

Technische Hogeschool Delft
Afdeling der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

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

E. Dobbina

December 1984
Delft - Nederland

Samenvatting

Het rapport beschrijft de meting van de weerstandscoefficiënt van een dwars aangestroomde gladde cirkelcilinder in een klein gebied van getallen van Reynolds in de omgeving van $R_d = 2,6 \cdot 10^4$. Het doel was in de eerste plaats de verkrijging van een nauwkeurige waarde van c_d ter controle van de bij het praktikum LA 206 in de M-tunnel toegepaste meetmethode waarbij de weerstand uit impulsverliesmetingen wordt afgeleid.

Van de gelegenheid werd gebruik gemaakt het gedrag van het mini-weegsysteem met draaiende assen te bezien onder bijzondere omstandigheden, nl. bij gebruik van slechts een enkele drukdoos en bij aanwezigheid van een zeer grote met het plateau meebewegende massa.

Indeling

| | <u>Blz.</u> |
|---|-------------|
| Samenvatting | 1 |
| Notaties | 3 |
| 1. Inleiding | 6 |
| 2. De opstelling in de grote tunnel | 7 |
| 3. De weerstandscoefficiënt van de cilinder | 9 |
| 4. Over de effectieve lengte van het aan de wind blootgestelde cilinderdeel | 12 |
| 5. De ijking van het mini-weegsysteem | 14 |
| 5.1. De bepaling van de ijkfactor ϕ_w | 14 |
| 5.2. Het effect van Δp_v op de ijkfactor | 15 |
| 5.3. De verplaatsing van het weegplateau van het mini-weegsysteem bij variatie van de opgenomen kracht | 15 |
| 5.3.1. De verandering van de spleetwijdte s_I | 15 |
| 5.3.2. De verplaatsing van het aangrijpingspunt a van het zwaard van het mini-weegsysteem | 16 |
| 6. Conclusies | 17 |
| 7. Literatuur | 18 |
| Tabellen 1 (in tekst) en 2 en 3 | 19+20 |
| Figuren 1 t/m 12 | 21 |
| Toevoegsel A: Schatting van de vervorming van een dwars op de wind geplaatste voorgespannen cilinder. | A-1 |
| Tabel A.1 | A-5 |
| TI-59 programma 26-4-83 | A-6 t/m A- |
| TI-59 programma 25-4-83 | A-10 t/m A- |

Afgesloten 11 december 1984.

Notaties

| | |
|----------|--|
| A en B | scharnierpunten van de verbindingsstrip tussen weegplateau en voor- spangewicht (fig. 1). |
| Ba | barometerstand |
| c_d | weerstandscoëfficiënt = $D/(q \cdot d_c \cdot H_e)$ |
| D | door de lucht op de cilinder uitgeoefende weerstandskracht |
| d_c | cilinderdiameter |
| d | effectieve diameter van de drukdozen |
| d_{*I} | diameter van de smooropening in de persluchtleiding naar drukdoos I |
| d_ℓ | inw. diameter van de toevoerleiding |
| E | voedingsspanning voor het mini-weegsysteem (ong. 4 Volt) |
| f | de horizontale coördinaat van de hartlijn van het cilindermodel, gemeten vanuit de lijn door de verticaal onder elkaar gelegen "ophangpunten"; positief met de wind mee ("doorbuiging" van de cilinder) |
| f_m | = f bij $z = h_b$ |
| G | "ijkgewicht" = de horizontale kracht op het mini-weegsysteem bij ijkingen |
| h_G | hoogte van het aangrijpingspunt van G (of K_o) boven de hartlijnen van de draaiende assen |
| H en h | hoogteverschillen (zie figuur 2) |
| h_b | arm waaraan K_b werkt, gemeten tot de tunnelhartlijn (938 mm) |
| h_o | arm waaraan K_o werkt, gemeten tot de tunnelhartlijn (1068 mm) |
| H_e | effectieve lengte van het aan de wind blootgestelde modeldeel = afstand tussen de schijven van de grenslaagafschermkokers = 1134 mm |
| i | nummer van de drukdozen van het mini-weegsysteem (I en II); $i = I$ voor de hoge-druk drukdoos |
| K_b | = de horizontale kracht die door het grote weegsysteem wordt opgenomen |
| K_o | = de horizontale kracht die door het mini-weegsysteem wordt opgenomen |

| | |
|--------------|--|
| ΔK_b | $= K_b(V=V) - K_b(V=0)$; $\Delta K_o = K_o(V=V) - K_o(V=0)$ |
| L | lengte van het model tussen de ophangpunten = $h_{III} = 2006$ mm |
| L_λ | lengte van de toevoerleiding tussen smooropening en drukdoos |
| p | weerstandskracht per lengte eenheid = D/H_e (alleen in toevoegsel A) |
| p_{atm} | atmosferische druk |
| p_I | druk in drukdoos I ($p_{II} = p_{atm}$) |
| Δp_v | overdruk in de persleiding naar het mini-weegsysteem stroomopwaarts van de smooropening (mm Hg) |
| q | dynamische druk, gemeten door pitot-statische buis no. 1.IV.003.001.5 in de grote tunnel |
| q_o | dynamische druk gemeten door de regel-pitot-statische buis van de W-tunnel |
| s_I | spleetwijdte van drukdoos I |
| t | luchttemperatuur |
| V | luchtsnelheid = $\sqrt{2 \cdot q / \rho}$ |
| W | voorspangewicht (kg) |
| x | coördinaat in stromingsrichting algemeen (ook: x coördinaat van weegplateau) |
| x_{ref} | nog nader te kiezen referentiewaarde voor x (zie par. 5.3.1) |
| x_b | = x van het bovenste ophangpunt van het cilindermodel |
| x_o | = x van de cilinderhartlijn ter hoogte van de verbindingsstrip met het zwaard van het mini-weegsysteem |
| Δx_o | = $x_o(V=V) - x_o(V=0)$ |
| Δx_A | = toeneming van x van het punt A van het mini-weegsysteem |
| y | = de coördinaat van punten van de cilinderhartlijn bij doorbuigingsberekening (toevoegsel A, par. 2); gemeten loodrecht op de raaklijn in het bovenste ophangpunt; positief tegen de windrichting in |
| z | = coördinaat in langsrichting van de cilinder, gemeten vanuit het bovenste ophangpunt; positief naar beneden. |

- α_b hulphoek (zie toevoegsel A, par. A.2)
- $\varepsilon = \Delta x_o / \Delta K_o = \frac{\Delta x}{D} \cdot \frac{L}{h_b}$
- ϕ_w ijkfactor van het mini-weegsysteem (N/m^2 per grf)
- ρ luchtdichtheid
- ν kinematische viscositeit

"Onderste ophangpunt" = het snijpunt van de hartlijn van de cilinder en de lijn door de twee scharnierpunten van de verbindingsstrip tussen het mini-weegsysteem en het voorspangewicht W.

1. Inleiding

Met betrekking tot het doel van het onderzoek kunnen twee zaken worden genoemd. Ter controle van de uitwerkingsmethode voor de bepaling van de weerstand van twee-dimensionale lichamen uit impulsmetingen werd het wenselijk geacht een nauwkeurige meting van de weerstandscoëfficiënt van een gladde cilinder uit te voeren bij R_d ongeveer $2,7 \cdot 10^4$.

Verder bestond behoefte aan een controle van de werking van het mini-weegsysteem met draaiende assen in een configuratie met vergroot meetgebied waarbij slechts aan een van de drukdozen perslucht wordt toegevoerd.

Gewenst werd daarbij ook na te gaan in hoeverre een sterke vergroting van de met het weegplateau meebewegende massa de werking van het systeem ongunstig zou beïnvloeden. Verder bestond belangstelling voor een nauwkeurige meting van de verschuiving van het plateau als functie van de belasting en voor het effect van de grootte van het aan de drukdoos toegevoerde luchttransport op de ijkfactor.

Het leek mogelijk althans enige van die behoeften te bevredigen door het uitvoeren van het hieronder beschreven onderzoek waarbij de weerstand van een verticaal in de grote tunnel opgestelde cilinder door weging werd bepaald. Om de onzekerheid in de meting die het gevolg is van grenslaaginterferentie bij de doorvoer door de tunnelwanden gering te houden is het wenselijk de diameter van de cilinder zo klein mogelijk te kiezen. Daarbij mag evenwel niet zover worden gegaan dat de benodigde windsnelheid zo groot wordt dat voor compressibiliteitseffecten moet worden gevreesd. Een cilinderdiameter van 10 mm is als compromis gekozen; voor het bereiken van $R_d = 2,7 \cdot 10^4$ is daarbij een luchtsnelheid van ongeveer 40 m/sec nodig.

Het bovineind van de cilinder was aan het weegsysteem van de tunnel opgehangen; het ondereind was door middel van een verbindingsschakel verbonden met het zwaard van het mini-weegsysteem.

Om te grote vervorming van het model te voorkomen werd het aan de onderzijde belast met een voorspangewicht van ongeveer 100 kg.

2. De opstelling in de grote tunnel

Voor een schets van de opstelling wordt naar fig. 1 verwezen, een overzicht van de gebruikte notaties en van de belangrijkste afmetingen is in fig. 2 gegeven. Een ongeveer 2 meter lange cilindrische stalen staaf met 10 mm diameter is scharnierend opgehangen aan het weegplateau van het grote weegstelsel.

Ter beperking van de doorbuiging van het cilindermodel onder invloed van de luchtkrachten werd het ondereind van het model verzwaard met een voorspangewicht van 101,3 kg. *)

Dit voorspangewicht was door een horizontale verbindingsstrip met twee scharnierpunten A en B verbonden met het zwaard van het onder de meetplaats opgestelde mini-weegstelsel.

Een foto van het onderste deel van de opstelling is als fig. 4 opgenomen. Het deel van de totale weerstand dat door het bovenste (grote-), resp. het onderste (mini-) weegstelsel wordt gemeten wordt met ΔK_b resp. ΔK_o aangeduid.

Ten opzichte van de toestand waarin het mini-weegstelsel in het verleden is gebruikt zijn de volgende wijzigingen aangebracht:

1. Slechts één van de drukdozen is gebruikt; alleen aan doos I is perslucht toegevoerd; **)
2. Ter verkrijging van een voldoende groot meetgebied is een smooropening met grotere doortocht toegepast ($d_{*I} = 3,5$ mm in plaats van 1,65 mm). Door passende bijstelling van het reduceerventiel is ervoor gezorgd dat de overdruk Δp_v in het persluchtleidingdeel stroomopwaarts van de smooropening steeds ongeveer 70 mm Hg bedroeg.

*) Rekenprogramma's waarmee een schatting van de te verwachten doorbuiging is gemaakt zijn in toevoegsel A gegeven.

**) Achteraf is niet geheel duidelijk waarom niet gewoon met twee drukdozen is gewerkt. Het doel: vergroting van het meetgebied van 200 naar ongeveer 1300 grf had ook bij gebruik van 2 drukdozen kunnen worden bereikt door passende vergroting van d_* en/of Δp_v .

Bij windsnelheid nul werd het mini-weegsysteem zover in -x richting verschoven dat op het zwaard daarvan een voorspanning van ongeveer 200 gramf werd uitgeoefend.

Om het storend effect van de grenslagen langs de tunnelwanden te elimineren zijn zowel tegen het plafond als op de vloer van de meetplaats grenslaagafschermkokers met eindschijven (100 mm diameter) gemonteerd (fig. 3 en 6).

Onder de onderste afschermkoker was een waterslot aangebracht.

De grenslaagafschermkokers werden zo gesteld dat bij een windsnelheid van ongeveer 40 m/sec (R_d ong. $2,7 \cdot 10^4$) de hartlijn van de onder belasting doorgebogen stang ter plaatse van de schijven van die kokers ongeveer samenviel met het hart van de centrale opening in die schijven waarvan de diameter 20 mm bedroeg.

De windsnelheid werd afgeleid uit de dynamische druk q die gemeten werd met de pitot-statische buis no. 1.VI.003.001.5. Deze buis was tegen een wandluik van de tunnel gemonteerd waarbij de statische drukgaatjes zich bevonden in de middendwarsdoorsnede van de meetplaats dus ongeveer in dezelfde doorsnede als waarin het cilindermodel zich bevond.

3. De weerstandscoefficiënt van de cilinder

De resultaten van de weerstandsmetingen zijn in tabel 2 verzameld.

Gemeten werd bij 7 windsnelheden tussen 19 en 52 m/sec.

Vier series metingen zijn uitgevoerd: de eerste twee series hadden betrekking op de toestand zonder waterslot; bij de laatste twee series was het waterslot onder wel met water gevuld.

Bij de eerste drie series werd $p_I - p_{atm}$ met een Mensor manometer gemeten, bij de laatste serie werd een Texas manometer gebruikt.

Bij de bepaling van ΔK_b werd de standaard uitwerkprocedure voor het grote weegsysteem gevolgd. Bij de uitwerking van de aanwijzingen van het mini-weegsysteem werd gebruik gemaakt van de waarde van de ijkfactor ϕ_w die uit de in par. 5.1 beschreven ijkingen is afgeleid nl. $3,18 \text{ N/m}^2$ per gramkracht. De verkregen waarden van c_d zijn in fig. 7 tegen R_d uitgezet.

Het is waarschijnlijk dat de metingen bij de grootste twee snelheden minder nauwkeurig zijn omdat het mini-systeem daarbij bijna tot de grens van het meetgebied werd belast ($\sim 1100 \text{ grf}$).

De c_d -waarden gemeten met waterslot onder zijn iets groter dan de waarden die zonder waterslot zijn bepaald. Aangenomen kan worden dat het effect van een waterslot boven even groot zou zijn geweest als dat van een waterslot onder. Voor het thans interessante R_d gebied tussen $2,5$ en $2,7 \cdot 10^4$ is in fig. 7 door een punt-streeplijntje het "meest waarschijnlijke" verloop van c_d met R_d aangegeven. De indruk bestaat dat de fout daarin niet meer dan ongeveer 1% zal bedragen.

