

STROOMSNELHEIDS- EN SCHUIFSPANNINGSMETINGEN

LANGS GLADDE- EN RUWE WANDEN

IR.R.H.PITLO

Nota no. 16

Laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie
Landbouwhogeschool
juli 1970
(66-51; 67-51)

1996525

INHOUD:

	pag.:
1. Inleiding	1
2. Literatuur overzicht	1
a. gladde wanden	1
b. ruwe wanden	4
3. Instrumentarium voor het onderzoek	7
a. wandpitotbuis	7
b. Prestonbuis	7
c. vervalmeter	8
d. meetgoot	8
4. Bespreking van het onderzoek en de resultaten	9
a. gladde wanden	9
b. ruwe wanden	10
5. Konklusies	13
6. Literatuurlijst	14

1. Inleiding.

Het onderzoek van turbulente stroming in open kanalen en het ontwerpen van waterlopen maken een studie van het verband tussen stroomsnelheids- en schuifspanningsverdeling noodzakelijk.

Reeds vele jaren houden verschillende onderzoekers zich bezig met de bestudering van stromingsverschijnselen van vloeistoffen en gassen langs de wanden van buizen en open kanalen. Vele ^{bekend geworden} publikaties op dit gebied zijn reeds verschenen.

In het onderstaande wordt naast een overzicht van een aantal van deze publikaties, het resultaat weergegeven van een serie metingen van snelheidsprofielen met behulp van een zgn. "wandpitotbuis" in een rechthoekige goot met gladde- en kunstmatig ruw gemaakte wanden. In de zelfde goot werd met behulp van "Prestonbuizen" de schuifspanningsverdeling gemeten. Het onderzoek werd verricht in het laboratorium voor Hydraulica en Afvoerhydrologie van de Landbouwhogeschool te Wageningen.

2. Literatuuroverzicht.

Omstreeks 1932 leidde Prandtl¹⁾ met behulp van dimensie-analyse de zgn. "wandsnelheidswet" of "innerlaw" af:

$$\frac{U}{U_*} = f_1 \left(\frac{U_* y}{\nu}, \frac{y}{k} \right) \quad (1)$$

hierin is : U = gemiddelde snelheid in een punt van de vloeistof

U_* = schuifspanningssnelheid $(= \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}})$

ρ = dichtheid van de vloeistof

y = afstand tot de wand

ν = kinematische viscositeit

k = wandruwheidsmaat

τ_0 = schuifspanning aan de wand.

a. Gladde wanden.

Heeft men te maken met turbulente stroming langs hydraulisch gladde wanden, dan kan vergelijking (1) worden vereenvoudigd tot:

$$\frac{U}{U_*} = f_2 \left(\frac{U_* y}{\nu} \right) \quad (2)$$

Deze betrekking die in 1950 experimenteel door Ludwig en Tillman²⁾ werd bevestigd, geldt in de onmiddellijke omgeving van de wand echter buiten de laminaire sublaag^{*)}

*) Experimenteel werd de dikte Δ van de laminaire sublaag vastgesteld:

$$\frac{\Delta U_*}{\nu} < 30, \text{ zie Millikan } ^4)$$

Als bovengrens voldoet: $\frac{U_* y}{\nu} < 500 \text{ à } 600$.

Prandtl vond voor de functie f_2 :

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{U_* y}{\nu} + B \quad (3)$$

Ter bepaling van de konstante B voert men als randvoorwaarde in, dat de snelheid $v = 0$ op een afstand y^1 van de wand. Dus: $B = -5,75 \log \frac{U_* y^1}{\nu}$

$$\text{of } \frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{y}{y^1} \quad (3a)$$

De waarde van y^1 werd door Nikuradse³⁾ bepaald voor hydraulisch gladde wanden:

$$y^1 = \frac{0,108 \nu}{U_*}$$

Ingevuld in vergelijking (3) volgt:

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{U_* y}{\nu} + 5,5 \quad (3b)$$

$$\text{begrenzing: } 1,47 < \log \frac{U_* y}{\nu} < \pm 2,0$$

Betreffende de waarde van B lopen de meningen van verschillende onderzoekers wat uiteen. Millikan⁴⁾ vond een betere aansluiting bij de meetpunten van Nikuradse met $B = 5,0$ i.p.v. $B = 5,5$; eigen metingen (zie fig. 2) toonden aan, dat de waarde van B gemiddeld ongeveer 5,5 bedraagt. Weliswaar werd bij één serie metingen (fig. 1) een gemiddelde waarde van ongeveer 5,0 gevonden, maar de meetnauwkeurigheid was in dit geval o.a. door de lage stroomsnelheid van het water in de goot beperkt.

Tabel 1: waarden van B bij hydraulisch gladde wanden.

Nikuradse	5,48
Prandtl	5,46
Millikan	5,0
Ludwig en Tillman	$\pm 5,5$
Hydr. Lab.	$\pm 5,5$

Uitgaande van vergelijking (2) stelde Preston⁵⁾ (1954), dat in het gebied waar deze functie geldt, ^{de stromingskondities} uitsluitend afhankelijk moeten zijn van

de fysische eigenschappen van de vloeistof ρ en ν , van τ_0 en van een passende lengtemaat.

Plaatst men in het betreffende gebied een pitotbuis met cirkelvormige dwarsdoorsnede (d), (zie fig. 6), naar de onderzoeker "Prestonbuis" genoemd, dan zal ook het verschil tussen stuwdruk (P) en statische druk (p_o), dus $P-p_o$, slechts een functie zijn van ρ , v , τ_o en d , waarbij als lengte de diameter (d) van de Prestonbuis is ingevoerd in plaats van de afstand (y) tussen het hart van de buis en de wand (met d wordt de uitwendige diam. bedoeld, in fig. 6 : d_2)

Deze vervanging is slechts toegestaan indien men tijdens de ijking en de metingen steeds dezelfde pitotbuis toepast of een aantal geometrisch gelijkvormige buizen, aangezien dan steeds $\frac{y}{d}$ konstant is. Hierbij wordt voor y de afstand genomen tussen de wand en het hart van de Pitotbuis.

Preston vond:

$$\frac{(P-p_o)d^2}{\rho v^2} = f_3 \left(\frac{\tau_o d^2}{\rho v^2} \right) \quad (4)$$

In deze betrekking kan men $P-p_o$ vervangen door: $\rho g \Delta H$ waarin ΔH het verschil in manometer aflezing tussen statische en dynamische buis voorstelt.

De functie f_3 werd door Preston empirisch in een cirkelvormige buis bepaald, waarbij τ_o uit het drukverval kon worden berekend.

Hij vond:

$$\log \frac{\tau_o d^2}{4 \rho v^2} = -1.396 + \frac{7}{8} \log \frac{g \Delta H d^2}{4 v^2} \quad (5)$$

begrenzings: $4,5 < \log \frac{g \Delta H d^2}{4 v^2} < 6,5$

Hsu ⁶⁾ (1955) paste de methode van Preston toe in stroming met een negatieve drukgradiënt ^{*} en vond goede resultaten. De verhouding tussen de in- en uitwendige buisdiameter van de Prestonbuis bleek van weinig invloed te zijn op de resultaten van zijn metingen.

Dutton ⁷⁾ (1956) en Ferriss ⁸⁾ (1965) komen beiden tot de konklusie, dat het meten van schuifspanningen met behulp van Preston buizen tot zeer goede resultaten leidt.

Uitgaande van vergelijking (5) werd door Ippen, Drinker e.a. ^{9, 10)} (1960) de schuifspanningsverdeling in trapeziumvormige kanalen bepaald. De methode van Preston bleek hierbij goede resultaten op te leveren. (zie opmerking pag. 6).

Ook Breusers ¹¹⁾ (1962) bevestigt de bruikbaarheid van de methode van Preston voor het meten van schuifspanningen langs gladde wanden.

^{*} Zowel Preston als Hsu verrichtten hun metingen in stromende lucht (windtunnels).

Voor water waar men tevens rekening moet houden met de zwaarte kracht treedt voor het drukverval uiteraard het piëz. verval in de plaats.

Tenslotte dient nog een publikatie van Rajaratnam en Muralidhar ¹³⁾ (1969) te worden vermeld handelende over de schuifspanningsverdeling in rechthoekige open kanalen met gladde wanden. Metingen met behulp van Pitot en Preston buizen werden verricht in schietend water aangezien in stromend water tengevolge van de lage stroomsnelheden onnauwkeurige resultaten werden verkregen.

De gevonden snelheidsprofielen voldeden goed aan vergelijking 3b. De schuifspanningsverdeling als functie van de kanaal afmetingen en van het Reynoldsgetal werd onderzocht $\left(\frac{U_{\max}}{v} \frac{Y_{\max}}{k} \right)$.

b. Ruwe wanden.

