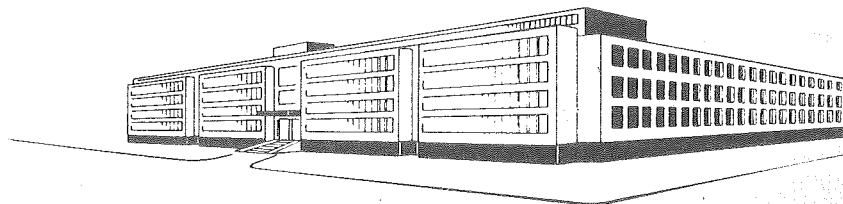


TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

HET INITIEEL HYDRAULISCH TRANSPORT IN BUIZEN
EN EEN GEROERD VAT

C. M. S. RAATS
AFSTUDEERVERSLAG

oktober 1967



Laboratorium voor Technische Natuurkunde
LORENTZWEG
DELFT

H E T I N I T I E E L H Y D R A U L I S C H T R A N S P O R T
I N B U I Z E N E N E E N G E R O E R D V A T

Verslag van het afstudeerwerk verricht in de werkgroep Fysische
Technologie onder leiding van

PROF. DR. IR. W. J. BEEK

door

C. M. S. RAATS

Delft, oktober 1967.

Samenvatting.

Met behulp van een nieuwe meettechniek werd bepaald wanneer een bolletje, dat op een vlak rust, wordt opgelicht door de turbulente snelheidsfluctuaties in een stroming langs dat vlak.

De bedoeling was het verkrijgen van meer inzicht in het proces van suspenderen van deeltjes in een geroerd vat. De experimenten werden uitgevoerd met bolletjes van verschillende dichtheden (7900, 2630 en 1200 kg/m³) en verschillende diameters (2 tot 6 mm).

Allereerst werd gemeten in een opstelling waarin het bolletje lag op de bodem van een doorstroomde buis. Hierbij werd de buisdiameter gevarieerd (2 en 4 cm) en ook de frictiefactor, door de buiswand te beplakken met schuurpapier en bollen. Ook werd de situatie nagebootst waarbij het deeltje tussen andere deeltjes ligt. Tenslotte werd gemeten met bolletjes, rustend op de bodem van een geroerd vat.

In alle gevallen bleek de theorie van Kolmogoroff zoals die voor dit geval werd uitgewerkt door Frank-Kamenetskii zich goed met de resultaten laat verenigen.

Inhoud.

	pag.
Samenvatting	1
Lijst van gebruikte symbolen	3
Hoofdstuk I. Inleiding.	5
Hoofdstuk II. Meetmethoden.	10
1. Meting van de initieele snelheid in gladde buizen.	10
2. Meting van de frictiefactor en initieele snelheid in ruwe buizen.	13
3. Meting van het initieele toerental en de circula- tietijd in een geroerd vat.	15
4. Overzicht van situaties waarin is gemeten.	17
Hoofdstuk III. Metingen.	19
1. Meting van de frictiefactor.	19
2. Metingen in gladde buizen.	19
3. Metingen in met schuurpapier beplakte buizen.	26
4. Metingen in met bollen beplakte buizen.	26
5. Meting van de circulatietijd als functie van het toerental in een geroerd vat.	32
6. Meting van het initieele toerental in het geroerde vat.	32
Hoofdstuk IV. Discussie van de meetresultaten.	37
1. Experimenten in buizen.	37
2. Experimenten in het geroerde vat.	41
Hoofdstuk V. Suggesties voor het voortzetten van het onderzoek.	45
Literatuur.	47

Lijst van gebruikte symbolen.

		dimensie
α	constante in formule (5)	-
β	"	-
γ	"	-
λ	<u>Kolmogoroff</u> -schaal van turbulentie	[m]
\mathcal{E}	gedissipeerde energie per massa en tijdseenheid	[m ² /s ³]
$\bar{\mathcal{E}}_i$	gemiddelde gedissipeerde energie per massa en per tijdseenheid bij initieel transport	[m ² /s ³]
ρ	dichtheid	[kg/m ³]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ϕ_v	volumestroom	[m ³ /s]
ϕ_p	pompcapaciteit	[m ³ /s]
a	constante in formule (2)	-
b	"	-
B	gewichtsprocent vaste stof	-
C	constante in formule (5)	-
C'	constante in formule (2)	-
C''	constante in formule (4)	-
C_w	weerstandscoefficiënt	-
D	diameter buis	[m]
D'	diameter roerder	[m]
D''	diameter vat	[m]
D_g	diameter geleide buis	[m]
d'	diameter op buiswand geplakte bollen	[m]
d	diameter bol	[m]
e/D	relatieve ruwheid	-
f	frictiefactor	-
g	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
H	hoogte vat	[m]
H'	afstand onderkant geleidebuis	[m]
L	lengte buis	[m]
N_i	initieel toerental	[1/s]
P	druk	[N/m ²]
r	afstand langs de bodem tot midden van de bodem van het vat	[m]
S	constante in formule (21)	-

t_{c_i}	initieele circulatietijd	[s]
V_s	stationaire valsnelheid	[m/s]
$\langle V \rangle$	gemiddelde snelheid in de hoofdstroom	[m/s]
$\langle V_i \rangle$	initieele snelheid	[m/s]
V_n	normale snelheidscomponent van turbulente beweging	[m/s]
$V(d)$	snelheidsfluctuatie op schaal d.	[m/s]
x	diepte tussen bollen op wand	[m]
Re_{d_u}	Reynoldsgetal betrokken op deeltjesdiameter en de locale snelheid	-
Re_D	Reynoldsgetal betrokken op buisdiameter en de gemiddelde snelheid	-

Hoofdstuk I.

Inleiding.

Het doel van het onderzoek is het verzamelen van gegevens om meer inzicht te verkrijgen in het proces van suspenderen en aan te kunnen geven aan welke vergrotingsregel het toerental van een roerder moet voldoen, om bij een bepaalde geometrische combinatie van roerder en vat, deeltjes juist volledig te suspenderen.

Een deeltje dat op een horizontale wand ligt wordt in een turbulente stroming langs de wand opgetild, als de normale snelheidscomponent van de turbulente beweging van de grootte-orde wordt van de vrije valsnelheid van het deeltje in de betreffende vloeistof. De vrije valsnelheid V_s van een bol in een stilstaande vloeistof wordt gevonden door zijn schijnbare gewicht gelijk te stellen aan de weerstandskracht en wordt gegeven door:

$$V_s = 1,155 \frac{1}{\sqrt{C_w}} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u} \quad (1)$$

Hierin is d_u de diameter van de bol, g de versnelling van de zwaartekracht, $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ het relatief dichtheidsverschil tussen bol en vloeistof en C_w de weerstandscoefficiënt.

De normale snelheidscomponent V_n van de turbulente beweging langs de wand, is afhankelijk van de gemiddelde vloeistofsnelheid in de hoofdstroom $\langle V \rangle$, de viscositeit en dichtheid van de vloeistof, de karakteristieke afmeting van het kanaal D en de relatieve ruwheid $\frac{e}{D}$ van de wand. In formule:

$$V_n = C' \langle V \rangle Re_D^a \left(\frac{e}{D}\right)^b \quad (2)$$

De gemiddelde vloeistofsnelheid waarbij juist volledig wordt gesuspendeerd, wordt gedefinieerd als de initieele snelheid $\langle V_1 \rangle$.

Bij juist volledig suspenderen is:

$$V_s = V_{n_i} = C' \langle v_i \rangle \operatorname{Re}_D^a \left(\frac{e}{D}\right)^b \quad (3)$$

Uit formule (1) en (3) volgt:

$$\frac{\langle v_i \rangle}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} D}} = C'' \frac{1}{\sqrt{C_w}} \frac{1}{\left(\frac{e}{D}\right)^b} \left(\frac{d_u}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\operatorname{Re}_D^a} \quad (4)$$

De weerstandscoefficiënt C_w is afhankelijk van Re_{d_u} .

De frictiefactor f is afhankelijk van $\left(\frac{e}{D}\right)$ en Re_D . Formule (4) is dus te schrijven als:

$$\frac{\langle v_i \rangle}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} D}} = C \frac{1}{\sqrt{C_w^\alpha}} \frac{1}{f^\beta} \left(\frac{d_u}{D}\right)^\gamma \quad (5)$$

In de literatuur [1] t/m [4] zijn waarden voor de constanten c, α, β en γ gegeven; ze zijn hieronder vermeld:

	c	α	β	γ
Durand [1] experimenteel	1,25	0	0	0
Shields [2] experimenteel	0,35	0	0,5	0,5
Hinze [3] theoretisch	1,7	1	0,5	0,5
Frank-Kamenetskii [4] theoretisch	0,91	1	0,33	0,16

In navolging van Shields wordt aan de combinatie

$$\frac{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} D}}{\sqrt{C_w}} \quad \text{de naam "kritische snelheid", } \langle v_k \rangle \text{ gegeven.}$$

De initieele snelheid kan dan in het dimensielose getal $\frac{\langle v_i \rangle}{\langle v_k \rangle}$ worden ondergebracht.

Omdat meetresultaten het best aansluiten bij de theorie van Frank-Kamenetskii, wordt deze theorie besproken.

Frank-Kamenetskii berekende de correlatie (5) met behulp van de theorie van Kolmogoroff [5] voor een homogeen isotroop turbulent veld.

Kolmogoroff leidde af dat:

$$V(d) = \varepsilon^{1/3} d^{1/3}, \text{ als } d \gg \lambda \quad (6)$$

Hierin is $V(d)$ de snelheidsfluctuatie van de turbulente beweging op een schaal d , ε de gedissipeerde energie per massa-eenheid en per tijdseenheid en λ is de Kolmogoroff-schaal van de turbulentie; deze wordt gegeven door:

$$\lambda = \nu^{3/4} \varepsilon^{-1/4} \quad (7)$$

Hoewel de turbulentie in een buisstroming en een geroerd vat noch homogeen, noch isotroop is, zal toch vergelijking (6) worden gebruikt. Het zal blijken dat dit door de resultaten wordt gerechtvaardigd.

Frank-Kamenetskii stelde voor juist volledig suspenderen:

$$V(d_u)_i = V_s \quad (8)$$

Voor een buisstroming is bij juist volledig suspenderen:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\phi_v \Delta P}{\frac{\pi}{4} D^2 L \rho} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 \langle V_i \rangle 4 f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho \langle V_i \rangle^2}{\frac{\pi}{4} D^2 L \rho} = \frac{2 f \langle V_i \rangle^3}{D} \quad (9)$$

$$\text{en } V(d_u) = 2^{1/3} f^{1/3} \left(\frac{d_u}{D}\right)^{1/3} \langle V_i \rangle \quad (10)$$

Uit formules (1), (8), en (10) volgt:

$$\frac{\langle V_i \rangle}{\sqrt{g \frac{4\rho}{\rho} D}} = 0,91 C_w^{-1/2} f^{-1/3} \left(\frac{d_u}{D}\right)^{1/6} \quad (11)$$

In formule (11) is C_w een functie van het Reynoldsgetal Re_{d_u} .

$$Re_{d_u} = \frac{V(d_u)_i d_u}{\nu} \quad (12)$$

Met behulp van formule (10) en (12) is formule (11) te schrijven als:

$$\frac{\langle V_i \rangle d_u^{1/3} D^{-1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}} = F(f, Re_{d_u}) = F(f, \frac{\langle V_i \rangle d_u^{4/3} D^{-1/3}}{\nu}) \quad (13)$$

Voor een geroerd vat wordt gebruik gemaakt van de beschrijving die Voncken [6] van de vloeistofstroming heeft gegeven.

Hij vergeleek de werking van de roerder met die van een pomp (figuur 7). Het debiet van deze "pomp" noemde hij de pompcapaciteit ϕ_p . Elk volume-elementje circuleert door het vat; de gemiddelde tijd die daarvoor nodig is noemt Voncken de circulatietijd t_c . Uit zijn experimenten bleek verder dat voor onze combinatie roerder en geleidebuis men mag stellen dat:

$$\phi_p \div ND_g^3 \text{ en } t_c \div \frac{D^3}{\phi_p} \div \frac{1}{N} \text{ zodat } Nt_c = \text{constant.}$$

De gemiddelde snelheid $\langle V \rangle$ langs de bodem van het vat is nu evenredig met:

$$\frac{\phi_p}{D H' g} \div \frac{ND_g^3}{D H' g} = \frac{ND_g^2}{H' g} \div \frac{D^2}{H' t_c g}$$

De grootte die analoog is aan de diameter van de buis bij de buisstroming is in dit geval de afstand van de onderkant van de geleidebuis tot de bodem van het vat: H' .

In overeenkomst met vergelijking (11) kan voor het initieel transport van een deeltje op de bodem van een geroerd vat worden geschreven:

$$\frac{D^2/H' t_c}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} H'}} = C \cdot C_w^{-1/2} \left(\frac{d_u}{H'} \right)^{1/6} \quad (14)$$

Omdat bij de experimenten in buizen is gebleken dat de invloed van de frictiefactor zeer gering is, is hij niet in vergelijking (14) opgenomen.

Voor een geroerd vat geldt:

$$\bar{\mathcal{E}}_i \div N^3 D'^2 \quad \text{als } Re_{\text{roerder}} > 10^4 \quad (15)$$

Waarin D' de diameter van de roerder is.

Formule (14) is te schrijven als:

$$\frac{N_i D'^{2/3} d_u^{1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}} = F' (Re_{d_u}) = F' \left(\frac{N_i D'^{2/3} d_u^{4/3}}{\nu} \right) \quad (16)$$

Hierin is N_i het initieele toerental en D' de diameter van de roerder.

De experimenten zijn erop gericht het verband te bepalen tussen $\langle V_i \rangle$ en de grootheden d_u , D , g , $\frac{\Delta \rho}{\rho}$, f en C_w voor een buisstroming en het verband tussen N_i en de grootheden d_u , D' , g , $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ en C_w voor een geroerd vat.

Omdat waarden van de weerstandscoefficiënt C_w van een deeltje, dat zich vlak bij een wand in een turbulente stroming bevindt, niet bekend zijn, is ter vergelijking met de theorieën de waarde genomen betrokken op de vrije valsnelheid van het deeltje in de stilstaande vloeistof.

Hoofdstuk II.

Meetmethoden.