Ter controle is in tabel 2 ook de waarde van $(\Delta K_b \cdot h_o) / (\Delta K_o \cdot h_b)$ opgenomen. Dat deze grootheid niet gelijk is aan 1 is een gevolg van het feit dat de x-coördinaat x_o van het voorspangewicht iets toeneemt bij toeneming van K_o . Hierbij moet niet alleen worden gedacht aan de verschuiving die samenhangt met de afneming van de spleetwijdte s_I bij toenemende kracht K_o ; maar vooral ook aan de extra verplaatsing van het ondereind van de cilinder door elastische vervorming van het zwaard van het weegsysteem en van de verbinding tussen dit zwaard en het 100 kg zware voorspangewicht onder de cilinder.

Wordt de verplaatsing Δx_o even evenredig gesteld aan de toeneming van D dan kan worden geschreven:

$$\Delta x_o = \epsilon \Delta \cdot K_o = \epsilon \cdot D \cdot \frac{h_b}{L}$$

Bij $V = 0$ geldt:

$$K_b(V=0) = - \frac{x_b - x_o(V=0)}{L} \cdot W_e$$

$$K_o(V=0) = + \frac{x_b - x_o(V=0)}{L} \cdot W_e$$

Bij $V = V$:

$$K_b(V=V) = D \cdot \frac{h_o}{L} - \frac{x_b - (z_o(V=0) + \Delta x)}{L} \cdot W_e$$

$$K_o(V=V) = D \cdot \frac{h_b}{L} + \frac{x_b - (x_o(V=0) + \Delta x)}{L} \cdot W_e$$

Hierin is $W_e = W +$ de helft van het gewicht van de cilinder zelf = 101,9 kg.

Na enige herleiding volgt daaruit:

$$\frac{\Delta K_b \cdot h_b}{\Delta K_o \cdot h_o} = \frac{1 + \epsilon \frac{h_b}{h_o} \cdot \frac{W_e}{L}}{1 - \epsilon \frac{W}{L}}$$

of, wanneer h_b/h_o gelijk 1 wordt gesteld:

$$\epsilon = \frac{(\Delta K_b \cdot h_b) / (\Delta K_o \cdot h_o) - 1}{(\Delta K_b \cdot h_b) / (\Delta K_o \cdot h_o) + 1} \cdot \frac{L \text{ lengte eenheden}}{W_e \text{ eenheid van kracht}}$$

De hiermee berekende waarden van ϵ zijn eveneens in tabel 2 gegeven.

Blijkbaar is ϵ in het van belang zijnde middendeel van het meetgebied gemiddeld ongeveer 0,45 mm/kgf.

Helaas is de waarde van ϵ niet direct gemeten. Wel is achteraf de verplaatsing Δx_A gemeten van het punt A van het zwaard waar de kracht K_o aangreep. Dit punt lag op 160 mm boven het vlak door de hartlijnen van de draaiende assen. Zoals uit par. 5.3 en fig. 11 blijkt is deze verplaatsing ongeveer 0,2 mm per kgf geweest. De rest, dus ongeveer 0,25 mm/kgf zou aan vormverandering in de verbinding tussen het zwaard en het voorspangewicht W moeten worden toegeschreven.

Het lijkt zeer wel mogelijk dat bij de toegepaste eenvoudige constructie waarbij de scharnierpunten door in hout bevestigde bouten werden gevormd een vervorming van de genoemde orde van grootte inderdaad heeft plaats gehad.

4. Over de effectieve lengte van het aan de wind blootgestelde staafdeel

In de W-tunnel werd enig vooronderzoek uitgevoerd met betrekking tot het effect van de grootte en de vorm van de opening in de schijf van een grenslaag-afschermkoker en, de plaats van de model-staaf ten opzichte van het hart van de opening en de werking van een waterslot.

Dit onderzoek werd zeer beperkt van omvang gehouden.

Een indruk van de opstelling in de W-tunnel kan worden verkregen uit fig. 5, die betrekking heeft op de situatie waarin een van de in de grote tunnel te gebruiken "echte" grenslaag-afschermkokers op een grondplaat achter de W-tunnel-tuit was gemonteerd. Op de voorgrond is vaag een "modelkoker" zichtbaar waarmee eveneens metingen zijn uitgevoerd.

Het stangmodel (10 mm diameter) dat 226 mm buiten de grenslaagkoker uitstak was onder de grondplaat vast aan het zwaard van het mini-weegsysteem bevestigd zodat de weerstand van het buiten de koker uitstekende deel van de stang kon worden gemeten.

De resultaten van de bij $V = 40$ m/sec uitgevoerde weerstandsmetingen zijn in de figuren 8 en 9 weergegeven.

Fig. 8 heeft betrekking op een "model-grenslaag-afschermkoker"; figuur 9 heeft betrekking op metingen aan een van de werkelijke in de grote tunnel gebruikte grenslaag-afschermkokers, nl. de onderste met waterslot.

Uit de bovenste kromme van figuur 8 volgt dat toepassing van een grote opening in de eindschijf zeer ongewenst is. Ter oriëntering omtrent het effect van verkleining van de opening zijn delen van die opening met papier-plakband afgeplakt. Versmalling van de opening tot 15 mm geeft geen verbetering. Daarentegen is verkleining van de lengte-in-stromingsrichting kennelijk gunstig. Uit figuur 8 wordt de indruk verkregen dat bij gebruik van openingen van 15 x 20 mm variatie van de plaats van stang + doorvoeropening ten opzichte van de schijf geen merkbaar effect op de gemeten weerstand heeft, althans in de beschouwde situaties waarbij de stang op het oog ongeveer in het midden van de opening werd geplaatst. Uit fig. 9 blijkt dat verandering van de plaats van de stang ten opzichte van de opening wel effect heeft.

Bij de meting in de grote tunnel is ervoor gezorgd dat de excentriciteit van het cilindermodel ten opzichte van de opening van de schijven niet meer dan ongeveer 2 mm is geweest. Bij de uitwerking is aangenomen dat de "effectieve lengte H_e " van het weerstand-ondervindende deel van de cilinder gelijk is geweest aan de afstand tussen de schijven van de grenslaagafschermkokers.

In hoeverre dit correct is kan uit de uitgevoerde metingen niet worden afgeleid. Nader onderzoek hieromtrent is wenselijk.

Voorlopig wordt aangenomen dat de fout in c_d die samenhangt met de onzekerheid in H_e niet meer dan 0,9% zal zijn, overeenkomend met een fout in H_e van 2 x 5 min.

Uit fig. 9 volgt verder dat toepassing van een waterslot in de in de W-tunnel bestaande situatie leidde tot een weerstandsvermeerdering die equivalent is met ongeveer 2 mm staaflengte; dit zou in de situatie in de grote tunnel waarin de staaf 1134 mm lang was overeenkomen met een toeneming van c_d met ongeveer $\frac{2}{1134} \cdot 1,75 = 0,03$ bij $R_d = 2,7 \cdot 10^4$.

Wat orde van grootte betreft komt dit redelijk goed overeen met het in de grote tunnel gemeten effect van een waterslot onder.

5. De ijking van het mini-weegsysteem

5.1. De bepaling van de ijkfactor

Drie series ijkingen: A, B en C werden uitgevoerd.

Bij ijking A die voor de montage in de grote tunnel werd uitgevoerd werd de kracht op het zwaard geleverd door gewichten aan een snoer dat over een op meskanten gelagerde ijschijf werd geslagen.

Direct na de weerstandsmetingen in de grote tunnel werden aanwijzingen van het mini-weegsysteem vergeleken met die van de weerstandsbalans van het grote weegsysteem (ijking B). Een foto van de daarbij gebruikte opstelling is in fig. 4 gegeven.

Het zwaard van het mini-weegsysteem was door een horizontaal snoer verbonden met het weegplateau van het grote weegsysteem.

De krachten op de weegsystemen waarvan de horizontale componenten uiteraard steeds gelijk bleven, werden gevarieerd door het midden van het verbindingssnoer met een serie verschillende gewichten te belasten.

Tenslotte werden nog controle-ijkingen C uitgevoerd waarbij dezelfde belastingsmethode werd toegepast als bij A (gewichten aan een over een ijkwiël geleid snoer).

Bij een per lucht overdruk Δp_v van 70 mm hg werden de volgende ijkfactoren verkregen

serie A $\varphi_w = 3,18 \text{ N/m}^2$ per gramkracht

serie B (vergelijking met het grote weegsysteem):

$\varphi_w = 3,178 \text{ N/m}^2$ per gramkracht

serie C (controle) $\varphi_w = 3,182 \text{ N/m}^2$ per gramkracht

Bij de uitwerking van de weerstandsmetingen is verder gewerkt met een gemiddelde waarde van de ijkfactor $\varphi_w = 3,18 \text{ N/m}^2$ gramf. *)

*) Dit komt overeen met een effectieve drukdoosdiameter van

$$\left[\frac{4 \cdot 0,001 \cdot 9,81}{\pi \cdot 3,18} \right]^{0,5} = 0,06267 \text{ m.}$$

De werkelijke diameters van de drukdoosrand zijn: inwendig 62 mm; uitwendig 64 mm.

5.2. Het effect van Δp_v op de ijkfactor

Tijdens serie A werd ook het effect van verandering van Δp_v gemeten. De resultaten zijn in onderstaande tabel 1 verzameld:

Tabel 1

Effect van Δp_v op de ijkfactor van het mini-weegstelsel (bij gebruik van slechts 1 drukdoos)

| Δp_v mm hg | ijkfactor ϕ_w N/m ² per gramf | $d_{I \text{ eff}} =$ $\frac{9,81 \cdot 4 \cdot 0,001}{F \cdot \pi}$ mm |
|-----------------------|--|---|
| 48 | 3,175 | 62,72 |
| 48 | 3,174 | 62,73 |
| 63 | 3,172 | 62,75 |
| 70 | 3,180 | 62,67 |
| 97 | 3,191 | 62,56 |
| 132 | 3,191 | 62,56 |
| 136 | 3,193 | 62,54 |

De waarden van ϕ_w zijn in fig. 10 op Δp_v uitgezet.

5.3. De verplaatsing van het weegplateau van het mini-weegstelsel bij variatie van de opgenomen kracht

5.3.1. De verandering van de spleetwijdte s_I

Bij enkele ijkingen is door middel van een kruisdraadkijker gemeten hoeveel het weegplateau zich verplaatst bij toeneming van de kracht G. De kijker was daarbij gericht op een punt dat ongeveer 25 mm boven het vlak door de hartlijnen van de draaiende assen is gelegen; aangenomen mag worden dat de waargenomen verplaatsing gelijk is aan de verandering van de wijdte s_I van de spleet van drukdoos I. Deze veranderingen zijn vergeleken met berekende waarden. De resultaten zijn in tabel 3 gegeven en in fig. 11 grafisch uitgezet.

Voor de bij de metingen gebruikte waarden van Δp_v is het verloop van s_I met G berekend met behulp van het in lit. 1 gegeven programma.

De gemeten waarden zijn gepresenteerd in de vorm van waarden van x_{ref}^{-x} ; waarin x_{ref} een constante is waarvan de waarde zo gekozen is dat het gemeten verloop van x_{ref} met G zo goed mogelijk overeenkomt met het berekende verloop van s_I met G (fig. 11). 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. Aangezien de rand van de drukdoos en de vaste wand aan de andere zijde van de spleet noch 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 een punt van de drukdoosrand en de vaste wand.

Uit fig. 11 wordt de indruk verkregen dat bij de gebruikte opstelling $s_{I\text{ eff}}$ niet kleiner kan zijn dan ongeveer 0,07 mm.

5.3.2. De verplaatsing van het aangrijpingspunt A van het zwaard van het mini-weegsysteem

Tijdens ijking C is met behulp van een kruisdraadkijker de verplaatsing Δx_A gemeten van het punt A van het zwaard waarin bij de metingen in de grote tunnel de kracht K_0 aangreep; een punt op 160 mm boven het vlak door de hartlijnen van de draaiende assen. De bij $\Delta p_v = 70$ mm Hg gemeten verplaatsing Δx_A ten opzichte van de situatie bij $K_0 = 200$ grf is in fig. 12 aangegeven. Als gevolg van elastische vervorming van plateau en zwaard is deze verplaatsing groter dan de bijbehorende verkleining van de spleetwijdte s_I . Gemiddeld tussen $K_0 = 200$ en 1000 grf verplaatst het punt A ongeveer 0,2 mm per kgf verandering van K_0 .

6. Conclusies

- a. Door de aanwezigheid van het met het weegplateau meebewegende 100 kg zware voor-
spangewicht bleek de werking van het mini-weegsysteem niet hinderlijk ongunstig
te worden beïnvloed.
- b. De ijkfactor φ_w van het mini-weegsysteem bij $\Delta p_v = 70$ mm Hg bedroeg
3,18 N/m² per grf.
Naar uit fig. 10 blijkt verloop φ_w enigszins met Δp_v .
Bij nauwkeurige metingen moet de waarde van Δp_v constant worden gehouden; even-
tueel kan het effect van Δp_v op φ_w worden verkleind door toepassing van nauwere
smooropeningen.
- c. De resultaten van verplaatsingsmetingen geven geen aanleiding te twijfelen aan
de bruikbaarheid van het in lit. 1 gegeven rekenprogramma voor drukdozen.
Bij toepassing van dat programma voor het horizontale mini-weegsysteem in de
huidige toestand kan bij de berekening van de bovengrens van het meetgebied
worden uitgegaan van een minimale effectieve spleetwijdte van 0,07 mm en een
effectieve drukdoosdiameter van 62,67 mm.
- d. Toepassing van watersloten bij de doorvoer van het model door de tunnelwanden
is nodig.
- e. Over de effectieve lengte van het aan de wind blootgestelde modeldeel kan op
grond van het onderzoek geen scherpe uitspraak worden gedaan. Voorlopig wordt
aangenomen dat de hiermee samenhangende onzekerheid in c_d niet meer dan onge-
veer 1% zal bedragen. Nader onderzoek is wenselijk (par. 4).
- f. Bij verwaarlozing van de onder e. bedoelde onzekerheid zijn de uit de metingen
afgeleide "meest waarschijnlijke" waarden van c_d van een gladde dwars-aange-
stroomde cirkelcilinder:

| R_d | c_d |
|------------------|-------|
| $2,5 \cdot 10^4$ | 1,178 |
| $2,6 \cdot 10^4$ | 1,180 |
| $2,7 \cdot 10^4$ | 1,182 |

7. Literatuur

1. E. Dobbinga: Drukdozen als krachtopnemers in weegsystemen; toepassing in het verticale mini-weegsysteem. Memorandum M-533.

