

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

zand-watermengselstromingen

het gedrag van zand-watermengselstromingen
boven water

verslag experimentele vervolgstudie

maart 1987

Z 46-02

zand – watermengselstromingen

het gedrag van zand – watermengselstromingen
boven water

verslag experimentele vervolgstudie

maart 1987

Z 46-02

INHOUD

Symbolen

Definities

	blz
<u>1 Samenvatting en Conclusies.....</u>	1
<u>2 Inleiding.....</u>	6
<u>3 De experimentele faciliteiten.....</u>	8
3.1 Zand.....	8
3.2 Mengtank.....	9
3.3 Kantelgoot.....	10
3.4 Meetinstrumenten.....	11
<u>4 Het proevenprogramma.....</u>	14
<u>5 Beschrijving van de waargenomen processen.....</u>	16
5.1 Uniforme stroming.....	16
5.2 Niet-uniforme stroming; duinvorming.....	16
<u>6 Uniforme mengselstroming over een vlakke bodem.....</u>	18
6.1 Evenwichtshelling.....	18
6.2 Snelheidsprofielen.....	20
6.3 Concentratieprofielen.....	26
6.4 Damping van de verticale turbulente uitwisseling.....	29
<u>7 Mengselstroming over een duinvormig, alluviaal bed.....</u>	35
7.1 Erosie- en sedimentatiesnelheid.....	35
7.2 Erosie als functie van de bodemschuifspanning.....	38
7.3 Ontwikkeling en geometrie van een duin.....	41
7.4 Concentratieverloop over een duin.....	43
<u>8 Literatuuroverzicht.....</u>	45

INHOUD (vervolg)

Tabellen 1 t/m 3..... 47

Figuren 1 t/m 45.....

Bijlage 1 IJkverslag Geleidendheids Concentratiemeter

Bijlage 2 Meetverslag Grondmechanica Delft

Symbolen

a	referentiediepte in formule concentratieverdeling	m
A	coëfficiënt in formule snelheidsverdeling	-
B	idem	-
b	breedte	m
c	zandvolumeconcentratie	-
c_b	idem aan bodem	-
$\bar{c}$	idem dieptegemiddeld	-
C	wrijvingscoëfficiënt van Chézy	$m^{0,5}/s$
D	korreldiameter	$\mu m, m$
D*	korrelparameter	-
E	erosie van zandbodern	$kg/s\ m^2$
f_o	bodemwrijvingscoëfficiënt van Darcy-Weisbach	-
Fr	Froudegetal	-
g	versnelling zwaartekracht	m/s^2
h	diepte of dikte mengselstroom	m
i	helling	-
k	effectieve bodemruwheid	m
l	mengweglengte	m
L	lengte	m
n	poriëngehalte zandbodern	-
q	specifiek debiet mengselstroom	m^2/s
Q	debiet mengselstroom	m^3/s
R	hydraulische straal	m
Re	Reynoldsgetal	-
Ri	Richardsongetal	-
s	specifiek zandtransport	$kg/s\ m$
S	sedimentatie van zand	$kg/s\ m^2$
t	tijdcoördinaat	s
T	temperatuur	°C
u	stroomsnelheid in x-richting	m/s
$\bar{u}$	idem, dieptegemiddeld	m/s
u*	schuifspanningssnelheid	m/s
V_{erosie}	erosiesnelheid	m/s
V_{sed}	sedimentatiesnelheid	m/s

Symbolen (vervolg)

w_o	valsnelheid zanddeeltje in schoon water	m/s
w_s	idem, in zand-watermengsel	m/s
x	horizontale lengtecoördinaat	m
Z	suspensieparameter	-
z	vertikale lengtecoördinaat	m
α	duinhelling, coëfficiënt in formule evenwichtshelling, coëfficiënt in formule valsnelheid	-
β	verhouding turbulente diffusiecoëfficiënt en -viscositeit, coëfficiënt in formule evenwichtshelling	-
δ	dikte viskeuze sublaag	m
Δ	relatieve korreldichtheid	-
ϵ_z	turbulente diffusiecoëfficiënt	m ² /s
ϕ	helling natuurlijk talud van zand, dempingscoëfficiënt	-
Φ	erosieparameter	-
κ	constante van von Kármán	-
ρ	dichtheid water	kg/m ³
ρ_s	idem zand	kg/m ³
ρ_m	idem zand-watermengsel	kg/m ³
ν	viscositeit water	m ² /s
ν_m	idem zand-watermengsel	m ² /s
ν_z, ν_t	turbulente viscositeit	m ² /s
τ	schuifspanning	N/m ²
τ_b	idem, aan bodem	N/m ²
θ	schuifspanningsparameter	-

Definities

Δ	$= \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$	relatieve korreldichtheid	-
ρ_m	$= \rho(1 + \Delta \bar{c})$	dichtheid zand-watermengsel	kg/m ³
q	$= \frac{Q}{b}$	specifiek debiet	m ² /s
u^*	$= \sqrt{\left(\frac{\tau_b}{\rho_m}\right)}$	schuifspanningssnelheid	m/s
$\bar{u}$	$= \frac{q}{h}$	gemiddelde stroomsnelheid	m/s
θ	$= \frac{(u^*)^2}{\Delta g D}$	schuifspanningsparameter	-
D^*	$= D \sqrt[3]{\frac{\Delta g}{v^2}}$	korreldparameter	-
Φ	$= \frac{E}{\rho_s \sqrt{(\Delta g D)}}$	erosieparameter	-
Fr	$= \frac{\bar{u}}{\sqrt{(gh)}}$	Froudegetal	-
Re	$= \frac{q}{v_m}$	Reynoldsgetal	-
Ri	$= - \frac{g}{\rho} \frac{d\rho/dz}{(du/dz)^2}$	Richardsongetal	-
Z	$= \frac{w_s}{\kappa u^*}$	suspensieparameter	-

1 Samenvatting en Conclusies

De faciliteit en de meetinstrumenten die in 1985 ten behoeve van een oriënterende studie naar hooggeconcentreerde zand-watermengselstromingen boven water, zie lit. [1], werden ontwikkeld, zijn in de loop van 1986 aangepast en verbeterd en hebben vervolgens dienst gedaan voor een meer kwantitatief experimenteel onderzoek, waarvan dit verslag het resultaat is.

Doel van dit vervolgonderzoek was de eigenschappen van zand-watermengselstromingen op bovenwaterstorts eerst voldoende uitputtend te bestuderen, voordat overgestapt wordt naar het fysisch veel ingewikkelder proces op onderwaterstorts. In concreto:

- a. het verkrijgen van gedetailleerde kwantitatieve gegevens omtrent de stromingskarakteristieken van zand-watermengsels met zandvolumeconcentraties van 10 tot 40%.
- b. het verkrijgen van meer kwantitatief inzicht in de erosie- en sedimentatieprocessen, welke het ontstaan en de voortplanting van de bij dit stroomregime horende beddingvormen bepalen, ten behoeve van o.m. de wiskundige modellering van zand-watermengselstromingen over een natuurlijk alluviaal bed.

De experimentele faciliteit bestond uit een ronde polyester mengtank met roerwerk, een korte leiding met een debietgestuurde klep en een kantelbare goot met glazen wanden. Gestroomd werd met mengsels met concentraties van 5 tot maximaal 50 volumepercent, specifieke debieten van 0,01 tot 0,15 m²/s en korreldiameters van 120 en 225 µm.

Gemeten werd met een speciaal ontwikkelde geleidingsconcentratiemeter (GCM) en een elektromagnetische snelheidsmeter (EMS).

De verbeteringen van de opstelling t.o.v. die van de oriënterende studie bestonden, zoals voorgesteld in lit. [3], uit:

1. een verlenging van de goot met 2 meter
2. een instroming via een woelkom
3. het opstellen van de mengtank in het verlengde van de goot en het verkorten van de toevoerleiding
4. een meer gestroomlijnde vormgeving van de concentratiemeter.

De volgende conclusies kunnen worden geformuleerd:

1. Met de proefopstelling kon probleemloos gestroomd worden. In de mengtank kon, met het 120 μm -zand, zelfs een concentratie van 50% gerealiseerd worden.

Het stromen met een grovere zandsoort (225 μm) vereiste echter aanzienlijk steilere hellingen, die met de kantelgoot niet in alle gevallen gerealiseerd konden worden. De mengtank had ook duidelijk meer moeite dit zand homogeen in suspensie te houden.

Voor het bestuderen van de vorming en verplaatsing van duinen was de goot voldoende lang en bleek de instroming geschikt; er zijn geen verstoppingen opgetreden.

Bij zeer flauwe hellingen bestond het gevaar, dat het zandbed over de gootrand zou stromen. Voor proeven met een aaneengesloten zandbed van voldoende dikte zijn hogere zijwanden noodzakelijk. Het instellen van een uniforme stroming bleek, wat betreft de snelheidsverdeling, geen problemen op te leveren. De concentratieverdeling echter zou in bijzondere gevallen (hoog debiet, fijn materiaal, hoge concentratie) aan het einde van de goot nog niet helemaal aangepast kunnen zijn. Om dit onder alle omstandigheden wel te bereiken zou een gootlengte van zeker 25 m noodzakelijk zijn.

2. De meetinstrumenten, die in het oriënterend onderzoek het meest geschikt bleken te zijn, zijn in de vervolgstudie toegepast en hebben naar alle tevredenheid gefunctioneerd.

Met de geleidingsconcentratiemeter (GCM) kon snel en nauwkeurig een concentratieverdeling bepaald worden, mits de concentraties binnen de grenzen van het ijkgebied bleven.

Ook de elektromagnetische snelheidsmeter (EMS) heeft goed gefunctioneerd, behalve dichtbij de bodem, waar de stroming door het instrument te veel verstoord werd. De resultaten van de snelheidsmetingen vertoonden meer spreiding dan die van de concentratiemetingen.

3. De evenwichtshelling, de helling waarbij nog net geen aanzanding optreedt, is bepaald als functie van specifiek debiet, concentratie en korreldiameter. De gevonden empirische relatie komt overeen met die van oriënterend

onderzoek en prototypemetingen, maar kon nader worden gespecificeerd, namelijk (zie par. 6.1):

$$i_{\text{sed}} = \beta \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-\alpha}$$

waarin $q_0 = 1 \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha = 0,45$ en β , als functie van de korreldiameter, op 90 ($D-65 \cdot 10^{-6}$) gesteld kan worden (zie fig. 9). De concentratie bleek slechts een geringe invloed te hebben.

4. De snelheidsverdeling in de mengselstroom was duidelijk logaritmisch van vorm, wat erop wijst, dat de stroming nog turbulent was (fig. 10 t/m 15). De effectieve von Kármánconstante bleek bij toenemende concentraties eerst af en vervolgens, bij ca. 20%, weer toe te nemen (zie fig. 16 en par. 6.2). Dit effect komt tot uiting in de, op grond van de metingen berekende, waarden van de coëfficiënten A en B in de formule voor de logaritmische snelheidsverdeling, welke luidt:

$$\frac{u}{u^*} = A \log \frac{zu^*}{v_m} + B$$

De bodemruwheid bleek alleen bij zeer hoge concentraties ($> 30\%$) toe te nemen ten gevolge van de toegenomen effectieve viscositeit van het mengsel. Bij lagere concentraties kon de bodem als hydraulisch ruw aangemerkt worden.

5. De concentratieverdeling werd bij toenemende gemiddelde concentratie steeds meer homogeen. De bodemconcentratie bleef constant in de range van gemiddelde concentraties van 10 tot 30%, en bedroeg voor 120 μm -zand ca 33% en voor 225 μm ca 40% (zie fig. 17 t/m 22 en par. 6.3). Bij gemiddelde concentraties hoger dan deze waarden bleef de verdeling van de bodem tot vlak onder het oppervlak homogeen.

Bij de lagere concentraties ($< 10\%$) traden wel grote concentratie- en dus dichtheidsgradiënten op, wat aanleiding gaf tot het ontstaan van een scheiding tussen een geconcentreerde onderlaag en een vrijwel heldere bovenlaag. Bij grover zand was dit effect nog sterker.

6. Pogingen de bij de snelheidsverdelingen gevonden toe- en afname van de snelheidsgradiënten bij toenemende concentraties te relateren aan de demping van de turbulentieuitwisseling, tengevolge van de toe- en afname van de dichtheidsgradiënten in het mengsel middels het Richardsongetal, waren niet succesvol. Blijkbaar gedraagt het mengsel zich intern niet volledig als een vloeistof, maar spelen de afzonderlijke eigenschappen van korrels en water een rol.
7. Bij hellingen flauwer dan de evenwichtshelling ontstond een duinenpatroon met afwisselend sub- en superkritische stroming, dat zich gestadig stroomopwaarts voortplantte (zie fig. 38 en 39). Dit verschijnsel doet zich in de praktijk voor op bovenwaterstorts bij voldoende spreiding van de mengselstroom over de breedte en kon in de goot op ongeveer gelijke schaal, wat betreft specifiek debiet, worden weergegeven.
8. Op het vrijwel horizontale bovenstroomse gedeelte van de duinen vond sedimentatie plaats. Deze was van de orde 1-2 mm/s en blijkt goed te beschrijven als produkt van valsnelheid en bodemconcentratie, mits een valsnelheidsreduktie t.g.v. hindered settling wordt toegepast. Op het korte, steil aflopende benedenstroomse gedeelte van de duinen vond heftige erosie plaats, van de orde 1 tot 5 mm/s. Deze erosie bleek te worden bepaald door lokale helling, stroomsnelheid en korreldiameter. De maximale waarden bleken te worden beperkt bij hoge gemiddelde concentraties t.g.v. hindered erosion (zie par. 7.1).

Aangezien tot nog toe bekende functies dit proces niet kunnen beschrijven, is een empirische erosiefunctie afgeleid (zie fig. 37 en par. 7.2), waarin de genoemde grootheden een rol spelen. Deze luidt:

$$\phi \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right) = 0,012 (\theta^{0,5} - 1,3) D^{*0,3}$$

waarin ϕ , θ en D^* dimensieloze parameters voor resp. erosie, bodemschuifspanning en korrelgrootte, α de lokale helling en ϕ de hoek van het natuurlijk talud van de betreffende zandsoort zijn.

Vanwege de sterke interactie tussen zandbodem en mengselstroom wordt de vorm van de duinen (lang en vlak of kort en steil, symmetrisch of a-symmetrisch) sterk bepaald door de lokale erosie. De hier afgeleide erosie-

funktie kan dan ook dienst doen voor de verdere wiskundige modellering van bovenwaterstorts.

In sommige gevallen werden de duinen zo steil dat de taluds plaatselijk in grondmechanische zin bezweken. Om ook deze processen, waarbij niet meer van erosie gesproken kan worden, te modelleren, is meer inzicht in de bodemstructuur vereist.

2. Inleiding

Het transport van zand door een waterstroming is een verschijnsel waaraan in de civiele techniek vanouds veel aandacht is besteed. Dat geldt echter niet voor zand-watermengselstromingen. We zullen spreken van een zand-watermengselstroming wanneer de zandconcentraties zo hoog zijn, dat het gedrag van het mengsel daardoor wezenlijk wordt beïnvloed. De zandconcentraties ($\bar{c}$) zijn dan van de orde 10 tot 50 volume-procenten, ofwel 265 tot 1325 gram/liter.

In de civiele praktijk zijn processen waarbij zand-watermengselstromingen een rol spelen met het vorderen van de baggertechniek in toenemende mate van belang. Voorbeelden van dergelijke processen zijn: het opspuiten van zandlichamen, het winnen van zand met steek- en winzuigers, het storten en klappen van zand, het transport van zand door pijpleidingen en het afstromen van zand na verweking bij zettingsvloeiingen en modderstromen.

Om op langere termijn de kennis van deze processen te vergroten heeft de Rijkswaterstaat, momenteel vertegenwoordigd door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW), in 1984 het MODVLO-onderzoek gestart.

De zandsluitingen in de Oosterschelde, waar zand-watermengselstromingen zowel boven als onder water optraden, vormden het eerste studie- en toepassingsgebied. Hier zijn intensief metingen uitgevoerd door en in opdracht van de Rijkswaterstaat.

Vergelijking van deze prototype- met een aantal laboratoriummetingen laat zien, dat schaafeffekten de resultaten sterk kunnen beïnvloeden. Een belangrijke schaalgevoelige grootheid is bijvoorbeeld het specifieke debiet (q), dat op het bovenwaterstort van een zandsluiting kan variëren van 0,05 tot 1 m²/s en daarom in het laboratorium van dezelfde orde van grootte moet zijn om representatieve kwantitatieve resultaten te kunnen leveren.

In het kader van MODVLO zijn op het Waterloopkundig Laboratorium te Delft, Sektor Estuaria en Zeeën, in 1985 een literatuurstudie, lit. [1] en een oriënterende experimentele studie, lit. [2], uitgevoerd. In het oriënterende onderzoek werden proefopstelling en diverse meetinstrumenten getest. Verder werden aanbevelingen gedaan, die tot meer kwantitatieve resultaten zouden kunnen leiden.

Begin 1986 werd door de Rijkswaterstaat de opdracht gegeven om in dat jaar het experimentele werk te vervolgen en tevens een wiskundig morfologisch model te ontwikkelen, zoals verwoord in de offerte van het Waterloopkundig Laboratorium, lit. [3].

Belangrijke, maar nog onbekende morfologische grootheden, zoals de erosiesnelheid, zouden dan met behulp van de experimenten bepaald en in het wiskundig model toegepast kunnen worden.

Het voorliggende verslag is het resultaat van het voortgezette en afrondende experimentele onderzoek in de aangepaste faciliteit van 1985. Het onderzoek is uitgevoerd in de maanden augustus, september en oktober 1986 in de Baggergoot van het Waterloopkundig Laboratorium te Delft door A.J.M. van Kemenade (Buitenmetingen) en ir. D.R. Mastbergen (Estuaria en Zeeën), welke laatste ook dit rapport voor zijn rekening heeft genomen. Als projectleider fungeerde ir. J.C. Winterwerp (Estuaria en Zeeën). Hij schreef tevens par. 6.4.

In hoofdstuk 3 wordt beknopt de proefopstelling beschreven, in 4 het uitgevoerde proevenprogramma en in 5 kwalitatief de waargenomen processen. In de hoofdstukken 6 en 7 worden de resultaten gegeven van de metingen over een vaste, vlakke respektievelijk een loskorrelige, alluviale bodem. Deze resultaten zijn verwerkt tot experimentele funkties en grafieken en weergegeven in de figuren.

Vooruitlopend op het onderzoek naar zand-watermengselstromingen onder water, gepland in 1987, is er dit jaar al samengewerkt met Grondmechanica Delft. De resultaten van een aantal dichtheids- en waterspanningsmetingen, uitgevoerd door W.J. van Pernis en gerapporteerd door ir. M.B. de Groot, zijn opgenomen in bijlage 2.

3. De experimentele faciliteiten

3.1 Zand

De meeste proeven zijn uitgevoerd met hetzelfde Haringvlietzand, dat ook is gebruikt in 1985, waarvoor geldt $D_{50} = 120 \mu\text{m}$.

Uit de mengtank is een monster getrokken, gedroogd en geanalyseerd met een optische deeltjesgroottebepaler, de Malvern. Voor de resulterende zeefkromme zie figuur 1. Door Grondmechanica is eveneens een zeefkromme bepaald, zie bijlage 2, figuur 3.

Het poriëngehalte (n) van dit zand is op indicatieve wijze bepaald met maatglas en weegschaal, uitgaande van een dichtheid van het zand, ρ_s , van 2650 kg/m^3 . Hieruit volgde:

- droog, onverdicht: $n = 43\%$
- nat, onverdicht : $n = 44-49\%$
- nat, verdicht : $n = 38-42\%$.

De maximale en minimale poriëngehalten, bepaald door Grondmechanica waren:

- $n_{\text{max}} = 50,2\%$
- $n_{\text{min}} = 37,1\%$.

Ter bepaling van de zandvolumeconcentratie van een monster is verder uitgegaan van een poriëngehalte van 40% .

Bij langdurig verblijf in de mengtank kon het slibgehalte van het mengsel, door slijtage en door losmaken van aangehechte slibdeeltjes, vrij hoog oplopen, tot wel 10 volumepercenten. Deze sliblaag, die na een uur bezonken was, bevatte dan echter nog een grote hoeveelheid water, zodat de concentratie in gewichtspercenten gering was. Toch kan dit slib wel enige invloed hebben op de viscositeit en daarmee indirect op de valsnelheid van de zandkorrels in het mengsel.

Er zijn nog een aantal aanvullende proeven uitgevoerd met een grovere zandsoort, namelijk zilverzand met $D_{50} = 225 \mu\text{m}$. Ook dit zand is geanalyseerd, zie figuur 2 en bijlage 2, figuur 10. Het slibgehalte van deze zandsoort was vrijwel nihil, het mengsel zag er zeer schoon uit.

Om de valsnelheden te berekenen zijn de volgende experimentele formules gebruikt (zie lit. [2] en [8])

$$\nu = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{20 + T} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (1)$$

waarin ν = viskositeit (m²/s)
 T = temperatuur (°C)

$$w_o = \frac{10 \nu}{D} \left[\sqrt{1 + \frac{\Delta g D^3}{100 \nu^2}} - 1 \right] \quad \text{m/s} \quad (2)$$

geldig voor $100 \mu\text{m} \leq D \leq 1000 \mu\text{m}$ en waarin

w_o = valsnelheid van een enkel deeltje (m/s)
 D = mediane korreldiameter (m)

en $w_s = w_o (1 - c)^\alpha$ m/s (3)

waarin w_s = de valsnelheid in een suspensie van deeltjes
 α = coëfficiënt, $3 < \alpha < 5$

De coëfficiënt α geeft het hindered-settling effect weer, volgens Richardson en Zaki (lit. [2]).

De volgende tabel geeft enkele karakteristieke valsnelheden, berekend met (2).

Valsnelheden

T (°C)	ν (m ² /s)	D = 120 μm	D = 225 μm
		w_o (m/s)	w_o (m/s)
20	$1 \cdot 10^{-6}$	0,0109	0,0305
25	$8,9 \cdot 10^{-7}$	0,0121	0,0326
30	$8,0 \cdot 10^{-7}$	0,0132	0,0345

3.2 Mengtank

Het zand-watermengsel werd aangemaakt in een grote polyester mengtank met keerschotten, waarin een roerwerk het zand in suspensie hield (zie figuren 3 en 5).

Met het fijne Haringvlietzand kon zelfs een concentratie van 50% gehandhaafd worden, dit betekent 13,5 ton zand in 5 m³ water! De mixer moest wel continu doordraaien, omdat eenmaal gesedimenteerde zand niet meer in suspensie gebracht kon worden. Het overbrengmechanisme van motor naar roerwerk, een rubberen koppeling, stond hierdoor bloot aan aanzienlijke slijtage.

Door het viskeuze gedrag van het mengsel en het voortdurend draaien van de mixer kon de temperatuur in de tank oplopen tot 30°C.

Uit vier aftappunten in de wand van de tank werden regelmatig monsters genomen om de gemiddelde concentratie te controleren en de concentratieverdeling in de tank te bepalen. Met het fijne zand bleek het mengsel in de tank bij alle concentraties vrijwel homogeen, met het grovere zilverzand was er een kleine gradiënt waarneembaar.

In de nieuwe opstelling stond de mengtank in het verlengde van de goot opgesteld en kon de toevoerleiding worden ingekort (zie figuur 5).

Technische gegevens mengtank en roerwerk.

Roerwerk	1 as	2 impellers type A310	Ø 1,18 m
	Firma Lightnin		
Elektromotor	4 kW	68 toeren/minuut	
Mengtank	10 m ³	Ø 2,40 m	4 keerschotten over gehele hoogte.

3.3 Kantelgoot

De eigenlijke onderzoeksfaciliteit bestond uit een goot met glazen wanden, welke kantelbaar was om een punt nabij de instroming (zie figuur 4).

De hellingshoek kon worden ingesteld met een takelmechanisme. Met een waterpasinstrument is de gootbodem gecontroleerd en plaatselijk met cement gecorrigeerd, opdat deze volkomen vlak was. Op de bodem van de goot is vervolgens een vast zandbed gelijmd, waarvan D₅₀ = 500 µm.

De verbeterde instroomopening (zie figuren 4 en 6), voorzien van een woelkom volgens de specificaties van het Voorstel Vervolgonderzoek 1986, heeft uitstekend gefunctioneerd. Bij de vorming van een zandbed werd de instroming niet belemmerd en kon de proef gewoon voortgang vinden. Met behulp van roosters, geperforeerde platen met gaten Ø 1 en Ø 1,5 cm, werd gezorgd, dat de instro-

ming steeds zo gelijkmatig mogelijk was en er geen ongewenste aanzanding direkt na de instroming ontstond.

Aan het einde van de goot stroomde het mengsel via een geleidingskap en een uitneembaar grof filter in een opvangbak. Vervolgens werd het mengsel met een klokpomp teruggevoerd naar de mengtank, zodat een gesloten circuit ontstond.

Deze klokpomp had voldoende vermogen om al het mengsel over een hoogte van ruim 6 meter op te voeren, maar was wel aan slijtage onderhevig. Na de proeven met het zilverzand moest de waaier vervangen worden.

Het geheel van kantelgoot met in- en uitstroomvoorzieningen stond opgesteld in de Baggergoot van het Waterloopkundig Laboratorium te Delft.

Technische gegevens kantelgoot.

Kantelgoot	lengte 7,0 m exclusief verlengstuk			
	inwendige breedte 0,30 m			
	inwendige hoogte 0,30 m			
Verlengstuk	lengte 2,0 m			
	inwendige hoogte 0,70 m			
	inwendige breedte 0,30 m			
Leidingen	Ø 15 cm			
Klokpomp	20 kW	95 l/sec	type B2151 LT	Firma Flygt

3.4 Meetinstrumenten

Het debiet kon nauwkeurig worden ingesteld met behulp van een elektromagnetische debietmeter en een pneumatisch regelbare, debietgestuurde klep in de toevoerleiding.

De mengseldiepte werd bepaald met peilnaalden. De nauwkeurigheid van deze meting werd voornamelijk beïnvloed door oppervlakteverstoringen van de meestal sterk turbulente mengselstroom.

De goothelling (i) kon nauwkeurig worden bepaald door met een peilnaald bij de uitstroming de verticale verplaatsing ($peil_{goot}$) ten opzichte van de met een waterpasinstrument bepaalde horizontale positie ($peil_{hor}$) te meten en deze te delen door de lengte van de goot tussen peilnaald en kantelpunt (L_{kantel}), dus

$$\tan i = \frac{\text{peil}_{\text{hor}} - \text{peil}_{\text{goot}}}{L_{\text{kantel}}} \quad (4)$$

welke weer praktisch gelijk is aan de helling (i) in radialen. De helling werd ingesteld met stapjes van minimaal 1 cm, wat overeenkomt met een hoekje van $1,2 \cdot 10^{-3}$ radiaal.

De temperatuur van het mengsel werd continu gemeten in de mengtank met een op het Waterloopkundig Laboratorium ontwikkelde opnemer, waarvan het meetprincipe de weerstandsverandering van een platina stripje is.

De instrumenten, die voor gebruik in de mengselstroom in de goot in aanmerking kwamen zijn uitgebreid getest in het oriënterend onderzoek van 1985. De instrumenten die daarbij als meest geschikt voor praktisch gebruik in zand-watermengselstromingen uit de bus kwamen waren de Electro Magnetische Snelheidsmeter (EMS) en de Geleidings Concentratie Meter (GCM), beiden eveneens ontwikkeld op het Waterloopkundig Laboratorium te Delft, afdeling Instrumentatie. Deze instrumenten zijn gebruikt in het vervolgonderzoek en hebben naar tevredenheid gefunctioneerd (zie fig. 7).

De GCM, speciaal ontwikkeld voor het onderzoek van zand-watermengselstromingen, heeft na het oriënterende onderzoek een meer gestroomlijnde vormgeving gekregen, zodat het probleem van loslating is ondervangen. Het instrument is geijkt door vergelijking van de gemeten relatieve geleidendheid met de zand-volumeconcentraties bepaald met het Afzuigstelsel in een speciaal ijkvat. Voor een andere zandsoort moet deze ijking opnieuw gebeuren (zie bijlage 1). Met de GCM kon tot minimaal 6 mm boven de bodem gemeten worden. Het instrument stond dan met de onderkant op de bodem.

De EMS heeft de vorm van een ellipsoïde. Dichtbij de bodem beïnvloedt het instrument de mengselstroming door vernauwing van het doorstroomprofiel. De resultaten zijn dan minder betrouwbaar. Op een afstand van 5 à 10 mm van de bodem echter was deze invloed niet meer merkbaar.

Beide instrumenten, EMS en GCM, waren gemonteerd op peilnaalden, zodat de positie boven de bodem van het meetpunt nauwkeurig ingesteld kon worden.

Alle instrumenten konden continu afgelezen worden m.b.v. voltmeters. Het signaal van de EMS en de GCM werd echter eerst door een zg. integratiekastje gestuurd, waarmee gemiddelde waarden over een in te stellen tijdsperiode konden worden bepaald. Meestal werd een periode van 10 seconden gebruikt om de turbulente fluktuaties uit te middelen. Dit was ruim voldoende, de grootste wervels immers hadden een periode van:

$$T = \frac{h}{u} = \frac{0,15}{1,5} = 0,1 \text{ sec} \quad (5)$$

Het signaal is een aantal keren uitgeschreven met een recorder, zie figuur 8. Deze figuur geeft een indruk van de mogelijke afwijkingen t.o.v. het gemiddelde signaal.

De turbulente wisselingen blijken vlakbij de bodem en bij het oppervlak het grootst te zijn. De GCM geeft verder een veel rustiger beeld te zien dan de EMS, de concentratiefluctuaties zijn blijkbaar geringer dan de snelheidsfluctuaties.

Technische gegevens meetinstrumenten.

Debietmeter	50 l/sec	Ø 15 cm	Firma Fischer & Porter
EMS	geijkt voor	-2 tot 2 m/s	
GCM	geijkt voor	5 - 40%	
Peilnaalden	afleesfout	0,1 mm	
Temperatuuropnemer	geijkt voor	0-50°C	

4. Het proevenprogramma

Een overzicht van het proevenprogramma is gegeven in tabel 1.

Er zijn proeven uitgevoerd met twee typen zand-watermengselstroming:

1. Uniforme stroming over een vaste bodem (proevenseries A,B,C), de resultaten zijn opgenomen in hoofdstuk 6.
2. Niet-uniforme stroming over een loskorrelig alluviaal zandbed (proevenseries D,V), de resultaten staan in hoofdstuk 7.

Er zijn vervolgens vijf verschillende proevenseries uitgevoerd, namelijk:

- A. Het bepalen van de sedimentatie- of evenwichtshelling (i_{sed}). Bij een zekere concentratie ($\bar{c}$) en debiet (q) werd de goothelling steeds met een stapje van 1 cm bij de peilnaald verflauwd, totdat, binnen een tijdsbestek van maximaal 10 minuten, aanzanding plaatsvond. De voorlaatste helling was dan, per definitie, de evenwichtshelling, als functie van debiet, concentratie en korreldiameter.
- B. Het meten van het snelheids- en het concentratieprofiel, bij de evenwichtshelling. Gemeten is op een positie aan het einde van de goot, in het symmetrievlak, op 7 meter van het kantelpunt. Tegelijkertijd zijn mengseldiepte (h) en temperatuur (T) bepaald.
- C. Controleproeven, om de uniformiteit van de stroming te controleren. Er zijn snelheden gemeten op verschillende plaatsen in lengte- en dwarsrichting in de goot. Geconstateerd werd, dat de stroming vrijwel uniform en symmetrisch t.o.v. de lengte-as van de goot was. Wel was er nog sprake van een geringe versnelling in langsrichting, wat kon worden geconstateerd, doordat de mengseldiepte in lengterichting van de goot nog enkele mm's afnam. Dit werd veroorzaakt, doordat bij de instroming de mengseldiepte groter was dan de hydraulische evenwichtswaarde, behorende bij de betreffende helling in de goot. Uitgaande van een bovenstroomse randvoorwaarde zal een superkritische mengselstroom deze evenwichtswaarde, volgens de wetten der hydraulica, asymptotisch benaderen. Daarom is verder zoveel mogelijk aan het einde van de goot gemeten, waar de stroming het meest uniform was.
- D. Proeven bij duinvorming. Bij hellingen, maar een fractie flauwer dan de evenwichtshelling vormden zich zandduinen in de goot, die zich stroomopwaarts verplaatsten. Hierdoor werd een natuurlijk, alluviaal zandbed in de

goot gevormd. Gemeten zijn erosie-, sedimentatie- en duinvoortplantings-snelheden, de geometrie van het duin en het concentratieverloop over het duin. De verandering van de bodemligging was in de meeste gevallen over de breedte gelijk en kon goed gemeten worden langs de glaswand met meetlat en stopwatch. Slechts bij zeer geringe debieten werd de stroming over de breedte niet-uniform.

Andere parameters, zoals de helling van het duin en de lokale stroomsnelheid, werden zoveel mogelijk simultaan gemeten. Dit kon slechts met beperkte nauwkeurigheid geschieden.

- V. Video-opnamen van de levensstadia van een duin, mengselsprong, sedimentatie en erosie, bij verschillende concentraties ($\bar{c}$) en korreldiameters (D).
- G. Dichtheids- en waterspanningsmetingen bij sedimentatie en erosie tijdens stroming, en in een drooggevalen goot, zonder stroming, uitgevoerd door Grondmechanica Delft.

De algehele werkwijze was als volgt:

In de mengtank werd een bepaalde concentratie aangemaakt en vervolgens werden de diverse proeven uitgevoerd met een aantal verschillende debieten. Om temperatuur en slibgehalte niet te hoog te laten oplopen en om het arbeidsintensieve vullen van de tank met nieuw zand zoveel mogelijk te beperken werd eerst een hooggeconcentreerd mengsel aangemaakt, dat gaandeweg aangevuld werd met schoon water. Het overtollig mengsel werd afgevoerd naar het baggergoot-bassin.

5. Beschrijving van de waargenomen processen

5.1 Uniforme stroming

Zolang de goothelling ongeveer gelijk, maar niet flauwer dan de evenwichtshelling was, bleef de mengselstroming uniform, superkritisch ($Fr \sim 2$) en sterk turbulent ($Re \sim 20000$). Het oppervlak werd voortdurend verstoord door kleine, zich snel stroomafwaarts voortplantende golfjes, veroorzaakt door kleine oneffenheden bij de instroming en langs de wanden. Naarmate echter met hogere concentraties gestroomd werd, zag het mengseloppervlak er gladder uit.

Langs de glaswand was zichtbaar hoe het zand in de mengselstroom werd meegevoerd. De indruk bestond, dat zand en water zich als kleine mengselvolumetjes of -werveltjes voortbewogen, die elkaar om beurten passeerden. Dit effect was vooral goed zichtbaar bij hoge concentraties ($\bar{c} = 30, 40\%$).

Bij zeer kleine debieten ($q < 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$) en hoge concentraties ($\bar{c} > 40\%$) werd de stroming niet-uniform over de breedte en begon dan een eigen, meanderende bedding te vormen, waarin een zich steeds verleggende geul ontstond.

Bij de wat hogere concentraties ($\bar{c} > 20\%$) was de mengselstroom op het oog vrijwel homogeen, afgezien van een heel dun slibrijk laagje aan het oppervlak.

Bij een concentratie van 10% echter was duidelijk een onderlaag met veel zand en een bovenlaag met weinig zand te onderscheiden. Er ontstond een duidelijk gelaagde stroming. Vaak waren zelfs een soort interne golven te zien in het tussengrensvlak. Met het grovere zilverzand was dit verschijnsel nog duidelijker.

5.2 Niet-uniforme stroming; duinvorming

Werd een helling ingesteld flauwer dan de evenwichtshelling, dan begon op een bepaalde plaats in de goot de bodem aan te zanden. Deze plaats was ondermeer afhankelijk van het debiet. Hoe hoger het debiet, doe verder van de instroming de aanzanding begon. Tengevolge van de lokale bodemophoging in de superkritische mengselstroom vertraagde de stroming ter plaatse en ontstond er na enige tijd een mengselsprong. Deze bewoog zich vervolgens snel stroomopwaarts, tengevolge van de toegenomen aanzanding in de subkritisch geworden mengselstroom. De bodem kwam daardoor zover omhoog, dat de mengselstroom opgestuwd werd en weer ging versnellen en daardoor weer in staat was zand te eroderen.

Op het punt waar de erosie de sedimentatie begon te overheersen ging de bodem weer omlaag en werd de stroming superkritisch.

Zo onstond een duin met afwisselend sub- en superkritische stroming, dat zich gestadig stroomopwaarts voortplantte tengevolge van de benedenstroomse erosie en de bovenstroomse sedimentatie.

In het begin groeide het duin en veranderde daarbij van vorm. Het werd steeds meer asymmetrisch, totdat het een bepaalde afmeting had bereikt, afhankelijk van debiet, concentratie en korreldiameter. Daarna verplaatste het duin zich alleen, totdat het uiteindelijk door de instroomopening verdween. Na enige tijd herhaalde dit proces zich weer.

De snelheid waarmee een duin gevormd werd en zich verplaatste en ook de uiteindelijke vorm, was sterk afhankelijk van de concentratie en de korreldiameter; bij hoge concentraties en fijn zand ging dit proces langzaam, bij lagere concentraties en grover zand veel sneller.

Vaak was te zien, dat achter de mengselsprong de nog vrijwel ongeconsolideerde bodem door de heftige turbulente bewegingen van de mengselstroom geschud en getrild en daardoor verdicht werd.

Sedimentatie vond soms plaats met kleine pakketjes tegelijk, maar meestal ging de bodem vrij gelijkmatig omhoog.

De erosie daarentegen kon soms zeer heftig zijn, vooral bij steil aflopende duinen. Af en toe werden zelfs zandpakketten in hun geheel afgevoerd, er was dan in feite sprake van een ondiepe afschuiving of lokale verweking, typisch grondmechanische verschijnselen.

Naarmate een flauwere goothelling werd ingesteld werd de tussenpoos tussen twee opeenvolgende duinen kleiner. Uiteindelijk ontstond een aaneengesloten patroon van duinen, zonder blootliggende gootbodem. Bij nog flauwere hellingen tenslotte raakten de mengselsprongen verdrongen. Deze situatie kon in de goot alleen bij heel kleine debieten ($q < 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$) ingesteld worden, omdat de zandlaag anders zo dik werd, dat de goot dreigde te overstromen.

De hellingverflauwingen, nodig om deze verschijnselen te doen ontstaan waren relatief gering (enkele cm's, dus enkele duizendsten van een radiaal). De evenwichtshellingen zijn daarom ook voor de stroming over een duinenpatroon nog representatief.

6. Uniforme mengselstroming over een vlakke bodem

6.1 Evenwichtshelling

De evenwichtshelling (zie ook punt A, hoofdstuk 4) is bepaald over de gehele range van de met deze opstelling mogelijke specifieke debieten, van $q = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$, waaronder de stroming een eigen bed ging vormen en niet-uniform over de breedte (0,30 m) werd, tot $q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$, vrijwel het maximale debiet, dat mengtankopstelling, debietmeter en leidingen toelieten.

Er is gestroomd met vijf verschillende concentraties en twee korreldiameters. De resulterende evenwichtshellingen (i_{sed}) zijn opgenomen in tabel 2.

Op dubbellog-papier uitgezet is er een duidelijk lineair verband te zien tussen helling en specifiek debiet (zie figuur 9). Deze resultaten komen goed overeen met die van het oriënterend onderzoek van 1985, lit. [1], zij het, dat de toen gevonden hellingen een fraktie steiler waren. Ook is er goede overeenstemming met prototypemetingen, zoals in het oriënterend onderzoek al werd geconstateerd.

De invloed van de korreldiameter bleek onverwacht groot te zijn. De proeven met het zilverzand konden niet bij kleine debieten uitgevoerd worden, omdat de evenwichtshelling dan steiler was dan de steilst mogelijke stand van de kantelgoot.

De invloed van de concentratie was in het algemeen gering. Dit kan, in het gebied van 10 - 20%, verklaard worden door het effect van hindered settling (zie lit.[10]). Bij de zeer hoge concentraties ($> 30\%$) was er wel enige invloed op de evenwichtshelling te bespeuren. Dit kan wellicht verklaard worden, doordat bij deze concentraties de viscositeit sterk toeneemt en daarmee de bodemruwheid toegenomen kan zijn (zie par. 6.2 en fig. 16B).

Bij wat lagere concentraties was het omslagpunt aanzanding-erosie scherp waarneembaar en ook zeer goed reproduceerbaar. Na het instellen van de goot met een helling een fraktie flauwer dan de evenwichtshelling, duurde het meestal niet langer dan ca. een minuut voordat de duinvorming explosief op gang kwam.

Naarmate de concentratie hoger was, werd dit omslagpunt diffuser. De duinvorming kwam steeds later op gang en voltrok zich ook in steeds langzamer tempo. Het was af en toe nodig om de tijdslimiet van 10 minuten (zie punt A, hoofdstuk 4) aan te houden om te kijken of er al of niet aanzanding optrad. Een enkele keer, bij $c = 40\%$, kwam het voor dat na 10 min. geen aanzanding was

opgetreden, maar bij voortzetting van de proef na 20 min. wel een duin ontstond, door de goot wandelde en door de instroming verdween, waarna de stroming in de goot weer geheel uniform was.

Ook het schoonspoelen van de goot bij een steile helling ging bij hogere concentraties moeilijker.

Op de meetresultaten kan een regressie-analyse toegepast worden. Er blijkt een duidelijk lineair verband tussen $\log q$ en $\log i$ te bestaan. De evenwichtshelling (i_{sed}) kan met de volgende empirische funktie beschreven worden:

$$i_{sed} = \beta \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-\alpha}, \quad \text{met } q_0 = 1 \text{ m}^2/\text{s} \quad (6)$$

De coëfficiënten α en β konden met een correlatiefaktor van meer dan 0,97 bepaald worden en zijn opgenomen in de tabel bij figuur 9.

Een nadere analyse laat zien, dat de coëfficiënten α en β afhankelijk zijn van de concentratie ($\bar{c}$) en de korreldiameter (D). In figuur 9 is te zien, dat de lijnen voor hogere concentraties steiler lopen en dat de lijn voor een grotere korreldiameter veel hoger ligt. Omdat beide grootheden invloed hebben, is een regressie-analyse uitgevoerd met twee variabelen. Dit resulteerde in de volgende empirische funkties:

$$\alpha = 1,62 \bar{c} + 212 D + 0,300 \quad (7)$$

en

$$\beta = -0,0112 \bar{c} + 86,9 D - 0,00546 \quad (8)$$

Worden deze funkties toegepast op de situatie met zilverzand ($D = 225 \mu\text{m}$) en een concentratie van 30%, dan wordt een lijn gevonden (zie figuur 9), die door het enige meetpunt loopt, dat beschikbaar was en dat niet in de regressieanalyse was betrokken.

Voor gebruik in praktijkgevallen, zoals op een stort, kan de formule vereenvoudigd worden door $\bar{c}$ in (7) en (8) een waarde van 10% te geven, zodat:

$$i_{sed} = 90 (D - 65 \cdot 10^{-6}) \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-0,45} \quad (9)$$

Voor niet te hoge concentraties wijkt de coëfficiënt α niet veel af van de op basis van de Engelund-Hansen transportformule gevonden theoretische waarde van 0,40 (lit.[10]).

6.2 Snelheidsprofielen

De snelheidsprofielen, bepaald met de EMS, zijn steeds doorgemeten bij de evenwichtshelling. Elk punt is het resultaat van een middeling over 3×10 seconden, (zie figuren 10 t/m 15, en tabel 3).

Uitgezet op log-papier geeft de snelheid, als functie van de afstand tot de bodem, steeds een nette rechte lijn te zien. Dit duidt er op, dat het logaritmische snelheidsprofiel, bekend van uniforme, turbulente waterstroming, ook voor zand-watermengselstromingen goed op gaat.

