

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

Memorandum M-479

Impulsverliesmetingen achter twee-dimensionale
cilindermodellen
(vooronderzoek naar het effect van
grenslaagschotten)

E. Dobbinga

November 1987
Delft-Nederland

Samenvatting

Een van de standaard-proeven in het tweede jaars windtunnelpraktikum LA 206 is de meting van de weerstand van twee-dimensionale modellen door impulsverliesmetingen in de 40 x 40 cm meetplaats van de M-tunnel. De daartoe beschikbare modellen zijn betrekkelijk dik nl. 40 mm. De aanleiding tot het onderzoek is twijfel omtrent de geldigheid van resultaten uit metingen achter modellen van deze dikte met stompe achterkant waarachter sterke secundaire stromingen zullen optreden.

Het doel van het rapport is een enigszins ordelijke presentatie te geven van enkele verspreide notities en metingsresultaten als basis voor voorstellen met betrekking tot verder onderzoek en tot verbetering van de praktikumopstelling. Onder meer worden uit twee perioden afkomstige metingsresultaten gegeven over het effect van grenslaagschotten in combinatie met cilindrische modellen op de uit impulsmetingen verkregen waarden van de weerstandscoefficiënt.

Toepassing van grenslaagschotten van geschikte vorm en afmeting blijkt effectief te zijn; de indruk bestaat dat bij correcte uitvoering van de proef redelijk betrouwbare waarden van c_d kunnen worden verkregen zelfs indien modellen worden gebruikt met een dikte die gelijk is aan 0,1 maal de meetplaatsbreedte.

Het lijkt echter wenselijk bij modellen met een niet-slank profiel van een kleinere dikte uit te gaan.

Voordat verdere metingen worden uitgevoerd dient de meetopstelling die in de huidige vorm onbevredigend is, te worden verbeterd.

De meetplaats waarvan de wanden evenwijdig zijn moet zo te worden gewijzigd dat de druk in de meetlijn achter het model gelijk kan worden gemaakt aan de ongestoorde druk ver stroomopwaarts. Verder dient de model-bevestiging te worden herzien; in de huidige opstelling wordt de tunnelwandgrenslaag door de vrij in de stroming liggende bevestigingsstangen ontoelaatbaar sterk verstoord.

<u>Indeling</u> *)	<u>Blz.</u>
Samenvatting	1
Notaties	3
1. Inleiding	6
2. Over de bepaling van de weerstandscoefficiënt van twee-dimensionale modellen uit impulsverliesmetingen	8
2.1. De keuze van het controlevlak	8
2.2. Over secundaire stromingen	11
2.3. De uitwerking van de impulsvergelijking	13
2.4. Meditatie aan de hand van een rekenvoorbeeld: een potentiaalstroming om een twee-dimensionaal bron-putlichaam tussen evenwijdige wanden	17
3. Metingen	21
3.1. Algemeen	21
3.2. De metingen uit 1969	22
3.3. De metingen uit 1983	23
4. Resultaten van de impulsverliesmetingen	24
4.1. Cilindermodel C 4	24
4.2. Cilindermodel C 40	24
4.2.1. Het effect van grenslaagschotten	24
4.2.2. Over het effect van de keuze van E	25
4.2.3. Over het effect van a, de afstand tot de meetlijn 2 achter het model	26
4.2.4. Over de waarden van c_d	27
4.3. Het scherprandige model Borda 40	28
4.4. Diversen	28
5. Grenslaagmetingen	30
6. Conclusies	31
7. Voorstellen ter overweging	34
7.1. Verbetering van de meetplaats van de M-tunnel	34
7.2. Verbetering van de modelbevestiging	35
8. Literatuur	37
Tabellen 1 t/m 3	38 t/m 41
Figuren 1 t/m 17	42 t/m 58
Toevoegsel A: TI-59 programma 30-6-83	A1 t/m A5

*) Toevoegsels B t/m D met de beschrijving van de uitwerking van de metingen en de volledige tabellen met druk- en snelheidsverhoudingen zijn gebundeld tot een intern rapport LSW 87-3.

Notaties

- a afstand tussen de achterkant van het model en het meetvlak 2 achter
- a_s lengte van het achter het model uitstekende deel van een grenslaagschot
- a = $l/2$
- b = $d/2$ } alleen in toevoegsel A
- b_s breedte van een grenslaagschot
- B breedte van de controleruimte
- B_t breedte van de meetplaats (400 mm)
- C4, C40 resp. C70 cilindermodellen met $d = 4;40$ resp. 70 mm
- c_{do} , c_{d2} resp. c_{dm} weerstandscoefficiënt = $(F+F_{sec})/(d \cdot q_{kar})$
waarin $q_{kar} = q_o$; q_{2B} resp. q_m
- $c_{do(1)}$ zie vergel.(20); $c_{do(2)}$, $c_{do(2a)}$, $c_{do(2b)}$; zie vergel.(21)
 $c_{do(p)}$: zie par. 4.3.
- d dikte van het model
- D_s schijfdiameter
- E factor (zie par. 2.1)
- F weerstand van het model per lengte eenheid
- F_{sec} extra weerstandsbijdrage per lengte eenheid, die bij impulsverliesmetingen meegemeten wordt indien het effect van secundaire stromingen wordt verwaarloosd
- H hoogte van de controleruimte
- H_t hoogte van de meetplaats (400 mm)
- Δh grootte die als maat voor het effect van secundaire stromingen wordt gehanteerd = "effectieve dikte van de met een modeleind interfererende wandgrenslaag" (par. 2.2)
- I impulstransport; gerekend per lengte eenheid van het model; positief indien de materie het controlevlak verlaat met in x-richting wijzende snelheidscomponent;
- I_1 resp. $I_2 = I$ door het voorvlak 1 resp. het achtervlak 2
- I^* = I door de zijvlakken voor zover samenhangend met het verschil tussen de volumetransporten door voor- en achtervlak
- I_{sec} = I door de mantel van de controleruimte voor zover samenhangend met secundaire stromingen
- k bronsterkte van een bronlijn per lengte eenheid
- l afstand tussen bronlijn en putlijn

- "p", "p_t" indien symbolen tussen "" zijn geplaatst worden waarden bedoeld die wel voor manometerfouten zijn gecorrigeerd, maar niet voor fouten van de gebruikte drukmeetsonden
- p₀ referentie-rekengrootheid; nader te definiëren (bijv. het gemiddelde van p₁ in de beide uiteinden van meetlijn 1 bij y = -B/2 en +B/2))
- p_{to} referentie-rekengrootheid; nader te definiëren (bijv. het gemiddelde van p_{t1} in de beide uiteinden van meetlijn 1)
- p_{2B} referentie-rekengrootheid = het gemiddelde van de drukken p₂ in de uiteinden van meetlijn 2 (bij y = -B/2 en +B/2)
- p₁ en p₂ druk bij y = y in meetlijn 1 resp. 2
- p_{t1} en p_{t2} totale druk bij y = y in meetlijn 1 resp. 2
- p_{tg} totale druk ter plaatse van het grenslaagpitotbuisje
- p₅ resp. p_{t5} = p resp. p_t aangewezen door de standaardpitot-statische buis no. 5(1.V1.003.001.5)
- "p_{tR}" en "p_{sR}" aanwijzingen van de vaste pitot-statische regelbuis van de tunnel
- Δp_t zog = p_{to} - p_{t2}
- "Δp_R" regeldrukverschil; meestal = "q_r" = "p_{tR}" - "p_{sR}"
- q₀ = p_{to} - p₀ (ongestoorde dynamische druk bij definitie)
- q_{2B} = p_{to} - p_{2B}
- q_m = $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2$
- "q_R" = "p_{tR}" - "p_{sR}"
- Q₁ resp. Q₂ volumetransport door het voor= resp. achtervlak van het controlevlak per lengte-eenheid van het model
- Q_{sec} en Q_{eind} volumetransporten samenhangend met secundaire stromingen; zie par. 2.2
- R_d getal van Reynolds = V₀ · d / ν
- S_I en S_{II} hulpgrootheden; par. 2.3
- U de snelheid juist buiten de grenslaag
- u bij grenslaagmetingen: de snelheid in de grenslaag
bij impulsverliesmeting: de snelheid in meetlijn 2 (achter het model) bij y = y; berekend uit p_{t2} en p₂
- u_{res} resulterende x-component van V_{res}
- v_{res} resulterende y-component van V_{res}
- V₁ de snelheid in meetlijn 1 (voor het model) bij y = y; berekend uit p_{t1} en p₁
- V_{2B} rekengrootheid; berekend uit p_{to} en p_{2B}

V_o	$= \sqrt{2 \cdot q_o / \rho}$
V_x^*	effectief-gemiddelde x-component van de snelheid in de zijvlakken van het controlevlak; $V_x^* = V_o + E(V_{2B} - V_o)$
V_m	"snelheid ter plaatse van het model"; in dit rapport: $V_m = V_o + 0,75 (V_{2B} - V_o)$
V_{eff}	= snelheid ter plaatse van het bron-put model in het rekenvoorbeeld van par. 2.4.
x	coördinaat in stromingsrichting; positief in de richting van V_o ; gemeten vanaf de achterrand van het vaste meetplaatsdeel
x_1, x_2	= x van meetlijn 1 resp. meetlijn 2
x_o	= x van het midden van een bron-putlichaam
x_m	= x van het achtereind van het model
x_+	= x van de reeks bronlijnen
x_{st}	= x van het achterste stuwpunt van een bron-putlichaam
y	coördinaat in horizontale richting; gemeten ongeveer vanuit het midden van de meetplaats: positief naar links, met wind mee gezien
y_{af1}	aanwijzing van de stand van de verstelslede van de verschuifbare pitot-statische buis
" y_w "	= nominale waarde van de afstand tussen de achterwand van de meetplaats en de grenslaagpitotbuis
z	coördinaat in verticale richting; positief naar boven, gemeten vanuit het midden van de meetplaats
α	invalshoek
δ^*	verdringingsdikte van de grenslaag langs de meetplaatsachterwand
δ	dikte van de grenslaag langs de meetplaatsachterwand
ϕ_t	= $(p_t - "p_t") / q$ (coëfficiënt van de p_t fout van de meetsonde)
ϕ_s	= $(p_s - "p_s") / q$ (coëfficiënt van de p_s fout van de meetsonde).
ρ	luchtdichtheid
ν	kinematische viscositeit

1. Inleiding

Het onderzoek heeft betrekking op een van de opstellingen die voor het tweede jaars windtunnelpraktikum LA 206 beschikbaar zijn nl. die voor de bepaling van de weerstand van twee-dimensionale lichamen door middel van impulsverliesmetingen in de 40 x 40 cm M-tunnel. Voor deze proeven zijn een 50-tal modelelementen aanwezig. Modellen van zeer verschillende vorm kunnen worden verkregen door een passend aantal elementen achter elkaar te plaatsen. De bestaande opstelling waarbij de elementen op twee 10 mm dikke bevestigingsstangen kunnen worden geschoven maakt een snelle verwisseling van modellen mogelijk en is met succes gebruikt voor oriënterende metingen omtrent de invloed van de modelvorm op de weerstand, met name voor slank gestroomlijnde modellen. Aerodynamisch is de bestaande situatie echter niet bevredigend en wordt wijziging overwogen.

In dit opzicht kunnen drie wensen worden genoemd:

- 1e. verkleining van het effect van secundaire stromingen door toepassing van "schijven" (grenslaagschotten);
- 2e. vermindering van het drukverloop in stromingsrichting door toepassing van een passend divergerende meetplaats
- 3e. eliminering van de verstoring door de ophangdelen.

Het hierna beschreven onderzoek heeft vooral betrekking op het onder 1e. bedoelde effect. Secundaire stromingen ontstaan door interferentie van de grenslagen die zich langs de tunnelwanden ontwikkelen met de stroming om de tegen die wanden geplaatste einden van de modellen.

In de onderdrukgebieden naast of achter de modellen wordt grenslaaglucht van de wand af gezogen; de stroming om het model is daardoor niet zuiver twee-dimensionaal en de weerstand kan niet nauwkeurig worden afgeleid uit impulsverliesmetingen die slechts in het middenvlak van de meetplaats worden uitgevoerd. Bij lange dunne modellen kan dit storend effect mogelijk worden verwaarloosd; de meeste bestaande modellen zijn echter betrekkelijk dik nl. 40 mm bij een modellengte = meetplaatshoogte = 400 mm.

De indruk bestaat dat zelfs met zulke dikke modellen nog redelijk nauwkeurig kan worden gemeten indien de beschouwing beperkt blijft tot gestroomlijnde vormen onder invalshoek nul. Bij vleugelmodellen onder een invalshoek en zeker bij modellen met stompe achterkant is het effect van de secundaire stromingen geenszins verwaarloosbaar.

Bekend is dat dit effect kan worden verkleind door toepassing van grenslaagschotten.

Het doel van het onderzoek was meer gegevens over de werking van grenslaagschotten te verkrijgen en enig inzicht in de geldigheid van de uit impulsmetingen achter stompe modellen afgeleide weerstandscoefficienten als basis voor voorstellen tot verbetering van de meetopstelling. Daartoe zijn in de eerste plaats uit reeds in 1969 gemeten, maar toen niet uitgewerkte gegevens weerstandscoefficienten berekend voor enkele modellen met en zonder grenslaagschotten (serie 1969).

Verder zijn in 1983 enkele aanvullende metingen uitgevoerd aan een cilindermodel in combinatie met verschillende eindschijven (serie 1983).

De uitwerking heeft plaats gevonden volgens de methode die in par. 2 wordt beschreven. Op de metingen en de resultaten wordt in de paragrafen 3 en 4 ingegaan.

2. Over de bepaling van de weerstandscoefficiënt van twee-dimensionale modellen uit impulsverliesmetingen

2.1. De keuze van het controlevlak

Onder impulsverliesmetingen wordt een type onderzoek verstaan waarbij alleen in een meetplaatsdoorsnede 1 (ver) stroomopwaarts van het model en in een meetplaatsdoorsnede 2 achter het model drukmetingen (eventueel in combinatie met directe snelheidsmetingen) worden uitgevoerd met het doel daaruit de weerstand van het model te berekenen.

Bij (quasi-) twee-dimensionale situaties wordt bij de toepassing van de impulswet een controleruimte gebruikt die wordt ingesloten door de volgende elementen van het controlevlak:

een "voorvlak" of "kopvlak" 1 en een "achtervlak" 2 loodrecht op de windrichting op enige afstand voor resp. achter het model

twee "dwarsvlakken", loodrecht op de beschrijvende lijnen van het model; (loodrecht op de z-as);

twee "zijwanden", gaande door twee lijnen van het voorvlak die evenwijdig zijn aan de beschrijvende lijnen van het model:

hierbij kunnen nog twee mogelijkheden worden onderscheiden:

a. de zijwanden liggen langs stroomvlakken en zijn gekromd;

b. de zijwanden zijn platte vlakken evenwijdig aan de tunnelhartlijn; in dat geval wordt de naam "zijvlakken" gebruikt.

De combinatie van dwarsvlakken en zijvlakken wordt met "de mantel" aangeduid.

Metingen vinden slechts plaats in het voor- en het achtervlak. Over eventuele secundaire stromingen in z-richting wordt daaruit geen informatie verkregen. Dergelijke metingen kunnen dan ook alleen dan met succes worden toegepast indien ervoor kan worden gezorgd dat het effect van secundaire dwarsstromingen verwaarloosbaar klein is zodat de stroming in het controlevlak praktisch twee-dimensionaal is.

In een ideaal twee-dimensionaal geval is de plaats van de dwarsvlakken niet van belang; is het model bovendien in een zeer uitgebreide parallelstroming

geplaatst dan lijkt het aantrekkelijk het controlevlak zo ruim te kiezen dat in alle punten van het voorvlak, het achtervlak en de zijwanden de druk gelijk is aan de druk in het ongestoorde stromingsdeel; de zijwanden kunnen in dat geval zonder bezwaar langs stroomvlakken worden gelegd.

Bij metingen in een windtunnel doet zich dit geval niet voor; de dikte van de gebruikte modellen is vrijwel nooit zeer klein ten opzichte van de wijde van de meetplaats en de druk wordt vrijwel overal in de meetplaats door de aanwezigheid van het model beïnvloed.

Stroomlijnen waarlangs de druk constant is zijn niet aanwezig; bij de definitie van het controlevlak wordt dan ook uitgegaan van de onder b. genoemde mogelijkheid: de controleruimte is aan de zijanten afgesloten door vlakke zijvlakken evenwijdig aan de tunnelhartlijn op een afstand B uit elkaar. Hierdoor wordt het voordeel bereikt dat de niet bekende drukkrachten op die vlakken geen resultante hebben in de richting van de tunnelhartlijn. Indien ervoor wordt gezorgd dat de zijvlakken van het controlevlak buiten de grenslagen van de meetplaatswanden worden gehouden en zich voldoende ver van het model bevinden kan worden aangenomen dat ook de schuifkrachten op de zijvlakken nul zijn.

In dat geval kan de impulswet worden gebruikt in de eenvoudige tweedimensionale vorm:

$$\int_B (p_1 - p_2) dy - F = \Sigma I = I_{\text{voor}} + I_{\text{achter}} + I_{\text{zijvlakken}} \quad (1)$$

hierin is B de breedte van het controlevlak (in y-richting)

F = de modelweerstand per eenheid van modellenlengte

I de som van de door voorvlak, achtervlak en zijvlakken tredende impulstransporten; positief gerekend indien materie die het controlevlak verlaat een in +x richting wijzende snelheidscomponent heeft; I gerekend per eenheid modellenlengte.

Alleen p_1 , p_2 , I_{voor} en I_{achter} kunnen uit de metingen direct worden afgeleid. Aangezien de zijvlakken geen stroomvlakken zijn moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid (de waarschijnlijkheid) dat ook door de zijvlakken een resulterend impulstransport-in-x-richting zal plaats vinden waarvan de grootte bij de berekening van F mede in de beschouwing moet worden betrokken.

Nu is $I_{\text{zijvlakken}}$ niet bekend. Een nauwkeurige bepaling van dit impulstransport zou, indien hij al mogelijk was, de meting zo tijdrovend maken dat het voordeel van een impulsverliesmeting boven een meer directe meting van F , die overigens ook niet zo eenvoudig is, geheel verloren zou gaan. Met betrekking tot $I_{\text{zijvlakken}}$ moet daarom met een schatting worden volstaan. Het enige wat in dit verband met zekerheid bekend is (althans voor zover de stroming werkelijk twee-dimensionaal is, hetgeen hier wordt verondersteld) is het resulterende volumetransport Q^* door de zijvlakken.

Toepassing van continuïteitswet leert:

$$Q^* = \int_B V_1 \cdot dy - \int_B u \cdot dy \quad (2)$$

Hierin is Q^* het totale resulterende volumetransport door de beide op onderlinge afstand B gelegen zijvlakken van het controlevlak, gerekend per eenheid van modellengte; Q^* is hierin positief gerekend indien het transport van binnen naar buiten plaats vindt.

Helaas kan niet precies worden aangegeven welk impulstransport hiermee gepaard gaat. Het is bijv. mogelijk dat Q^* het resultaat is van een uitstroming voor het model en een instroming stroomafwaarts van het model; zolang noch het verloop van de y -componenten, noch dat van de x -componenten van de snelheid langs de zijvlakken bekend is kan de waarde van het impuls transport door de zijvlakken niet worden aangegeven.

Een enigszins betrouwbare schatting daarvan kan alleen worden gemaakt indien de x -component van de snelheid ter plaatse van de zijvlakken niet te zeer en zeker niet op onregelmatige wijze in x -richting verloopt.

In dat opzicht is het gunstig ervoor te zorgen:

- 1e. dat V_{2B} de waarde van de snelheid buiten het zog in doorsnede 2, niet te veel van V_0 voor het model verschilt;
- 2e. dat de breedte B niet te klein is zodat de zijvlakken ver van het model verwijderd zijn (uiteraard moet hiermee niet zover worden gegaan dat bij het integreren over een te breed gebied de meetfouten een te grote invloed krijgen).

Indien aan deze voorwaarden is voldaan kan $I_{\text{zijvlakken}}$ gelijk worden gesteld aan I^* waarvoor geldt:

$$I^* = \rho \cdot Q^* \cdot V_x^* \quad (3)$$

waarbij voor V_x^* , de met betrekking tot I^* effectieve gemiddelde x-component van de snelheid in een zijvlak, wordt geschreven:

$$V_x^* = V_0 + E(V_{2B} - V_0) \quad (3a)$$

Gehoopt kan worden dat de factor E ergens tussen 0 en 1 zal liggen.

Uit (2), (3) en (3a) volgt:

$$I^* = \rho \cdot \left[\int_B V_1 \cdot dy - \int_B u \cdot dy \right] \cdot [V_0 + E(V_{2B} - V_0)] \quad (4)$$

2.2. Over secundaire stromingen

Helaas is in een windtunnel, zelfs wanneer het model perfect twee-dimensionaal is, de stroming die zich daaromheen ontwikkelt nooit zuiver twee-dimensionaal. Er treden secundaire stromingen op, vooral als gevolg van de interferentie van de tegen de wand aanliggende modeleinden met de grenslaag die zich langs de meetplaatswand vormt.