Tabel 2

Resultaten van de meting van de weerstand van het cilindermodel in de grote tunnel
 $(\Delta p_v = 70 \text{ mm Hg})$

| V | $R_d \cdot 10^{-4}$ | c_d | ΔK_b | K_o | ΔK_o | $\frac{\Delta K_b \cdot 938}{\Delta K_o \cdot 1068}$ | $\epsilon = \frac{\Delta x_o}{\Delta K_o}$ |
|---|---------------------|---------|--------------|-------|--------------|--|--|
| m/sec | | | grf | grf | grf | | mm/kgf |
| serie 1: zonder waterslot (K_o gemeten met behulp van Mensor manometer). | | | | | | | |
| 19,63 | 1,325 | (1,118) | 165,0 | 324 | 136,8 | 1,059 | 0,56 |
| 27,93 | 1,885 | 1,156 | 344,0 | | 287,6 | 1,051 | 0,48 |
| 34,36 | 2,319 | 1,166 | 526,8 | | 437,7 | 1,057 | 0,54 |
| 39,67 | 2,677 | 1,175 | 703,0 | | 592,5 | 1,042 | 0,40 |
| 44,47 | 3,001 | 1,180 | 887,7 | | 747,3 | 1,043 | 0,42 |
| 48,89 | 3,299 | (1,188) | 1079,8 | | 909,5 | 1,043 | 0,41 |
| 52,65 | 3,553 | (1,178) | 1256,1 | 1219 | 1031,4 | 1,070 | 0,66 |
| serie 2: zonder waterslot (K_o gemeten met behulp van Mensor manometer). | | | | | | | |
| 19,75 | 1,332 | (1,120) | 167,8 | 325 | 138,1 | 1,068 | 0,64 |
| 28,04 | 1,892 | 1,151 | 345,9 | | 288,4 | 1,054 | 0,51 |
| 34,35 | 2,318 | 1,168 | 525,9 | | 439,3 | 1,051 | 0,49 |
| 39,66 | 2,676 | 1,176 | 703,0 | | 592,1 | 1,043 | 0,41 |
| 44,37 | 2,994 | 1,181 | 886,7 | | 742,8 | 1,048 | 0,46 |
| 48,72 | 3,287 | (1,180) | 1073,3 | | 888,8 | 1,061 | 0,58 |
| 52,83 | 3,565 | (1,187) | 1260,7 | 1246 | 1058,8 | 1,046 | 0,44 |
| serie 3: met waterslot onder (K_o gemeten met behulp van Mensor manometer) | | | | | | | |
| 19,73 | 1,327 | (1,116) | 167,8 | 324 | 136,0 | 1,084 | 0,79 |
| 27,95 | 1,881 | 1,159 | 344,9 | | 289,2 | 1,048 | 0,45 |
| 34,37 | 2,313 | 1,169 | 526,8 | | 440,1 | 1,051 | 0,49 |
| 39,67 | 2,670 | 1,176 | 704,9 | | 590,3 | 1,049 | 0,47 |
| 44,40 | 2,988 | 1,185 | 889,6 | | 745,0 | 1,049 | 0,47 |
| 48,75 | 3,280 | (1,188) | 1076,1 | | 899,7 | 1,050 | 0,48 |
| 52,66 | 3,544 | (1,187) | 1257,9 | 1235 | 1046,5 | 1,056 | 0,53 |
| serie 4: met waterslot onder (K_o gemeten met behulp van Texas manometer) | | | | | | | |
| 19,66 | 1,323 | (1,127) | 166,9 | 326 | 138,2 | 1,061 | 0,58 |
| 27,93 | 1,879 | 1,160 | 344,9 | | 288,5 | 1,050 | 0,48 |
| 34,35 | 2,312 | 1,172 | 525,9 | | 442,4 | 1,044 | 0,42 |
| 39,69 | 2,671 | 1,179 | 704,0 | | 595,5 | 1,038 | 0,37 |
| 44,39 | 2,987 | 1,185 | 884,9 | | 750,0 | 1,036 | 0,35 |
| 48,71 | 3,278 | (1,194) | 1072,3 | | 910,0 | 1,035 | 0,34 |
| 52,66 | 3,544 | (1,188) | 1257,0 | 1236 | 1048,7 | 1,053 | 0,50 |

Tabel 3

Verplaatsing van de drukdoos van het weegplateau (zie ook fig. 11)

Berekend verband tussen de spleetwijdte s_I en de bijbehorende kracht K_O *)

Verplaatsing $x_{ref}-x$ van het weegplateau gemeten op 25 mm boven het vlak door de hartlijnen van de assen **)

| $\Delta p_v = 65$ | | | 130 mm Hg | |
|-------------------|--------------|--------------|----------------|--------------------|
| s_I mm | K_O grf | K_O grf | V_I m/sec | V_{*I} m/sec |
| 0,5 | 31 | 62 | 17,9 | 183,3 |
| 0,4 | 48 | 96 | | |
| 0,3 | 84 | 168 | | |
| 0,25 | 120 | 239 | 35,2 | 180,3 |
| 0,2 | 182 | 365 | | |
| 0,19 | 201 | 401 | | |
| 0,18 | 222 | 443 | | |
| 0,17 | 246 | 492 | | |
| 0,16 | 275 | 549 | | |
| 0,15 | 308 | 616 | 56,6 | 173,7 |
| 0,14 | 348 | 696 | | |
| 0,13 | 395 | 791 | | |
| 0,12 | 453 | 905 | | |
| 0,11 | 522 | 1045 | | |
| 0,10 | 608 | 1215 | 79,4 | 162,6 |
| 0,09 | 713 | 1426 | | |
| 0,08 | 844 | 1687 | | |
| 0,07 | 1006 | 2013 | | |
| 0,06 | 1209 | 2418 | | |
| 0,05 | 1457 | 2913 | 123,0 | 125,9 |
| 0,04 | 1750 | 3500 | | |
| 0,03 | 2075 | 4151 | 146,8 | 90,1 |
| 0,02 | 2393 | (4786) | (157,7) | 64,5 |
| 0,01 | 2635 | (5270) | (165,4) | 33,9 |
| 0,005 | 2703 | (5407) | (167,6) | 17,1 |
| 10^{-37} | 2727 | (5454) | (168,3) | $3 \cdot 10^{-37}$ |

| $\Delta p_v \approx 60 \text{ à } 65$ | | 130 à 135 mm Hg |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| K_O grf | $x-x_{ref}$ mm | $x-x_{ref}$ mm |
| 100 | 0,25 | 0,315 |
| 100 | 0,23 | 0,305 |
| 200 | 0,18 | 0,245 |
| 300 | 0,14 | 0,205 |
| 300 | 0,15 | 0,205 |
| 300 | 0,16 | |
| 400 | 0,12 | 0,185 |
| 500 | 0,11 | 0,175 |
| 500 | 0,13 | |
| 600 | 0,11 | 0,165 |
| 600 | | 0,165 |
| 700 | 0,10 | 0,155 |
| 700 | 0,095 | |
| 800 | 0,09 | 0,135 |
| 900 | 0,07 | 0,125 |
| 900 | 0,08 | |
| 1000 | 0,07 | 0,105 |
| 1100 | | 0,115 |
| | | 0,105 |
| 1200 | | 0,105 |
| 1300 | | 0,095 |

*) Berekend met programma 8-1-85 in toevoegsel A van lit. 1 bij:

$d_I = 0,06267$ m (berekend uit de gemiddelde ijkfactor $3,18 \text{ N/m}^2$ per gramkracht)

$L_\ell = 0,7$ m

$d_\ell = 0,008$ m

$\lambda = 0,03$

$d_{*I} = 0,0035$ m

$\emptyset = 0,85$

$\zeta = 1$

$f = 0$

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

$V_m = 150 \text{ m/sec}$

**) x_{ref} zo gekozen dat het gemeten verloop van $x_{ref}-x$ met K_O "zo goed mogelijk" samenvalt met het berekende verloop van s_I met K_O .