Om aan te sluiten bij in de literatuur gebruikelijke formuleringen zijn de meetresultaten verwerkt met behulp van twee dimensieloze parameters:

$\frac{zu^*}{\nu_m}$, een diepteparameter en

$\frac{u}{u^*}$, een snelheidsparameter,

waarin z = positie t.o.v. de bodem (m)
 u = lokale stroomsnelheid (m/s)
 u^* = schuifspanningssnelheid (m/s)
 ν, ν_m = viscositeit van het water, respectievelijk het mengsel (m^2/s)

Voor uniforme stroming kan uit een evenwichtsbeschouwing worden afgeleid:

$$u^* = \sqrt{g h i} \quad m/s \quad (10)$$

De viscositeit van het mengsel wordt, behalve door de temperatuur (zie (1) par. 3.1) ook beïnvloed door de concentratie. Dit effect, de rheologische dilatantie, wordt redelijk beschreven met de formule van Lee (1969), lit. [2], welke luidt:

$$\nu_m = \nu (1-\bar{c})^{(-2,5 + 1,9 \bar{c} + 7,7 \bar{c}^2)} \quad m^2/s \quad (11)$$

Voor een laminaire mengselstroming geldt een lineaire evenredigheid tussen schuifspanning en snelheidsgradiënt, volgens:

$$\tau = \rho_m \nu_m \frac{du}{dz} \quad N/m^2 \quad (12)$$

waaruit, met een lineaire schuifspanningsverdeling, te schrijven als:

$$\tau = \rho_m (u^*)^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad \text{N/m}^2 \quad (13)$$

een parabolische snelheidsverdeling volgt, namelijk

$$\frac{u}{u^*} = \frac{u^* z}{v_m} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{z}{h}\right) \quad (14)$$

Voor een turbulente mengselstroming kan volgens de klassieke mengweglengte-theorie een analoge redenering worden gevolgd, maar dan met de zogenaamde turbulente viscositeit, v_t , waarvoor geldt:

$$v_t = l^2 \frac{du}{dz} \quad (15)$$

en waarin l de mengweglengte is, die dicht bij de bodem evenredig is met de afstand en meer algemeen geschreven kan worden als:

$$l = \kappa z \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h}\right)} \quad (16)$$

met κ de von Kármán constante. De snelheidsverdeling, behorend bij (12), (13), (15) en (16) is:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{zu^*}{v_m} + \text{constante} \quad (17)$$

ook te schrijven als:

$$\frac{u}{u^*} = A \log \frac{zu^*}{v_m} + B \quad (18)$$

Dicht bij de vlak veronderstelde bodem is de stroming meer viskeus van karakter. Dan geldt (14), bij benadering te schrijven als:

$$\frac{u}{u^*} = \frac{u^* z}{v_m} \quad (19)$$

De formules (18) en (19) staan bekend als de "Wandwet". Uit in het verleden uitgevoerde, nauwkeurige metingen in helder water is gebleken dat de constante A een waarde van 5,75 en de constante B een waarde van 5,47 aanneemt.

De dikte van de viskeuze sublaag, δ , gedefinieerd als het snijpunt van (18) en (19), kan berekend worden uit:

$$B = \delta \frac{u^*}{v_m} - A \log \delta \frac{u^*}{v_m} \quad (20)$$

Is de bodem vlak, of zijn de bodemoneffenheden te verwaarlozen t.o.v. δ dan spreekt men van een hydraulisch gladde bodem, in het omgekeerde geval van een hydraulisch ruwe bodem.

De effectieve von Kármán constante, κ_{eff} , gedefinieerd als de helling van het logaritmische snelheidsprofiel, volgt uit:

$$A = \frac{\ln 10}{\kappa_{eff}} \quad (21)$$

Voor helder water wordt dan gevonden $\delta = 11,6 v/u^*$ en $\kappa = 0,40$.

In een zestal grafieken, voor specifieke debieten, q , van 0,05, 0,10 en 0,15 m²/s, een korreldiameter, D , van 120 en 225 μ m en diverse concentraties $\bar{c}$, zijn de gemeten snelheidsverdelingen gegeven (zie figuren 10 t/m 15 en tabel 3). De coëfficiënten A en B zijn uit deze snelheidsverdelingen berekend met behulp van een lineaire regressie-analyse en zijn opgenomen in de tabellen bij de betreffende grafieken.

Opvallend is de toe- en daarna weer afname van A bij toenemende concentraties. De effectieve von Kármán constante, berekend uit (21), is als functie van de gemiddelde concentratie $\bar{c}$ gegeven in figuur 16. Duidelijk zichtbaar is de af- en daarna weer toenemende trend van κ_{eff} , met een minimum waarde voor $\bar{c}$ rond de 20%.

De absolute waarde voor helder water wijkt af van de uit de literatuur bekende waarde van 0,4. Dit is wellicht te wijten aan de nog in geringe mate aanwezig zijnde versnelling van de stroming ter plaatse (zie par. 4, punt C), welke vrij veel invloed heeft op de waarde van A.

De afnemende trend van κ_{eff} bij lage concentraties was al wel bekend, zie bv. lit. [8]. In het gebied van de zeer hoge concentraties echter, waar κ_{eff} weer toeneemt, waren tot op heden geen metingen beschikbaar.

Het verschijnsel zou kunnen samenhangen met de demping van de turbulentie,

veroorzaakt door de aanwezigheid van dichtheidsgradiënten. Bij toenemende concentraties nemen de dichtheidsgradiënten namelijk eerst toe en daarna weer af (zie 6.3). Hierop wordt nader ingegaan in 6.4.

Een andere mogelijke oorzaak van het verschijnsel kan zijn het effect van de volumetrische dilatantie, zie lit. [2], waarop hier wat nader zal worden ingegaan.

De totale schuifspanning τ in het afstromende zand-watermengsel wordt in principe opgenomen door een term, samenhangend met de impulsuitwisseling door turbulentie, te beschrijven met het eerder genoemde mengweglengtemodel en een term, samenhangend met de impulsuitwisseling tussen de korrels onderling, dus

$$\tau = \tau_{\text{turb}} + \tau_{\text{korrels}} \quad (22)$$

waarin met (12) en (15) voor de turbulente schuifspanning kan worden geschreven

$$\tau_{\text{turb}} = \rho_m l^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (23)$$

en voor de korrelschuifspanning een formulering gekozen kan worden (zie lit. [2]) van de vorm

$$\tau_{\text{korrel}} = \rho_s f(c) D^2 \left(\frac{du}{dz} \right)^2 \quad (24)$$

Hierin is $f(c)$ een nader te definiëren, stijgende funktie van de concentratie ter plaatse. In het algemeen is de korrelterm in (22) te verwaarlozen t.o.v. de turbulente term, maar bij grove korrels, zeer hoge concentraties of grote snelheidsgradiënten kan deze wel een rol gaan spelen.

Uit (13), (16) en (22) t/m (24) kan een vergelijking voor de snelheidsverdeling worden afgeleid, namelijk:

$$\left(\frac{du}{dz} \right)^2 = \frac{(u^*)^2 (1-z/h)}{(0,4 z)^2 (1-z/h) + \rho_s / \rho_m f(c) D^2} \quad (25)$$

In een recente publikatie van Arai en Takahashi (1986), lit. [11], is een dergelijke vergelijking opgelost en is een uitdrukking afgeleid voor de effek-

tieve von Kármán constante in een mengselstroming ten opzichte van die in helder water. Vervolgens hebben Arai en Takahashi getracht deze theorie te verifiëren door het meten van snelheidsprofielen in kortstondige, hooggeconcentreerde mengselstromen in een laboratoriumopstelling ("mud"- of debris flows", $\bar{c}$ tot 42%). Met deze metingen kon het effect nauwelijks aangetoond worden. Uit de door hen afgeleide theorie volgt echter een soortgelijk verloop voor κ_{eff} als uit de huidige metingen is gedestilleerd. Dit pleit dus voor de invloed van de volumetrische dilatantie.

Een ander effect dat uit de meetresultaten naar voren komt is het feit, dat de coëfficiënt B, samenhangend met de bodemwrijving, weliswaar allerlei waarden kan aannemen, maar dat bij ongeveer gelijke A, maar verschillende concentraties $\bar{c}$, de waarde van B bij de hoge concentratie duidelijk groter is. Dit komt, omdat bij hoge concentraties de effectieve viscositeit, ν_m , sterk toeneemt. Deze grootheid is verwerkt in de parameter zu^*/ν_m , welke in de figuren 10 t/m 15 op de horizontale as is uitgezet. Ter vergelijking is in figuur 10B dezelfde gemeten snelheidsverdeling als in figuur 10 uitgezet, maar nu met de zo goed als constante viscositeit van het water, ν , in plaats van die van het mengsel. De Darcy-Weisbach bodemwrijvingscoëfficiënt f_o , te berekenen uit

$$f_o = 8 \frac{(u^*)^2}{\bar{u}^2} \quad (26)$$

varieerde van 0,028 tot 0,059 (zie tabel 3), overeenkomend met Chézy-waarden van 53 tot 37. Deze bodemwrijvingscoëfficiënt is afhankelijk van de bodemruwheid, k, en de hydraulische straal, R, van de mengselstroom in de goot. De hydraulische straal kan berekend worden met:

$$R = \frac{b h}{b + 2h} \quad m \quad (27)$$

waarin de gootbreedte b een waarde van 0,30 m heeft. De effectieve bodemruwheid k volgt dan uit

$$k = 12 R 10^{-\sqrt{\left(\frac{0,24}{f_o}\right)}} \quad m \quad (28)$$

Zoals in paragraaf 3.3. vermeld, was de gootbodem afgewerkt met een laag grof zand, waarvan $D_{50} = 500 \mu\text{m}$. De ruwheid k_s van een dergelijke zandbodem wordt in de literatuur vaak gesteld op:

$$k_s = 2 D_{90} \text{ of } 2,5 D_{50} \quad \text{m} \quad (29)$$

Dit komt neer op een ruwheidsbijdrage k_s voor de gootbodem van ca. $1200 \mu\text{m}$. Verder zal er een bijdrage zijn van de viskeuze sublaag δ , waarvoor geldt, volgend uit (20)

$$\delta = 11,6 \frac{v_m}{u_*} \quad \text{m} \quad (30)$$

In tabel 3 zijn de effectieve ruwheid, volgens (28) en de dikte van de viskeuze sublaag, volgens (30), gegeven. Daaruit volgt dat de gootbodem i.h.a. als hydraulisch ruw moet worden beschouwd, omdat $k_s \gg \delta$. Alleen bij de hogere concentraties ($\bar{c} > 30\%$), waarbij de effectieve viscositeit v_m sterk toeneemt, is de dikte van de viskeuze sublaag van de orde van de zandruwheid k_s .

In figuur 16B is de bodemruwheid k uitgezet als functie van de concentratie $\bar{c}$. In de figuur zijn tevens de zandruwheid k_s en daarboven de dikte van de viskeuze sublaag δ aangegeven. Duidelijk is te zien, dat alleen bij de hoge concentraties de totale ruwheid toeneemt en dat dit verklaard kan worden door een grotere bijdrage van δ . In figuur 10B is dit te zien door de lijn voor $\bar{c} = 44\%$ te vergelijken met de lijn voor $\bar{c} = 0$, deze loopt vrijwel parallel, maar is iets naar rechts opgeschoven.

Het Froudegetal tenslotte varieerde van 1,5 tot 3 (tabel 3). De stroming was dus steeds superkritisch.

6.3 Concentratieprofielen

De concentratieprofielen zijn simultaan met de snelheidsprofielen bepaald, met behulp van de GCM. In de figuren 17 t/m 22 zijn deze profielen opgenomen. De gegeven proefnummers korresponderen met de proefnummers van de snelheidsprofielen, de figuren 10 t/m 15. De concentratie, c , is weergegeven in volumeprocenten, de positie t.o.v. de bodem, z , is gerelateerd aan de mengseldiepte, h . Opvallend is, dat de bodemconcentratie, althans de concentratie op 6 mm boven de bodem, bij gemiddelde concentraties van 10 tot 30% vrijwel constant bleef. Bij het Haringvlietzand bedroeg deze ca. 33%, bij het zilverzand ca. 40%. Het profiel werd wel steeds "voller" en homogener. Bij nog hogere gemiddelde concentraties nam ook de bodemconcentratie toe en was het profiel vrijwel homogeen (bv. bij $\bar{c} = 40\%$). De concentratiegradiënten bij de bodem waren niet steeds gelijk (zie figuren 17 t/m 22), deze namen duidelijk af bij toenemende gemiddelde concentratie.

Een constante bodemconcentratie bij toenemende gemiddelde concentraties betekent, dat ook de sedimentatie bij de bodem constant is. Deze bedraagt immers

$$S = \rho_s w_o c_b (1 - c_b)^\alpha \quad \text{kg/s m}^2 \quad (31)$$

In een morfologische evenwichtssituatie, dus bij de evenwichtshelling i_{sed} , is de erosie gelijk aan de sedimentatie volgens (31). Niet de gemiddelde, maar de bodemconcentratie is dus bepalend voor dit evenwicht.

De sedimentatie S bereikt een maximum voor een bodemconcentratie van 20%, met $\alpha = 4$, zie lit. [10]. Mengselconcentraties van 10% en meer gaven echter al een bodemconcentratie te zien hoger dan deze optimumwaarde.

Overigens traden bij de zilverzand-profielen afwijkingen op tussen de diepte-gemiddelde concentratie, berekend uit het profiel en de mengtankconcentratie ($\bar{c}$). Dit werd veroorzaakt door de niet volledig homogene verdeling van het grovere zand in de mengtank.

De gemeten concentratieverdelingen geven aanleiding tot de volgende veronderstellingen omtrent de opbouw van een concentratieprofiel bij stroming van aanvankelijk helder water met constant specifiek debiet over een loskorrelig zandbed bij een toenemende bodemschuifspanning:

- de bodemconcentratie neemt toe, totdat deze een bepaalde optimumwaarde bereikt, afhankelijk van de korreldiameter. Bodemtransport overheerst aanvankelijk.
- de bodemconcentratie blijft gelijk, maar steeds meer materiaal gaat in suspensie, het profiel wordt steeds meer opgevuld, totdat het vrijwel homogeen is geworden. Suspensie transport is nu van overwegend belang
- het profiel blijft homogeen, maar de concentratie neemt over de hele hoogte, ook bij de bodem, toe.

Het zelfde effect zal worden verkregen bij een afnemende korreldiameter. Het effect van een grovere korreldiameter en daarmee een hogere valsnelheid, is in de figuren duidelijk te zien in de vorm van meer "uitgezakte" profielen, met grotere concentratiegradiënten.

Getracht is de gemeten concentratieverdelingen na te rekenen met een aangepaste Rouse-verdeling, volgens:

$$c = c_a \left(\frac{a/h}{1 - a/h} \frac{1 - z/h}{z/h} \right)^Z \quad (32)$$

waarin c = lokale concentratie

c_a = referentieconcentratie

a = referentiediepte (m)

h = mengseldiepte (m)

Z = suspensiegetal, gedefinieerd als

$$Z = \frac{w_s}{\kappa u^*} \quad (33)$$

waarin w_s = lokale valsnelheid (m/s)

κ = constante van von Kármán

u^* = schuifspanningssnelheid (m/s)

Voor de lokale valsnelheid, w_s , wordt de concentratieafhankelijke formule (3) toegepast. Omdat het suspensiegetal Z dan diepte-afhankelijk is, moet de concentratie volgens (32) iteratief berekend worden. Deze iteratie convergeert echter snel. (32) is de oplossing van de convectie -diffusievergelijking voor zand in een turbulente stroming. Daarbij is impliciet verondersteld, dat de turbulentiestructuur in de mengselstroom niet afwijkt van die in schoon water

(zie ook par. 6.4).

In de figuren 23 en 24 zijn de resultaten van enkele van deze berekeningen gegeven, tezamen met de corresponderende gemeten waarden. Vergelijking van gemeten en berekende profielen laat zien, dat bij het fijne zand de profielen wat minder en bij het grovere zand wat meer "uitgezakt" zijn. Overigens kan de werkelijke valsnelheid, w_0 , afwijken van de in de berekening gehanteerde waarden, tengevolge van bijvoorbeeld de korrelverdeling.

Het is niet uitgesloten, dat de profielen, met name die van het 120 μm zand, nog niet volledig uitgezakt zijn en dus nog niet helemaal hun evenwichtswaarde hebben bereikt. Gemeten en berekende concentratieverdelingen zouden in dat geval nog beter overeenstemmen. De aanpassingslengte van een concentratieprofiel is namelijk groter dan de aanpassingslengte van het bijbehorende snelheidsprofiel, welke herhaaldelijk gecontroleerd is.

De vraag doet zich voor of de gevonden concentratieprofielen na verloop van tijd ook zouden ontstaan bij een stroming van helder water over een zandbed onder overigens gelijke omstandigheden, of dat zij mede afhankelijk zijn van de begintoestand bij de instroming. Uitgaande van een lage beginwaarde zal namelijk de concentratie, na erosie van de bodem, bij een lage waarde een evenwicht kunnen bereiken, terwijl bij een hoge beginconcentratie en overigens gelijke stromingsomstandigheden (debiet, helling) een evenwicht, na sedimentatie, bij een veel hogere waarde bereikt wordt. Dit wordt veroorzaakt door het hindered settling-effect (zie lit [10]).

6.4 Damping van de verticale turbulente uitwisseling

De verticale snelheids- en concentratieverdeling in een stationaire, uniforme zand-watermengselstroming kan beschreven worden met de twee volgende differentiaalvergelijkingen:

$$\tau = \rho_m v_z \frac{du}{dz} = \left(1 - \frac{z}{h}\right) \rho_m u_*^2 \quad \text{en} \quad (34)$$

$$w_s c - \epsilon_z \frac{dc}{dz} = 0 \quad (35)$$

Hierin is:

ρ_m	= dichtheid zand-watermengsel	(kg/m ³)
v_z	= effectieve verticale turbulente uitwisselings- coëfficiënt voor impuls (turbulente viscositeit)	(m ² /s)
u	= horizontale snelheid zand-watermengsel	(m/s)
z	= verticale coördinaat	(m)
τ	= schuifspanning	(N/m ²)
h	= mengseldiepte	(m)
u_*	= schuifspanningssnelheid	(m/s)
w_s	= lokale valsnelheid zandkorrels	(m/s)
c	= zandconcentratie in volumedelen	(-)
ϵ_z	= effectieve verticale turbulente uitwisselings- coëfficiënt voor zand (turbulente diffusie)	(m ² /s)

De verticale gradiënten in de zandconcentratie resulteren in verticale dichtheidsgradiënten, welke op hun beurt de verticale turbulente uitwisseling dempen. Dit is o.a. te zien in de figuren 10 t/m 15, waar blijkt, dat de helling van de gemeten logaritmische snelheidsverdeling bij toenemende gemiddelde zandconcentratie eerst toeneemt en daarna, wanneer de zandconcentratie (bijna) homogeen over de diepte verdeeld is, weer afneemt tot de voor schoon water gevonden helling.

Deze damping kan worden veroorzaakt, doordat de turbulente bewegingen zandpakketjes tegen de door de zwaartekracht veroorzaakte oprijvende krachten in moeten transporteren. Het een en ander is, met name in relatie tot dichtheidsgradiënten ten gevolge van saliniteits- en temperatuursgradiënten, uitgebreid bestudeerd en in de literatuur besproken. Een overzicht hiervan is o.a. te

vinden in WL-verslag R880 (lit. [5]). Het is gebruikelijk om in deze gevallen de demping te beschrijven als funktie van het Richardsongetal Ri :

$$Ri = - \frac{g}{\rho} \frac{dp/dz}{(du/dz)^2} \quad (36)$$

Ri is een maat voor de verhouding tussen de potentiële energie, nodig om zandpakketjes tegen de oprijvende krachten in te transporteren en de beschikbare turbulente kinetische energie.

Er blijken in de literatuur vele dempingsformuleringen te bestaan van de vorm:

$$\nu_z = \phi_u(Ri) \nu_{z_0} \quad m^2/s \quad (37)$$

$$\epsilon_z = \phi_c(Ri) \nu_{z_0} \quad m^2/s \quad (38)$$

waarin:

- ν_{z_0} = vertikale turbulente uitwisselingscoëfficiënt voor impuls in homogene omstandigheden (m^2/s)
- ϕ_u = dempingscoëfficiënt voor impuls (-)
- ϕ_c = dempingscoëfficiënt voor stof (-)

In tegenstelling tot zout en warmte is het zand in een zand-watermengsel in suspensie, dat wil zeggen, dat de zandkorrels hun identiteit behouden en eigen bewegingen t.o.v. de omringende vloeistof kunnen uitvoeren. Daarom wordt in de sedimenttransporthoek vaak een wat andere relatie voor (38) gebruikt, zie o.a. Van Rijn (1984), lit [8]:

$$\epsilon_z = \beta \nu_z = \beta \phi_u \nu_{z_0} \quad m^2/s \quad (39)$$

Van Rijn heeft aan de hand van de metingen van Einstein - Chien en Coleman de volgende relaties voor ϕ_u en β gevonden:

$$\phi_u = 1 + \left[\frac{c}{c_{max}} \right]^{0,8} - \left[\frac{c}{c_{max}} \right]^{0,4} \quad (40)$$

$$\beta = 1 + 2 \left[\frac{w_s}{u_*} \right]^2 \quad (41)$$

Gepoogd is met deze dempingsrelaties de experimentele snelheids- en concentratieverdelingen na te rekenen door numerieke integratie van de vergelijkingen (34) en (35) (zie figuren 25, 26 en 27). Nabij de bodem werd steeds een gemeten snelheid of zandconcentratie opgelegd. Enige oriënterende berekeningen leerde, dat de demping volgens (40) en (41) veel te groot is, waarschijnlijk omdat ϕ_u afhankelijk is gesteld van de concentratie en niet van de concentratiegradient.

Vervolgens is gepoogd de demping te bepalen uit de experimentele snelheids- en concentratieverdelingen. Dit is met de zogenaamde balansmethode gedaan (zie WL-verslag M896-28, lit [6]). Hierbij wordt gebruik gemaakt van de vergelijkingen (34) en (35). Uit de metingen werden gedistilleerd:

$\frac{du}{dz}$, ρ_m , u_* , w_s , c en $\frac{dc}{dz}$, zodat Ri , v_z en ϵ_z berekend konden worden. Het een en ander gaat uiteraard niet goed als de stroming niet uniform is, omdat dan advectietermen aan (34) en (35) toegevoegd moeten worden. Gezien de zorgvuldigheid waarmee gepoogd is de stroming uniform te krijgen en controle hiervan middels de meting van de mengseldiepte op verschillende langstations, wordt deze fout klein geacht. De grootste fouten zijn afkomstig van de onnauwkeurigheid in de experimentele dc/dz en du/dz waarden - hierop wordt later nog teruggekomen.

De procedure was als volgt. Van een achttal proeven is de gemeten snelheid en zandconcentratie getekend als functie van de dimensieloze afstand tot de bodem. Door de meetpunten is een gladde kromme getekend. Daar waar deze kromme de verdeling redelijk betrouwbaar lijkt weer te geven is een raaklijn aan de krommes getekend ter bepaling van du/dz en dc/dz . Ter illustratie zijn in de figuren 25, 26 en 27 de meetpunten, de krommes en de hele waarden voor

du/dz en dc/dz voor een drietal proeven bij verschillende gemiddelde concentraties gegeven.

Voor de turbulente uitwisselingscoëfficiënt onder homogene omstandigheden is een parabolisch-konstante verdeling aangenomen (zie bijv. Van Rijn, lit [8]):

$$\begin{aligned} v_{z_0} &= \kappa u_* (z - z^2/h) \text{ voor } z \leq h/2 \\ v_{z_0} &= 0,25 \kappa u_* h \text{ voor } z > h/2 \end{aligned} \quad (42)$$

waarin κ = von Kármán's constante ($\kappa \approx 0,4$)

Aldus konden de figuren 28 en 29 samengesteld worden: ϕ_u vs Ri en β vs c. Uit figuur 28 blijkt dat er vrijwel geen correlatie tussen ϕ_u en Ri is: er is een wolk punten rond $\phi_u \approx 0,6$, Ri = 0,2 en een wolk rond $\phi_u = 1,3$, Ri = 6,0. Deze laatste wolk betreft meetpunten nabij het mengseloppervlak of van de proeven met zeer hoge concentraties ($\bar{c} > 40\%$). In de figuur zijn ook de dempingsrelaties volgens Vreugdenhil en DISTRO gegeven:

$$\text{Vreugdenhil : } \phi_u = \frac{v_z}{v_{z_0}} = (1 + 30 \text{ Ri})^{-0,5} \quad (43)$$

$$\text{DISTRO I : } \phi_u = \frac{v_z}{v_{z_0}} = (1 + 8 \text{ Ri})^{-1} \quad (44)$$

Deze relaties doorkruisen min of meer de onderste wolk punten.

Figuur 29 laat zien dat $\beta (= \epsilon_z / v_z)$ en de lokale concentratie c redelijk gecorreleerd zijn met:

$$\beta = \frac{\epsilon_z}{v_z} = 0,25 \exp \{40 c^2 - 2,3 c\} \quad (45)$$

Alleen de meetpunten van de proeven bij hoge concentratie ($\bar{c} > 40\%$) vallen duidelijk buiten de correlatie.

Vervolgens is onderzocht in hoeverre de gemeten u- en c-verdeling te reproduceren zijn door numerieke integratie van (34) en (35) en de gevonden dempingsrelaties, dwz. β volgens (45) en $\phi_u = 0,5$. Deze berekende profielen zijn ook in de figuren 25 en 26 getekend. Het resultaat lijkt nergens op; de demping is blijkbaar veel te groot.

Vervolgens zijn berekeningen gemaakt met β volgens (45) en $\phi_u = 0,6$, 0,7 en 1,0. In geen van deze gevallen werden acceptabele snelheids- en concentratieverdelingen gevonden.

Daarom is gezocht naar andere correlaties, waarmee de snelheids- en concentratieverdeling voorspeld zouden kunnen worden. De relevante plaatjes zijn in de figuren 30, 31 en 32 gegeven.

In figuur 30 is ϵ_z / v_{z_0} versus Ri getekend. De rechthoeken in de figuur repre-

senteren de meetpunten met hun foutenband. Deze foutenband is aanzienlijk, met name in de richting van de Ri -as. Dit wordt veroorzaakt doordat in Ri de fouten in dc/dz en du/dz samen doorwerken. Echter, zelfs met inachtnahme van deze grote foutenband zijn ϵ_z/v_{z_0} en Ri niet gekorreleerd. Ter illustratie zijn in de figuur ook de correlaties volgens Vreugdenhil en Distro getekend:

$$\text{Vreugdenhil } \epsilon_z/v_{z_0} = 1,17(1+6,53 Ri)^{-1,61} \quad (46)$$

$$\text{DISTRO I } \epsilon_z/v_{z_0} = (1+80 Ri)^{-1} \quad (47)$$

$$\text{DISTRO II } \epsilon_z/v_{z_0} = \exp(-18 Ri) \quad (48)$$

In figuur 31 zijn ϵ_z/v_{z_0} vs Ri^* , $\beta = \epsilon_z/v_z$ vs $(c_{\max} - c)/c_{\max}$ en $\beta = \epsilon_z/v_z$ vs w_s/u_* getekend. Ri^* is gedefinieerd als het overall Richardson getal:

$$Ri^* = -g \frac{\Delta c}{\Delta h} \frac{h^2}{u^2}$$

waarin $\Delta c/\Delta h$ de overall concentratiegradiënt is. Ook nu wordt geen correlatie gevonden. Een poging om een verband te vinden tussen β en w_s/u_* , zoals gebruikt door van Rijn, leidt ook tot niets: β varieert tussen 0,1 en 10, terwijl w_s/u_* slechts een faktor 2 varieert.

Figuur 32 tenslotte laat nog enige pogingen zien $\phi_u = v_z/v_{z_0}$ te correleren met verscheidene grootheden. Ook is de inverse van de helling₀ van de logaritmische snelheidsverdelingen zie par. 6.2) getekend als functie van Ri^* . De figuren geven geen betere correlaties dan in figuur 30 is gevonden.

Vervolgens is onderzocht in hoeverre de vaak gebruikte relaties van Vreugdenhil en DISTRO I de snelheids- en concentratieverdeling kunnen beschrijven. Hierbij is de uitwisselingscoëfficiënt voor "homogene omstandigheden" gedis-tilleerd uit de hoge concentratiemetingen ($\bar{c} > 40\%$) onder de aanname, dat de daarbij gevonden vrijwel homogene concentratieverdeling geen aanleiding tot turbulente damping gaf. Dit leidde tot:

$$\begin{aligned} v_{z_0} &= 3 \kappa u_* (z - z^2/h) & \text{voor } z \leq h/2 \text{ en} \\ v_{z_0} &= 0,75 \kappa u_* h & \text{voor } z > h/2 \end{aligned} \quad (49)$$

(zie ook (42)). Gebruik is gemaakt van de dempingsfuncties (43), (44), (46) en (47). De resultaten van de berekeningen voor twee proeven bij $\bar{c} = 10\%$ en $\bar{c} = 44\%$ zijn opgenomen in de figuren 25 en 27. De lage concentratieproef is redelijk te beschrijven met de DISTRO-demping, de hoge concentratieproef met de Vreugdenhil-demping. Voor tussengelegen concentraties zijn beide slecht.

Een mogelijk probleem is de (niet-) uniformiteit van de stroming. De snelheidsverdeling nabij de instroming van de goot zal verre van logaritmisch zijn. Een vuistregel voor de aanpassingslengte L_u voor de snelheidsverdeling luidt:

$$L_u \approx 50 h \quad (50)$$

Bij de experimenten bedroeg de mengseldiepte maximaal ca 0,1 m, zodat $L_u \approx 5,0$ m. Aangezien de metingen achterin de goot zijn uitgevoerd, mag worden verwacht, dat de snelheidsverdeling globaal in evenwicht zal zijn.

De zandconcentratie nabij de instroming zal vrijwel uniform over de diepte verdeeld zijn. Een maat voor de aanpassingslengte van de concentratieverdeling is in dit geval:

$$L_c \approx \frac{q}{w_s} \quad (51)$$

Met $q = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ en $w_s = 0,02 \text{ à } 0,004 \text{ m/s}$ wordt $L_c \approx 5 \text{ à } 25 \text{ m}$, zodat de concentratieverdeling wellicht niet geheel in evenwicht is.

Mogelijk is dit een oorzaak voor het ontbreken van een correlatie tussen de diffusiecoëfficiënt ϵ en parameters als Ri . Dit kan echter niet verklaren waarom er ook geen correlatie tussen de turbulente viscositeit ν_z en de verschillende parameters gevonden is.

Samenvattend moet geconcludeerd worden, dat de demping in de turbulente verticale uitwisseling en de relatie tussen de uitwisseling van impuls en die van zandkorrels voor stromingen met hoge concentraties niet met bestaande theorieën te beschrijven zijn. Ook pogingen anderssoortige relaties uit de metingen af te leiden waren niet succesvol.

7 Mengselstroming over een duinvormig, alluviaal bed

7.1 Erosie- en sedimentatiesnelheid

In de kantelgoot zijn metingen verricht tijdens de vorming en voortplanting van duinen, met het doel het erosieproces zoveel mogelijk te kwantificeren. Er is naar gestreefd simultaan te meten: de erosiesnelheid van het zandbed, de lokale duinhelling en de lokale stroomsnelheid aan het einde van een duin. Aangezien bij niet-cohesief materiaal, zoals zand, erosie en sedimentatie gelijktijdig op kunnen treden, is de erosiesnelheid van de bodem het netto resultaat van beide processen, in formule:

$$V_{\text{erosie}} = \frac{E - S}{\rho_s (1 - n)} \quad \text{m/s} \quad (52)$$

waarin E = erosie in kg/s m^2

S = sedimentatie in kg/s m^2

ρ_s = dichtheid korrelmateriaal, hier 2650 kg/m^3

en n = poriëngehalte bodem, hier is 40% aangehouden.

Is de erosie op een bepaald moment kleiner dan de sedimentatie, dan zal de bodem opgehoogd worden en kan er beter gesproken worden van de sedimentatiesnelheid, $V_{\text{sed}} = - V_{\text{erosie}}$.

De duinvoortplantingssnelheid is een functie van de erosiesnelheid, volgens

$$V_{\text{duin}} = \frac{V_{\text{erosie}}}{\sin \alpha} \quad \text{m/s} \quad (53)$$

waarin α de duinhelling ten opzichte van de horizontale as is.

In de figuren 33 en 34 zijn de gemeten duinvoortplantings-, erosie- en sedimentatiesnelheden uitgezet als functie van de gemiddelde concentratie $\bar{c}$.

De sedimentatie, het neerwaarts transport van deeltjes ten gevolge van de zwaartekracht, kan geschreven worden als (zie ook (31))

$$S = \rho_s w_o c(1 - c)^4 \quad \text{kg/s m}^2 \quad (54)$$

waarin de valsnelheidsreductie en de bodemconcentratie een rol spelen.

Voor zand met een bepaalde korrelverdeling zal ook de valsnelheid, w_0 , een bepaalde verdeling vertonen. Hier wordt echter gerekend met de valsnelheid voor de deeltjes met de mediane korreldiameter, D_{50} .

Uit metingen van de concentratieprofielen voor uniforme stroming (zie paragraaf 6.3) bleek, dat de bodemconcentratie voor gemiddelde concentraties van 10 tot 30% steeds ca. 33% bedroeg (voor 120 μm -zand). De sedimentatie is dan constant en bedraagt, met $w_0 = 0,011 \text{ m/s}$,

$$S = 1,9 \quad \text{kg/s m}^2 \quad (55)$$

De maximale sedimentatiesnelheid kan nu berekend worden met (52), waarin de erosie nul gesteld wordt. Deze wordt dan 1,2 mm/s en inderdaad liggen de gemeten maximale sedimentatiesnelheden (zie figuur 34) in de buurt van deze waarde.

De gemeten erosiesnelheden zijn in het algemeen aanzienlijk hoger, hetgeen tot gevolg heeft, dat de duinen een a-symmetrische vorm aannemen (zie paragraaf 7.3). In figuur 33 is verder te zien, dat de maximale erosiesnelheid afneemt bij toenemende gemiddelde concentraties. Men kan zich voorstellen, dat bij hoge concentraties en voldoende hoge bodemschuifspanningen de zandkorrels wel van de bodem losgemaakt, maar vervolgens niet in suspensie gebracht kunnen worden, ze worden a.h.w. weer teruggestuiterd. Bovendien moet er om de erosie te bewerkstelligen water van het mengsel in de bodem dringen. Deze waterstroming wordt geremd door de zandkorrels in het mengsel. Men kan spreken van hindered erosion in analogie met de hindered settling.

Wordt een in de literatuur gebruikelijke, dimensieloze erosieparameter (lit. [9]) ingevoerd, volgens

$$\Phi = \frac{E}{\rho_s \sqrt{(\Delta g D)}} \quad (56)$$

dan kan met een regressie-analyse de maximale erosie goed geschreven worden als een functie van een parameter, welke de relatieve "ruimte" in het concentratieprofiel beschrijft, namelijk:

$$\Phi_{\text{max}} = 0,033 \frac{1 - n - \bar{c}}{\bar{c}} \quad (57)$$

Uit het ingestelde specifieke debiet en de gemeten laagdikte van de mengselstroom boven het eroderende duin kan de lokale stroomsnelheid berekend worden. De metingen gaven echter geen direkt verband te zien tussen deze lokale stroomsnelheid en de simultaan gemeten erosiesnelheid (zie figuur 35).

Uit de eveneens simultaan gemeten duinhoogte en -lengte (van het aflopende gedeelte) kon een indruk verkregen worden van de lokale duinhelling. Er kon echter evenmin een direkt verband gevonden worden tussen deze lokale helling en de erosiesnelheid (figuur 35).

De waarnemingen op de soms zeer steil aflopende duinen (tot 30°) konden echter herleid worden naar een situatie met een horizontale bodem, zodanig, dat er wel een significante relatie tussen erosiesnelheid en stroomsnelheid viel af te leiden. Hiertoe dient de volgende beschouwing.

Een zandkorrel op een horizontale bodem zal in beweging komen, indien de sleepkracht F , uitgeoefend door het stromende water, groter wordt dan de tegenwerkende wrijvingskracht van de bodem. Deze tegenwerkende wrijvingskracht is evenredig met de normaalkracht op het betreffende vlak. De evenredigheidsconstante is voor zand de tangens van het natuurlijk talud, ϕ , van deze zandsoort. De normaalkracht is gelijk aan het gewicht G van het zandkorreltje. Beweging treedt dus op, zodra geldt

$$\frac{F}{G \tan \phi} > 1 \quad (58)$$

Bevindt het korreltje zich echter op een helling α in de richting van het stromende water, dan neemt de normaalkracht af en de kracht in de stroomrichting toe door toedoen van een component van de zwaartekracht in langsrichting. Dan kan worden afgeleid, dat beweging optreedt, zodra

$$\frac{F}{G \tan \phi} > 1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} \quad (59)$$

waarbij F , evenals de stroomsnelheid $\bar{u}$, in horizontale x -richting wordt gekozen. Dit betekent, dat naarmate het talud steiler wordt, met een zelfde sleepkracht steeds méér korrels losgemaakt kunnen worden, de erosie neemt dus toe. Wordt het natuurlijk talud bereikt (voor zand ca. 32°), dan is er in het geheel geen kracht meer nodig om het zand los te maken, het zal spontaan afvloeien.

Indien er onder- of overdrukken optreden in de bodem zal daardoor de helling van het natuurlijk talud beïnvloed worden. Is er sprake van een overdruk, bijvoorbeeld bij uittredend grondwater bij verweking van een zandpakket, dan zal de weerstand tegen erosie afnemen. Ontstaat er een onderdruk, bijvoorbeeld bij dilatantie tengevolge van afschuifverschijnselen, dan neemt de weerstand tegen erosie toe. Het talud kan dan stand houden bij hellingen steiler dan 32°, tot zelfs vertikaal toe. Het precieze verband tussen ϕ en deze waterspanningen is echter nog niet bekend.

De genoemde grondmechanische verschijnselen kwamen in de kantelgoot voor, maar steeds zeer kortstondig en lokaal. In bijlage 2 wordt nader ingegaan op een aantal waterspanningsmetingen, gedaan tijdens de erosie van een duin in de kantelgoot.

Met behulp van de hellingreduktie, zijnde het rechterlid van (59), kan nu uit de gemeten erosiesnelheden en de bekende sedimentatie van (55) de erosie berekend worden. Deze helling-gecorrigeerde erosie, de erosie, die bij gelijke condities op een horizontaal bed zou optreden, vertoont nu wel een redelijk verband met de stroomsnelheid ter plaatse.

Voor de metingen met een mengsel van 10% Haringvlietzand en stroomsnelheden van 1 tot 3 m/s is met behulp van een regressie-analyse het volgende verband gevonden (zie figuur 37 en par. 7.2):

$$E \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} \right) = 4,95 (\bar{u} - 0,50) \quad \text{kg/s m}^2 \quad (60)$$

In paragraaf 7.2 zal getracht worden de bodemschuifspanning in deze formule te betrekken en vervolgens hieruit een dimensieloze erosiefunctie voor zand-watermengselstromen af te leiden.

7.2 Erosie als functie van de bodemschuifspanning

In paragraaf 6.1 is een empirische functie afgeleid voor de evenwichtshelling, de helling waarbij erosie en sedimentatie aan elkaar gelijk zijn. Deze evenwichtshelling kan vertaald worden naar een evenwichtsbodemschuifspanning. Immers, voor uniforme stroming geldt:

$$\bar{u} = u^* \sqrt{\left(\frac{8}{f_o} \right)} \quad \text{m/s} \quad (61)$$

$$\text{en } u^* = \sqrt{(g h i)} \quad \text{m/s} \quad (62)$$

waarin: u^* = bodemschuifspanningssnelheid in m/s,
 $\bar{u}$ = mengselstroomsnelheid in m/s,
 f_0 = wrijvingscoëfficiënt van de gootbodem,
 h = mengsellaagdikte in m,
 en i = goothelling.

Wordt een dimensieloze bodemschuifspanningsparameter ingevoerd, volgens

$$\theta = \frac{(u^*)^2}{\Delta g D} \quad (63)$$

welke ook veel in de literatuur wordt gehanteerd, dan kan worden afgeleid:

$$\theta = \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{f_0}{8}\right) (g q i)^2}}{\Delta g D} \quad (64)$$

waarin: q = specifiek debiet in m^2/s
 D = mediane korreldiameter in m
 en Δ = relatieve dichtheidsverschil tussen korrels en water.

Wordt in (64) de evenwichtshelling ingevuld, bijvoorbeeld volgens formule (6) van 6.1, dan ontstaat een uitdrukking voor de evenwichts-bodemschuifspanning. Hierin zijn debiet en concentratie nog zwak, maar de korreldiameter sterk van invloed, analoog aan bijvoorbeeld de kromme van Shields. Men kan zich afvragen of debiet en concentratie misschien in het geheel niet in deze functie thuis horen. Dit is het geval, indien $\alpha = 1$ i.p.v. een waarde volgens formule (7) en $\beta = f(D)$ i.p.v. een waarde volgens formule (8) van par. 6.1.

In fig. 36 is relatie (64), gecombineerd met (6) geschetst, tezamen met enkele meetpunten. Omdat de erosie bij deze schuifspanning gelijk is aan de sedimentatie en de sedimentatie bekend is uit de metingen van de concentratieprofielen, zie (54) en (55) van 7.1, is ook de erosie bekend bij deze schuifspanning. Dit levert, vanwege de constante bodemconcentratie bij de hier beschouwde gemiddelde concentraties, slechts twee meetpunten op, één voor het fijne 120 μm en één voor het grovere 225 μm zand. Dit is echter voldoende om de in

de vorige paragraaf gevonden relatie te ijken en in dimensieloze vorm te schrijven. Immers, met (61) en (63) volgt:

$$\theta = \frac{\bar{u}^2}{\Delta g D} \cdot \frac{f}{8} \quad (65)$$

waarin f de wrijvingscoëfficiënt voor het betreffende oppervlak is. Met (65) en (56) kan de erosieformule (60) nu dimensieloos geschreven worden als:

$$\phi \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right) = 0,0019 \left(\theta^{0,5} \sqrt{\frac{8}{f}} - 11,4\right) \quad (66)$$

De erosie is voor de evenwichtstoestand voor $D = 120 \mu\text{m}$ gelijk aan $1,9 \text{ kg/s m}^2$, volgens (55). De bijbehorende schuifspanning geeft voor verschillende debieten en concentraties nog iets verschillende waarden, zie fig. 36. Een representatieve waarde van 5,0 geeft ingevuld in (66), voor de wrijvingscoëfficiënt op het duin, f , een waarde van 0,10. Deze vrij hoge waarde is verklaarbaar, omdat bij heftige erosie het zand niet alleen opgewerveld, maar ook in stroomrichting versneld moet worden, wat een extra weerstand voor de stroming inhoudt. De erosiefunctie wordt nu:

$$\phi \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right) = 0,017 \left(\theta^{0,5} - 1,3\right) \quad (67)$$

Vergelijking van deze functie, afgeleid voor snelstromende, superkritische mengselstromen, met in de literatuur genoemde functies (lit. [9]), afgeleid voor veel lagere stroomsnelheden en concentraties, blijkt dat de macht van de schuifspanning daar steeds veel hoger is. Deze formules zouden onder de hier beschouwde omstandigheden te hoge erosiewaarden geven. Van Rijn geeft bijvoorbeeld een macht 1,5, volgens:

$$\phi = 0,00033 \left(\frac{\theta - \theta_{cr}}{\theta_{cr}}\right)^{1,5} D^{*0,3} \quad (68)$$

waarin

$$D^* = D \sqrt[3]{\left(\frac{\Delta g}{2}\right)}, \text{ een korreelparameter}$$

en θ_{cr} = kritieke bodemschuifspanningsparameter volgens Shields.

Een oriënterende analyse van een aantal erosieproeven met het grovere zilverzand gaf aan, dat de factor $D^{0,3}$ in (68) de korrelgrootte-invloed redelijk weergeeft. Wordt deze factor in (67) ingevoerd, dan volgt een erosiefunctie voor zand-watermengselstromen volgens:

$$\phi \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right) = 0,012 (\theta^{0,5} - 1,3) D^{0,3} \quad (69)$$

Deze functie is geschetst in figuur 37, tezamen met de meetpunten voor $\bar{c} = 10\%$ en $D = 120 \mu\text{m}$, op grond waarvan de relatie is afgeleid en de overige meetpunten. Bij de meetpunten met hogere concentraties bleek de erosiebeperking volgens formule (57) van belang. Deze formule is ook in de figuur geschetst. In principe zouden beide formules in één erosiefunctie (bijv. een exponentiële) geschreven kunnen worden. Om een verantwoorde regressie-analyse uit te voeren zouden echter meer meetpunten beschikbaar moeten komen.

De spreiding van de meetpunten is nog vrij groot, wat o.a. wordt veroorzaakt door de beperkte nauwkeurigheid, waarmee simultaan helling, erosie- en stroomsnelheid bepaald konden worden. Met name het bepalen van de helling op het meestal bolvormige talud kon slechts globaal gebeuren en juist deze helling bleek later sterk van invloed op de erosie. Voor meer nauwkeurige methoden moet gedacht worden aan het gebruik van high-speed filmcamera's en dergelijke. De meetpunten voor het zilverzand zijn verkregen door analyse van videobeelden. De nauwkeurigheid daarvan was ook matig door de beperkte beeldscherpte, waardoor met name de erosiesnelheid minder nauwkeurig kon worden bepaald.

Al met al lijken (69) en (57) het erosieproces redelijk weer te geven, mede gezien het feit, dat geen enkele bestaande formule hier toegepast kon worden. In de verdere wiskundige modellering kunnen zij daarom nog van belang zijn.

7.3 Ontwikkeling en geometrie van een duin

In par. 5.2 is reeds geschetst hoe een duin in de goot ontstond, zich ontwikkelde en uiteindelijk weer door de instroomopening verdween.

In de figuren 38 en 39 is een serie foto's opgenomen, die in kort tijdsbestek achter elkaar door de glaswand zijn gemaakt en welke het hele proces van opbouw en afbraak van een duin laten zien.