1. Meting van de initieele snelheid in gladde buizen.

In een horizontaal opgestelde buis wordt een bol met een lange dunne draad aan de bodem van de buis bevestigd. Wanneer met toenemende vloeistofsnelheid in de buis de verticale component van de turbulente beweging zo groot wordt dat het bolletje wordt opgetild, gaat het bolletje tegen de wand tikken.

Bij toenemende vloeistofsnelheid maakt het bolletje een heftiger tikkende beweging en het aantal tikken per tijdseenheid neemt sterk toe, tot een maximum bereikt wordt. Daarna blijft de frequentie (het aantal tikken per seconde) ongeveer constant bij groter wordende vloeistofsnelheid.

Om nu een criterium te vinden waarbij juist volledig gesuspendeerd wordt, zijn frequentiekaracteristieken opgenomen (aantal tikken per seconde als functie van de snelheid).

De frequentie is gemeten, door een deel van de buiswand ($\sim 1 \text{ cm}^2$), op de plaats van het bolletje, door een koperfolie (dikte 0,2 mm) te vervangen.

Tegen het koperfolie is een opnemer (pick-up element) geplaatst. Het aantal tikken is geregistreerd met behulp van een versterker en een elektronische teller (figuur 1).

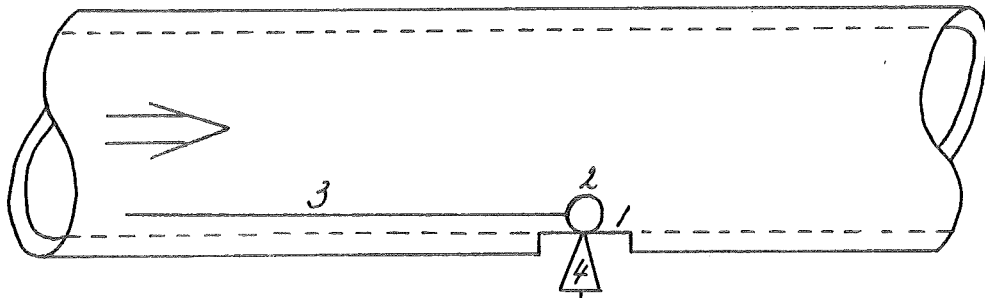
In figuur 4 is een frequentiekaracteristiek getekend voor een glazen bol.

De frequentiekaracteristieken waren niet goed reproduceerbaar wat betreft de maximale frequentie en de helling bij toenemende frequentie, dit was onder andere afhankelijk van de lengte van de draad, die aan het bolletje was verbonden.

Wel bleek de stroomsnelheid behorend bij het snijpunt van de horizontale raaklijn en de buigraaklijn van de frequentiekaracteristieken goed reproduceerbaar.

Dit punt is als criterium voor de initieele snelheid genomen. Een voorbeeld van de bepaling van $\langle V_i \rangle$ uit de frequentiekaracteristiek is in figuur 4 uitgevoerd.

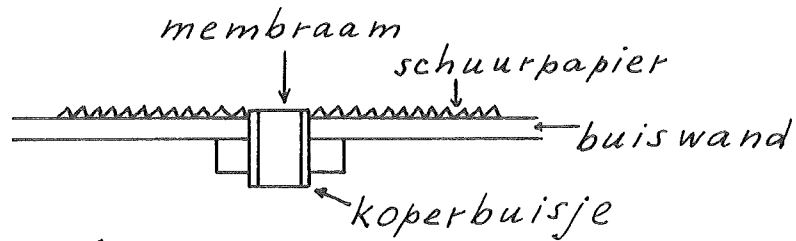
MEETOPSTELLING.



figuur 1.

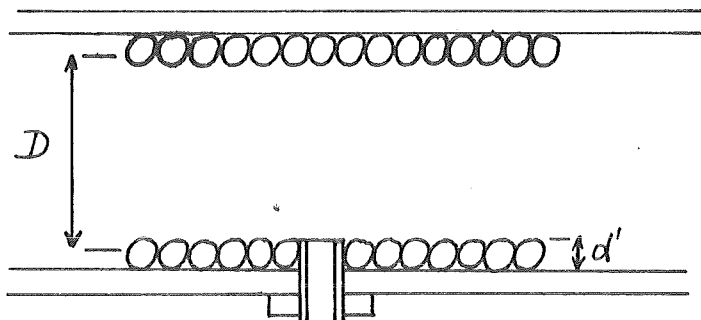
- | | |
|------------|-------------------------|
| 1 membraam | 4 opnemer |
| 2 bol | 5 versterker |
| 3 draad | 6 elektronische teller. |

BUISWAND BEPLAKT MET SCHUURPAPIER

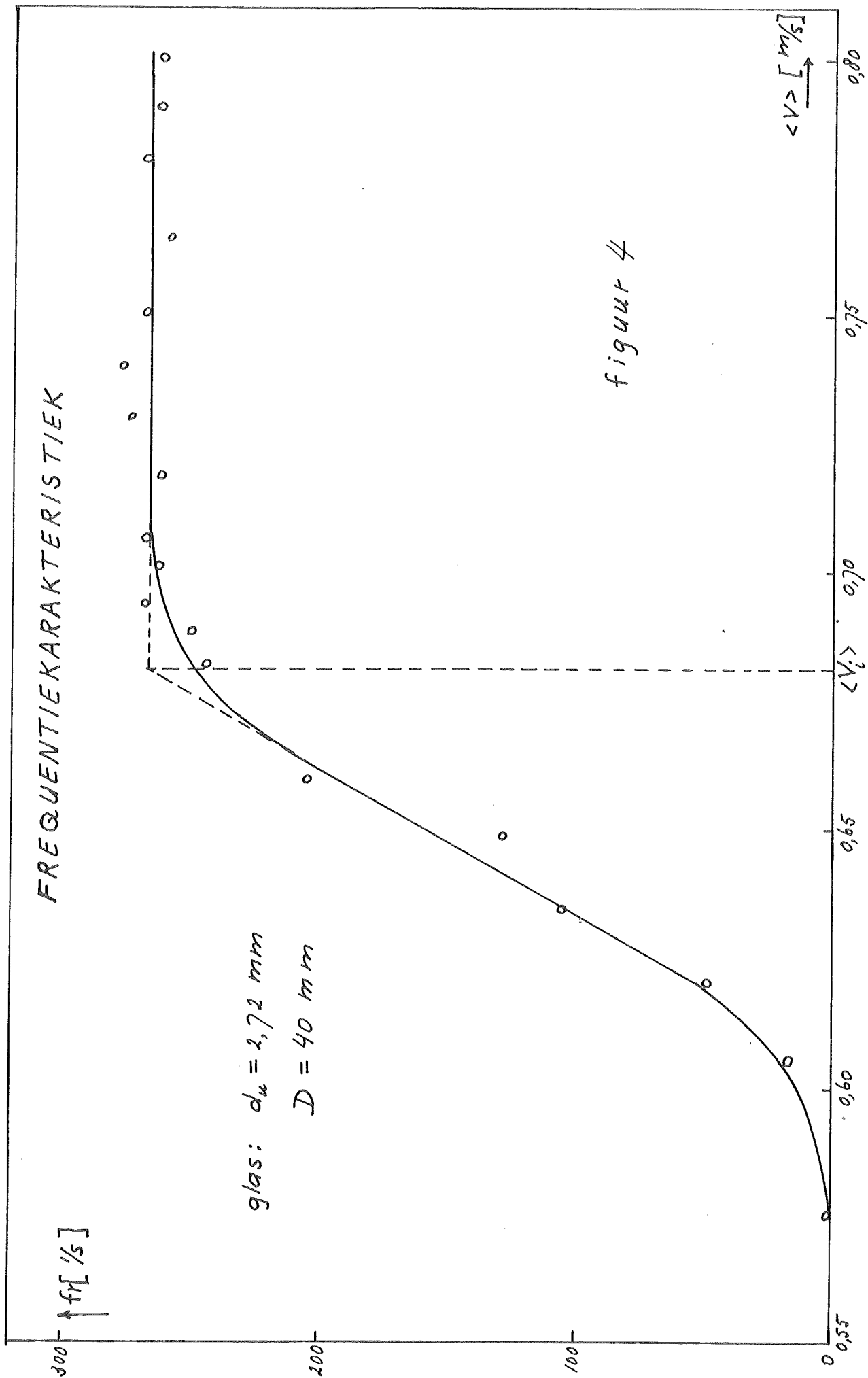


figuur 2.

BUISWAND BEPLAKT MET BOLLEN



figuur 3.



Dat dit criterium voor de initieele snelheid juist gekozen is, blijkt uit de frequentiekaracteristiek van een bol die aan een korte draad (4 cm) bevestigd is en waarvan de draad op ongeveer een hoogte d_u (diameter van de bol) boven de buiswand is bevestigd. De frequentie neemt na het bereiken van een maximum zeer snel af bij toenemende vloeistofsnelheid. In dit gebied begint het bolletje te zweven. De maximale frequentie wordt bereikt bij een stroomsnelheid die goed overeenkomt met de initieele snelheid, bepaald uit de frequentiekaracteristiek van dezelfde bol aan een lange draad.

2. Meting van de frictiefactor en initieele snelheid in ruwe buizen.

Om de invloed van de wandruwheid op de initieele snelheid na te gaan, zijn metingen gedaan in ruwe buizen. De frictiefactor kon over een groot gebied gevarieerd worden, door de buiswand te beplakken met schuurpapier en bollen.

Het membraam is zodanig uitgevoerd, dat het verplaatsbaar is in een richting loodrecht op de buiswand. Op deze wijze kon het membraam op gelijke hoogte met het schuurpapier gesteld worden en op gelijke hoogte met de op de buiswand geplakte bollen (figuur 2 en 3).

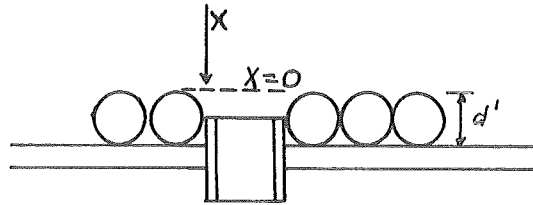
De initieele snelheid is ook gemeten voor bollen die zich op verschillende diepte x tussen de op de buiswand geplakte bollen bevinden (figuur 5). Diameter membraam is 5 mm.

De frictiefactor is gemeten door de drukval over een lengte L van de buis te meten met een omgekeerde manometerbuis, die onder verschillende hoeken gesteld kan worden (figuur 6). De beste resultaten bij de drukvalmeting werden verkregen door een manometerbuis te nemen met een inwendige diameter van 2,0 mm. De invloed van de capillaire krachten kon op deze wijze vermeden worden.

De manometer is verbonden met twee capillairen met inwendige diameter van 0,5 mm, welke draaibaar om hun lengteas in de meetsectie zijn aangebracht.

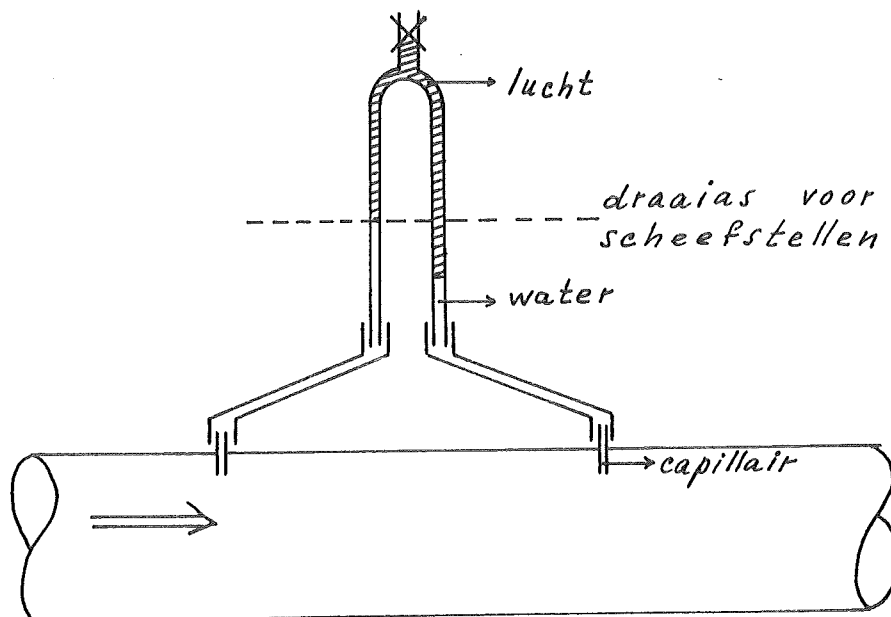
Het uiteinde van de capillairen moet goed zijn afgewerkt. De goede afwerking is te controleren door bij constante stroomsnelheid de drukval te meten, terwijl de capillairen om de lengteas gedraaid worden.

BUIS MET BOLLEN BEPLAKT



figuur 5.

OPSTELLING VOOR
DRUKVALMETING



figuur 6.

3. Meting van het initieele toerental en circulatietijd in een geroerd vat.

Het initieele toerental werd in het geroerde vat op dezelfde wijze gemeten als in ronde buizen.

Het vat heeft een diameter $D'' = 190$ mm en een hoogte $H = D''$ en is voorzien van zes keerschotten.

De roerder was van het type schevebladroerder met een diameter $D' = 50$ mm.

Om de roerder is een geleidebuis aangebracht met diameter en hoogte gelijk aan $1/3 D''$. De geleidebuis is centraal in het vat geplaatst (figuur 7). Ook in de geleidebuis zijn keerschotten aangebracht. Het initieele toerental is gemeten voor verschillende bollen op verschillende afstanden r van het midden van de bodem.