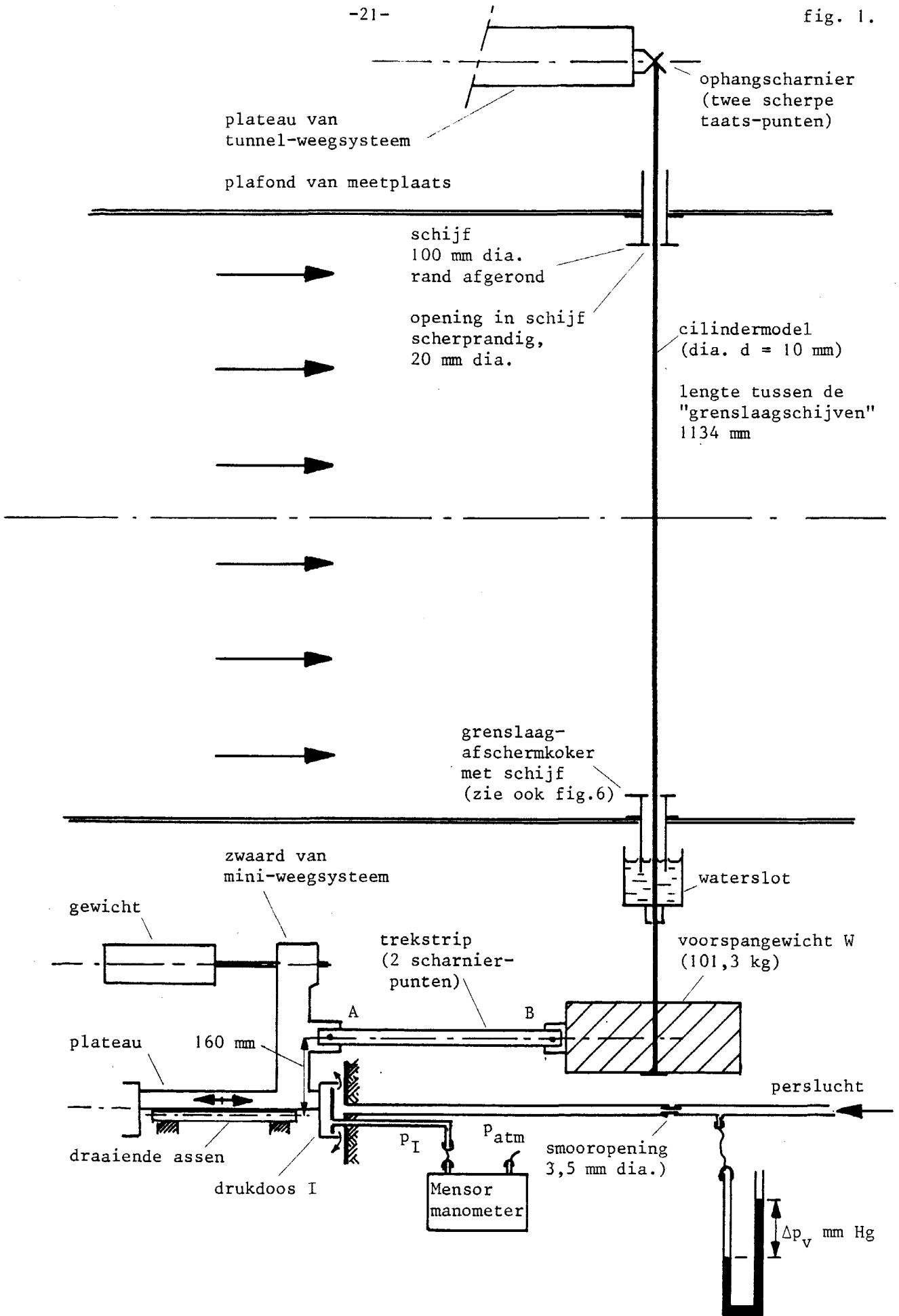


Fig. 1: Opstellingschema

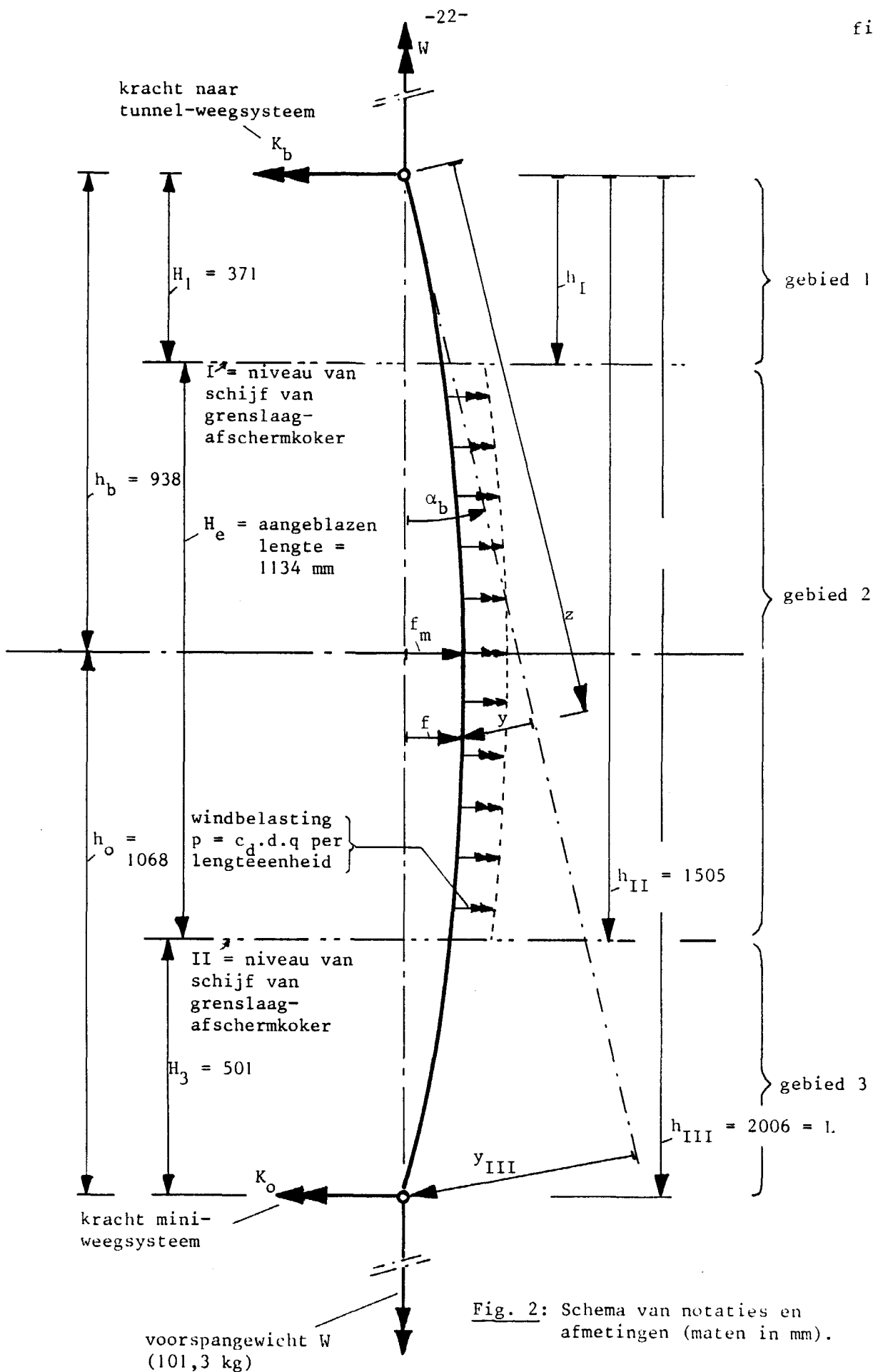


Fig. 2: Schema van notaties en afmetingen (maten in mm).



Fig. 3: De opstelling van het mini-weegstelsel onder de meetplaats (neg. ED 83-007-8)

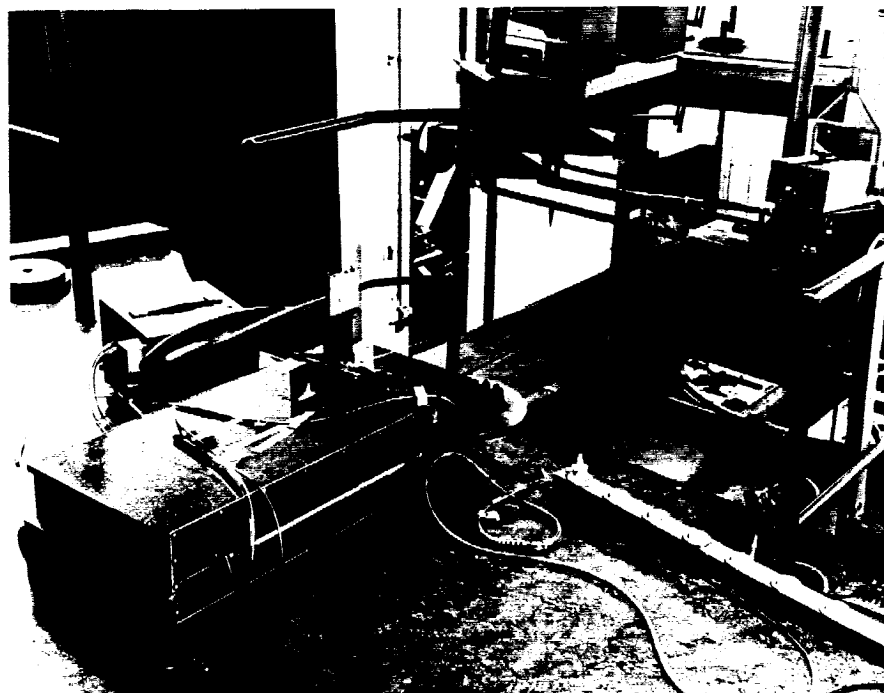


Fig. 4: De opstelling bij de vergelijking van de weegsystemen (ijking B van het mini-weegstelsel) (neg. ED 83.008-7).

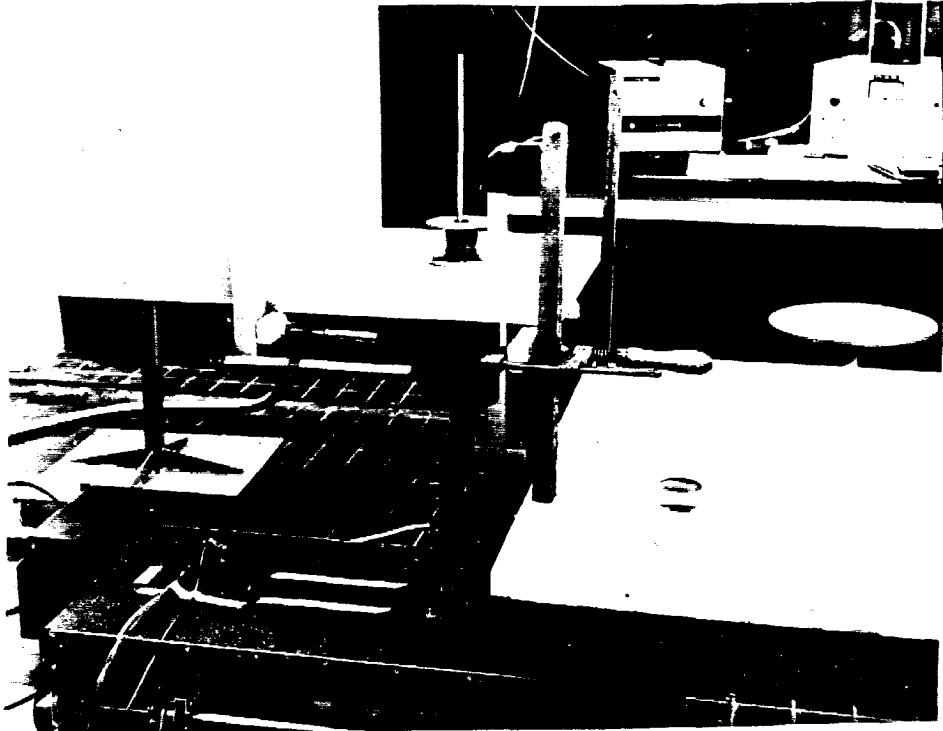


Fig. 5: De opstelling in de 40x40 cm W-tunnel voor het onderzoek van de "grenslaag-afschermkokers" met waterslot. (neg. ED 83.007-4).

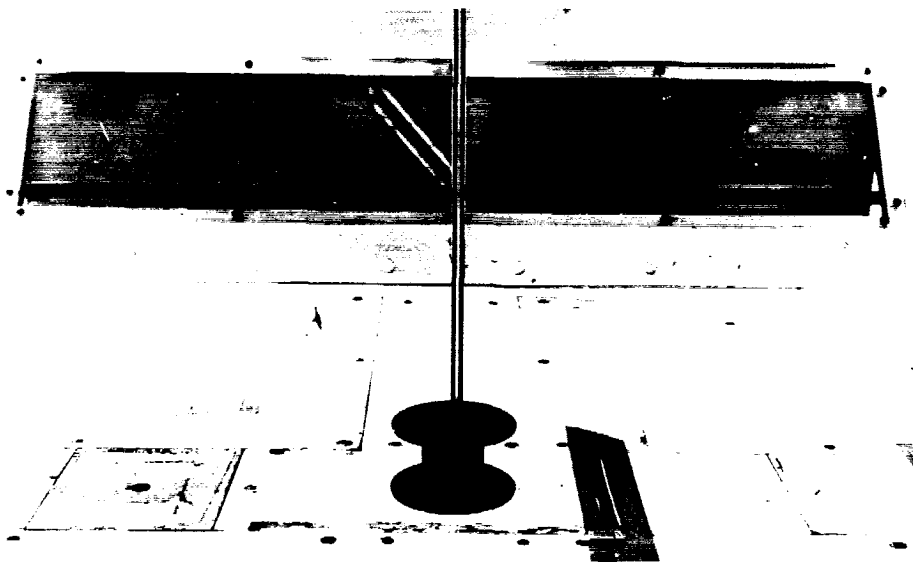


Fig. 6: Grenslaag-afschermkoker op de onderdraaischijf van de grote tunnel. (neg. ED 83.007-11).

$$C_d = \frac{\text{weerstand}}{q \cdot d \cdot H_e}$$

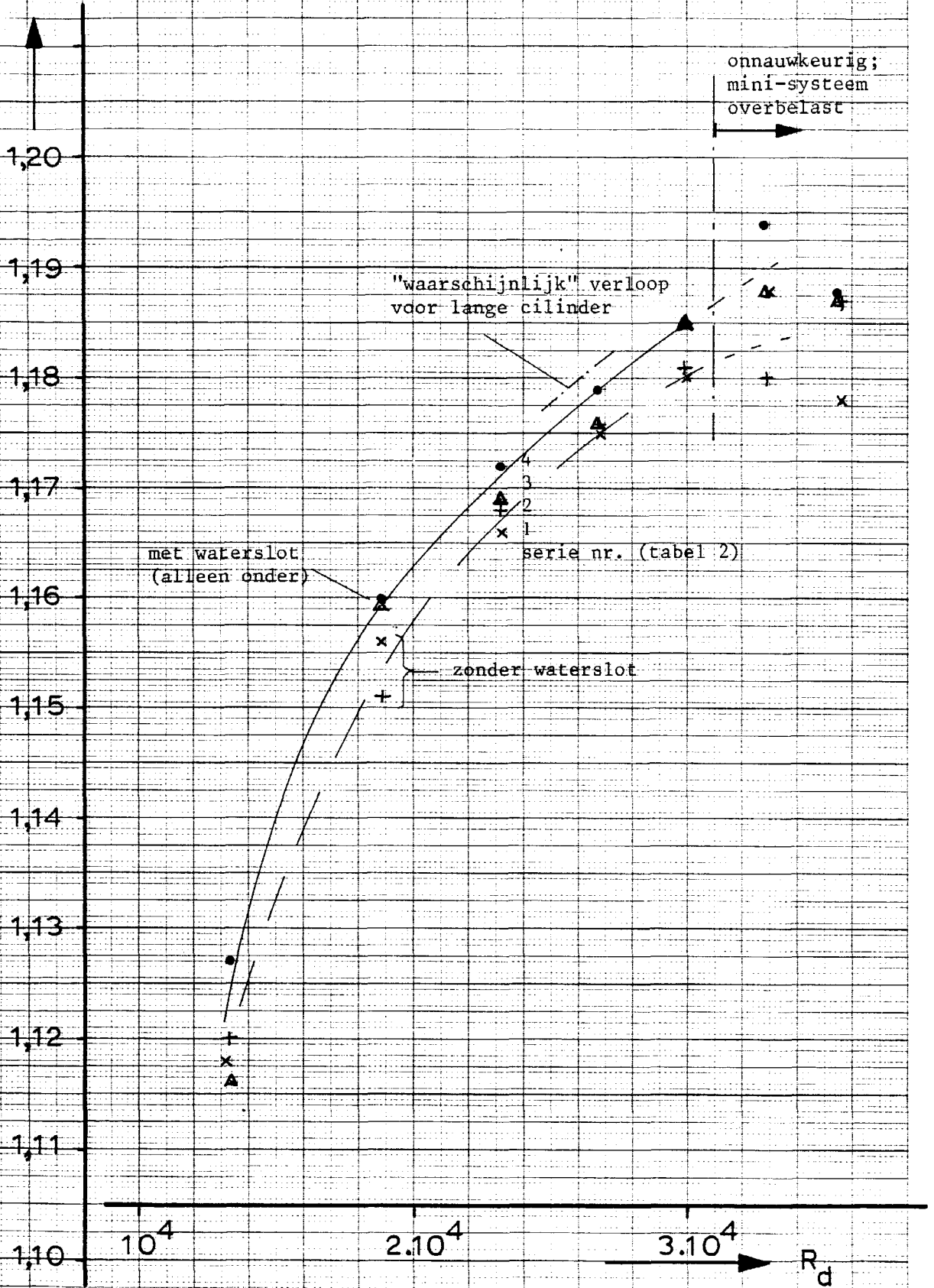
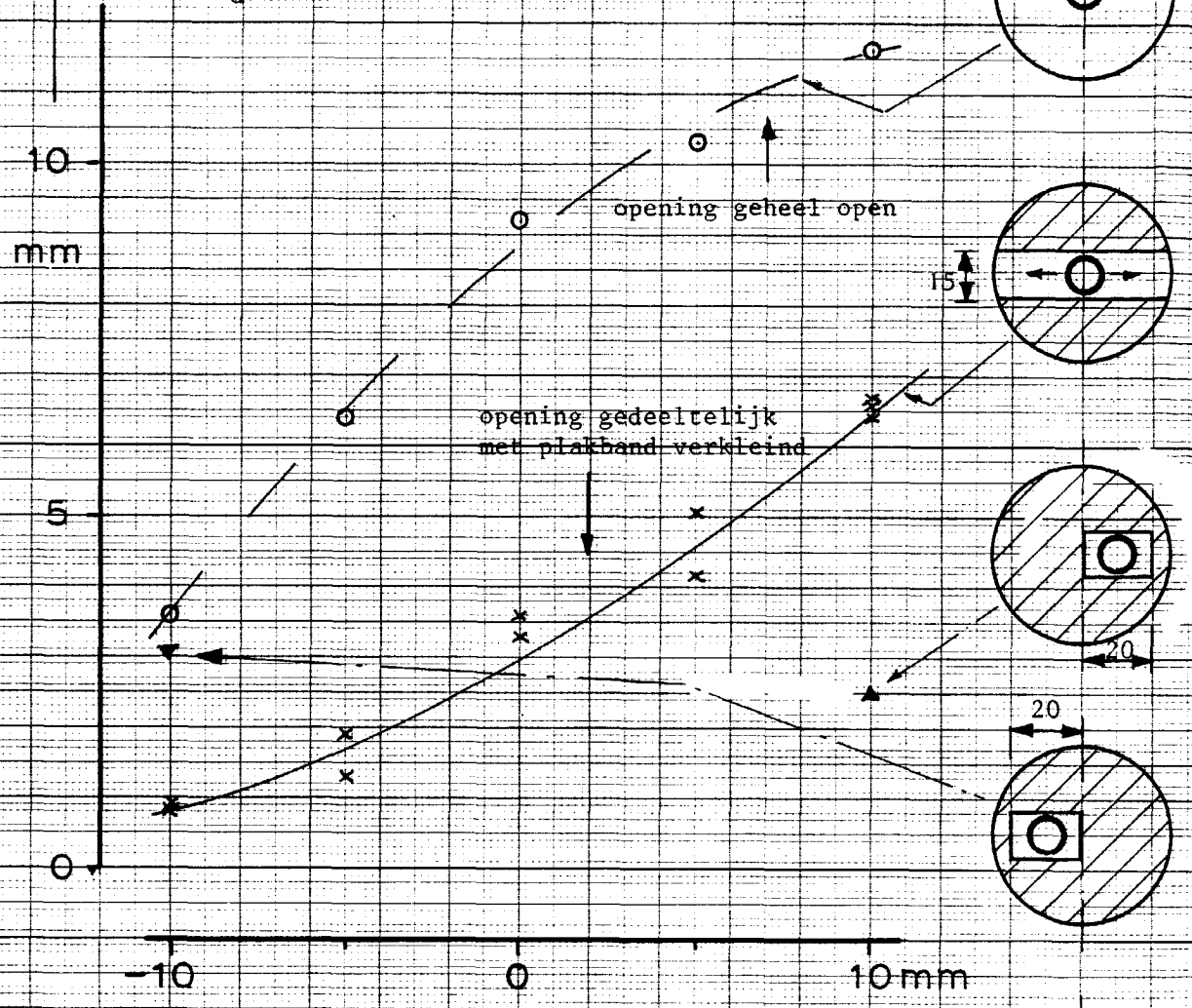