Figuur 40, een registratie van de duinhoogte als functie van de tijd, geeft een vergelijkbaar beeld. De lokale helling van de grafiek geeft een indruk van

de sedimentatie- of erosiesnelheid op dat moment.

In de figuren 41 en 42 zijn de ontwikkeling en de verplaatsing van een drietal duinen in de kantelgoot te zien. Duinlengte, hoogte en positie werden daartoe geregistreerd op een aantal achtereenvolgende tijdstippen. Op gelijke schaal is de goothelling weergegeven. Daardoor is te zien, dat de helling van het sedimenterende gedeelte van het duin vrijwel nul of licht negatief was. De helling van het eroderende gedeelte nam aanvankelijk steeds toe, maar bleef na verloop van tijd vrijwel constant, zoals eveneens te zien is in de figuren.

Figuur 43 geeft vergelijkbare beelden, alleen is hier niet de verplaatsing, maar alleen de geometrie van de duinen geregistreerd.

In par. 7.1 is gebleken dat bij lagere concentraties ($\bar{c} \leq 10\%$) de erosiesnelheid veel verder kon toenemen dan bij hogere concentraties ($\bar{c} \geq 40\%$).

Men kan zich nu voorstellen, dat op het duin tijdens erosie zich het volgende proces afspeelt:

Op het al enigszins aflopende talud versnelt de mengselstroom, waardoor de erosiesnelheid toeneemt. Daardoor wordt het talud steiler en zal de mengselstroom verder versnellen. Dit proces versterkt zich zelf, net zolang, totdat bij de teen van het talud de maximale erosiesnelheid wordt bereikt (volgens (57) van 7.1) en de taludhelling verder constant blijft, of het duin, in grondmechanische zin, instabiel wordt en bezwijkt (door afschuiving of vloeïng).

In de figuren is inderdaad te zien, dat de taluds in het begin steeds steiler werden en tevens, dat bij lagere concentraties de taluds steiler en de duin-hoogte-lengteverhouding groter waren dan bij de hogere concentraties. In het laatste geval waren de duinen veel vlakker en minder a-symmetrisch van vorm.

7.4 Concentratieverloop over een duin

Getracht is met behulp van de GCM de afname van de gemiddelde concentratie in het sedimentatiedeel en de toename in het erosiedeel te meten. Daartoe werd de GCM, gemonteerd op een peilnaald, zo veel mogelijk op een vaste hoogte t.o.v. het zandbed gehouden. Bij sedimentatie moest de GCM dan voortdurend omhoog en bij erosie omlaag bewogen worden. Tegelijkertijd werden de gemeten concentraties afgelezen. De resultaten, de met vaste tijdsintervallen gemeten concentratie en de simultaan afgelezen positie van de GCM t.o.v. de bodem, tevens een maat voor de duinhoogte, zijn weergegeven in de figuren 44 en 45.

De uitvoering van deze metingen had een belangrijk praktisch bezwaar. Door de

ondoorzichtigheid van het mengsel kon de juiste positie van de GCM niet visueel gecontroleerd worden. Af en toe bleek, dat het meetpunt van de GCM geheel ingezand was. In de figuren komt dit tot uitdrukking in plotselinge concentratiepieken ($c \sim 60\%$). Deze punten kunnen dus beter buiten beschouwing blijven.

Het bleek helaas niet mogelijk een significante toe- of afname van de concentratie over het duin te meten. Grotendeels hangt dit samen met de praktische problemen, welke de juiste positionering van de concentratiemeter met zich mee bracht. Anderzijds zijn de te verwachten veranderingen in de concentratie ook zo klein, dat deze alleen bij zeer nauwkeurige meetmethoden op te merken konden zijn.

Immers, uit een 1-dimensionale zandbalansvergelijking (met q constant) volgt:

$$\frac{d\bar{c}}{dx} = \frac{E - S}{\rho_s q} \quad m^{-1} \quad (70)$$

De maximale concentratie-afname kan bijvoorbeeld geschat worden met $E = 0$, $S = 1,9 \text{ kg/s m}^2$ en $q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$, waaruit een waarde volgt van 1,4% per meter.

Bij gemiddelde concentraties van enkele tientallen procenten en duinlengten van enkele meters is een dergelijke concentratie-afname nauwelijks meetbaar. Bij erosie is de concentratieverandering weliswaar groter, maar de lengte waarover dit geschiedt evenredig kleiner, zodat ook dan dezelfde conclusie gerechtvaardigd blijft.

Uit de metingen kan dus evenmin afgeleid worden, dat er géén concentratieveranderingen optreden.

8 Literatuuroverzicht

1. Waterloopkundig Laboratorium
Zandwatermengselstromingen: Verslag van een Experimentele Studie naar het Gedrag van Zand-watermengselstromen Boven Water
M2081-20, juli 1986
2. Waterloopkundig Laboratorium
Zand-watermengselstromingen: Literatuurstudie naar het Gedrag van Zand-watermengselstromen
M2081-10, juli 1986
3. Waterloopkundig Laboratorium
Zand-watermengselstromingen: Voorstel Vervolgonderzoek 1986
K3474, januari 1986
4. Waterloopkundig Laboratorium
Onderzoek Meetmethodes Kantelgoot
M2081-22, oktober 1985.
5. Waterloopkundig Laboratorium
Momentum and Mass Transfer in Stratified Flows
R880, 1974
6. Waterloopkundig Laboratorium
Tweedimensionaal Onderzoek, Turbulente Diffusiecoëfficiënten
M896-28, juli 1976
7. L.C. van Rijn
Sediment Transport, Part I, Bed Load Transport
Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, no. 10, p 1431-1456,
1984
8. L.C. van Rijn
Sediment Transport, Part II, Suspended Load Transport
Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 110, no. 11, p 1613-1641,
1984

Literatuuroverzicht (vervolg)

9. L.C. van Rijn

Sediment Pick-up Functions

Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, no. 10, p 1494-1502, 1984

10. D.R. Mastbergen, W. Leeuwestein

Het Gedrag van Zand-watermengselstromingen bij Zandsluitingen,

T.U. Delft, Afdeling Civiele Techniek, mei 1986

11. M. Arai, T. Takahashi

The Kármán Constant of the Flow laden with High Sediment

3rd International Symposium on River Sedimentation, p 824-833,

University of Mississippi, March 31-April 4, 1986

Tabel 1 Proevenprogramma.

- 47 -

 $D = 120 \mu\text{m}$

	$q \text{ (m}^2/\text{s)}$	0,01	0,02	0,03	0,05	0,10	0,15
$\bar{c}(\%)$							
0	-	-	-	B	B	B	
5	A	A	A	A	A	A	A
10	A	A,D,V	A	A,B,C,V	A,B,C,G	A,B,C	
20	A	A,D	A	A,B,D,V	A,B,C,G	A,B	
30	A	A	A	A,B,D	A,B,D	A,B	
40	A	A	A	A,B,D	A,B,D,V	A,B	
50	-	-	-	-	B,V	-	

 $D = 225 \mu\text{m}$

	$q \text{ (m}^2/\text{s)}$	0,05	0,10	0,15
$\bar{c}(\%)$				
0	B	B	B	
3	B	B	B	
10	A,B,V,G	A,B	A,B	
20	-	-	-	
30	B	B	B	

A = Bepalen evenwichtshelling

B = Meten snelheids- en concentratieprofiel

C = Controleproeven uniformiteit

D = Duinvorming

V = Video

G = Metingen Grondmechanica Delft.

Tabel 2 Evenwichtshellingen i_{sed} in radialen

$D = 120 \mu m$

$\bar{c}$	5%	10%	20%	30%	40%
q (m^2/s)					
0,01	0,0326	0,0374	0,0344	0,0444	-
0,02	0,0236	0,0252	0,0228	0,0268	-
0,03	0,0193	0,0211	0,0188	0,0194	0,0306
0,05	0,0167	0,0178	0,0133	0,0117	0,0191
0,10	0,0124	0,0120	0,0085	0,00637	0,0130
0,15	0,0099	0,0102	0,0072	0,00415	0,0059

$D = 225 \mu m$

$\bar{c}$	10%	20%	30%
q (m^2/s)			
0,01	-	-	-
0,02	-	-	-
0,03	-	-	-
0,05	0,0633	-	-
0,10	0,0430	-	-
0,15	0,0363	-	0,0605

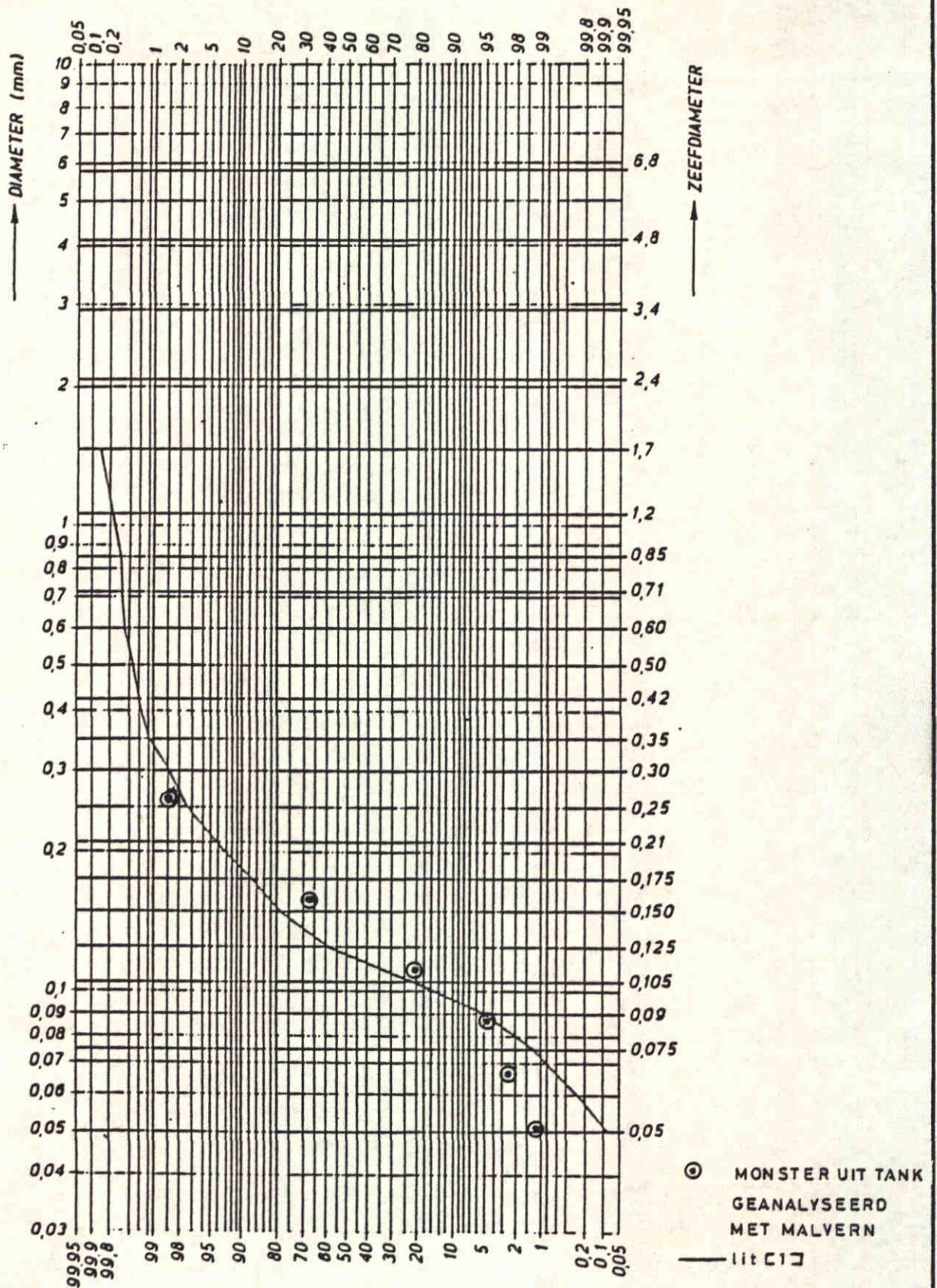
Tabel 3 Algemene meetgegevens per proef

- 49 -

Proef no.	$\bar{c}$ %	q m^2/s	$\bar{u}$ m/s	i -	h cm	f_o -	Fr -	T $^{\circ}C$	δ μm	k μm
$D = 120 \mu m$										
37	40,8	0,05	1,11	0,0195	4,49	0,055	1,68	27,3	1050	3380
39	40,8	0,10	1,33	0,0135	7,50	0,045	1,55	28,9	943	2940
41	41,2	0,05	1,11	0,0191	4,49	0,054	1,68	30,7	989	3230
43	42,2	0,15	1,36	0,0066	11,02	0,031	1,31	30,6	1082	1260
44	30,6	0,05	1,00	0,0107	4,99	0,042	1,43	26,0	537	1830
45	31,9	0,15	1,29	0,0051	11,66	0,028	1,20	26,4	502	929
46	31,9	0,10	1,10	0,0059	9,11	0,035	1,16	26,7	523	1630
49	20,5	0,05	1,07	0,0120	4,68	0,039	1,07	24,8	285	1410
50	20,5	0,10	1,21	0,0076	8,24	0,033	1,21	24,9	267	1280
51	20,9	0,15	1,39	0,0071	10,81	0,031	1,35	25,9	236	1240
54	20,5	0,15	1,37	0,0070	10,97	0,032	1,32	26,0	236	1386
56	10,8	0,05	1,17	0,0155	4,28	0,038	1,80	25,4	169	1220
57	10,8	0,15	1,53	0,0102	9,81	0,034	1,56	24,9	139	1570
58	10,8	0,10	1,39	0,0114	7,19	0,033	1,66	24,6	156	1170
$D = 225 \mu m$										
65	30,0	0,15	2,29	0,0605	6,54	0,059	2,89	22,9	210	5251
70	10,4	0,15	1,97	0,0363	7,62	0,056	2,28	23,1	87,9	5150
71	10,4	0,10	1,92	0,0430	5,20	0,047	2,69	23,5	97,2	2550
73	10,4	0,05	1,76	0,0626	2,84	0,045	3,34	23,8	107	1400
77	3,4	0,15	2,53	0,0476	5,94	0,035	3,31	21,3	73,4	1230
78	3,4	0,10	2,24	0,0476	4,47	0,033	3,38	21,9	83,0	830
79	3,4	0,05	1,72	0,0476	2,91	0,037	3,22	22,0	102	829
helder water										
80	0	0,15	2,40	0,0476	6,26	0,041	3,06	18,7	69,9	2020
81	0	0,10	2,08	0,0476	4,82	0,042	3,02	18,9	79,7	1781
82	0	0,05	1,65	0,0476	3,03	0,042	3,03	19,0	100	1230
$D = 120 \mu m$										
83	43,8	0,15	1,87	0,0291	8,03	0,053	2,11	23,6	1160	4670
84	43,8	0,10	1,85	0,0449	5,42	0,056	2,53	24,3	1114	4061

) voor u^ en v_m zie figuren 10 t/m 15

OP DE ZEEF IN GEWICHTSPROCENTEN



DOOR DE ZEEF IN GEWICHTSPROCENTEN

KORRELVERDELING HARINGVLIETZAND

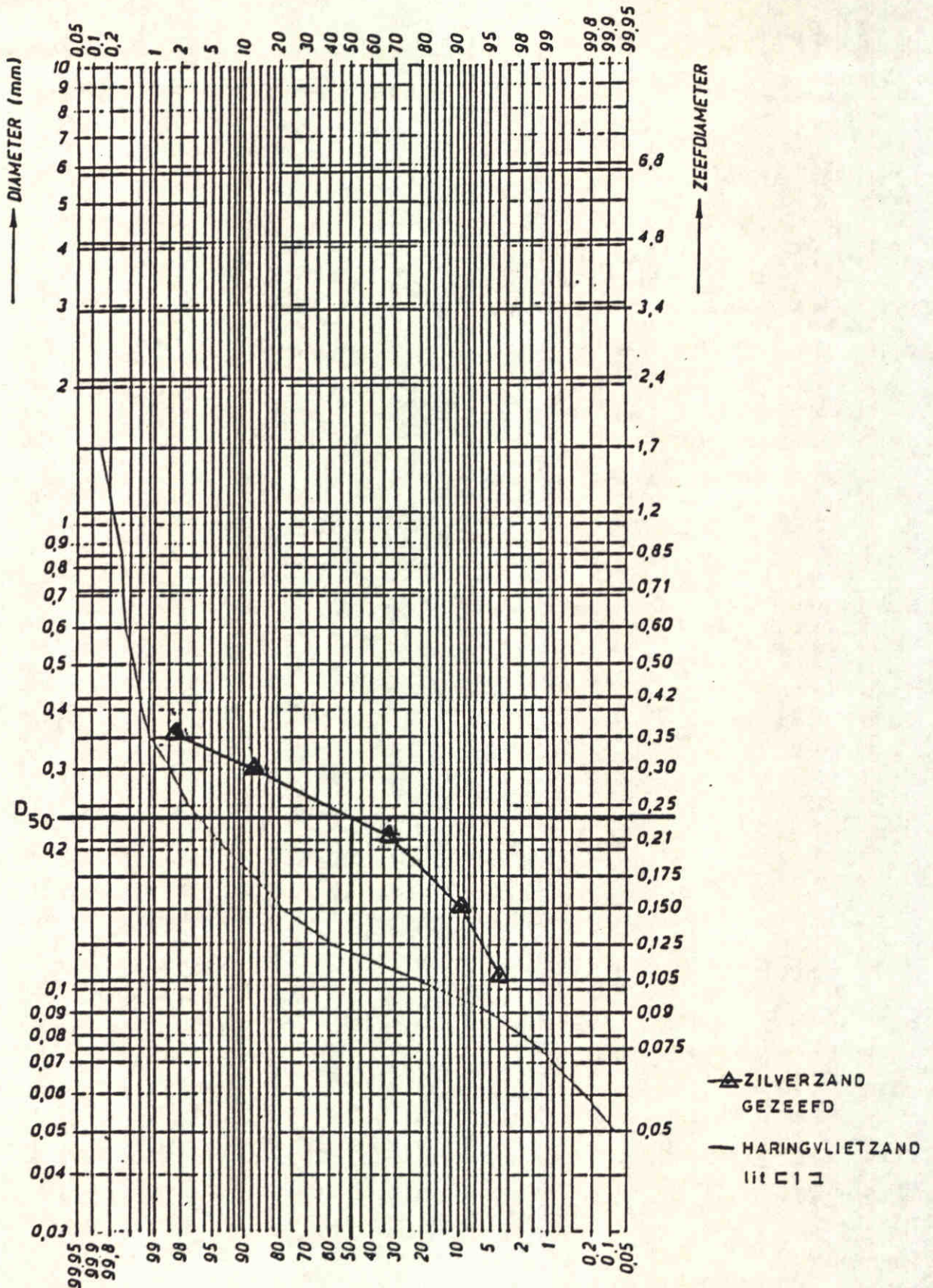
D 50 = 120 μ m

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 1

OP DE ZEEF IN GEWICHTSPROCENTEN



DOOR DE ZEEF IN GEWICHTSPROCENTEN

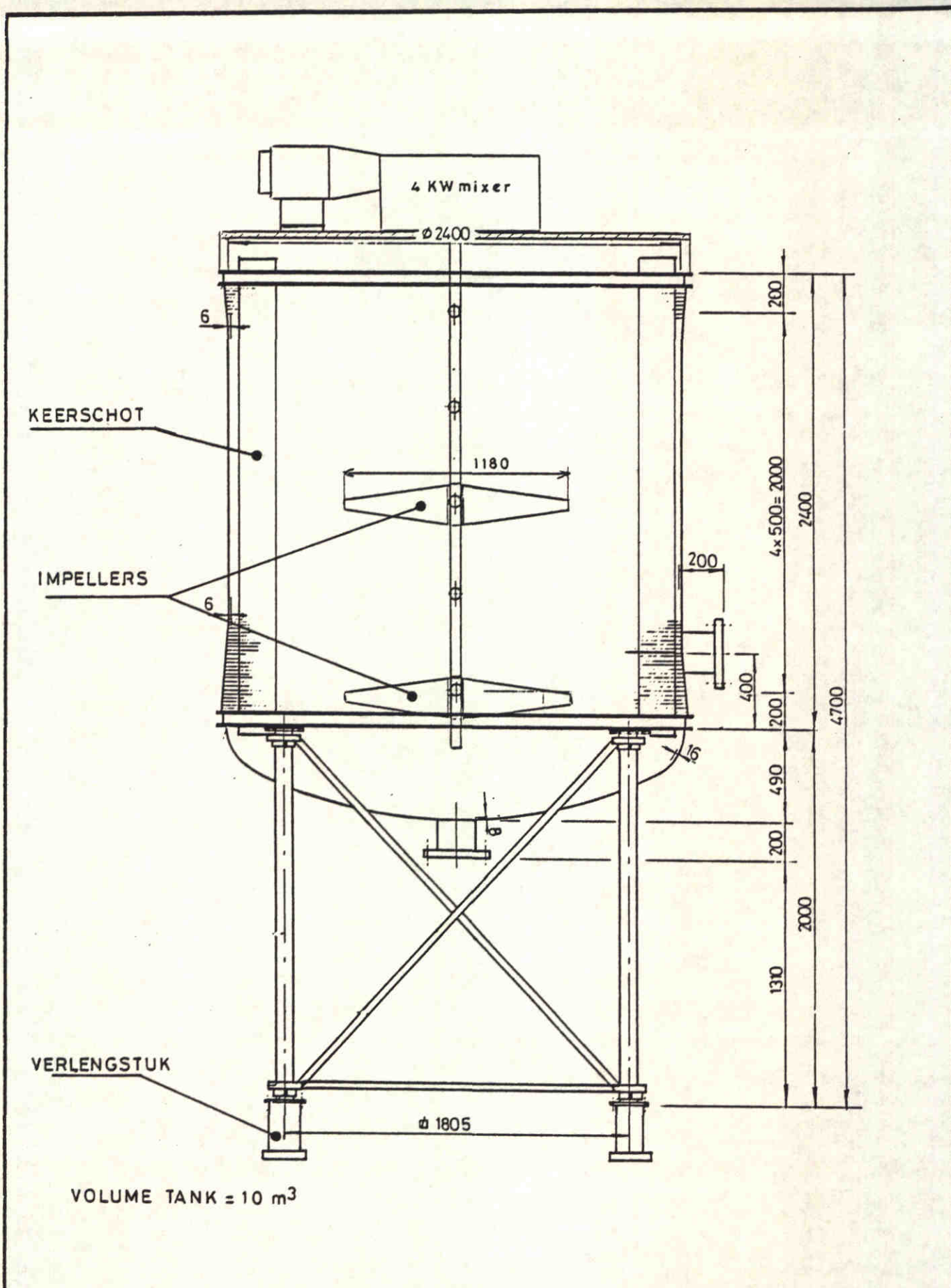
KORRELVERDELING ZILVERZAND

D 50 = 225 μ m

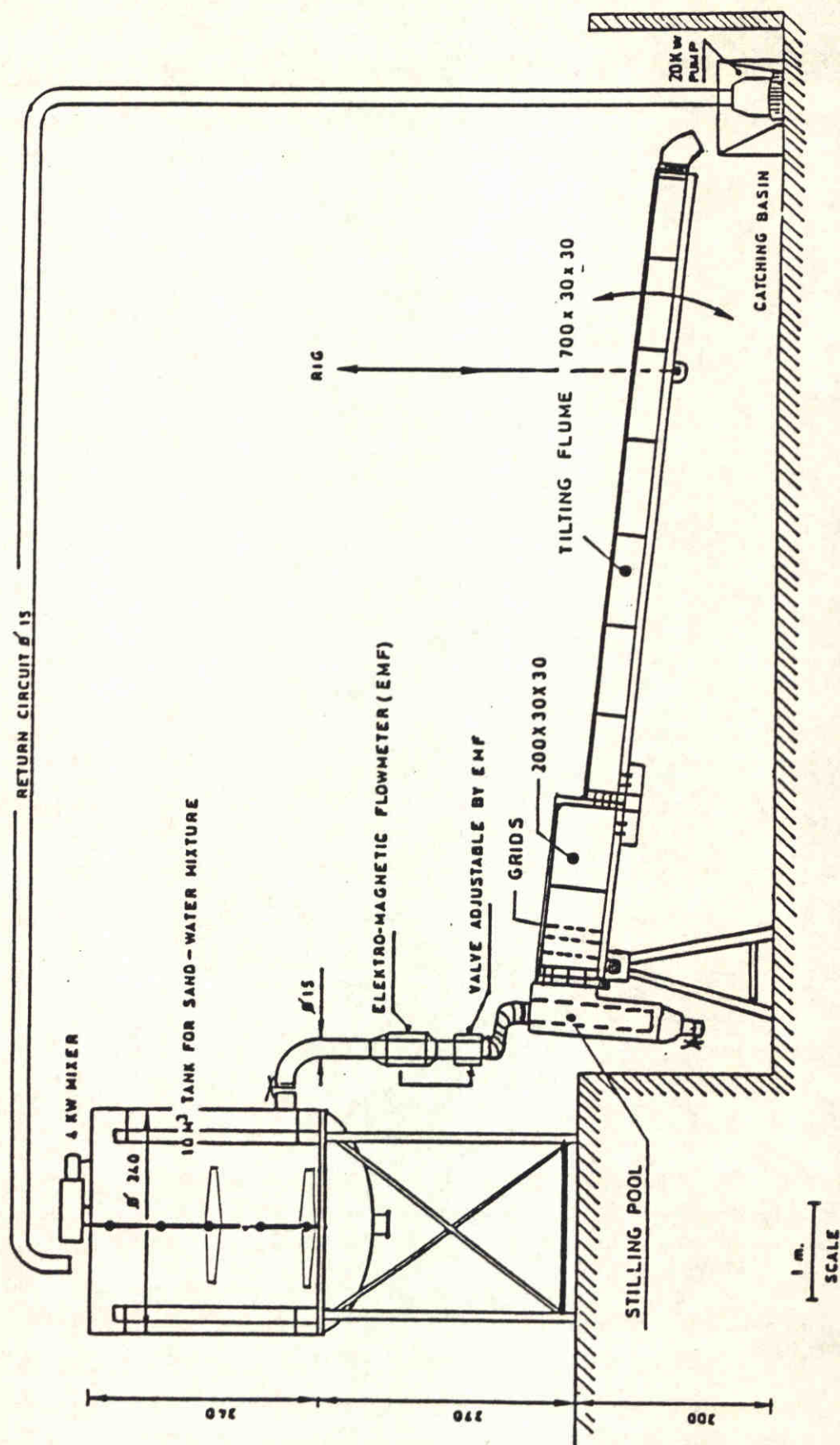
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46 - 02

FIG 2



MENG TANK		
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	Z 46-02	FIG 3



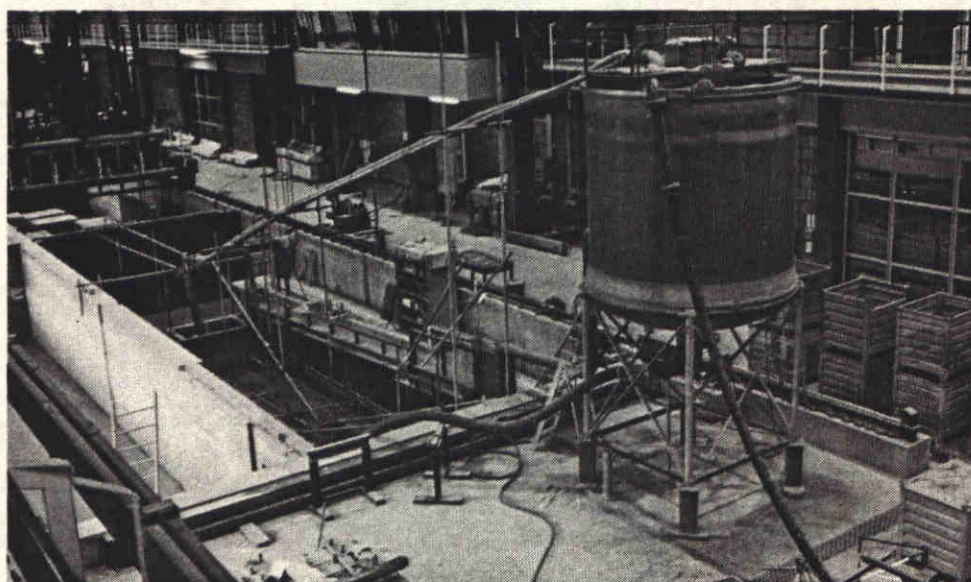
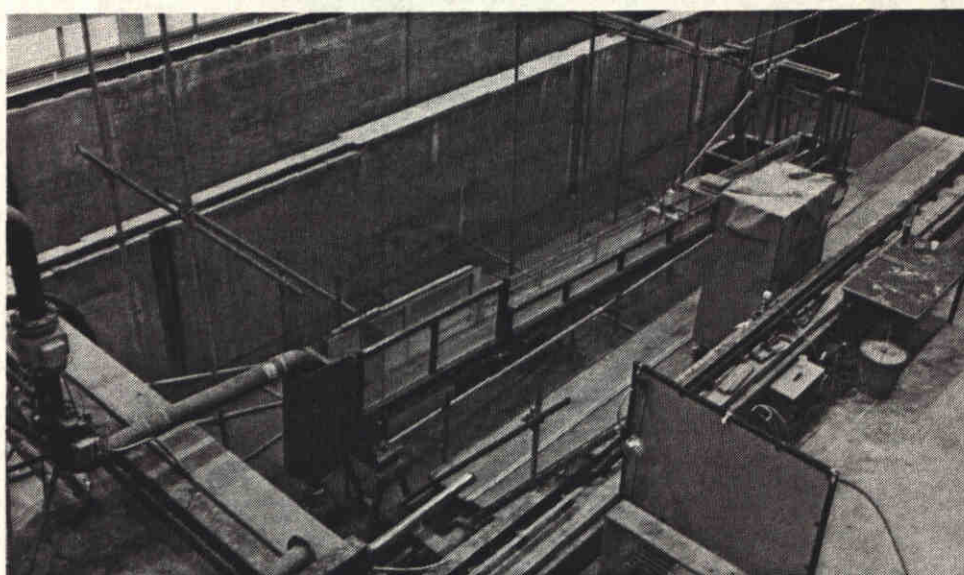
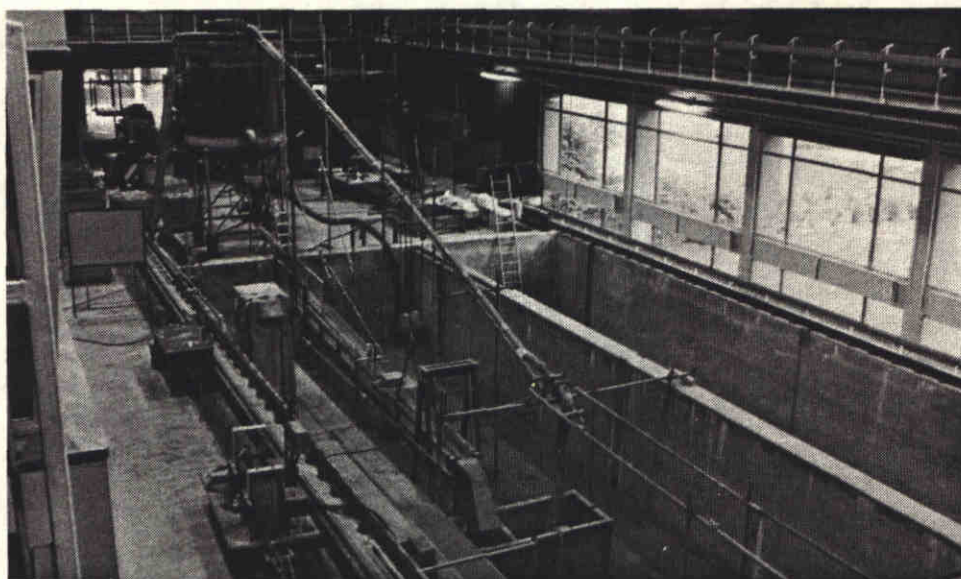
SKETCH OF MODEL SET-UP

SCHETS VAN DE MODELOPSTELLING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 4

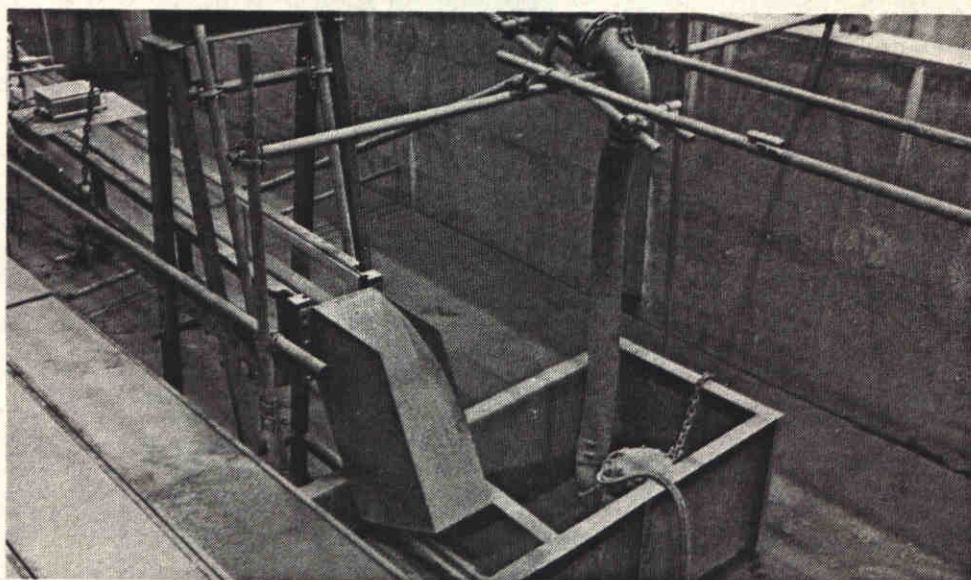
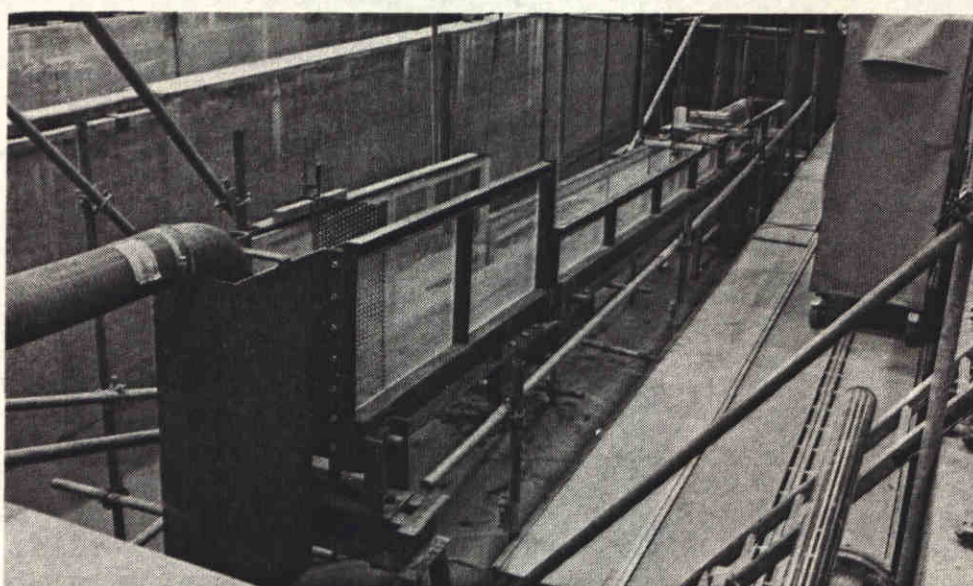
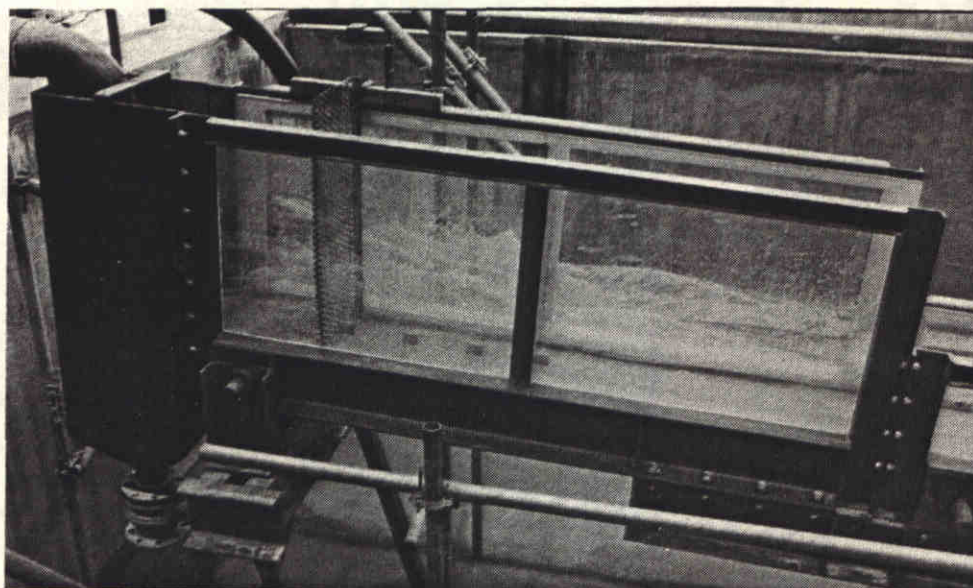


DE PROEFOPSTELLING IN DE BAGGERGOOT
OVERZICHT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46 -02

FIG 5

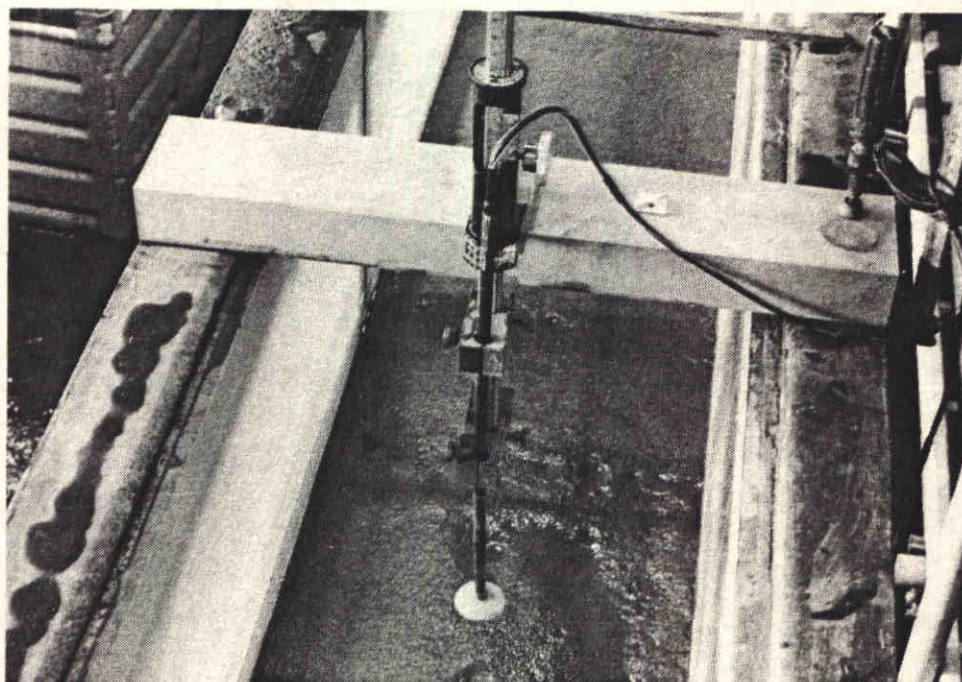
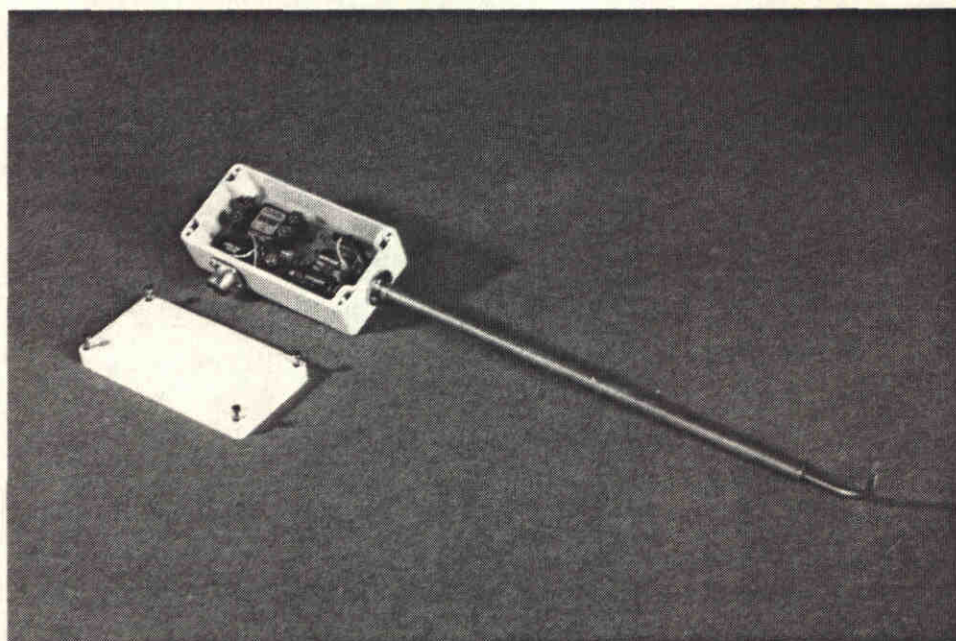


IN- EN UITSTROOMVOORZIENINGEN KANTELGOOT

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z46-02

FIG 6

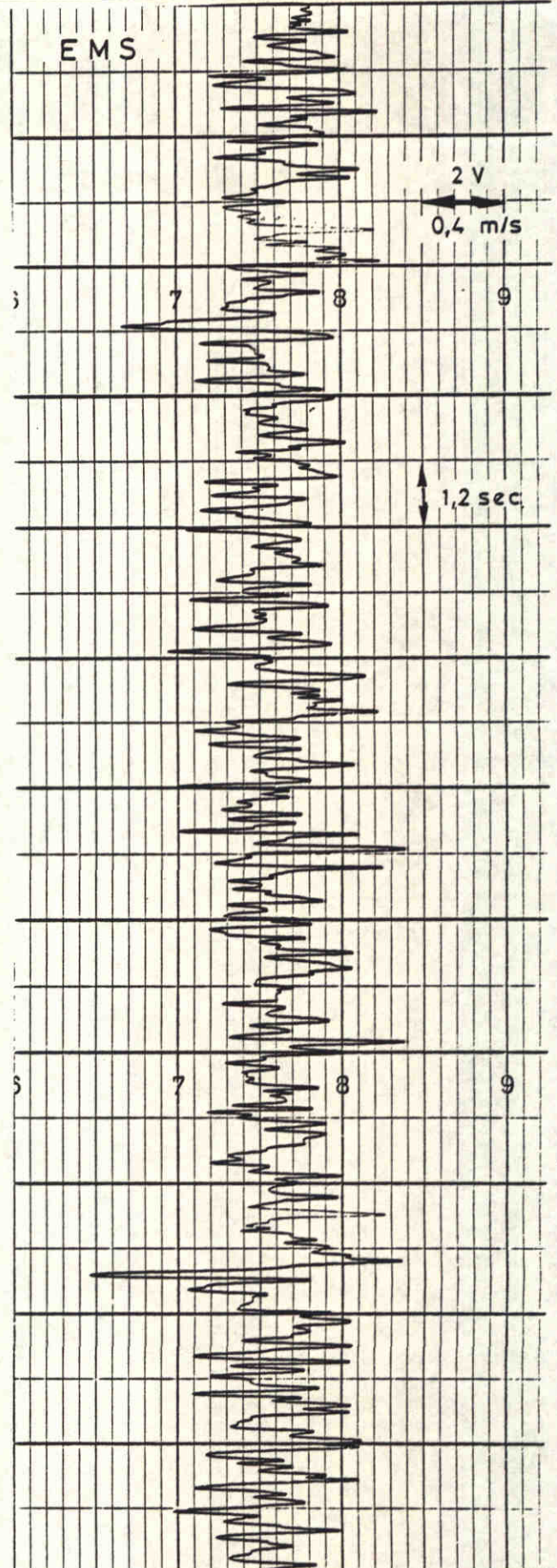
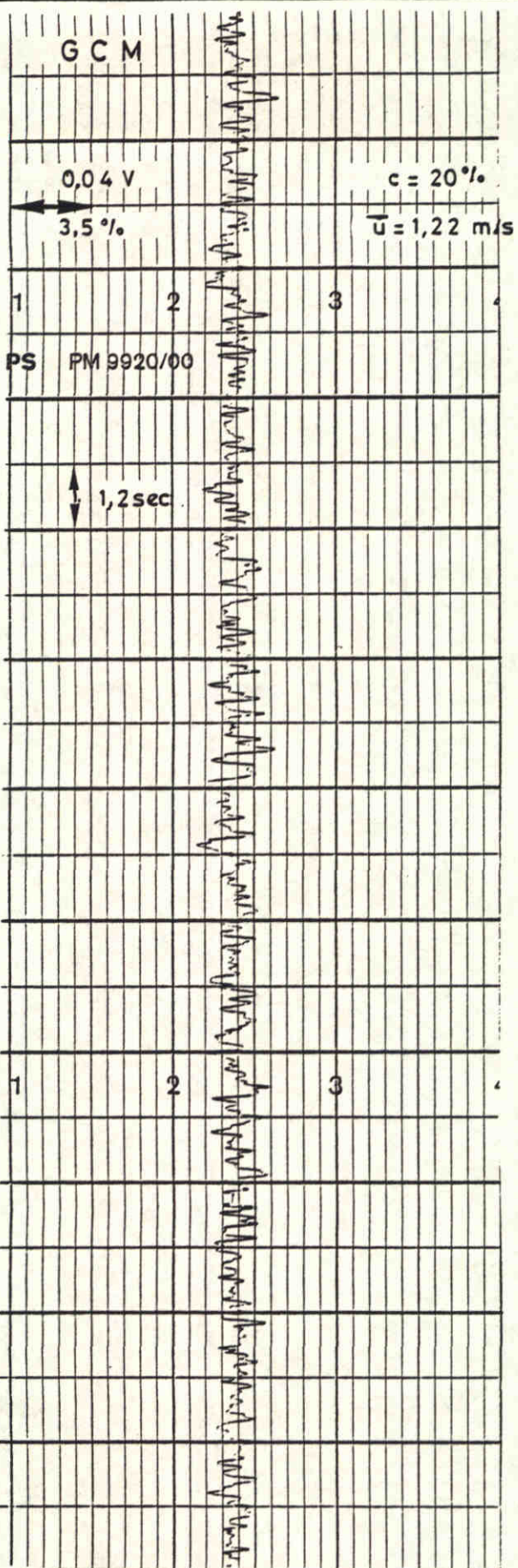