Voor hydraulisch ruwe wanden wordt de snelheidsverdeling nabij de wand slechts bepaald door $\frac{Y}{k}$, vergelijking (1) wordt:

$$\frac{U}{U_*} = f_4 \left(\frac{Y}{k} \right) \quad (6)$$

Op analoge wijze als is beschreven bij hydraulisch gladde wanden, kan worden afgeleid:

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{Y}{y^1} \quad (6a)$$

waarin y^1 de afstand tot de wand voorstelt waarop de ongestoorde logaritmische snelheidsverdeling de waarde $U=0$ aangeeft.

Nikuradse ¹²⁾ vond: $y^1 = \frac{k}{30}$ en in combinatie met vergelijking (3a):

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{Y}{k} + 8,5 \quad (6b)$$

met als begrenzing: $\log \frac{U_* k}{v} > 1,83$ *)

Voor eenparige stroming langs ruwe wanden met gefixeerde ruwheidselementen blijkt deze vergelijking goed te voldoen.

Op grond van theoretische overwegingen kwam Millikan ⁴⁾ tot een begrenzing van het geldigheidsgebied van de logaritmische snelheidsverdeling (verg. 6b). Hij ging uit van de door Prandtl ontwikkelde "wandsnelheidswet" (of "innerlaw") en van de van von Karman ¹⁴⁾ (1930) afkomstige "snelheidsverlieswet" (of "outerlaw") :

$$\frac{U_{\max} - U}{U_*} = f \left(\frac{Y}{a} \right)$$

Millikan veronderstelde een overlappingsgebied op enige afstand van de wand waarin beide wetten gelden. Voor dit gebied toonde hij het bestaan van een logaritmische snelheidsverdeling aan. Zeer dicht bij de wand en tussen de op de wand bevestigde ruwheidselementen mogen afwijkingen van deze logaritmische snelheidsverdeling worden verwacht.

) De geldigheid van verg. (6b) wordt bepaald zowel door de wandruwheid als door het Reynoldsgetal van de stroming door de doorsnede. Deze invloeden kunnen gezamenlijk worden uitgedrukt in de dimensieloze parameter $\frac{U_ k}{v}$.

Als benedengrens van genoemde snelheidsverdeling geeft Millikan $\frac{y}{k} = 4$ en als bovengrens $\frac{y}{a} < 0,1$, waarbij a de waarde van y in het midden van een buis of open kanaal voorstelt ($a = y_{\max}$).

Bij metingen langs kunstmatig ruw gemaakte wanden in het Hydraulica Laboratorium werden dicht bij de wand inderdaad afwijkingen van het logaritmische snelheidsprofiel gevonden (zie fig. 4). De benedengrens van de logaritmische snelheidsverdeling lag bij $\frac{y}{k} = 2 \text{ à } 3$.

In een recent verschenen publikatie van O'Loughlin en Shastri Annambhotla ¹⁵⁾ (1969), worden eveneens afwijkingen van de logaritmische snelheidsverdeling in de omgeving van een ruwe wand beschreven. De afwijkingen treden op voor $\frac{y}{k} < \pm 2$. De aard van de toegepaste wandruwheid (los van elkaar staande kubussen) wijkt echter sterk af van de in het Hydraulica Laboratorium toegepaste uniforme "korrelruwheid". Een directe vergelijking van de resultaten is daarom niet mogelijk.

De bepaling van de schuifspanningen langs ruwe wanden is minder eenvoudig dan langs gladde wanden. Ippen e.a. ⁹⁾ trachtten uitgaande van vergelijking (6) de functiewaarden van de door Preston voor ruwe wanden opgestelde betrekking te vinden:

$$\frac{\rho g \Delta H}{\tau_o} = f_5 \left(\frac{d}{k} \right) \quad (7)$$

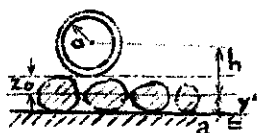
Dit bleek alleen mogelijk indien de Preston buis altijd op dezelfde plaats t.o.v. de ruwe wand wordt toegepast.

Voor een uniforme ruwheid en hydraulisch (geheel) ruwe wanden stelden zij een empirische betrekking op, die echter zeer beperkt toepasbaar is.

Hwang en Laursen ¹⁶⁾ (1963) leidden eveneens uitgaande van vergelijking (6) een verband af tussen ΔH en τ_o enerzijds en a , h en k anderzijds:

$$\begin{aligned} \frac{\rho g \Delta H}{\tau_o} = 16,531 \left\{ \left[\log \frac{30h}{k} \right]^2 - (\ln)(\log \frac{30h}{k}) \left[0,25 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + 0,0625 \left(\frac{a}{h} \right)^4 + \right. \right. \\ \left. \left. + 0,026 \left(\frac{a}{h} \right)^6 + \dots \right] + \ln^2 \left[0,25 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + 0,1146 \left(\frac{a}{h} \right)^4 + 0,0594 \left(\frac{a}{h} \right)^6 + \dots \right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

hierin is: h = de afstand van het hart van de Preston buis tot het vlak (op een afstand y^1 van de wand) waar de logaritmische snelheidsverdeling de waarde $U=0$ aangeeft (zie fig.)
 a = de inwendige diameter van de Preston buis



De grootste moeilijkheid vormt ook hier weer de onbekende positie van de Preston-buis t.o.v. de ruwe wand (m.a.w. de onbekende afstand h). De gemaakte fout bij een schatting van h bleek te verminderen, door een zo groot mogelijke diameter voor de Prestonbuis te kiezen, waarbij deze diameter wel kleiner moet zijn dan het geldigheidsgebied van vergelijking (6).

Uit de proeven van Hwang en Laursen bleek verder, dat de fouten in de uitkomsten van τ_0 groter werden naarmate de korreldiameter toenam. Voor een relatieve bepaling van schuifspanningen en schuifspanningsverdelingen langs wanden met een uniforme ruwheid is de methode echter bruikbaar. Men kan de hierbij verkregen uitkomsten eventueel corrigeren indien men de totale schuifweerstand kent b.v. uit verhangmetingen.

Opmerking.

De proeven van Preston werden verricht in een cirkelvormige buis. De empirisch gevonden konstante: $\sim 1,396$ uit vergelijking (5) heeft dus alleen betrekking op soortgelijke omstandigheden als die waaronder Preston zijn proeven deed. De geldigheid van vergelijking (5) bij toepassing op stroming langs een vlakke wand werd door sommige onderzoekers aangevochten. Enkele van hen vonden een iets andere waarde voor de genoemde konstante.

Ippen, Drinker e.a.^{9, 10)} toonden echter aan, dat in een goot met gladde wanden de verkregen uitkomsten van de schuifspanning (τ_0) bij toepassing van formule (5) binnen 5% gelijk zijn aan die welke werden berekend met behulp van het Reynoldsgetal. Toepassing van de formule van Preston op stroming langs gladde vlakke wanden lijkt daarom verantwoord.

3. Instrumentarium voor het onderzoek.

a. Wandpitotbuis.

Voor de meting van snelheidsprofielen werd gebruik gemaakt van een wandpitotbuis zoals deze is beschreven door Ippen e.a.⁹⁾. Met dit instrument is het mogelijk om stroomsnelheden te meten tot 0,5 mm van de wand. In fig. 5 en op de foto's is deze wandpitotbuis afgebeeld. De statische- en dynamische drukken worden elk met een afzonderlijke buis gemeten. De statische buis is boven de dynamische buis gemonteerd, teneinde de zone met sterke dynamische drukveranderingen bij de wand zo min mogelijk te verstoren. De afstand tussen statische en dynamische buis is experimenteel zodanig gekozen, dat geen onderlinge beïnvloeding meer optreedt. Dit bleek bij 4,5 mm het geval te zijn.

Alvorens de wandpitotbuis werd toegepast voor het meten van snelheidsprofielen, werd hij eerst in het midden van de goot vergeleken met een standaard Pitotbuis. Gemiddeld bleek (zie tabel 2), dat met de wandpitotbuis een 2% lagere snelheid werd gemeten dan met de standaard Pitotbuis. Deze geringe afwijking ligt in de orde van de meetnauwkeurigheid, er werd niet voor gecorrigeerd *)

Tabel 2: Vergelijking wandpitotbuis met standaard pitotbuis

Q (l/sec)	snelheid in m/sec		% afwijking
	wand pitot	standaard pitot	
10	0,171	0,174	1,9
12	0,197	0,202	2,5
14	0,228	0,234	2,6
20,7	0,342	0,347	1,5
31,6	0,514	0,524	1,9

b. Preston buis.

De schuifspanningsmetingen werden verricht met een drietal "Preston buizen" (zie foto en fig. 6) genoemd naar de onderzoeker die deze meettechniek ontwikkelde. De vormgeving van deze Prestonbuis kwam tot stand tijdens een uitgebreid onderzoek verricht door Ippen, Drinker, Jobin en Noutsopoulos⁹⁾.