Fig. 7: Gemeten weerstandscoefficiënt van het gladde cilindermodel.

$\Delta H_e = \frac{\text{weerstand-ref. weerstand}}{c_d \cdot q \cdot d}$
 in mm equivalente stanglengte
 voor $c_d = 1,18$



→ verplaatsing in stromingsrichting van het cilindermodel t.o.v. het midden van de opening in de schijf

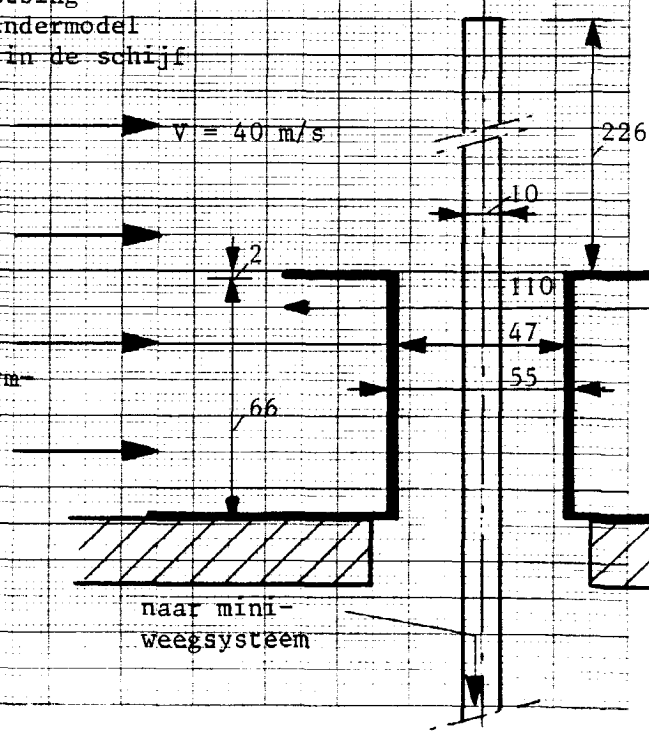
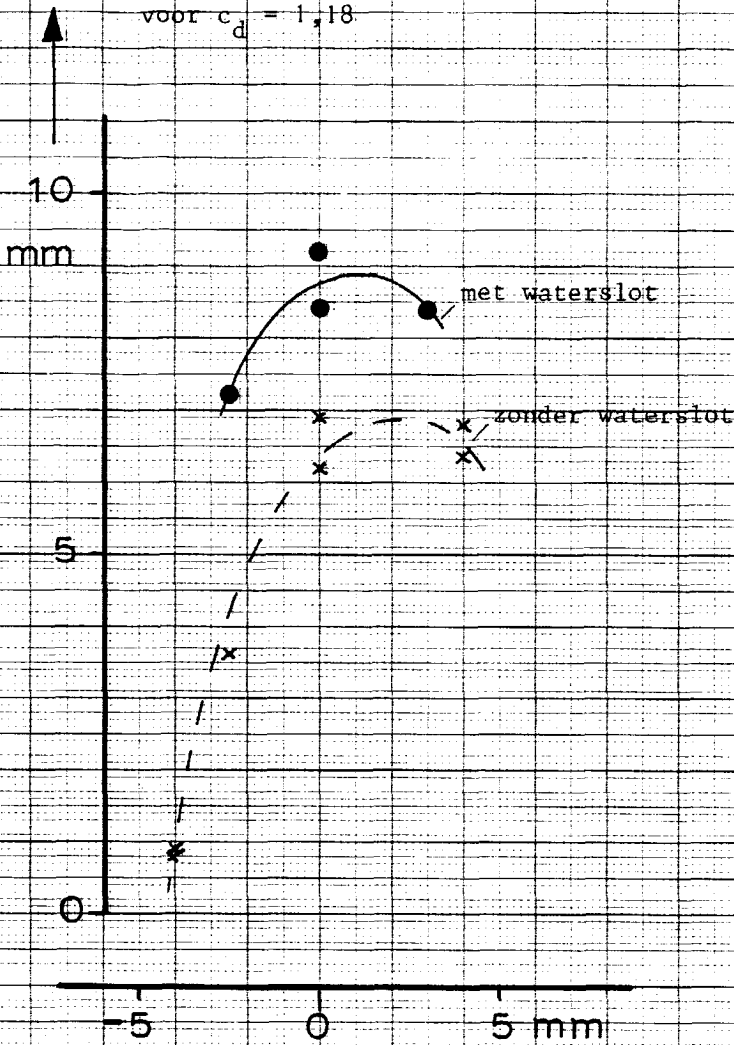


Fig. 8: Resultaten van metingen met het grenslaag-afschermkokermodel in de W-tunnel

naar mini-weegsystem

$$\Delta H_e = \frac{\text{weerstand} - \text{ref. weerstand}}{c_d \cdot q \cdot d}$$

in mm æquivalente stanglengte
voor $c_d = 1,18$



verplaatsing in stromingsrichting
van het cilindermodel ten opzichte van
het midden van de opening in de schijf
(niet nauwkeurig gemeten)

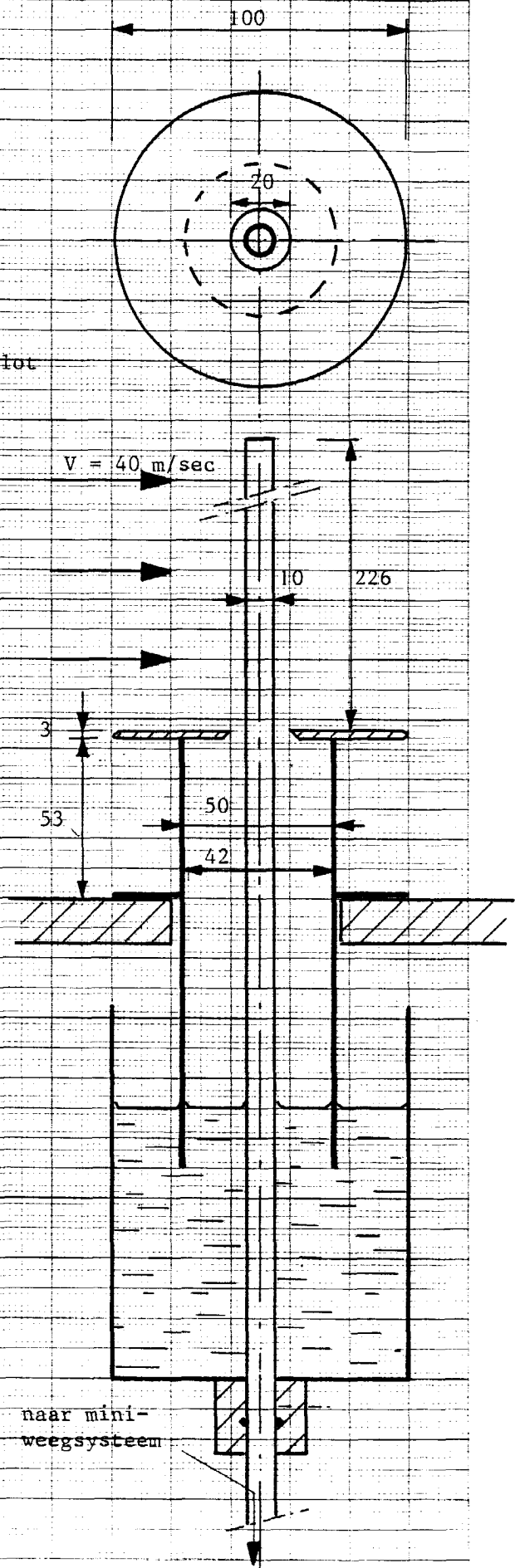


Fig. 9: Resultaten van metingen met een grenslaag-afschermkoker met en zonder gevuld waterslot in de W-tunnel (zie ook fig. 5) maten in mm.

naar mini-weegstelsysteem

φ_w = ijkfactor van het mini-weegsysteem

N/m² per grf

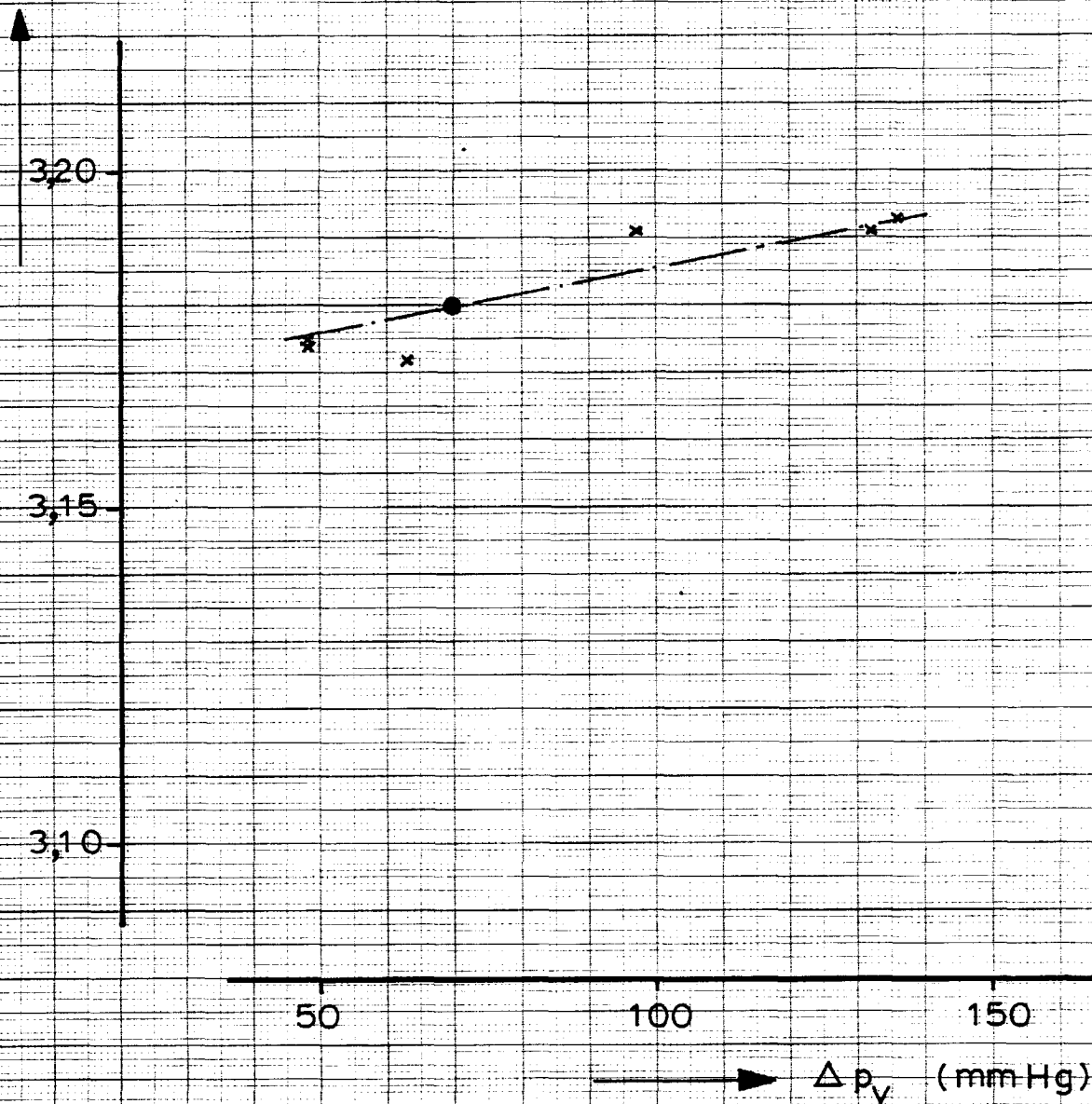


Fig. 10. Het effect van de persluchtdruk op de ijkfactor van het mini-weegsysteem (bij gebruik van slechts een drukdoos).