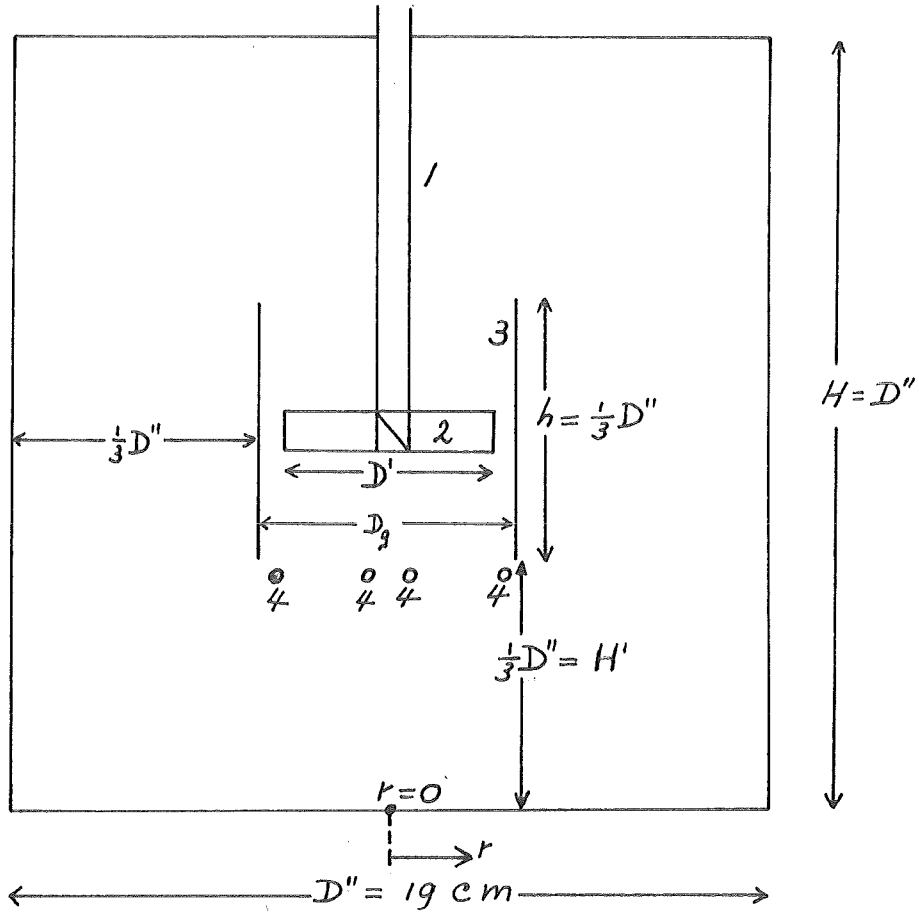
De circulatietijd als functie van het toerental is met behulp van geleidbaarheidsmetingen bepaald.

Direct onder de geleidebuis is een geleidbaarheidscel aangebracht, bestaande uit twee concentrische koperringen (figuur 7).

Door vlak boven de roerder een geconcentreerde NaCl oplossing te injecteren en de responsie met behulp van een geleidbaarheidsmeter en een recorder te registreren, is de circulatietijd te bepalen.

In figuur 8 is de responsie van een zoutinjectie getekend.

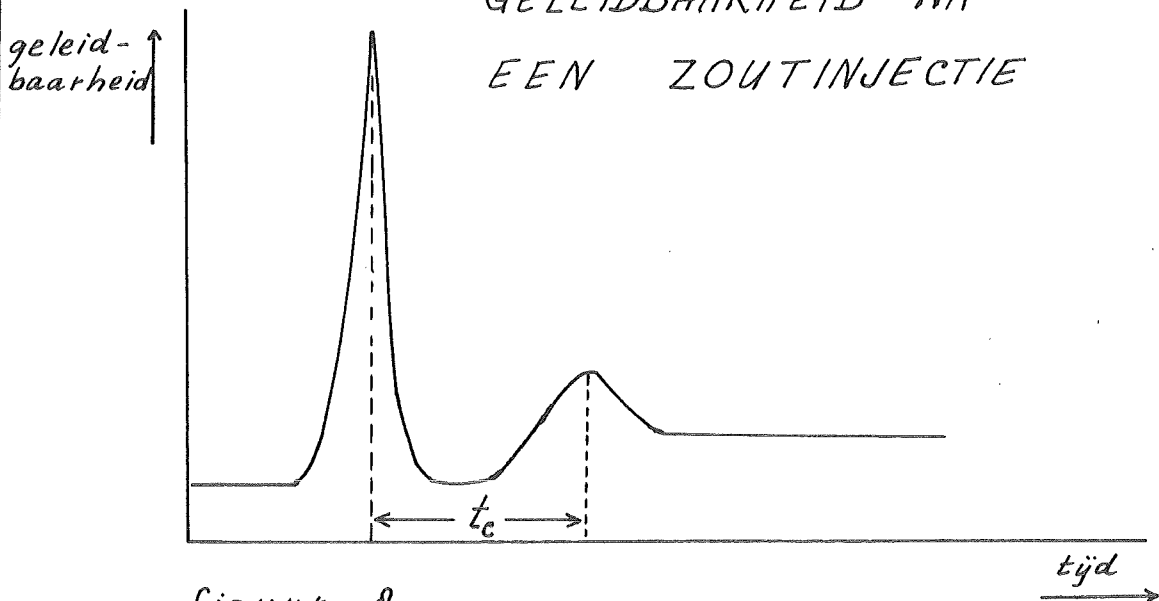
GEROERD VAT



- 1. roerderas
- 2. scheve bladroerder
- 3. geleidebuis
- 4. geleidbaarheidsceel.

figuur 7.

RESPONSIE VAN DE
GELEIDBAARHEID NA
EEN ZOUTINJECTIE



figuur 8.

4. Overzicht van situaties waarin is gemeten.I Gladde buizen

Materiaal bol	Diameter buis D = 40 mm		Diameter buis D = 20 mm		
	glas $\rho=2630 \text{ kg/m}^3$	nylon $\rho=1200 \text{ kg/m}^3$	glas $\rho=2630 \text{ kg/m}^3$	staal $\rho=7900 \text{ kg/m}^3$	nylon $\rho=1200 \text{ kg/m}^3$
diameter bol d_u (mm)	4,95	4,94	4,95	6,0	3,93
	2,93	3,93	3,0	5,5	
	2,72			3,95	
	2,26			2,0	

II Buizen beplakt met schuurpapier

Materiaal bol	Diameter buis D = 39 mm		Diameter buis D = 19 mm	
	glas $\rho=2630 \text{ kg/m}^3$	nylon $\rho=1200 \text{ kg/m}^3$	glas $\rho=2630 \text{ kg/m}^3$	staal $\rho=7900 \text{ kg/m}^3$
diameter bol d_u (mm)	5,0		5,0	4,0
	3,97		3,0	2,0
	3,0			
	2,1			

III Buizen beplakt met bollen

Materiaal bol	Diameter buis D (mm)	Diameter op buiswand ge- plakte bollen d' (mm)	Diameter bol d_u (mm)
glas	35,7	3,8	3,8
glas	36,5	3,0	3,0
staal	17,5	2,0	2,0

Voor deze combinaties is de initieele snelheid gemeten wanneer de bol met diameter d_u zich op diepte $x = 0, \frac{1}{4} d_u, \frac{1}{2} d_u, \frac{3}{4} d_u$ en d_u tussen de bollen op de wand bevindt.

IV Geroerd vat

Diameter vat : $D'' = 190$ mm

Hoogte vat : $H = 190$ mm

Diameter roerder : $D' = 50$ mm

Diameter en hoogte geleidebuis: $1/3 D'' = 63$ mm

De geleide buis is centraal in het vat geplaatst.

De metingen zijn op een afstand $r = 1/3 D''$ van het midden van de bodem verricht.

Materiaal bol	glas $\rho = 2630 \text{ kg/m}^3$	staal $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	nylon $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$
diameter	6,0	5,5	5,0
bol	4,95	3,95	2,0
d_u (mm)	3,95	3,0	
	3,0	2,0	
	2,1		

Voor een glazen bol met $d_u = 3,95$ mm is op verschillende afstanden r gemeten.

Hoofdstuk III.

Metingen.

1. Meting van de frictiefactor.

De frictiefactoren f als functie van het Reynoldsgetal Re_D met de relatieve ruwheid $(\frac{e}{D})$ als parameter zijn in figuur 9 uitgezet.

In de figuur zijn tevens de Reynoldsgebieden aangegeven waarin de metingen met bollen zijn verricht.

De uitkomsten voor de frictiefactor in de gladde en ruwe buis met $D = 40,0$ mm respectievelijk $39,0$ mm wijken af van de te verwachten waarden. Beide krommen lopen te steil. De kromme voor de ruwe buis met $D = 39,0$ mm zou beneden die van de buis met $D = 19,0$ mm moeten liggen, want beide buizen waren met schuurpapier van dezelfde grofheid beplakt.

De afwijkingen zijn niet duidelijk verklaarbaar. De inlooptlengte was groter dan $30 D$ voor alle buizen. Volgens Hinze [8] is dit ruim voldoende in het meetgebied ($10^4 \leq Re_D \leq 4 \cdot 10^4$).

De uitlooptlengte was voor alle buizen groter dan $12 D$.

Het is waarschijnlijker dat de capillairen voor de drukvalmeting, niet nauwkeurig loodrecht in de buiswand gemonteerd waren, zodat ook een stuwdruk ($\div \frac{1}{2} \rho \langle V \rangle^2$) gemeten werd.

2. Metingen in gladde buizen.

De bollen zijn aan een nylondraad van $0,1$ mm dik gelijmd. Er is gebleken dat de dikte van de draad geen invloed heeft, mits de dikte niet groter wordt dan ongeveer $0,2 d_u$.

De meting van de initieele snelheid voor glas en staal is zeer goed reproduceerbaar, terwijl ook met kleine bollen (≈ 2 mm) gemeten kan worden.

Dit alles is voor nylon bollen moeilijker realiseerbaar. De dichtheid van nylon verschilt weinig met die van water. De hevigheid van de tik tegen het membraam is klein. Het signaal van nylon bollen kleiner dan 4 mm komt niet boven de ruis van de stroming uit.

Ook is de frequentie laag (maximaal ≈ 20). Een aantal zwakke tikken die niet geregistreerd worden, beïnvloedt sterk de frequentiekenarakteristiek.

FRICTIEFACTOR ALS FUNCTIE VAN
REYNOLDSGETAL MET DE RELATIEVE
RUWHEID ALS PARAMETER.

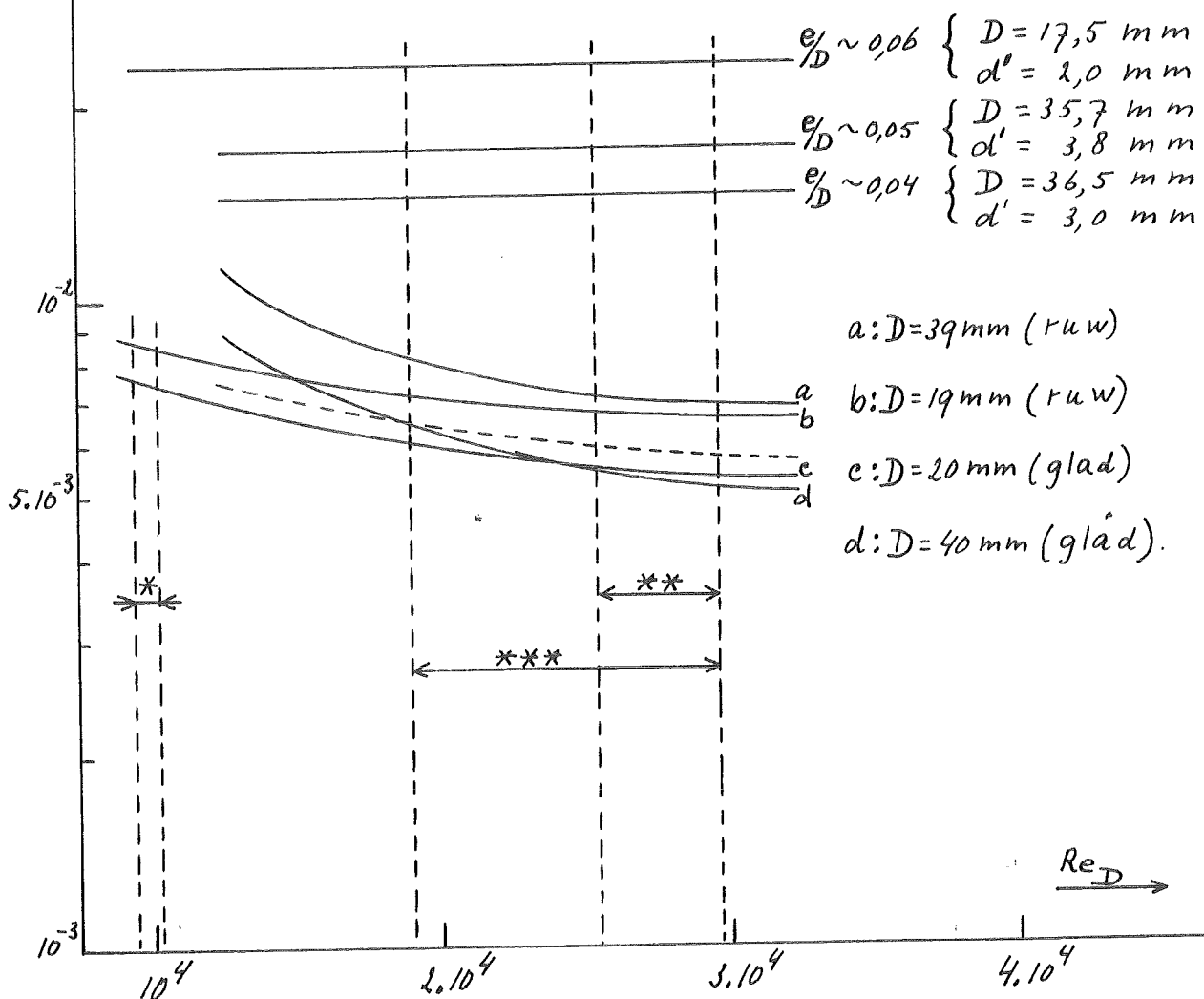
— gemeten
----- theoretische lijn voor gladde buis.