De afmetingen van het instrument zijn weergegeven in tabel 3 en in fig. 6. Door een geschikte buisdiameter te kiezen bereikt men dat de metingen welke met de gekozen buis verricht worden liggen binnen de geldigheidsgrenzen van de door Preston gegeven relatie (5) dus:

$$4,5 < \log \frac{g \Delta H d^2}{4 v^2} < 6,5$$

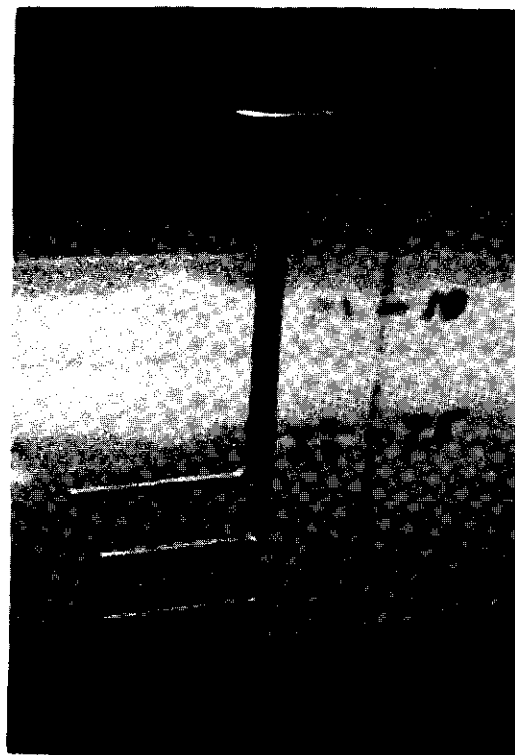
*) Een eventuele correctie had weinig zin, aangezien van de standaard Pitotbuis geen nauwkeurige ijking beschikbaar was.



1.

1. Meetopstelling met vervalmeter (links)

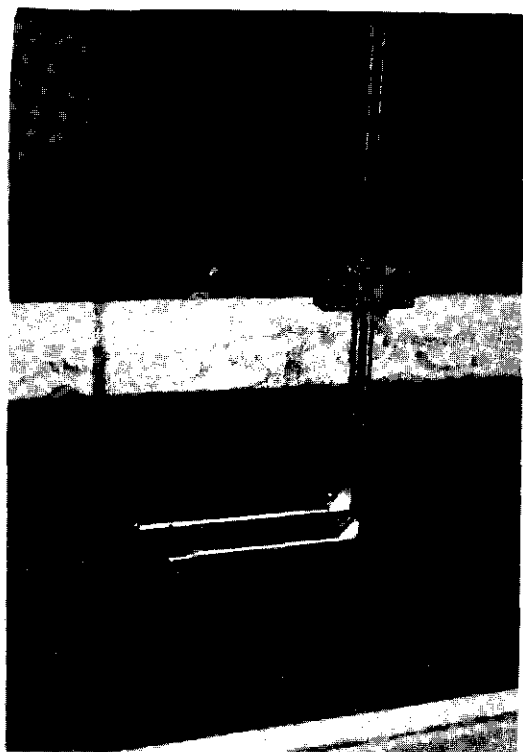
2. Prestonbuis (gladde wand)



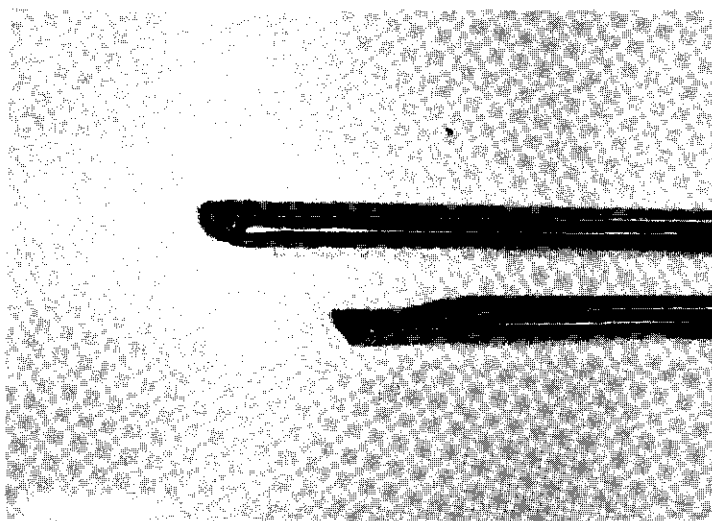
2.

3. Wandpitotbuis (ruwe wand)

4. Detail van wandpitotbuis



3.



4.

Tijdens het onderzoek werd gewerkt met een drietal geometrisch vrijwel gelijkvormige Preston buizen.

Tabel 3.

Buis no.	diameter statische buis (mm)	diameter dynamische buis (mm)		verhouding inv./uitw. dyn. buis	afstand stat.- dyn. buis (mm)
		inwendig	uitwendig		
2	6,09	6,06	9,96	0,608	25
3	2,96	3,00	5,00	0,600	15
4	2,95	1,84	2,95	0,623	12

Voor de verhouding tussen de in- en uitwendige diameters van de dynamische buizen werd in navolging van Preston ⁵⁾ ongeveer 0,6 gekozen, hoewel latere onderzoekers ⁶⁾ aantoonde, dat deze verhouding weinig invloed heeft op de door Preston verkregen ijkrelatie (5).

c. Vervalmeter.

De niveau verschillen tussen de statische- en dynamische buis van de wandpitot- en Preston buizen werden allen gemeten met behulp van een zgn. vervalmeter ^{*}) (zie fig. 7 en foto). Dit instrument bestaat uit een omgekeerde U-buis manometer met sterk verwijde benen. Op de vloeistofspiegels in de benen drijven vlotter met schaalverdelingen. Via een optisch systeem worden de schaalverdelingen 40 maal vergroot op een scherm geprojecteerd. Met dit instrument kunnen niveau verschillen tot 0,1 mm worden afgelezen. Honderdsten van een mm kunnen worden geschat.

d. Meetgoot.

Alle metingen werden verricht in een rechthoekige glazen meetgoot met een breedte van 0,40 en een lengte van 5 m. Het waterniveau in de goot kon door middel van een verstelbare schuif aan het benedenstroomse einde van de goot worden geregeld. De goot is instelbaar onder verschillende hellingen. De debieten werden gemeten met een volumetrisch geijkte Rehbock meetoverlaat. Voor de proeven met hydraulisch ruwe wanden werden de wanden en de bodem van de meetgoot bekleed met 5 mm dikke p.v.c.-platen welke beplakt waren met glaspapier met een doorsnede van gemiddeld 1,4 mm.

^{*}) fabrikaat fa. van Essen N.V. te Delft.

It is to be hoped that the Commission will

be able to complete its work in a timely manner.

Very truly yours,

W. J. P.

The Commission on the Organization of the Executive Branch of the Government has the honor to acknowledge the receipt of your letter of the 10th instant, in which you express your interest in the work of the Commission and your desire to be kept advised of its progress. The Commission is pleased to inform you that it is currently engaged in a study of the various agencies of the Executive Branch, with a view to determining the most effective method of organizing them. The results of this study will be reported to the President in a comprehensive report, which is expected to be completed within the next few months.

The Commission is also engaged in a study of the various departments of the Executive Branch, with a view to determining the most effective method of organizing them. The results of this study will be reported to the President in a comprehensive report, which is expected to be completed within the next few months.

The Commission is also engaged in a study of the various agencies of the Executive Branch, with a view to determining the most effective method of organizing them. The results of this study will be reported to the President in a comprehensive report, which is expected to be completed within the next few months.

The Commission is also engaged in a study of the various departments of the Executive Branch, with a view to determining the most effective method of organizing them. The results of this study will be reported to the President in a comprehensive report, which is expected to be completed within the next few months.

The Commission is also engaged in a study of the various agencies of the Executive Branch, with a view to determining the most effective method of organizing them. The results of this study will be reported to the President in a comprehensive report, which is expected to be completed within the next few months.

4. Bespreking van het onderzoek en de resultaten.

a. Gladde wanden.