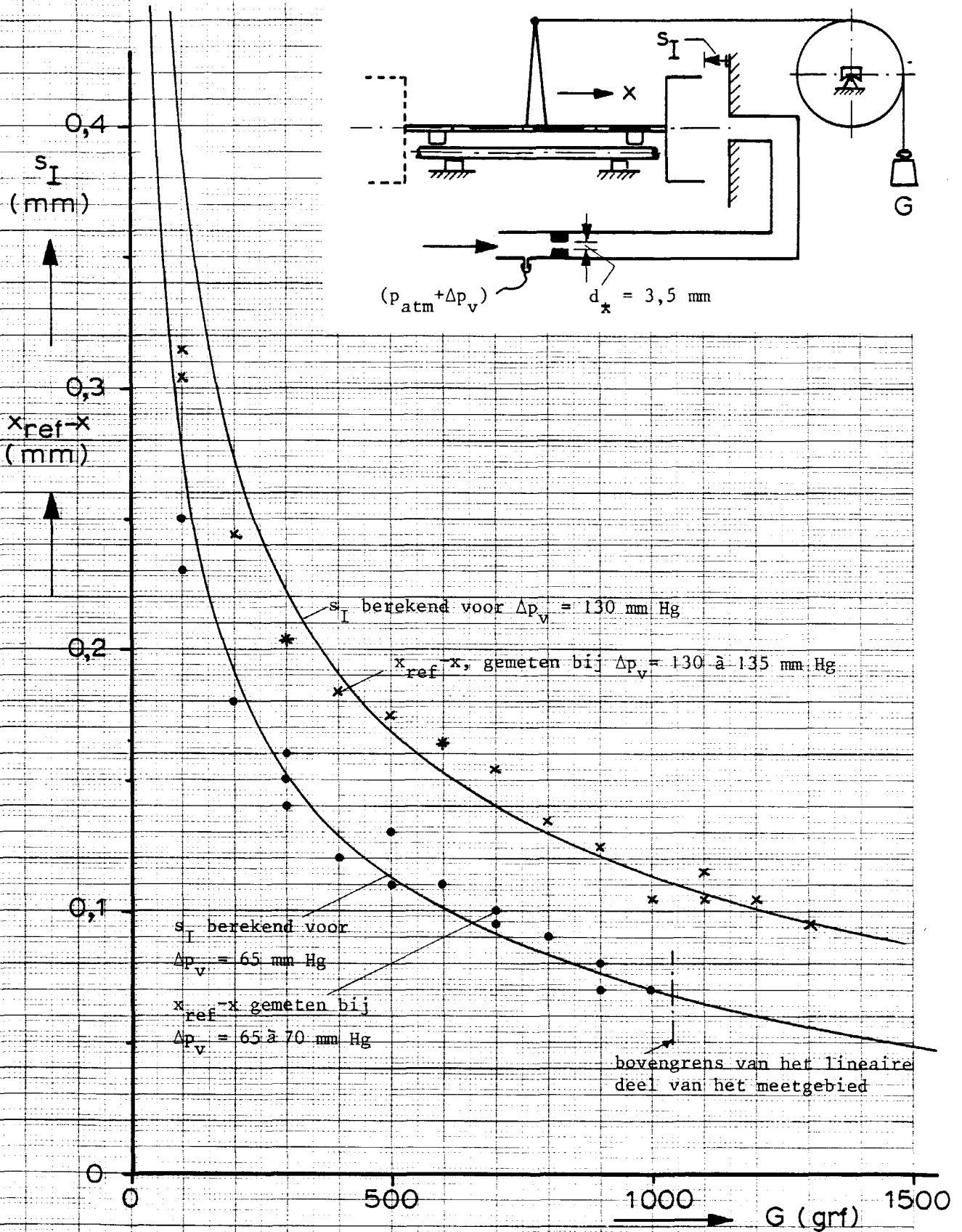


Fig. 11: De verplaatsing van de drukdoos van het horizontale mini-weegsysteem bij variatie van de belasting.
 s_I = berekende spleetwijdte; x_{ref} zo gekozen dat het verloop van $x_{ref} - x$ met G zo goed mogelijk samenvalt met het berekende s_I verloop.

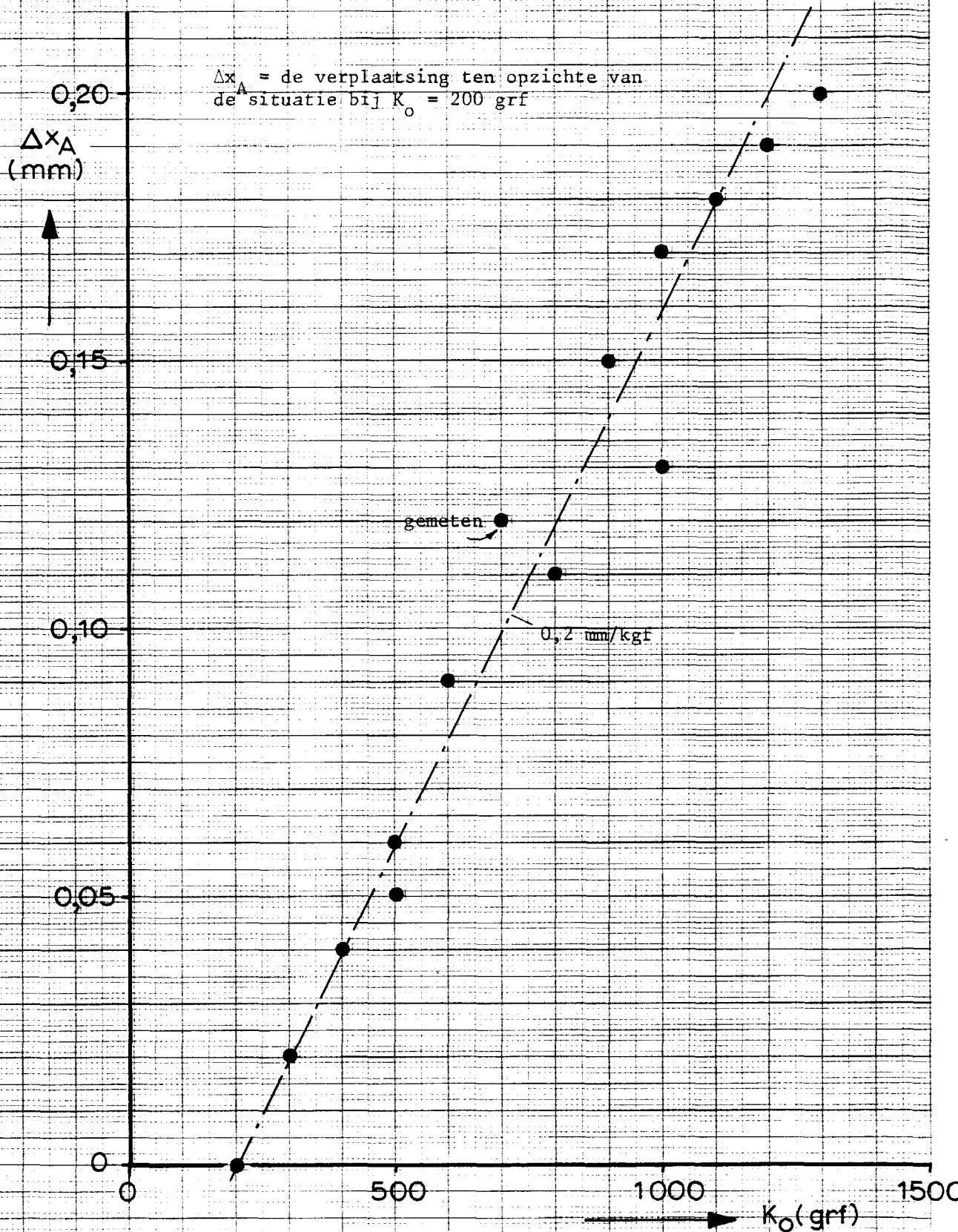


Fig. 12: Gemeten verplaatsing van het punt A van het mini-weegstelsel waarin de kracht K_0 aangrijpt (punt van het zwaard op 160 mm boven het vlak door de hartlijnen van de draaiende assen).

Toevoegsel A bij Memorandum M-528Schatting van de vervorming van een dwars op de wind geplaatste voorgespannen cilinder

In dit toevoegsel zijn rekenprogramma's gegeven voor twee situaties:

A.1. De doorbuiging van een dwars op de wind staande voorgespannen cilinder bij verwaarlozing van de buigingsstijfheid

Aangenomen wordt dat de draad scharnierend is bevestigd in twee punten die zich in een verticaal bevinden. Het bovenste ophangpunt is vast, het onderste wordt belast met een voorspangewicht W . Het deel van de draad gelegen in het "gebied 2" tussen een punt op H_1 onder het bovenste ophangpunt en H_3 boven het onderste bevestigingspunt bevindt zich in een horizontale windstroom met dynamische druk q . Punten van dat draaddeel worden door de wind over een afstand f_2 opzij gedrukt. Voor het zich in de wind bevindende draaddeel geldt:

$$\frac{d^2 f}{dz^2} = - \frac{p}{T} \quad (A-1)$$

Hierin is p de luchtweerstand per lengte eenheid = $c_d \cdot d \cdot q$;

z is de coördinaat in langsrichting, positief naar beneden, gemeten vanuit het bovenste ophangpunt;

f is de horizontale coördinaat van de hartlijn van de draad, positief met de wind mee, gemeten vanuit de verticaal door het ophangpunt;

T is de trekkracht in de draad die vrijwel gelijk is aan het voorspangewicht W .

Aan de boven en onderkant van het gebied 2 moet worden voldaan aan de randvoorwaarden dat de draaddelen buiten gebied 2 recht zijn en door de "ophangpunten" gaan. Om aan deze randvoorwaarden te kunnen voldoen zonder de vergelijking onhandig ingewikkeld te maken wordt in het gebied 2 gewerkt met de benadering:

$$\frac{d^2 f}{dz^2} = - \left[\frac{p}{W} + C_1 (z - h_b)^2 + C_2 \cdot z \right] = - \left[\frac{p}{W} + C_1 \cdot z^2 + (C_2 - 2 \cdot C_1 \cdot h_b) \cdot z + C_1 \cdot h_b^2 \right]$$

(A-2)

$$\frac{df}{dz} = - \left[+ \frac{1}{3} \cdot C_1 \cdot z^3 + \frac{1}{2} (C_2 - 2 \cdot C_1 \cdot h_b) \cdot z^2 + C_1 \cdot h_b^2 \cdot z + C_3 \right] \quad (A-3)$$

$$f = - \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{p}{W} \cdot z^2 + \frac{1}{12} \cdot C_1 \cdot z^4 + \frac{1}{6} \cdot (C_2 + 2 \cdot C_1 \cdot h_b) \cdot z^3 + \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot h_b^2 \cdot z^2 + C_3 \cdot z + C_4 \right] \quad (A-4)$$

Hierin is h_b de afstand tussen het bovenste ophangpunt en het midden van gebied 2 (de tunnelhartlijn).

De randvoorwaarden zijn:

$$\text{bij } z = h_I : df/dx = + \frac{K_b}{W} \quad \text{en} \quad f = + \frac{K_b}{W} \cdot h_I \quad (A-5)$$

$$\text{bij } z = h_{II} : df/dx = - \frac{K_o}{W} \quad \text{en} \quad f = + \frac{K_o}{W} \cdot h_3$$

Hiermee zijn vier vergelijkingen beschikbaar waaruit de waarde van C_1 t/m C_4 kan worden opgelost.

Hierachter is een TI-59 programma (26-4-83) opgenomen waarmee voor elke waarde van z (in het gebied 2) een schatting van de bijbehorende waarde van f kan worden gemaakt.

Voor het in dit rapport besproken geval zijn in tabel A.1 enkele berekende waarden van f opgenomen.

A.2. Schatting van de vervorming waarbij de cilinder wordt opgevat als een op buigting belaste in twee punten opgelegde balk

Indien wordt aangenomen dat de doorbuiging van de cilinder gering is kan gebruik worden gemaakt van de betrekking:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{M}{EI} \quad (A-6)$$

waarin: M = het in de doorsnede werkende buigend moment

E = de elasticiteitsmodulus

I = het traagheidsmoment; voor een cirkelvormige doorsnede met diameter d :

$$I = \pi d^4 / 64.$$

Aangenomen is dat de z-as een zodanige hoek α_b met de verticaal maakt dat die z-as in het bovenste ophangpunt samenvalt met de raaklijn aan de hartlijn van de belaste cilinder.

Het effect van het voorspangewicht W op de vervorming wordt in de hier gegeven benadering niet geheel correct verwerkt; volstaan is met het in rekening brengen van een geschatte bijdrage van W in het buigend moment.