GELEIDINGSCONCENTRATIEMETER (GCM) EN
ELECTROMAGNETISCHE SNELHEIDSMETER (EMS)

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z46-02

FIG 7



SIMULTAAN SIGNAAL CONCENTRATIE METER (GCM)
EN SNELHEIDSMETER (EMS)

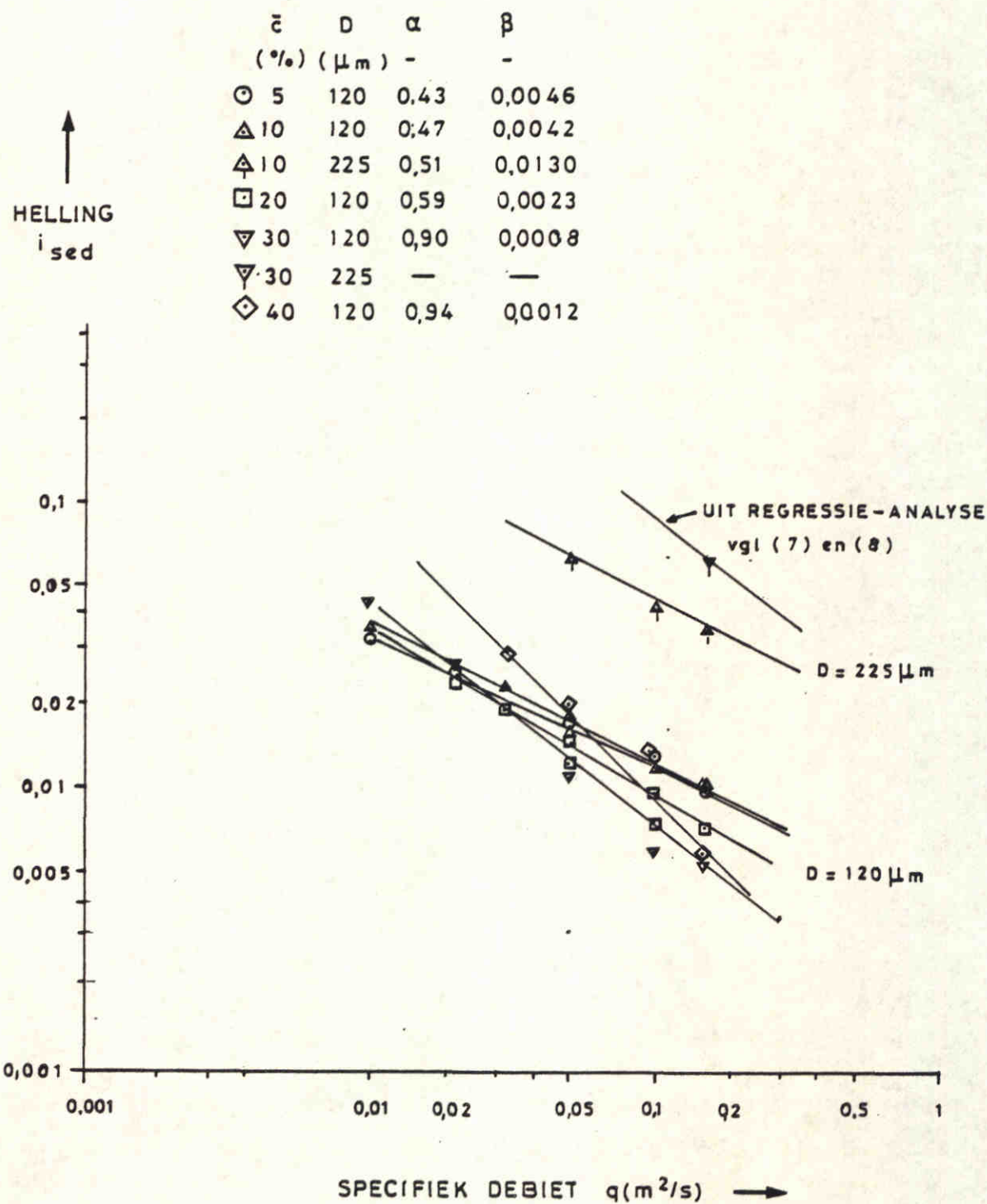
$D = 120 \mu\text{m}$

$q = 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$

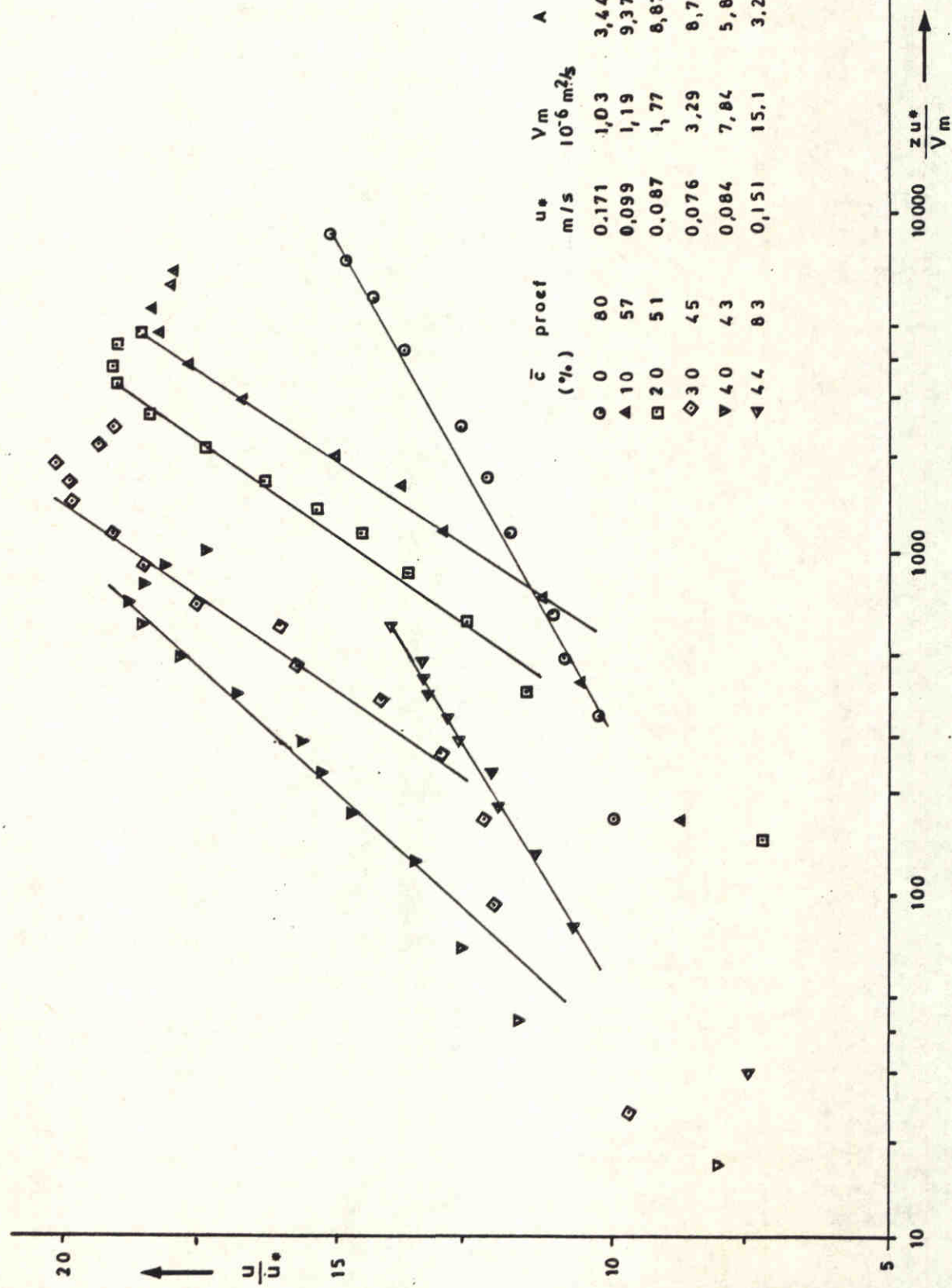
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 8



GEMETEN EVENWICHTSHELLINGEN $i_{sed} = \beta \left(\frac{q}{q_0} \right)^{-\alpha}$
met $q_0 = 1 m^2/s$



$\bar{c}$ proef (%)	u^* m/s	V_m $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	A	B
0	0.171	1.03	3.44	1.43
10	0.099	1.19	9.37	-15.8
20	0.087	1.77	8.87	-12.1
30	0.076	3.29	8.71	-7.77
40	0.084	7.84	5.88	1.71
44.4	0.151	15.1	3.27	4.63

GEMETEN SNELHEIDSVERDELINGEN

$$\frac{u}{u^*} = A \log \frac{zu^*}{Vm} + B$$

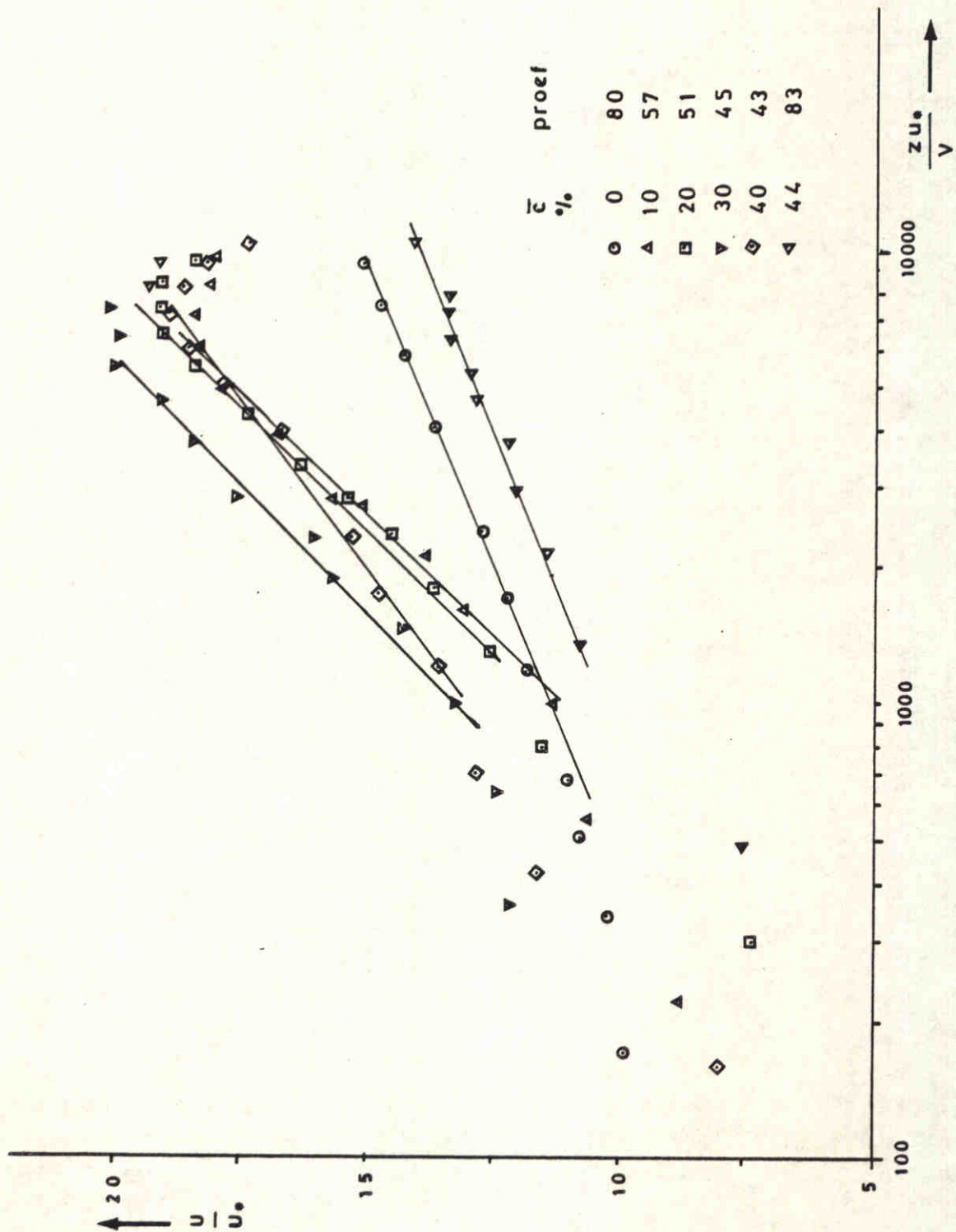
$q = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 120 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 10



GEMETEN SNELHEIDSVERDELING, UITGEZET MET
 VISKOSITEIT WATER i.p.v. MENGSEL

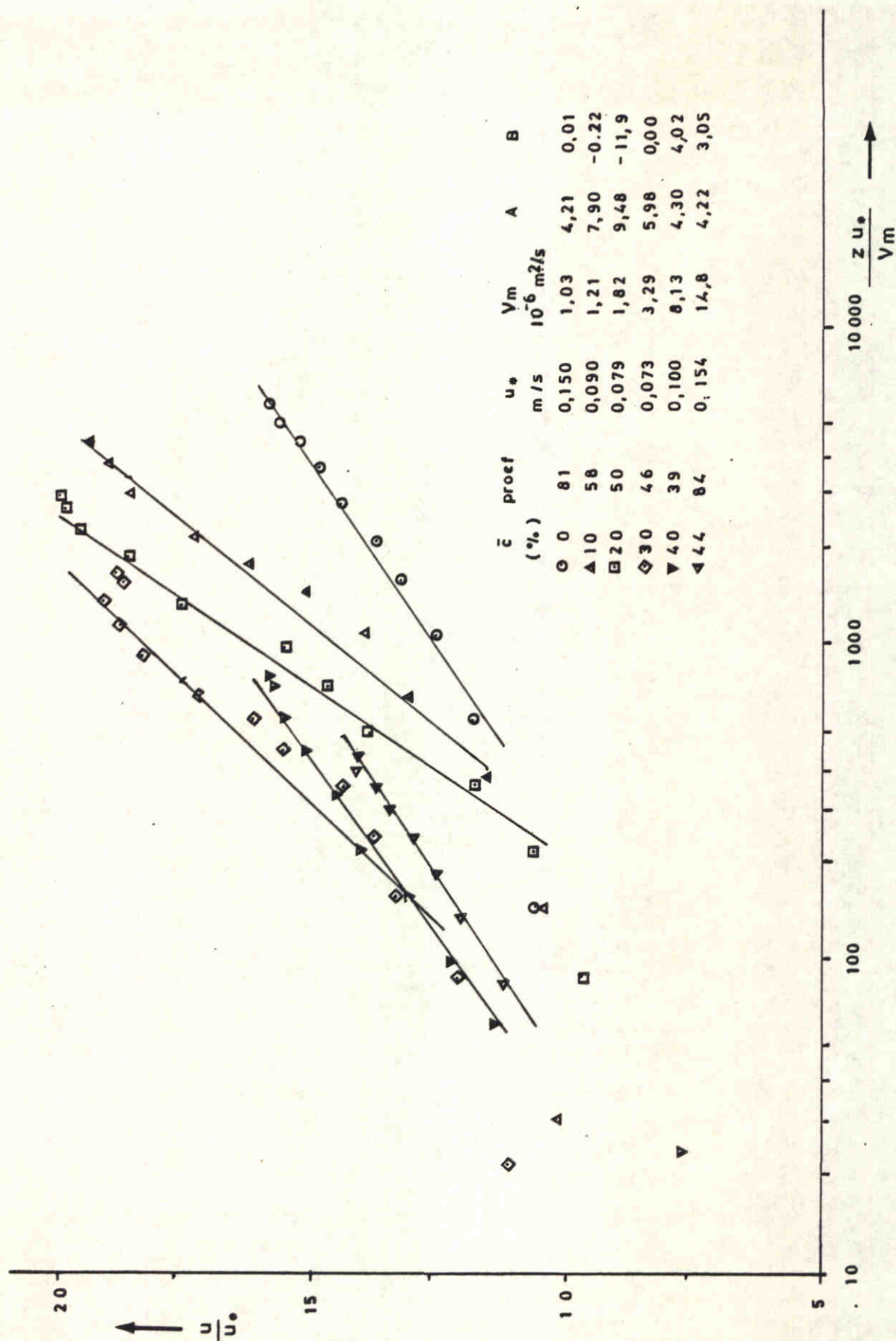
$q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 120 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 10 b



$\bar{\epsilon}$ proef (%)	u_* m/s	V_m 10^{-6} m ² /s	A	B
0 0	0,150	1,03	4,21	0,01
10 58	0,090	1,21	7,90	-0,22
20 50	0,079	1,82	9,48	-11,9
30 46	0,073	3,29	5,98	0,00
40 39	0,100	8,13	4,30	4,02
44 84	0,154	14,8	4,22	3,05

GEMETEN SNELHEIDSVERDELINGEN

$$\frac{u}{u_*} = A \log \frac{z u_*}{v_m} + B$$

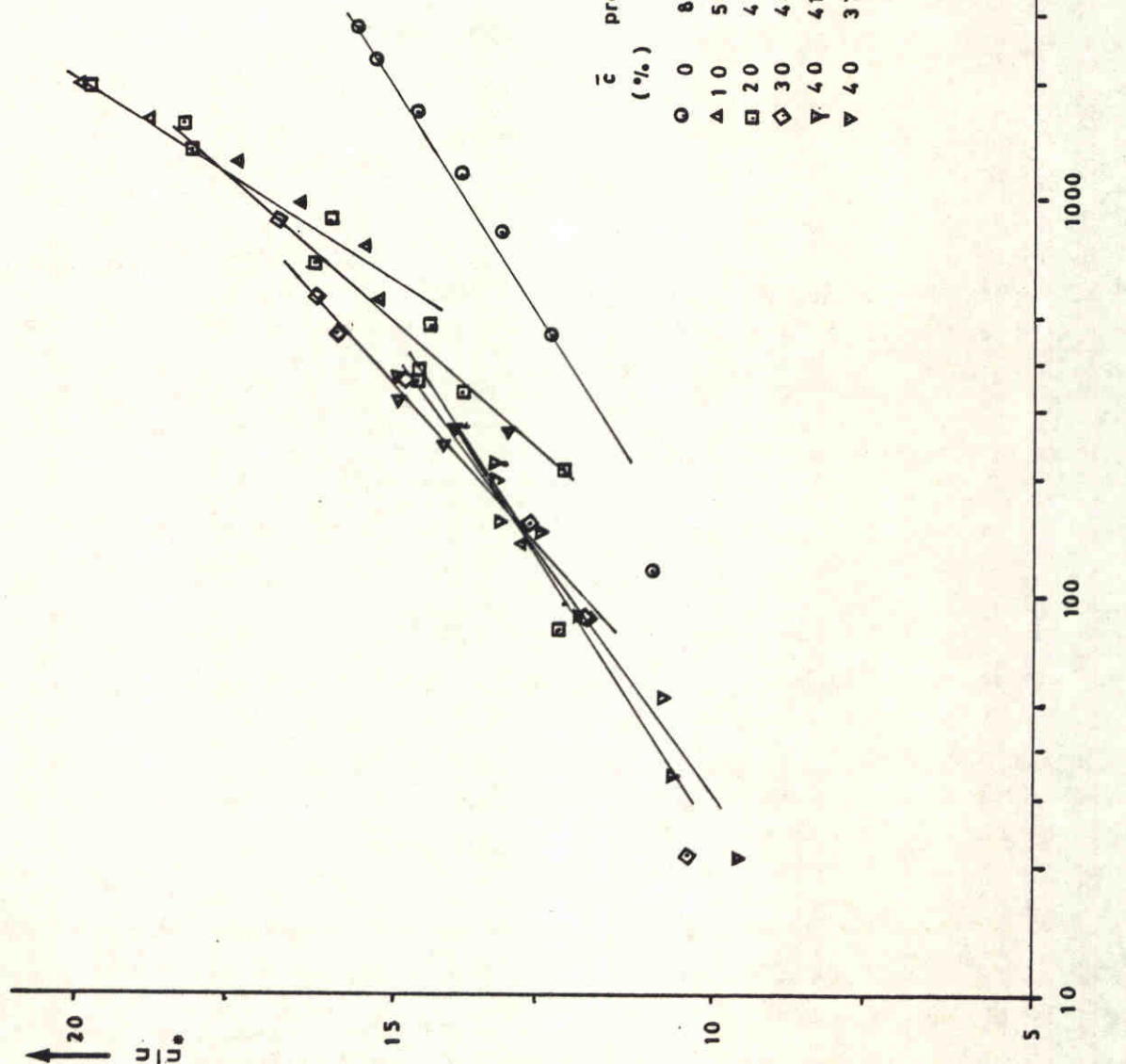
$q = 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 120 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46 - 02

FIG 11



$\bar{c}$ (%)	proef	u^* m/s	V_m $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	A	B
0	82	0,119	1,03	4,06	1,61
10	56	0,081	1,18	7,02	-3,91
20	49	0,074	1,82	6,89	-3,66
30	44	0,072	3,33	5,12	1,96
40	41	0,092	7,84	3,83	4,73
40	37	0,093	8,43	4,57	3,15

GEMETEN SNELHEIDSVERDELINGEN

$$\frac{u}{u^*} = A \log \frac{z u^*}{V_m} + B$$

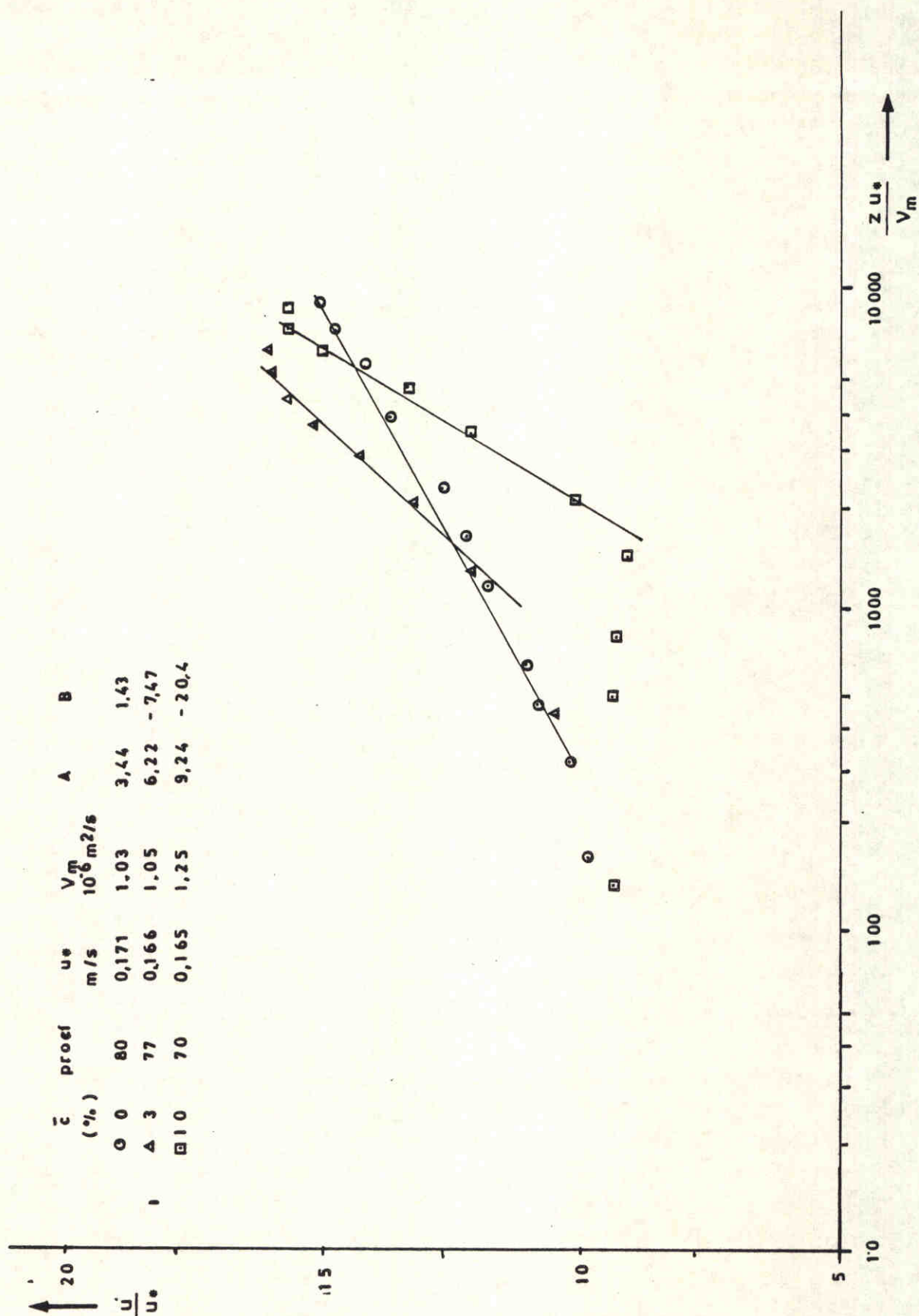
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 120 \mu\text{m}$

Z 46-02

FIG 12



GEMETEN SNELHEIDSVERDELINGEN

$$\frac{u}{u^*} = A \log \frac{z u^*}{V_m} + B$$

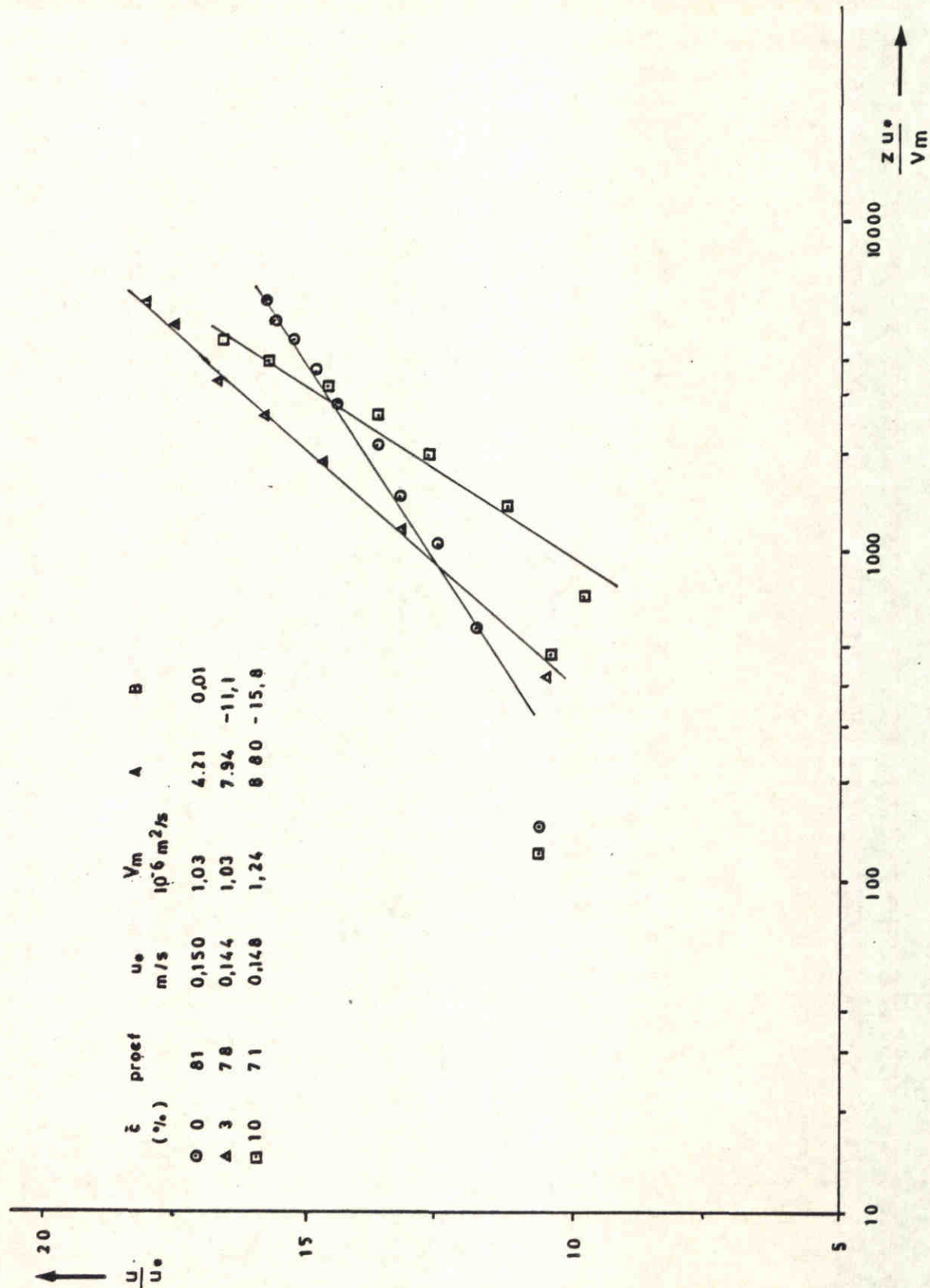
$q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 225 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z46-02

FIG 13



GEMETEN SNELHEIDSVERDELINGEN

$$\frac{u}{u_*} = A \log \frac{z u_*}{V_m} + B$$

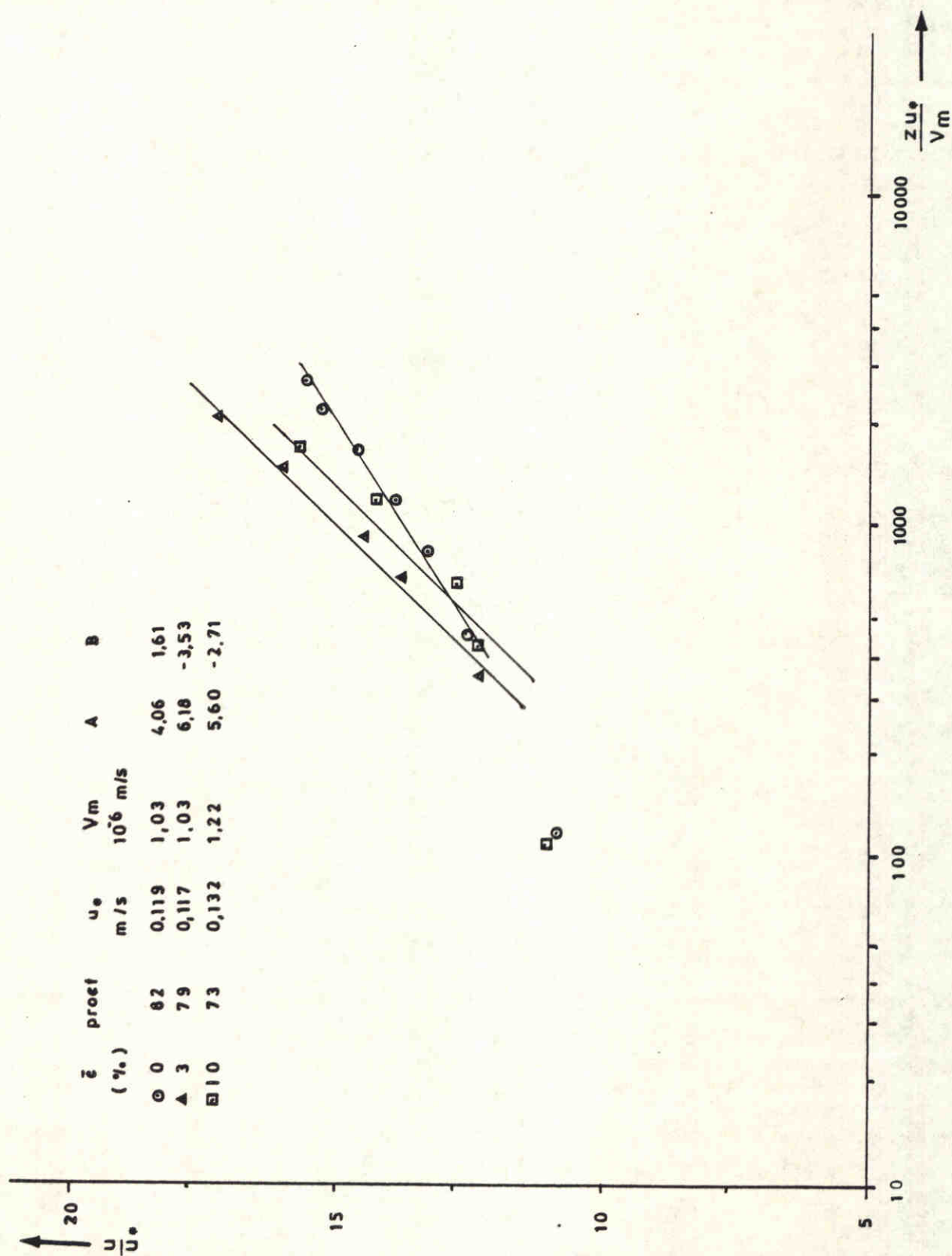
$q = 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 225 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 14



GEMETEN SNELHEIDSVERDELINGEN

$$\frac{u}{u_*} = A \log \frac{z u_*}{V_m} + B$$

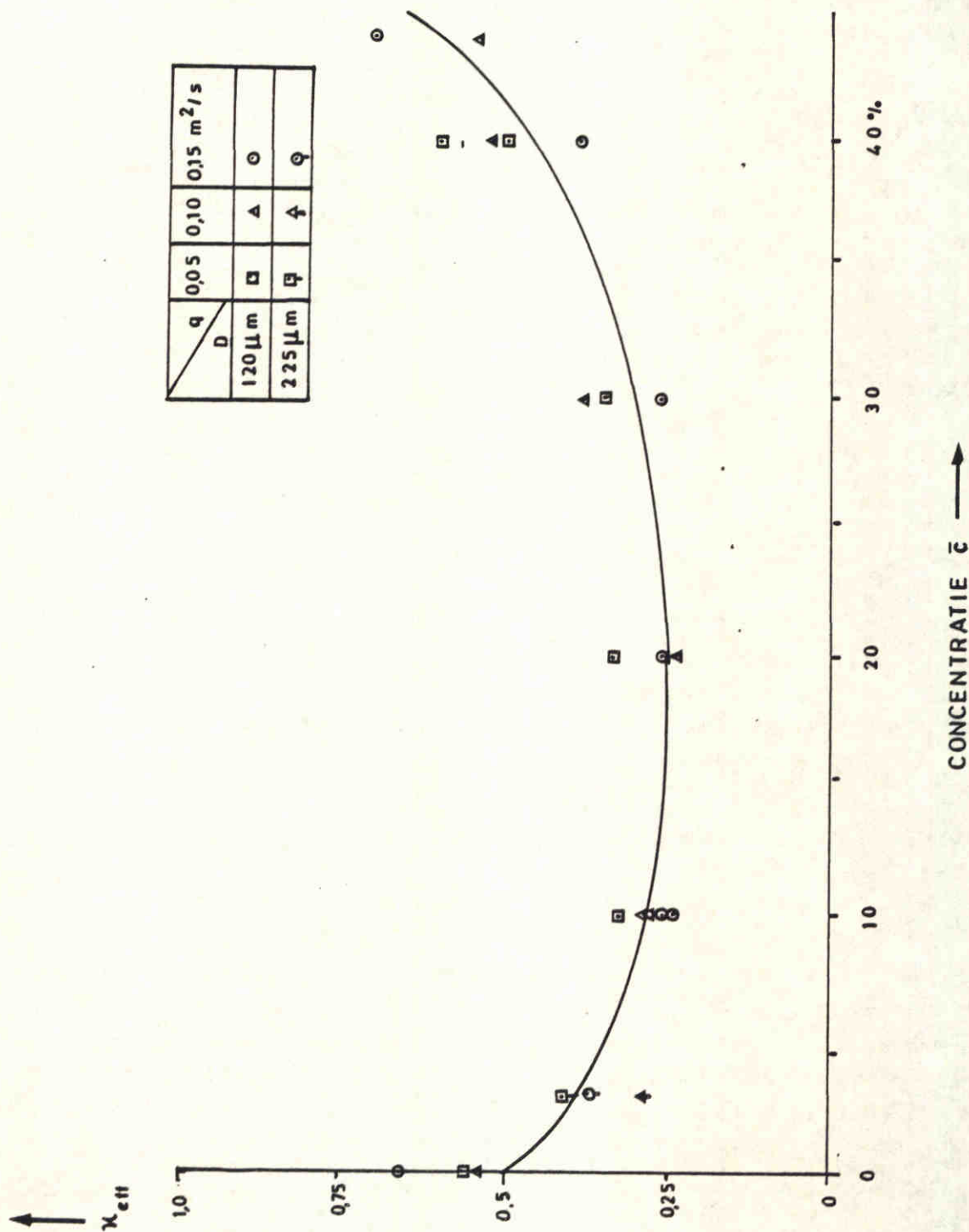
$q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 225 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46 - 02

FIG 15

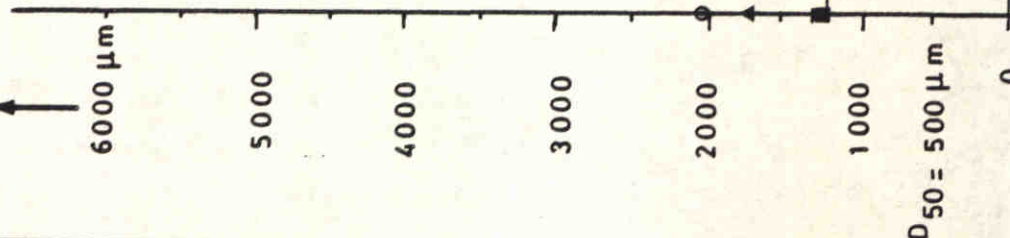


GEMETEN EFFECTIEVE CONSTATE VAN VON KÁRMÁN κ_{eff} ALS FUNCTIE VAN DE MENGSELCONCENTRATIE $\bar{c}$

D \ Q	0.15	0.10	0.05 m ² /s
120 μm	○	△	□
220 μm	○	↑	▣

BODEMRUWHEID

k

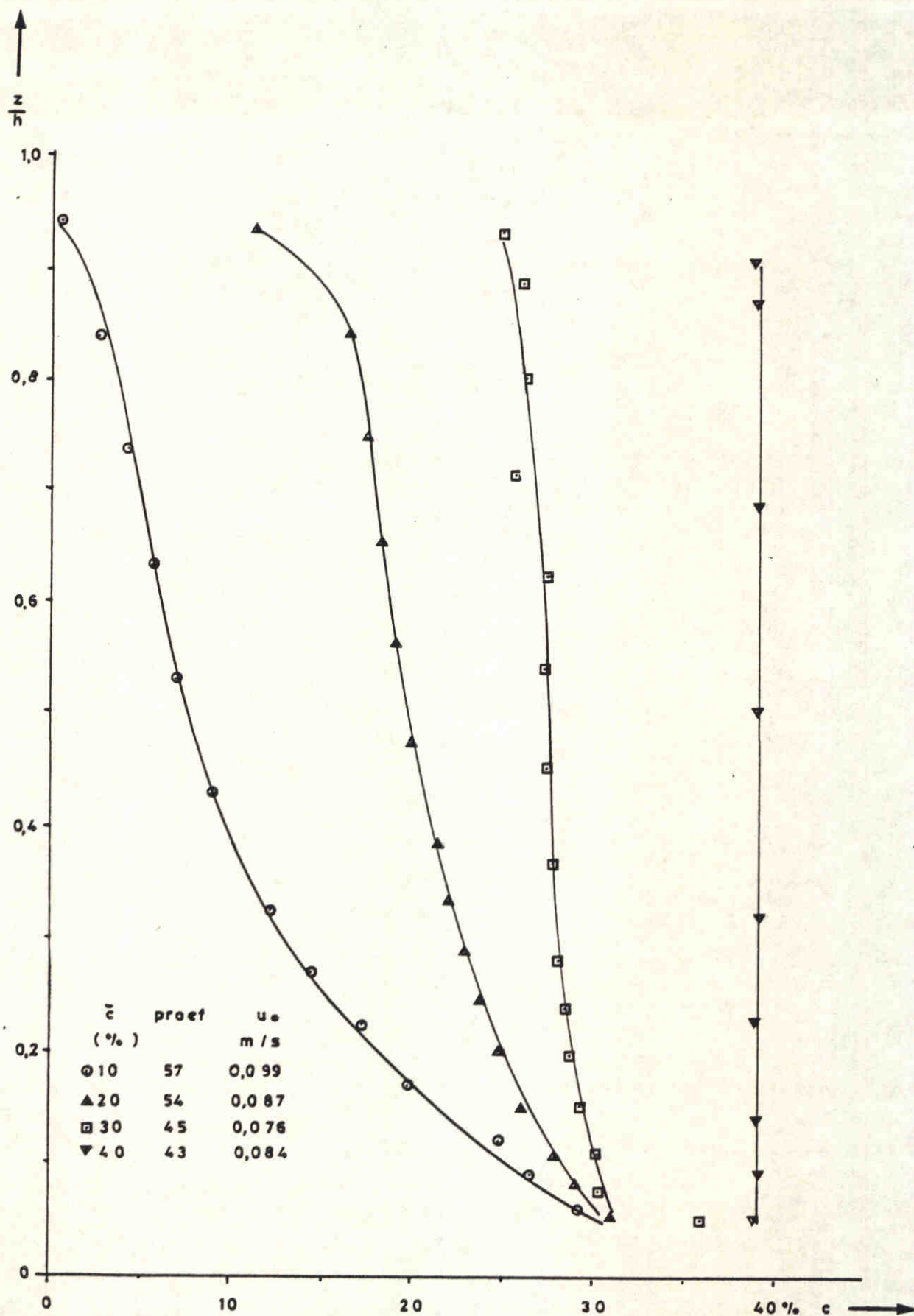


GEMETEN EFFECTIEVE BODEMRUWHEID k ALS FUNCTIE
VAN DE MENGSELCONCENTRATIE $\bar{c}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 16 b