Met behulp van de eerder beschreven wandpitot buis werden langs een loodlijn op de bodem snelheidsprofielen gemeten op 5; 7,5; 10 en 20 cm uit de zijwand van de meetgoot en ongeveer 2 meter benedenstrooms van de instroomzijde van de meetgoot. Tijdens deze eerste serie metingen bedroeg het debiet 20,7 l/sec, de waterdiepte in de meetgoot werd door het omhoogdraaien van een schuif aan het einde van de goot ingesteld op $\pm 16,3$ cm. De schuifspanningssnelheid $U_* (= \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}})$ werd berekend met behulp van de formule van Preston⁵⁾. Ter plaatse van de te meten snelheidsprofielen werden hiertoe schuifspanningsmetingen verricht met Preston buizen $\varnothing 3$ mm; $\varnothing 5$ mm en $\varnothing 10$ mm. De buisdiameter moet, afhankelijk van de stroomsnelheid en de watertemperatuur, zodanig worden gekozen, dat de grootte van $\log \frac{g \Delta H d^2}{U_*^2}$ ligt tussen de door Preston gevonden grenzen. Bij het gekozen debiet van 20,7 l/sec bleek dit ter plaatse van de te meten snelheidsprofielen voor elk van de drie gebruikte Preston buizen het geval te zijn. De resultaten van deze serie metingen zijn weergegeven in figuur 1. De gevonden snelheidsprofielen zijn in een dimensieloze vorm uitgezet als $\frac{U}{U_*}$ tegen $\log \frac{U_* y}{\nu}$. Voor $\frac{U_* y}{\nu} > 30$ (de grens van de laminaire sublaag) liggen de meeste metingen uit deze 1^e serie om een lijn met vergelijking:

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{U_* y}{\nu} + 5,0$$

De metingen werden hierna voortgezet bij debieten van 10,0; 20,7; 32,1 en 40,0 l/sec. De waterdiepten bedroegen resp.: 6,5; 9,5; 11,5 en 20,4 cm. De schuif aan het einde van de meetgoot werd hierbij niet omhoog gedraaid. Voor de bepaling van U_* werden Preston buizen $\varnothing 5$ en $\varnothing 3$ mm gebruikt. In fig. 2 zijn de meetresultaten weergegeven. De metingen voldoen aan vergelijking 3b:

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \frac{U_* y}{\nu} + 5,5$$

Hieruit valt af te leiden, dat langs gladde wanden de schuifspanning met behulp van Preston buizen voldoende nauwkeurig kan worden gemeten.

Bij dit resultaat kan nog het volgende worden opgemerkt:

- 1e. Tijdens alle metingen werd hinder ondervonden van zwevend vuil in het water. Vooral bij het debiet van 20,7 l/sec, waarbij t.g.v. het omhoog draaien van de schuif in de meetgoot de stroomsnelheid laag was, zette dit vuil zich af op de bodem en wanden van de meetgoot en bovendien op de pitotbuizen. Proeven waarbij bodem en/of wanden gedeeltelijk werden gereinigd toonden aan, dat de meetresultaten door deze vuilafzettingen werden beïnvloed.

Reiniging van de pitotbuizen tijdens de meting is zonder een verstoring van hun positie nauwelijks mogelijk, zodat moet worden gestreefd naar korte meettijden. Met het gebruikte meetsysteem waren echter korte meettijden niet te realiseren. De kleine openingen van de pitot buis en de wijde buizen van de vervalmeter veroorzaakten wachttijden van tenminste 10 minuten per meting.

Mogelijk werd de wat lagere waarde van B uit de 1^e serie metingen (mede) veroorzaakt door genoemde vuilafzettingen.

2e. De reproduceerbaarheid van de metingen liet vooral bij lage stroomsnelheden af en toe te wensen over. Ook hier kan sprake zijn geweest van beïnvloeding door zwevend vuil. Vervolgens werd bij een debiet van 20,7 l/sec met behulp van de wandpitotbuis in een willekeurig gekozen dwarsprofiel op 66 plaatsen de snelheid gemeten. Bovendien werd, met behulp van de Preston buis, langs de omtrek van het gekozen profiel op 36 plaatsen de schuifspanning gemeten. In figuur 3 zijn de resultaten van deze metingen weergegeven. Er valt uit af te leiden, dat de grootste schuifspanning in een rechthoekige goot optreedt nabij het wateroppervlak. Ter controle van de gemeten snelheden met de wandpitotbuis werd op 20 plaatsen in hetzelfde dwarsprofiel met een Ott-molen de stroomsnelheid gemeten. In fig. 5 zijn deze metingen tussen haken weergegeven. De resultaten komen goed overeen met de wandpitotbuis metingen.

Een moeilijkheid deed zich voor bij de metingen met de Prestonbuis langs de verticale zijwanden van de goot. Bij normaal vertikaal gebruik van de Prestonbuis zou de statische buis zeer dicht bij, of zelfs tegen de gootwand komen. Om deze reden werd bij de metingen langs de verticale zijwanden de buis onder een hoek van 45° t.o.v. de wand opgesteld (fig.A)

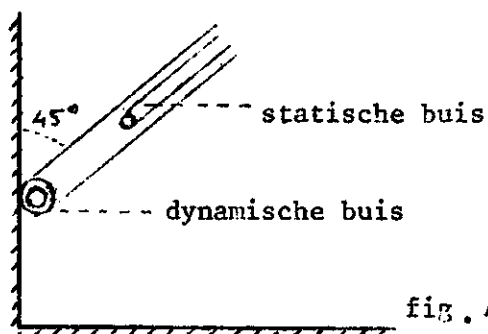


fig. A

Aangezien de metingen werden verricht in een recht kanaal bij een vrij regelmatige snelheidsverdeling mocht worden verwacht, dat in dit geval de opstelling van de buis onder een hoek vrijwel geen afwijkingen in de aflezing zou veroorzaken. Proeven genomen op verschillende plaatsen van de bodem met de Prestonbuis onder verschillende hoeken

bevestigden deze veronderstelling. Voor algemene toepassing leent deze methode zich echter niet.

Het kan in sommige gevallen wenselijk zijn, om niet zoals in fig. 3 de schuifspanning als absolute grootte te hanteren, maar deze te vervangen door een dimensieloze vorm: $\frac{\tau_0}{\bar{\tau}_0}$, waarin $\bar{\tau}_0$ de gemiddelde schuifspanning voorstelt langs de omtrek van een gekozen profiel van de waterloop. De mogelijkheid van een directe vergelijking met de schuifspanningsverdeling op andere plaatsen in de waterloop, door de aldaar optredende schuifspanningen te delen door $\bar{\tau}_0$ van het eerst gekozen profiel, wordt hiermee vereenvoudigd.

De bepaling van $\bar{\tau}_0$ voor het gekozen profiel kan het eenvoudigste grafisch geschieden met behulp van een planimeter:

$$\bar{\tau}_0 = \Sigma \frac{\tau_0 \Delta 0}{0} \quad (\text{of } \bar{\tau}_0 = \frac{1}{0} \int_0 \tau_0 d0)$$

Hierin stelt 0 de natte omtrek voor.

Bepaalt men op deze wijze de gemiddelde schuifspanning in fig. 3, dan blijkt deze $\pm 0,25 \text{ kg/m}^2$ te bedragen.

b. Ruwe wanden.

De eerder beschreven meetgoot werd inwendig bekleed met 5 mm dikke PVC platen welke met glasparels (diameter gemiddeld 1,4 mm) waren beplakt. Dit plakken geschiedde door de glasparels te strooien op de met lak bespoten PVC platen. Aldus werd een vrij dichte pakking verkregen. Vervolgens werden, op overeenkomstige wijze als bij de proeven met gladde wanden, in het midden van de goot op een afstand van ± 3 meter beneden-strooms van de instroomzijde snelheidsprofielen gemeten. Hierbij werd van dezelfde wandpitotbuis gebruik gemaakt.

De afstand tot de wand werd, overeenkomstig Nikuradse ¹²⁾ vastgesteld, door bij de afgelezen afstand van de wandpitotbuis tot de bovenzijde van de ruwe laag telkens de gemiddelde korreldiameter (1,4 mm) op te tellen. Met behulp van een lampje en een spiegeltje werd er steeds op gelet, dat de wandpitotbuis in zijn laagste stand (dus tegen de ruwe wand geplaatst) niet op een toevallig sterk uitstekende oneffenheid rustte. Als ruwheidsmaat k werd de gemiddelde korreldiameter van de glasparels gebruikt. Schlichting ¹⁷⁾ (pag. 527) geeft afhankelijk van de dichtheid van de pakking voor glasparels een ruwheidsmaat die varieert van $\pm 0,5$ (dichtste pakking) tot ± 4 maal de korreldiameter.

Er werden verschillende series snelheidsprofielen gemeten bij wisselende debieten en wisselende bodemhellingen, getracht werd om telkens een bij benadering eenparige stroming te verkrijgen. De gemiddelde schuifspanningssnelheid $\bar{U}_*$ werd dan berekend uit de hydraulische straal (R) en het gemiddelde piezometrische verhang ($\bar{S}_p$): $\bar{U}_* = \sqrt{g R \bar{S}_p}$ *). Een onzekerheid vormt hierbij de beperkte nauwkeurigheid waarmee $\bar{S}_p$ kan worden bepaald (zie fig. 4a). Voor een 2-tal gevallen werd $\bar{U}_*$ ter plaatse van het gemeten snelheidsprofiel met behulp van een Prestonbuis en de formule van Iwang en Laursen ¹⁶⁾ berekend. De uitkomsten waren $\pm 50\%$ lager dan die welke werden verkregen uit de verhangmetingen.

In figuur 4b is van enkele metingen het verband weergegeven tussen $\bar{U}_*$ en y/k .

) Bij de laatste serie proeven werd de bekleding van de zijwanden weggelaten en werd uitsluitend met een ruwe bodem gewerkt. In één geval werd hierbij $\bar{U}_$ berekend uit $\bar{S}_p$ en de waterdiepte y (vgl. Ippen ⁹⁾).