Daarbij is ervan uitgegaan dat bij de berekening van de bijdrage van W mag worden aangenomen dat de elastische lijn parabolisch is:

$$f = \frac{4 \cdot f_{\max}}{h_{III}} \cdot z - \frac{4 \cdot f_{\max}}{(h_{III})^2} \cdot z^2 \quad (A-7)$$

Deze betrekking voldoet aan: $f = 0$ voor $z = 0$ en $z = h_{III}$; $f = f_{\max}$ voor $z = \frac{h_{III}}{2}$

De momenten in de cilinder worden dan de volgende:

In het gebied 1, tussen $z = 0$ en $z = h_I$ (boven de windstraal):

$$M_1 = K_b \cdot z - W \cdot f \quad (A-8)$$

in het gebied 2: tussen $z = h_I$ en h_{II} (in de wind):

$$M_2 = K_b \cdot z - p(z-h_I) \cdot \frac{1}{2} \cdot (z-h_I) - W \cdot f \quad (A-9)$$

in het gebied 3: tussen $z = h_{II}$ en $z = h_{III}$ (onder de windstraal):

$$M_3 = K_b \cdot z - H_e \cdot p \cdot (z-h_b) - W \cdot f \quad (A-10)$$

Door twee maal integreren kan de doorbuiging y ten opzichte van de z-as worden afgeleid. De integratie constanten kunnen worden afgeleid uit de randvoorwaarden:

$$\begin{aligned} \text{bij } z = 0 & : dy/dz = 0 & \text{en } y = 0 \\ \text{bij } z = h_I & : (dy/dz)_1 = (dy/dz)_2 & \text{en } y_1 = y_2 \\ \text{bij } z = h_{II} & : (dy/dz)_2 = (dy/dz)_3 & \text{en } y_2 = y_3 \end{aligned} \quad (A-11)$$

Uit de voorwaarde dat bij $z = h_{III}$ de verplaatsing f gelijk 0 moet zijn kan de waarde van α_b worden afgeleid uit: $\alpha_b = y_{III}/h_{III}$.

Uitwerking levert de volgende betrekkingen:

$$E.I.y_{III} = \frac{1}{12} \cdot W \cdot b \cdot h_{III}^4 + \frac{1}{6} \left[K_b - H_e \cdot p - W \cdot a \right] h_{III}^3 + \frac{1}{2} \cdot H_e \cdot p \cdot h_b \cdot h_{III}^2 + c_5 \cdot h_{III} + c_6 \quad (A-12)$$

hierin is:

$$c_5 = \frac{1}{3} \cdot p \cdot h_{II}^3 - \frac{1}{2} \cdot p \cdot (h_I^2 + 2 \cdot H_t \cdot h_b) \cdot h_{II} + \frac{1}{6} \cdot p \cdot h_I^3$$

$$c_6 = -\frac{5}{24} \cdot p \cdot h_{II}^4 + \frac{1}{2} \cdot p \cdot \left(\frac{1}{2} h_I^2 + H_e \cdot h_b \right) \cdot h_{II}^2 - \frac{1}{24} \cdot p \cdot h_I^4$$

Voor het gebied 2 kan worden geschreven:

$$f_2 = \frac{y_{III}}{h_{III}} \cdot z - \frac{1}{E.I} \left\{ \left[\frac{1}{12} \cdot W \cdot b - \frac{1}{24} \cdot p \right] z^4 + \frac{1}{6} \left[K_b + p \cdot h_I - W \cdot a \right] z^3 - \frac{1}{4} \cdot p \cdot h_I^2 \cdot z^2 + \frac{1}{6} \cdot p \cdot h_I^3 \cdot z - \frac{1}{24} \cdot p \cdot h_I^4 \right\} \quad (A-13)$$

In deze betrekkingen is:

$$a = \frac{4 \cdot f_{\max}}{h_{III}} \quad \text{en} \quad b = \frac{4 \cdot f_{\max}}{h_{III}^2} \quad (A-14)$$

De in te voeren waarde voor f_{\max} in (A-14) moet door iteratie zo worden gekozen dat de uit (A-13) volgende waarde van f_2 bij $z = h_{III}/2$ gelijk is aan de ingevoerde f_{\max} .

De berekening kan worden uitgevoerd met het hierachter opgenomen TI-59 programma (25-4-83).

Enkele berekende resultaten zijn in de kolommen 2 t/m 6 van tabel A.1 opgenomen.

Tabel A.1

Doorbuiging van een dwars op de wind geplaatste voorgespannen cilinder

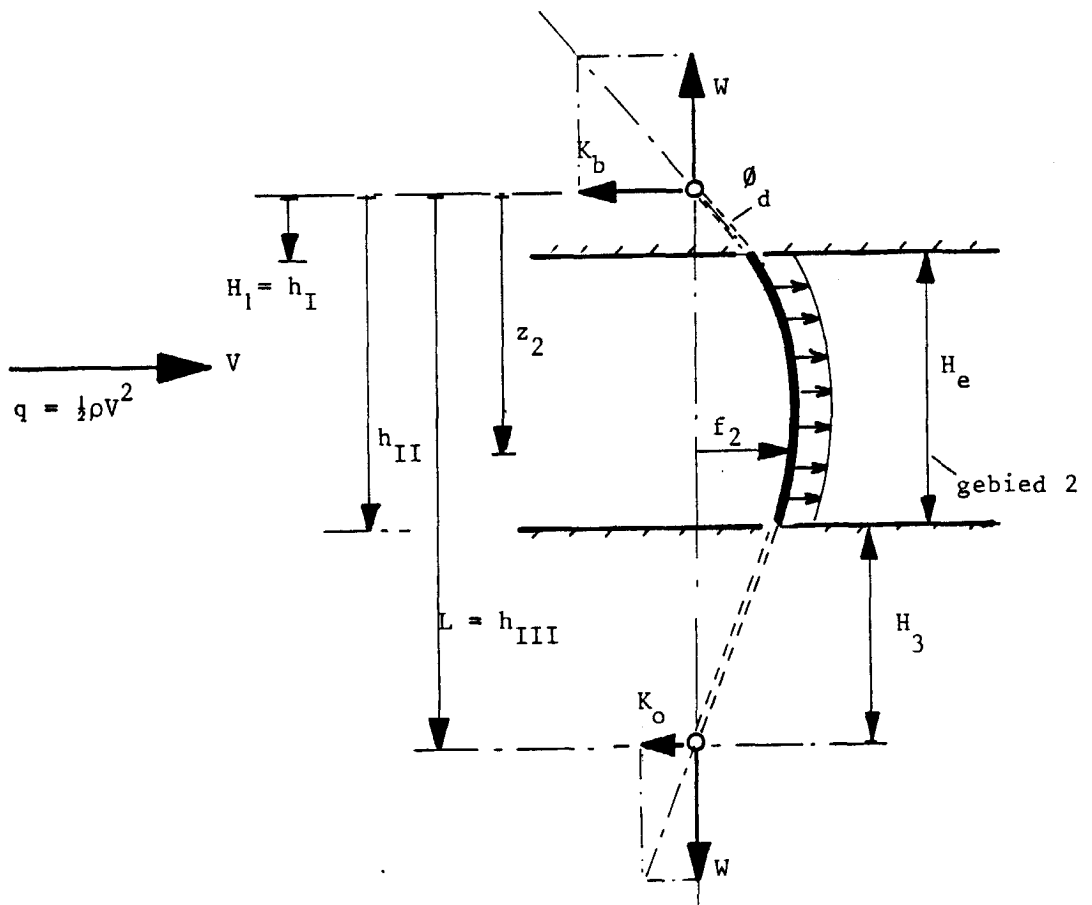
$$d = 10 \text{ mm}; q = 100 \text{ kgf/m}^2$$

| z | E = 2,1.10 ⁶ kgf/cm ² | | | | | zonder buigings- stijfheid | |
|-----------------------------|---|---------|--------|--------|--------|-------------------------------|-------|
| | W = 0 | 12,5 | 25 | 50 | 100 | 100 | 50 kg |
| mm | f ₂ (mm) | | | | | | |
| h _I = 371 | 10,36 | 6,85 | 5,12 | 3,39 | 2,01 | 2,64 | 5,29 |
| 400 | 11,07 | 7,33 | 5,47 | 3,63 | 2,16 | 2,84 | 5,69 |
| 500 | 13,32 | 8,83 | 6,60 | 4,39 | 2,63 | 3,46 | 6,93 |
| 600 | 15,23 | 10,11 | 7,57 | 5,04 | 3,03 | 3,97 | 7,33 |
| 700 | 16,76 | 11,13 | 8,34 | 5,56 | 3,35 | 4,35 | 8,70 |
| 800 | 17,87 | 11,87 | 8,89 | 5,93 | 3,57 | 4,61 | 9,23 |
| 900 | 18,54 | 12,30 | 9,21 | 6,13 | 3,69 | 4,76 | 9,52 |
| h _b = 938 | 18,67 | 12,38 | 9,29 | 6,17 | 3,70 | 4,79 | 9,57 |
| $\frac{1}{2}h_{III} = 1003$ | 18,74 | 12,4223 | 9,2912 | 6,1772 | 3,6982 | 4,79 | 9,58 |
| 1100 | 18,48 | 12,23 | 9,15 | 6,06 | 3,61 | 4,70 | 9,40 |
| 1200 | 17,76 | 11,74 | 8,75 | 5,78 | 3,41 | 4,49 | 8,99 |
| 1300 | 16,61 | 10,95 | 8,14 | 5,36 | 3,13 | 4,17 | 8,34 |
| 1400 | 15,05 | 9,90 | 7,34 | 4,79 | 2,77 | 3,73 | 7,45 |
| h _{II} = 1505 | 13,04 | 8,54 | 6,31 | 4,09 | 2,33 | 3,13 | 6,27 |
| programma | TI-59 25-4-83 | | | | | 26-4-83 | |

TI-59 programma: 26-4-83: "Doorbuiging van een dwars op de wind staande voorgespannen cilinder bij verwaarlozing van de buigingsstijfheid".

Instructie voor gebruik: maten in cm: krachten in kgf; q in kgf/cm²

| | invoer | toetsen | display |
|---|--------|-------------------------|-------------------|
| I. Machine instellen: | | | |
| . vier kaartkanten inlezen | 0 | 4 2nd Op 17 invoeren | 639.39 1 t/m 4 |
| Hiermee worden de volgende getalwaarden ingevoerd: | | | |
| d cilinderdiameter | 1 | STO 00 | |
| c_d weerstandscoefficiënt | 1,18 | STO 01 | |
| H_e lengte van het aangeblazen deel | 113,4 | STO 02 | |
| H_1 h_I | 37,1 | STO 11 | |
| H_3 | 50,1 | STO 03 | |
| $L = H_{III} (= H_e + H_1 + H_3)$ | 200,6 | STO 04 | |
| $h_{II} (= L - H_3)$ | 150,5 | STO 21 | |
| Voordat verder wordt gegaan met II dienen indien nodig eerst andere waarden in deze registers te worden ingevoerd | | | |
| II. Voorbereidende berekening: | | | |
| IIa. invoer van de dynamische druk q (<u>kgf/cm²</u>) | q | B | 1 |
| IIb. invoer van voorspangewicht in kg | W | C | 0 |
| III. Berekening van de verplaatsing f_2 in het gebied 2 door invoer van z_2 | z_2 | D | f_2 |



TI-59 programma: ED 26-4-83

| | | | | | | |
|------------------|----------------|---------|-------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------|
| d | STO 00 | 1 | x | STO 22 |) | |
| c _d | STO 01 | 1,18 | RCL 08 | (| STO 18 | b _o |
| H _e | STO 02 | 113,4 | x | CE | (| |
| H ₁ | STO 11 | 37,1 | RCL 06 | h _o x | CE | |
| H ₃ | STO 03 | 50,1 | : | RCL 21 | x | |
| L | STO 04 | 200,6 | RCL 04 |) | RCL 03 | |
| h _{II} | STO 21 | 150,5 |) | STO 23 |) | |
| | | | STO 09 | K _b (| +/- | |
| <u>2nd Lbl B</u> | | | | CE | STO 19 | e _o |
| STO 07 | q | (0,01) | (| x | (| |
| (| | | RCL 02 | RCL 21 | RCL 13 | |
| RCL 11 | | | x |) | : | |
| + | | | RCL 08 | STO 24 | h _{II} ⁴ 3 | |
| RCL 02 | | | - | 1 | - | |
| : | | | RCL 09 | 2nd Fix 0 | RCL 12 | |
| 2 | | |) | R/S | x | |
|) | | | STO 10 | K _o | RCL 05 | h _b |
| STO 05 | h _b | (93,8) | | <u>2nd Lbl C</u> | + | |
| (| | | RCL 11 | STO 15 | W | RCL 05 |
| RCL 04 | | | x ² | (| x ² | |
| - | | | STO 12 | RCL 09 | x | |
| RCL 05 | | | (| : | RCL 11 | |
|) | | | CE | RCL 15 |) | |
| STO 06 | h _o | (106,8) | x |) | STO 20 | a ₁ |
| (| | | RCL 11 | +/- | (| |
| RCL 07 | | | STO 13 | STO 16 | a _o | RCL 12 |
| x | | | (| (| : | |
| RCL 01 | c _d | | CE | CE | 2 | |
| x | | | x | x |) | |
| RCL 00 | d | | RCL 11 | RCL 11 | STO 25 | a ₂ |
|) | | |) |) | (| |
| STO 08 | p | | STO 14 | STO 17 | d _o | RCL 08 |
| (| | | h _I ⁴ (| (| : | |
| RCL 02 | | | RCL 21 | RCL 10 | RCL 15 | |
| | | | x ² | : | x | |
| | | | | RCL 15 | RCL 11 | |