Zo zal in overdruk gebieden een grenslaagstroming naar buiten ontstaan; overheersend echter is het effect van de onderdrukgebieden, bijv. achter lichamen met stompe achterkant. In die gebieden zal een secundaire stroming ontstaan die vanaf de meetplaatswanden langs het model naar het midden van de tunnel is gericht. Daarbij treedt door de loodrecht op het model staande "dwarsvlakken" van het controlevlak een volumetransport van buiten naar binnen op.

De door die dwarsvlakken binnentredende materie die bij dat binnentreden slechts een kleine snelheidscomponent in x-richting heeft zal elders het controlevlak weer verlaten en op dat moment een snelheidscomponent in x-richting hebben die vrijwel gelijk is aan de ongestoorde snelheid V_0 .

Deze secundaire stroming heeft een extra positieve bijdrage in I tot gevolg die niet in (1) tot uitdrukking komt.

Voor de situatie in de tunnel wordt in plaats van met (1) gewerkt met:

$$\int_B (p_2 - p_1) dy - F = I_{\text{voor}} + I_{\text{achter}} + I^* + I_{\text{sec}} \quad (5)$$

hierin is I^* dezelfde grootte als in (4)

I_{sec} is een correctieterm voor secundaire stroming gerekend per meter modellengte.

De waarde van I_{sec} kan uit metingen worden afgeleid door de met (5) uit impulsverliesmetingen bepaalde waarde van $F + I_{sec}$ te vergelijken met de waarde van F zelf die met een andere geschikte meetmethode is gemeten. In dit verband kan worden gedacht aan metingen aan gladde cilindrische modellen waarvoor de waarde van de weerstandscoefficiënt bekend is en een meting aan een scherprandig Borda model waarvan de weerstand ook uit directe drukmetingen op het oppervlak kan worden afgeleid; hiervoor wordt verder ook naar par. 4.4 verwezen. Omdat een bepaalde waarde van I_{sec} op zichzelf niet veel zegt is gepoogd hem te herleiden naar een andere grootheid die wel tot de verbeelding spreekt.

Bij gebrek aan kennis omtrent de secundaire verschijnselen wordt bij de verdere omschrijving volstaan met een gedachtenspel:

Op grond van de gedachte dat het secundaire volumetransport met een snelheidscomponent 0 in x-richting binnenkomt en met snelheid V_0 het controlevlak weer verlaat kan een relatie tussen het volumetransport en I_{sec} worden aangegeven:

$$I_{sec} = \rho \cdot Q_{sec} (V_0 - 0) \quad \text{of} \quad Q_{sec} = \frac{I_{sec}}{\rho \cdot V_0} \quad (6)$$

Hierin is Q_{sec} het volumetransport dat door de op een afstand van 1 eenheid modellengte van elkaar gelegen dwarsvlakken binnentreedt.

Indien wordt aangenomen dat het volumetransport door de dwarsvlakken evenredig is met de afstand H tussen die vlakken zou mogen worden geconcludeerd dat ter plaatse van elk van de einden van het model een volumetransport Q_{eind} optreedt waarvan de waarde volgt uit:

$$Q_{eind} = \frac{\frac{1}{2} \cdot H_t \cdot I_{sec}}{\rho \cdot V_0} \quad (7)$$

Teneinde de waarde van Q_{eind} aanschouwelijk te maken wordt verder nog geschreven:

$$Q_{eind} = \Delta h \cdot d \cdot V_0 \quad (8)$$

Met enige fantasie zou Δh kunnen worden opgevat als de lengte van dat deel van een modeleind dat direct door de wandgrenslaag wordt beïnvloed.

Met (7) en (8) kan de waarde van Δh worden afgeleid uit:

$$\Delta h = \frac{H_t \cdot I_{\text{sec}}}{4 \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot V_0^2 \cdot d} \quad (9)$$

2.3. De uitwerking van de impulsvergelijking

Indien de meetlijnen 1 en 2 zo ver van het model liggen dat mag worden aangenomen dat de uit de metingen afgeleide waarden van V_1 en u gelijk zijn aan de componenten ervan in de richting van de hartlijn dan kan voor I_{voor} worden geschreven $\int V_1^2 \cdot dy$ en kan I_{achter} gelijk worden gesteld aan $\int \rho u^2 \cdot dy$. *)

Hiermee, en na invoering van (4) en (3a) kan voor (5) worden geschreven:

$$\int_B (p_2 - p_1) \cdot dy - F = \rho \int_B u^2 \cdot dy - \rho \int_B V_1^2 \cdot dy + \rho \cdot V_x^* \left[\int_B V_1 \cdot dy - \int_B u \cdot dy \right] + I_{\text{sec}} \quad (10)$$

of ook:

$$F + I_{\text{sec}} = \underbrace{\int_B (p_1 - p_2 - \rho u^2 + \rho V_1^2) \cdot dy}_{F_a} - \underbrace{\rho \cdot V_x^* \cdot \int_B (V_1 - u) \cdot dy}_{F_b} \quad (11)$$

Bij de herleiding van (11) tot een vorm die voor de uitwerking van metingen in windtunnel geschikt is worden enkele referentie-rekengrootheden ingevoerd, nl.

- de ongestoorde totale druk p_{t0} t.p.v. meetlijn 1
- de ongestoorde statische druk p_0 t.p.v. meetlijn 1
- de ongestoorde dynamische druk $q_0 = p_{t0} - p_0$
- de "statische druk p_{2B} buiten het zog in meetlijn 2" achter het model
- en de "snelheid V_{2B} buiten het zog in meetlijn 2"

Omdat noch p_{t1} noch p_1 in alle punten van meetlijn 1 precies gelijke waarde hebben en omdat de druk aan weerszijden van het zog evenmin gelijk is kunnen de bovenbedoelde grootheden op verschillende manieren worden gedefinieerd.

Aanbevolen worden de volgende definities:

*) Normaal is de hierdoor gemaakte fout verwaarloosbaar klein; een toelichting daarop is in par. 2.4 gegeven.

- p_{to} = het gemiddelde van p_{t1} in de beide uiteinden van meetlijn 1, dat wil zeggen bij $y = -B/2$ en $y = +B/2$
 p_o = het gemiddelde van p_1 in de beide uiteinden van meetlijn 1
 q_o = $p_{to} - p_o$
 p_{2B} = het gemiddelde van de drukken p_2 in de uiteinden van meetlijn 2, dat wil zeggen bij $y = -B/2$ en $y = +B/2$
 V_{2B} = $\frac{2}{\rho} (p_{to} - p_{2B})$

Het deel F_a van (11) kan worden herleid tot:

$$F_a = \int (p_{t1} - \frac{1}{2}\rho V_1^2 - p_{t2} + \frac{1}{2}\rho u^2 - \rho u^2 + \rho V_1^2) dy =$$

$$\int [(p_{t1} - p_{to}) + (p_{to} - p_{t2}) - \frac{1}{2}\rho u^2 + \frac{1}{2}\rho V_1^2] dy \quad (12)$$

Hierin wordt ingevoerd: $p_{to} - p_{t2} = \Delta p_t$ zog (13)

$$\text{en: } u = V_{2B} - \Delta u \quad (14)$$

Daarmee volgt uit (12):

$$F_a = \int_B [(p_{t1} - p_{to}) + \Delta p_t \text{ zog} - \frac{1}{2}\rho \cdot V_{2B}^2 + \rho \cdot V_{2B} \cdot \Delta u - \frac{1}{2}\rho \cdot (\Delta u)^2 + \frac{1}{2}\rho \cdot V_1^2] dy \quad (15)$$

Voor het deel F_b van (11) kan na invoering van (14) ook worden geschreven:

$$F_b = \int_B [\rho \cdot V_x^* \cdot (V_{2B} - V_o) - \rho \cdot V_x^* \cdot \Delta u + \rho \cdot V_x^* \cdot (V_o - V_1)] \cdot dy \quad (16)$$

Sommering van (15) en (16) leidt met (11) tot:

$$F + I_{sec} = F_{(1)} + F_{(2)} \quad (17)$$

waarin:

$$F_{(1)} = \int [(p_{t1} - p_{to}) + \rho \cdot V_x^* \cdot (V_o - V_1) + \frac{1}{2}\rho \cdot (V_1^2 - V_o^2)] dy \quad (17a)$$

en

$$F_{(2)} = \int [\Delta p_t \text{ zog} - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\Delta u)^2 + \rho \cdot (V_{2B} - V_x^*) \cdot \Delta u] dy +$$

$$+ [\rho \cdot V_x^* \cdot (V_{2B} - V_o) - \frac{1}{2} \cdot \rho (V_{2B}^2 - V_o^2)] \cdot B$$

(17b)

De weerstandscoefficiënt betrokken op het frontoppervlak van het model en op de "ongestoorde dynamische druk" $q_o (= p_{to} - p_o)$ is:

$$c_{do} = \frac{F+I}{d \cdot q_o} \text{ of met (9)} \quad c_{do} = \frac{F}{d \cdot q_o} + \frac{4 \cdot \Delta h}{H_t} \quad (18)$$

De weerstandscoefficiënt c_{do} wordt bij de uitwerking van metingen opgevat als de som van een deel dat vooral met de toestand in meetlijn 1 samenhangt en een deel dat vooral betrekking heeft op meetlijn 2 achter het model:

$$c_{do} = c_{do(1)} + c_{do(2)}$$

waarin:

$$c_{do(1)} = \frac{F(1)}{d \cdot q_o} \quad c_{do(2)} = \frac{F(2)}{d \cdot q_o} \quad (19)$$

Met (17) volgt:

$$c_{do(1)} = \frac{1}{d} \left\{ - \int_B \frac{p_{to} - p_{t1}}{q_o} \cdot dy + \int_B \frac{q_1}{q_o} \cdot dy - B + 2 \cdot \frac{V_x^*}{V_o} \left[B - \int_B \frac{V_1}{V_o} \cdot dy \right] \right\} \quad (20)$$

dit wordt ook geschreven als:

$$c_{do(1)} = \frac{1}{d} \cdot [S_I + S_{II} \cdot V_x^* / V_o] \quad (20a)$$

waarin

$$S_I = - \int_B \frac{p_{to} - p_{t1}}{q_o} \cdot dy + \int_B \left[\frac{V_1}{V_o} \right]^2 \cdot dy - B \quad (20b)$$

$$S_{II} = 2 \left[B - \int_B \frac{V_1}{V_0} .dy \right] \quad (20c)$$

$$c_{do(2)} = c_{do(2a)} + c_{do(2b)} =$$

$$\frac{1}{d} \left[\int_B \frac{\Delta p_t \text{ zog}}{q_0} .dy - \int_B \left[\frac{\Delta u}{V_0} \right]^2 .dy + 2 \left\{ \frac{V_{2B}}{V_0} - \frac{V_x^*}{V_0} \right\} \int_B \frac{\Delta u}{V_0} .dy \right] +$$

$$c_{do(2a)}$$

$$+ \frac{B}{d} \left[\left\{ \frac{V_{2B}}{V_0} - 1 \right\}^2 . (2E-1) \right] \quad (21)$$

$$c_{do(2b)}$$

hierin is

$$\frac{V_x^*}{V_0} = 1 + E \left(\frac{V_{2B}}{V_0} - 1 \right) \quad (22) = (3a)$$

Met betrekking tot het deel $c_{do(1)}$ kan worden opgemerkt dat dit gelijk nul wordt in het ideale geval dat p_{t1} in alle punten van meetlijn 1 gelijk is aan p_{to} en de druk p_1 in alle punten gelijk is aan p_0 .

Men zou verwachten dat $c_{do(2)}$ gelijk 0 zou worden wanneer zowel $\Delta p_t \text{ zog}$ als Δu in alle punten van meetlijn 2 nul zou zijn. Uit (21) volgt echter dat in dat geval een waarde overblijft nl.:

$$\frac{B}{d} \cdot \left\{ \frac{V_{2B}}{V_0} - 1 \right\}^2 \cdot (2E-1) \quad (23)$$

Men zou kunnen vermoeden dat deze term gelijk zou zijn aan de coëfficiënt van de "buoyancy-weerstand"; opgemerkt moet echter worden dat het niet mogelijk is uit metingen in de lijnen 1 en 2 af te leiden welke waarde daartoe aan E zou moeten worden toegekend.

Het is aanbevelenswaardig deze term nul te doen zijn door de opstelling zo te maken dat V_{2B} gelijk is aan V_0 , in welk geval ook V_x^* gelijk wordt aan V_0 .

In dat geval blijft van (21) slechts over:

$$c_{do(2)}(V_{2B}=V_0) = \frac{1}{d} \left[\int_B \frac{\Delta p_t \text{ zog}}{q_0} \cdot dy - \int_B \left(\frac{\Delta u}{V_0} \right)^2 \cdot dy \right] \quad (24)$$

Het is niet juist uit het feit dat de vorm in (23) ook nul wordt voor $E = 0,5$ af te leiden dat ook in vergelijking (21) voor gevallen met wrijvingsweerstand voor E de waarde $0,5$ zou mogen worden ingevoerd. E blijft een onzekere factor.

2.4. Meditatie aan de hand van een rekenvoorbeeld: een potentiaalstroming om een twee-dimensionaal bron-putlichaam tussen evenwijdige wanden

Nog afgezien van gewone meetfouten en het effect van secundaire stromingen bestaat in tweeërlei opzicht enige twijfel aan de juistheid van de met de besproken meetmethode te verkrijgen uitkomsten:

- 1e. Bij de formulering van vergelijking (11) is het impulstransport door het meetvlak 2 gelijk gesteld aan $\int u \cdot dy$ per eenheid van modellengte. Dit is alleen geheel correct als u in elk punt loodrecht op het achtervlak van de controleruimte staat. Op grote afstand achter het model zullen cosinusfouten wel verwaarloosbaar zijn. Bij meting dicht achter het model zal dit niet het geval zijn.
- 2e. In de tweede plaats is de rol van de factor E in formule (3a) verre van duidelijk vooral wanneer V_{2B} sterk verschilt van V_0 . Uit metingen is gebleken dat variatie van E tussen 0 en 1 in sommige gevallen een forse verandering van de berekende waarde van c_d tot gevolg heeft.
Op het eerste gezicht is het verder ook niet prettig dat in (21) een term voorkomt (de laatste) die niet naar nul gaat wanneer $\Delta p_t \text{ zog}$ en Δu wel tot nul naderen. In die term komt de gekozen breedte B van het controlevlak als factor voor.
- 3e. In verband met het voorgaande doet zich dus de vraag voor in hoeverre de keus van B de uitkomsten beïnvloed.

Hoewel het niet mogelijk is daarmee een algemeen geldig antwoord op die vragen te verkrijgen leek het nuttig een enkele geïdealiseerde situatie te bezien waarvoor wel exacte uitkomsten bekend zijn.

Als zodanig is gekozen een potentiaalstroming om een twee-dimensionaal bron-put lichaam dat midden tussen twee evenwijdige vlakke wanden op onderlinge afstand B_t is geplaatst. De beschouwde situatie is onder tabel 3 geschetst.

Het "lichaam" wordt slechts door een enkele bronlijn en een enkele putlijn gevormd (met bronsterkte k per lengte eenheid).

Het resulterende veld wordt opgevat als een combinatie van een parallelstroming met snelheid V_0 en het veld van de oneindige reeksen bron- en putlijnen die door spiegeling ten opzichte van de wanden worden verkregen.

De weerstand van een dergelijk bron-put lichaam is uiteraard nul.

Uit een impulsbeschouwing tussen de doorsneden 0 (ver stroomopwaarts) en 2 op een afstand $x_2 - x_{st} = a$ achter het lichaam volgt voor de "weerstand" F van het model per lengte eenheid exact:

$$\int_B (p_0 - p_2) \cdot dy - F = \int_{B_t} \rho \cdot V_2 \cdot \cos \theta [V_2 \cdot \cos \theta - V_0] \cdot dy \quad (25)$$

Hierin moeten de integraties over de gehele meetplaatsbreedte worden uitgevoerd.

De hoek θ is de hoek tussen V_2 en de richting van V_0 .

Herleiding met Bernoulli: $p_0 - p_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho (V_2^2 - V_0^2)$ leidt tot de vorm:

$$c_d = \frac{F}{d \cdot q} = \int_0^{B_t} \frac{1}{d/2} \left\{ \left(\frac{V_2}{V_0} \right)^2 - 1 + 2 \cdot \frac{u_{res}}{V_0} \left(1 - \frac{u_{res}}{V_0} \right) \right\} \cdot dy \quad (26)$$

hierin is d de maximale dikte van het verdringingslichaam.

Bij de uitvoering van impulsverliesmetingen in de windtunnel wordt de snelheid V_2 uit drukmetingen afgeleid en is de richting ervan meestal niet bekend. Meestal wordt dan aangenomen dat θ zo klein is dat mag worden aangenomen dat V_2 in de richting van de tunnelhartlijn werkt. Indien $\cos \theta = 1$ wordt gesteld gaat (26) over in de benaderingsvorm:

$$c_d = \int_0^{B_t} \left\{ - \frac{1}{d/2} \cdot \left[\frac{V_2}{V_0} - 1 \right]^2 \right\} \cdot dy \quad (27)$$

Uit (27) kan een met (21) vergelijkbare vorm worden verkregen door voor V_2 in te voeren: $V_{2B} - \Delta u$ waarbij V_{2B} de waarde van V_2 is bij $y = B/2$.

Na enige herleiding volgt uit (27):

$$c_d = \frac{1}{b} \left[- \int_0^{B_t/2} \left(\frac{\Delta u}{V_0} \right)^2 \cdot dy + 2 \left[\frac{V_{2B}}{V_0} - 1 \right] \cdot \int_0^{B_t/2} \frac{\Delta u}{V_0} \cdot dy \right] - \frac{B_t}{2 \cdot b} \cdot \left[\frac{V_{2B}}{V_0} - 1 \right]^2 \quad (27a)$$

Deze vorm komt geheel overeen met de laatste drie termen van (21) indien tenminste de daarin voorkomende factor E gelijk nul wordt genomen.

Dit behoeft overigens nog niet te betekenen dat E ook nul zou mogen worden genomen bij werkelijke impulsmetingen achter een lichaam met van nul verschillende weerstand en bij gebruik van een controlevlak dat smaller is dan de meetplaatsbreedte.

De waarde van de integraal in (27) is altijd negatief; het blijkt dus dat bij verwaarlozing van de richtingsafwijking van de snelheden in meetlijn 2 uit de metingen steeds een negatieve weerstand zal worden verkregen terwijl in het nu beschouwde geval de werkelijke weerstand uiteraard nul is.

Ter oriëntering is de grootte van de daardoor gemaakte fout in de verkregen waarde van c_d berekend voor een potentiaalstroming om een in een meetplaats met breedte B_t geplaatst twee-dimensionaal broon-put lichaam,

De afmetingen van de beschouwde situatie zijn de volgende:

$$B_t = \text{meetplaatsbreedte} = 400 \text{ mm}$$

$$d = \text{modeldikte} = 40 \text{ mm}$$

$$l = \text{afstand tussen bronlijn en putlijn} = 20 \text{ mm.}$$

Het achterste stuwpunt bleek daarbij op 23,051969 mm achter het midden van het model te liggen.

Vier posities van het meetvlak 2 zijn beschouwd: $a = 10^{-6}$ mm; 20 mm, 50 mm en 100 mm.

De uitkomsten van de berekening zijn in tabel 3 gegeven.

Bij integratie over de gehele tunnelbreedte blijkt (27) een fout in c_d op te leveren van resp. -0,2155; -0,0459; -0,0088 en -0,0013.

Bij normaal gebruikelijke meetafstanden a (meer dan 100 mm) is de fout verwaarloosbaar. Slechts bij onpraktisch kleine waarden van a wordt een aanzienlijke fout gemaakt.

Opgemerkt kan worden dat ook bij gebruik van de exacte formule (26) een fout ontstaat indien de integratie niet over de gehele meetplaatsbreedte wordt uitgevoerd; bij $a = 20$ mm en integratie tot $y = 20$ mm is de fout blijkbaar -0,0264 in c_d (tabel 3). Uit het feit dat de invloed van de breedte van het integratiegebied bij de hier beschouwde potentiaalstroming verdwijnt als a groot genoeg wordt gemaakt kunnen geen gevolgtrekkingen worden gemaakt met betrekking tot werkelijke impulsverliesmetingen in een windtunnel; het integratiegebied moet daarbij uiteraard groter zijn dan de breedte van het zog ter plaatse.

Bij de berekening is gebruik gemaakt van de volgende betrekkingen: *)

Voor de relatie tussen de bronsterkte k en de afmetingen d (modeldikte) en ℓ (de afstand tussen bronlijn en putlijn):

$$\frac{k}{V_o \cdot B_t} = \frac{\pi(d/2)/B_t}{0,5 - \frac{1}{\pi} \cdot b_g \operatorname{tg} [\operatorname{tg}\{\pi(d/2)/B_t\} : \operatorname{tgh}\{\pi(\ell/2)/B_t\}]} \quad (28)$$

Voor de x -component u_+ van de snelheid in een punt x, y opgewekt door een oneindige reeks bronlijnen:

$$\frac{u_+}{V_o} = \frac{k}{2 \cdot B_t \cdot V_o} \frac{\sinh \frac{\pi(x-x_+)}{B_t} \cdot \cosh \frac{\pi(x-x_+)}{B_t}}{\sin^2 \frac{\pi y}{B_t} + \sin^2 \frac{\pi(x-x_+)}{B_t}} \quad (29)$$

hierin is x_+ de x -coördinaat van de bronlijnen.