De meeste van de gemeten snelheidsprofielen blijken te liggen in het overgangsgebied tussen hydraulisch glad en hydraulisch ruw: $0,55 \leq \log \frac{U_* k}{\nu} \leq 1,83$. In dit gebied geldt: $U/U_* = 5,75 \log y/k + C$, waarbij C afhangt van de waarde van $\log \frac{U_* k}{\nu}$ (zie Nikuradse, 12)

Half logaritmisch uitgezet ontstaat een serie evenwijdige rechten. Voor y/k kleiner dan 2 à 3 treden afwijkingen op van dit halflogaritmische snelheidsprofiel, hetgeen in overeenstemming is met de resultaten van andere onderzoekers. Voor y/k groter dan 8 à 10 blijken ook afwijkingen te ontstaan (zie fig. 4). In hoeverre deze laatste afwijkingen kunnen worden toegeschreven aan een nog onvolledig ontwikkeld snelheidsprofiel in het vrij korte (3 meter lange) aanvoerkanaal moet nader worden onderzocht. Ippen ⁹⁾ werkte bij overeenkomstige proeven met een aanvoerkanaal van ongeveer 7 meter lengte. Ook de onzekerheden in de bepaling van U_* en y/k maken voortzetting van het onderzoek in een goot met grotere lengte bij verschillende ruwheden noodzakelijk.

5. Konklusies

1. Het meten van snelheidsprofielen met behulp van wandpitotbuizen levert over het algemeen goede resultaten op. Het stromingsbeeld wordt door de kleine afmetingen van het instrument, nauwelijks verstoord.
2. De bepaling van schuifspanningen langs gladde wanden volgens de methode van Preston levert resultaten op welke goed overeenkomen met de uithomsten van o.a. Nikuradse. In een rechthoekige goot met gladde wanden treden de grootste schuifspanningen op nabij het wateroppervlak.
3. Zwevend vuil en dode algen kunnen zich tijdens de metingen afzetten op de gootwanden en op de meetinstrumenten. De meetnauwkeurigheid en de reproduceerbaarheid van de metingen worden hierdoor ongunstig beïnvloed. Er dient derhalve te worden gestreefd naar een zo kort mogelijke meettijd. Door b.v. gebruik te maken van een verschildruk opnemer kan de meettijd worden teruggebracht tot ± 1 minuut. Toepassing van een filter voor zwevend vuil verdient aanbeveling.
4. Om een uitspraak te kunnen doen over het gebruik van Prestonbuizen voor het bepalen van schuifspanningen langs ruwe wanden moet het onderzoek worden voortgezet in een goot van voldoende lengte bij verschillende ruwheden.

6. Literatuurlijst:

1. Prandtl, L. Zur turbulenten Strömung in rohren und längs platten, Ergebnisse der aerodynamischen versuchsanstalt zu Göttingen, IV Lieferung, 1932.
2. Ludwig, H. und Tillman, W. Investigations of the wall shearing stress in turbulent boundary layers, National advisory committee for aeronautics, Technical memorandum 1285, 1950.
3. Nikuradse, J. Gesetz massigkeiten der turbulenten Strömung in glatten rohren, V.D.I. Forschungsheft 356, 1932.
4. Millikan, C.B. A critical discussion of turbulent flows in channels and circular tubes, Proc. 5th Int. Congress for Applied Mechanics, 1938.
5. Preston, J.H. The determination of turbulent skin friction by means of pitot tubes, Journ. of the Royal Aeronautical Soc., febr. 1954.
6. Hsu, E.Y. The measurement of local turbulent skin friction by means of surface pitot tubes, David W. Taylor Model Basin Report no. 957, Aug. 1955.
7. Dutton, R.A. The accuracy of the measurement of turbulent skin friction by means of surface pitot-tubes and the distribution of skin friction on a flat plate, Report and Memoranda no. 3058, sept. 1956.
8. Ferriss, D.H. Preston tube measurement in turbulent boundary layers and fully developed pipe flow, Ministry of aviation, Aeronautical research council current papers no. CP 331, 1965.
9. Ippen, A.T. and Drinker, P.A. The distribution of boundary shear stresses in curved trapezoidal channels, Massachusetts Institute of Technology, Hydrodynamics Laboratory, Technical report no. 43, Okt. 1960.
10. Ippen, A.T. and Drinker, P.A. Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels, Journ. of the Hydraulics Division no. HY5, Sept. 1962.
11. Breusers, H.N.C. Het meten van wandschuifspanningen met pitotbuizen, Informatie no. V 136, W.L. Delft, Dec. 1962.
12. Nikuradse, J. Strömungsgesetze in rauhen rohren, V.D.I. Forschungsheft 361, 1933.
13. Rajaratnam, N. and Muralidhar, D. Boundary shear stress distribution in rectangular open channels, La Houille Blanche, no. 6, 1969.
14. Karman, Th.von Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 1930.
- 14a. Karman, Th.von Mechanische Ähnlichkeit und turbulenz, Proc. third Int. Congress for Applied Mechanics, Stockholm, 1930.

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

... ..
... ..

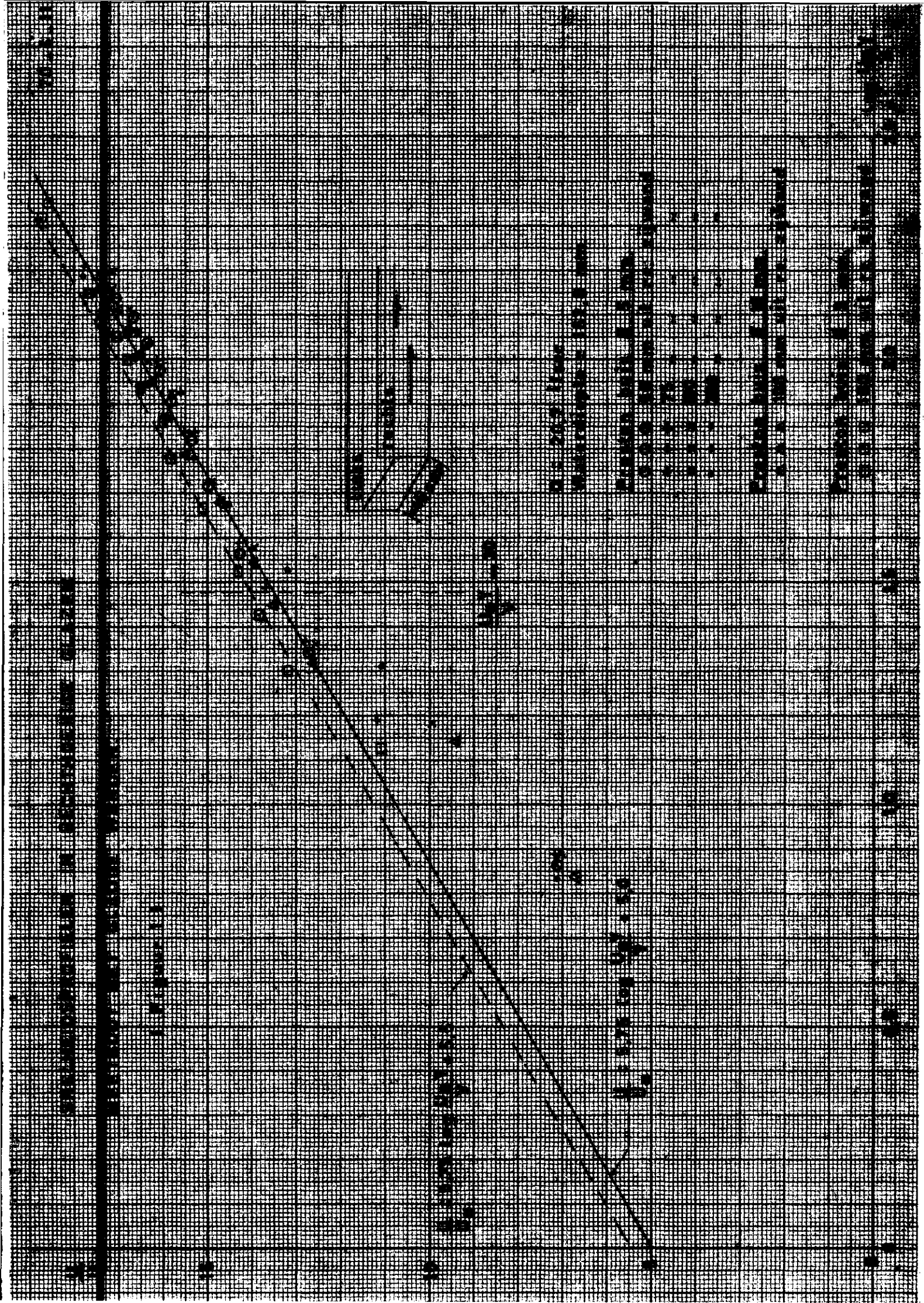
... ..
... ..