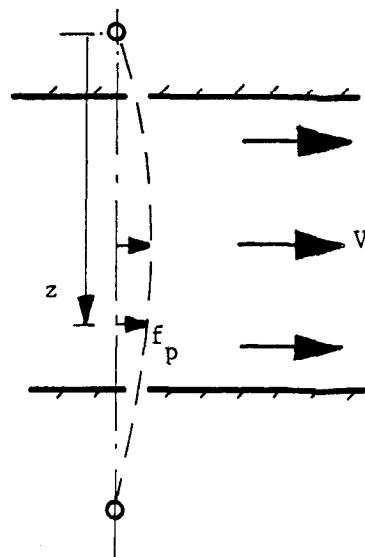
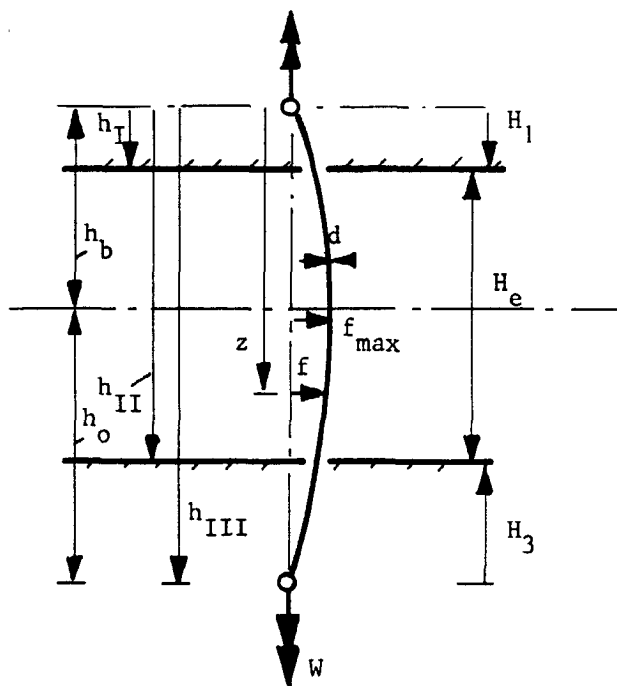
| | | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|--------|----------------|--------|
|) | | x | : | | x | | RCL 28 |
| STO 26 | a ₅ | RCL 13 | 3 | | RCL 28 | |) |
| (| | : | + | |) | | x |
| RCL 23 | | 3 | RCL 05 | | STO 36 | A | (|
| : | | + | x ² | | | | RCL 30 |
| 3 | | RCL 05 | x | | ((| | - |
| - | | x ² | RCL 22 | | RCL 25 | | RCL 33 |
| RCL 22 | | x | : | | - | | - |
| x | | RCL 12 | 2 | | RCL 28 | | (|
| RCL 05 | | : |) | |) | | RCL 11 |
| + | | 2 | STO 33 | e ₁ | x | | - |
| RCL 05 | |) | (| | ((| | RCL 21 |
| x ² | | STO 30 | d ₁ RCL 23 | | RCL 17 | |) |
| x | | | : | | - | | x |
| RCL 21 | | (| 6 | | RCL 19 | | RCL 27 |
|) | | RCL 13 |) | |) | |) |
| STO 27 | b ₁ | : | STO 34 | e ₂ | - | | - |
| (| | 6 | (| | (| | RCL 36 |
| RCL 22 | |) | RCL 08 | | RCL 11 | | x |
| : | | STO 31 | d ₂ : | | - | | (|
| 2 | | (| RCL 15 | | RCL 21 | | RCL 20 |
|) | | RCL 08 | x | |) | | - |
| STO 28 | b ₂ | : | RCL 22 | | x | | RCL 27 |
| (| | RCL 15 | : | | RCL 18 | |)) |
| RCL 08 | | x | 2 | |) | | STO 38 |
| : | | RCL 12 |) | | - | | ((|
| RCL 15 | | : | STO 35 | e ₅ | RCL 36 | | RCL 25 |
| x | | 2 | | | x | | - |
| RCL 21 | |) | (| | (| | RCL 28 |
|) | | STO 32 | d ₅ RCL 31 | | RCL 16 | |) |
| STO 29 | b ₅ | (| - | | - | | x |
| | | RCL 24 | RCL 34 | | RCL 18 | | (|
| (| | : | - | |)) | | RCL 32 |
| RCL 14 | | 12 | (| | STO 37 | X ₁ | - |
| : | | + | RCL 11 | | | | RCL 35 |
| 12 | | RCL 05 | - | | ((| | - |
| + | | x | RCL 21 | | RCL 25 | | (|
| RCL 05 | | RCL 23 |) | | - | | RCL 11 |

| | | | | | |
|--------|--------------|------------------|-------|---|--|
| - |) | STO 19 | C_4 | x | |
| RCL 21 | : | 0 | | RCL 05 | |
|) | (| R/S | | x^2 | |
| x | RCL 25 | | | : | |
| RCL 29 | - | <u>2nd Lbl D</u> | | 2 | |
|) | RCL 28 | STO 29 | z_2 |) | |
| - |) | (| | + | |
| RCL 36 | STO 34 | C_2 CE | | RCL 35 | |
| x | (| x^2 | | x | |
| (| RCL 16 | x | | RCL 29 | |
| RCL 26 | - | (| | + | |
| - | RCL 33 | RCL 08 | p | RCL 19 | |
| RCL 29 | x | : | |) | |
|) | RCL 20 | RCL 15 | W | 2nd Fix 3 | |
| STO 39 | x_3 - | : | | +/- | |
| ((| RCL 34 | 2 | | R/S | |
| RCL 37 | x | + | | | |
| - | RCL 25 | RCL 33 | C_1 | p.m.: $a_3=b_3=d_4=e_4=1$ | |
| RCL 39 | - | x | | registers 19, 26, 29, 33, 34 en 35 worden | |
|) | RCL 26 | RCL 29 | | na 559 voor andere grootheden gebruikt | |
| : |) | x^2 | | | |
| RCL 38 | STO 35 | C_3 : | | | |
|) | (| 12 | | | |
| STO 33 | C_1 RCL 17 | + | | | |
| ((| - | (| | | |
| RCL 16 | RCL 33 | RCL 34 | | | |
| - | x | + | | | |
| RCL 18 | RCL 30 | 2 | | | |
| - | - | x | | | |
| RCL 26 | RCL 34 | RCL 33 | | | |
| + | x | x | | | |
| RCL 29 | RCL 31 | RCL 05 | | | |
| - | - |) | | | |
| RCL 33 | RCL 35 | x | | | |
| x | x | RCL 29 | | | |
| (| RCL 11 | : | | | |
| RCL 20 | - | 6 | | | |
| - | RCL 32 | + | | | |
| RCL 27 |) | RCL 33 | | | |

TI-59 programma: 25-4-83: "Doorbuiging van een dwars op de wind staande cilinder met voorspanning"

Instructie voor gebruik: maten in cm; krachten in kgf; q in kgf/cm²

| | invoer | toetsen | display |
|--|--------------------------------|--------------------|--|
| I. Laden van programma; eerst instellen 4 kaartkanten lezen | 4 0 | 2nd Op 17 lezen | 639.39 1 t/m 4 |
| II. Invoer van gegevens: Door intoetsen van SBR SBR worden ingevoerd 1 STO 04 d van cilinder 2100000 STO 05 E 3000 STO 06 σ_{toel} 1,18 STO 07 c_d 113,4 STO 08 H_e 37,1 STO 01 $h_I=H_1$ Hierna kunnen eventueel andere waarden in deze registers worden ingevoerd | | SBR SBR | |
| III. Start van voorbereidende berekening: invoer van H_3 (50,1 cm) invoer van $q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$ in <u>kgf/cm²</u> | H_3 q | A B | $W_{toel.}$ H_3 |
| IV. Keuze van het voorspangewicht W ; twee mogelijkheden: of: IVa. $W = 0$ (alleen effect van stijfheid) berekening van de verplaatsing f uit de verticaal in het gebied van de windstraal (gebied 2) | 0 z | C E | f bij $z = h_b$ f bij z |
| of: IVb: $W \neq 0$ dan: schatting van max. doorbuiging herhaling van invoer van " f_{max} " tot berekende " f " daaraan gelijk is. Daarna benaderingsberekening van f bij willekeurige z in gebied 2! | W " f_{max} " X z | C D D E | 111111111 . " f " bij $z=h_{III}$ " f " = " f_{max} " f |
| Controle van de vorm van de gebruikte benaderingsparabool voor W -invloed: | z | 2nd E' | $f_{parabool}$ |



TI-59 programma ED 25-4-1983: Doorbuiging van cilinder dwars op de wind

| | | | |
|-----------------------------|------------------|-----------|--------------------|
| <u>2nd Lbl SBR</u> | (| CE | RCL 02 |
| 1 STO 04 d | RCL 03 | x | : |
| 2100000 STO 05 E | - | RCL 07 | c_d 3 |
| 3000 STO 06 σ_{toel} | RCL 10 | x | - |
| 1,18 STO 07 c_d |) | RCL 04 | d (|
| 113,4 STO 08 H_e | STO 11 h_o |) | RCL 01 |
| 37,1 STO 01 $h_I=H_I$ | (| STO 15 | $p x^2$ |
| R/S | RCL 04 | d | + |
| | x^2 | (| 2 |
| <u>2nd Lbl A</u> | x^2 | RCL 08 | x |
| STO 09 $H_3(50,1)$ | x | x | RCL 08 |
| (| 2nd π | RCL 15 | x |
| CE | : | x | RCL 10 |
| + | 64 | RCL 11 | h_o) |
| RCL 08 H_e | x | : | x |
| + | RCL 05 | RCL 03 | L RCL 02 |
| RCL 01 H_I |) |) | : |
|) | STO 12 | E.I | STO 16 K_b 2 |
| STO 03 $L=h_{III}$ | (| (| + |
| (| RCL 04 | RCL 08 | RCL 01 |
| RCL 01 | x^2 | x | x^2 |
| + | x | RCL 15 | x |
| RCL 08 | 2nd π | - | RCL 01 |
|) | : | RCL 16 | : |
| STO 02 h_{II} | 4 |) | 6 |
| (| x | STO 17 | K_o STO 18 c_5 |
| RCL 01 | RCL 06 | (| (|
| + |) | RCL 15 | p RCL 15 |
| RCL 08 | STO 13 | R/S | x |
| : | <u>2nd Lbl B</u> | (| (|
| 2 | STO 14 | $q(0,01)$ | RCL 02 |
|) | (| x | x^2 |
| STO 10 h_b | | | : |
| | | | 24 |

| | | | | | |
|-------------------|---------------------------------|---------------------|--------|------------------|------------|
| x | STO 22 | W.a | 12 |) | + |
| RCL 02 | STO 23 | W.b | + | STO 24 | y_{III} |
| x^2 | GTO x^2 | | -(| | RCL 15 |
| x^2 | | | RCL 16 | (| x |
| +/- | <u>2nd Lbl C</u> | | - | CE | RCL 01 |
| + | STO 20 | W | RCL 08 | : | - |
| (| 2nd x=t EE | | x | RCL 03 | RCL 22 |
| RCL 01 | (1111111111) | | RCL 15 |) |) |
| x^2 | R/S | | - | STO 26 | α_b |
| : | | | RCL 22 | (| RCL 27 |
| 2 | <u>2nd Lbl D</u> | |) | RCL 03 | x^2 |
| + | STO 21 | "f _{max} " | x | : | x |
| RCL 08 | (| | RCL 03 | 2 | RCL 27 |
| x | CE | | x^2 |) | : |
| RCL 10 | x | | x | | 6 |
|) | 4 | | RCL 03 | <u>2nd Lbl E</u> | - |
| x | x | | : | STO 27 | RCL 15 |
| RCL 02 | RCL 20 | | 6 | (| z_2 |
| x^2 | : | | + | RCL 26 | RCL 01 |
| : | RCL 03 | | RCL 08 | x | x^2 |
| 2 |) | | x | RCL 27 | x |
| - | STO 22 | W.a | RCL 15 | - | RCL 27 |
| RCL 01 | | | x | ((| x^2 |
| x^2 | (| | RCL 10 | RCL 23 | : |
| x^2 | CE | | x | : | 4 |
| : | : | | RCL 03 | 12 | + |
| 24 | RCL 03 | | x^2 | - | RCL 15 |
|)) |) | | : | RCL 15 | x |
| STO 19 | STO 23 | W.b | 2 | : | RCL 01 |
| RCL 09 | | | + | 24 | x^2 |
| 2nd Fix 1 | <u>2nd Lbl x^2</u> | | RCL 18 |) | x |
| R/S | ((| | x | x | RCL 01 |
| 0 | RCL 23 | W.b | RCL 03 | RCL 27 | x |
| 1/x | x | | + | x^2 | RCL 27 |
| R/S | RCL 03 | | RCL 19 | x^2 | : |
| | x^2 | |) | + | 6 |
| <u>2nd 1bl EE</u> | x^2 | | : | (| - |
| 0 | : | | RCL 12 | RCL 16 | RCL 15 |
| | | | | | x |

```
RCL 01      2nd Fix 3
x2        R/S
x2        (22222222222)
:
```

```
24
)
:
```

```
RCL 12
))
2nd Fix 3
STO 28      f2
R/S
(9999999999)
R/S
```

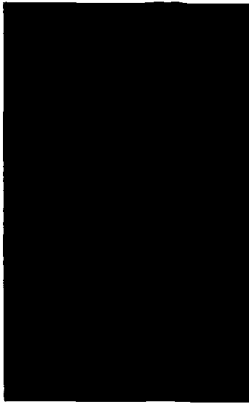
2nd Lbl 2nd E'

```
STO 29      z
(
CE
x
4
x
RCL 21      "fmax"
:
```

```
RCL 03
-
4
x
RCL 21
```

```
:
```

```
RCL 03
x2
x
RCL 29
x2
)
STO 30
```



Memorandum 528



60142011252