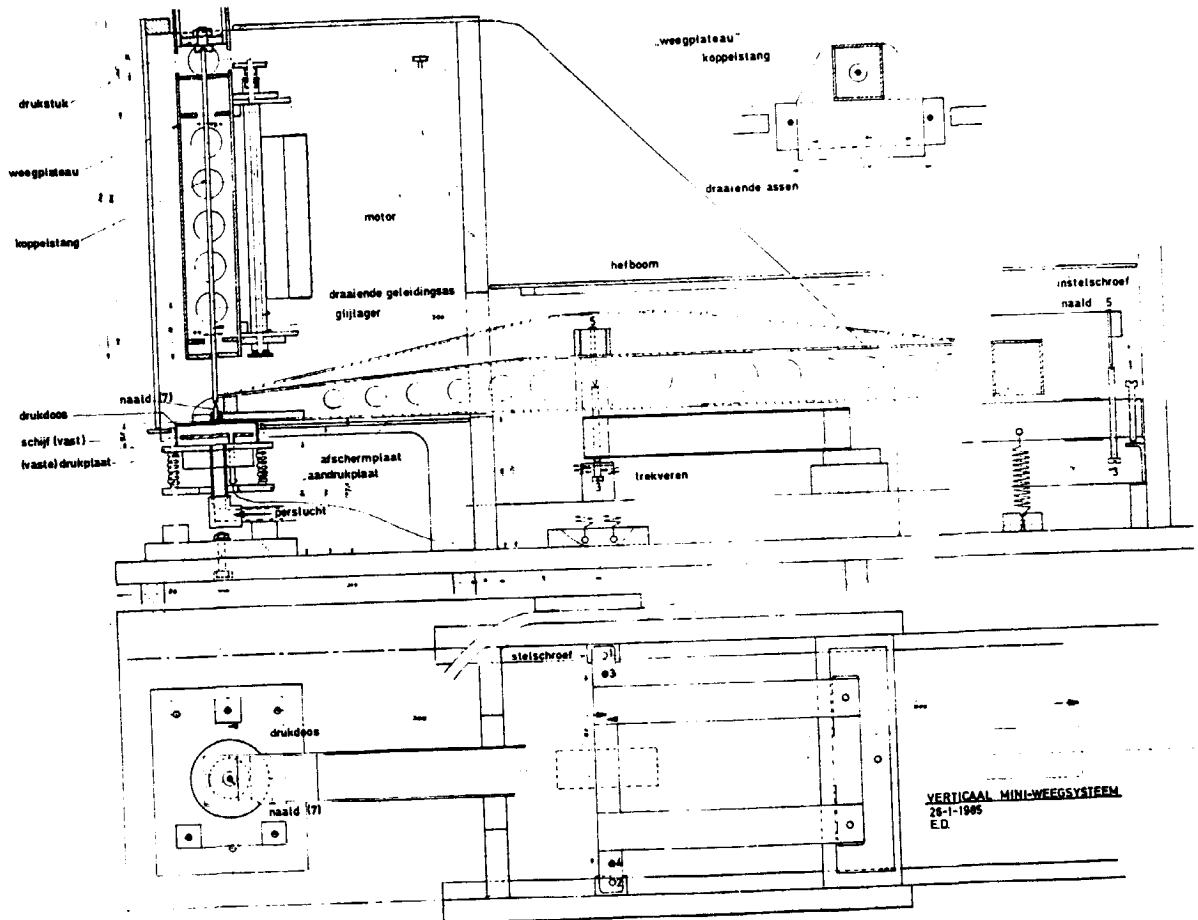
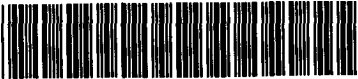


Fig. D-1: Verticaal mini-weegsysteem.

Memorandum 533



60142011257