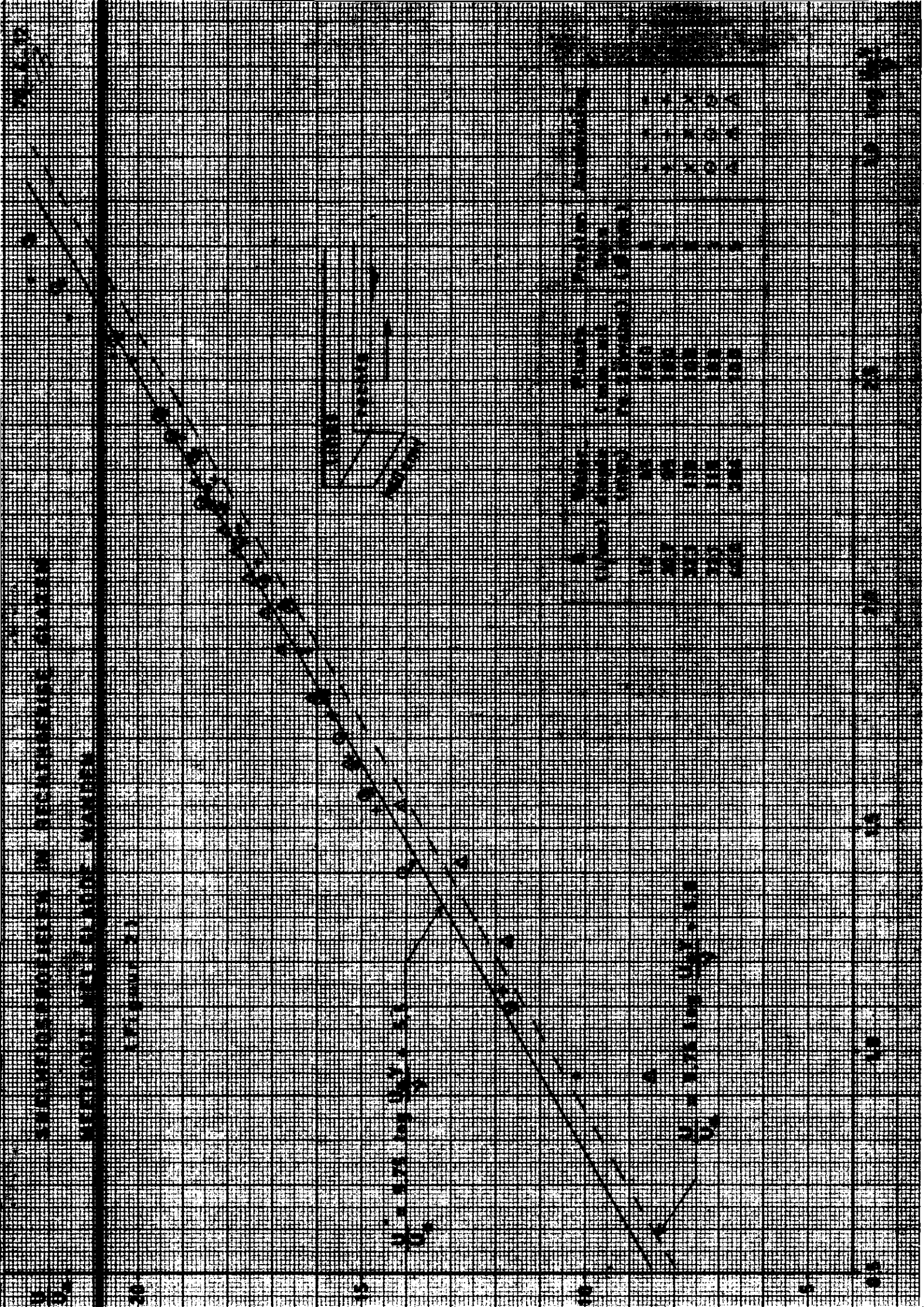
... ..
... ..

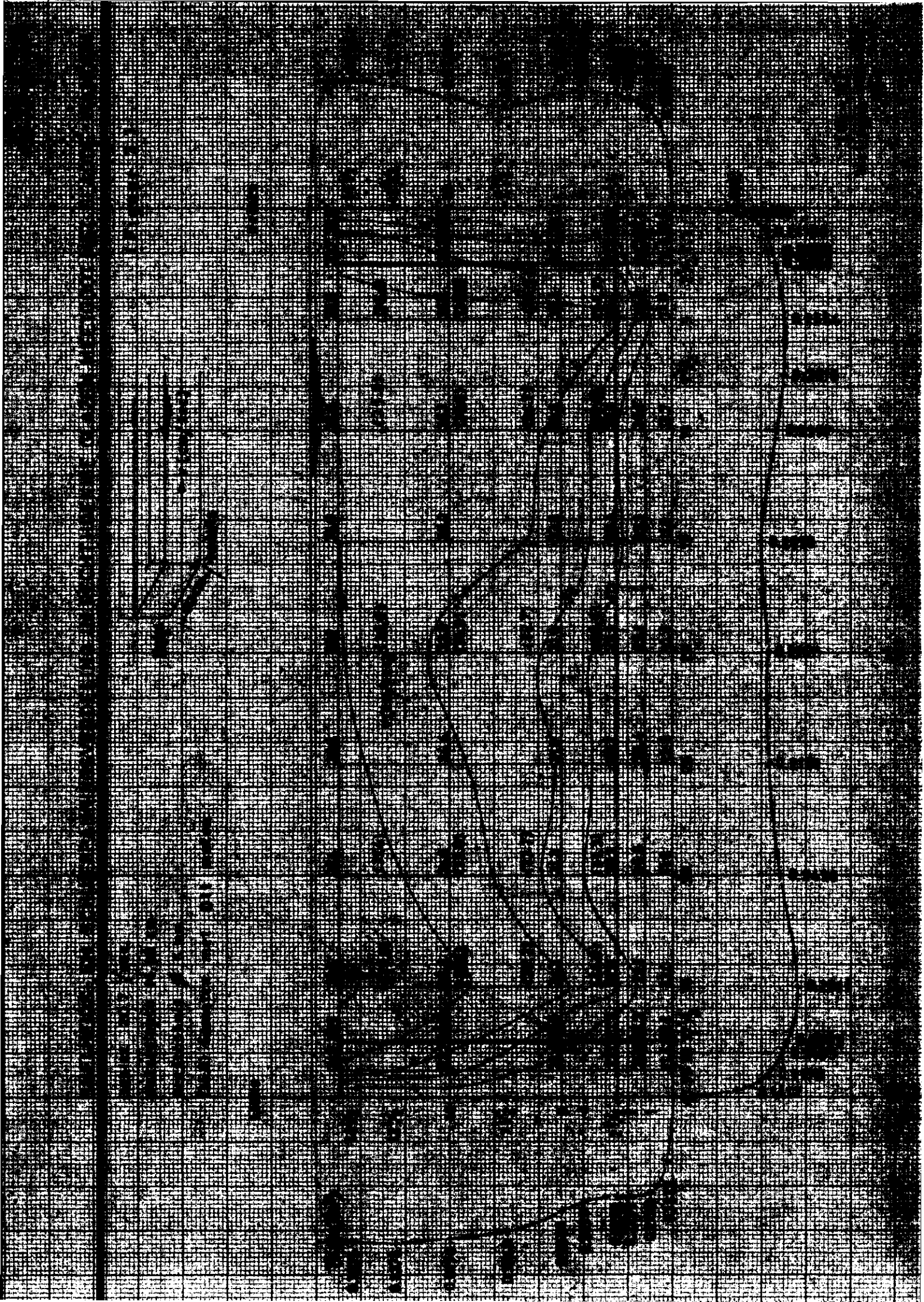
... ..
... ..

... ..
... ..