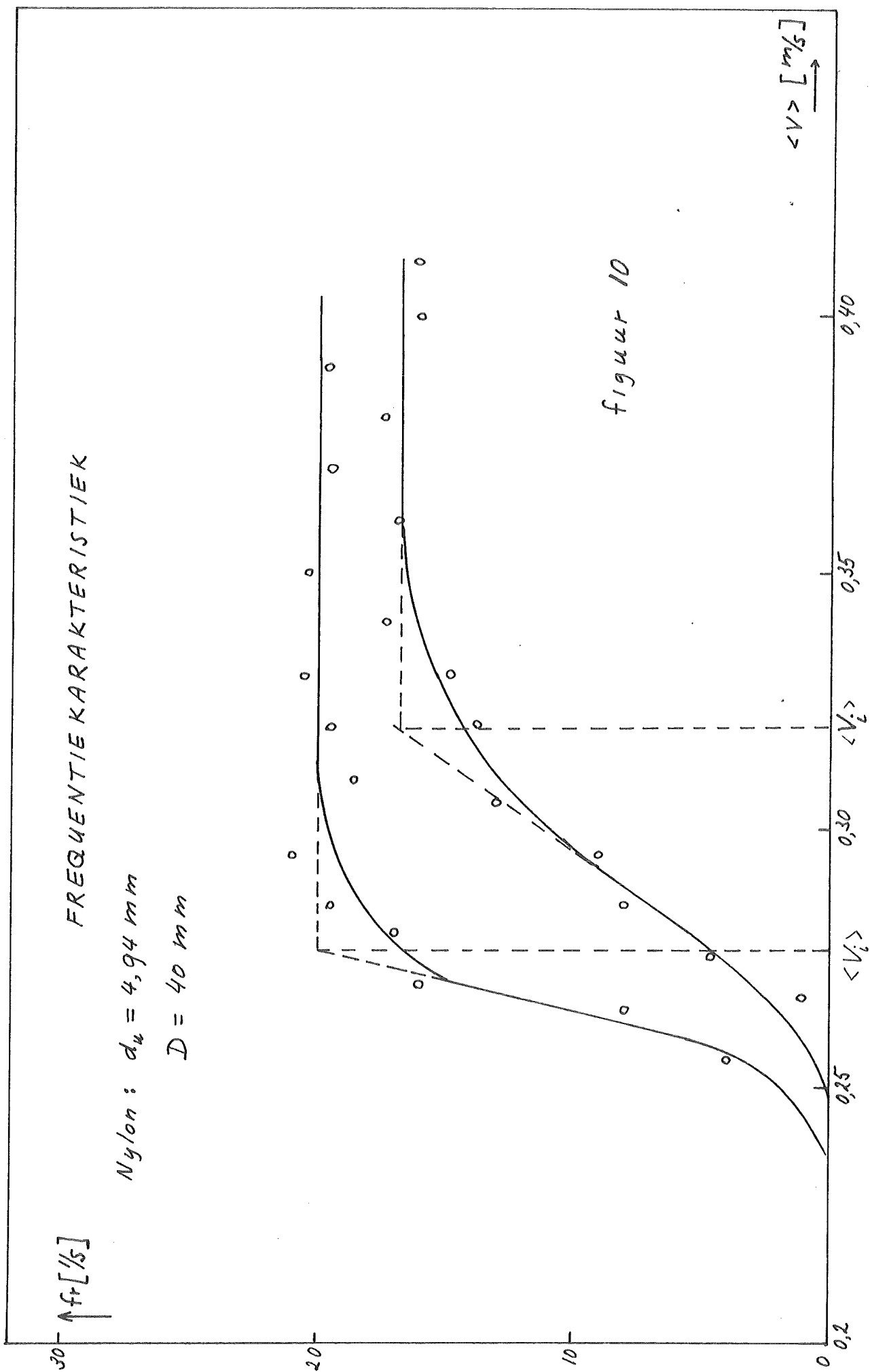
D = gemiddelde diameter buis.
 d' = diameter van op buiswand geplakte bollen
 e/D = relatieve ruwheid.

- * glazen bollen in gladde en ruwe buizen met $D = 20$ resp $D = 19$ mm
- ** glazen bollen in gladde en ruwe buizen met $D = 40$ resp $39; 36,5; 35,7$ mm.
- *** stalen bollen in gladde en ruwe buizen met $D = 20$ resp $19; 17,5$ mm.

$5 \cdot 10^{-2}$

figuur 9.





FREQUENTIEKARAKTERISTIEK

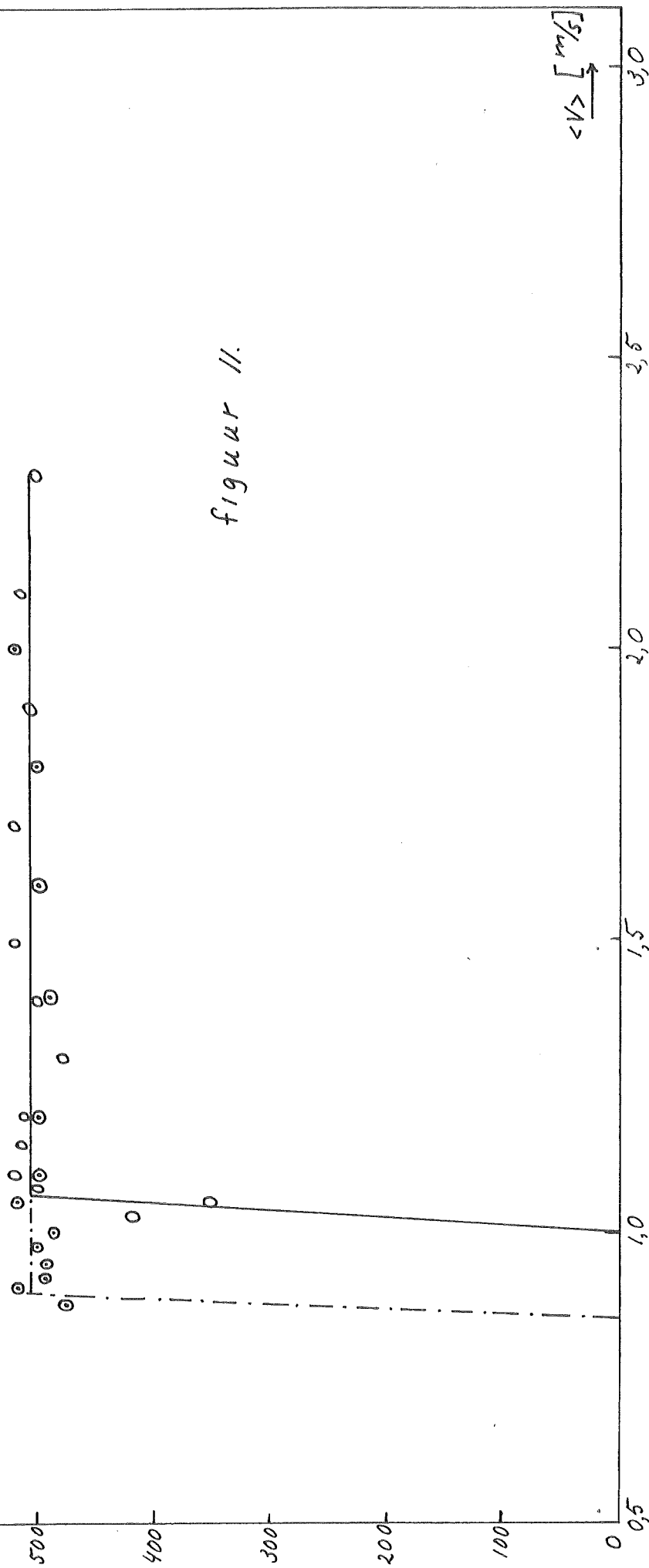
f_r [$1/s$]

staal: $d_u = 2,0$ mm

$D = 20$ mm

—: $\langle V \rangle$ toenemend

- - -: $\langle V \rangle$ afnemend



figuur II.

Tabel I

Meetresultaten in gladde buizen

D = 40,0 mm						
materiaal	d_u (mm)	d_u/D	$\langle V_i \rangle$ (m/s)	C_w	$\langle V_i \rangle / \langle V_k \rangle$	f
glas $\rho = 2630 \text{ kg/m}^3$	4,95	0,1238	0,740	0,41	0,593	$5,5 \cdot 10^{-3}$
	4,95	0,1238	0,750	0,41	0,598	
	2,93	0,073	0,720	0,45	0,605	
	2,72	0,068	0,725	0,46	0,617	
	2,72	0,068	0,682	0,46	0,580	
	2,72	0,068	0,695	0,46	0,587	
	2,26	0,0565	0,685	0,50	0,605	
	2,26	0,0565	0,715	0,50	0,632	
nylon $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	4,94	0,1235	0,275	0,48	0,680	$10 \cdot 10^{-3}$
	4,94	0,1235	0,320	0,48	0,795	
	3,93	0,098	0,290	0,53	0,752	
	3,93	0,098	0,293	0,53	0,760	

D = 20,0 mm						
materiaal	d_u (mm)	d_u/D	$\langle V_i \rangle$ (m/s)	C_w	$\langle V_i \rangle / \langle V_k \rangle$	f
glas $\rho = 2630 \text{ kg/m}^3$	4,95	0,247	0,52	0,41	0,588	$7,5 \cdot 10^{-3}$
	3,0	0,15	0,50	0,45	0,590	
nylon $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	3,93	1,965	0,20	0,53	0,735	$12 \cdot 10^{-3}$
	6,0	0,30	1,50	0,39	0,808	
staal $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	5,5	0,275	1,40	0,385	0,745	$5,5 \cdot 10^{-3}$
	3,95	0,197	1,30	0,39	0,697	
	3,20	0,16	1,20	0,405	0,646	
	2,0	0,10	1,08	0,43	0,607	

Tabel II

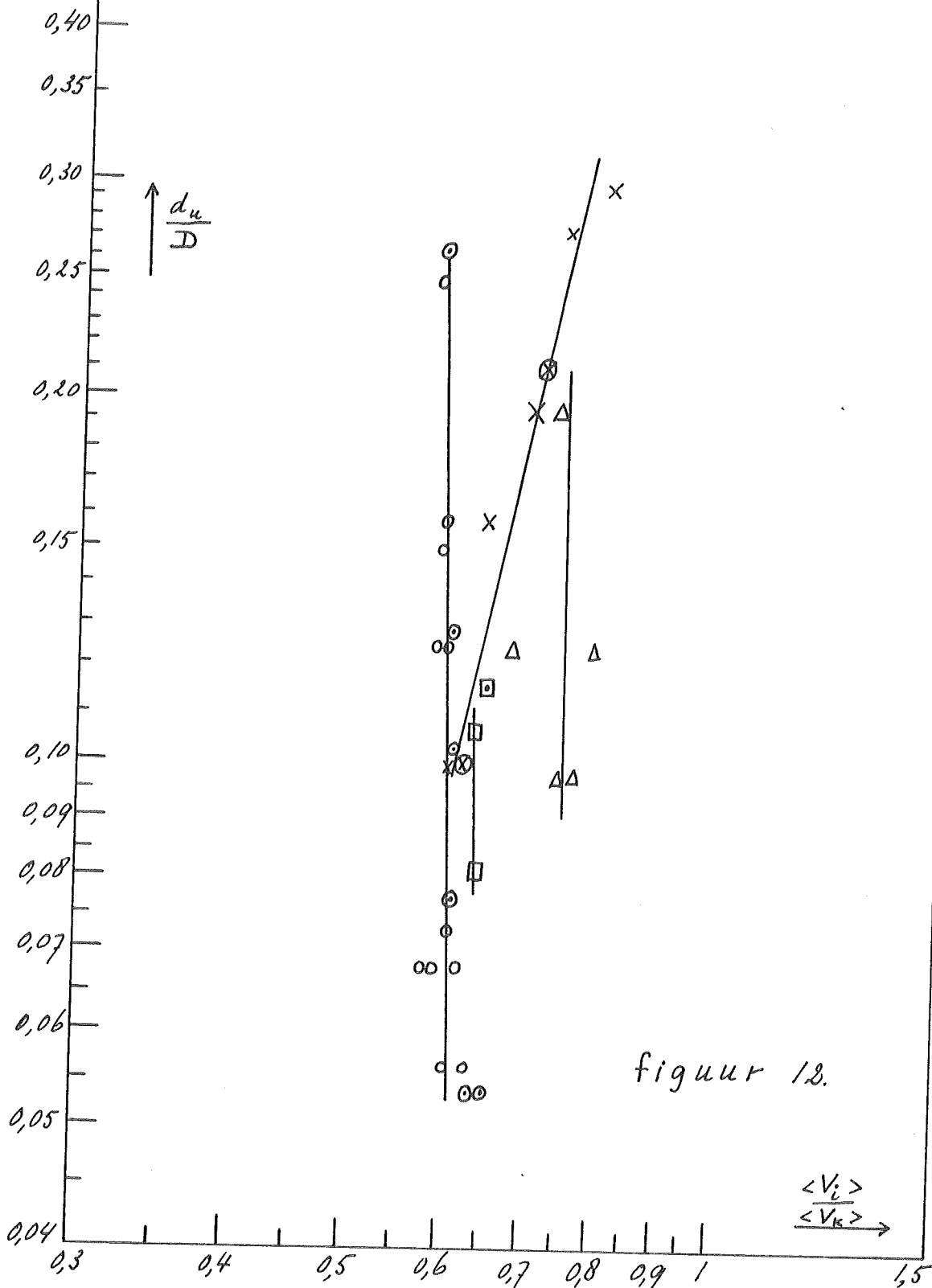
Meetresultaten in met schuurpapier beplakte buizen

D = 39,0 mm						
materiaal	d_u (mm)	d_u/D	$\langle V_i \rangle$ (m/s)	C_w	$\langle V_i \rangle / \langle V_k \rangle$	f
glas $\rho=2630$ kg/m ³	5,0	0,128	0,750	0,41	0,605	$7 \cdot 10^{-3}$
	3,97	0,102	0,746	0,42	0,612	
	3,0	0,077	0,723	0,45	0,615	
	2,1	0,054	0,720	0,51	0,65	
	2,1	0,054	0,710	0,51	0,642	

D = 19,0 mm						
materiaal	d_u (mm)	d_u/D	$\langle V_i \rangle$ (m/s)	C_w	$\langle V_i \rangle / \langle V_k \rangle$	f
glas $\rho=2630$ kg/m ³	5,0	0,263	0,51	0,41	0,593	$9 \cdot 10^{-3}$
	3,0	0,158	0,49	0,45	0,60	
staal = $\rho=7900$ kg/m ³	4,0	0,210	1,30	0,39	0,715	$7 \cdot 10^{-3}$
	2,0	0,105	1,10	0,43	0,63	

$\frac{\langle V_i \rangle}{\langle V_k \rangle}$ ALS FUNCTIE VAN $\frac{d_u}{D}$

- | | | |
|---|------------------------------------|------------|
| ○ | glas in gladde buizen | $f=0,0055$ |
| ⊙ | glas in buizen met schuurpapier | $f=0,008$ |
| □ | glas in buizen met bollen beplakt | $f=0,016$ |
| △ | nylon in gladde buizen. | $f=0,011$ |
| x | staal in gladde buizen | $f=0,0055$ |
| ⊗ | staal in buizen met schuurpapier | $f=0,007$ |
| ⊠ | staal in buizen met bollen beplakt | $f=0,023$ |



In figuur 10 zijn twee karakteristieken getekend voor hetzelfde nylon bolletje.