GEMETEN CONCENTRATIEVERDELINGEN

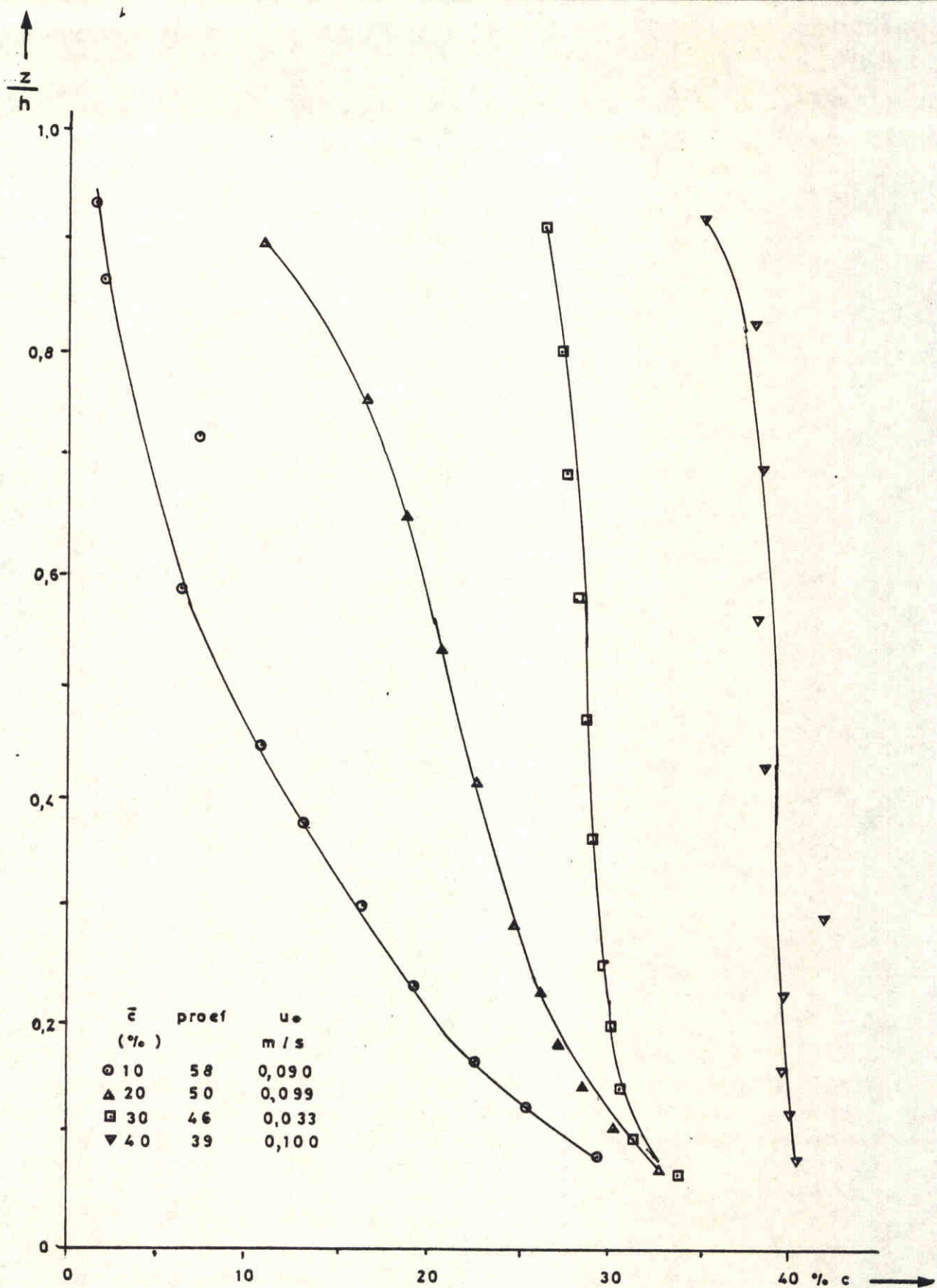
$q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 120 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 17



GEMETEN CONCENTRATIEVERDELINGEN

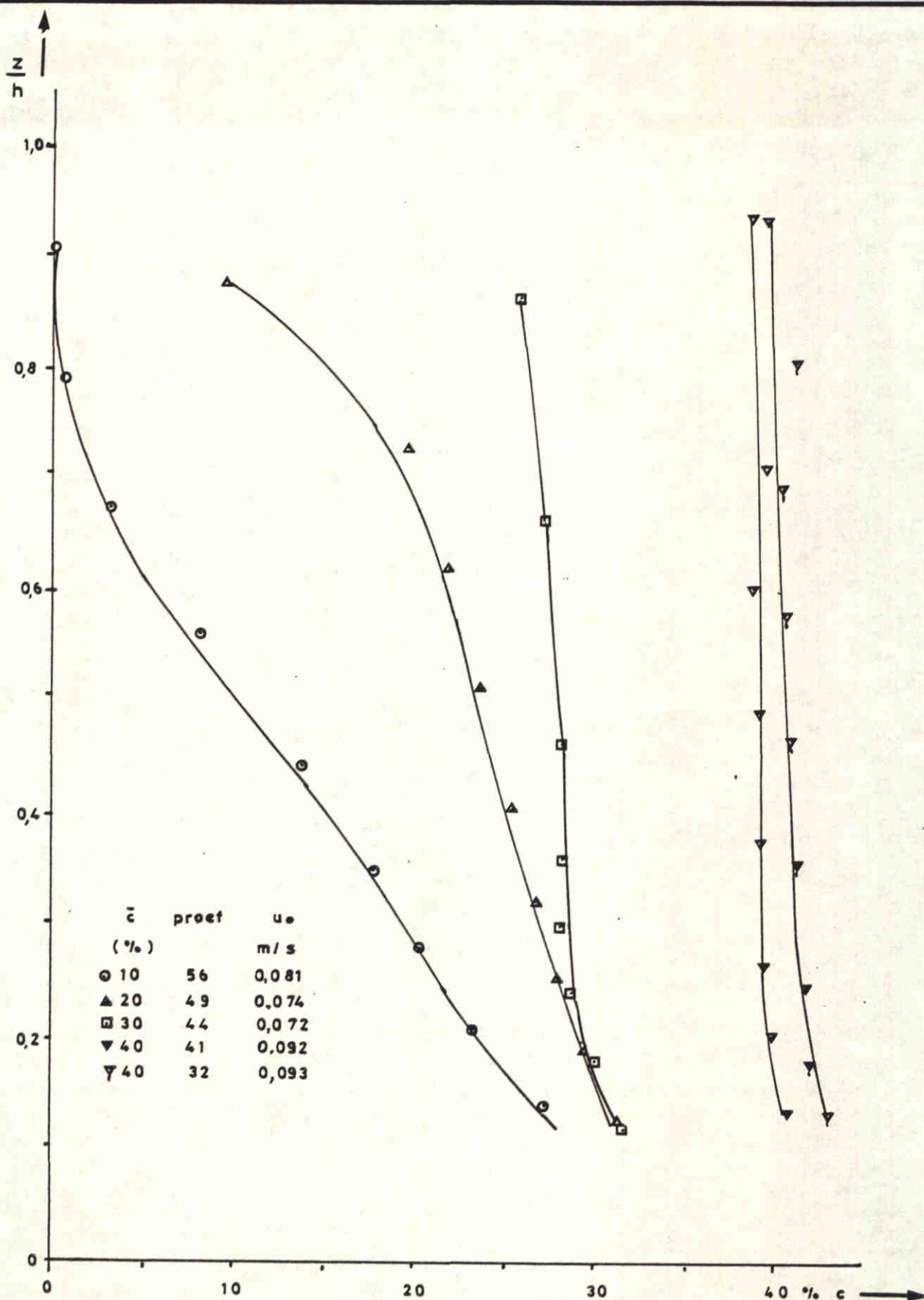
$q = 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 120 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46 - 02

FIG 18



GEMETEN CONCENTRATIEVERDELINGEN

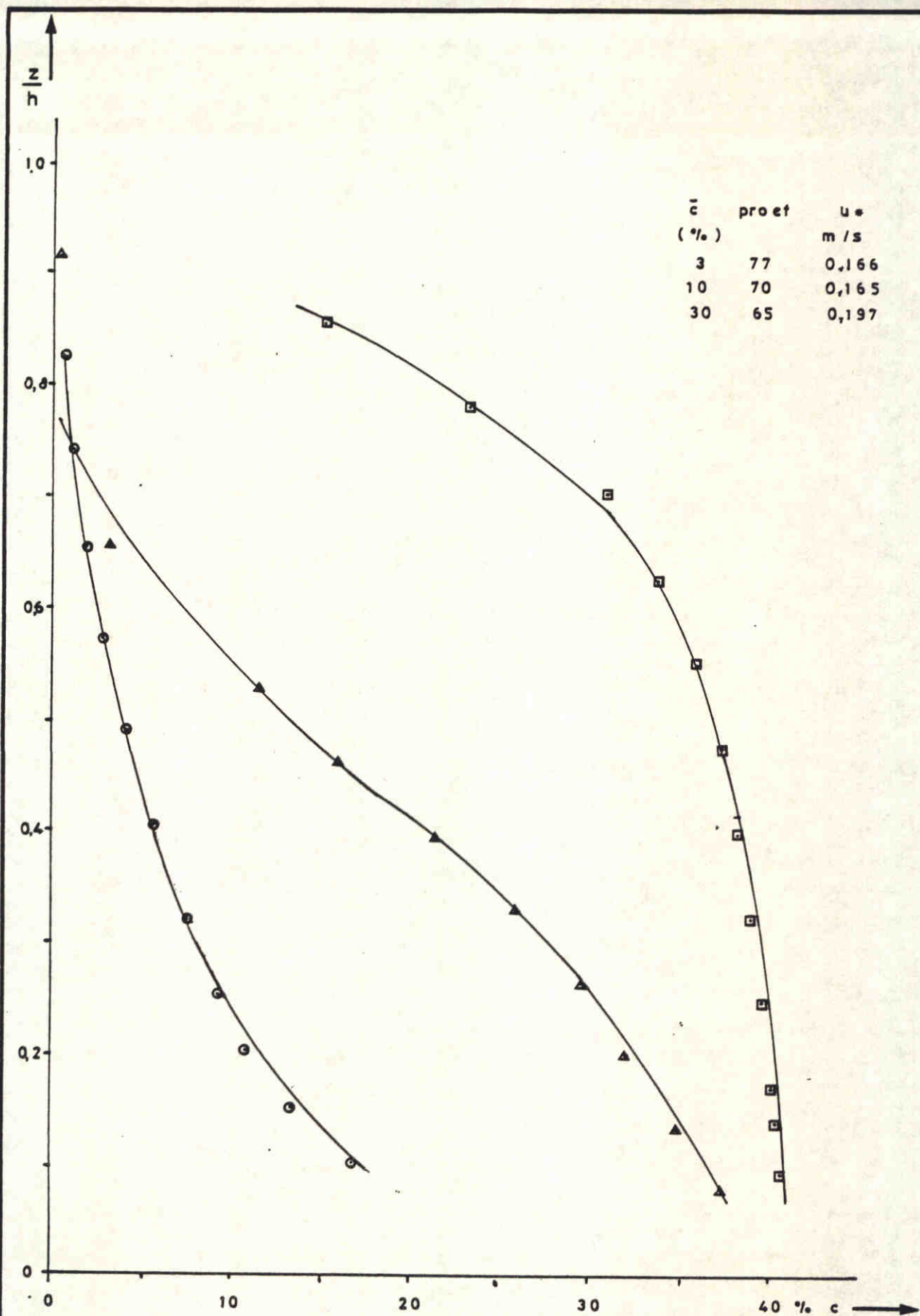
$q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 120 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG19



GEMETEN CONCENTRATIEVERDELINGEN

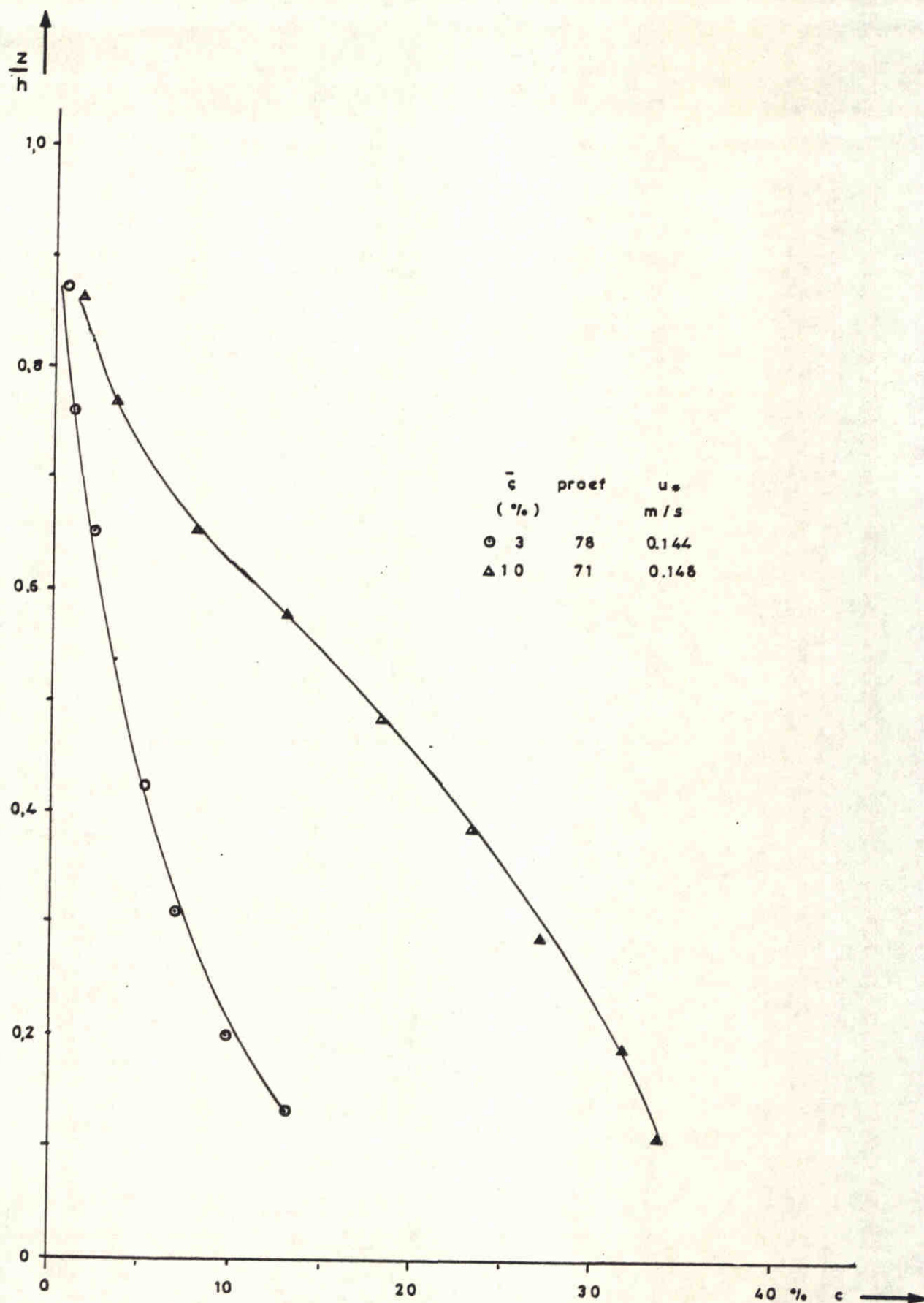
$q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 225 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 20



GEMETEN CONCENTRATIEVERDELINGEN

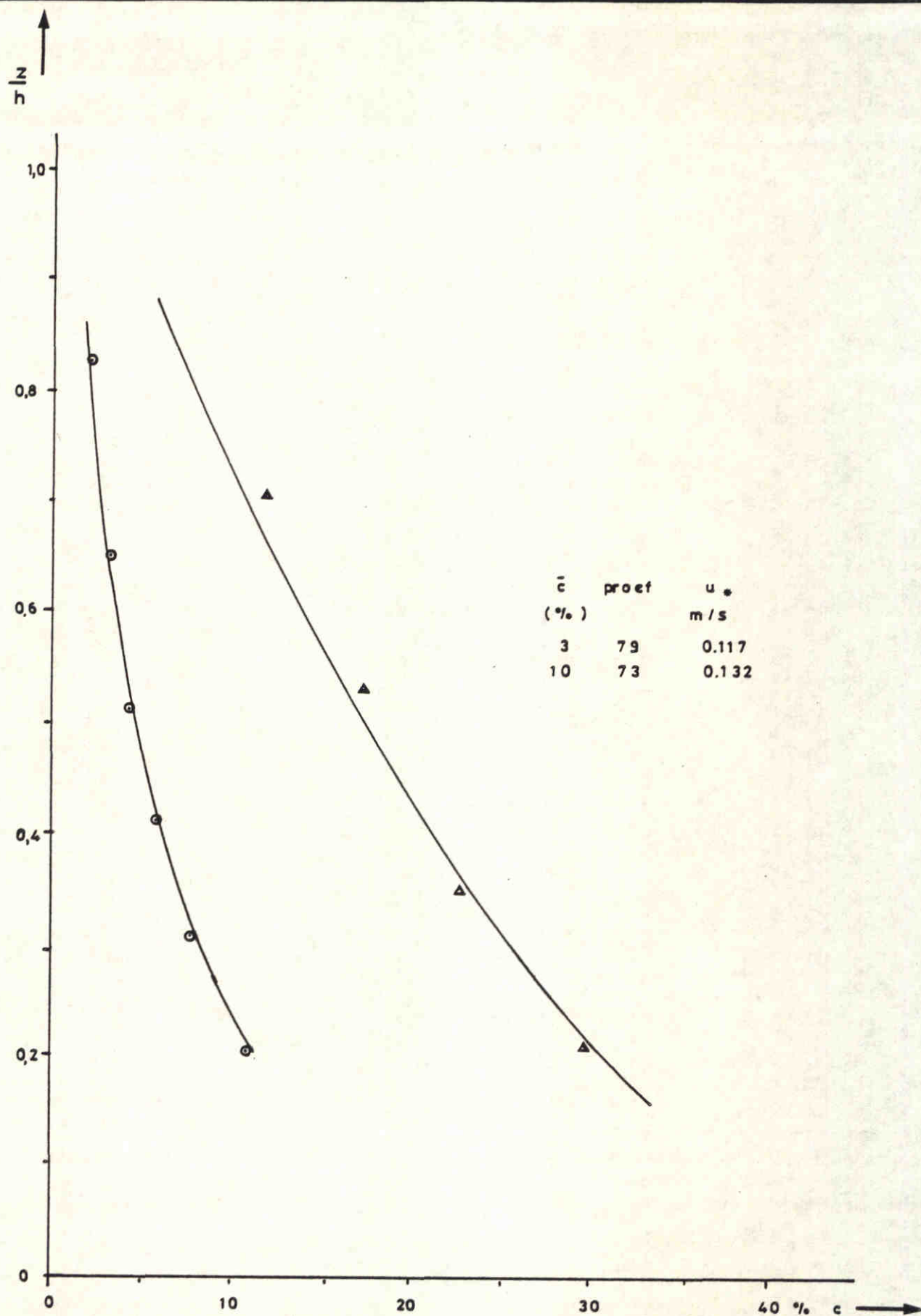
$q = 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$

$D = 225 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 21



GEMETEN CONCENTRATIEVERDELINGEN

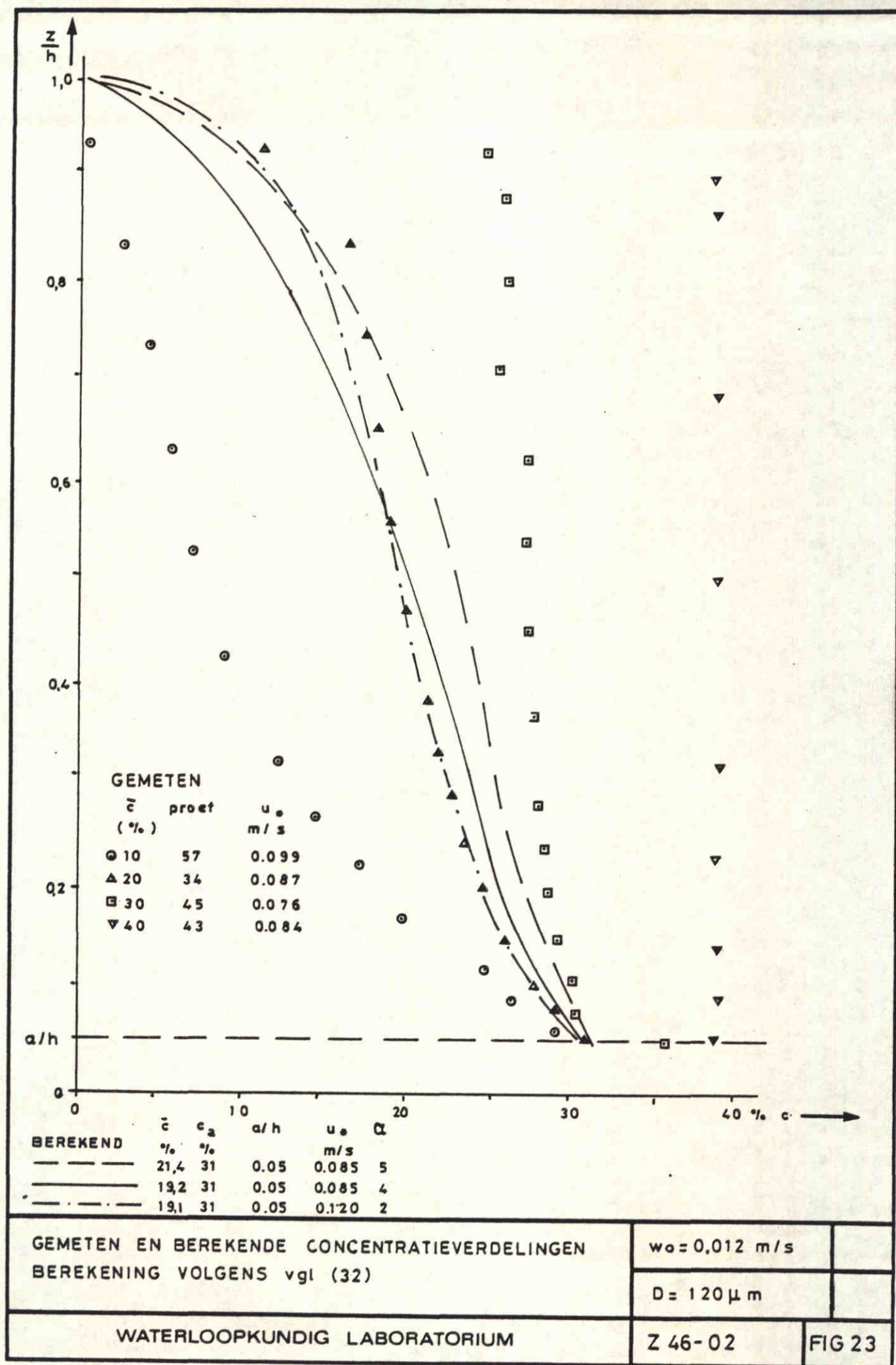
$q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$

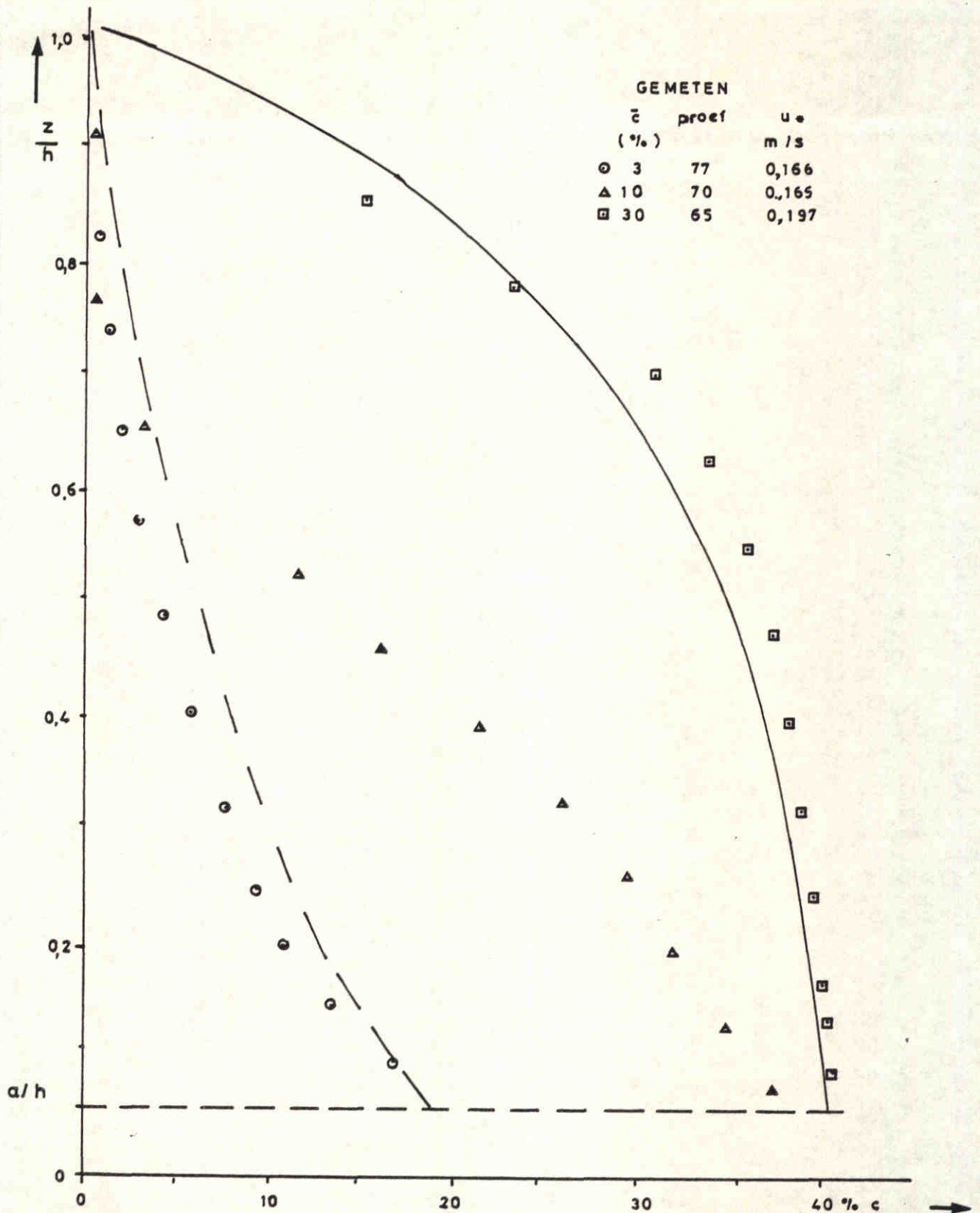
$D = 225 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 22





GEMETEN EN BEREKENDE CONCENTRATIE VERDELINGEN
BEREKENING VOLGENS vgl (32)

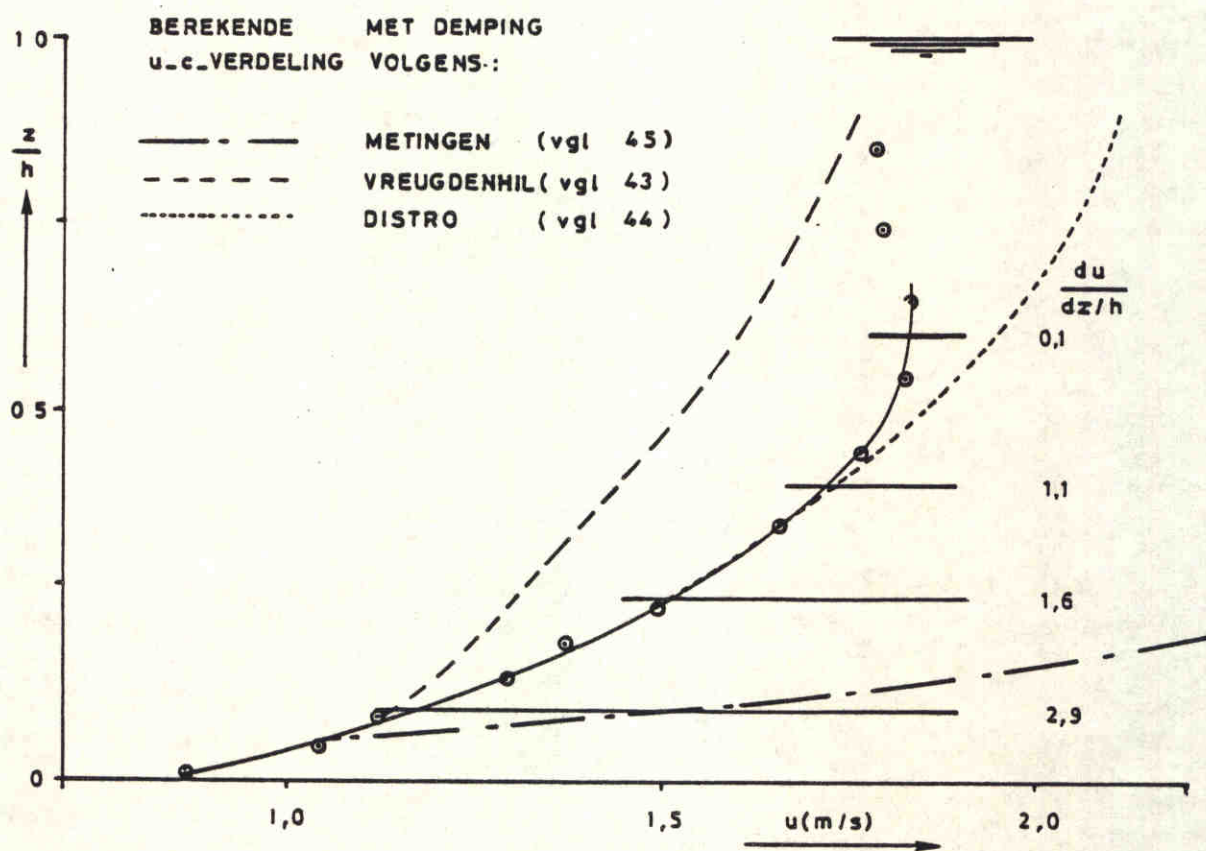
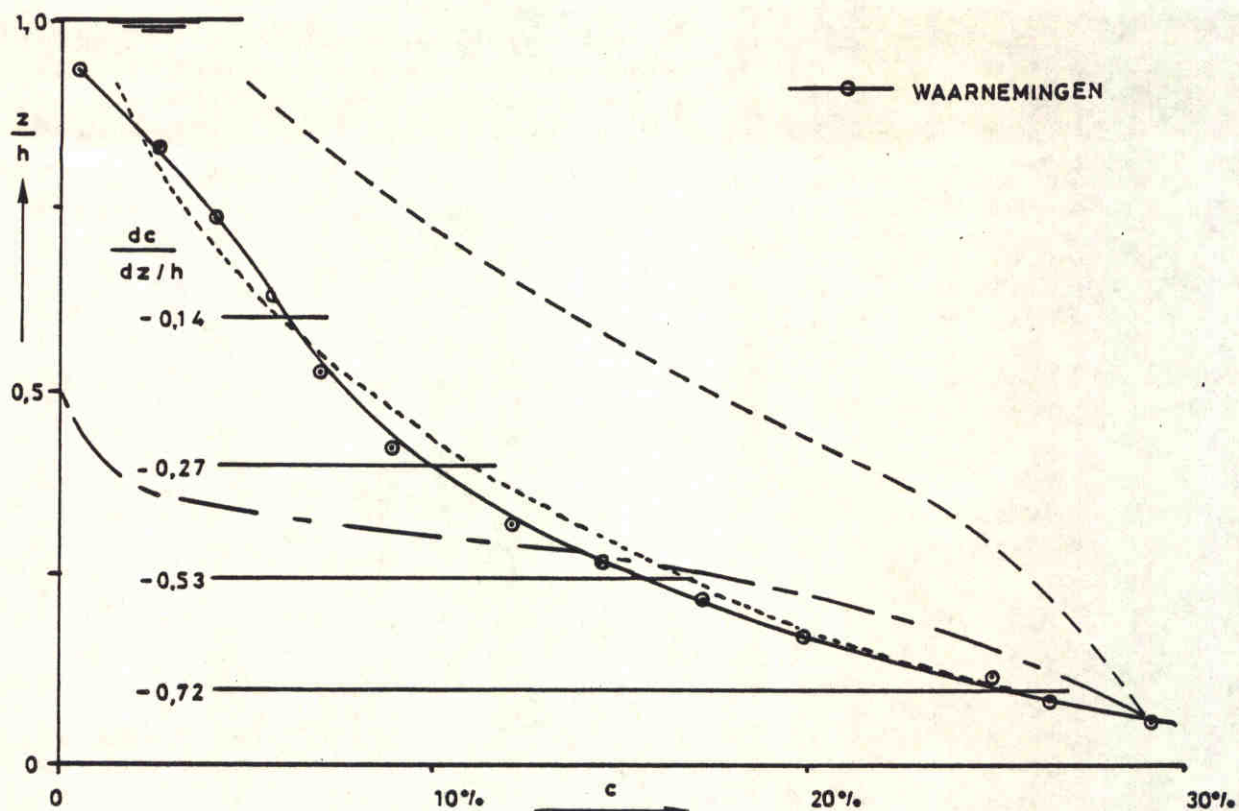
$w_0 = 0,033 \text{ m/s}$

$D = 225 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 24



GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDS-EN CONCENTRATIE - VERDELING

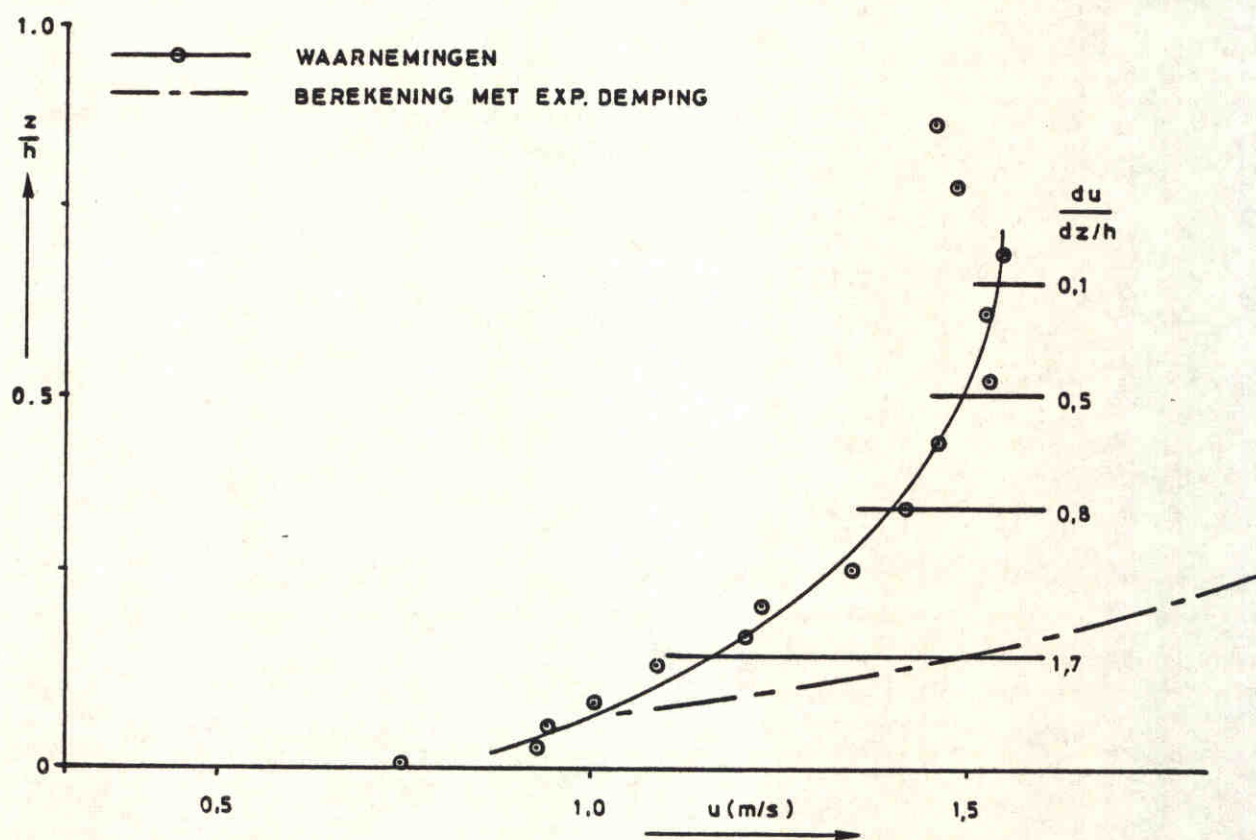
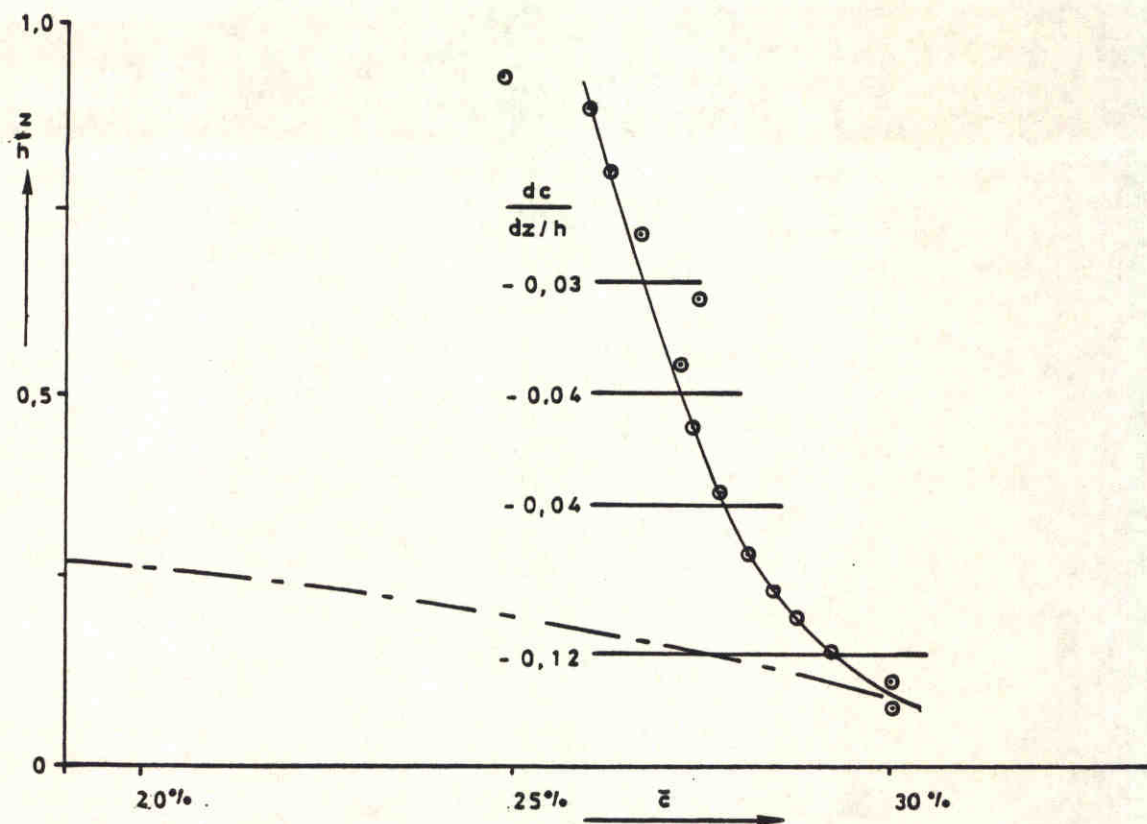
PROEF 57

$q = 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$, $\bar{c} = 11\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 25



GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDS - EN CONCENTRATIE - VERDELING

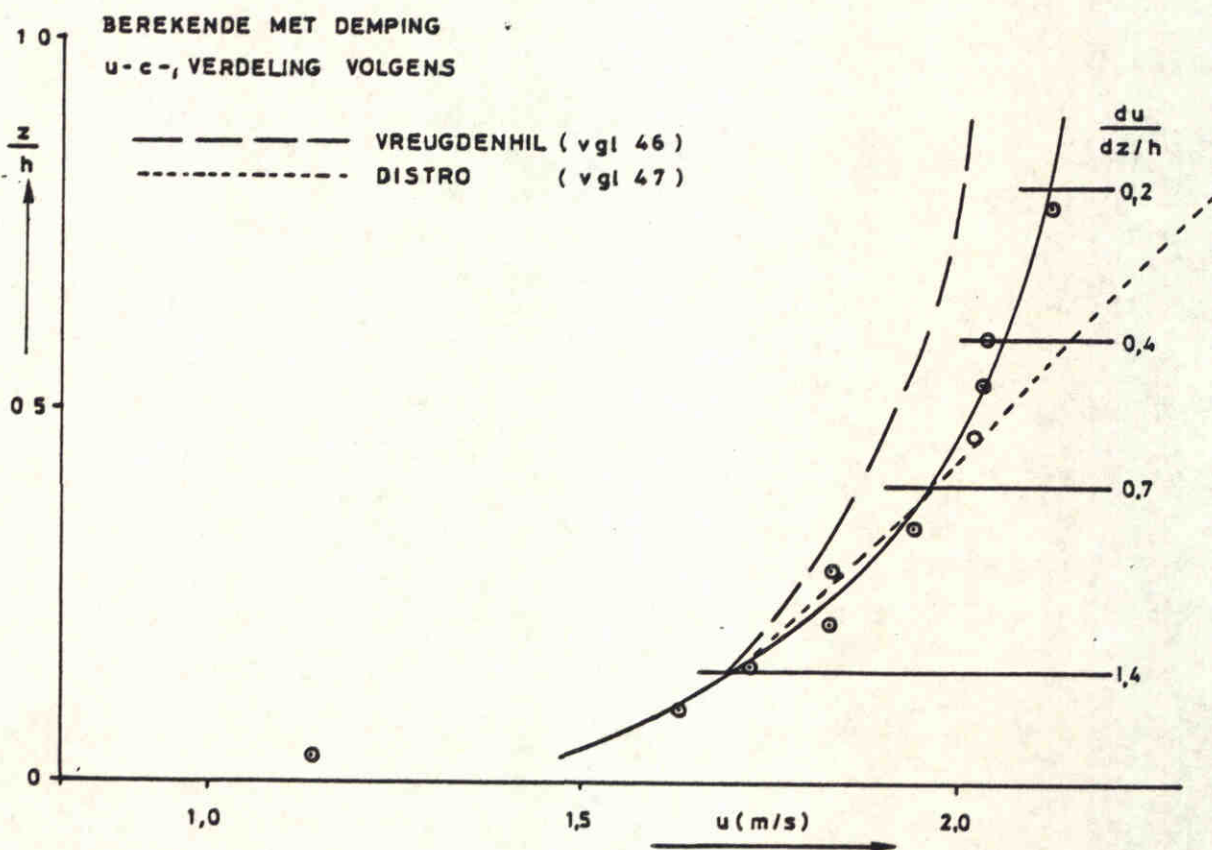
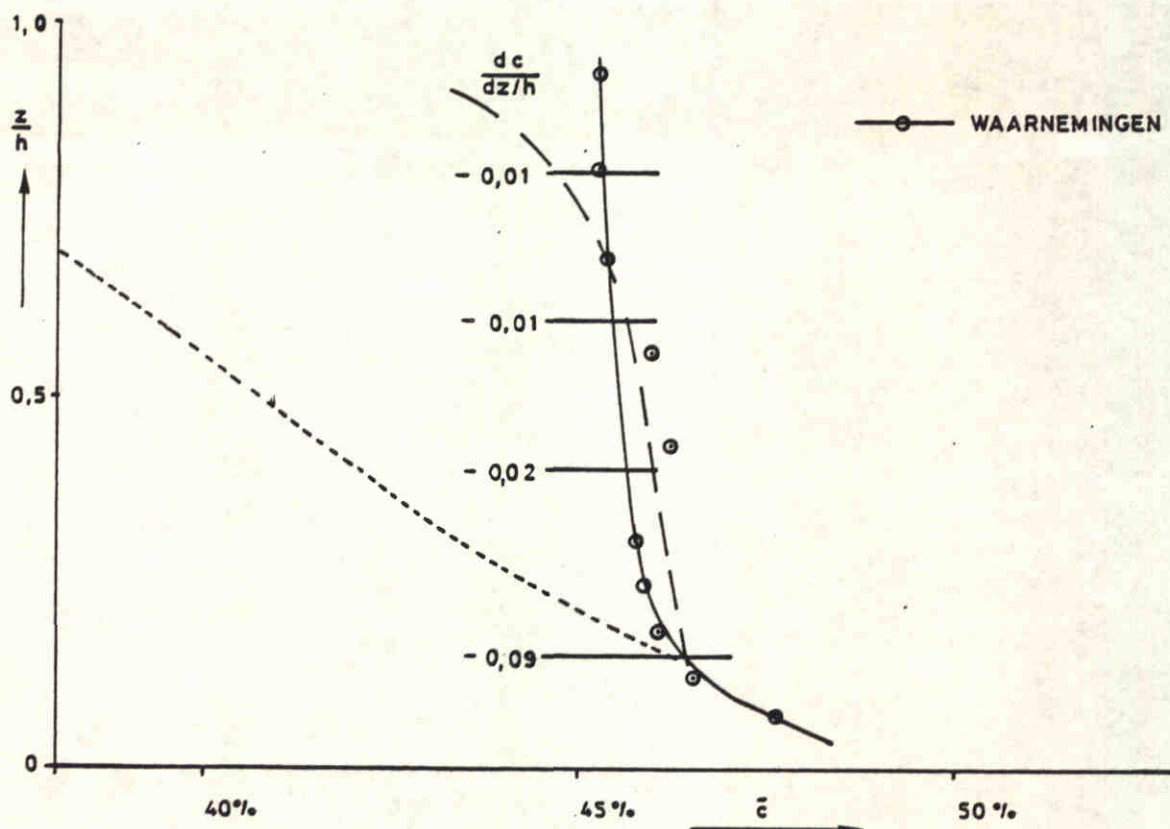
PROEF 45

$q=0,15 \text{ m}^2/\text{s}, \bar{c}=32\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 26