15. O'Loughlin, E.M. and Shastri Annambhotla, V.S.
Flow phenomena near rough boundaries, Journ. of Hydraulic Research 7, 1969, no. 2.
16. Hwang, L.S. and Laursen E.M. Shear measurement technique for rough surfaces, Journ. of the Hydraulics Division, no. HY2, March 1963.
17. Schlichting, H.
Boundary layer theory. McGraw-Hill Book Comp. Inc., 1960



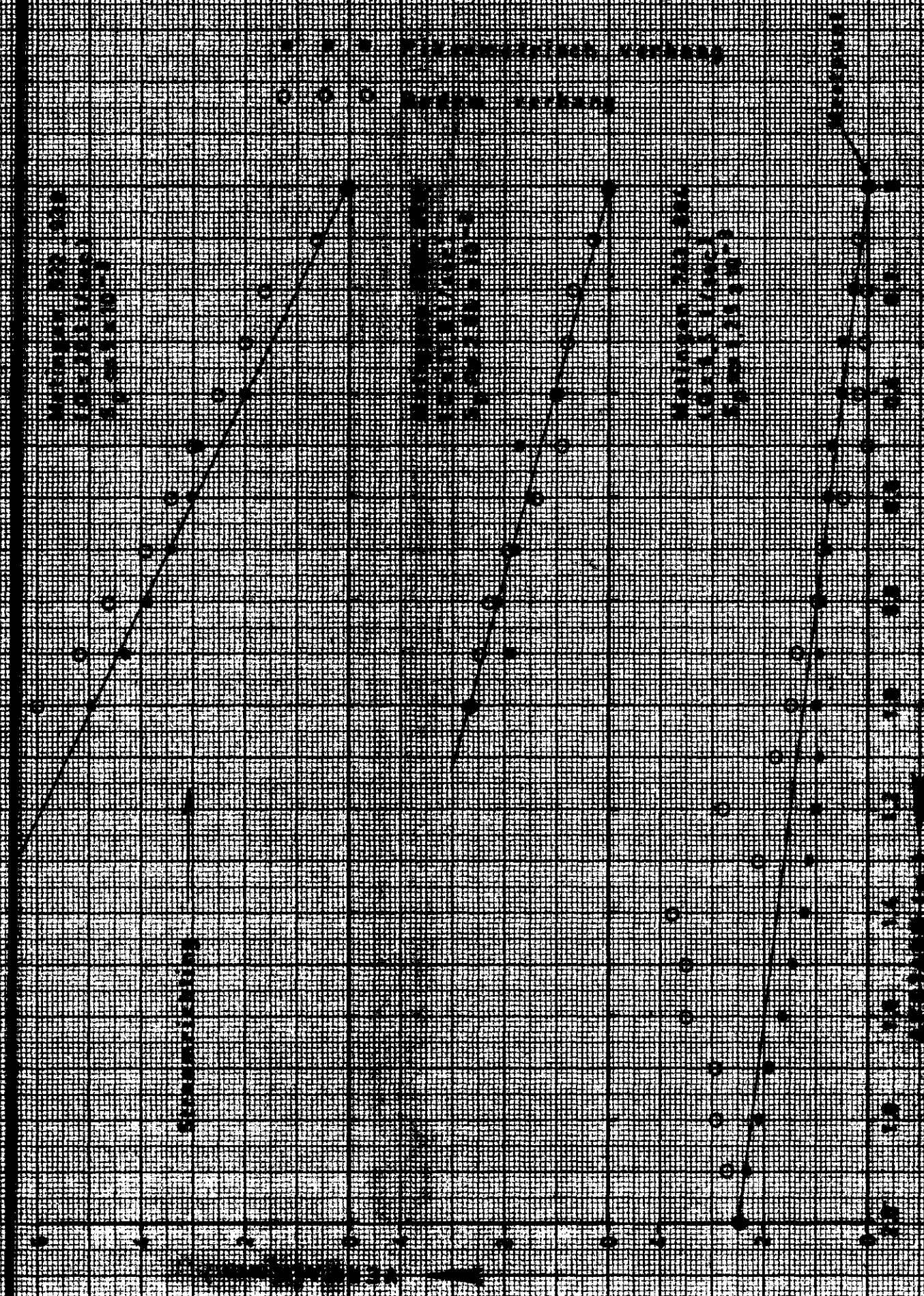




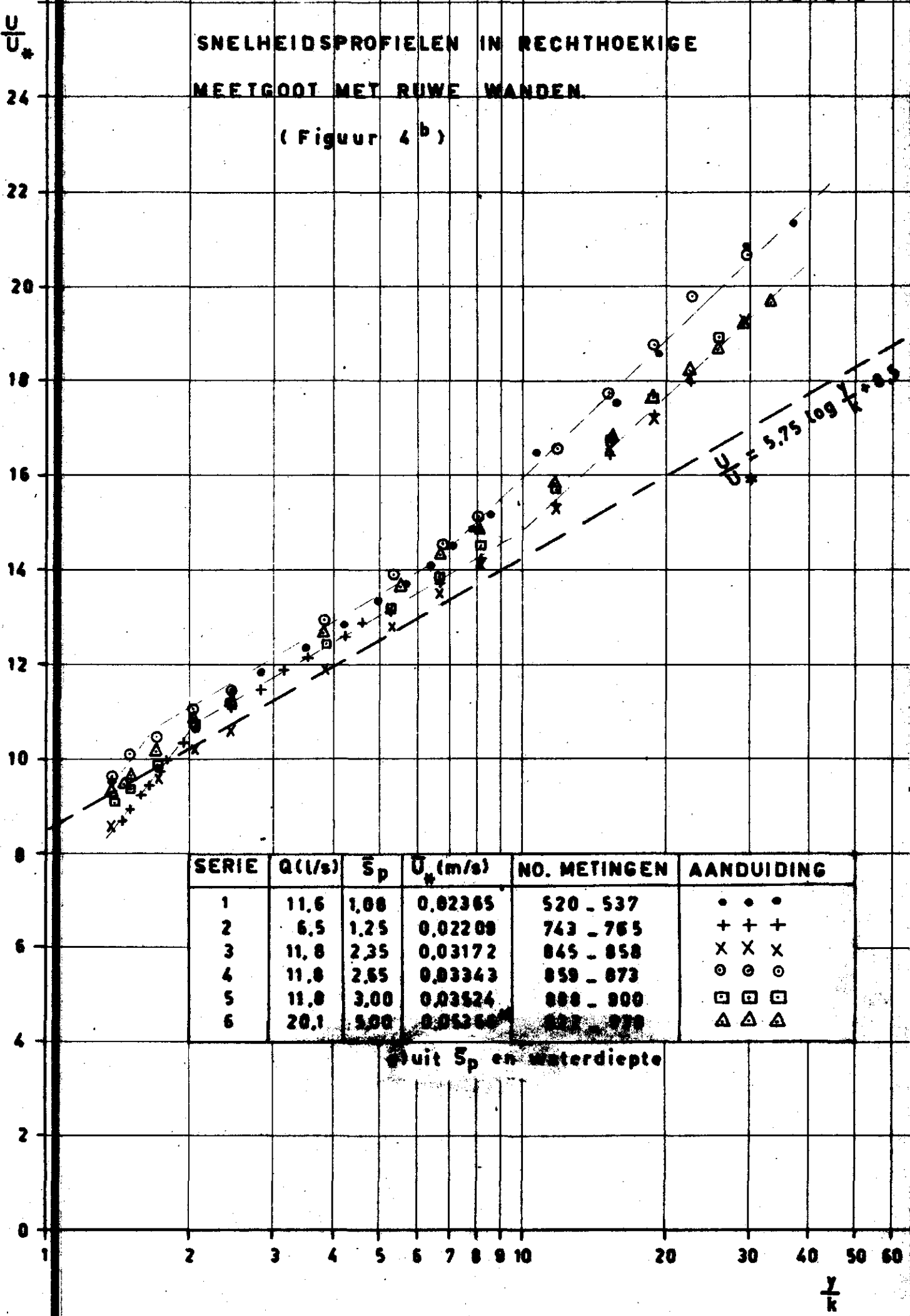
MECHANICAL PROPERTIES
OF POLYMER FILMS

(Figure 1)

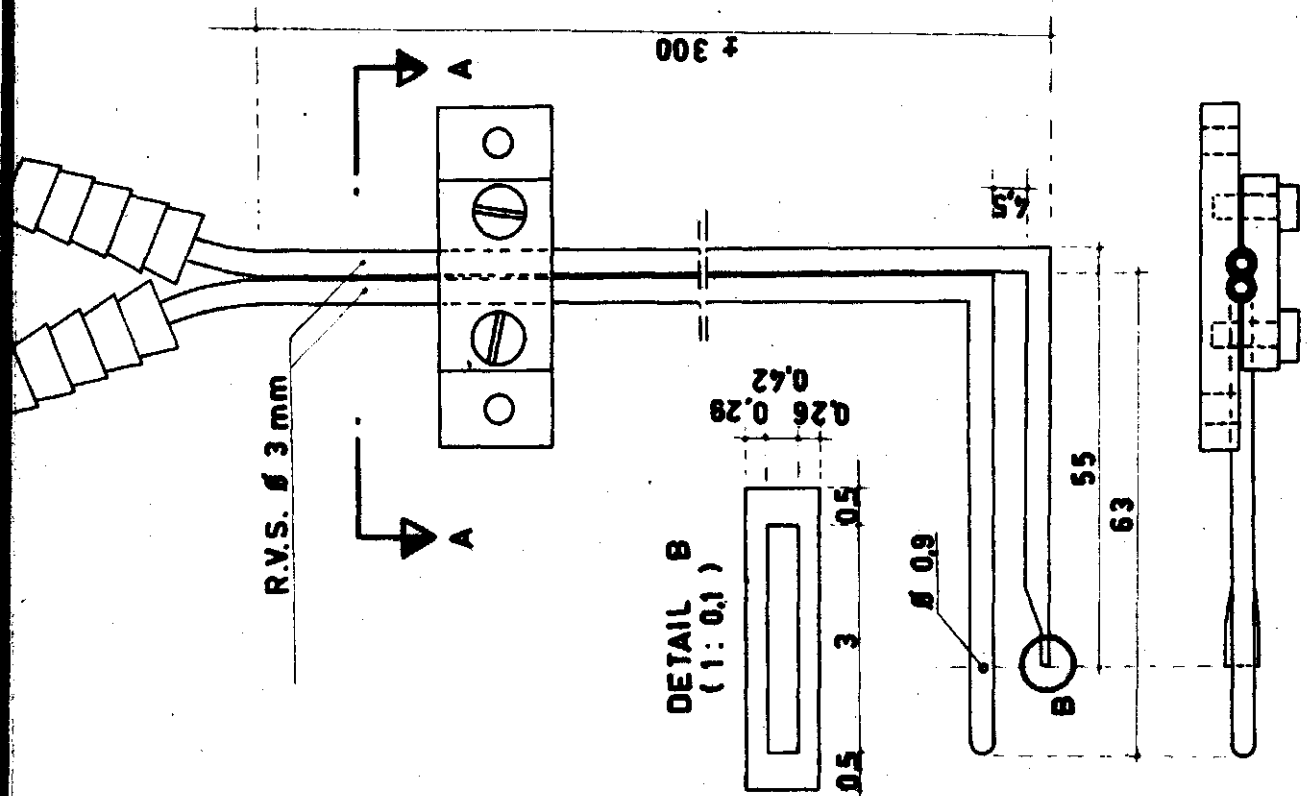
• • • • • TENSILE STRENGTH
○ ○ ○ ○ ○ ELONGATION