De frequentiekarakteristieken voor staal vertonen een sterke hysteresis. De tikkende beweging start, bij toenemende stroomsnelheid bij een grotere snelheid dan de snelheid waarbij de beweging wordt beëindigd bij afnemende stroomsnelheid.

Dit verschijnsel is bij glas en nylon niet waargenomen. Het kan verklaard worden doordat het verschil in energie, nodig om de beweging te starten en de beweging te onderhouden voor een stalen bol groter is dan voor glas en nylon. Ook de elastische eigenschappen van membraam en bol zullen een rol spelen.

De initieele snelheid voor stalen bollen is zeer scherp gedefinieerd. In figuur (11) zijn de karakteristieken getekend voor een stalen bol bij toenemende en afnemende stroomsnelheid.

De resultaten van de metingen zijn verzameld in tabel I.

In figuur 12 is $\frac{\langle v_i \rangle}{\langle v_k \rangle} = \frac{\langle v_i \rangle \sqrt{C_w}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} D}}$ als functie van $\frac{d_u}{D}$ uitgezet.

3. Metingen in met schuurpapier beplakte buizen.

De bepaling van de initieele snelheid was goed reproduceerbaar, wanneer het membraam een deel van het schuurpapier verving (figuur 2).

De initieele snelheid kon niet bepaald worden wanneer ook het membraam beplakt was met schuurpapier. Het rollen van het bolletje over het schuurpapier werd dan ook gedetecteerd, wat de frequentiekarakteristiek sterk beïnvloedde.

De resultaten zijn vermeld in tabel II en eveneens uitgezet in figuur 12.

4. Metingen in met bollen beplakte buizen.

De diepte tussen de bollen op de wand wordt aangegeven door de grootte x . Het referentievlak $x = 0$ is gelijk genomen met de bovenkant van de bollen op de wand (figuur 5).

De diameter van de bollen op de wand wordt aangegeven met d' .

De frequentiekarakteristieken bij verschillende waarden van x zijn getekend in figuur 13 voor een stalen bol en in figuur 14 voor twee glazen bollen.

De bepaling van de initieele snelheid uit deze karakteristieken levert

FREQUENTIEKARAKTERISTIEKEN STALEN BOL

f_r [Hz]

150

125

100

75

50

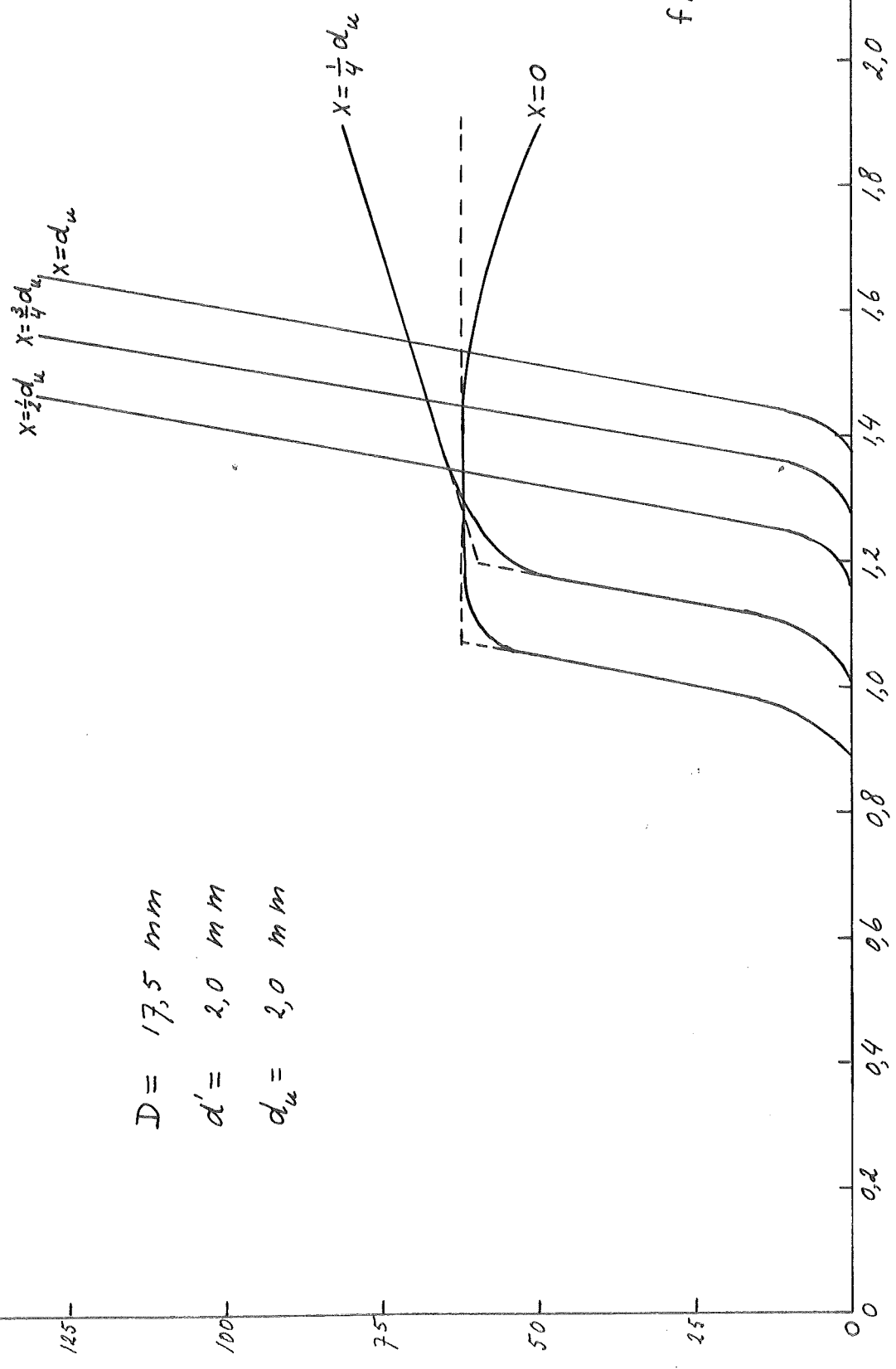
25

0

$D = 17,5 \text{ mm}$

$d' = 2,0 \text{ mm}$

$d_u = 2,0 \text{ mm}$



figuur 13

$\langle v \rangle$ [m/s]

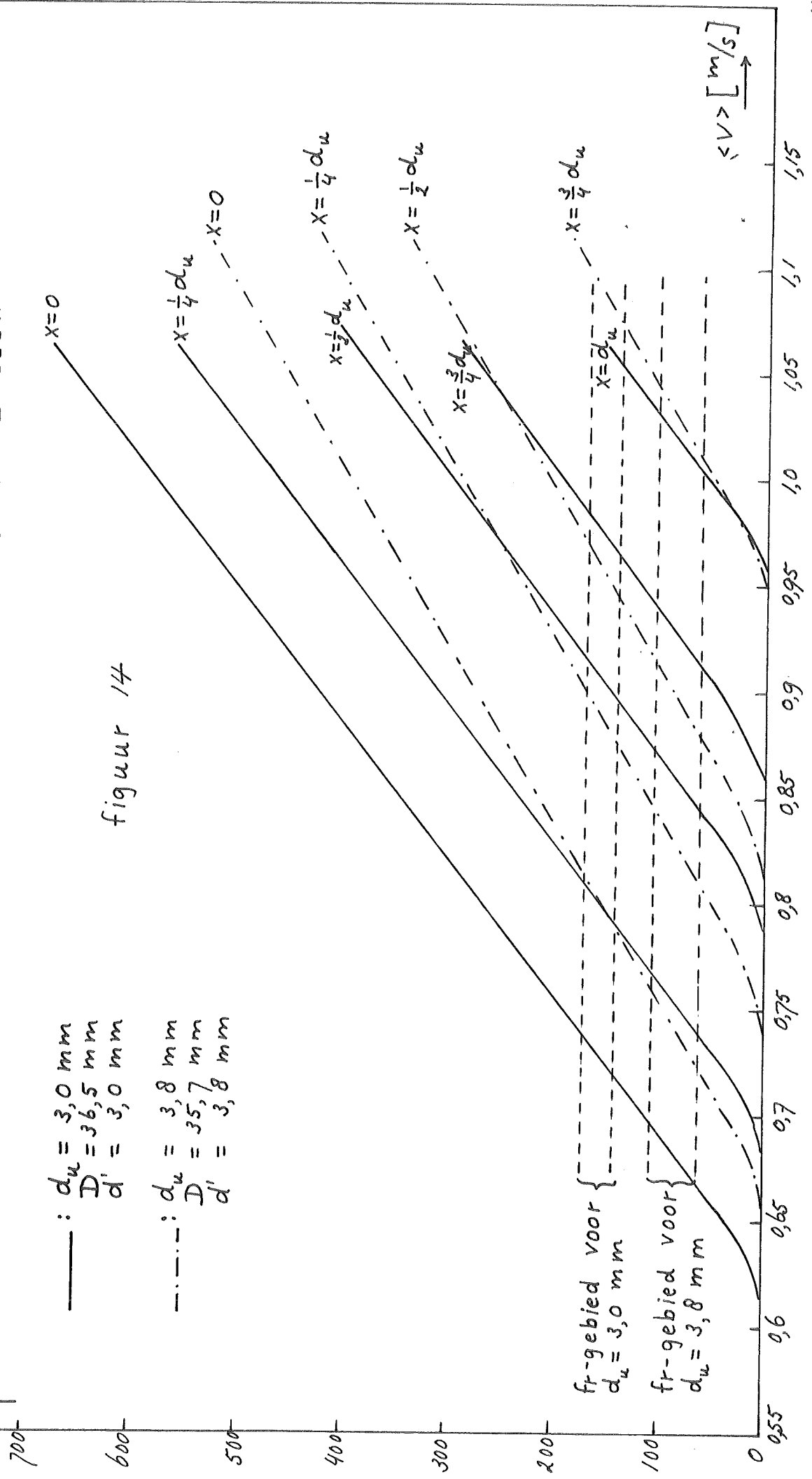
FREQUENTIEKARAKTERISTIEKEN GLAZEN BOLLEN

figuur 14

↑ fr [Hz]

— : $d_u = 3,0$ mm
 $D = 36,5$ mm
 $d' = 3,0$ mm

--- : $d_u = 3,8$ mm
 $D = 35,7$ mm
 $d' = 3,8$ mm



fr-gebied voor $d_u = 3,0$ mm

fr-gebied voor $d_u = 3,8$ mm

↑ $\langle V \rangle [m/s]$

moeilijkheden, omdat alle karakteristieken rechten zijn, behalve voor staal bij $x = 0$ en $x = \frac{1}{4} d_u$.

Toch kan een goede schatting van de initieele snelheden gemaakt worden, door het signaal, wat door het tikkende bolletje wordt veroorzaakt, te beluisteren met een oortelefoon.

Er zijn twee soorten signalen duidelijk te onderscheiden:

1. het tikken van de bol tegen het membraam
2. het tikken van de bol tegen de omliggende bollen.

Bij lage stroomsnelheden zijn vooral signalen van de eerste soort waar te nemen en bij hoge stroomsnelheden vooral die van de tweede soort.

De overgang van de signalen van de eerste soort naar die van de tweede soort en het regelmatig worden van de signalen is een redelijk goede indicatie voor de bepaling van de initieele snelheid.

Voor de stalen bol vertonen de karakteristieken voor $x = 0$ en $x = \frac{1}{4} d_u$ wel een knik, waaruit $\langle V_i \rangle$ bepaald kan worden (figuur 13). De verklaring hiervan is, dat bij de hogere stroomsnelheden voor staal de bol minder heen en weer geslingerd wordt. Bij de stalen bol voor $x = 0$ waren de signalen van de tweede soort nauwelijks te onderscheiden. Voor $x = \frac{1}{4} d_u$ kwamen de signalen van de tweede soort al duidelijk naar voren, wat ook het toenemen van de frequentie bij grote stroomsnelheden verklaart.

Bij $x = \frac{1}{2} d_u$, $x = \frac{3}{4} d_u$ en $x = d_u$ was een duidelijk waarneembare overgang van de signalen van de eerste soort naar die van de tweede soort bij een frequentie die gelijk was aan de frequentie waarbij de karakteristieken bij $x = 0$ en $x = \frac{1}{4} d_u$ een knik vertonen.