GEMETEN EN BEREKENDE SNELHEIDS-EN CONCENTRATIE -
VERDELING

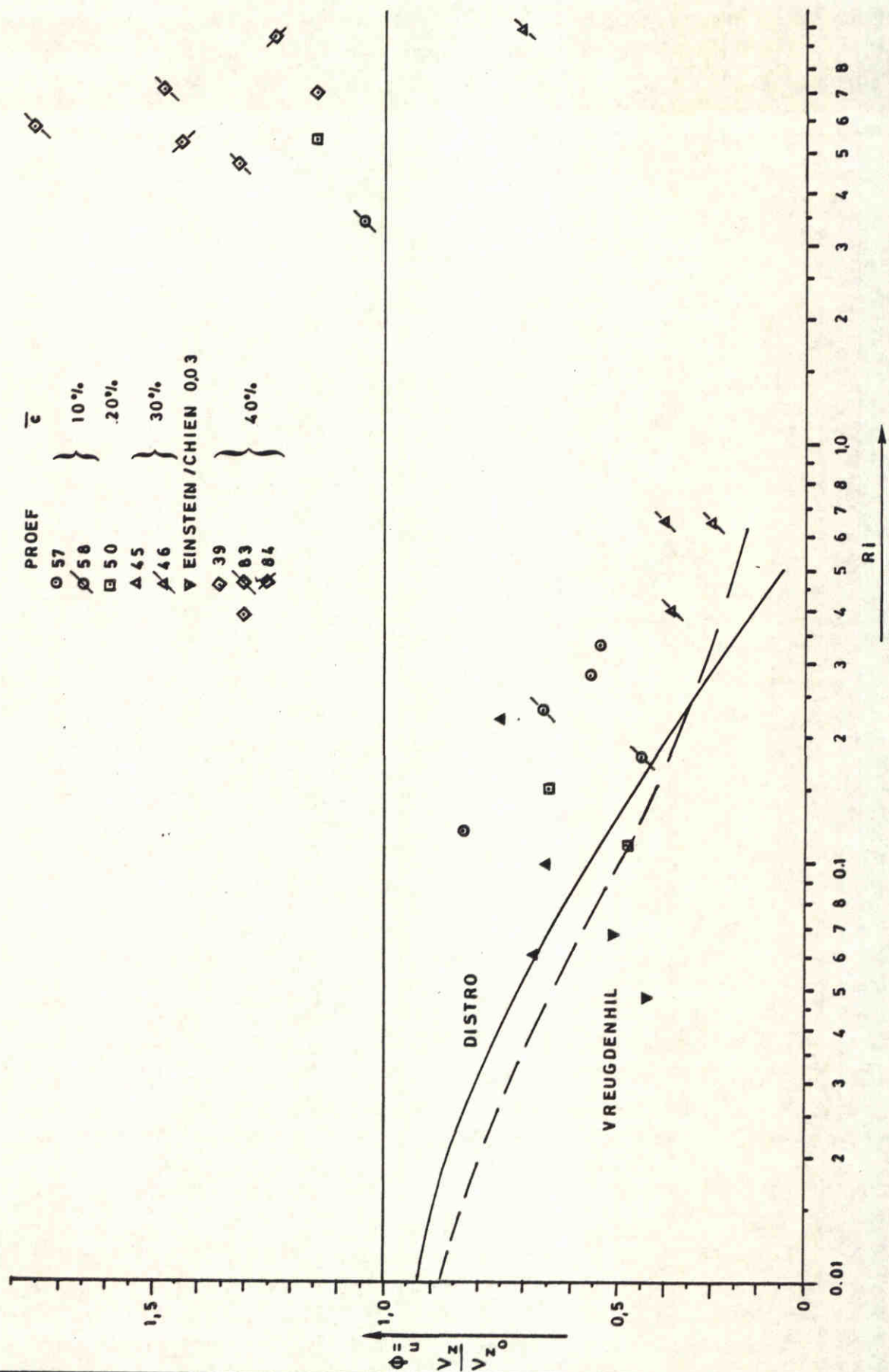
PROEF 83

$q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ $c = 4,4 \%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 27



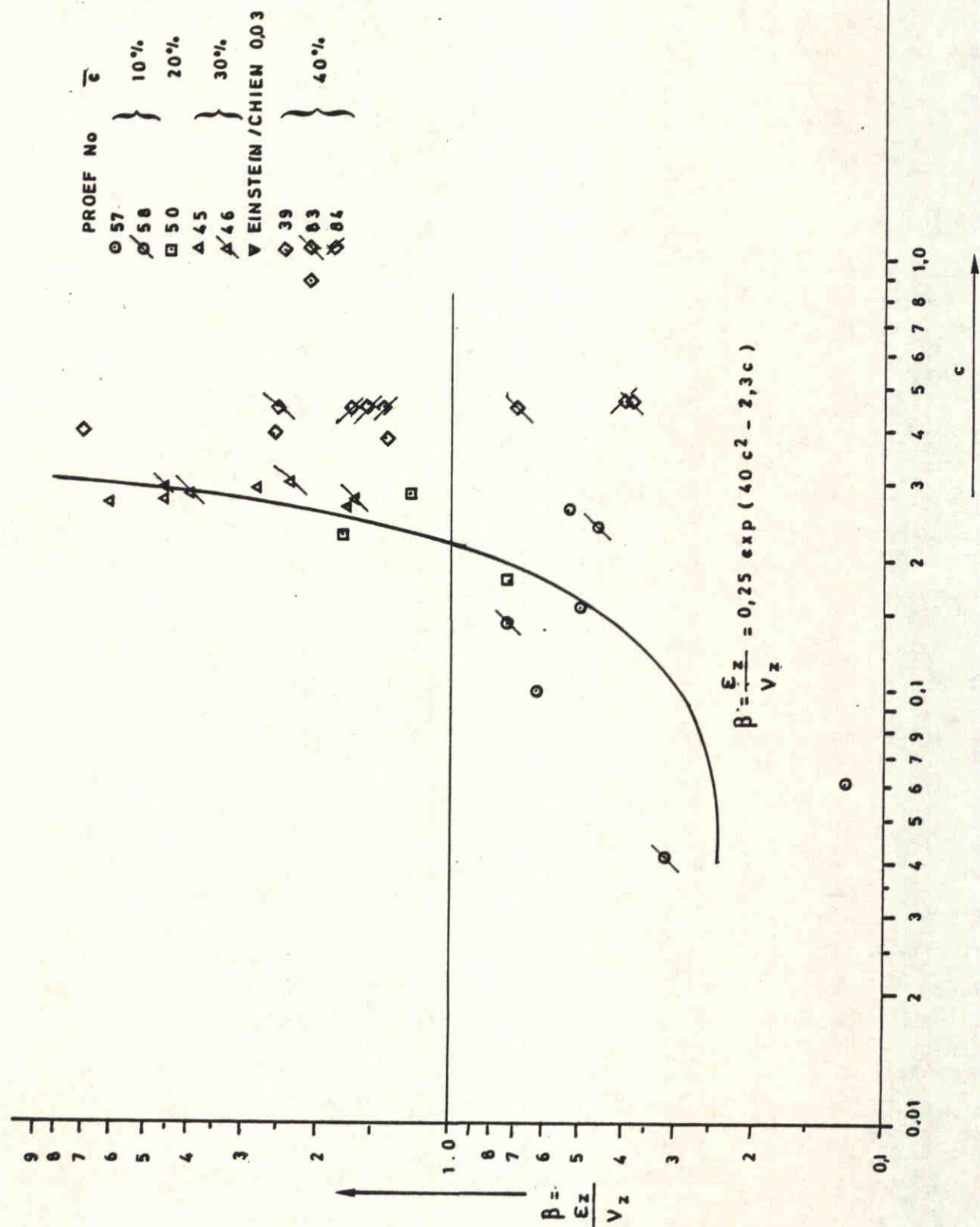
DAMPING VERTIKALE TURBULENTE UITWISSELING
VAN IMPULS

$$Ri = - \frac{g}{\rho} \frac{dp/dz}{(du/dz)^2}$$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 28



VERHOUDING VERTIKALE TURBULENTE UITWISSELING VAN
ZANDKORRELS EN IMPULS

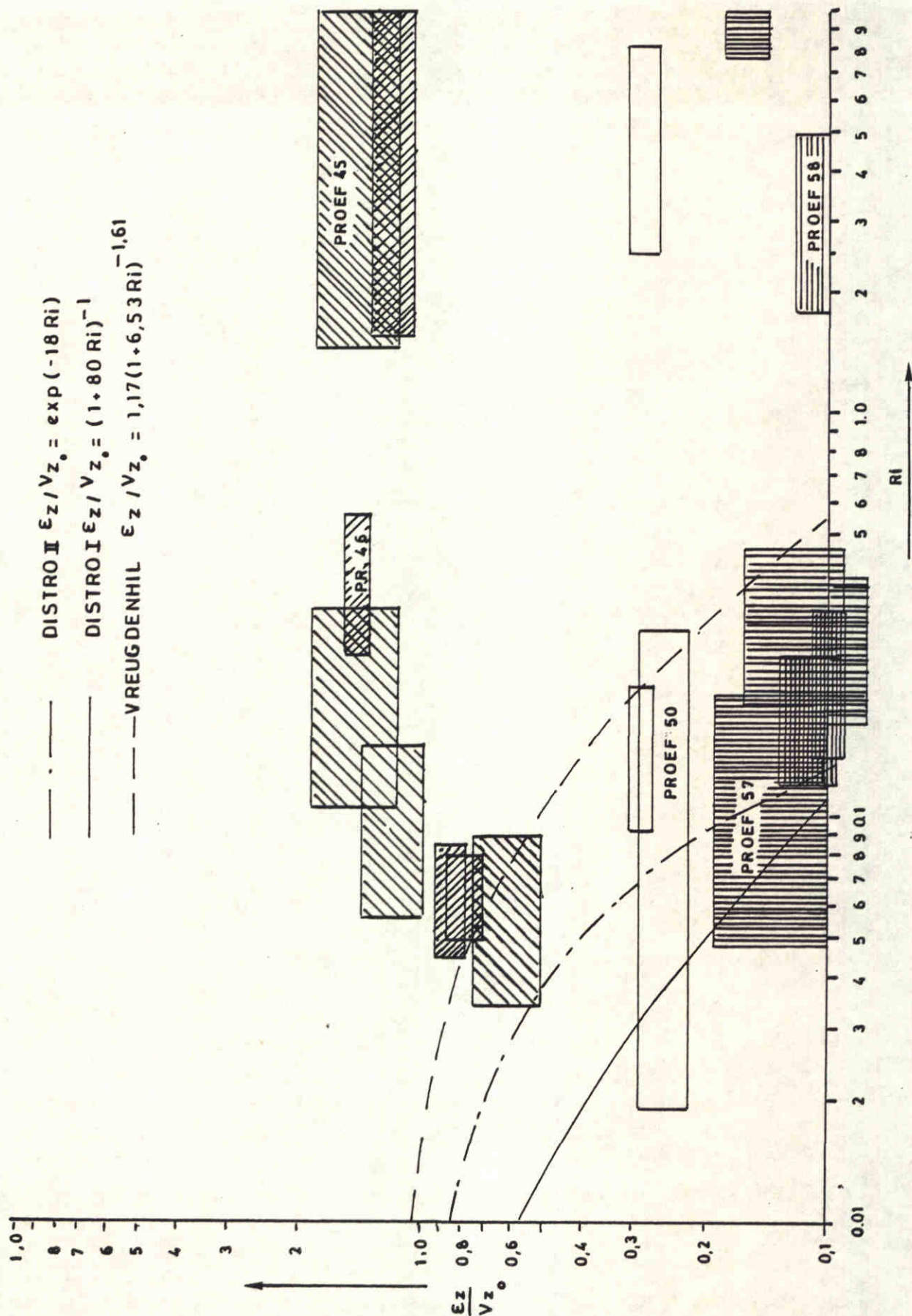
$$Ri = - \frac{g}{\rho} \frac{dp/dz}{(du/dz)^2}$$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 29

- DISTRO II $\epsilon_z / v_{z_0} = \exp(-18 Ri)$
- DISTRO I $\epsilon_z / v_{z_0} = (1 + 80 Ri)^{-1}$
- VREUGDENHIL $\epsilon_z / v_{z_0} = 1,17(1 + 6,53 Ri)^{-1,61}$



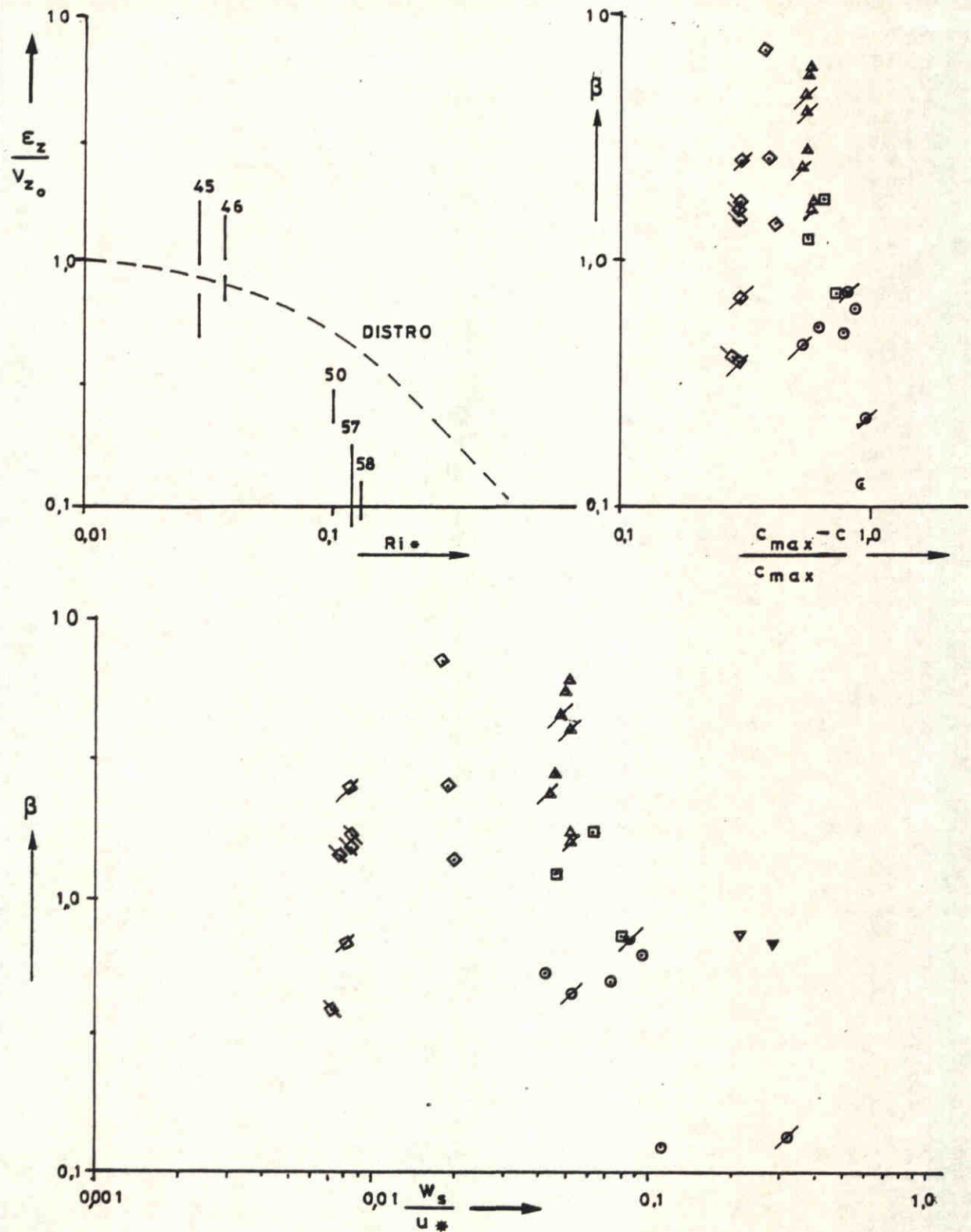
DEMPING VERTIKALE TURBULENTE UITWISSELING
VAN ZANDKORRELS

$$Ri = - \frac{g}{\rho} \frac{dp/dz}{(du/dz)^2}$$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 30



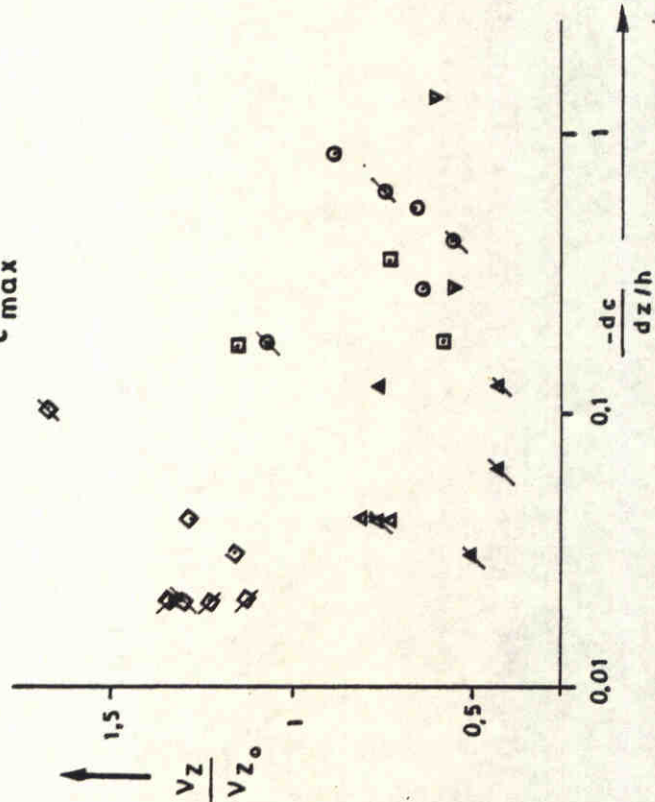
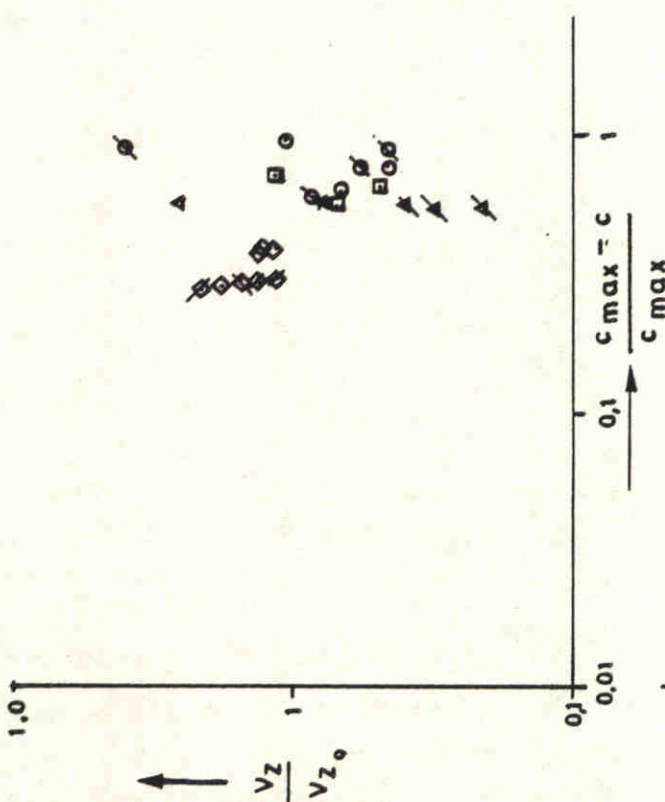
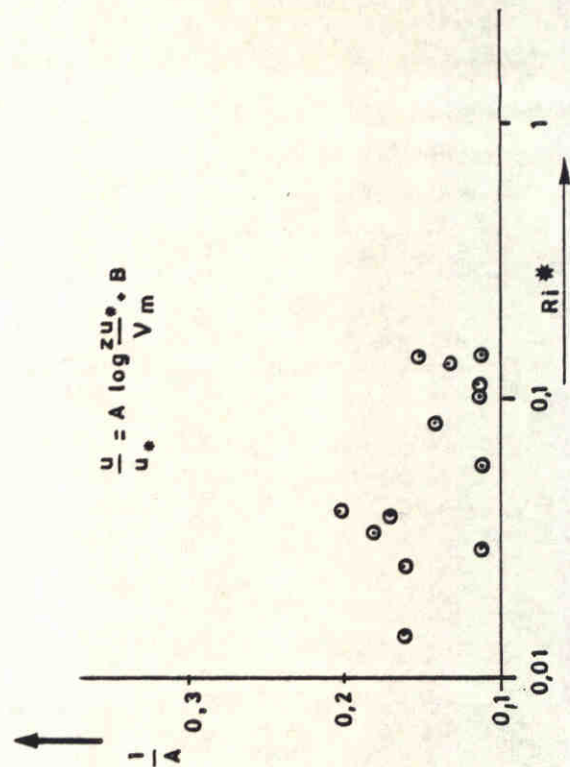
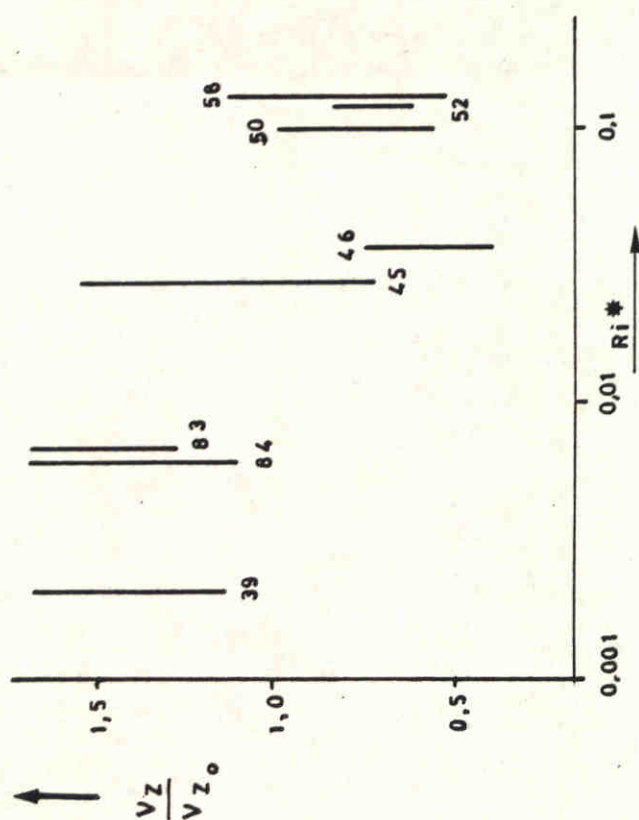
DEMPINGSRELATIE VOOR DE ZANDCONCENTRATIE
VERDELING

$$Ri^* = -g \frac{\Delta c}{\Delta h} \frac{h^2}{\bar{u}^2}$$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46 - 02

FIG 31



DEMPINGSRELATIES VOOR DE SNELHEIDSVERDELING

$$Ri^* = -g \frac{\Delta c}{\Delta h} \frac{h^2}{\bar{u}^2}$$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 32

c (%)



40

30

20

10

0

0

5

10

15

20

25

v_{DUIN}

mm/s

□	○	□	○	□	□
proef 2	59	60	52	53	55
$\bar{c} = 10\%$			20%		30%
			40%		

$v_{DUIN, MAX}$



z (%)



40

30

20

10

0

0

1

2

3

4

5

v_{EROSIE}

mm/s

○	△	△	○	△	△	○	△	▽	○
proef 18	19	20	21	59	60	13	14	52	53
$\bar{c} = 10\%$					20%		30%		40%

$v_{EROSIE, MAX}$



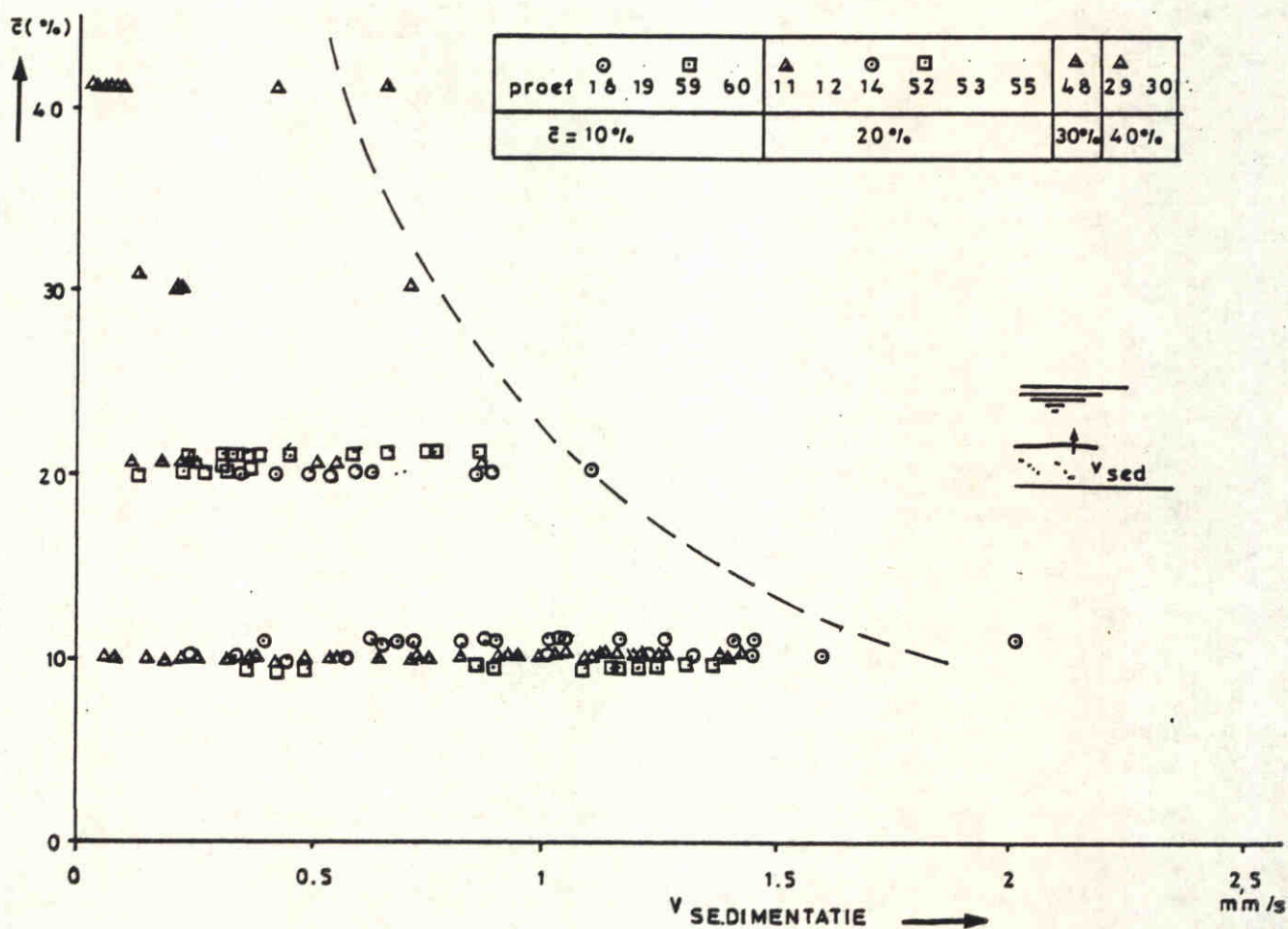
GEMETEN DUINVOORTPLANTINGS - EN EROSIESNELHEDEN
ALS FUNCTIE VAN DE GEMIDDELTE CONCENTRATIE ($\bar{c}$)

$D = 120 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 33



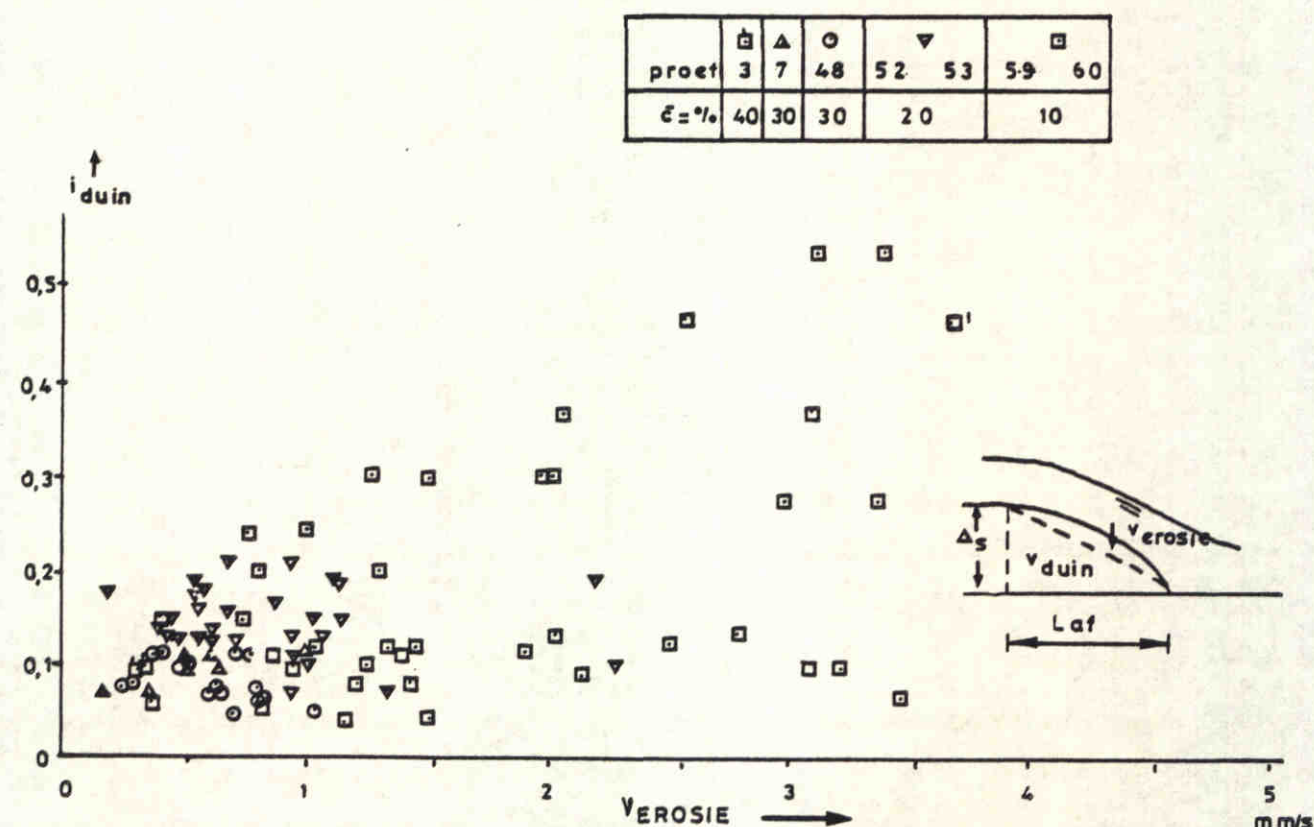
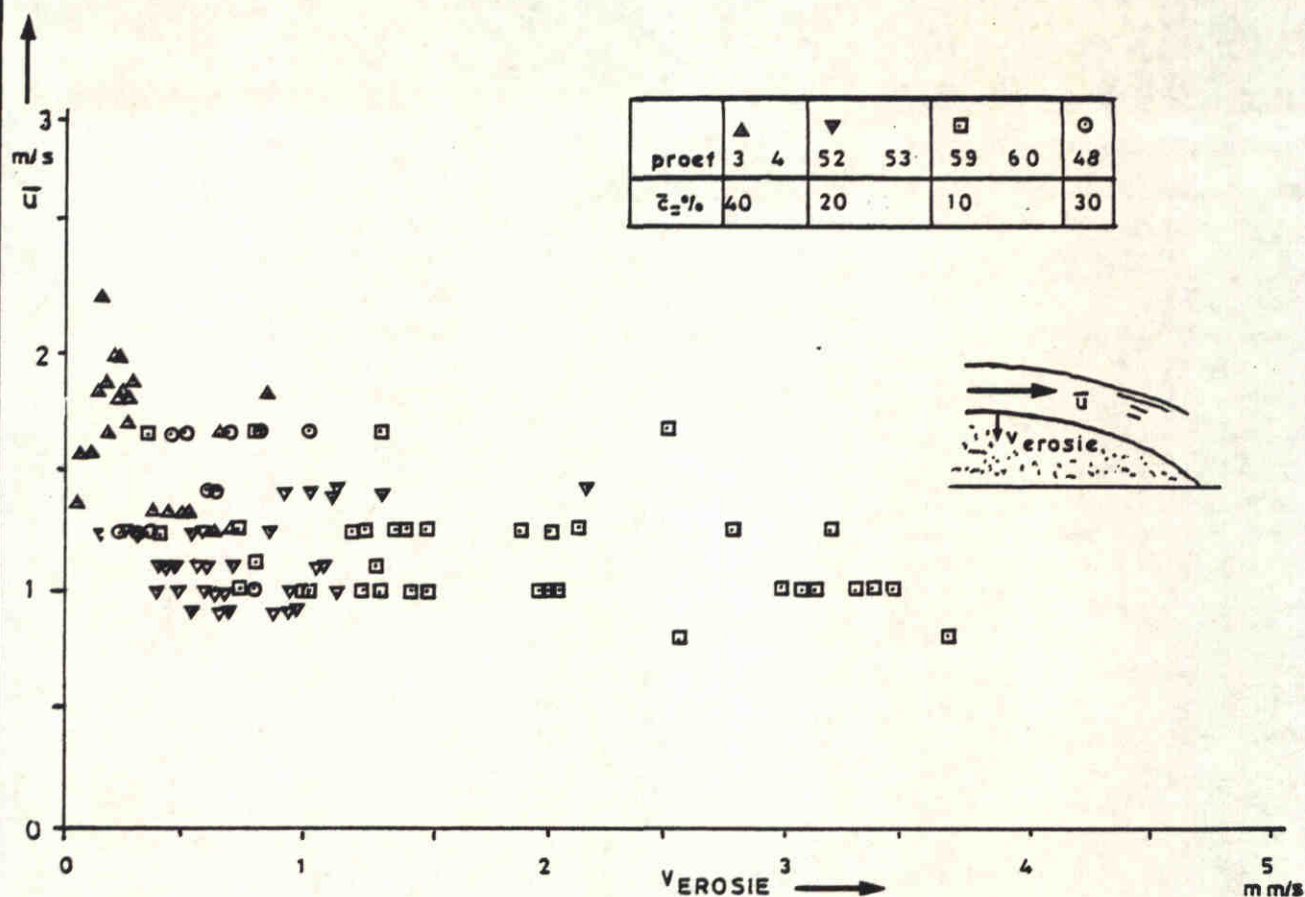
GEMETEN SEDIMENTATIESNELHEDEN ALS FUNCTIE VAN
DE GEMIDDELDE CONCENTRATIE ($\bar{z}$)

$D = 120 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 34



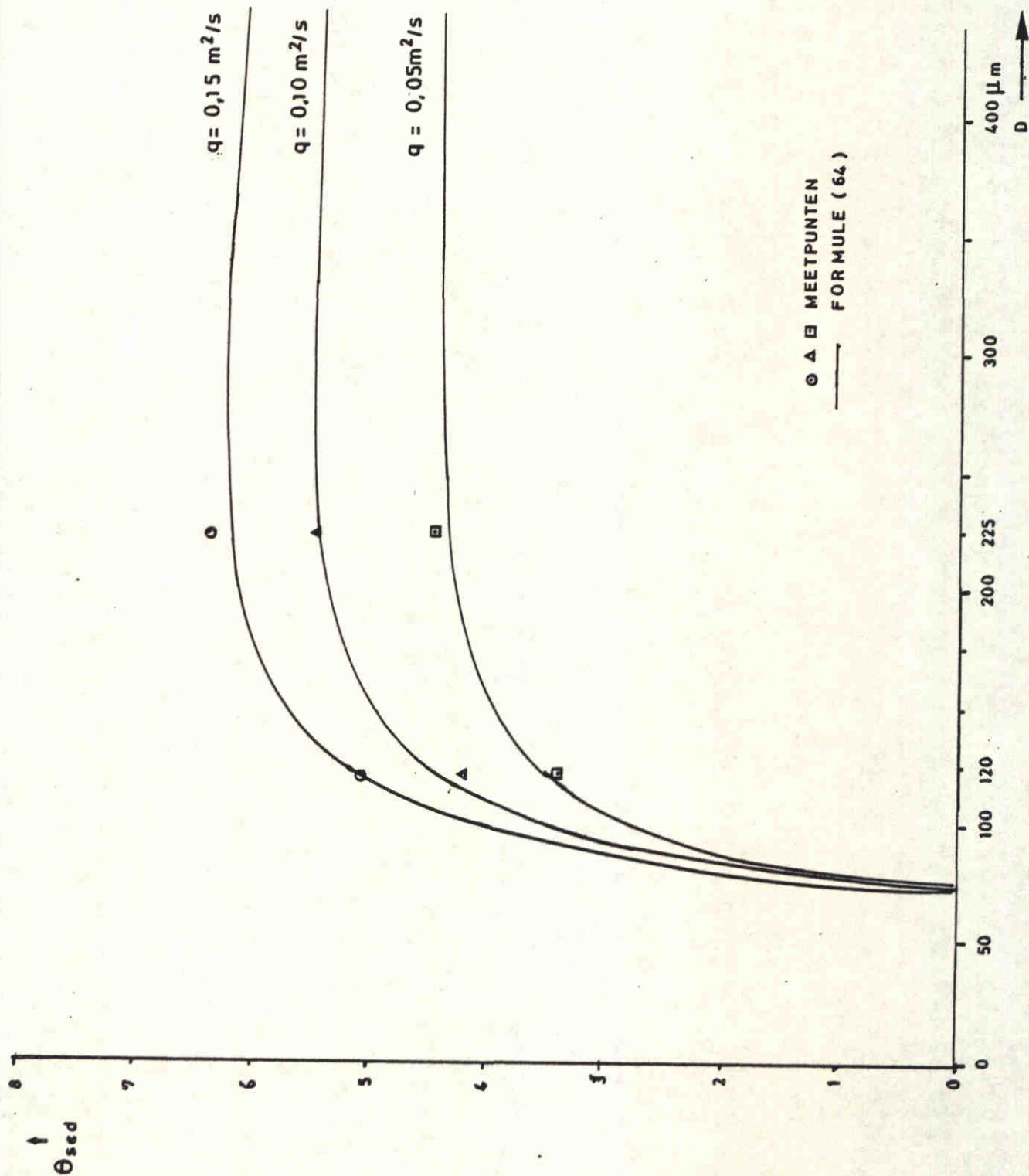
GEMETEN EROSIESNELHEDEN ALS FUNCTIES VAN DE
LOKALE STROOMSNELHEID ($\bar{u}$) EN DE LOKALE DUINHELLING
(i_{duin})

$D = 120 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 35



DIMENSIELOZE EVENWICHTS BODEMSCHUIFSPANNING (Θ_{sed})
ALS FUNCTIE VAN DE KORRELDIAMETER (D)

$\bar{c} = 10 \%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 36

$$\frac{\Phi \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi}\right)}{D^{0.3}}$$

$D^{0.3}$

EROSIE
PARAMETER

MAX $\bar{c} = 20\%$

METINGEN

D = 120 μ m					225 μ m
proef	▲	▼	⊕	⊗	□
59,60	VIDEO	52,53	34,6	48	VIDEO
c = 10%		20%	40%	30%	10%

FORMULE (69) en (57)

0,04

0,03

0,02

0,01

0

MAX $\bar{c} = 30\%$

MAX $\bar{c} = 40\%$

0,01 $\leq q \leq 0,15$ m²/s
D = 120, 225 μ m
10 $\leq \bar{c} \leq 40\%$
0,5 $\leq \bar{u} \leq 3$ m/s
0 $\leq \alpha \leq 30^\circ$

Θ SCHUIFSPANNINGSPARAMETER $\rightarrow$

EROSIEFUNKTIE VOOR EEN ZAND-WATER MENGSELSTROOM
FORMULE (69) EN MEETWAARDEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 37



OPBOUW EN AFBRAAK VAN EEN DUIN

$D = 225 \mu\text{m}$ $\bar{c} = 10 \%$

1,2,3 MENGSELSPRONG EN SEDIMENTATIE

$q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z46-02

FIG 38



OPBOUW EN AFBRAAK VAN EEN DUIN

4,5,6 EROSIE

$D = 225 \mu\text{m}$ $\bar{c} = 10 \%$

$q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

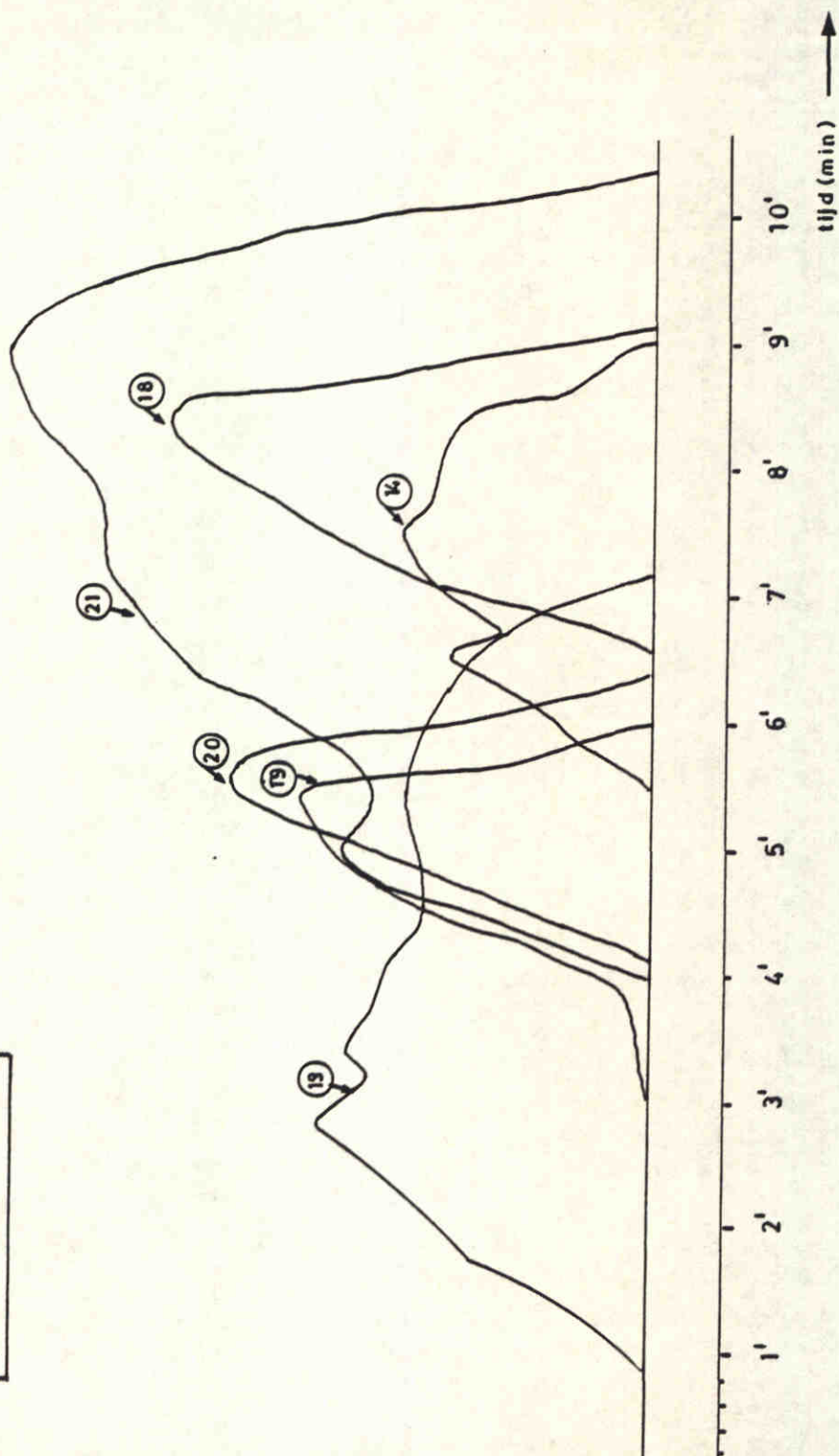
Z46-02

FIG 39

↑
z duin
(cm)

PROEF	13	14	18	19	20	21
20%						
$\bar{c} = 10 \%$						
$q = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$						

14
12
10
8
6
4
2
0



↑
tijd (min)

10'

9'

8'

7'

6'

5'

4'

3'

2'

1'