SNELHEIDSPROFIELEN IN RECHTHOEKIGE MEETGOOT MET RUWE WANDEN. (Figuur 4^b)

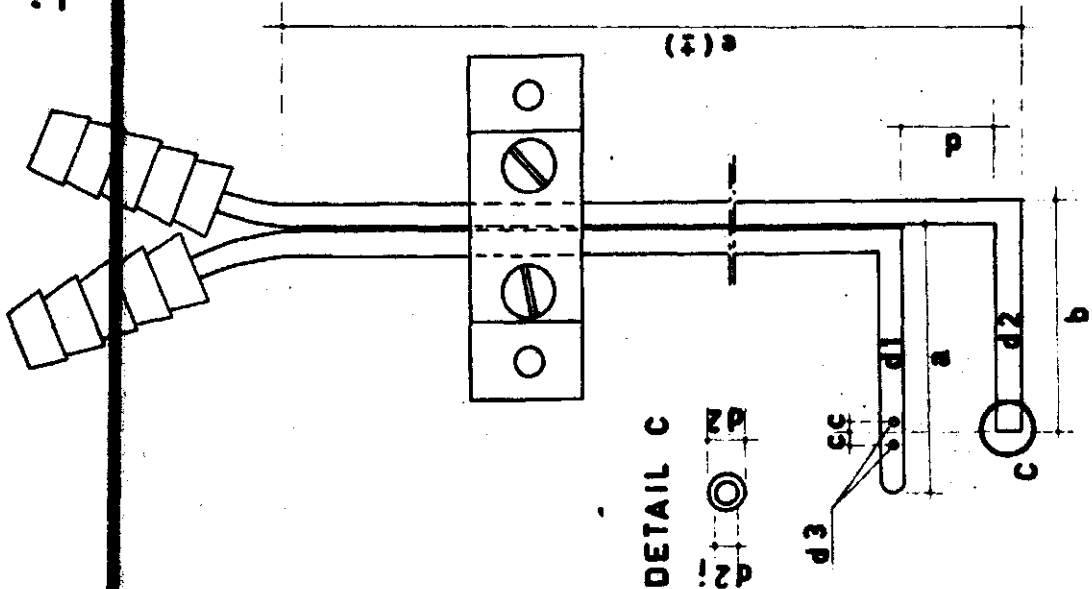


WANDPITOT - QUIS (fig. 5)



DOORSNEDE A-A

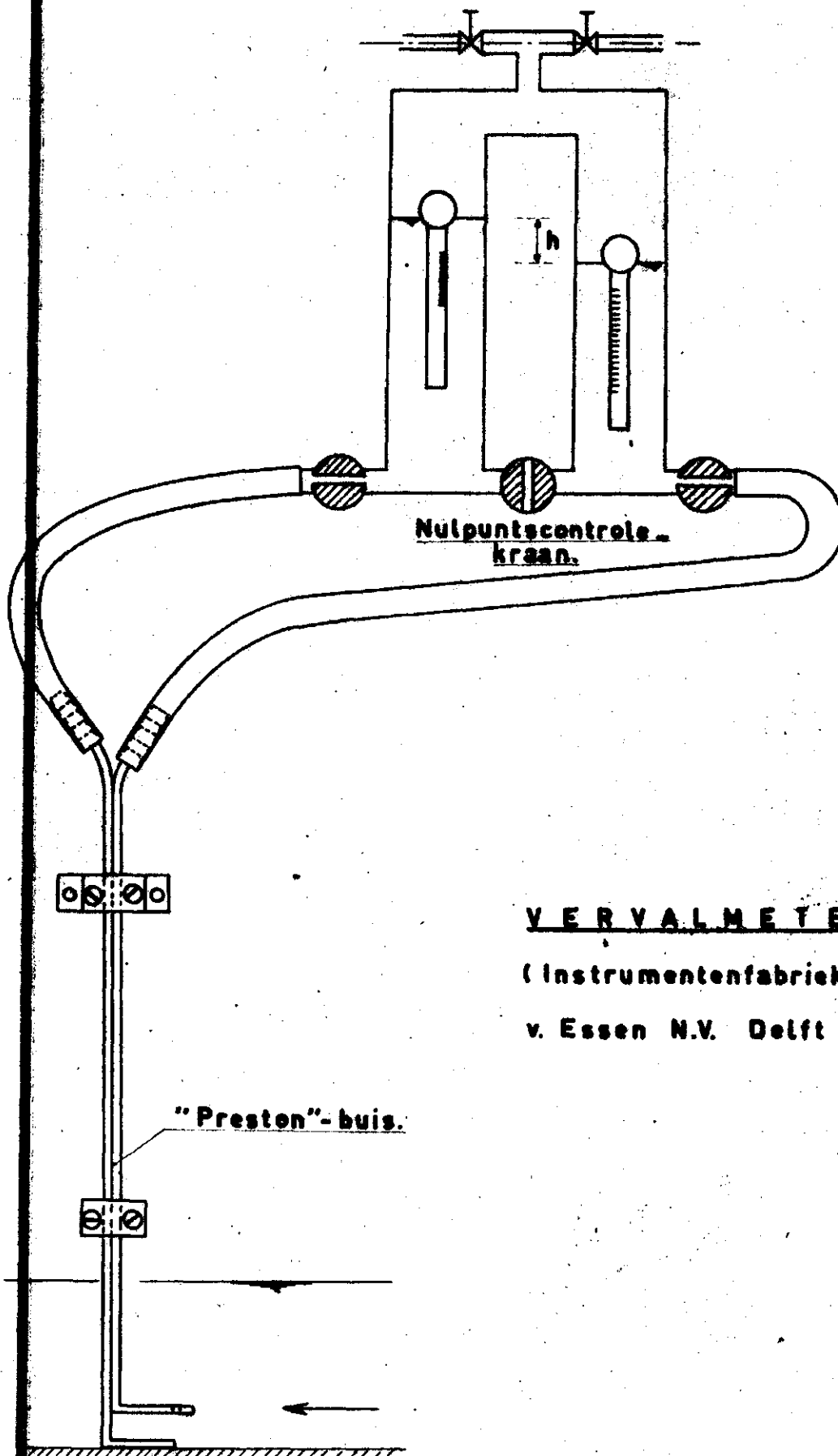
"PRESTON" - BUIS (fig. 6)



DETAIL C

MATEN _ TABEL			
	BUIS NR. 2	BUIS NR. 3	BUIS NR. 4
a	100	55	35
b	100	50	29
c	3	1.5	1.5
d	25	15	12
e	±540	±420	±290
d1	6.00	2.00	2.95
d2	9.96	5.00	2.95
d2i	6.06	3.00	1.94
d3	1.4	0.7	0.7

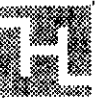
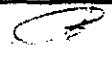
SCHUIFSPANNINGSONDERZOEK		No. 70 - 4 - 04	
LANDBOUWHOOGESCHOOL		D.D.	maart '70
HYDRAULICA		Project	67 - 51
		Gez.	
Blad -	van.	Maten: in mm.	
Rev.:	Omschr.:	School	1 : 1
		File	N



VERVALMETER. (fig. 7)

(Instrumentenfabriek
v. Essen N.V. Delft)

"Preston"-buis.

SCHUIF SPANNINGS ONDERZOEK		No. 70 - 4 - 85	
LANDBOUWHOGESCHOOL		D.D.	maart '70
HYDRAULICA  LABORATORIUM		Project	67 - 51
		Gez.	
Blad - van.		Maten:	Schaal
Rev.:	Omschr.:	File	K