Voor de y -component v_+ van de snelheid in een punt x, y opgewekt door een oneindige reeks bronlijnen:

$$\frac{v_+}{V_o} = \frac{k}{2 \cdot B_t \cdot V_o} \cdot \frac{\sin \frac{\pi y}{B_t} \cdot \cos \frac{\pi y}{B_t}}{\sin^2 \frac{\pi y}{B_t} + \sinh^2 \frac{\pi(x-x_+)}{B_t}} \quad (30)$$

$$\text{Resultierend: } u_{\text{res}} = V_o + u_+ \text{ (door bronnen)} + u_- \text{ (door putten)} \quad (31a)$$

$$v_{\text{res}} = v_+ \text{ (door bronnen)} + v_- \text{ (door putten)} \quad (31b)$$

$$V_2 = u_{\text{res}}^2 + v_{\text{res}}^2 \quad ; \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{v_{\text{res}}}{u_{\text{res}}} \quad (31c)$$

Voor de "effectieve snelheid ter plaatse van het model" groter dan V_o als gevolg van tunnelwandinvloed is voor het 40 mm dikke model berekend:

$$V_{\text{eff}} = 1,0089 \cdot V_o.$$

(Voor een model met $d = 70$ mm en $\ell = 20$ mm zou gelden: $V_{\text{eff}} = 1,0265 V_o$.)

*) Het rekenprogramma is opgenomen in toevoegsel A.

3. Metingen

3.1. Algemeen

In het rapport worden resultaten van twee series in de 40 x 40 cm meetplaats van de M-tunnel uitgevoerde metingen beschouwd: een uit 1969 en een uit 1983. De gebruikte modellen waren verticaal tussen de vloer en het plafond van de meetplaats opgesteld. Een indruk van de opstelling kan uit de schema's van fig. 2 worden verkregen.

Met behulp van een verschuifbare pitot-statische buis met doorlopende steel kon het verloop van de totale- en de statische druk worden gemeten langs horizontale lijnen ter hoogte van het midden van de meetplaats.

In alle gevallen werden metingen uitgevoerd langs een lijn 2 op een afstand a stroomafwaarts van het achterste punt van het model. In enkele gevallen werd ook gemeten langs een lijn 1 stroomopwaarts van het model.

Ter vermindering van het effect van de uit de wandgrenslaag voortkomende secundaire stromingen werden de modellen in vele gevallen voorzien van horizontale grenslaagschotten die op enige afstand (30 a 50 mm) van de tunnelwanden werden aangebracht.

Schotten met een breedte gelijk aan de meetplaatsbreedte worden hierna "platen" genoemd; smallere lange schotten worden met "stroken" aangeduid; schotten met geringere afmetingen worden "schijven" genoemd.

De schuivende meetbuis is tijdens de serie 1983 geijkt tegen de als standaard gehanteerde pitot-statische buis no. 1.VI.003.001.5.

De gedetailleerde beschrijving van de verwerking van de metingen tot gecorrigeerde drukcoëfficiënten, de volledige tabellen met druk- en snelheidsverhoudingen en de rekenprogramma's zijn niet in het rapport opgenomen; zij zijn gebundeld in het interne rapport LSW 87-3.

Bij de berekening van c_{do} is gebruik gemaakt van de vergelijkingen (20) en (21). De weerstandscoefficiënt betrokken op de dynamische druk q_{2B} in meetlijn 2 naast het zog is verkregen door c_{do} te delen door q_{2B}/q_o .

Bij voorkeur zou men een coëfficiënt willen vormen die betrokken is op de "effectieve snelheid ter plaatse van het model". Mede als gevolg van het grote verschil tussen V_o en V_{2B} bij de besproken metingen is het niet duidelijk welke waarde voor V_{eff} zou moeten worden gekozen.

Bij gebrek aan beter zijn de uitkomsten ook gegeven in de vorm van een coëfficiënt c_{dm} die betrokken is op een "gemiddelde snelheid"
 $V_m = V_o + 0,75 (V_{2B} - V_o)$.

3.2. Metingsserie 1969

In 1969 bevond de M-tunnel zich in de oorspronkelijke toestand als rondloopkanaal; gemeten werd bij een windsnelheid van ongeveer 23 m/sec.

Een overzicht van de beschouwde modelconfiguraties en van de verkregen resultaten is in tabel 1 gegeven. Gemeten werd achter houten cirkelcilinders, de modellen C 40 en C 70 (met resp. 40 en 70 mm diameter).

Schetsen van de toegepaste grenslaagschotten zijn in de figuren 8 en 9 gegeven.

Voorts werd gemeten achter een scherprandig model "Borda 40"; voor de vorm van dat model kan naar fig. 12 worden verwezen. Dit model was aan de voor- en achterkant voorzien van enkele drukmeetgaatjes. Uit het drukverschil tussen de voor- en achterkant kan een weerstand worden afgeleid die als controle van de uit de impulsverliesmetingen afgeleide weerstand kan worden benut.

De stroming in de tunnel was in 1969 niet bijzonder gelijkmatig: als gevolg daarvan was de uit vergelijking (20) volgende bijdrage $c_{do(1)}$ vrij groot: ongeveer -0,07 voor een 40 mm dik model. De nauwkeurigheid van de verkregen waarden voor c_d is in verband daarmee niet bijzonder groot, maar vermoedelijk wel voldoende voor een eerste beoordeling van het effect van grenslaagschotten.

3.3. Metingsserie 1983

Bij de metingen van 1983 was het bochtstuk achter de meetplaats gedemon- teerd. In de plaats daarvan bevond zich een 500 mm lange verlengstuk achter de meetplaats; de windstraal blies achter dit verlengstuk vrij in de atmos- feer uit.

Evenals bij de metingen 1969 zijn de x-coördinaten gemeten vanuit de achterrand van het vaste meetplaatsdeel zonder verlengstuk.

Gemeten werd bij een windsnelheid van ongeveer 10 m/sec.

Een schets van de opstelling is in fig. 2 gegeven. Tabel 2 geeft een over- zicht van die modelconfiguraties waarachter volledige series drukmetingen zijn uitgevoerd.

Gemeten werd in hoofdzaak achter het houten cilindermodel C 40 dat ook in 1969 is gebruikt. Het oppervlak was in 1983 evenwel minder glad dan in 1969; bovendien waren, om een goede bevestiging van grenslaagschijven mogelijk te maken de einden van model C 40 voor de serie 1983 over een lengte van 35 mm rechthoekig afgewerkt (zie fig. 4). Het model in deze toestand wordt met C 40' aangeduid.

Verder is gemeten achter het cilindermodel C 4 (4 mm diameter); bij dit model dat uit metaal is vervaardigd, werd slechts een enkel stel schijven toegepast (fig. 4).

Als gevolg van de aanwezigheid van betere gazen in de suskamer was de stroming in 1983 veel gelijkmatiger dan in 1969.

Bij de uitwerking werden voor de bijdrage $c_{do(1)}$ volgens vergel. (20) waarden verkregen van de volgende orde van grootte:

$$0,0002 \text{ a } 0,003 \text{ voor } d = 40 \text{ mm en } B \text{ (de breedte van het integratiegebied)} \\ = 200 \text{ mm}$$

$$0,004 \text{ a } 0,006 \text{ voor } d = 4 \text{ mm en } B = 50 \text{ mm.}$$

Deze waarden zijn afgeleid uit drukverschillen van ongeveer 0,1% q_0 ; de nauwkeurigheid ervan is gering; bij de berekening van de in tabel 2 gegeven getalwaarden voor c_d is $c_{do(1)}$ gelijk nul genomen.

Tijdens de serie 1983 zijn ook enkele metingen uitgevoerd in de grenslaag langs de achterrand van de tunnelmeetplaats.

4. Resultaten van de impulsverliesmetingen

4.1. Cilindermodel C 4 (d = 4 mm); (meting 1983)

Overeenkomstig de verwachting heeft, naar uit tabel 2 blijkt, bij het dunne model C 4 toevoeging van de in het experiment gebruikte schijven geen invloed op de verkregen waarde van weerstandscoefficiënt c_{dm} .

In dit verband kan ook worden verwezen naar fig. 5 waarin het met en zonder schijven achter het model gemeten verloop van p_{t2} en p_2 op y is uitgezet. De vorm van de gebruikte schijven en de plaatsing ten opzichte van het eind van het model is in fig. 4 geschetst. De bevestiging van de schijven met plakband was primitief; mogelijk hebben zij niet precies loodrecht op de modelkantlijn gestaan. Vermoedelijk is daardoor de in fig. 5 zichtbare verschuiving van de p_{t2} - y kromme in y -richting veroorzaakt. Effect op de weerstand heeft dit overigens blijkbaar niet gehad. De gemeten waarde van c_{dm} lijkt betrouwbaar in die zin dat hij niet door secundaire stromingseffecten merkbaar is beïnvloed.

4.2. Cilindermodel C 40 (d = 40 mm) (metingen 1969 en 1983)

4.2.1. Het effect van grenslaagschotten

De grenslaagschotten die in 1969 met het toen nog nieuwe model C 40 zijn gebruikt zijn in fig. 9 geschetst. Voor de verkregen waarden van c_{dm} wordt naar fig. 10 (en tabel 1a) verwezen.

Uit fig. 10 blijkt dat het effect van schotten op c_{dm} bij dit model zeer groot was. Opvallend is dat reeds met de betrekkelijk kleine "schijven b" die slechts 70 mm achter het model uitsteken een aanzienlijke reductie van c_{dm} wordt verkregen en dat toepassing van veel grotere "stroken" met 500 mm lengte en "platen" met 728 mm lengte slechts een gering extra effect hebben. Het is de vraag of het wenselijk is dergelijke zeer grote schotten toe te passen; de kans is groot dat daarmee een extra verstoring van de stroming als geheel wordt geïntroduceerd die de nauwkeurigheid van de uitkomsten van impulsmetingen nadelig beïnvloedt.

Om hieromtrent enige nadere gegevens te verkrijgen zijn in 1983 enkele aanvullende metingen uitgevoerd met een serie "niet al te grote schijven". Schetsen van de gebruikte schijven en van de bevestiging aan het cilinder-

model zijn in fig. 3 en 4 gegeven. Het houten cilindermodel is hetzelfde als het in 1969 gebruikte model C 40, met dit verschil dat de uiteinden rechthoekig zijn gemaakt in verband met de bevestiging van de schijven en het buiten- oppervlak van het niet meer nieuwe model niet perfect glad was. In overeen- stemming met de waarnemingen van 1969 bleek ook nu het effect van schijven met passend gekozen afmetingen zeer groot te zijn.

Een indruk van dat effect kan onder meer worden verkregen uit fig. 6 waarin het achter het model gemeten verloop van p_{t2} en p_2 met y is uitgezet voor de situatie zonder schijven en voor die waarbij de schijven 160/80 aanwezig waren, schijven met 80 mm breedte die 60 mm achter het cilindermodel uitstaken.

Bij toepassing van deze schijven (160/80) is de kleinste waarde van de weerstandscoefficiënt verkregen.

Uit tabel 2 volgt dat de gemeten waarde van c_d bijna discontinu naar een veel hoger niveau overgaat indien schijven worden toegepast die achter het model minder ver dan 60 mm uitsteken ($a_s < 60$ mm).

Kennelijk moet a_s niet veel kleiner worden gemaakt dan $1,5 \cdot d$; bij gebruik van de cirkelronde schijven 120 en 80 waarbij a_s slechts 40 resp. 20 mm is blijkt c_d vrijwel even groot te zijn als bij afwezigheid van schijven. De breedte b_s van de schijven zou waarschijnlijk nog iets kleiner kunnen worden genomen dan bij de schijven (160/80); de schijven 160/62 met 62 mm breedte werkten ook goed; voor die schijven is echter geen volledige drukverdelings- meting uitgevoerd.

Toepassing van grotere schijven dan 169/80 blijkt, naar uit tabel 2 kan worden afgeleid nadelig te zijn in die zin dat daarbij c_d weer toeneemt. Het is niet bekend in hoeverre dit samenhangt met een grotere staartlengte a_s , met een grotere breedte b_s of met een grotere lengte van het voor het model uitstekende deel van de schijven; enig nader onderzoek hieromtrent lijkt wenselijk.

4.2.2. Over het effect van de keuze van E

Uit de metingen 1983 (tabel 2 en fig. 7) volgt dat variatie van de voor E gekozen waarde tussen 0 en 1 alleen een duidelijke invloed blijkt te hebben bij het dikke model C 40' in de gevallen waarin geen of te kleine schijven zijn toegepast.

Een prettige indruk maakt het feit dat de invloed van E klein blijkt te zijn bij het dunne model C 4 en bij het 40 mm dikke model-met-gunstig-werkende-schijven.

Om de invloed van E in de tabel te doen uitkomen zijn de waarden van c_d in drie decimalen gegeven, hoewel in verband met de absolute nauwkeurigheid van de verkregen waarden beter met twee decimalen had kunnen worden volstaan.

Naar uit fig. 10 blijkt zijn de resultaten van de in 1969 uitgevoerde metingen van C 40 niet in overeenstemming met het voorgaande. De situatie in 1969 was blijikbaar zodanig dat door toevoeging van de destijds gebruikte schijven, stroken en platen het verschil tussen de waarden van c_{dm} bij E=0 en E=1 groter werd dan in de toestand zonder schijven.

Dat de waarde van E in de beschouwde gevallen effect had op de waarde van c_d hangt samen met het feit dat bij de beschouwde metingen de snelheid V_{2B} naast het zog veel groter was dan de ongestoorde snelheid V_0 ver stroomopwaarts van het model. Het is zeer wenselijk de meetplaats van de M-tunnel zo te wijzigen dat dit snelheidsverschil tot vrijwel nul kan worden teruggebracht; liefst door toepassing van verstelbare zijwanden (zie ook par. 7.1).

4.2.3. Over het effect van a, de afstand van de meetlijn 2 achter het model

Verontrustend is het feit dat, zoals in fig. 10 is aangegeven, uit de in 1969 uitgevoerde metingen blijkt dat verandering van de afstand a tussen de meetlijn 2 en de hartlijn van het model een vrij groot effect op de verkregen waarde van c_{dm} heeft, althans bij metingen achter een model met 40 mm dikte met stompe achterkant en in een meetplaats met evenwijdige wanden waarin de snelheid in stromingsrichting sterk toeneemt.

Het is noodzakelijk door verdere proeven na te gaan hoe de invloed van a op het eindresultaat van impulsverliesmetingen kan worden geëlimineerd. Daarbij is het in de eerste plaats wenselijk uit te gaan van modellen met optimale grenslaagschotten.

In de tweede plaats dient dit onderzoek eerst te worden uitgevoerd nadat de meetplaats in zoverre gewijzigd is dat door passende divergentie van de wanden de snelheid V_{2B} ongeveer gelijk kan worden gemaakt aan V_0 .

In de derde plaats is het wenselijk bij gebruik van modellen met stompe achterkant ook modellen te onderzoeken met een dikte kleiner dan 40 mm, bijv. 30 en 20 mm.

Of een dikte van 40 mm voor deze proeven ontoelaatbaar groot is kan uit de tot nu toe verrichte metingen niet met zekerheid worden afgeleid; in par. 4.2.4. is aangegeven dat zowel voor een glad cilindermodel met $d = 40$ mm als voor een scherprandig Borda 40 model de orde van grootte van de verkregen waarden van c_d wel correct is.

Zeker is dat de dikte niet veel groter dan 40 mm mag worden gekozen.

In dit verband kan worden gewezen op de in 1969 voor een 70 mm dik cilindermodel C 70 verkregen resultaten die in fig. 10 zijn aangegeven.

Niet alleen zijn de verkregen waarden van c_{dm} veel te groot ook bij toepassing van grenslaagschotten; merkwaardig is ook het feit dat toepassing van kleine schijven een vergroting van c_{dm} geeft ten opzichte van de toestand zonder schijven. Kennelijk is een dikte van 70 mm veel te groot.

4.2.4. Over de waarden van c_d

In fig. 7 zijn enkele in 1983 verkregen waarden van c_{dm} op $\log R_d$ uitgezet. In die figuur zijn ook de uit lit. (1) overgenomen waarden getekend, waarden die zijn verkregen door een betrekkelijk nauwkeurige weging van de weerstand van een 1200 mm lange gladde stalen cilinder met 10 mm diameter in de grote L&R windtunnel.

Voorlopig wordt aangenomen dat de stippellijn door deze punten en de thans gemeten c_{dm} voor het dunne model C 4 ongeveer het correcte verloop van c_d van een gladde cirkelcilinder met $\log R_d$ aangeeft.

Duidelijk is in fig. 7 dat de in 1983 voor het model C 40' verkregen coëfficiënten veel te groot zijn. Weliswaar geeft toepassing van voldoende grote schijven een aanzienlijke verbetering maar ook dan is c_{dm} blijkbaar nog ongeveer 15% te groot.

Zoals reeds is opgemerkt was het oppervlak van het houten model C 40' bij de metingen in 1983 niet meer geheel glad. In dit verband is een vergelijking met de metingen in 1969 aan het toen nog nieuwe en vermoedelijk gladde model C 40 van belang. Vergelijking van fig. 7 en tabel 1a (en fig. 10) leert dat in 1969 bij $R_d = 6,13 \cdot 10^4$ ($\log R_d = 4,8$) voor het gladde model C 40 in combinatie met "stroken" waarden van c_{dm} zijn verkregen die, gemiddeld genomen, wel in overeenstemming zijn met de in de grote tunnel door weging bepaalde waarden. Kennelijk zijn de in 1983 verkregen resultaten beïnvloed door "ruwheid" van het modeloppervlak.

4.3. Het scherprandige model Borda 40

In 1969 zijn onder meer metingen uitgevoerd aan een scherprandig zgn. Borda model met een dikte van 40 mm; waarvan de vorm in fig. 12 is geschetst. In deze figuur is ook het drukverloop op de voor- en achterkant van dat model gegeven. Uit dit drukverloop is, ter controle van de resultaten van de impulsverliesmetingen, ook de "echte" waarde $c_{do(p)}$ van c_{do} afgeleid. Voor drie metingsseries zijn de resultaten boven in fig. 11 aangegeven. Het blijkt dat bij toepassing van "platen" de uit de impulsmetingen verkregen waarden van c_{do} redelijk in overeenstemming zijn met de waarde van c_{do} die uit de op het model werkende drukken is afgeleid, een enigszins verrassend resultaat indien wordt bedacht dat de breedte van het zog ter plaatse van de meetlijn 2 ongeveer 80% van de meetplaatsbreedte bedroeg.

Vermoedelijk is de situatie bij een dergelijk scherprandig model in zoverre verschillend van die bij een cirkelcilinder dat bij een cilinder als gevolg van secundaire stromingen ook de plaats van het loslatingspunt en dus het stromingspatroon om het model zelf sterk kan worden gewijzigd terwijl bij een scherprandig model waar de loslating vastligt het effect op het stromingspatroon veel minder groot zal kunnen zijn.

In dit verband kan erop worden gewezen dat de invloed op c_{dm} van toepassing van "schotten" bij het Borda-model slechts 10% is tegen ongeveer 25% bij model C 40.

4.4. Diversen

Zeer onaangenaam is het feit dat de snelheid V_{2B} stroomafwaarts bij de metingen zeer veel groter was dan de snelheid V_o ver stroomopwaarts van het model. Voordat de metingen worden voortgezet is het nodig de meetplaats passend te wijzigen.

Met betrekking tot de waarde van de in par. 22 ingevoerde grootheid Δh die als maat voor de secundaire stromingssterkte kan worden opgevat kan het volgende worden opgemerkt.

Volgens (18) is het verschil tussen de uit impulsmetingen afgeleide en de werkelijke weerstandscoefficiënt gelijk aan $4.\Delta h/H_t$.

Uit fig. 11 volgt voor het c_d -verschil voor het Borda-model zonder schotten een waarde van ongeveer $3,65 - 3,05 = 0,6$; hiermee zou overeenkomen een waarde van $\Delta h = 60$ mm!

Vergelijking van de figuren 7 en 10 leert dat c_{dm} van het gladde cilindermodel C 40 zonder schijven (ongeveer 1,47 bij a tussen 200 en 300 mm en $\log R_d = 4,8$) $1,47 - 1,22 = 0,25$ groter is gemeten dan de waarde 1,22 die bij extrapolatie van de stippellijn in fig. 7 naar $\log R_d = 4,8$ wordt verkregen.

Dit verschil zou overeenkomen met $\Delta h = 25$ mm voor een cilinder met 40 mm diameter.

Deze waarden zijn groot; kennelijk treden sterke secundaire stromingen op. Het is niet duidelijk in hoeverre, maar het is zeker dat, Δh onnodig is vergroot door de aanwezigheid van de bevestigingsstangen waarop de modelementen kunnen worden gemonteerd.

Om een gemakkelijke en flexibele montage van modellen mogelijk te maken zijn deze stangen destijds vrij in de stroming op ongeveer 15 mm van de horizontale meetplaatswanden aangebracht. Het, onaanvaardbare, nadeel van deze opstelling is echter dat door de aanwezigheid van die stangen plaatselijk en juist ter plaatse van de modeleinden waar dit het minst gewenst is een aanzienlijke verdikking van de grenslaag langs de tunnelwanden wordt opgewekt. In dit verband kan ook naar par. 5 worden verwezen.