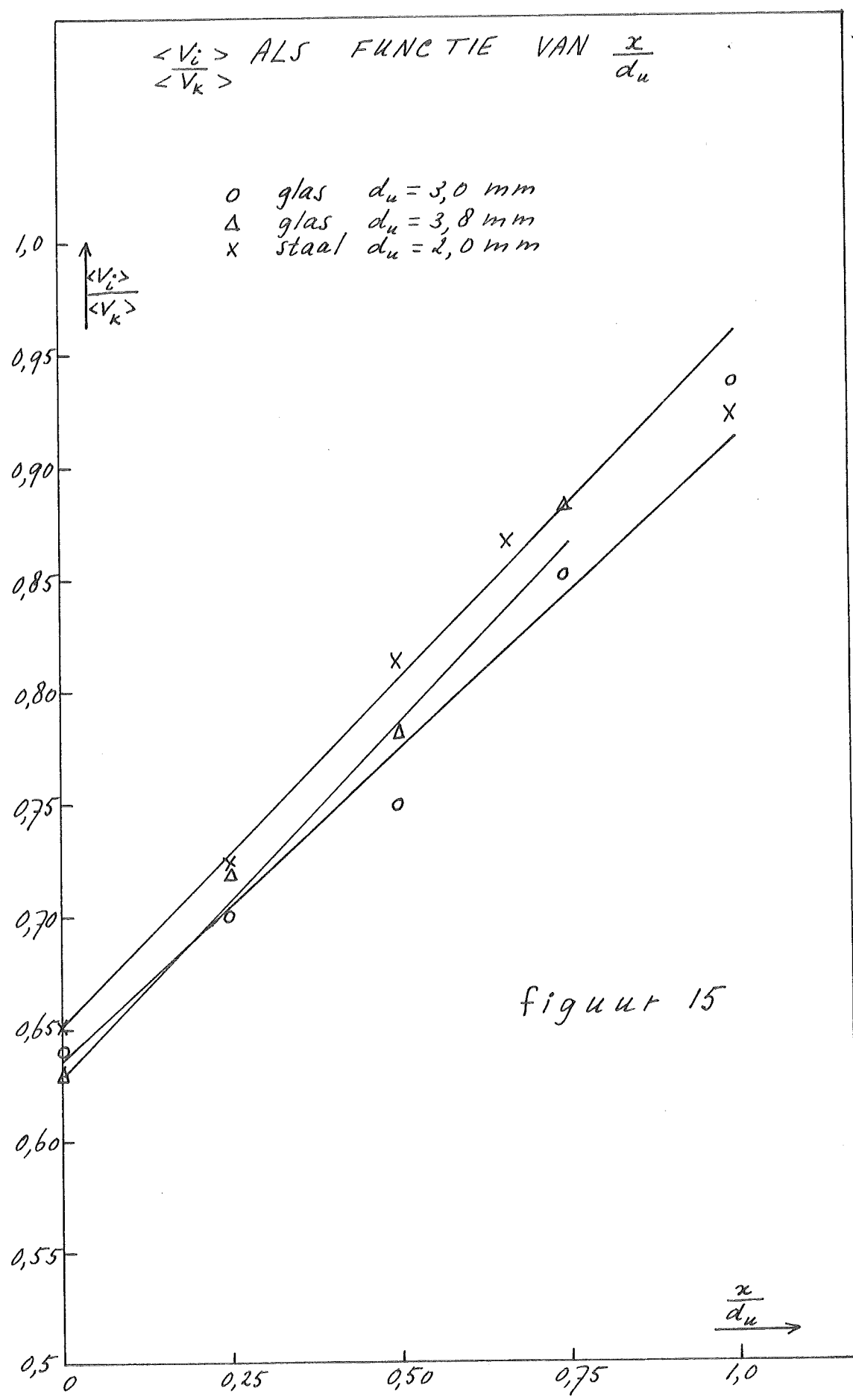
Door een lijn bij deze frequentie evenwijdig aan de $\langle V \rangle$ -as te trekken kan uit de snijpunten met de karakteristieken de initieele snelheden bepaald worden (figuur 13).

Voor glazen bollen is de frequentie waarbij overgang optreedt van signalen van de eerste soort naar die van de tweede soort niet scherp gedefinieerd, maar ligt binnen een bepaalde frequentieband. In figuur 14 is de bovengrens en ondergrens van de frequentiebanden aangegeven voor twee glazen bollen. Voor de initieele snelheden is de gemiddelde waarde genomen van de snelheden die bij de snijpunten horen van de onder en bovengrens van de frequentieband

Tabel III

Meetresultaten in buizen met bollen beplakt

	x/d_u	V_i (M/s)	C_w	$\langle V_i \rangle / \langle V_k \rangle$	f
glas	0	0,73	0,45	0,640	$1,45 \cdot 10^{-2}$
$d_u = 3,0$ mm	$\frac{1}{4}$	0,80	0,45	0,70	
$d' = 3,0$ mm	$\frac{1}{2}$	0,905	0,45	0,794	
$D = 36,5$ mm	$\frac{3}{4}$	0,97	0,45	0,85	
$d_u/D = 0,082$	1	1,066	0,45	0,935	
glas	0	0,74	0,43	0,63	$1,7 \cdot 10^{-2}$
$d_u = 3,8$ mm	$\frac{1}{4}$	0,83	0,43	0,718	
$d' = 3,8$ mm	$\frac{1}{2}$	0,90	0,43	0,78	
$D = 35,7$ mm	$\frac{3}{4}$	1,03	0,43	0,88	
$d_u/D = 0,106$					
staal	0	1,08	0,43	0,65	$2,3 \cdot 10^{-2}$
$d_u = 2,0$ mm	$\frac{1}{4}$	1,20	0,43	0,722	
$d' = 2,0$ mm	$\frac{1}{2}$	1,35	0,43	0,812	
$D = 17,5$ mm	$\frac{3}{4}$	1,44	0,43	0,866	
$d_u/D = 0,114$	1	1,53	0,43	0,92	



en de karakteristieken.

In tabel III_d zijn de metingen verzameld. In figuur 12 is $\frac{\langle V_i \rangle}{\langle V_k \rangle}$ als functie van $\frac{d_u}{D}$ bij $x = 0$ voor twee glazen bollen en een stalen bol getekend.

In figuur 15 is $\frac{\langle V_i \rangle}{\langle V_k \rangle}$ uitgezet als functie van $\frac{x}{d_u}$.

5. Meting van de circulatietijd als functie van het toerental.

Uit de meetresultaten blijkt dat $N.t_e = 20$. In figuur 16 is de circulatietijd als functie van het toerental getekend.

6. Meting van het initieele toerental in het geroerde vat.

De meting van het initieele toerental was goed reproduceerbaar.

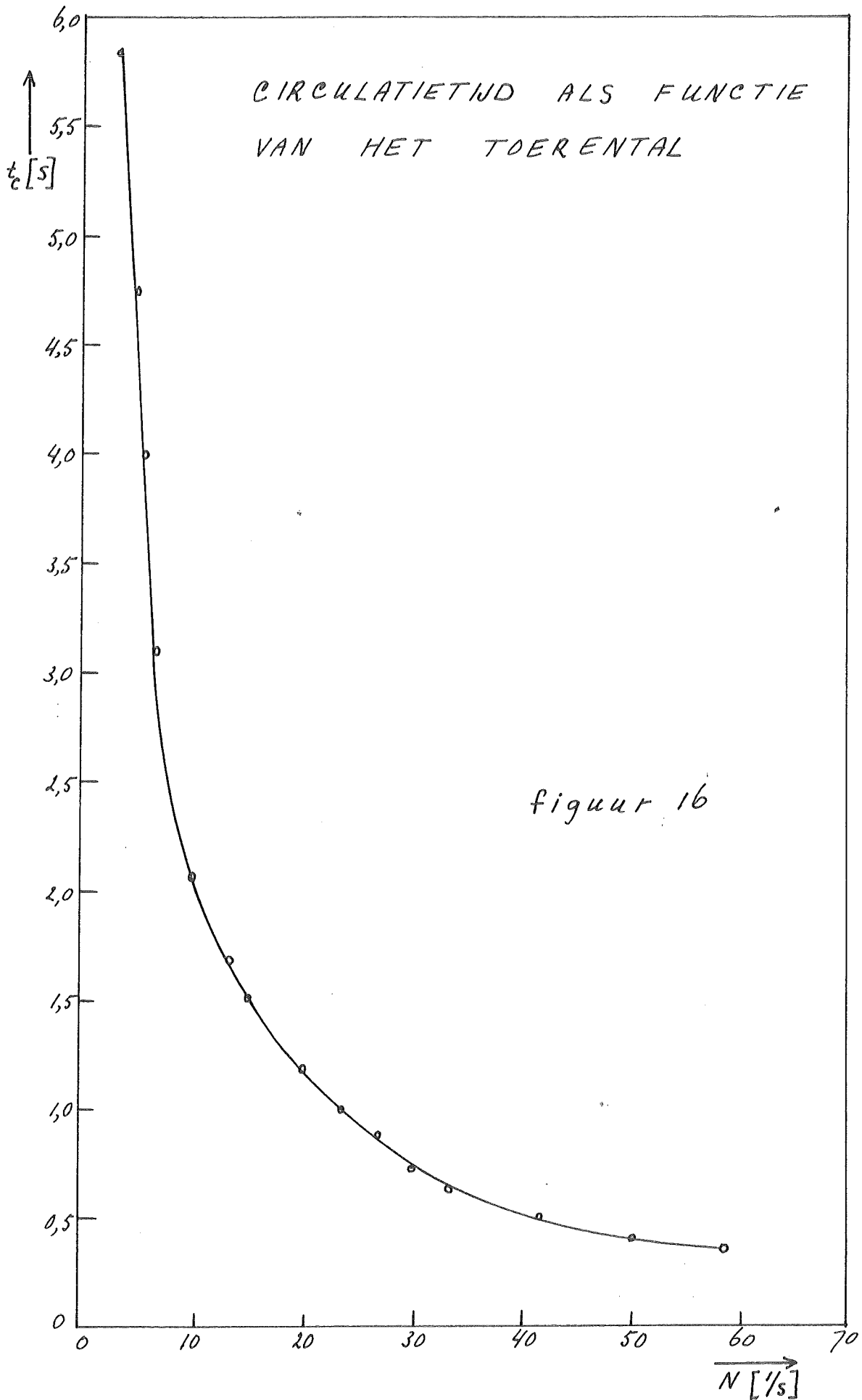
De metingen zijn gedaan op een afstand $r = 1/3 D'$ met diverse bollen.

De resultaten zijn vermeld in tabel IV en uitgezet in figuur 17. Als karakteristieke afmeting H' is de afstand tussen onderkant geleide-

buis en de bodem van het vat genomen. Voor het vat wordt $\langle V_k \rangle' = \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} H'} / \sqrt{C_w}$.

Met een glazen bol met diameter $d_u = 3,95$ mm zijn metingen gedaan op verschillende afstanden r . Onder de geleidebuis kon niet gemeten worden door het hevig heen en weer slingeren van de bol. Resultaten staan

in tabel IV. In figuur 18 is $\frac{D_g^2 / H' t_{c_i}}{\langle V_k \rangle'}$ als functie van $\frac{r}{D'}$ getekend.