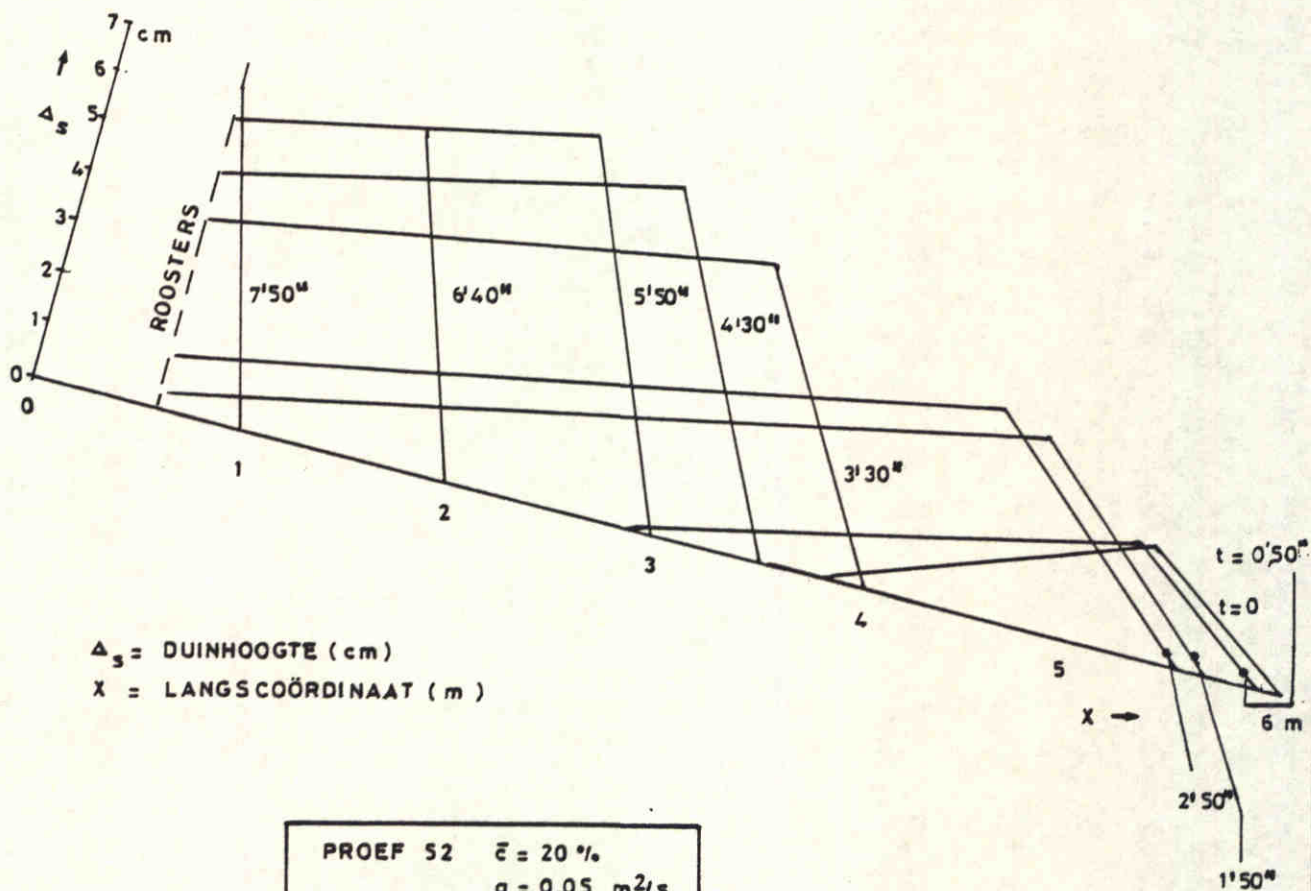
VERLOOP DUINHOOGTE OP EEN LOCATIE IN DE TIJD

$D = 120 \mu\text{m}$

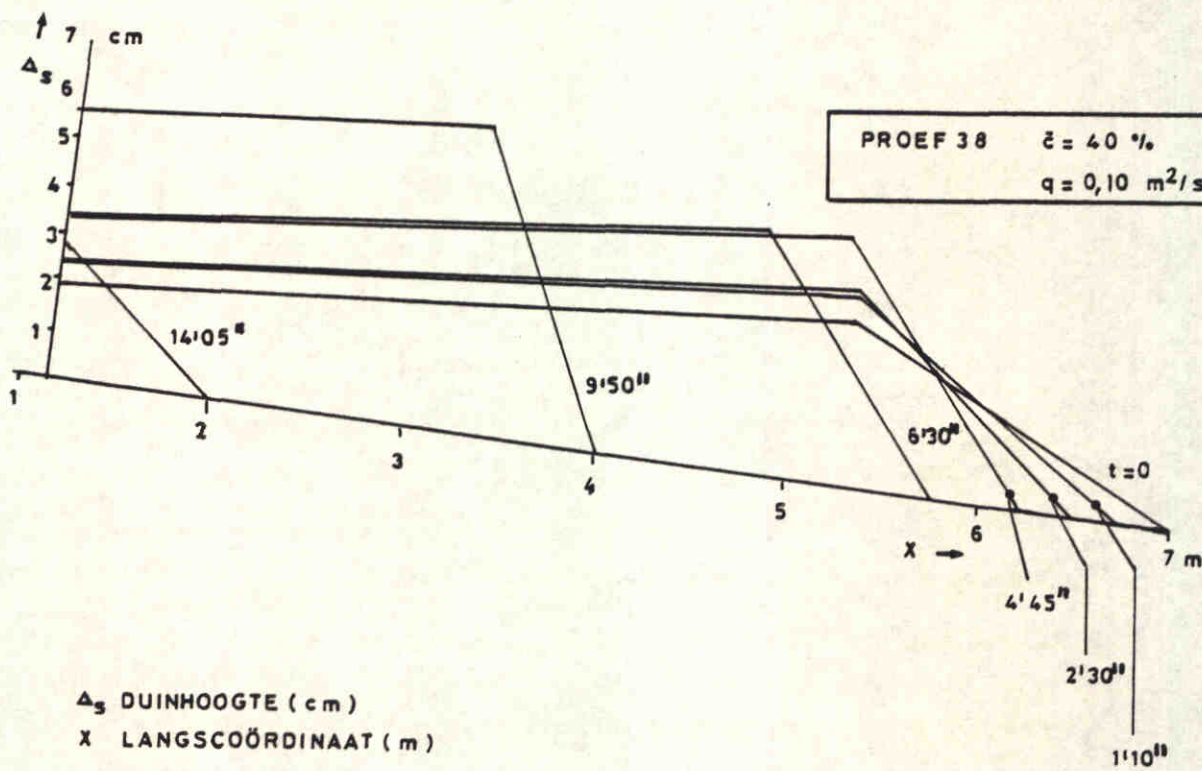
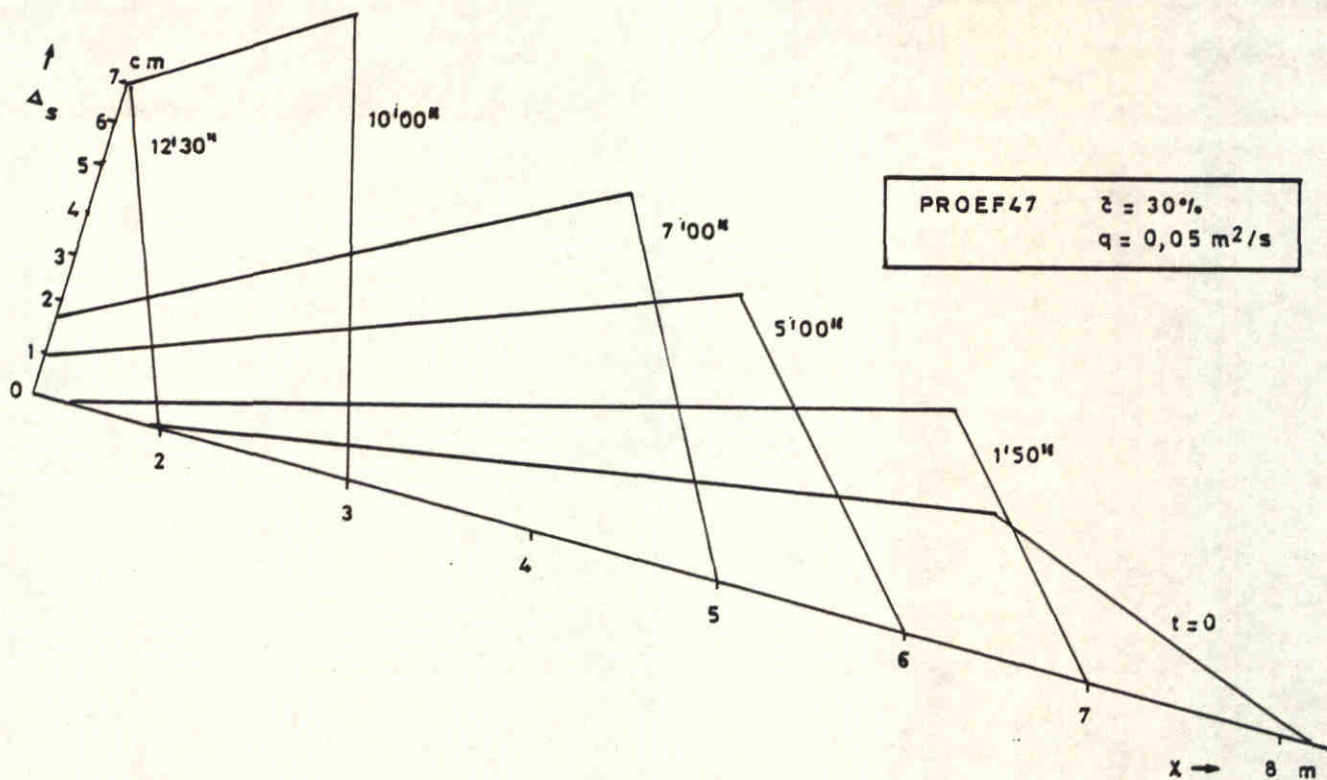
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 40



ONTWIKKELING VAN EEN DUIN IN DE GOOT	$D = 120 \mu\text{m}$	
	$\bar{\epsilon} = 20 \%$	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	Z 46-02	FIG 41



ONTWIKKELING VAN EEN DUIN IN DE GOOT

$D = 120 \mu\text{m}$

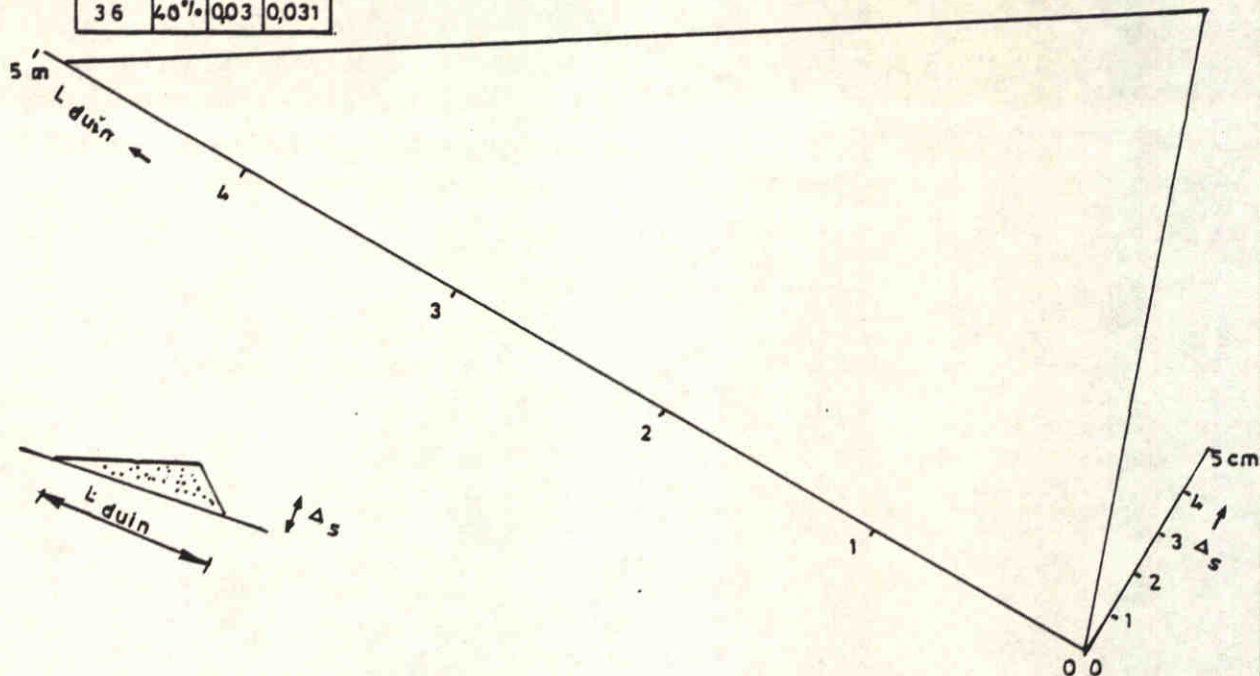
$\bar{c} = 30,40\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

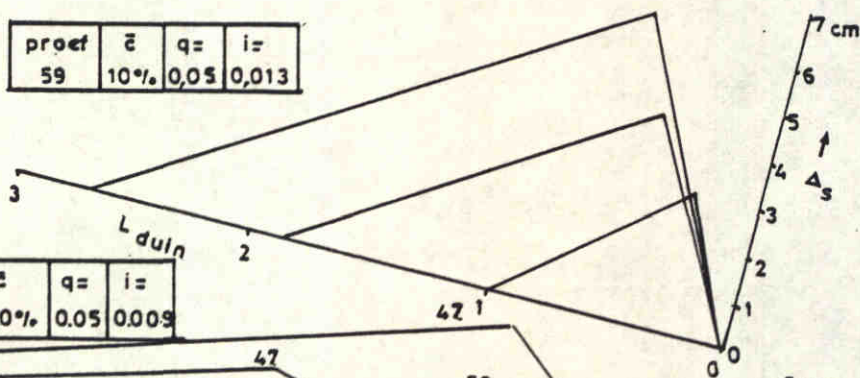
Z 46-02

FIG 42

proef	$\bar{e}$	q =	i =
36	40%	0,03	0,031

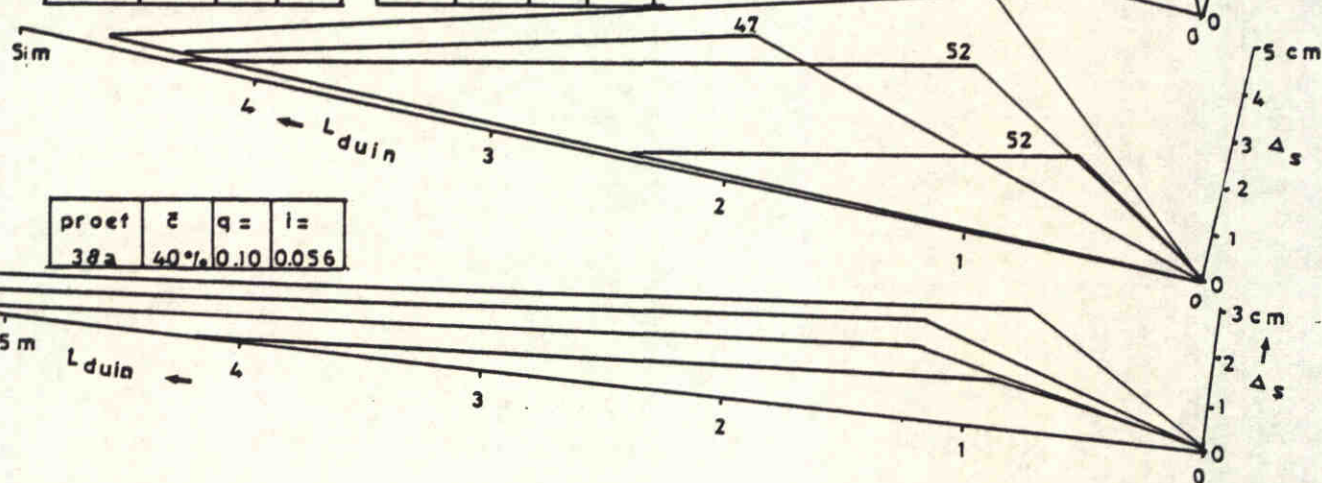


proef	$\bar{e}$	q =	i =
59	10%	0,05	0,013



proef	$\bar{e}$	q =	i =
47	30%	0,05	0,011

proef	$\bar{e}$	q =	i =
52	20%	0,05	0,009



proef	$\bar{e}$	q =	i =
38a	40%	0,10	0,056

Δs = DUINHOOGTE (cm)
 L_{duin} = DUINLENGTE (m)

DUINGEOMETRIE

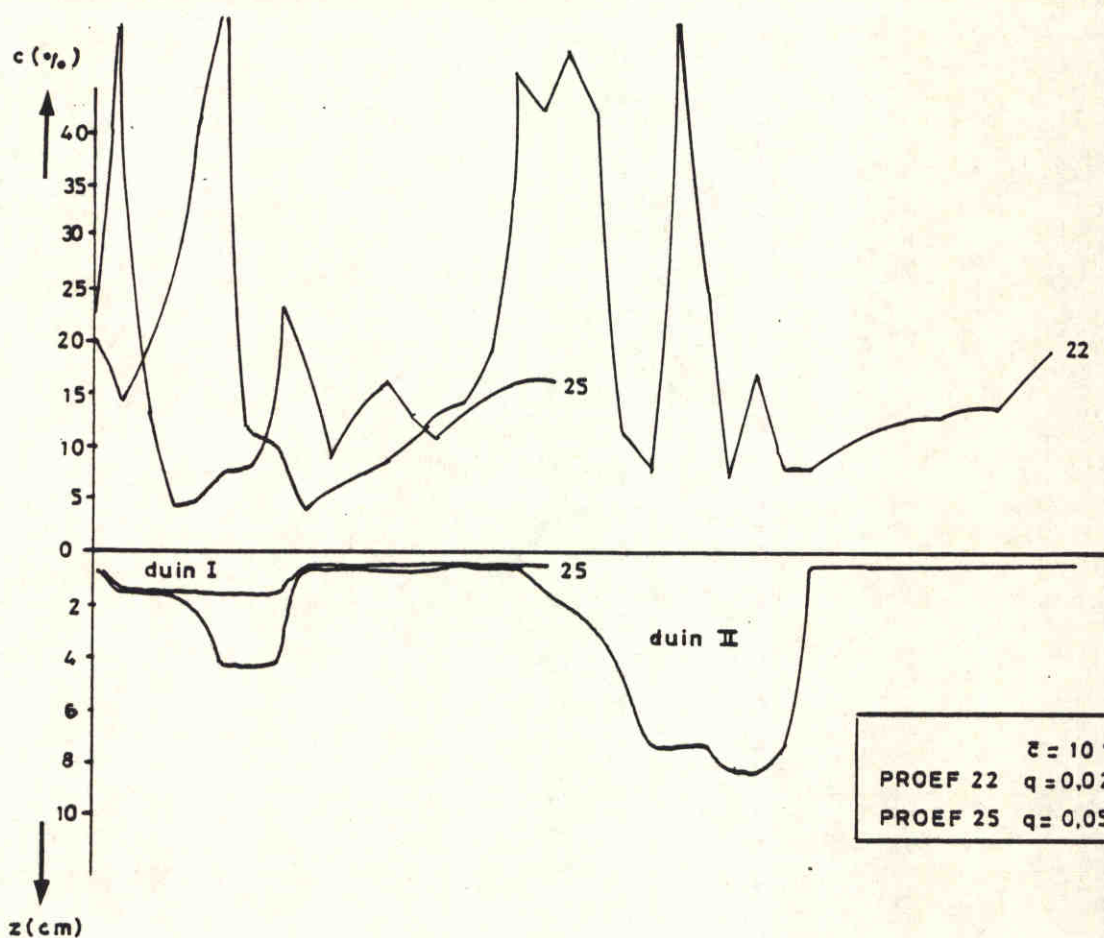
$D = 120 \mu m$

$\bar{e} = 10, 20, 40 \%$

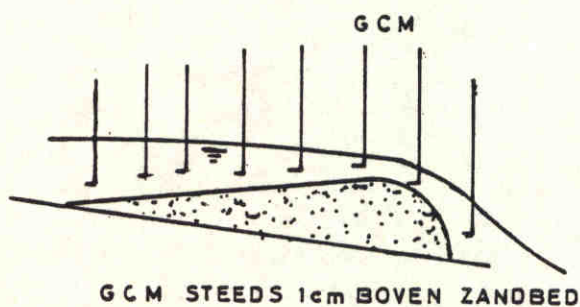
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 43



z = POSITIE GCM BOVEN GOOTBODEM
 c = GEMETEN CONCENTRATIE



CONCENTRATIEVERLOOP OVER EEN DUIN

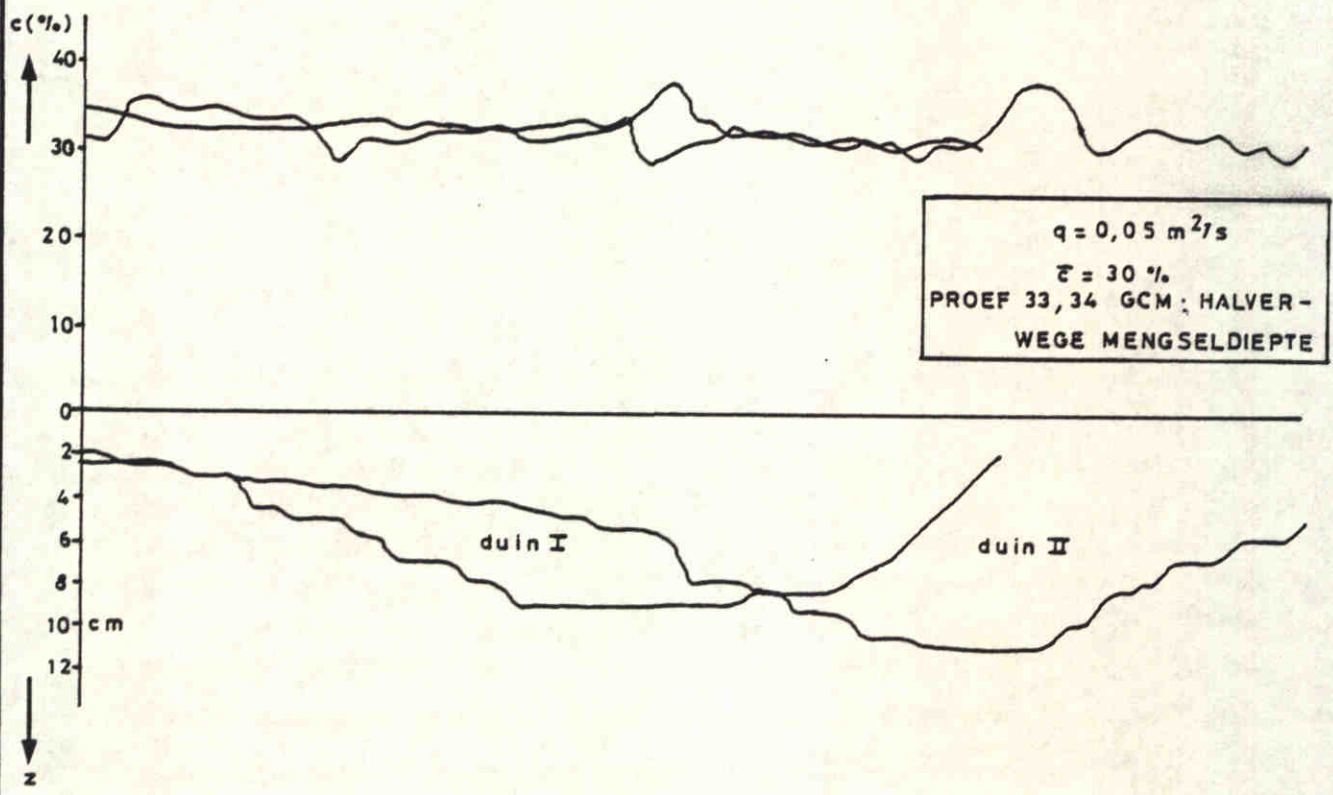
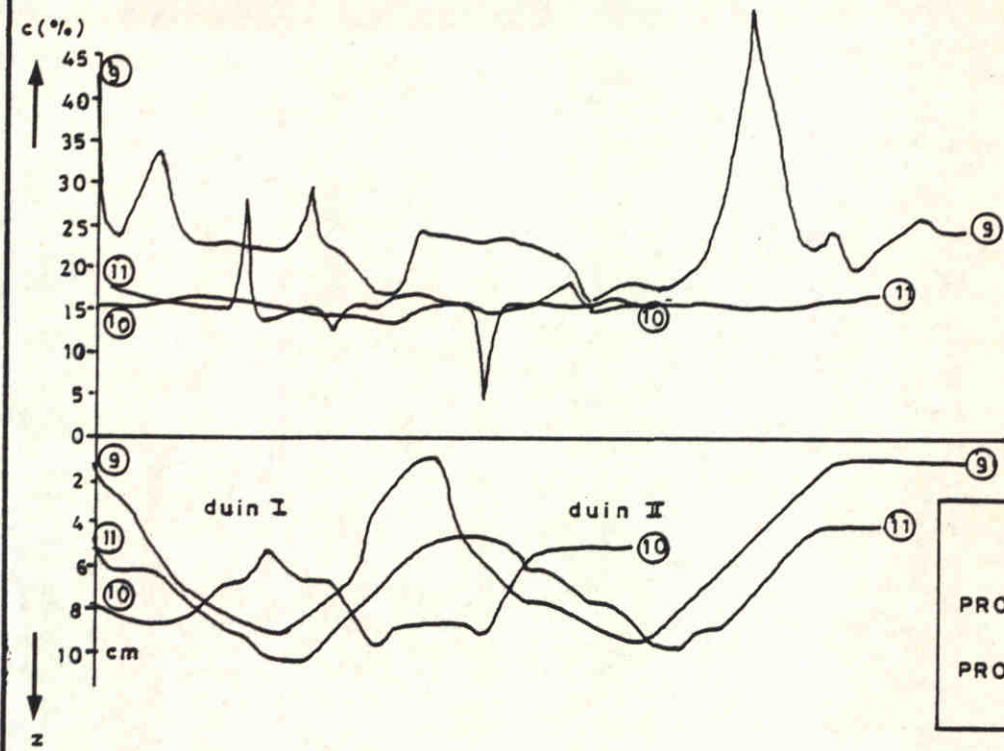
$D = 120 \mu\text{m}$

$\bar{c} = 10 \%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

FIG 44



z = POSITIE GCM BOVEN GOOTBODEM c = GEMETEN CONCENTRATIE

CONCENTRATIEVERLOOP OVER EEN AANTAL DUINEN	$D = 120 \mu\text{m}$	
	$\bar{\epsilon} = 20, 30\%$	
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	Z 46-02	FIG 45

BIJLAGE 1

IJking Geleidendheids Concentratie Meter (GCM)

In 1986 is de GCM, ontwikkeld voor toepassing bij experimenten in 1985 met zand-watermengselstromingen in de kantelgoot op het Waterloopkundig Laboratorium, zie lit. [1] en [2], op een aantal punten verder verbeterd. Het betrof met name de vormgeving. De opnemer werd meer gestroomlijnd, zodat de mengselstroom het instrument zonder loslaatverschijnselen kon passeren. Verder werd de opnemer met een koperdraadweefsel afgeschermd om het minder gevoelig te maken voor de invloed van objecten in de nabijheid, zoals de metalen gootbodem en op het instrument gesedimenteerd zand. Het meetbereik, ofwel de gevoeligheid, bleek voor het relevante meetgebied, zandconcentraties van 0 tot 50 volumepercenten, te liggen tussen 0,6 en 1,2 Volt.

Bij iedere meting of serie van metingen moet de nulspanning R_0 , een maat voor de geleidendheid van het water waarin al het zand bezonken is, bepaald worden. Deze waarde is onder meer afhankelijk van de temperatuur en het gehalte aan opgeloste mineralen en zouten.

De ijking is uitgevoerd door vergelijking van de met de GCM gemeten spanningen met de concentraties, bepaald door monsternamen. Voor iedere zandsoort is dit verband anders en moet deze ijking opnieuw gebeuren. In een speciaal perspex ijkvat, waarin met een elektrisch roerwerk het zand in suspensie gehouden kon worden, stonden, met de meetpunten op gelijke hoogte, de GCM en een afzuigbuisje aangesloten op een verdringerpompje opgesteld. Door het afzuigbuisje kon een monster afgetapt worden, dat in een maatglas werd opgevangen. In het maatglas konden vervolgens, na volledige bezinking en enige verdichting door een tikje tegen het glas, het volume zand (hz) en het totale volume (ht) afgelezen worden. De concentratie in volumedelen bedraagt dan:

$$c = \frac{hz}{ht} (1 - n) \quad (1)$$

waarin n het poriëgehalte van het gesedimenteerd zand is. Hiervoor is een waarde van 0,40 aangehouden, geldig voor enigszins verdicht zand.

De ijkprocedure was als volgt:

Begonnen werd met schoon water, waaraan een hoeveelheid zand werd toegevoegd. Nadat het zand door de mixer volledig in suspensie was gebracht, werd gedurende 10 tot 30 sec een monster afgetapt en tegelijkertijd met de GCM de spanning

Rgem gemeten. Dan werd de mixer uitgeschakeld, zodat het zand bezonk. Nadat het zand volledig bezonken was werd de nulspanning gemeten, waarbij eventueel op het instrument bezonken zand met een paar tikjes werd verwijderd.

Daarna werd de mixer weer gestart en de procedure herhaald, net zolang, totdat de maximale concentratie werd bereikt, de concentratie, waarbij het zand niet meer in suspensie te krijgen was. Deze concentratie bedroeg 40 tot 50 %, afhankelijk van de korreldiameter.

Uit de gemeten spanningen werd de relatieve geleidendheid Gr berekend, volgens:

$$Gr = \frac{R_{gem} - R_o}{R_{gem}} \quad (2)$$

Deze grootte is een vrijwel lineaire functie van de concentratie.

Er zijn twee ijkingen uitgevoerd, een met een relatief fijne zandsoort, het Haringvlietzand, met $D_{50} = 120 \mu$ (zie figuur 1) en een met het grovere zilverzand, met $D_{50} = 225 \mu$ (figuur 2). Aangezien door niet-lineaire verschijnselen de curve enigszins een S-vorm vertoont is het van belang de functie te ijken in het gebied waar ook daadwerkelijk gemeten gaat worden.

Als best-fit functies werden gevonden:

1. voor Haringvlietzand, $D = 120 \mu$

$$\begin{aligned} c &= 1,06 Gr - 0,064 & 0,1 < Gr < 0,5 & (3) \\ &= 0,42 Gr & 0 < Gr < 0,1 \end{aligned}$$

2. voor zilverzand, $D = 225 \mu$

$$c = 0,77 Gr \quad 0 < Gr < 0,5 \quad (4)$$

De metingen met de GCM in de kantelgoot, zie lit. [3], waar concentraties van 10 tot 50 volumepercent, overeenkomend met 265000 tot 1325000 mg/l en stroomsnelheden van 0,5 tot meer dan 2 m/s optraden, verliepen naar

tevredenheid. De variatie van het signaal in de tijd bij stationair-uniforme stroming was gering (lit. [3]). Er kon tot op 6 mm van de bodem gemeten worden, i.v.m. de vormgeving van de opnemer.

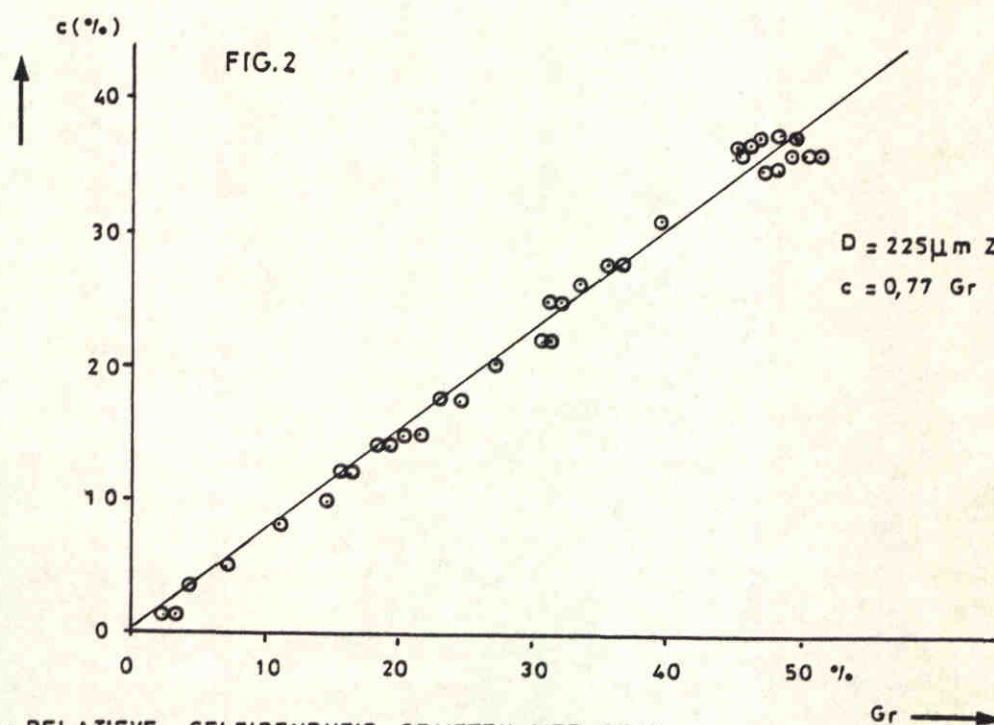
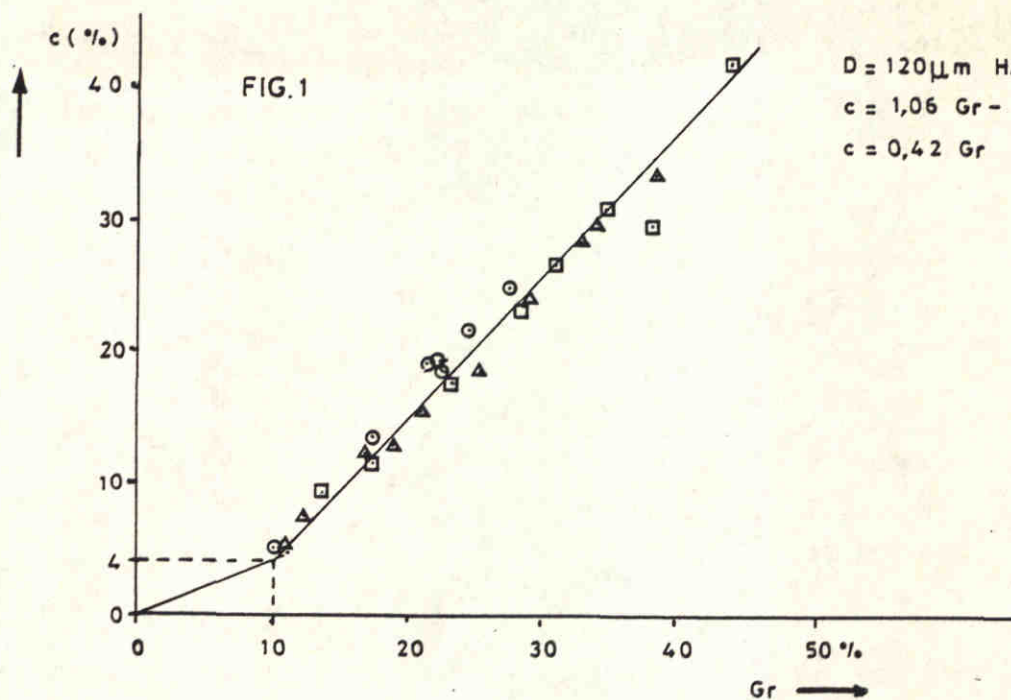
Ook kon er gemeten worden in een gesedimenteerde zandlaag. Het instrument fungeerde dan in feite als een dichtheidsmeter en gaf dan nog redelijke getalwaarden, in verdicht zand spanningen tot 2 Volt, overeenkomend met een concentratie van 65 %, ofwel een poriëgehalte van 0,35. Daarbij wordt het instrument wel ver buiten het ijkgebied gebruikt, zodat het onzeker is of de resultaten dan nog betrouwbaar zijn.

Enige aanbevelingen voor de verdere ontwikkeling van het instrument zijn:

1. de aanpassing van de vormgeving, zodanig, dat tot op de bodem gemeten kan worden,
2. een verhoging van de gevoeligheid, zodat zowel bij hoge als bij lage concentraties gemeten kan worden.

Literatuur:

- [1]. Waterloopkundig Laboratorium,
Onderzoek Meetmethodes Kantelgoot,
M 2081-22, 1985.
- [2]. Waterloopkundig Laboratorium,
Verslag Experimentele Studie Gedrag Zand-Watermengsel-
stromingen Boven Water,
M 2081-20, 1986.
- [3]. Waterloopkundig Laboratorium,
Zand-Watermengselstromingen;
Verslag Experimentele Vervolgstudie Gedrag Zand-Water-
mengselstromingen Boven Water,
Z 46-02, 1987.



Gr = RELATIEVE GELEIDENDHEID GEMETEN MET GCM
 c = CONCENTRATIE, BEPAALD MET AFZUIGSYSTEEM

IJKKROMME GELEIDINGS CONCENTRATIE-METER (GCM)
 VOOR HARINGVLIET - EN ZILVERZAND

BIJLAGE 1

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Z 46-02

Metingen in juist gesedimenteerd zand tijdens
zand/water mengsel stroom in kantelgoot

meetverslag

CO-287140/4
februari 1987
dGo/MS/2/87/kantel

Opgesteld in opdracht van:
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Rijkswaterstaat

Metingen verricht door: W.J. van Pernis
Projectleider/verslag: ir. M.B. de Groot
Projectbegeleider: ir. J. Lindenberg
AFDELING WATERBOUWKUNDIGE CONSTRUCTIES
Afdelingshoofd: ir. P. Lubking

bladnummer : - I -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

INHOUD	blz.
1. INLEIDING	1
2. BESCHRIJVING VAN PROEVEN EN METINGEN	2
2.1 De kantelgoot proeven	2
2.2 Grondmechanische metingen	3
3. MEETRESULTATEN PROEVEN MET FIJN ZAND	4
3.1 Zandkarakteristieken	4
3.2 Waterspanningsmeting	4
3.3 Poriën-volume meting tijdens het stromen	6
3.4 poriën-volume meting na afloop	7
4. MEETRESULTATEN PROEVEN MET MIDDEL-GROF ZAND	9
4.1 Zandkarakteristieken	9
4.2 Poriën-volume meting	9
5. CONCLUSIES	10
5.1 Conclusies over de meetmethodes	10
5.2 Conclusies over de bij de gootproeven opgetreden verschijnselen	10

bladnummer : - II -
 ons kenmerk: CO-287140/4
 datum : februari 1987

SYMBOLLEN

A, B	ijkconstanten voor elektrische dichtheidsmeting volgens $n.100\% = A + B \rho_w / \rho_{gr}$	-
c	zandvolume concentratie (volume korrels/volume mengsel)	-
D ₅₀	mediane korreldiameter	m
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s ²
Gr =	$100\% \cdot (R_m - R_w) / R_m$	-
n	poriën-volume $n = 1 - c$	-
p	waterdruk	Pa
Δp	waterdruk onderste waterspanningsmeter minus die van bovenste	Pa
q	specifieke debiet mengselstroom	m ² /s
R _m	elektrische weerstand door instrument in mengsel gemeten	Ω
R _w	elektrische weerstand door instrument in water gemeten	Ω
t	tijd	s
x	afstand vanaf kantelpunt goot in richting van goot-as	m
z	afstand vanaf gootbodem	m
Δz	afstandsverschil (=hoogteverschil) tussen beide waterspanningsmeters	m
γ _w	soortelijk gewicht water	N/m ³
γ _z	soortelijk gewicht zandkorrels	N/m ³
γ _m	soortelijk gewicht mengsel	N/m ³
ρ _{gr}	specifieke elektrische weerstand van de grond (= zand/water mengsel)	Ωm
ρ _w	specifieke elektrische weerstand van het water of	Ωm
ρ _w	soortelijke massa van het water	kg/m ³

bladnummer : - 1 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

1. INLEIDING

In dit verslag worden een aantal grondmechanische metingen beschreven die in 1986 zijn uitgevoerd in de kantelgoot die in het Waterloopkundig Laboratorium was geïnstalleerd ten behoeve van onderzoek op het gebied van zand/watermengselstromen. De metingen zijn verricht in het kader van het zettingsvloeiingsonderzoek, maar vormen ook een onderdeel van het MODVLO-onderzoek. Dit verslag wordt enerzijds los verspreid, anderzijds als bijlage van het rapport Z46-02 van het Waterloopkundig Laboratorium.

Bij opspuiten en klappen van zand stroomt een zand/watermengsel over de bodem waarna een groot deel van het zand sedimenteert op de veelal hellende zandbodem. Vaak vinden vervolgens nog weer zettingvloeiingen plaats of zettingsvloeiingsachtige verschijnselen. Het is van belang te weten wat er precies met zandkorrels en poriënwater gebeurt direct na sedimentatie. Want daardoor worden de randvoorwaarden bepaald voor eventuele zettingsvloeiingen. Het gaat om vragen als:
Hoe groot is het poriënvolume direct na sedimentatie?
Verandert dat nog na verdere sedimentatie of onder invloed van de stroming die erover heen trekt?
Treden er wateroverspanningen op?
Zo ja, hoe groot, hoe langdurig?
Ook tijdens en na eventuele vloeiingen zullen dichtheid en water-spanning variëren. Het is ook van belang die waar te nemen om uiteindelijk in staat te zijn de verschijnselen die in dergelijke omstandigheden optreden te kunnen beschrijven en te kunnen voorspellen.

Nog twee andere onderzoekingen zijn of worden gericht op het waarnemen van wat er met het zand gebeurt vanaf het moment van sedimentatie vanuit een zand/watermengsel:

- De metingen tijdens de sluiting van de Slaak (augustus/- september 1986; zie Grondmechanica Delft rapport CO-285230/18)
- De laboratoriumproeven die in de loop van 1987 zullen plaats vinden in de Cuttergoot in het Waterloopkundig Laboratorium Delft, gericht op het hele proces van talud-opbouw onder water.

De proeven in de kantelgoot waren in de eerste plaats gericht op de hydraulische en morfologische processen. De hier besproken grondmechanische studie is dan ook van bescheiden omvang. Het doel is in de eerste plaats het opdoen van ervaring met dit soort metingen op laboratorium schaal. Daarnaast is het gericht op het leren kennen van de verschijnselen die optreden na sedimentatie vanuit een zand/watermengsel stroom boven water en vlak voor het eventueel opnieuw eroderen van het zand tijdens de voorbeweging van duinen.

2. BESCHRIJVING VAN PROEVEN EN METINGEN

2.1 De kantelgoot proeven

Het doel van de proeven was de bestudering van de stroming van een zand/water mengsel over een zandbodem boven water met de daarbij behorende vervorming van die zandbodem. De studie beperkte zich tot twee-dimensionale stroming in het verticale vlak. Bij de toegepaste specifieke mengseldebieten ontstaat een stroomregiem waarbij de vervorming van de zandbodem een grote rol speelt. Er ontstaan terrasvormige duinen die zich langzaam tegen de stroom in voortbewegen, doordat zand sedimenteert aan de bovenstroomse kant van het duin (op het terras) en zand erodeert aan de benedenstroomse kant (de rand van het terras). De studie richtte zich met name op de situaties waarbij de (in tijd of ruimte) gemiddelde sedimentatie juist nul is: globaal evenwicht.

De laboratorium opstelling is geschetst in figuur 1. Een zand/water mengsel met constante zandconcentratie c wordt met constant specifiek debiet q aangevoerd aan de bovenstroomse kant van de goot. De goothelling wordt een klein beetje flauwer gekozen dan de helling waarbij juist geen sedimentatie op de gootbodem optreedt. Na enige tijd treedt dan een situatie van min of meer globaal evenwicht: individuele duinen bewegen zich over de verder niet met zand bedekte gootbodem of de hele gootbodem is met zand bedekt waarbij de zandbodem een dynamisch duinpatroon vertoont. De bovenste tekening in figuur 2 geeft een indruk van de zandbodem als functie van de tijd.

Zie voor een uitgebreide beschrijving, het WLD-rapport Z46-02.

Gedurende drie van de vele in de kantelgoot uitgevoerde proeven zijn grondmechanische metingen gedaan:

- 1986-08-28 proefnummer Z46-55
- 1986-09-02 proefnummer Z46-60A
- 1986-10-08 proefnummer Z46-73A

Bij de eerste twee proeven werd zand met een mediane korreldiameter van 120 micrometer gebruikt, bij de derde proef 225 micrometer. Elke proef bestond uit vier of vijf sub-proeven.

Voor verdere gegevens: zie tabel 1.

bladnummer : - 3 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

2.2 Grondmechanische metingen

In de goot zijn enerzijds poriën-volume metingen verricht, anderzijds waterspanningsmetingen.

De poriën-volume metingen werden uitgevoerd met een elektrische dichtheidsmeter. Deze bestaat uit een kleine grondsonde (diameter 15 mm) waaraan vier ringvormige elektrodes boven elkaar bevestigd zijn, en uit de bijbehorende elektronische apparatuur. Met deze meter werd op twee manieren gemeten. Zie de onderste tekening van figuur 2.

Enerzijds werd de meter op een vaste plaats in de goot bevestigd en werd gemeten tijdens het stromen en de voortbeweging van de duinen. De meter bevond zich zodoende afwisselend in de mengselstroom en in een duin. Vaak ook stak een gedeelte van de meter boven het gesedimenteerde zand uit in de mengselstroom of zelfs boven de mengselstroom in de lucht.

Anderzijds werd de meter na afloop van een sub-proef op de traditionele manier gebruikt: waar na afloop duinen aanwezig waren, werd de sonde in de grond geduwd en werd vervolgens de elektrische weerstand gemeten om daaruit het poriën-volume te bepalen.