5. Grenslaagmetingen

In fig. 13 zijn de gemeten snelheidsverdelingen in twee punten van de grenslaag langs de achterwand gegeven. De afstand tot de wand is niet nauwkeurig bekend. Uit fig. 13 wordt de indruk verkregen dat de wand bij " y_w " = -0,2 mm zou kunnen hebben gelegen. In dat geval zijn de verdringingsdikten:

$$\begin{aligned} \text{voor } \delta^* &= 1,73 \text{ mm} \\ \text{achter } \delta^* &= 2,66 \text{ mm} \end{aligned}$$

Indien wordt aangenomen dat de grenslaaggroei langs alle meetplaatswanden gelijk was dan zou voor de verhouding tussen de dynamische drukken q_2/q_1 de waarde

$$\left[\frac{400 - 2 \cdot 1,73}{400 - 2 \cdot 2,66} \right]^4 = 1,019$$

moeten worden verwacht.

In werkelijkheid is in de meetplaats-zonder-model deze verhouding ongeveer 1,06.

Dit grote verschil moet vermoedelijk worden toegeschreven aan het storend effect van de bevestigingsstangen die bij deze metingen nog tegen het plafond en tegen de vloer aanwezig waren.

Het is wenselijk de bevestigingsmethode te wijzigen, ook als daarbij de verwisseling van de modellen meer tijd zou vergen.

6. Conclusies

6.1. De meetplaats

In de M-tunnel meetplaats met evenwijdige wanden treedt een veel te groot drukverloop in stromingsrichting op. Het is wenselijk de meetplaats te vervangen door een met verstelbare zijwanden waarin het drukverschil tussen de meetlijnen voor en achter het model gelijk nul kan worden gemaakt (zie ook par. 7.1).

6.2. Grenslaagschotten

Bij niet zeer dunne modellen blijkt toepassing van grenslaagschotten noodzakelijk te zijn ter beperking van de storende invloed van secundaire stromingen. Dit geldt zeker voor betrekkelijk dikke modellen met stompe achterkant (bijv. met een modeldikte van 0,1 meetplaatsbreedte).

Uit andere hier niet besproken metingen is overigens gebleken dat ook bij slanke, onder een invalshoek geplaatste vleugelprofielen de toepassing van grenslaagschotten een merkbare invloed had op de resultaten van een weerstandsbeplating uit impulsverliesmetingen.

Indien schotten van passende afmetingen worden gekozen lijkt het mogelijk bruikbare waarden voor c_d te verkrijgen (nadat de onder 6.1 en 6.4 bedoelde verbeteringen van de meetopstelling zijn aangebracht).

Voor een cilinder met 40 mm diameter betekent passend dat het achter de cilinder uitstekende deel van de grenslaagschijf niet kleiner mag zijn dan 60 mm; de indruk is verkregen dat het niet gunstig is een al te groot deel van de schijf voor het model te laten uitsteken.

Ter bepaling van optimale grenslaagschot-configuraties zullen nog aanvullende metingen nodig zijn.

6.3. De modeldikte

Hoewel uit de uitgevoerde metingen niet blijkt dat het onmogelijk is met 40 mm dikke modellen bij gebruik van gunstige schotten bruikbare waarden van c_d te verkrijgen is wel de indruk gewekt dat een dikte van 40 mm voor modellen met stompe achterkant aan de grote kant is; het is wenselijk bij voortzetting van het onderzoek ook dunnere modellen te gebruiken (30 en 20 mm dik).

6.4. De modelbevestiging

De verstoring van de stroming door de thans aanwezige model-bevestigingsstangen is onaanvaardbaar groot. In het vervolg zal een minder storinggevende montage methode moeten worden toegepast (zie ook par. 7.2).

6.5. Over de meetmethode

Vooraf wanneer met een controlevlak van grote breedte B wordt gewerkt is het ter verkrijging van nauwkeurige resultaten noodzakelijk zeer zorgvuldig te werken. Bij de hiervoor besproken metingen is dat in tweërlei opzicht niet gebeurd:

a. In de eerste plaats is te weinig aandacht gegeven aan de meting van de situatie in meetlijn 1 stroomopwaarts van de modellen.

Omdat het drukverloop in y richting klein bleek te zijn is ten onrechte het aantal meetpunten veel kleiner gekozen dan bij de metingen achter het model. Bovendien is ter besparing van tijd ten onrechte de meting 1 slechts voor zeer weinig modellen uitgevoerd op grond van de gedachte dat de situatie in lijn 1 door wijziging van het model nauwelijks zal worden beïnvloed.

b. In samenhang met het onder a. genoemde is de verwerking van de reken-grootheid p_{to} niet geheel correct geweest.

Bij de uitwerking van de metingen in lijn 1 is een p_{to} gebruikt die uit metingen voor het model is afgeleid.

Bij de uitwerking van de metingen in de meetlijn 2 achter het model is p_{to} gelijk genomen aan het gemiddelde van de totale drukken aan weerszijden van het zog. In een ideale stroming is dit uiteraard toelaatbaar, maar in een windtunnel heeft p_t in het "ongestoorde deel" van de stroming niet overal precies dezelfde waarde.

Bij volgende metingen moet de situatie langs lijn 1 gedetailleerd worden gemeten en moet bij de uitwerking van de metingen voor en achter het model worden uitgegaan van een op precies gelijke wijze gedefinieerde p_{to} .

De snelheid waarbij tijdens de metingen in 1983 kon worden gemeten in de tunnelconfiguratie met verlengde meetplaats en vrij uitblazende straal was kleiner dan wenselijk is (ongeveer 10 m/sec).

Bij voortzetting van het onderzoek moet de tunnel in gesloten rondloop configuratie worden gebruikt waarbij een veel grotere waarde van V kan worden ingesteld.

7. Voorstellen ter overweging

7.1. Verbetering van de meetplaats van de M-tunnel

Het is wenselijk de M-tunnel van een nieuwe meetplaats te voorzien, een meetplaats waarbij de divergentie van de zijwanden kan worden versteld.

In de huidige meetplaats met evenwijdige wanden is over een lengte van ongeveer 800 mm reeds bij afwezigheid van een model een toeneming van 6% in q geconstateerd. Bij aanwezigheid van een cilindermodel met 40 mm was deze toeneming in stromingsrichting zelfs 16%.

Het is wenselijk de wanden zo divergerend te kunnen stellen dat over een lengte van 800 mm in de ledige meetplaats een snelheidsafneming kan worden ingesteld ter grootte $(1,16)^{0,5} - 1 = 7,7\%$.

Per meter in stromingsrichting komt dit overeen met 10% vergroting van de doortocht. Om dit te bereiken moeten de zijwanden 20 mm per meter naar buiten wijken. Dit moet als een minimum worden beschouwd; indien het constructief niet op bezwaren stuit dient bij het ontwerp van een nieuwe meetplaats te worden uitgegaan van de eis dat elke zijwand tenminste 40 mm per meter naar buiten moet kunnen wijken.

Voor zover andere wensen zich daartegen niet verzetten zou de inrichting zo kunnen worden gemaakt dat ook een kleine convergentie van bijv. 10 mm per meter per wand zou kunnen worden ingesteld. Dit lijkt echter niet perse nodig, wel aardig.

Bij het ontwerp moet rekening worden gehouden met de volgende eisen:

1e. de voorwand moet van hetzelfde type zijn als de bestaande voorwand: met naar boven wegschuifbare wandpanelen.

Met betrekking tot de achterwand lijkt het aanbevelenswaardig het huidige type waarbij het middenpaneel van de achterwand in zijn geheel van buitenaf verwisselbaar is te handhaven.

2e. aan de uitstroomkant dient de nieuwe meetplaats aan het (aangepaste) bochtstuk te kunnen worden aangesloten zodat bedrijf met gesloten rondloopkanaal mogelijk blijft. Indien de lengte van de meetplaats gelijk moet blijven aan de huidige totale lengte van ongeveer 1800 mm dan dient ook het terugvoer kanaal te worden verlengd.

Ter oriëntering kan naar de principeschets in fig. 14 worden verwezen.

Aan de verstelbare zijwanden zouden zeer dunne verende stalen stripjes kunnen worden gemonteerd; stripjes die bij de verstelling langs de vloer respectievelijk het plafond van de meetplaats glijden. In bedrijf zou de

vrije rand van die strippen met plakband aan de horizontale wanden kunnen worden bevestigd en afgedicht. Eventueel zouden bovendien op enkele plaatsen in glijdende blokjes grijpende bevestigingsschroefjes kunnen worden aangebracht.

7.2. Verbetering van de model-bevestiging

7.2.1. Algemeen

Met betrekking tot de gewenste verbetering van de bevestiging van de model-elementen voor de zgn. "blokkendoosproeven" worden hieronder twee mogelijkheden ter overweging kort beschreven.

De eerste in par. 7.22 behandelde oplossing gaat uit van de eis dat in het geheel geen bevestigingselementen in de stroming aanwezig mogen zijn.

Bij de tweede in par. 7.2.3 te bespreken oplossing ligt de nadruk op verkleining van de storing, niet alleen van die door de ophangdelen maar en passant ook van die door de grenslaag langs de tunnelwand.

7.2.2. Voorstel 1

Gedacht wordt aan een oplossing van het in fig. 15 geschetste type waarbij stripvormige verlengstukken van de modeleinden worden gemonteerd in sleuven die in het plafond en in de vloer van de meetplaats zijn aangebracht.

Hiertoe, en ook voor andere toepassingen van de tunnel, is het wenselijk zowel in de vloer als in het plafond van de meetplaats grote verwisselbare luiken aan te brengen. Zowel het vloer- als het plafondluik dient van boven af te kunnen worden ingebracht.

Bij de proeven moeten verschillende model-elementen in willekeurige volgorde bij willekeurige waarden van x kunnen worden geplaatst. De luiken dienen daartoe te worden voorzien van lange sleuven, bijv. minstens 600 mm lang.

De niet door modelvoeten ingenomen ruimte van de sleuven moet stroomopwaarts en stroomafwaarts van het model door vulstrippen kunnen worden opgevuld. Na montage van model plus vulstrippen dient het geheel in de richting tegen de wind te worden aangedrukt. Het is toelaatbaar daartoe bij het stroomafwaartse eind van de sleuven een verwijding toe te passen waardoor een klemschroef toegankelijk wordt; deze opening kan bij de meting met plakband worden afgedicht. De strippen mogen niet uit de sleuven vallen. In de oplossing volgens fig. 15 zijn zij daartoe van schuine eindkanten

voorzien; mogelijk is een oplossing van het in fig. 17 geschetste type met paspennen aantrekkelijker.

Het is wenselijk vleugelmodellen niet alleen bij invalshoek nul maar ook in andere standen te kunnen meten. Overwogen dient te worden in hoeverre in het ontwerp van een nieuwe meetplaats ook rekening kan worden gehouden met toepassing van draaischijven.

Voorlopig zou in die behoefte kunnen worden voorzien door aanmaak van luiken waarin de sleuven onder hoeken van 5° resp. 10° met de hartlijn verlopen.

Bovendien kunnen vleugelmodellen worden aangemaakt waarvan het eigenlijke modeldeel verdraaibaar is ten opzichte van de stukken strip die zich in de sleuven bevinden. Om ruimte te houden voor draaipunten moeten de strippen niet te smal worden genomen (niet smaller dan bijv. 8 mm).

7.2.3. Voorstel 2

Het tweede voorstel is in de figuren 16 en 17 toegelicht.

Hierbij bevinden de in par. 7.2.2. bedoelde sleuven zich niet in de tunnelwand maar in stalen frame-balkjes die tegen de vloer en tegen het plafondluik worden vastgeschroefd.

Gedacht wordt hierbij aan toepassing van een dubbel stel grenslaagschotten: een stel relatief grote "hoofdschotten" die vast op de framebalken zijn bevestigd en een tweede deel "hulpschotten".

Omdat de storing door de wandgrenslaag reeds grotendeels door de "hoofdschotten" wordt geëlimineerd kunnen de hulpschotten waarvan de vorm moet zijn aangepast aan die van het onderzochte model vermoedelijk kleiner zijn dan de schijven die bij afwezigheid van de hoofdschotten nodig zouden zijn.

Aanbevolen wordt voordat tot een definitief ontwerp wordt overgegaan, nadat de onder 6.1 bedoelde verbetering van de meetplaats is gerealiseerd, aan vereenvoudigde opstellingen volgens de voorstellen 1 en 2 enig vooronderzoek uit te voeren aan gladde metalen cilinders met diameters van 40, 30 en 20 mm en aan een Borda model met 30 mm dikte.

8. Literatuur

E. Dobbinga: "Over het gebruik van het mini-weegstelsel met draaiende assen bij de meting van de weerstandscoefficiënt van een cilinder in de grote L&R windtunnel". L&R Memorandum M-528.

Tabel 1a: Overzicht van de metingen; serie 1969

model $R_d = d \cdot V_o / v$	C 40 (d = 40 mm) 6,13.10 ⁴										
	200	300	300	400	295	275	275	275	175	275	477
schotten	stroken+schijven										
a_s (mm)	550										
b_s (mm)	550										
$(V_{2B}/V_o)^2$	1,187	1,183	1,184	1,190	1,188	1,169	1,174	1,169	1,169	1,172	1,178
$(p_{t0} - p_{t2})_{max} / q_o$	0,77	0,60	0,59	0,49	0,65	0,62	0,65	0,65	1,01	0,77	0,58
B (mm)	320										
$\int_B \frac{p_{t0} - p_{t2}}{q_o} \cdot dy$ (mm)	59,83	54,84	55,47	53,13	55,37	57,47	59,16	72,39	71,07	66,93	
$\int_B (\Delta u / V_o) \cdot dy$	15,35	14,97	15,25	15,71	14,3	17,02	17,43	20,51	23,51	26,10	
$\int_B (\Delta u / V_o)^2 \cdot dy$	1,92	1,55	1,61	1,53	1,52	2,03	2,13	4,55	4,32	4,43	
c_{d0} E = 0	1,377	1,261	1,276	1,220	1,270	1,327	1,367	1,651	1,636	1,540	
c_{d0} E = 1	1,444	1,325	1,340	1,288	1,343	1,370	1,413	1,680	1,655	1,552	
c_{d2} E = 0	1,160	1,066	1,078	1,025	1,069	1,135	1,165	1,413	1,396	1,307	
c_{d2} E = 1	1,216	1,120	1,132	1,082	1,130	1,172	1,203	1,437	1,412	1,318	
c_{dm} E = 0	1,21	1,11	1,12	1,07	1,12	1,18	1,21	1,47	1,45	1,36	
c_{dm} E = 1	1,27	1,17	1,18	1,13	1,18	1,22	1,25	1,49	1,47	1,37	
(tabel in toevoegsel C van LSW 87-3)	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9	C-10	

Tabel 1b: Overzicht van de metingen; serie 1969

model	C 70 (d = 70 mm) 1,07.10 ⁵						Borda 40 (d = 40 mm) 6,13.10 ⁵			
a (mm)	295						295			
schotten	platen +schijf 3k	stroken +schijf 3k	schijven 3k	schijven 3k	zonder schotten		platen +schijf	stroken +schijf	zonder schotten	
a _s (mm)	728	550	70	40			728	550		
b _s (mm)	398	120	110	110			398	120		
(V _{2B} /V ₀) ²	1,288	1,284	1,275	1,275	1,277	1,274	1,377	1,357	1,337	
(p _{to} -p _{t2}) _{max} /q ₀	1,20	1,08	1,16	1,12	1,13	1,14	1,76	1,34	1,27	
B (mm)	320						320			
$\int_B \frac{p_{to}-p_{t2}}{q_0} \cdot dy$ (mm)	125,51	119,09	147,73	176,35	171,41	142,97	139,99	144,04	156,72	
$\int_B (Au/V_0) \cdot dy$ (mm)	25,66	22,39	43,90	74,79	67,18	40,13	38,74	35,70	49,49	
$\int_B (Au/V_0)^2 \cdot dy$ (mm)	4,62	3,21	11,72	30,54	23,91	9,59	12,88	9,00	15,64	
c _{do} E = 0	1,700	1,616	1,986	2,240	2,236	1,934	3,198	3,378	3,643	
E = 1	1,773	1,699	1,982	2,122	2,146	1,944	3,357	3,531	3,659	
c _{dP}							3,367	3,130	3,045	
c _{d2} E = 0	1,319	1,259	1,558	1,756	1,754	1,519				
E = 1	1,377	1,323	1,555	1,664	1,683	1,526				
c _{dm} E = 0	1,40	1,34	1,65	1,86	1,86	1,61				
E = 1	1,46	1,40	1,65	1,76	1,78	1,62				
(tabel in toevoegsel C van LSW 87-3)	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15	C-16	C-17	C-18	C-19	C-20

Tabel 2: Overzicht van de impulsverliesmetingen; serie 1983

model $R_d = d \cdot V_o / v$ a (mm)	C 40' (d = 40 mm) 2,63.10 ⁴ 180 mm								C 4 (d = 4 mm) 0,26.10 ⁴ 138 mm	
	280	160	160/140	160/80	120	80	zonder schijven		met schijven 26	zonder schijven
a_s (mm)	110	60	60	60	40	20				
b_s (mm)	280	160	140	80	120	80				
$(V_{2B}/V_o)^2$	1,163	1,150	1,143	1,143	1,130	1,153	1,153		1,067	1,065
$(P_{to} - P_{t2})_{max} / q_o$	1,00	(0,96)	0,94	0,90	1,13	1,23	1,22		0,31	0,31
B =	200 mm									
$\int_B \frac{P_{to} - P_{t2}}{q_o} \cdot dy$ (mm)	66,02	64,76	63,19	62,02	79,37	98,82	95,2	95,84	3,99	4,00
$\int_B (\Delta u / V_o) \cdot dy$ (mm)	16,72	16,88	16,49	16,55	27,46	48,14	45,69	46,74	1,90	1,89
$\int_B (\Delta u / V_o)^2 \cdot dy$ (mm)	3,35	3,11	3,02	2,98	9,31	26,88	22,74	27,07	0,20	0,20
c_{do} E = 0	1,601	1,576	1,537	1,509	1,818	1,949	1,950	1,939	0,964	0,965
E = 1	1,597	1,568	1,528	1,500	1,772	1,826	1,837	1,821	0,960	0,960
c_{d2} E = 0	1,377	1,371	1,345	1,321	1,609	1,690	1,697	1,682	0,904	0,906
E = 1	1,374	1,363	1,337	1,312	1,568	1,583	1,598	1,580	0,900	0,902
c_{dm} E = 0	1,428	1,418	1,390	1,364	1,658	1,750	1,755	1,741	0,918	0,920
E = 1	1,425	1,410	1,381	1,356	1,615	1,639	1,654	1,635	0,914	0,916
(tabel in toevoegsel D van LSW 87-3)	D-1	D-2	D-3	D-5	D-7	D-8	D-9	D-10	D-11	D-12

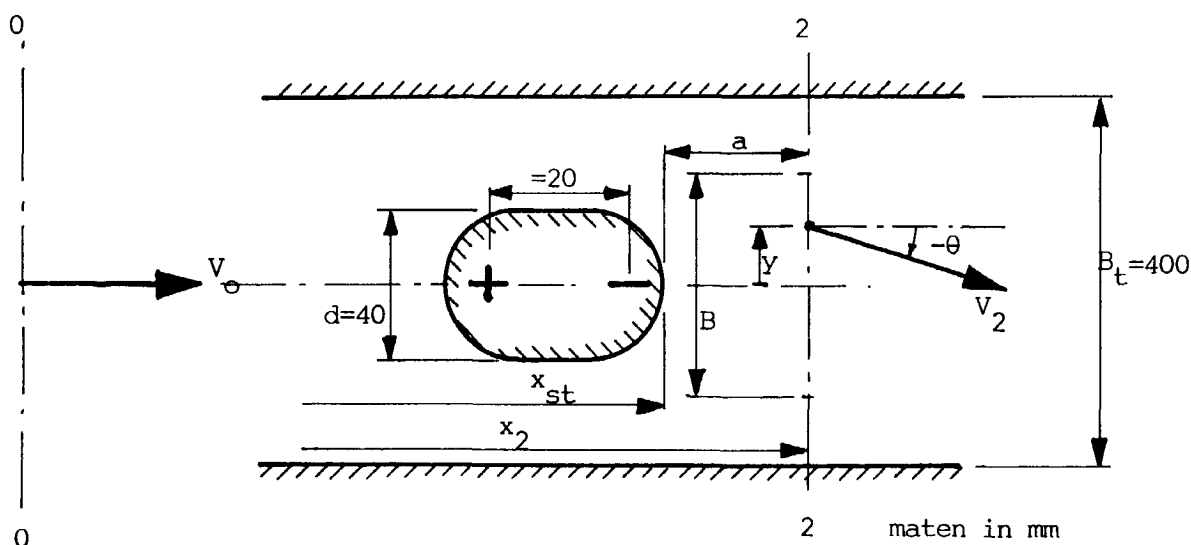
Tabel 3: Potentiaal stroming om een twee-dimensionaal bron-put lichaam tussen evenwijdige meetplaatswanden; c_{do} van het lichaam afgeleid uit impulsbeschouwingen

c_{do} : getallen zonder (): uit vergelijking (26); correct indien de integratie over de gehele meetplaatsbreedte wordt uitgevoerd.

getallen tussen (): uit vergel.(27); richtingsafwijkingen verwaarloosd.