Tabel IV

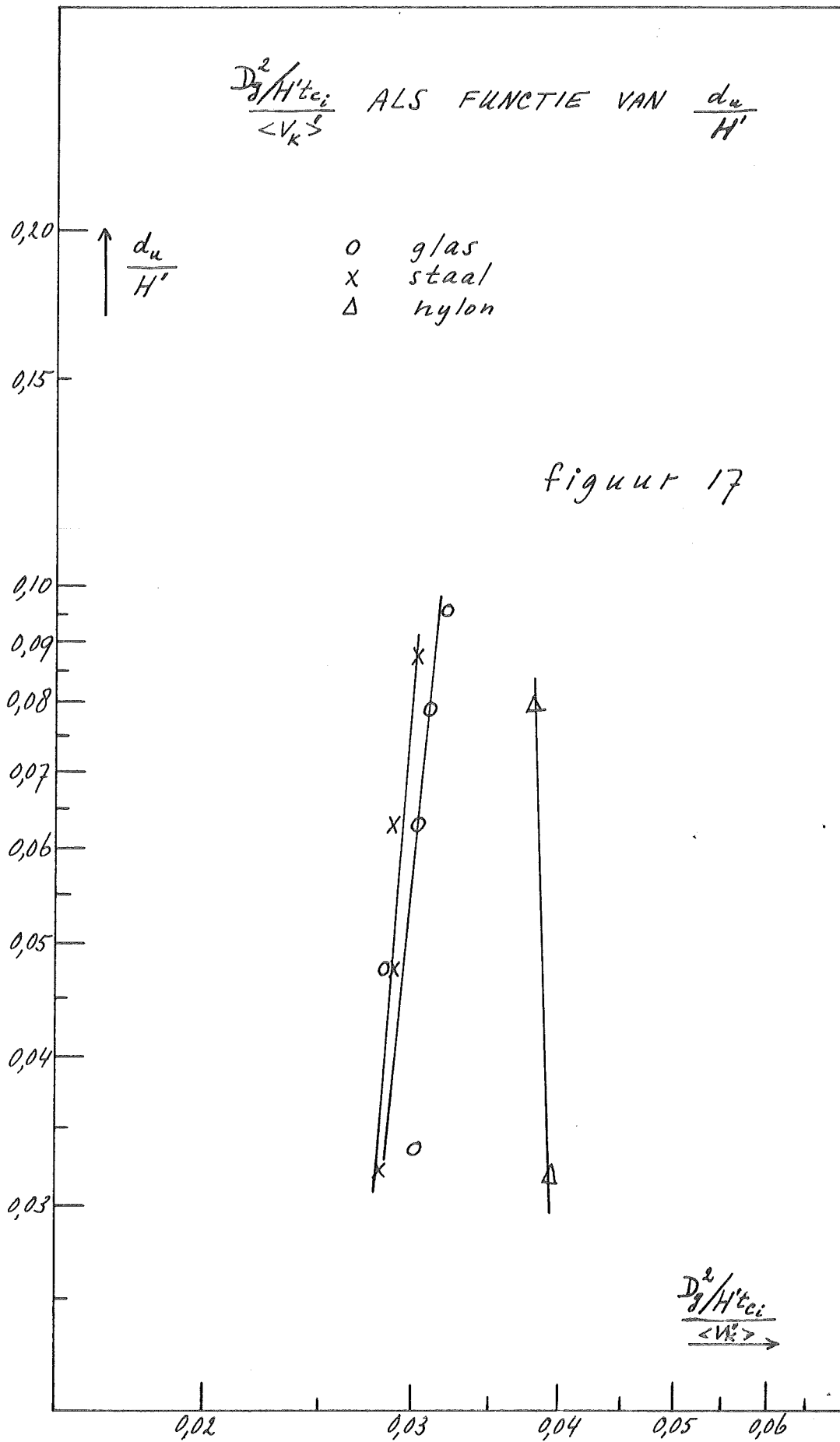
Meetresultaten in het geroerde vat

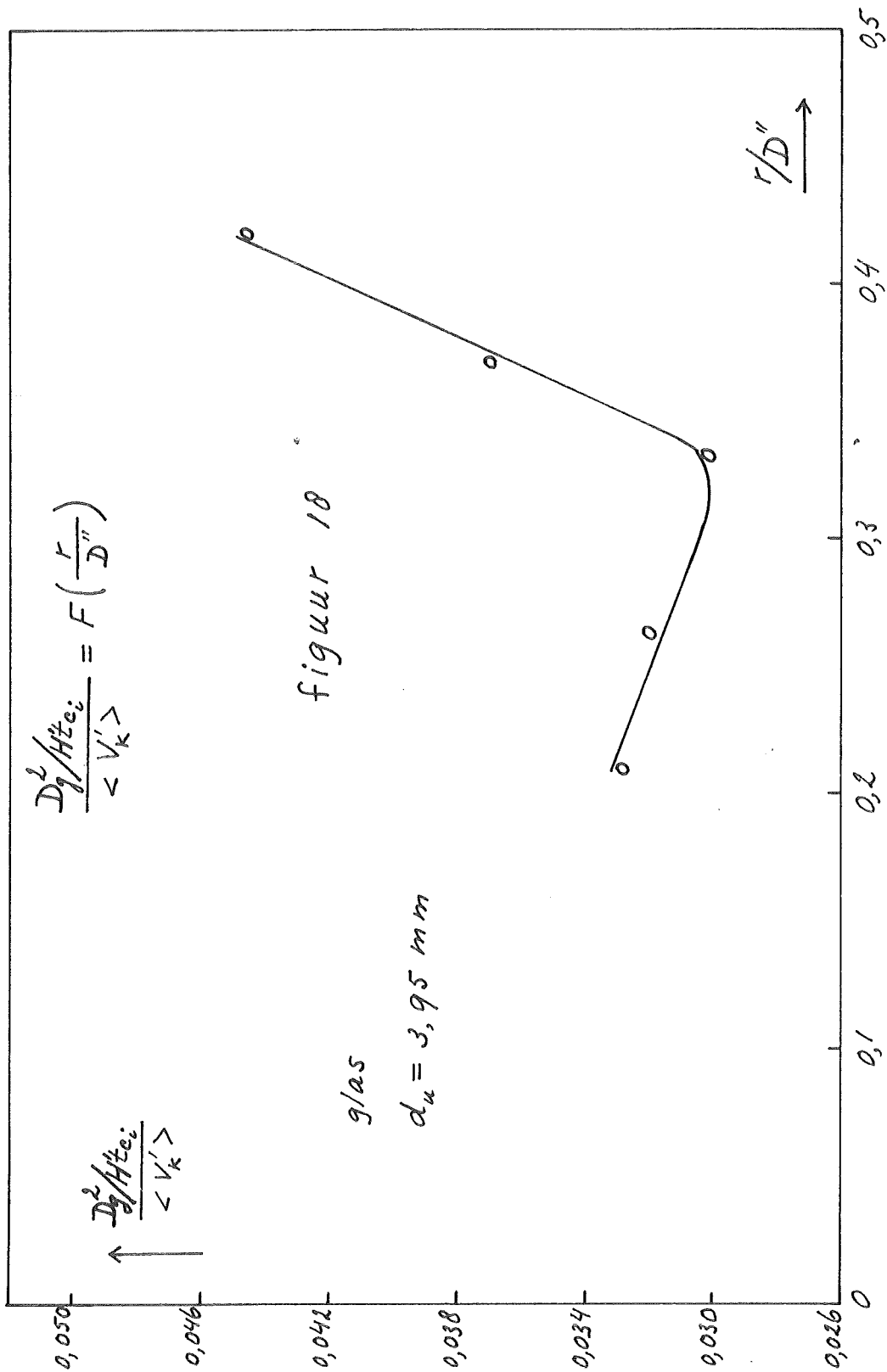
materiaal	d_u (mm)	d_u/H' *)	t_{c_1} (s)	C_w	$\frac{D^2}{g} / H' t_{c_1} \cdot **)$
glas $\rho = 2630 \text{ kg/m}^3$	6,0	0,095	1,23	0,395	0,0322
	4,95	0,0785	1,29	0,41	0,0311
	3,95	0,0627	1,35	0,42	0,0302
	3,0	0,0476	1,42	0,45	0,0284
	2,1	0,0334	1,50	0,51	0,030
staal $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	5,5	0,0873	0,63	0,385	0,0302
	3,95	0,0627	0,66	0,39	0,0289
	3,0	0,0476	0,68	0,41	0,0285
	2,0	0,0318	0,71	0,43	0,0282
nylon $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	5,0	0,0793	3,25	0,475	0,0380
	2,0	0,0318	4,2	0,85	0,0392

*) $H' = 63,0 \text{ mm}$, afstand van onderkant geleide buis tot bodem van het vat.

$$**) \langle V_k \rangle' = \frac{\sqrt{g \frac{4\rho}{\rho} H'}}{\sqrt{C_w}}$$

glas	$\frac{r}{D'}$	t_{c_1} (sec)	$\frac{D^2}{g} / H' t_{c_1} \cdot \langle V_k \rangle'$
$d_u = 3,95 \text{ mm}$ $\frac{d_u}{H'} = 0,0627$	0,21	1,24	0,0328
	0,263	1,27	0,0321
	0,333	1,35	0,0302
	0,369	1,10	0,0370
	0,42	0,90	0,0447





Hoofdstuk IV

Discussie van de meetresultaten1. Experimenten in buizen

Vergelijken we de resultaten van de metingen in gladde buizen met de correlaties van Frank-Kamenetskii, Shield, Durand en Hinze dan blijken ze het beste aan te sluiten bij die van Frank-Kamenetskii (figuur 19). De correlaties tussen de initieele snelheid en de grootheden die deze bepalen zijn voor glas, staal en nylon enigzins verschillend.

De meest onzekere factor is de weerstands coëfficiënt C_w voor een deeltje dat zich in een turbulente stroming langs een wand bevindt. Hiervoor zijn geen waarden bekend. C_w is daarom berekend voor de stationaire valsnelheid van het deeltje in de stilstaande vloeistof.

De invloed van de frictiefactor is zeer gering. De metingen in gladde buizen en buizen beplakt met schuurpapier geven geen merkbare invloed van de frictiefactor. Zelfs de metingen in met bollen beplakte buizen tonen slechts een afhankelijkheid van $\frac{\langle V_i \rangle}{\langle V_k \rangle}$ met $f^{0,05}$ voor glas en $f^{0,02}$ voor staal (figuur 12).

Dit is in tegenspraak met alle theorieën, die $\frac{\langle V_i \rangle}{\langle V_k \rangle}$ omgekeerd evenredig stellen met f^β waarin $\beta \geq 0$.

De gemeten exponent van de frictiefactor is zeer dubieus omdat we de invloed van de wandruwheid op de weerstandscoefficiënt van een bol, vlak bij de wand, niet weten, en voor C_w de waarde bij stationaire vlasnelheid hebben genomen.

Om de theorieën te kunnen vergelijken is voor de constante α in formule (5) de waarde één gekozen en voor β de waarde nul.

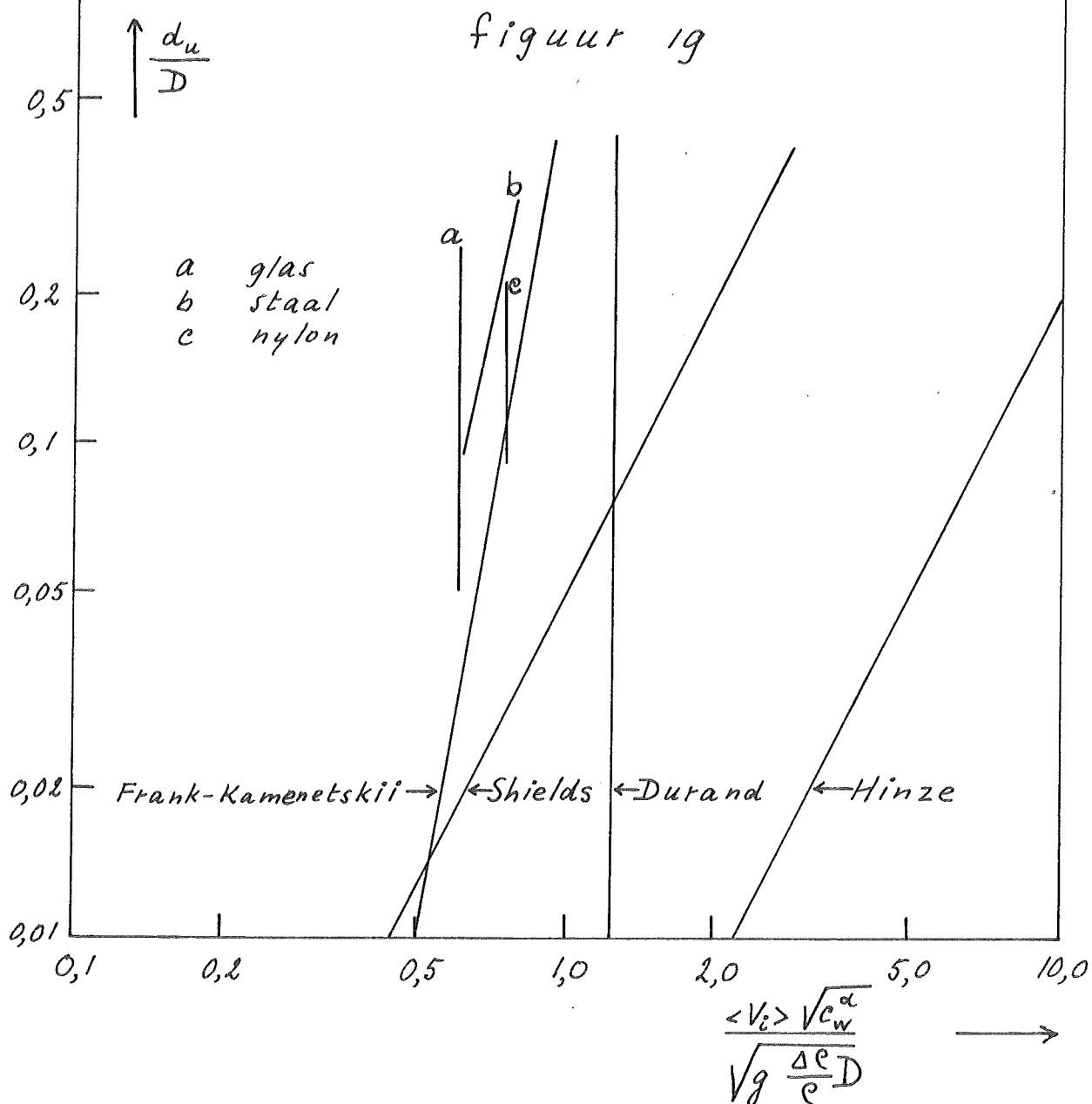
De overige constanten in formule (5) zijn in de tabel (figuur 19) voor glas, staal en nylon opgenomen.

De resultaten van de metingen in gladde buizen zijn in figuur 20 (tabel V) gegeven op een wijze die beter aan de metingen is aangepast. Volgens Frank-Kamenetskii (formule 12) is

$$\frac{\langle V_i \rangle}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}} \frac{d_u^{1/3}}{D^{1/3}} \quad \text{een functie van } Re_{d_u}.$$

BESTAANDE CORRELATIES EN
EIGEN METINGEN IN GLADDE BUIZEN
($f = 6 \cdot 10^{-3}$)

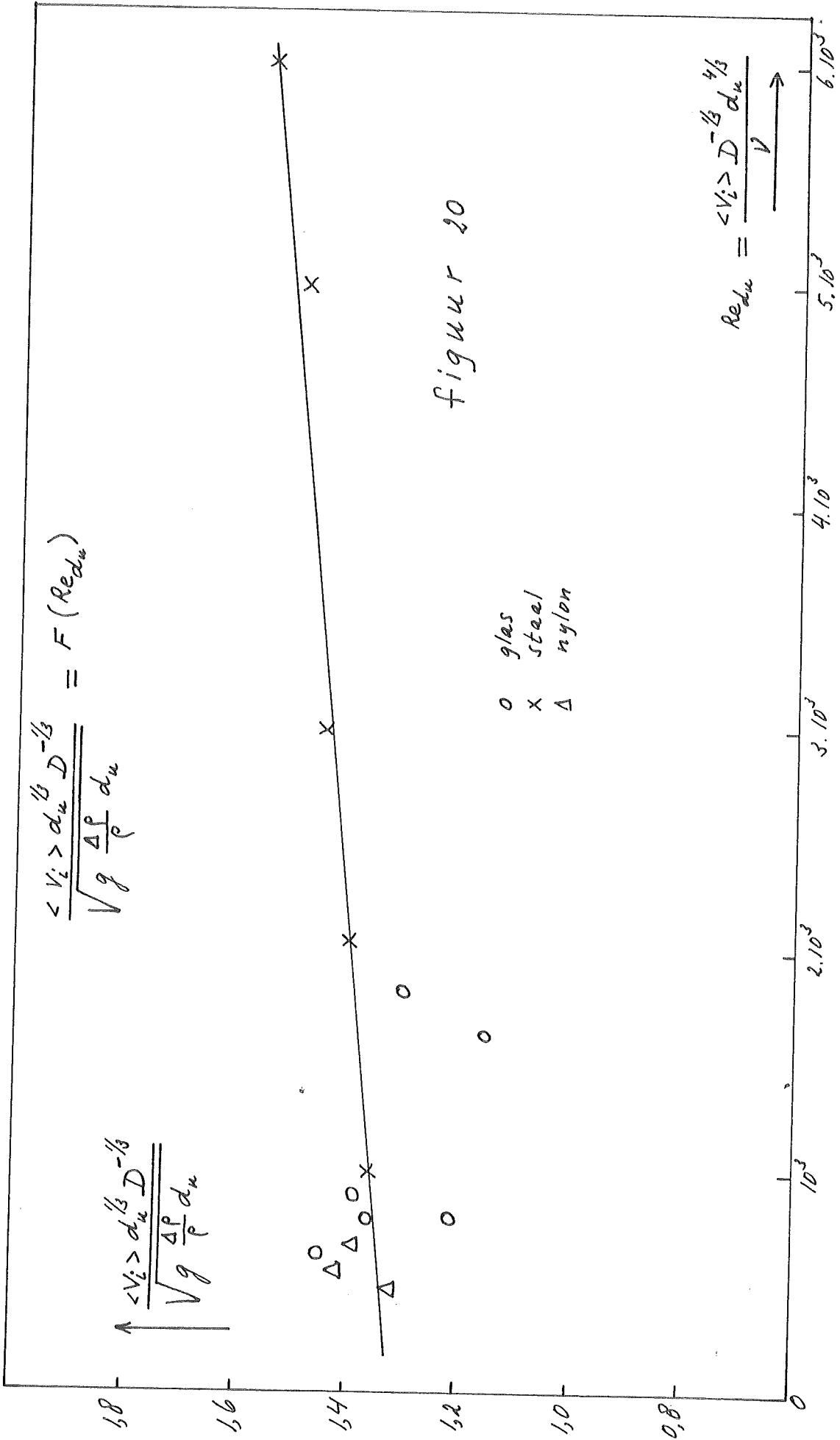
	C	α	β	γ
Durand	1,25	0	0	0
Shields	0,35	0	0,5	0,50
Hinze	$\geq 1,7$	1	0,5	0,50
Frank-Kamenetskii	0,91	1	0,33	0,16
staal	1,0	1	0	0,21
glas	0,60	1	0	0
nylon	0,75	1	0	0