$a = x_2 - x_{st} *$	10^{-6} mm	20 mm	50 mm	100 mm
Totale breedte B van het integratiegebied mm				
400 = B_t	0 (-0,2155)	0 (-0,0459)	0 (-0,0088)	0 (-0,0013)
200	0,0051 (-0,2102)	0,0032 (-0,0420)	0,0012 (-0,0069)	0,0001 (-0,0008)
80	0,0085 (-0,1897)	-0,0076 (-0,0381)	-0,0036 (-0,0064)	-0,0005 (-0,0007)
40	-0,0773 (-0,1723)	-0,0264 (-0,0358)	-0,0042 (-0,0047)	-0,0004 (-0,0004)

*) a = afstand van achterkant lichaam tot meetvlak



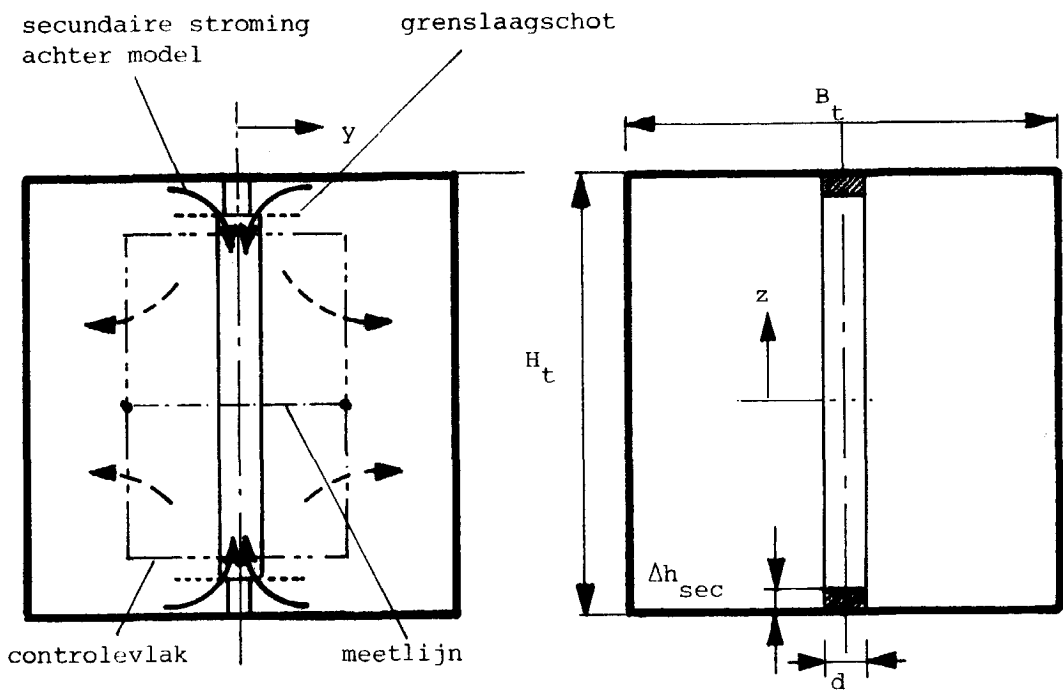
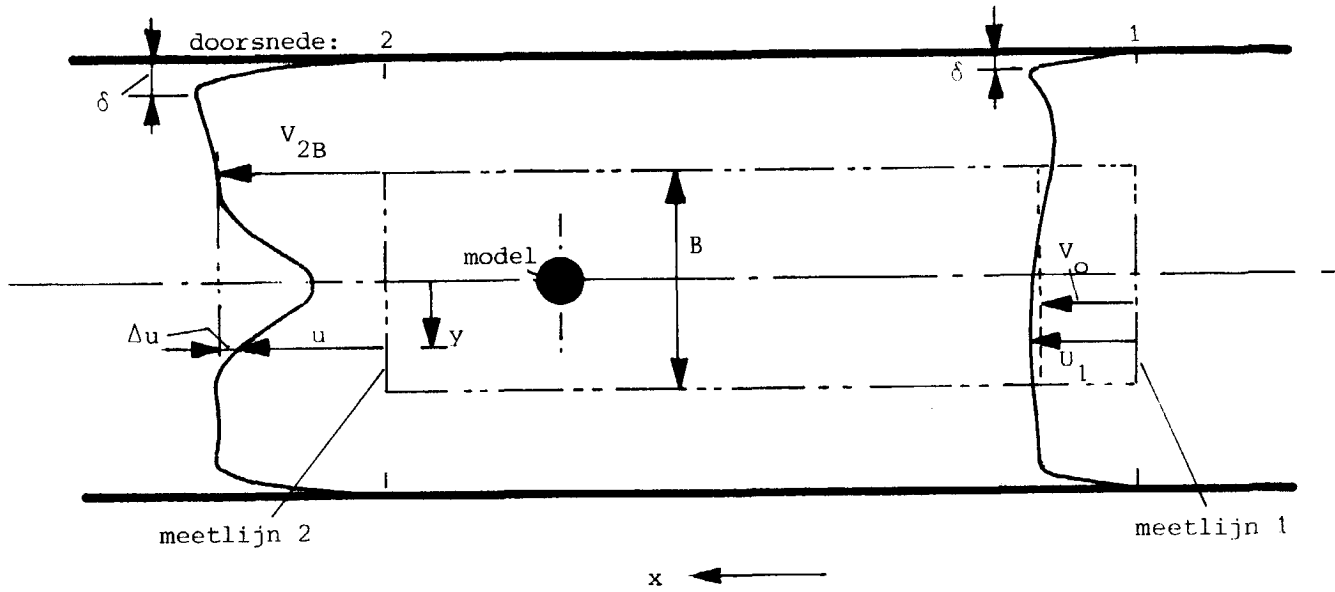


Fig. 1: Schema bij impulsbeschouwing.

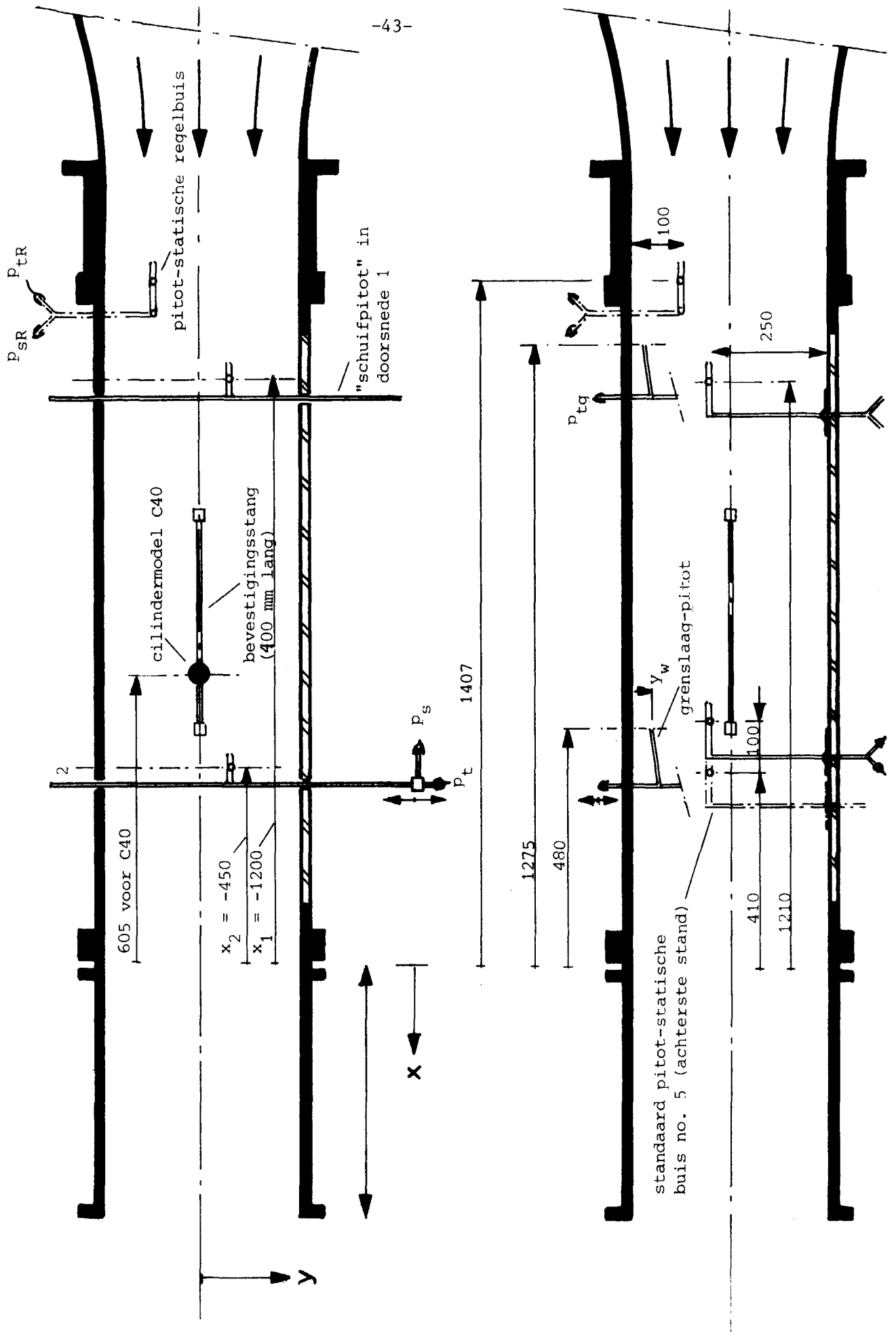


Fig. 2: Schema: opstelling in M-tunnel; serie 1983 horizontale doorsneden; schaal 1:10; maten in mm.

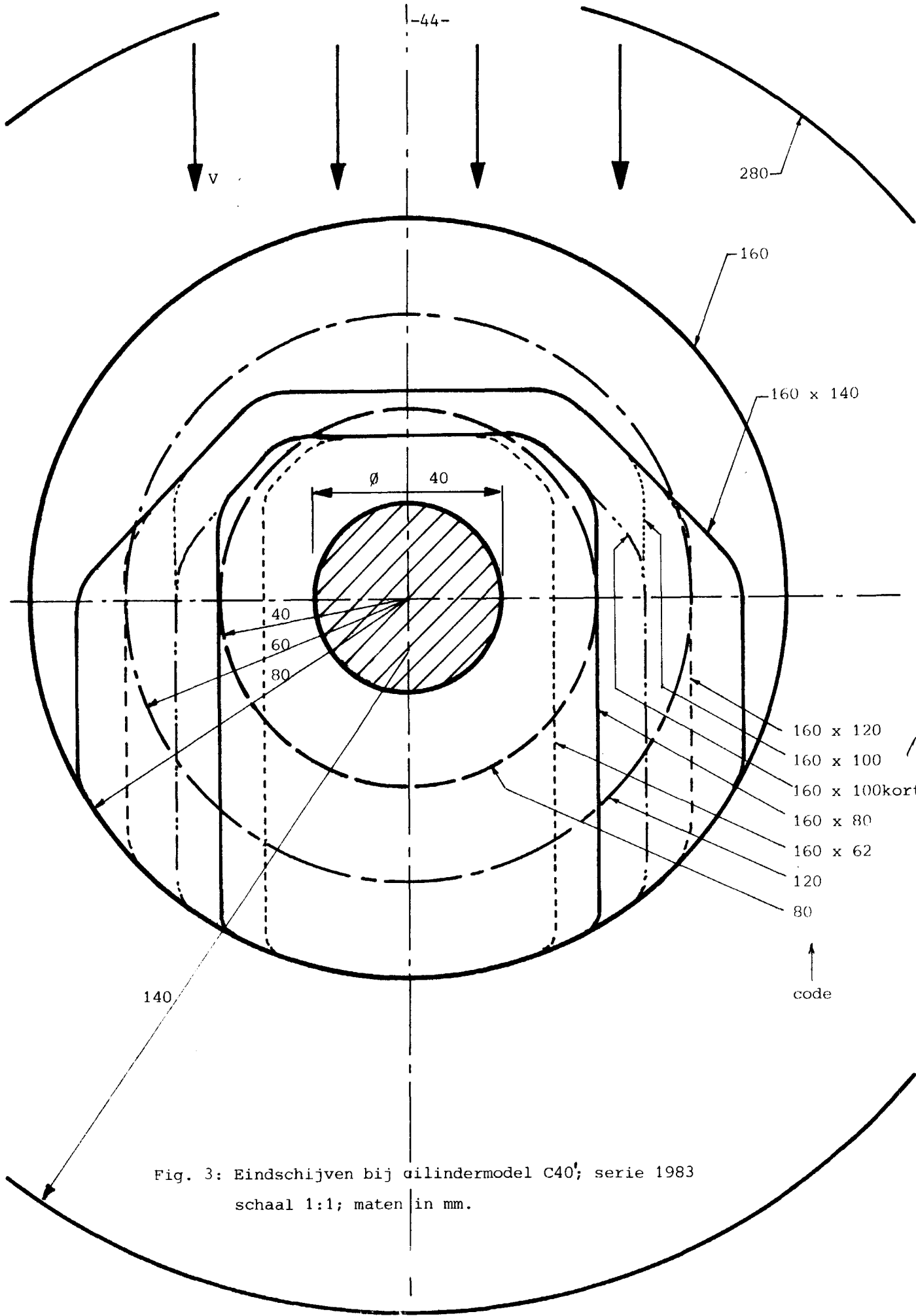


Fig. 3: Eindschijven bij cilindermodel C40¹; serie 1983
schaal 1:1; maten in mm.

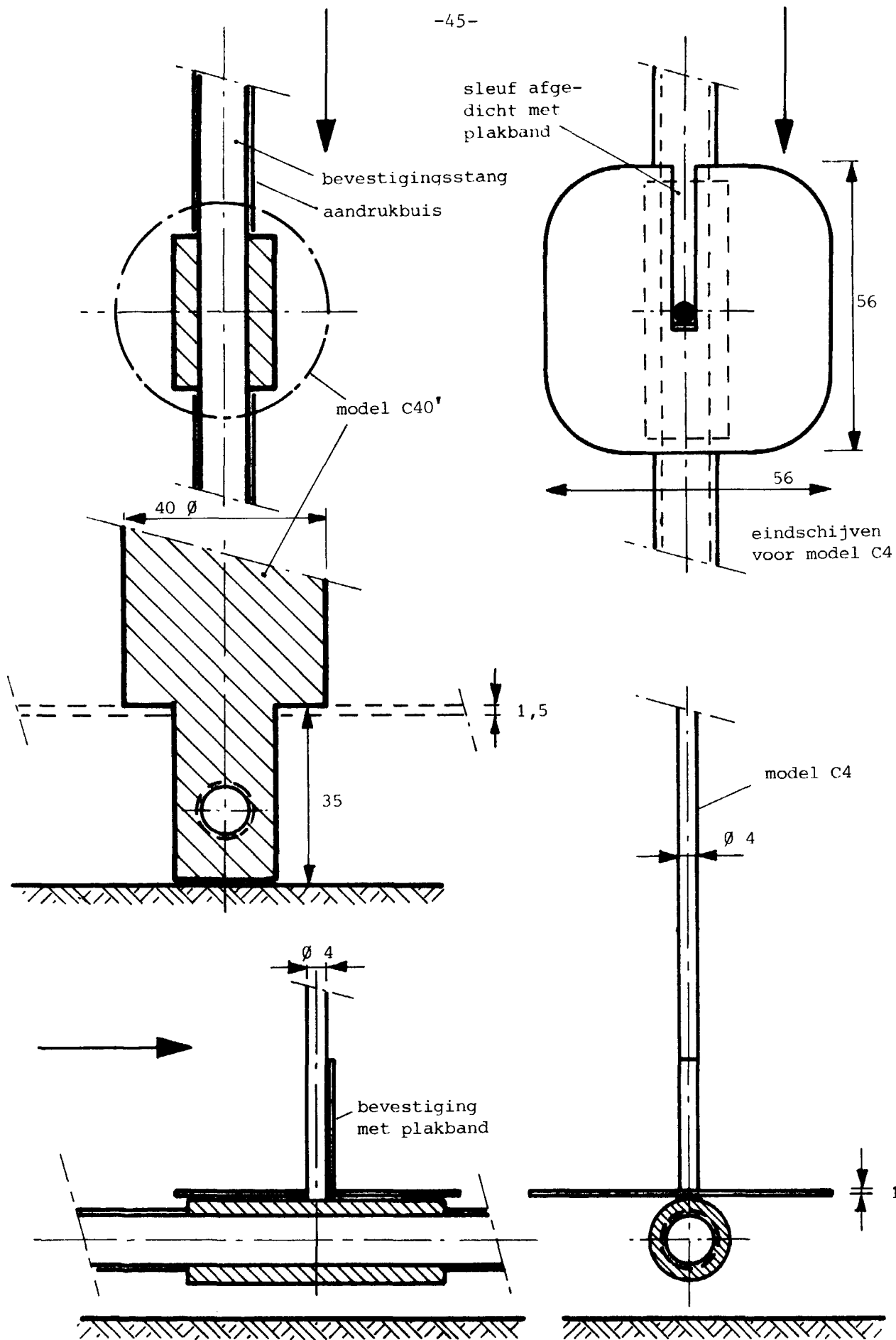


Fig. 4: Details modeleinden en schijfbevestiging; serie 1983
schaal 1:1; maten in mm.

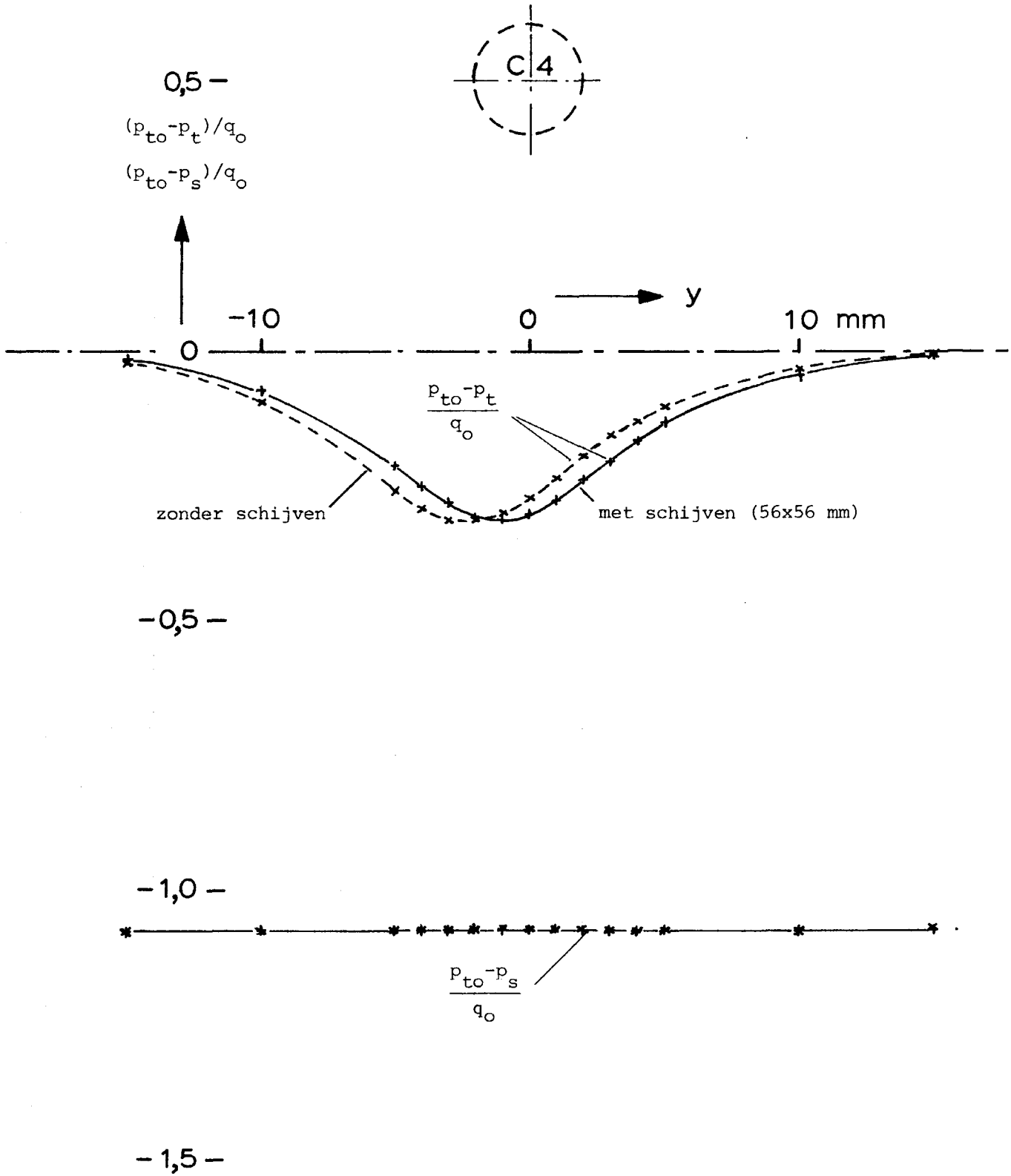


Fig. 5: p_t en p_s verloop achter cilindermodel C4; serie 1983
 $x = -405$ mm; 140 mm achter de modelhartlijn.
Het effect van de eindschijven.

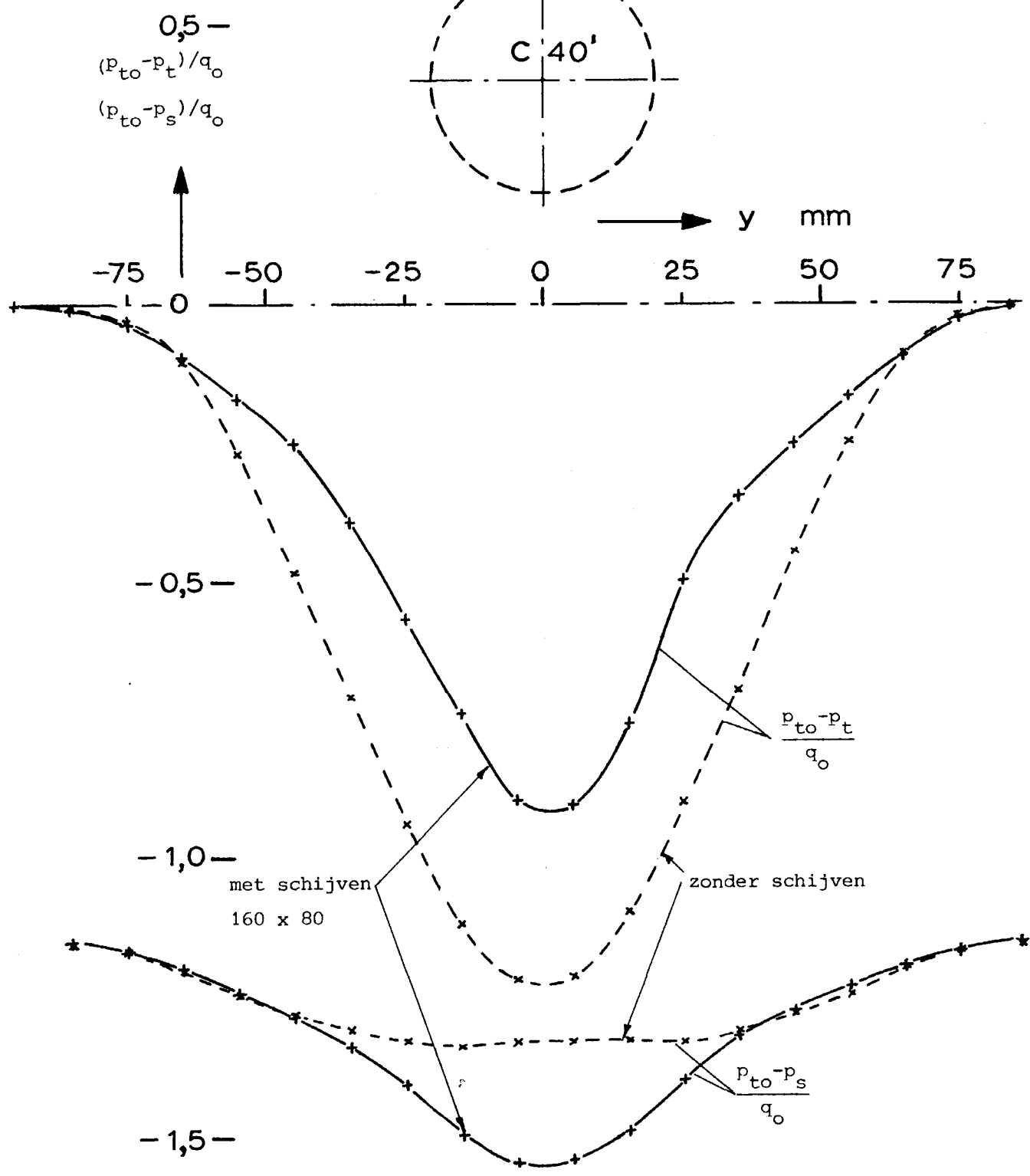
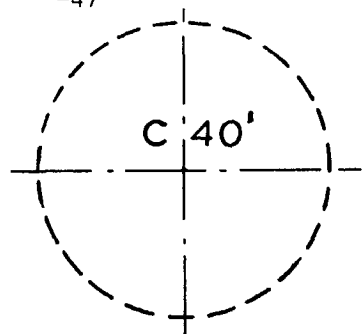


Fig. 6: p_t en p_s verloop achter cilindermodel C40'; serie 1983
 $x = -405$ mm; 200 mm achter de modelhartlijn.
Voorbeeld van het effect van eindschijven.

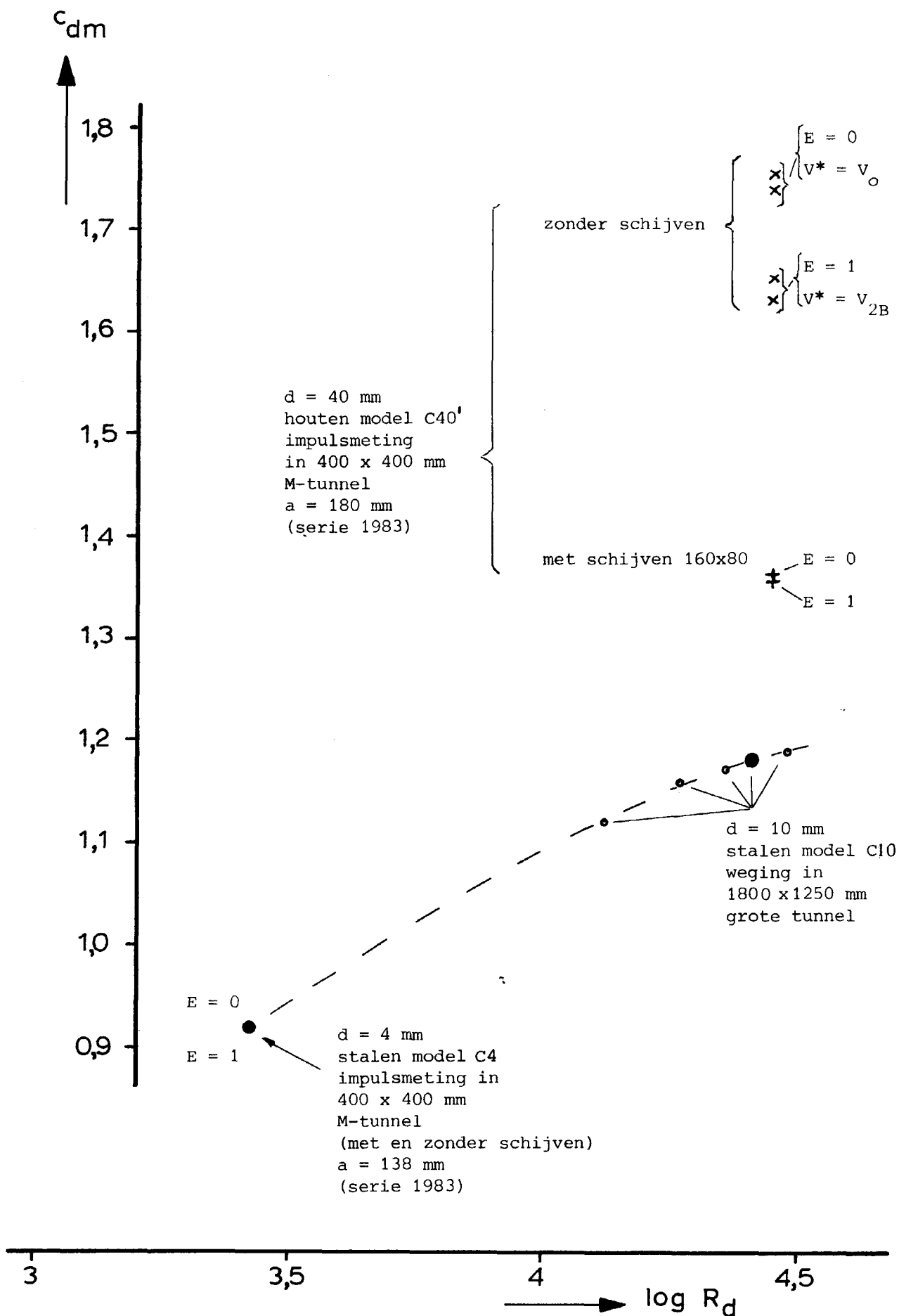


Fig. 7: Gemeten weerstandscoefficiënten van cirkelcilinders.

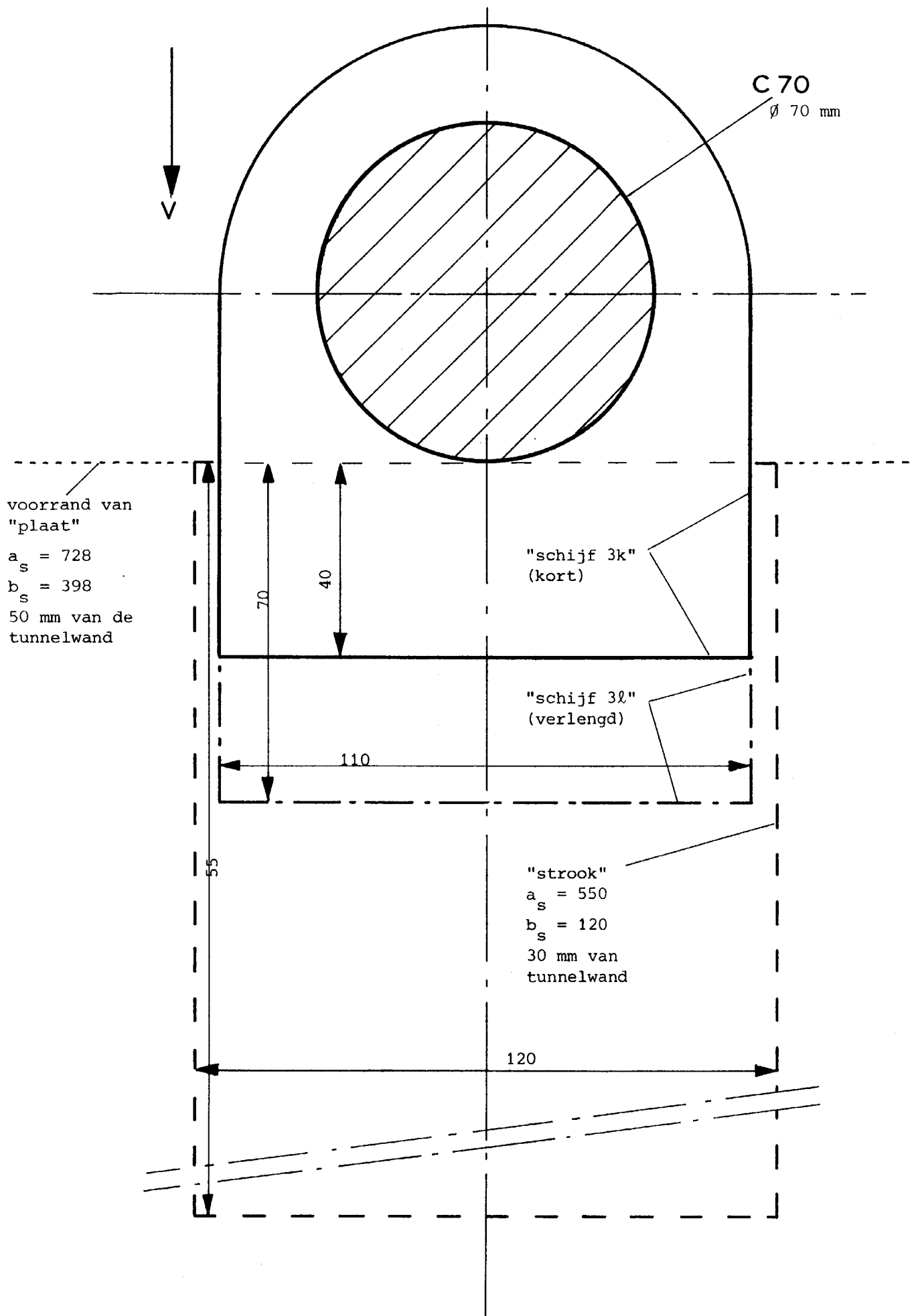


Fig. 8: De met model C70 gebruikte grenslaagschotten (schijven) schaal 1:1; maten in mm (serie 1969).

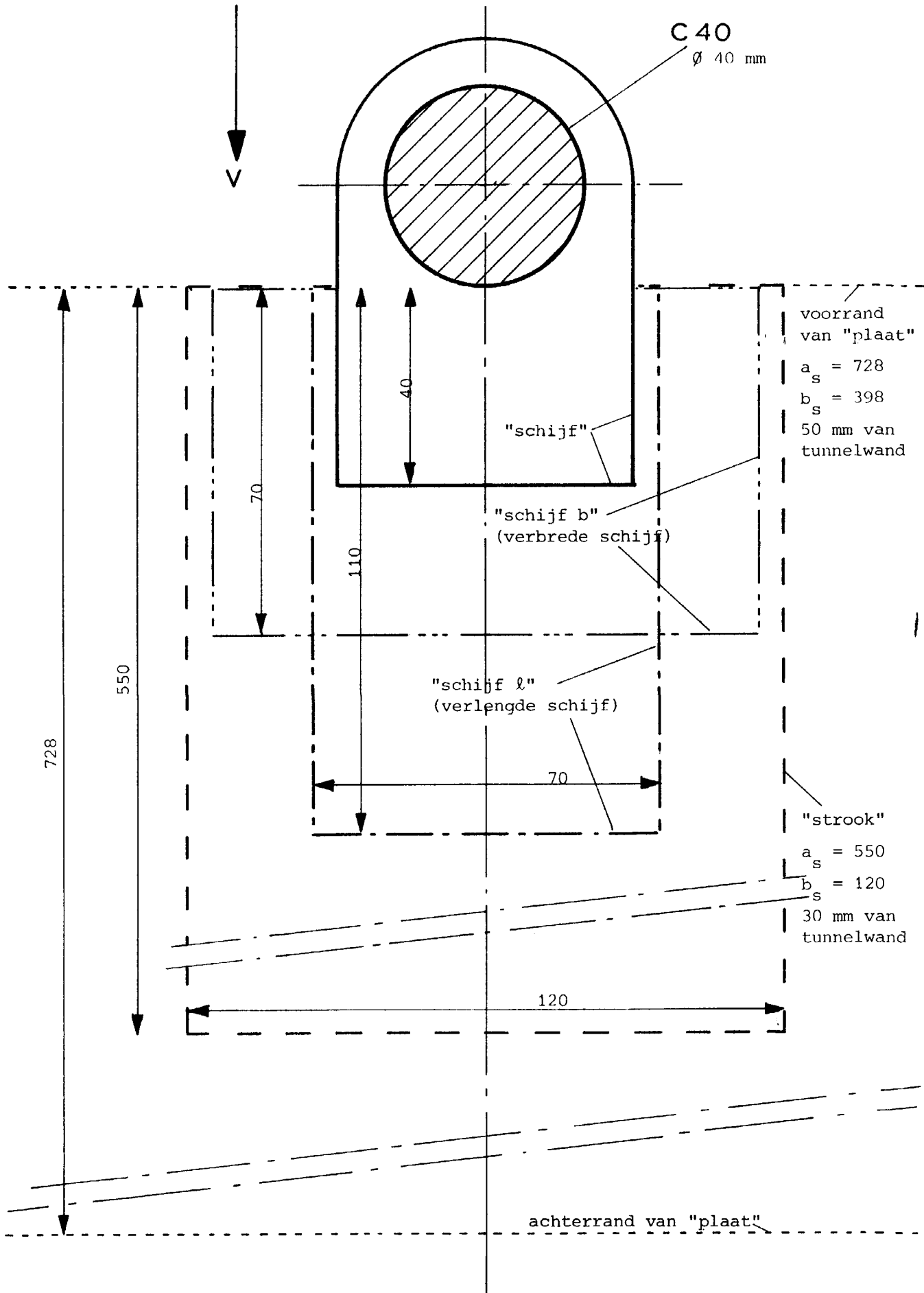


Fig. 9: De met model C40 gebruikte grenslaagschotten (schijven) schaal 1:1; maten in mm (serie 1969).

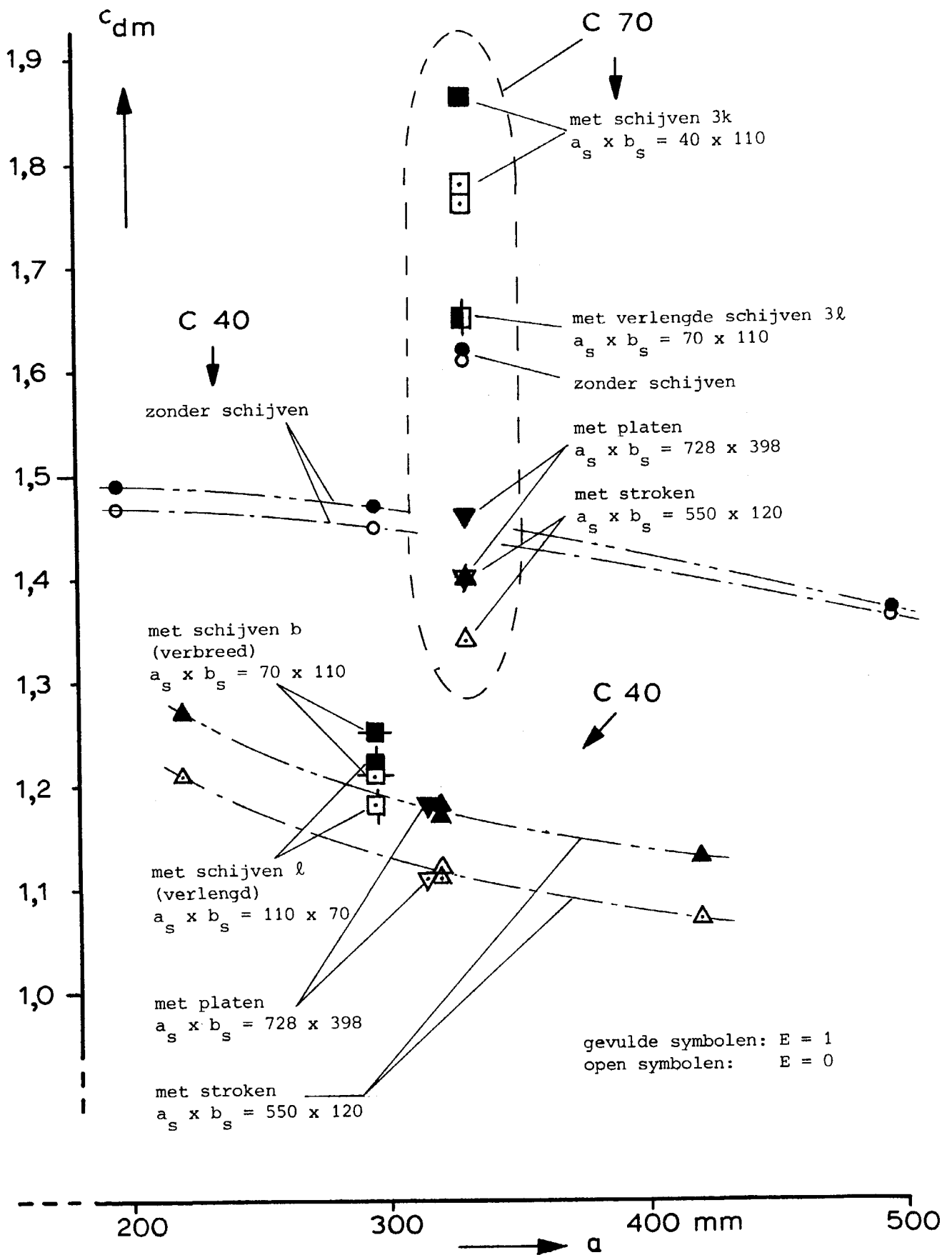


Fig. 10: Weerstandscoëfficiënt c_{dm} van cilinders uit impulsmetingen in de M-tunnel (1969).

c_{dm} is betrokken op d en op $V_m = V_o + 0,75 (V_{2B} - V_o)$.