Tabel V

Materiaal	D (mm)	d _u (mm)	$\langle V_i \rangle$ m/s	$\frac{\langle V_i \rangle D^{-1/3} d_u^{1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}}$	$\frac{\langle V_i \rangle D^{-1/3} d_u^{4/3}}{\nu}$
glas $\rho = 2630 \text{ kg/m}^3$	40	4,95	0,74	1,30	1840
	40	2,93	0,72	1,39	890
	40	2,73	0,695	1,36	780
	40	2,26	0,715	1,45	622
	20	4,95	0,52	1,15	1610
	20	3,0	0,50	1,21	800
staal $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	20	6,0	1,50	1,56	6000
	20	5,5	1,40	1,49	5000
	20	3,95	1,30	1,45	3000
	20	3,2	1,20	1,40	2070
	20	2,0	1,08	1,36	1000
nylon $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	40	4,94	0,275	1,39	680
	40	3,93	0,29	1,42	540
	20	3,93	0,20	1,32	459

materiaal	D' (mm)	d _u (mm)	N (1/s)	$\frac{ND'^{2/3} d_u^{1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}}$	$\frac{ND'^{2/3} d_u^{4/3}}{\nu}$
glas $\rho = 2630 \text{ kg/m}^3$	50	6,0	18,8	1,49	2800
	50	4,95	18,3	1,49	2090
	50	3,95	17,5	1,49	1490
	50	3,0	16,7	1,49	980
	50	2,1	15,7	1,49	570
staal $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$	50	5,5	36,0	1,42	4700
	50	3,95	33,3	1,375	2820
	50	3,0	32,0	1,385	1880
	50	2,0	31,5	1,47	1080
nylon $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$	50	5,0	6,5	1,53	755
	50	2,0	5,5	1,51	190



figur 20

In gladde buizen is in het meetgebied de frictiefactor nagenoeg constant.

Conclusies ten aanzien van C_w zijn niet te maken, omdat Frank-Kamenetskii zijn correlatie afleidde voor een homogeen isotroop turbulent veld; aan deze condities werd in het experiment niet voldaan.

De correlatie die het beste aansluit bij de metingen wordt gegeven door:

$$\frac{\langle V_i \rangle d_u^{1/3} D^{-1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}} = 1,3 + 4,4 \cdot 10^{-5} \text{Re}_{d_u} \quad (17)$$

Metingen in buizen beplakt met bollen tonen een afhankelijkheid van $\frac{\langle V_i \rangle}{\langle V_k \rangle}$ van de diepte x waarop een bol zich tussen omliggende bollen bevindt (figuur 15).

Uit figuur 15 blijkt dat: $\frac{\langle V_i \rangle|_x - \langle V_i \rangle|_{x=0}}{\langle V_k \rangle} = 0,3 \frac{x}{d_u} \quad (18)$

2. Experimenten in het geroerde vat.

De constanten in vergelijking $\frac{D_g^2 / H' t_{ci}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} H'}} = C' \frac{1}{\sqrt{C_w^\alpha}} \left(\frac{d_u}{H'}\right)^\gamma$

voor $r = 1/3 D''$, zijn in onderstaande tabel vermeld, waarin $\alpha = 1$ gesteld is (figuur 17).

	C'	α	γ
staal	0,037	1	0,08
glas	0,040	1	0,1
nylon	0,036	1	-0,025

De nauwkeurigheid van de exponent γ is niet groot, omdat gemeten is in een klein gebied van $\frac{d_u}{H'}$.

Ook hier kunnen de resultaten beter op de andere wijze worden weergegeven.

Volgens Frank-Kamenetskii is

$$\frac{N_i D^{2/3} d_u^{1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}} = F(\text{Re}_{d_u}) \quad (16)$$

Deze twee groepen staan in figuur 21 uitgezet (de waarden staan vermeld in tabel V).

Er wordt geen afhankelijkheid gevonden van Re_{d_u} , dus:

$$\frac{N_i D^{2/3} d_u^{1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} d_u}} = 1,5 \quad (19)$$

Hieruit volgt:

$$\frac{N_i D^2}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} D^3}} = 1,5 \left(\frac{d_u}{D}\right)^{0,16} \quad (20)$$

Dit is de correlatie die Frank-Kamenetskii voorspelt voor een deeltje in een homogeen isotroop turbulent veld indien C_w constant is.

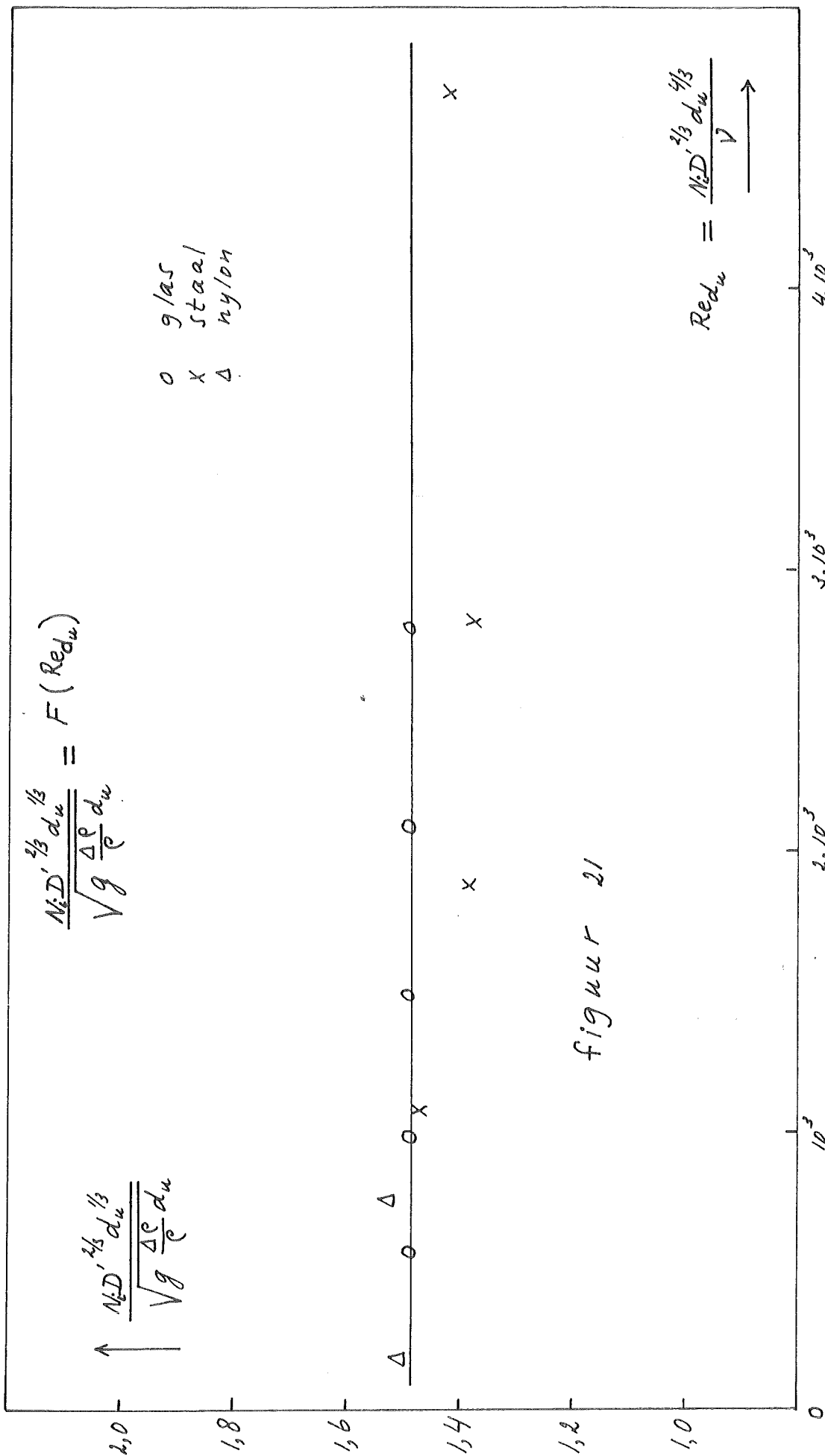
De constante in formule (19) wordt bepaald door de geometrie van roerder en vat en de plaats van het deeltje (afstand r).

Figuur 18 toont de invloed van de afstand r .

Wanneer in het vat een handvol deeltjes wordt gedaan, dan worden ze allemaal langs de wand van het vat in suspensie gebracht bij een toerental dat gelijk is aan het initieele toerental voor $r = 1/3 D''$.

Zwietering [7] geeft als correlatie voor het in suspensie brengen van deeltjes in een geroerd vat:

$$\frac{N_i D^{0,85}}{\left(g \frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^{0,45}} \cdot d_u^{-0,2} \cdot \nu^{-0,1} \cdot B^{-0,13} = S \quad (21)$$



figuur 21

waarin B het gewichtspercentage vaste stof is en S een constante die door de geometrie wordt bepaald.

Vergelijking (21) kan geschreven worden als:

$$\frac{N_i D'^{2/3} d_u^{1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} d_u}} = S \cdot D'^{-0,19} d_u^{0,03} \left(g \frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^{-0,05} \nu^{0,1} B^{0,13} \quad (22)$$

Voor een combinatie van roerder en vat (propellerroerder met $D' = 1/3 D''$ en op een hoogte $1/3 D''$ boven de bodem van het vat) welke het meest met de gebruikte combinatie overeenkomt, geeft Zwietering: $S = 7$.

Het kleinste gewichtspercentage vaste stof B waarmee Zwietering gemeten heeft is 0,5.

Vergelijking (22) met $B = 0,5$ en $S = 7$ wordt in ons geval voor het hele meetgebied:

$$\frac{N_i D'^{2/3} d_u^{1/3}}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} d_u}} = 2,1 \text{ à } 2,2 \quad (23)$$

Dit is in zeer goede overeenstemming met vergelijking (19).

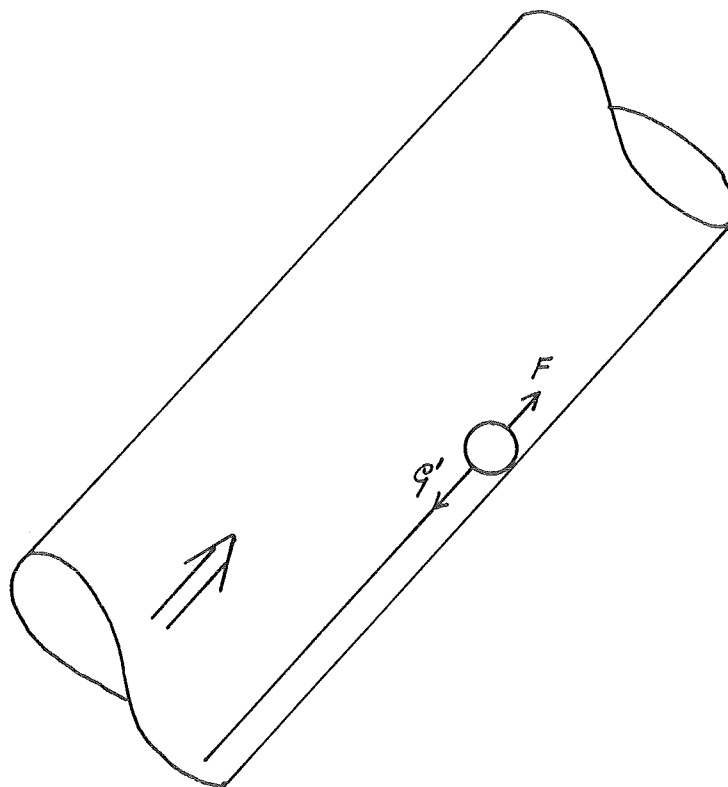
Hoofdstuk V

Suggesties voor het voortzetten van het onderzoek

- 1e. Het meten van de weerstandscoefficiënten van bollen die op een wand liggen in een turbulente stroming.
Dit kan gedaan worden door een bol aan een draad in een schuinopgestelde buis te bevestigen.
Wanneer de draad juist strak gaat staan is de weerstandskracht gelijk aan de component van het schijnbare gewicht in de richting van de draad (figuur 22).
- 2e. Variëren van de geometrie van het vat en de roerder.
 - a. hoogte H' variëren bij constante vat- en roerderdiameter,
 - b. vatdiameter variëren,
 - c. roerderdiameter variëren.
- 3e. Variëren van de viscositeit van de vloeistof.

MEETOPSTELLING VOOR HET METEN
VAN WEERSTANDSCOËFFICIËNTEN VAN
EEN BOL OP EËN BUISWAND IN
EEN TURBULENTE STROMING

F = weerstandskracht
 Q' = component van het
schijnbare gewicht



figuur 22

Literatuur

- [1] Durand R. and Condolios F.: Proc. Coll. on Hydraulic Transp. of Coal, held bij the N.C.B. London, 5-6 nov. 1952.
- [2] Shields A.: Mitt. der Preussischen Versuchsanhalt für Wasserbau und Schiffbau 26 (1936) 5.
- [3] Hinze J.O.: B.O. college Twee fasenstroming, Delft 1957.
- [4] Frank-Kamenetskii D.A.: Diffusion and Exchange in Chemical Kinetics, Univ. Press. Princeton, 1955.
- [5] Kolmogoroff A.N.: Compt. rend. acad. sci. U.S.S.R. 30 (1941) 301; 31 (1941) 538; 32 (1941) 16.
- [6] Voncken R.M.: Circulatiestroming en menging in geroerde vater.(dissertatie) Delft 1966.
- [7] Zwietering Th.N.: Chemical Engineering Science 8 (1958) 244.
- [8] Hinze J.O.: College Stroming en warmteoverdracht, Delft.