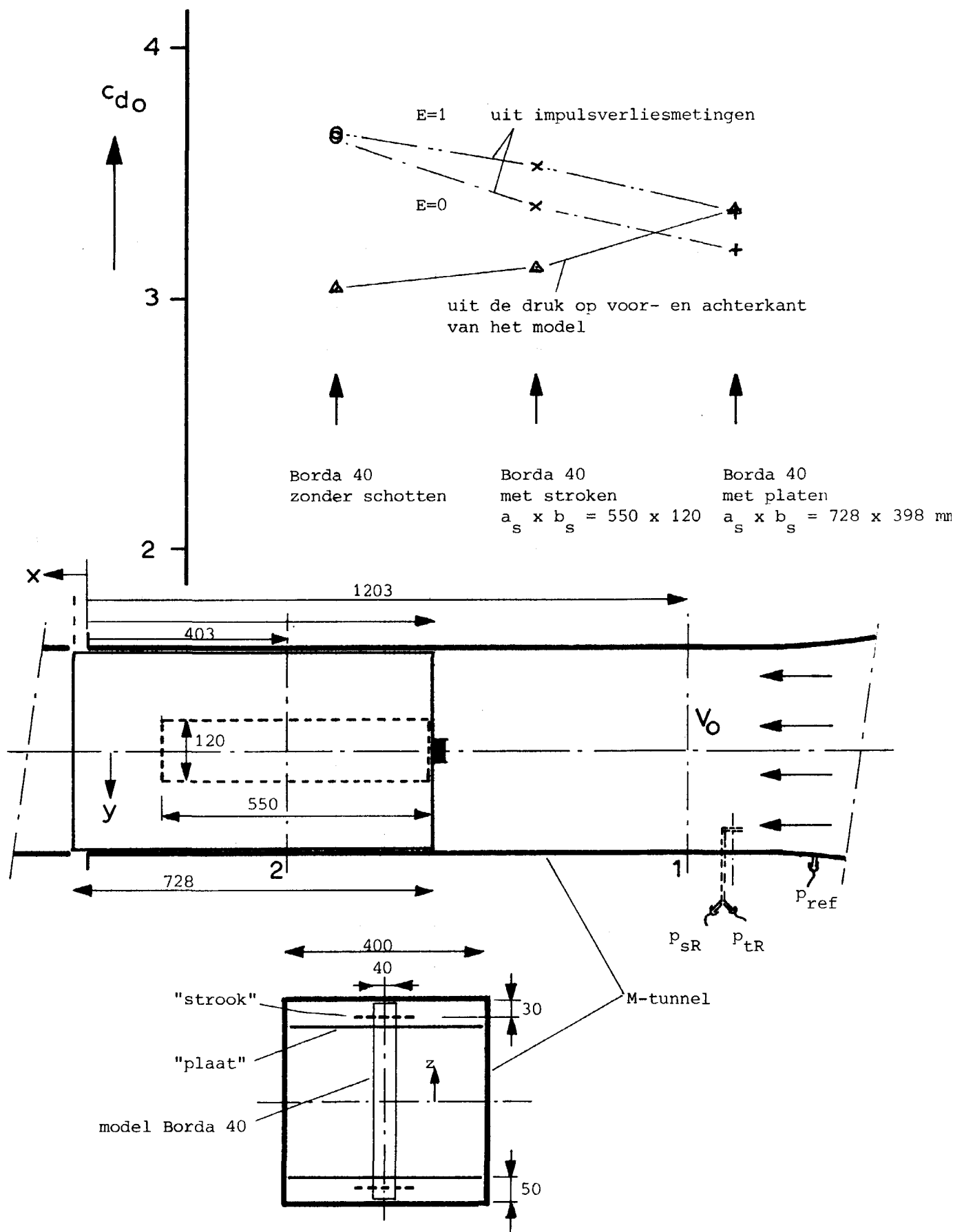


Fig. 11: Het effect van grote grenslaagschotten op de weerstandscoefficiënt c_{do} van het model Borda 40; gemeten in de M-tunnel (1969) bij $V_0 \approx 23$ m/sec.

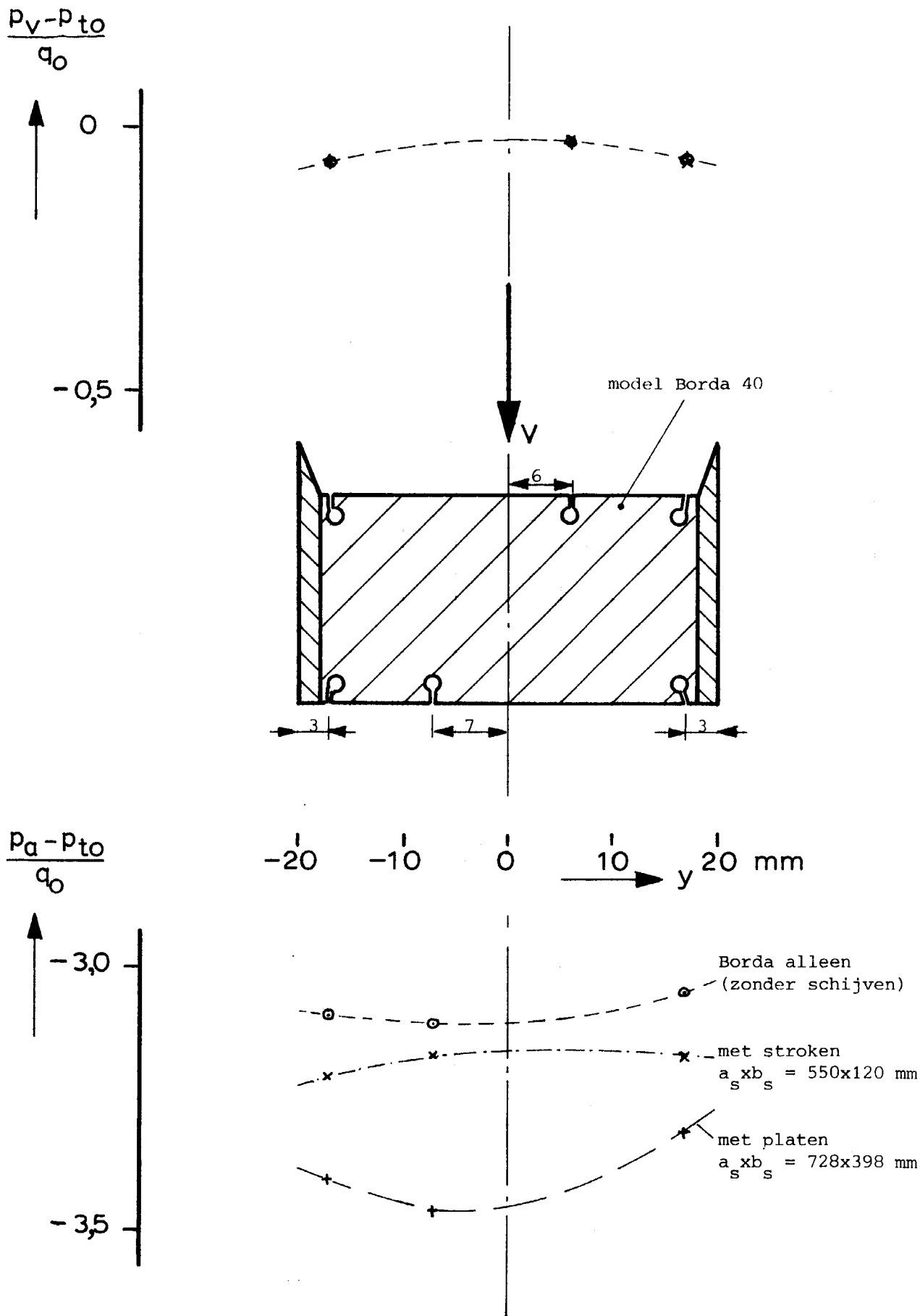


Fig. 12: De druk p_v op de voorkant en p_a op de achterkant van het model Borda 40, gemeten in de M-tunnel (1969).

$V_0 = \text{ong. } 23 \text{ m/sec.}$

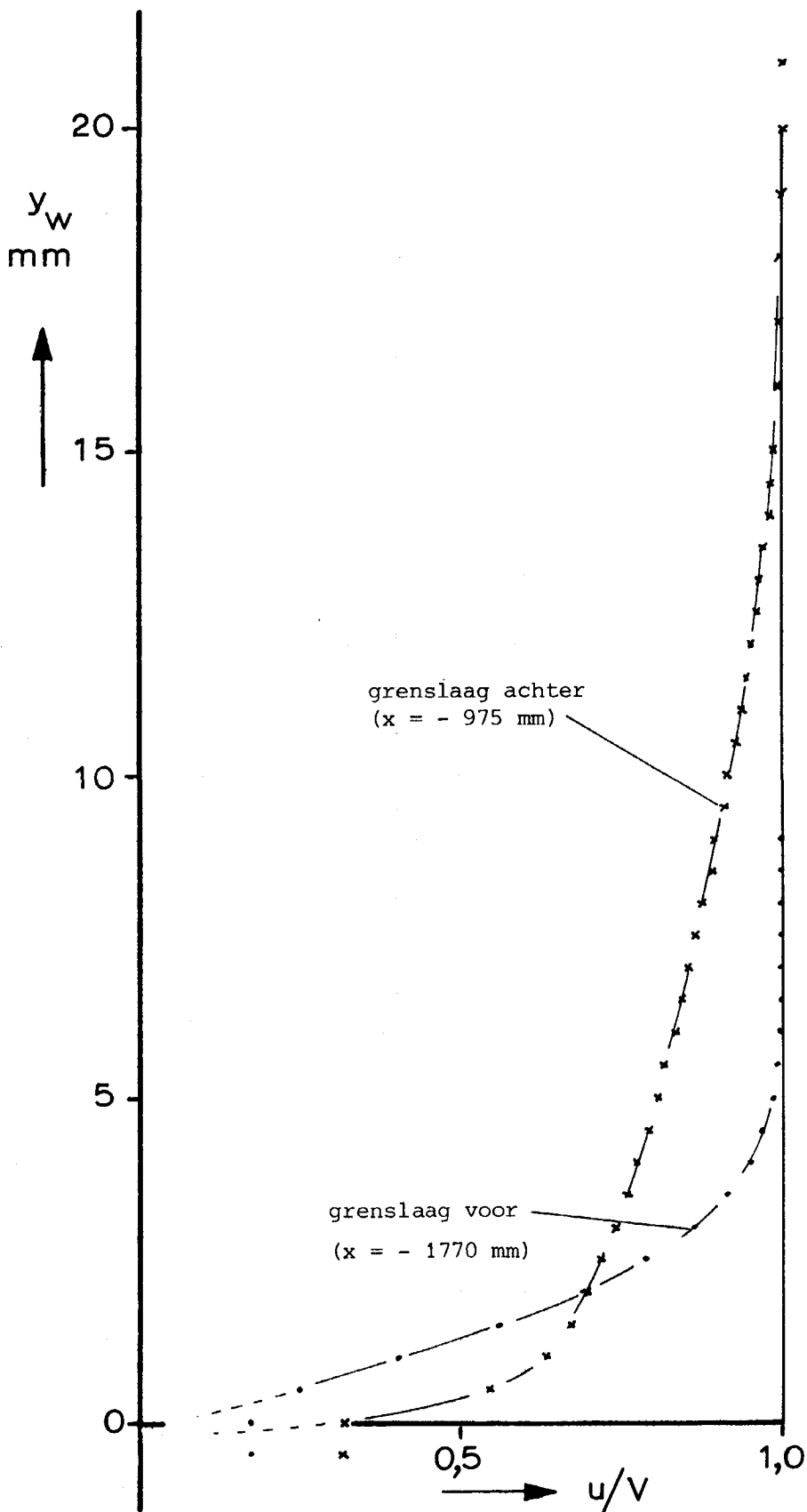


Fig. 13: Snelheidsverloop in de grenslaag langs de achterwand van de meetplaats, bij afwezigheid van het model (serie 1983).

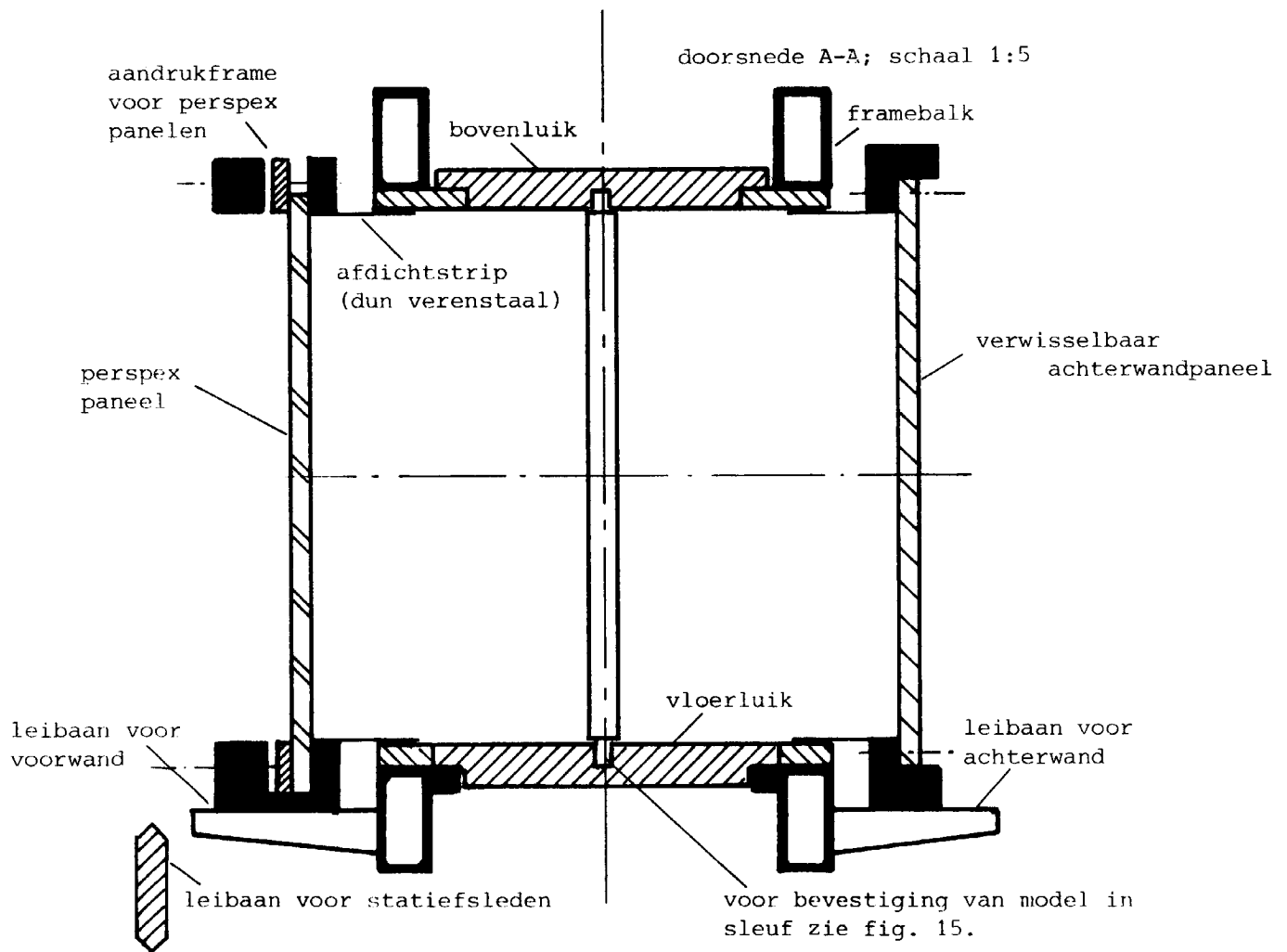
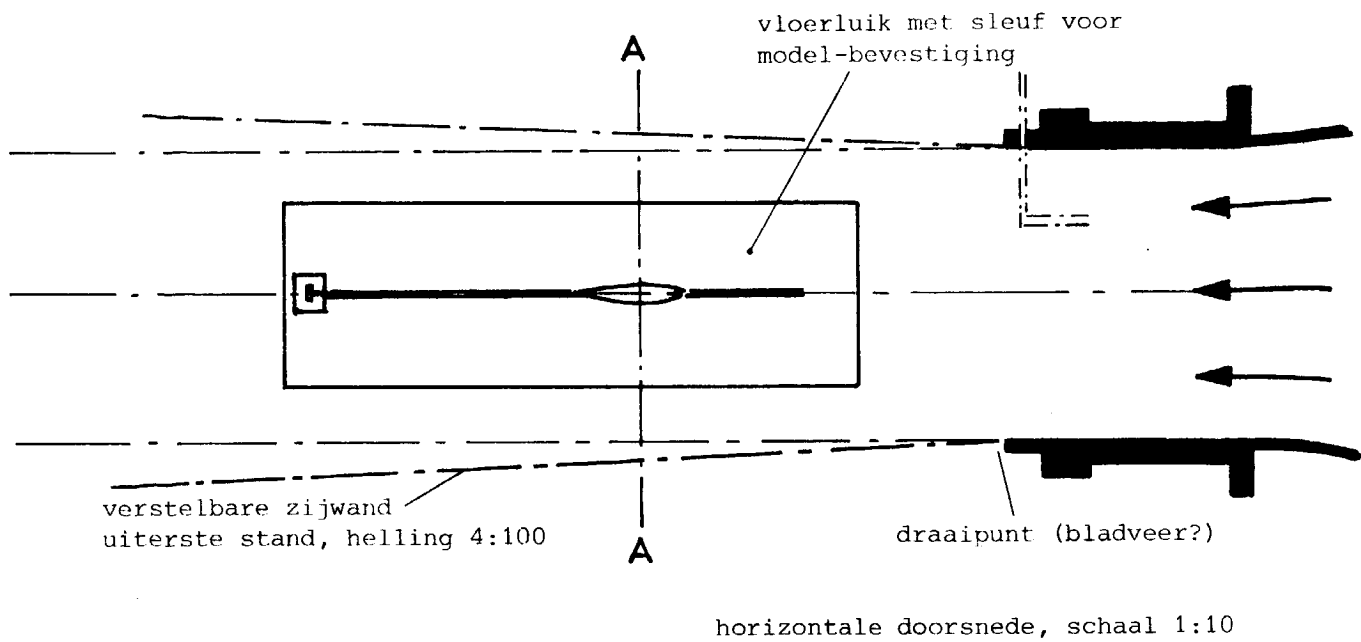


Fig. 14: Schets van gewijzigde meetplaats in M-tunnel.

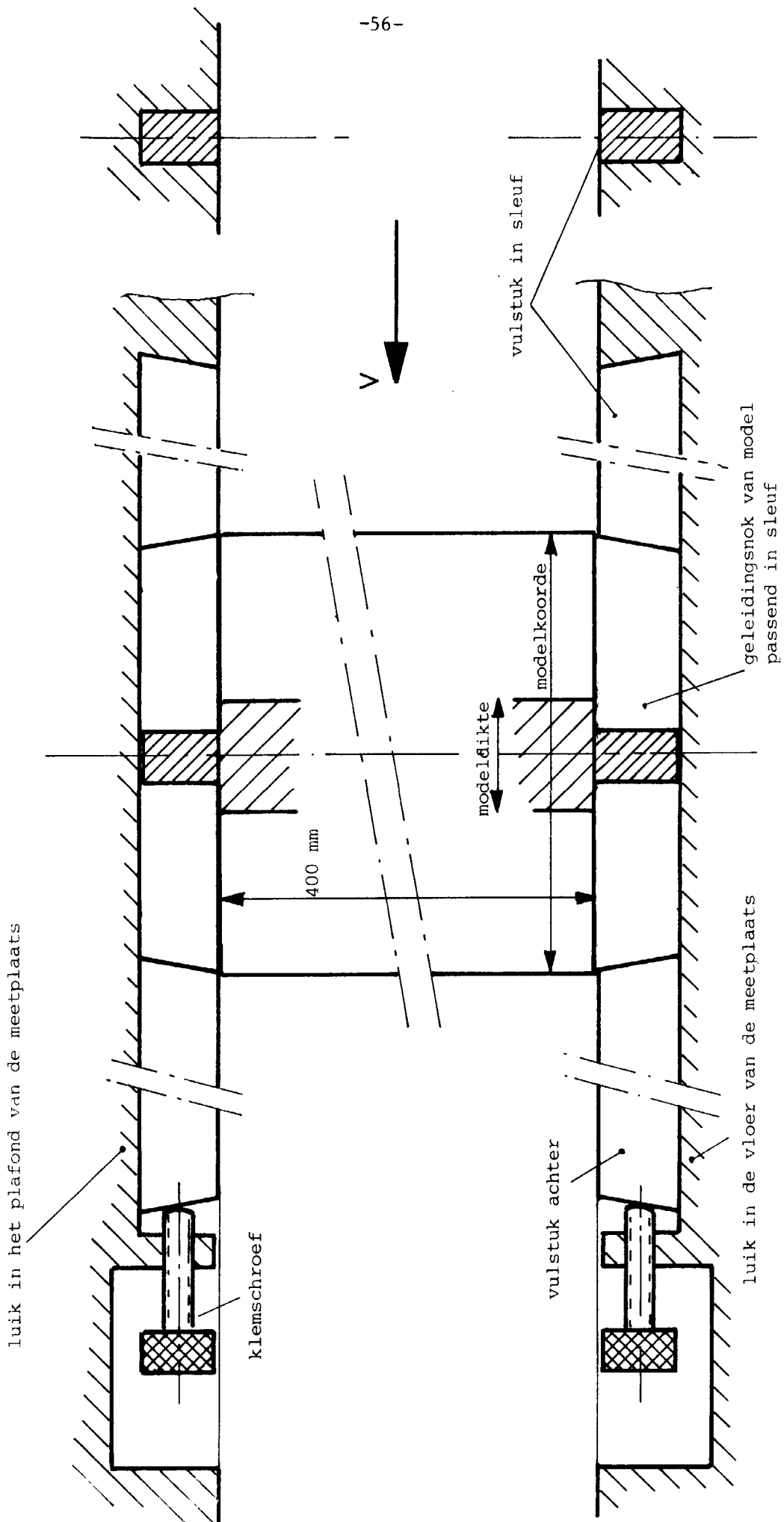


Fig. 15: Bevestiging van modelementen in sleuven in vloer en plafond (Voorstel 1)
Langsdoorsnede door tunnelhartlijn; schaal 1:1.

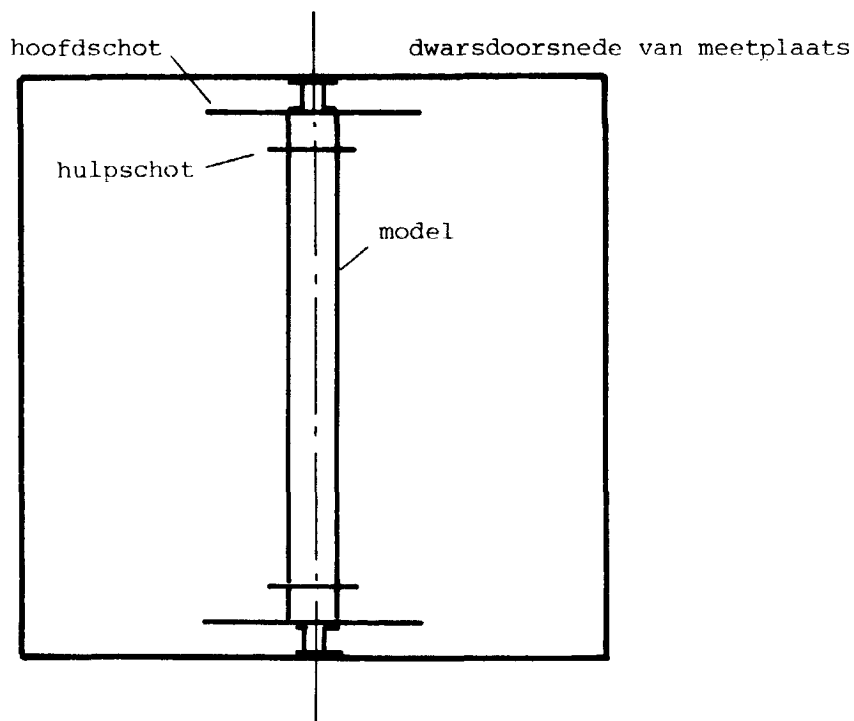
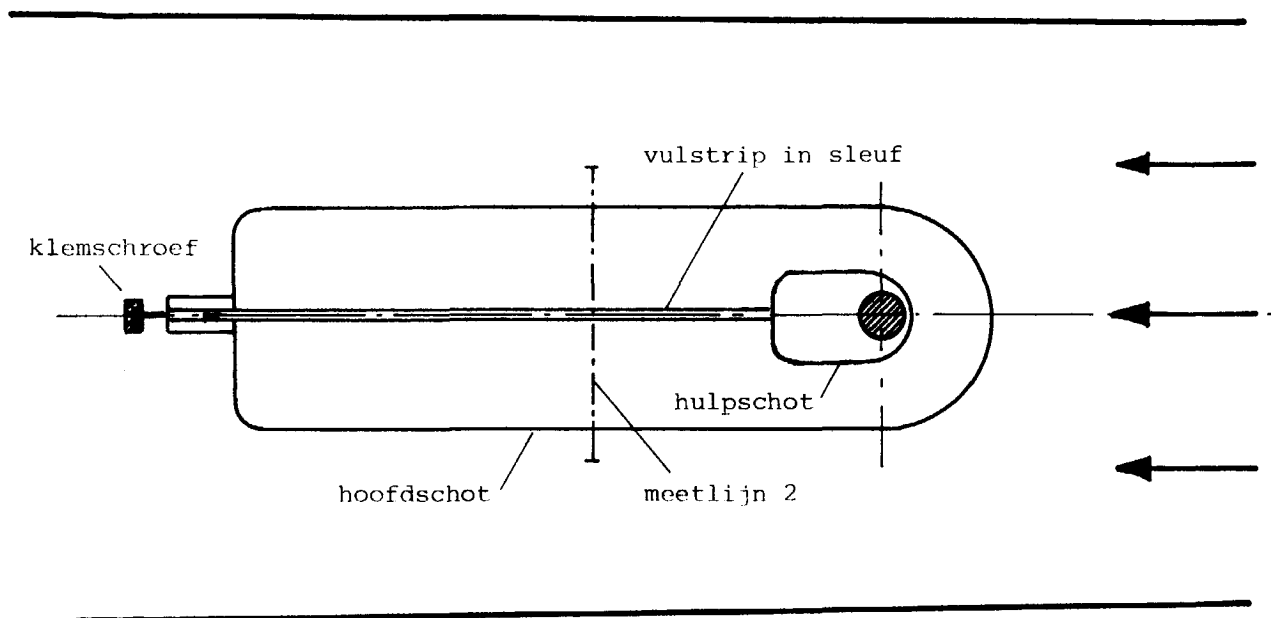


Fig. 16: Voorstel 2: toepassing van hoofd- en hulpschotten
schaal 1:10.

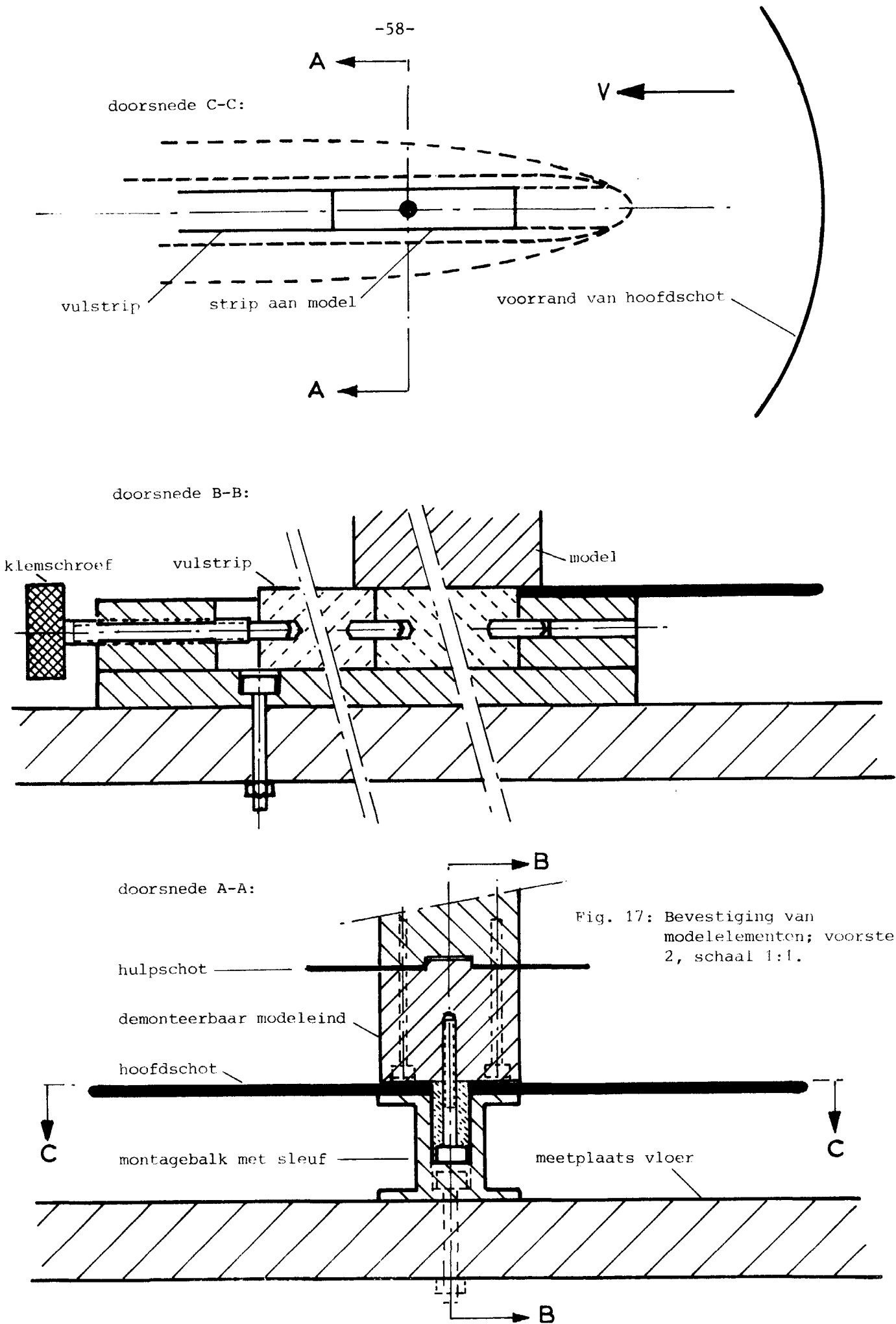


Fig. 17: Bevestiging van modelementen; voorstel 2, schaal 1:1.

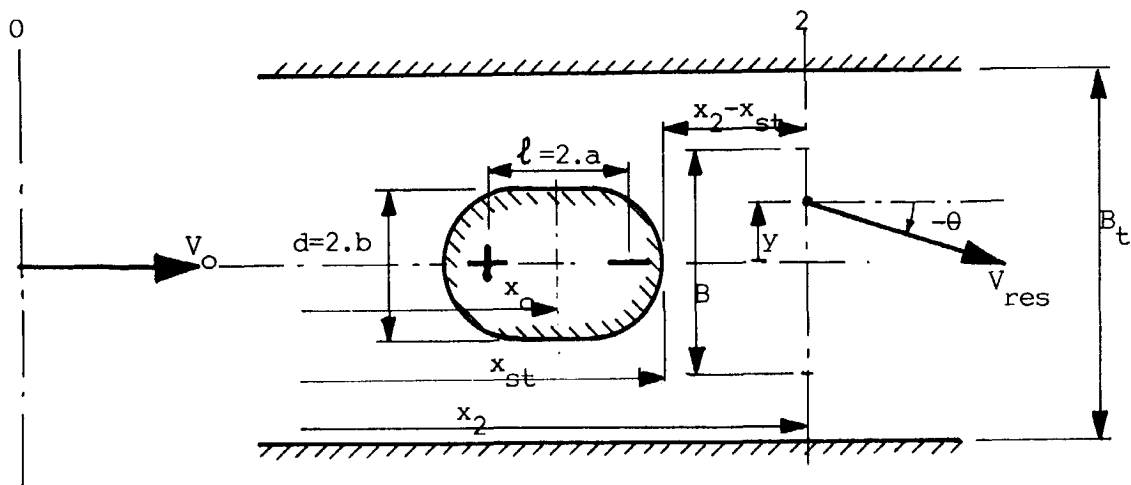
Toevoegsel A bij memorandum M-479

TI-59 programma 30-6-83: "Twee-dimensionaal bron-put lichaam tussen wanden"
(berekening van snelheden;toetsing van benaderings-impulsvergelijking)

Instructie voor gebruik:

	invoer	toetsen	display
I. Laden v. programma:mach. instellen (4 kaartkanten lezen)	4 0	2nd Op 17 lezen	639.39 1 t/m 4
II. Invoer van afmetingen en berekening van $x_{st} - x_o$ (ondergrens van $x_{st} - x_o$)/a gewenste nauwkeurigheid van $x_{st} - x_o$ tunnelbreedte $b = (\text{modeldikte})/2$ $a = (\text{afstand tussen bron- en putlijn})/2$	... *) ... *) B_t b a	STO 37 STO 38 SBR STO SBR RCL SBR SUM R/S SBR EE	 B_t/π b/B_t $k/(2 \cdot V_o \cdot B_t)$ $x_{st} - x_o$ 1111111111
Hierna <u>of</u> direct doorgaan met III. <u>of</u> eerst de plaats van het achterste stuwpunt berekenen via			
III. Invoer van de plaats van het meetvlak 2, het vlak waarin de snelheid wordt berekend: $x_2 - x_o$	$x_2 - x_o$	SBR EE	1111111111
Hierna kunnen stappen IV en/of V volgen.			
IV. Berekening van de situatie bij x_2 integrand van vergel. (26), exact " " " (27), benadering	y	SBR SBR R/S R/S R/S R/S R/S R/S	y V_{res}/V_o **) θ in graden integrand (26) " (27) 2222222222
V. Berekening van tunnelwandinvloed bij x_2 *) bij inlezen van programma van kaarten wordt ingevoerd: 1,000 001 in reg. 37 en 0,000 001 in reg. 38	y	SBR GTO R/S R/S R/S	$u_{wandinvloed}/V_o$ $v_{wandinvloed}/V_o$ 3333333333

**) u_{res}/V_o kan worden opgeroepen via RCL 35
 v_{res}/V_o " " " " via RCL 36



24

TI-59 programma 30-6-83

2nd Lbl A		1/x	coth ..	(
2nd Pgm 08 A		INV SBR		RCL 17	a
INV SBR				x	
2nd Lbl B		<u>2nd Lbl STO</u>		RCL 37	
2nd Pgm 08 B		STO 13	B_t)	
INV SBR		(		A	
2nd Lbl C		CE		(
2nd Pgm 08 C		:		RCL 17	
INV SBR		2nd π		+	
2nd Lbl D		)		RCL 15	
2nd Pgm 08 D		STO 14	B_t/π)	
INV SBR		2nd Rad		B	
2nd Lbl E		R/S		RCL 38	
2nd Pgm 08 E		<u>2nd Lbl RCL</u>		D	
INV SBR		STO 15	$b=d/2$	E	
		(		STO 21	$x_{st}^{-x_o}$
<u>2nd Lbl 2nd sin</u>		CE		R/S	
INV ln x		:			
STO 11	$e^{..}$	RCL 14		<u>2nd Lbl 2nd A'</u>	
1/x		)		STO 22	$x_s^{-x_o}$
STO 12	$e^{-..}$	STO 16	b/B_t	(
((		R/S		CE	
RCL 11				:	
-		<u>2nd Lbl SUM</u>		RCL 14	
RCL 12		STO 17	$a=l/2$	+	
)		(		RCL 18	
:		CE)	
2		:		SBR 2nd tan	$\frac{\pi \cdot (x_s - x_o + a)}{B_t}$
)	sinh ..	RCL 14		STO 23	coth
INV SBR)		(
<u>2nd Lbl 2nd cos</u>		STO 18	$\pi a/B_t$	RCL 22	
INV ln x		SBR 2nd tan		:	
STO 11		1/x		RCL 14	
1/x		STO 19	$\tanh(\pi a/B_t)$	-	
STO 12		(		RCL 18	
((		RCL 15)	
RCL 11		:		SBR 2nd tan	$\frac{\pi \cdot (x_s - x_o - a)}{B_t}$
+		RCL 13		STO 24	coth
RCL 12		:		(
)		(		1	
:		,5		+	
2		-		RCL 20	
)	cosh ..	(		x	
INV SBR		RCL 16		(
<u>2nd Lbl 2nd tan</u>		2nd tan		RCL 23	
INV ln x		:		-	
STO 11		RCL 19		RCL 24	
1/x))	
STO 12		INV 2nd tan		INV SBR	
((:			
RCL 11		2nd π			
-)			
RCL 12		:			
)		2			
:)			
(		STO 20	$\frac{k}{2 \cdot V_o \cdot B_t}$		
RCL 11		R/S			
+					
RCL 12					
))					

TI-59 progr. 30-6-83 (vervolg)

2nd Lbl EE

STO 25	$x_2 - x_0$	-	((
(		RCL 30	CE	
CE		x	x^2	
:		RCL 31	-	
RCL 14		:	1	
+		(+	
RCL 18		RCL 33	2	
)		x^2	x	
STO 26		+	RCL 35	
SBR 2nd sin	$\sinh \frac{\pi(x_2 - x_0 + a)}{B_t}$	RCL 30	x	
STO 27		x^2	(
RCL 26		)))	1	
SBR 2nd cos	$\cosh \frac{\pi(x_2 - x_0 + a)}{B_t}$	STO 35	-	
STO 28		(	RCL 35	
(		RCL 20))	
:		x	:	
RCL 14		RCL 33	RCL 15	b
-		x	)	integrand in
RCL 18		RCL 34	STO 22	vergel. (26)
)		x	((
STO 29		(	RCL 00	
SBR 2nd sin	$\sinh \frac{\pi(x_2 - x_0 - a)}{B_t}$	1	-	
STO 30		:	1	
RCL 29		()	
SBR 2nd cos	$\cosh \frac{\pi(x_2 - x_0 - a)}{B_t}$	RCL 33	x^2	
STO 31		x^2	:	
(1111111111)		+	RCL 15	b
STO 39		RCL 27	)	integrand in
R/S		x^2		vergel. (27)
)	((
<u>2nd Lbl :</u>		-	RCL 36	
(		1	:	
CE		:	RCL 35	
:		()	
RCL 14		RCL 33	INV 2nd tan	
)		x^2	x	
STO 32	y/B_t	+	180	
2nd sin		RCL 30	:	
STO 33	$\sin \pi y/B_t$	x^2	2nd π	
RCL 32))))	
2nd cos		STO 36	STO 24	θ graden
STO 34	$\cos \pi y/B_t$	(	<u>2nd Lbl (</u>	
(		RCL 35	RCL 12	y
1		x^2	2nd Fix 0	
+		+	R/S	
RCL 20		RCL 36	RCL 00	V_{res}/V_0
x		x^2	2nd Fix 4	
(		)	R/S	
RCL 27		\sqrt{x}	RCL 24	θ graden
x		INV SBR	2nd Fix 2	
RCL 28		V_{res}/V_0	R/S	
:			RCL 22	
(			2nd Fix 6	
RCL 33		<u>2nd Lbl SBR</u>	R/S	
x^2		STO 12	RCL 23	
+		SBR :	R/S	
RCL 27		STO 00	(2 x RCL 39)	2222222222
x^2		V_{res}/V_0	R/S	
)			GTO (

24

TI-59 progr. 30-6-83 (vervolg)

2nd Lbl GTO

STO 12 y
 SBR :
 ((
 RCL 25
 +
 RCL 17
)
 x²
 +
 RCL 12
 x²
)
 STO 09
 ((
 RCL 25
 -
 RCL 17
)
 x²
 +
 RCL 12
 x²
)
 STO 10
 (
 RCL 35
 -
 1
 -
 RCL 20
 :
 2nd π
 x
 RCL 13
 x
 ((
 RCL 25
 +
 RCL 17
)
 :
 RCL 09
 -
 (
 RCL 25
 -
 RCL 17
)
 :
 RCL 10
))
 STO 26
 (
 RCL 36
 -
 RCL 20
 :
 2nd π

x
 RCL 13
 x
 RCL 12
 x
 (
 RCL 09
 1/x
 -
 RCL 10
 1/x
))
 STO 29
2nd Lbl x²
 RCL 26
 2nd Fix 4
 R/S
 RCL 29
 R/S
 (
 3
 x
 RCL 39
)
 R/S
 GTO x²

einde

$$\frac{v_{wandinvl.}}{V_o}$$

$$u_{wandinvloed}/V_o$$

$$v_{wandinvloed}/V_o$$

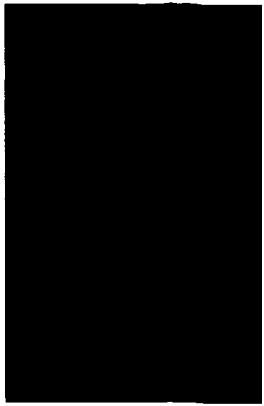
3333333333

$$\frac{u_{wandinvl.}}{V_o}$$

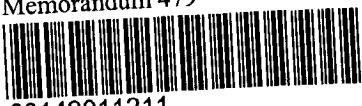
TI-59 progr. 30-6-83

Inhoud van de registers

00	V_{res}/V_o		
09	$(x_2-x_o+a)^2+y^2$		
10	$(x_2-x_o-a)^2+y^2$		
11	e^{\dots}	na SBR	SBR:
12	$e^{-\dots}$	<u>12</u>	y
13	B_t		
14	B_t/π		
15	b		
16	$\pi.b/B_t$		
17	a		
18	$\pi.a/B_t$		
19	$\tanh(\pi.a/B_t)$		
20	$k/(2.V_o.B_t)$		
21	$x_{st}-x_o$		
22	x_s-x_o	<u>22</u> *	$[(V_{res}/V_o)^2-1+2.u/V_o.(1-u/V_o)]/b$
23	$\coth \pi.(x_s-x_o+a)/B_t$	<u>23</u> **)	$-(V_{res}/V_o-1)^2/b$
24	$\coth \pi.(x_s-x_o-a)/B_t$	<u>24</u>	hoek θ in graden
25	x_2-x_o		na SBR GTO:
26	$\pi.(x_2+a)/B_t$	<u>26</u>	$\frac{u_{wandinvloed}}{V_o}$
27	$\sinh \pi.(x_2-x_o+a)/B_t$		
28	$\cosh \pi.(x_2-x_o+a)/B_t$		
29	$\pi.(x_2-a)/B_t$	<u>29</u>	$\frac{v_{wandinvloed}}{V_o}$
30	$\sinh \pi.(x_s-x_o-a)/B_t$		
31	$\cosh \pi.(x_s-x_o-a)/B_t$		
32	$\pi.y/B_t$		
33	$\sin \pi.y/B_t$		
34	$\cos \pi.y/B_t$		
35	u_{res}/V_o		*) integrand van vergelijking (26)
36	v_{res}/V_o	**)	" " " (27)
37	1,000 001		
38	0,000 001		
39	1111111111		



Memorandum 479



60142011211