De waterspanningsmetingen werden uitgevoerd met twee waterspanningsmeters (type PDCR 10 , meetbereik: 100 kPa; lineariteit 0,1% van meetbereik). Een meter bevond zich steeds op een vaste plaats 5 mm boven de bodem. Terwijl de andere -bevestigd aan een peilnaald- zich wel voortdurend in (praktisch) dezelfde raai (dezelfde afstand x tot het kantelpunt) bevond maar op een variërende hoogte Δz boven het andere instrument. Gemeten werd tijdens het stromen. De hoogte van de tweede meter werd veelal tijdens een subproef een aantal malen gevarieerd en wel zodanig dat de meter zich zo hoog mogelijk onder het oppervlak van het gesedimenteerde zand bevond, althans gedurende de tijd dat er in de meetraai gesedimenteerd zand (een duin) aanwezig was. Voor nadere gegevens: zie tabel 1.

Behalve in de goot werden ook nog enige grondmechanische metingen verricht om de karakteristieken van zand en water te bepalen: zeefkrommes, minimum en maximum dichtheden, elektrische weerstand van de beide zandsoorten (bij verschillende poriën-volumina) en van het water.

bladnummer : - 4 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

3. MEETRESULTATEN PROEVEN MET FIJN ZAND

3.1 Zandkarakteristieken

De zandkarakteristieken zijn te vinden in figuur 3 en 4 en tabel 1.

- $D_{50} = 120 \mu\text{m}$
- IJkconstanten elektrische dichtheidsmeting: $A = 13,4$ $B = 98,6$
- Minimum poriën-volume $n_{\min} = 0,371$;
maximum poriën-volume $n_{\max} = 0,502$

3.2 Waterspanningsmeting

Tijdens alle sub-proeven, behalve 55D, zijn waterspanningen continu gemeten en op papier geregistreerd. Beide meters werden vóór iedere proef geijkt door ze op verschillende hoogten in een bak met water te houden.

Een voorbeeld van een deel van de registratie is weergegeven in figuur 5. Beide meters bevonden zich op hetzelfde niveau, 5 mm boven de gootbodem. Het passeren van een duin is duidelijk te volgen. Tussen ca. 25 s < t < ca. 100 s neemt de waterdruk toe, eerst vrij snel, daarna langzaam. Ongetwijfeld betekent dat sedimentatie, eerst snel, dan langzaam. Met het stijgen van de bodemhoogte gaat ook het oppervlak van het stromende mengsel omhoog.

Later vindt erosie plaats die vooral op het laatst erg snel gaat. Waarschijnlijk is rond $t = 180$ s al het zand geërodeerd, gezien de lage gemiddelde druk. De sterke drukfluctuaties duiden of op een mengselsprong of op een snelle fluctuatie van het vrije mengsel oppervlak (kleine golfjes).

Uit de drukregistraties is zelfs de hoogte van de duin te schatten. Bij het gegeven specifiek debiet bedraagt de mengsel-laag-dikte op de top van het duin ca. 0,02 m (zie Z46-02). In die laag zal een verticale drukgradient heersen die overeenkomt met het soortelijk gewicht van het mengsel, zijnde $\gamma_m = (1-c)\gamma_w + c\gamma_z$. Dat betekent een druk van 0,1 à 0,2 kPa aan het grensvlak tussen gesedimenteerd zand en stromend mengsel. Als daaronder globaal hydrostatische druk heerst volgt, in het voorbeeld van figuur 5, een duinhoogte van ca. 0,10 m.

De gemeten drukken uitgevoerd tijdens de twee langst-durende sub-proeven, zijn ook weergegeven in figuur 6 en figuur 7A en 7B, zij het op een andere schaal en met de assen in een andere richting. Zo komen de getrokken lijn en de gestippelde lijn getekend in de middelste grafiek van figuur 7A, tussen 0s < t < 200s overeen met de lijnen van figuur 5.

bladnummer : - 5 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

Zodra de meter met variabele hoogte op een grotere hoogte werd gebracht, nam de drukregistratie van die meter onmiddellijk af en nam het drukverschil tussen beide meters toe. Dit is behalve uit de middelste grafiek van figuur 6 en 7, ook te zien aan de onderste grafiek. Daarin is het drukverschil weergegeven maar gecorrigeerd voor het plaats-hoogte verschil tussen beide meters. Een positief drukverschil betekent een water-opverspanning bij de onderste meter ten opzichte van de bovenste meter. Die wateroverspanning is ongeveer 100% als

$$\Delta p - \gamma_w \Delta z = \Delta z \cdot 10 \text{ kN/m}^3$$

Met een streepjeslijn is dat niveau aangegeven. Daaruit is ook onmiddellijk af te leiden wanneer de hoogte van de bovenste meter varieerde en hoe groot Δz was.

Bij meting 55-E (fig. 6) treedt een tijd lang onderspanning op. Het is de vraag of dat niet berust op een onjuiste registratie van Δz of een andere meetfout, alhoewel daar verder geen aanwijzingen voor zijn. Bij meting 60A-D (fig. 7A/B) treedt dat verschijnsel niet op.

Aan het begin van meting 60A-D, tussen $t = 230s$ en $t = 270s$ treedt bijna permanent een overdruk van 100% op. Datzelfde is waargenomen bij de drie kort-durende sub-proeven die daaraan voorafgingen (registratie hier niet weergegeven). Hiervoor is moeilijk een fysische verklaring te vinden. Maar ook hier zou een registratie-fout van de hoogte van de bovenste meter de waarnemingen verklaren. Ook kan men denken aan een schaalfout van een factor 2 van de waterspanningsmeters. De in fig. 7A en 7B weergegeven waterspanningen zouden dan alle, of tot een bepaald tijdstip, gehalveerd moeten worden. Erg waarschijnlijk is dat niet.

In de onderste grafiek van de figuren 6, 7A en 7B ziet men verder ettelijke malen een wateroverspanningsverloop dat sterk lijkt op dat wat enige malen bij de Slaak-proeven is waargenomen (zie CO-285230/18, bijlagen 20-25): een snelle stijging tot 30% à 100% wateroverspanning gevolgd door een aanvankelijk vrij snelle, maar later langzame daling van de wateroverspanning.

Bij de Slaak-proeven waren er sterke aanwijzingen dat het ging om tijdelijke verweking van een deel van het zand. Dat kan ook hier het geval zijn. Uit de registraties blijkt namelijk dat de plotselinge wateroverspanning optreedt of op het moment van verplaatsing van de peilnaald met waterspanningsmeter of bij het begin van een periode van erosie. In het eerste geval zou de verplaatsing de verweking kunnen hebben ingeleid. Het tweede geval komt overeen met waarnemingen van Mastbergen: plotselinge snelle vervormingen van het zand traden ettelijke malen op bij het begin van periodes van erosie.

bladnummer : - 6 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

3.3 Porien-volume meting tijdens het stromen

In de bovenste grafieken van de figuren 6, 7A en 7B zijn de met de grondsonde gemeten poriën-volumina weergegeven met plusjes. Opvallend zijn de uitschieters naar boven tot $n = 0,8$ à $1,0$. Deze treden steeds op als, blijkens de waterdrukregistraties, juist erosie heeft plaatsgevonden. Dat komt overeen met de verwachting. De elektrische dichtheidsmeter geeft alleen dan het poriën-volume van de grond goed weer als het midden van het instrument zich ten opzichte van het zandoppervlak bevindt op een diepte die tenminste gelijk is aan de afstand tussen de buitenste elektroden. Komt het zandoppervlak lager, dan neemt de gemeten elektrische weerstand snel af.

Verder valt op dat de met de plusjes aangeduide gemeten poriën-volumina op de tijdstippen dat het zandoppervlak wel hoog genoeg is, steeds ongeveer overeenkomen met het "maximum-poriën-volume", $n_{\max}$. Dat betekent een zeer losse pakking, hetgeen overeenkomt met de geringe weerstand die men voelt wanneer men een voorwerp in het juist gesedimenteerde zand wegdrukt.

Dat de waarden zelfs geregeld iets boven het "maximum-poriën-volume" $n_{\max}$ uitkomen, kan verklaard worden uit het feit dat de grootte van $n_{\max}$ (in tegenstelling tot die van $n_{\min}$) nogal afhangt van de methode waarop men $n_{\max}$ bepaalt. In de natuur kan in principe best een iets hoger porien-volume ontstaan. Maar ook een andere verklaring is mogelijk die samenhangt met de ijking van de elektrische dichtheidsmeter.

Tijdens sub-proef 55E heeft namelijk ook het WL de dichtheid van het zand gemeten met de Geleidings Concentratie Meter. Zie Z46-02, paragraaf 34. Die meter berust op hetzelfde principe als de door Grondmechanica Delft gebruikte meter, maar is veel kleiner. Het instrument is bedoeld om de concentratie in het stromende zand/watermengsel te meten. Bij wijze van experiment is het tijdens die sub-proef voortdurend vlak boven de bodem gehouden. De gemeten poriën-volumina zijn in de bovenste grafiek van figuur 6 met rondjes weergegeven.

Gezien de geringe afmetingen en de lage positie van het WL-instrument, zijn uitschieters naar hoge poriën-volumina alleen te verwachten als bijna al het zand weggeërodeerd is. Inderdaad ziet men minder vaak uitschieters naar boven dan bij de GD-meting.

bladnummer : - 7 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

Een veel opvallender verschil met de GD-metingen zijn de zeer lage poriën-volume, soms zelfs tot onder het minimum poriën-volume. Wat is de oorzaak van het verschil? Men zou kunnen denken aan het verschil in plaats en het verschil in meetvolume. Het WL-instrument meet het poriën-volume vlakbij de bodem en middelt daarbij over een klein meetvolume (lengtemaat orde 0,01 m), terwijl het midden van de GD-meter zich op 0,08 m boven de gootbodem bevindt en de lengtemaat van het meetvolume ca. 0,1 m bedraagt. Maar dat er over de geringe hoogte van 0,1 m of 0,2 m enig waarneembaar verschil in poriën-volume zou heersen is gezien de geringe bovenbelasting al onwaarschijnlijk, laat staan dat dit verschil zo groot is. Een poriën-volume rond of zelfs beneden het minimum $n_{\min}$ is zeer onwaarschijnlijk.

Het verschil tussen beide meetwaarden en met name de lage waarden berekend uit de WL-waarnemingen zijn echter zeer goed te verklaren als men de ijkwaarden beschouwt. In figuur 8 zijn de ijkwaarden van beide instrumenten uitgezet, alsmede de beide lineaire relaties die op grond van de metingen zijn bepaald. Het is duidelijk dat geen van beide lineaire relaties toepasbaar zijn voor alle concentraties en poriën-volumina. Iets dergelijks is al eerder geconstateerd door A. Vlasblom in "Onderzoek naar de mogelijkheid van dichtheidsmetingen van zandlagen in situ langs elektrische weg", G.D., SE 127-III, juli 1963. Een niet-lineaire relatie lijkt gerechtvaardigd. In ieder geval blijkt dat met beide instrumenten bij dezelfde verhouding tussen gemeten elektrische weerstanden (b.v. $Gr = 65$, $Rw/Rm = 0,35$) twee poriën-volumina berekend worden die meer dan 10% verschillen. Daarmee is het verschil verklaard dat aangegeven is in de bovenste grafiek van figuur 6.

Wellicht is het geoorloofd de beide groepen meetkrommen te verbinden door een S-vormige kromme en daaruit de poriën-volumina af te leiden voor beide meetinstrumenten. Dan zal blijken dat de poriën-volumina veel hoger liggen dan de WL-waarden, maar toch ook wat lager dan de GD-waarden. Het poriën-volume zal steeds wat kleiner zijn dan het maximum $n_{\max}$.

Tenslotte lijken de meetwaarden in de figuren 6 en 7A, vooral die van het WL, aan te geven dat het poriën-volume enige procenten daalt in de 100 s à 1000 s na sedimentatie. In figuur 7B is dat echter niet zichtbaar.

3.4 Porien-volume meting na afloop

In figuur 9 zijn de poriën-volumina weergegeven die gemeten zijn in de duinen in de drooggevallen goot na de sub-proeven 55-B, 55-E en 60A-D. De metingen zijn gedaan op de traditionele manier: de grondsonde werd weggeduwd in het gesedimenteerde zand, waarna de elektrische weerstand werd gemeten.

bladnummer : - 8 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

Soms zakte de grondsonde heel makkelijk weg in de grond. Soms moest enige druk worden uitgeoefend. Nogal eens werd waargenomen dat verdichting optrad van het zand rond de sonde. Ook een tikje tegen de ruit leidde veelal tot verdichting.

Daarmee is wellicht te verklaren dat het zo gemeten poriën-volume bijna steeds kleiner is dan dat gemeten tijdens het stromen, waarbij de sonde niet bewogen werd.

bladnummer : - 9 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

4. MEETRESULTATEN PROEVEN MET MIDDEL-GROF ZAND

4.1 Zandkarakteristieken

De zandkarakteristieken zijn te vinden in de figuren 10, 11 en 12 alsmede in tabel 1.

- $D_{50} = 225 \mu\text{m}$
- IJkconstanten elektrische dichtheidsmeting: $A = 10,5$ $B = 116,8$, geldig voor $n < \text{ca. } 0,45$; of $A = 23$ en $B = 77$, geldig voor $n > 0,60$.
- Minimum poriën-volume $n_{\text{min}} = 0,351$; maximum $n_{\text{max}} = 0,474$.

4.2 Porien-volume meting

De resultaten van de porën-volume metingen zijn weergegeven in de figuren 13 en 14. De resultaten vertonen sterke overeenkomst met die van het fijne zand.

Een verschil, zichtbaar in fig. 13, is de korte duur van de aanwezigheid van lage poriën-volumina. Dat komt overeen met de waarneming dat de duinen in de goot zich bij het middel-grove zand veel sneller verplaatsten dan bij het fijne zand (zie Z46-02). De aanwezigheid van een hoog zand-oppervlak (duintop) op een vaste plaats, duurde dan ook veel korter.

De drie metingen na afloop van sub-proef 73A-D ter plaatse van $x = 1$ m, wijzen op een lokale verdichting elke keer dat de grondsonde opnieuw in de grond wordt gebracht.

Verder valt het op dat de poriën-volumina slechts één keer onder het maximum poriën-volume komen.

5. CONCLUSIES

5.1 Conclusies over de meetmethodes

- Een continu registrerende waterspanningsmeter op een vaste plaats in de buurt van het zandoppervlak kan betrouwbare en waardevolle informatie geven.
- Voor de betrouwbaarheid en waarde is de simultane continue registratie van het zandoppervlak en het mengseloppervlak direkt boven de meter van groot belang.
- Ook over de gradienten van de waterdruk is betrouwbare en waardevolle informatie te verkrijgen met een paar continu registrerende waterspanningsmeters op een onderlinge afstand van ongeveer een decimeter.
- Het is niet aan te raden de waterspanningsmeters tijdens de meting te verplaatsen, enerzijds in verband met de aandacht die dit vereist en de mogelijkheid van vergissingen, anderzijds in verband met de verstoring die de beweging van meter met bevestigingsmiddel in het losgepakte zand teweeg kan brengen.
- Elektrische dichtheidsmeters die om de 10 s of vaker afgelezen worden geven eveneens betrouwbare en waardevolle informatie.
- Het is nuttig de ijking van het gebruikte zand (bepaling relatie elektrische weerstand-poriën-volume) te doen over alle mogelijke poriën-volumina/zandconcentraties. Toepassing van de traditionele lineaire relatie kan tot onjuiste conclusies leiden. Het is nuttig de ijking waar mogelijk met twee instrumenten te doen.
- Om dichtheden van juist gesedimenteerd zand vlak onder het zand-oppervlak te meten is een instrument nodig waarvan het meetvolume niet meer bedraagt dan enige centimeters.
- Het inbrengen van een grondsonde leidt vaak tot locale verdichting.

5.2 Conclusies over de bij de gootproeven opgetreden verschijnselen

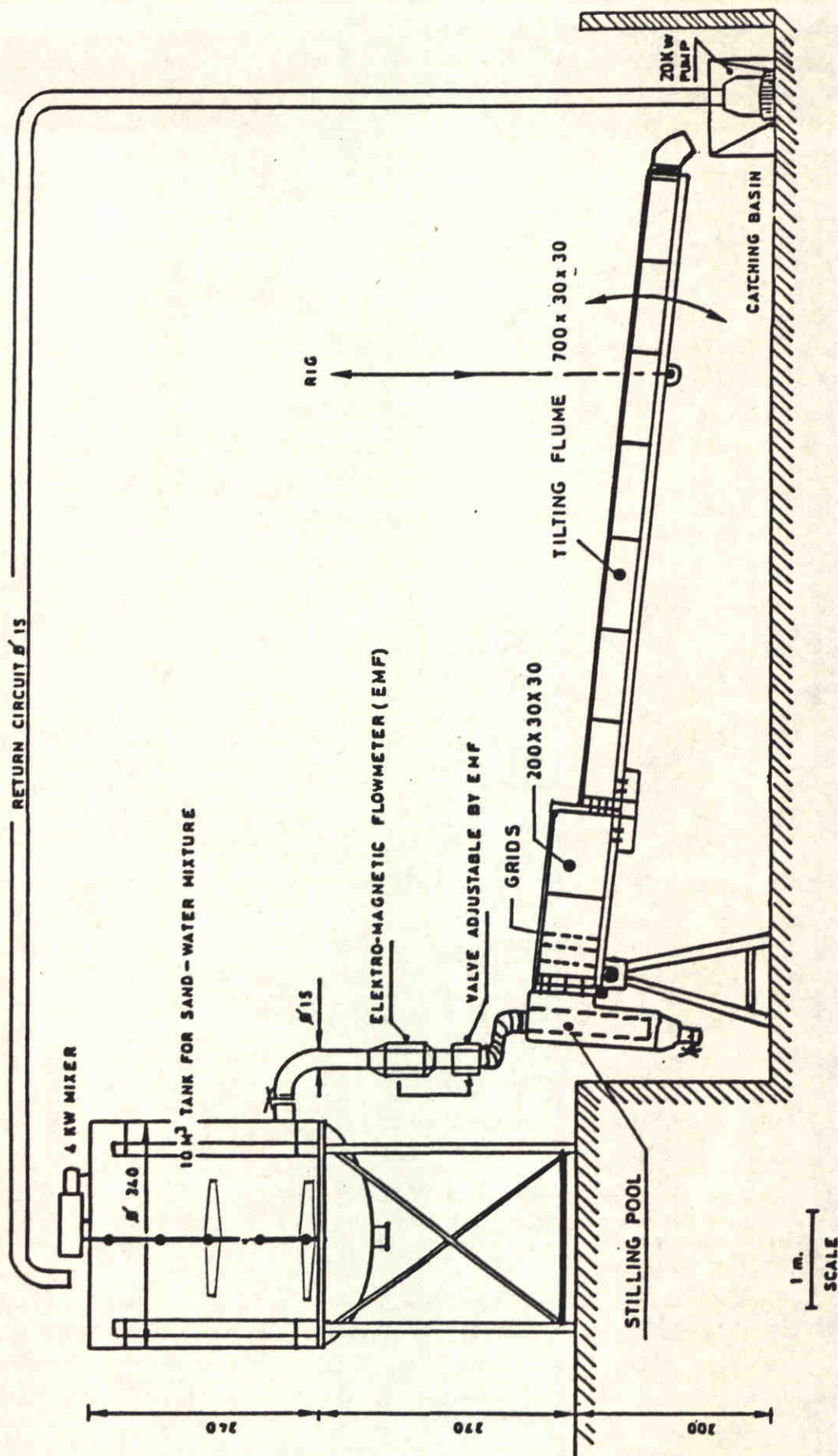
- In de bovenste centimeters (eventueel decimeters) traden geregeld wateroverspanningen op, met name aan het begin van een periode van duïnerosie en als de hoogte van de bovenste waterspanningsmeter werd gewijzigd. De periodes van wateroverspanning duurden 30 s à 100 s. Zij begonnen steeds als een piek die orde 10 s duurde en een hoogte bereikte van 30% tot 100% wateroverspanning. Dit duidt op kleine zettingsvloeiingen.

bladnummer : - 11 -
ons kenmerk: CO-287140/4
datum : februari 1987

- Het poriën-volume direkt na sedimentatie was steeds hoog, dicht tegen het maximum porien-volume. Misschien daalde het poriën-volume ook enige procenten gedurende de volgende 100s à 1000s. Doch dat is niet geheel zeker.

PROEF NUMMER	Z46-55					Z46-60A				Z46-73A			
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	A	B	C	D
Datum	1986-08-28					1986-09-02				1986-10-08			
D ₅₀	120 μm									225 μm			
Mengsel conc. c (=1-n)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,104	0,104	0,104	0,104
Specifieke debiet q (m ² /s)	0,05	0,05	?	0,03	0,02			0,05	0,02	0,05	0,05	0,05	0,15
Verhang (rad of tg)	0,0065	0,0065	?	0,0082	0,0082			0,0101	0,0132	0,048	0,045	0,042	0,032
PORIENVOLUMEMETINGEN													
Plaats t.o.v. kantelpunt	x= 4,30 m					x= 1,80 m				x= ,00 m			
Meetduur (s)	95	390	0	390	1800	0	0	360	2250	770	520	450	
Aantal meet-tijdstippen	2	7	0	3	29	0	0	15	110	26	36	36	0
Aantal meetpp. na afloop	0	8	0	0	12	0	0	0	8	0	0	0	7
Watertemperatuur (°C)	25,8	25,8	-	25,8	25,8			24	24	24,2	24,2	24,2	-
Elect. weerst. water (Ω)	36,2	36,2	-	36,2	36,2			38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
IJk-constance A	13,420									10,549			
IJk-constante B	98,592									116,835			
Min. porienvolume n _{min.}	0,371									0,351			
Max. porienvolume n _{max.}	0,502									0,474			
WATERSPANNINGSMETING													
Plaats t.o.v. kantelpunt	x= 4,00 m					x= 1,80 m				x= 1,00 m			
Meet duur (s)	420	480	90	0	1800	500	360	390	2400	0	0	0	0
Achtereenvolgende Δz-waarden (m)	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	-	-	-
					0,022	0,053	0,043	0,043	0,013				
					0,072	0,000	0,000	0,000	0,073				
					0,122				0,113				
					0,037				0,053				
					0,112				0,113				
					0,097				0,063				
					0,037				0,123				
					0,107				0,143				
									0,168				
									0,113				
									0,063				
									0,133				
									0,163				
									0,133				
									0,113				
									0,173				

TABEL 1



GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 56 92 23

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

d.d.

87-02-11

get.

gez.

MODELOPSTELLING IN CUTTERGOOT WLD

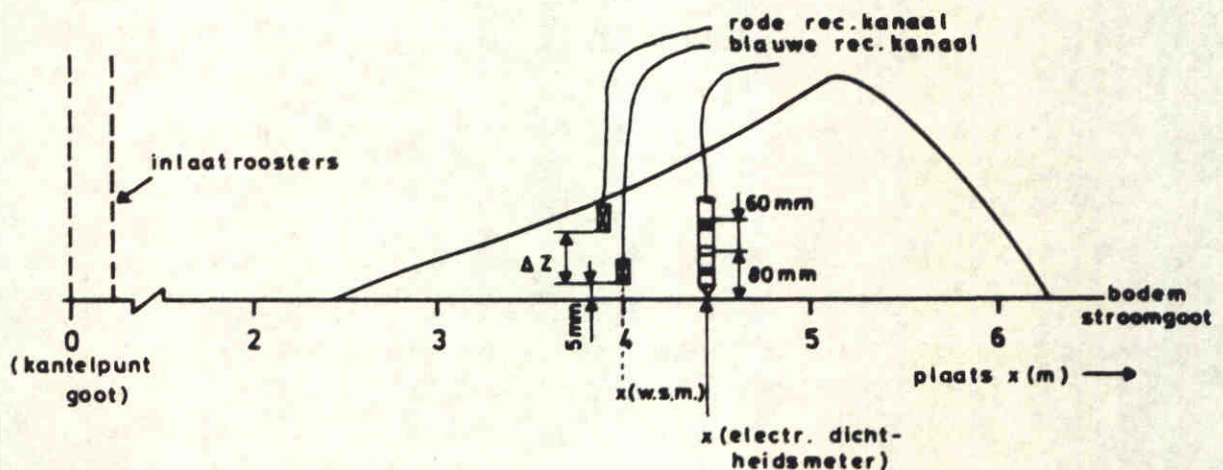
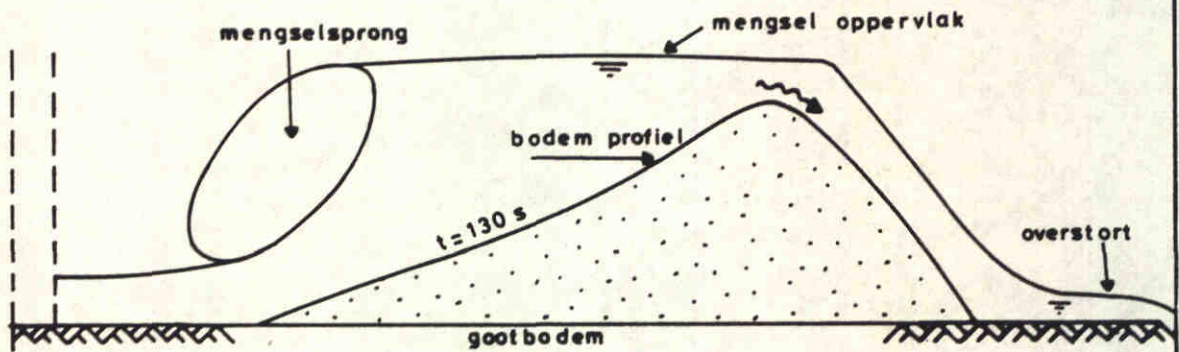
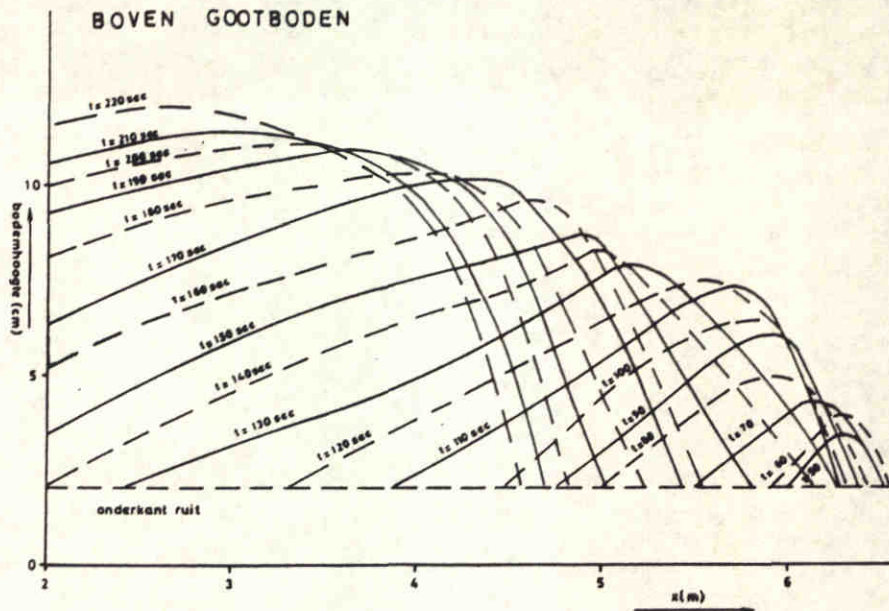
CO-287140

FIG. 1

form.
A4

HOOGTE ZANDBODEM

BOVEN GOOTBODEN



GRONDMECHANICA DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 56 92 23

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

d.d. 87-02-12

get.

- VOORBEELD ONTWIKKELING BODEMPROFIEL
- VOORBEELD BODEMPROFIEL EN MENGSEL - OPPERVLAK OP ÉÉN TIJDSTIP
- OPSTELLING G.D-MEET INSTRUMENTEN

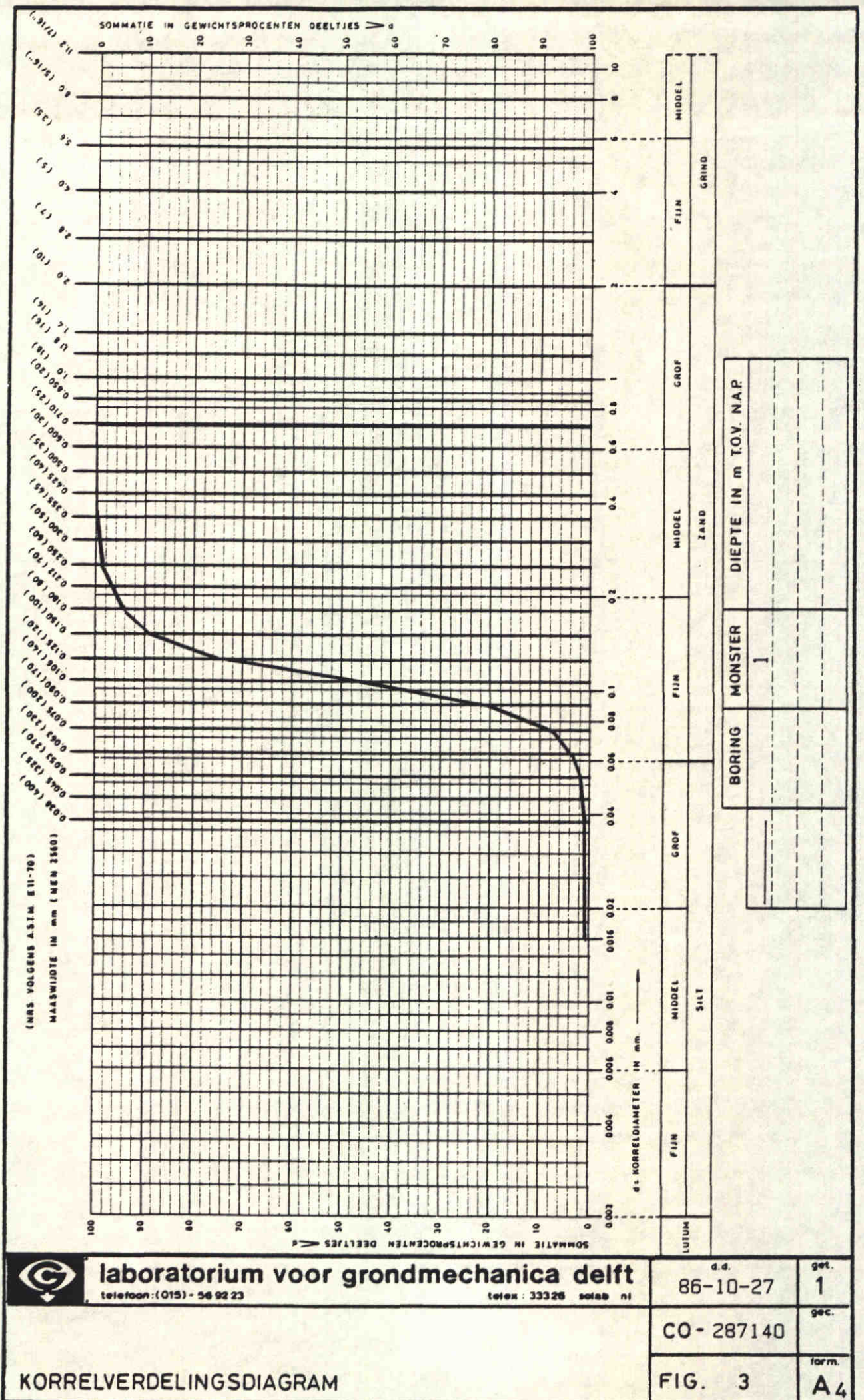
CO- 287140

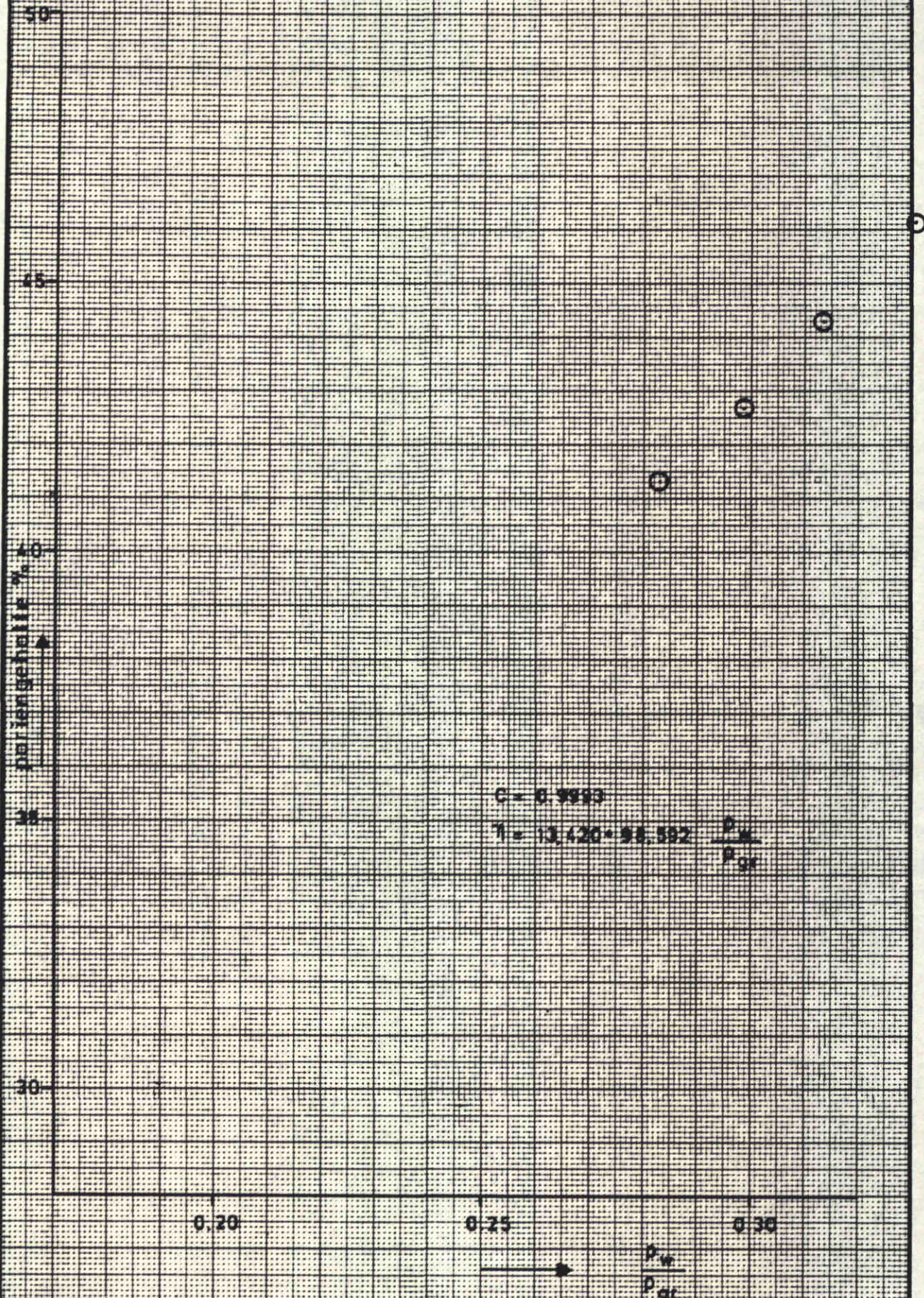
gez.

FIG. 2

form

M





laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 569223
 telex: 38234 soil nl

87 - 02 - 12



IJKING PORIENVOLUME ZAND $D_{50} = 120 \mu m$
 $\pm 1400 \Omega cm$

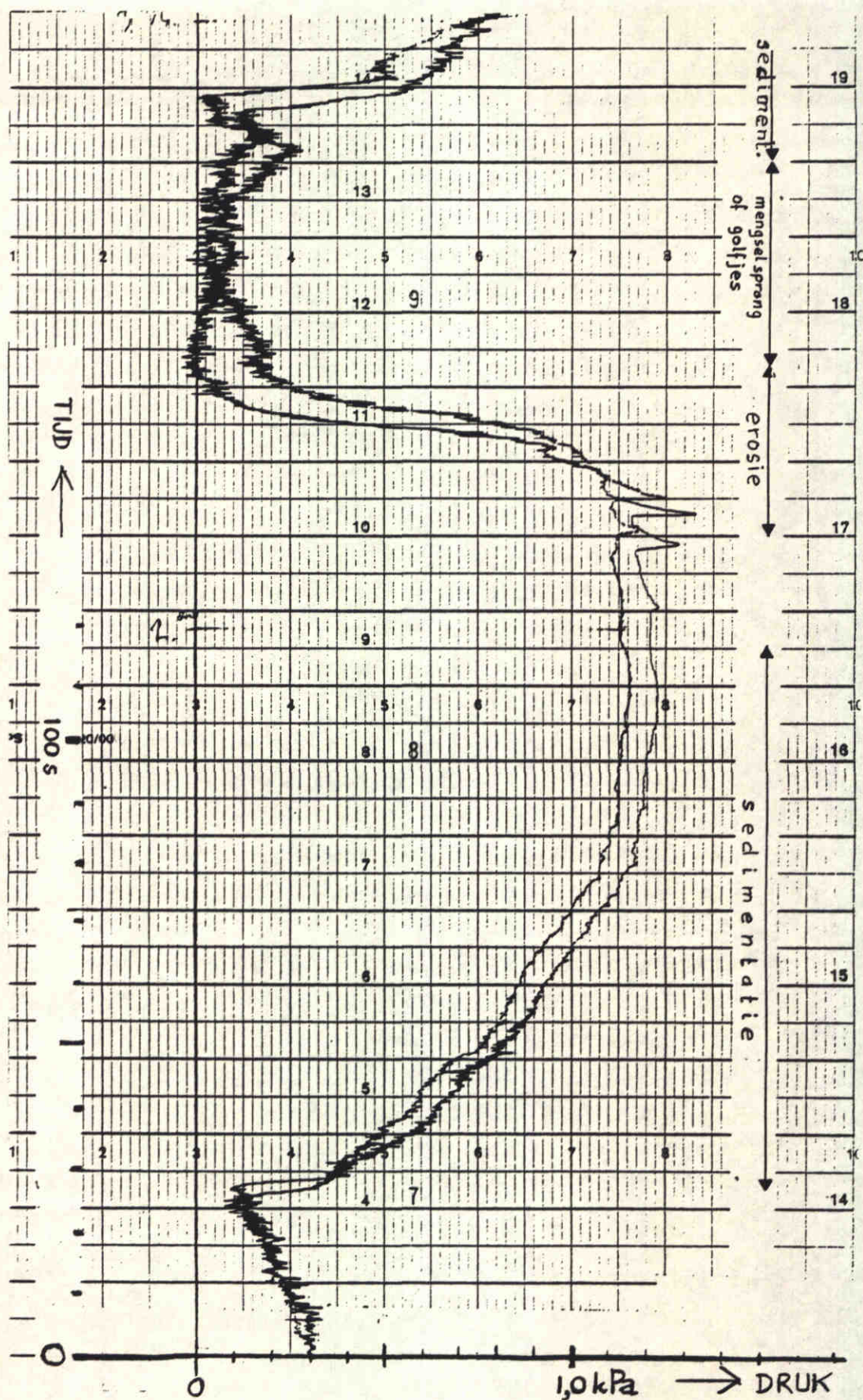
CO-287140

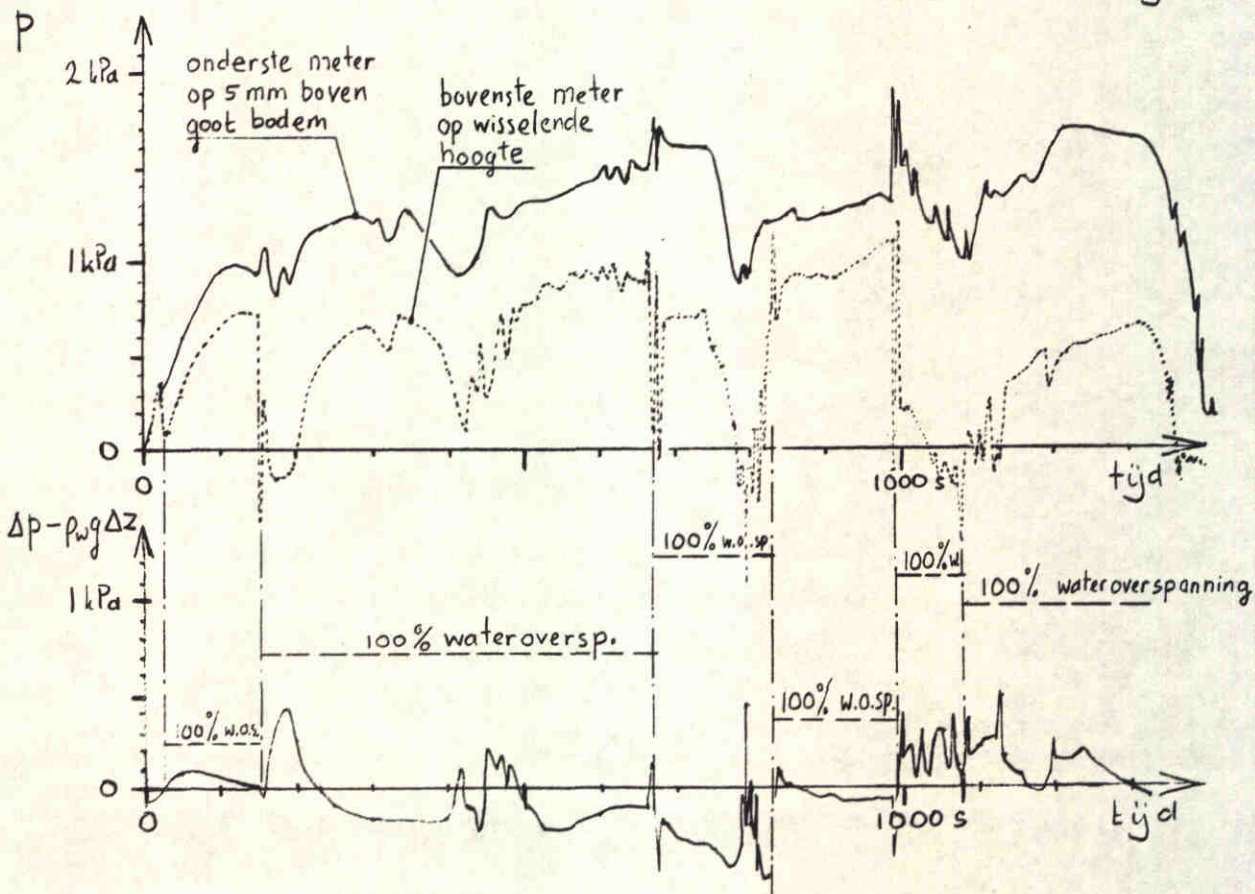
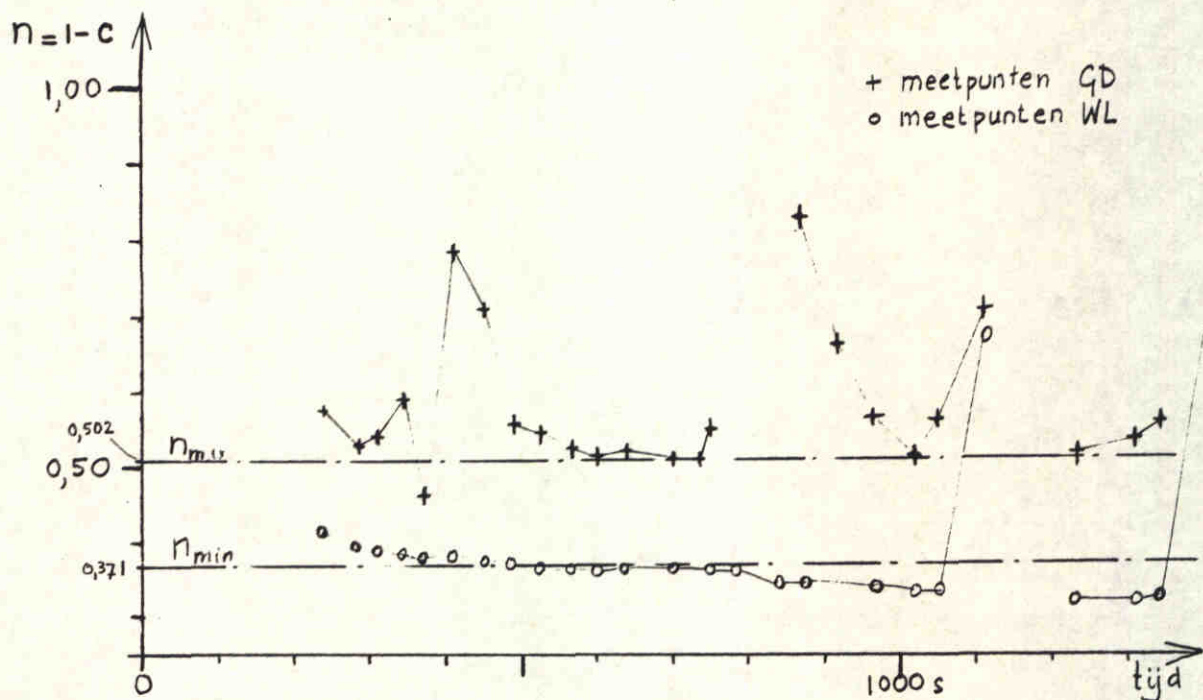
goc.

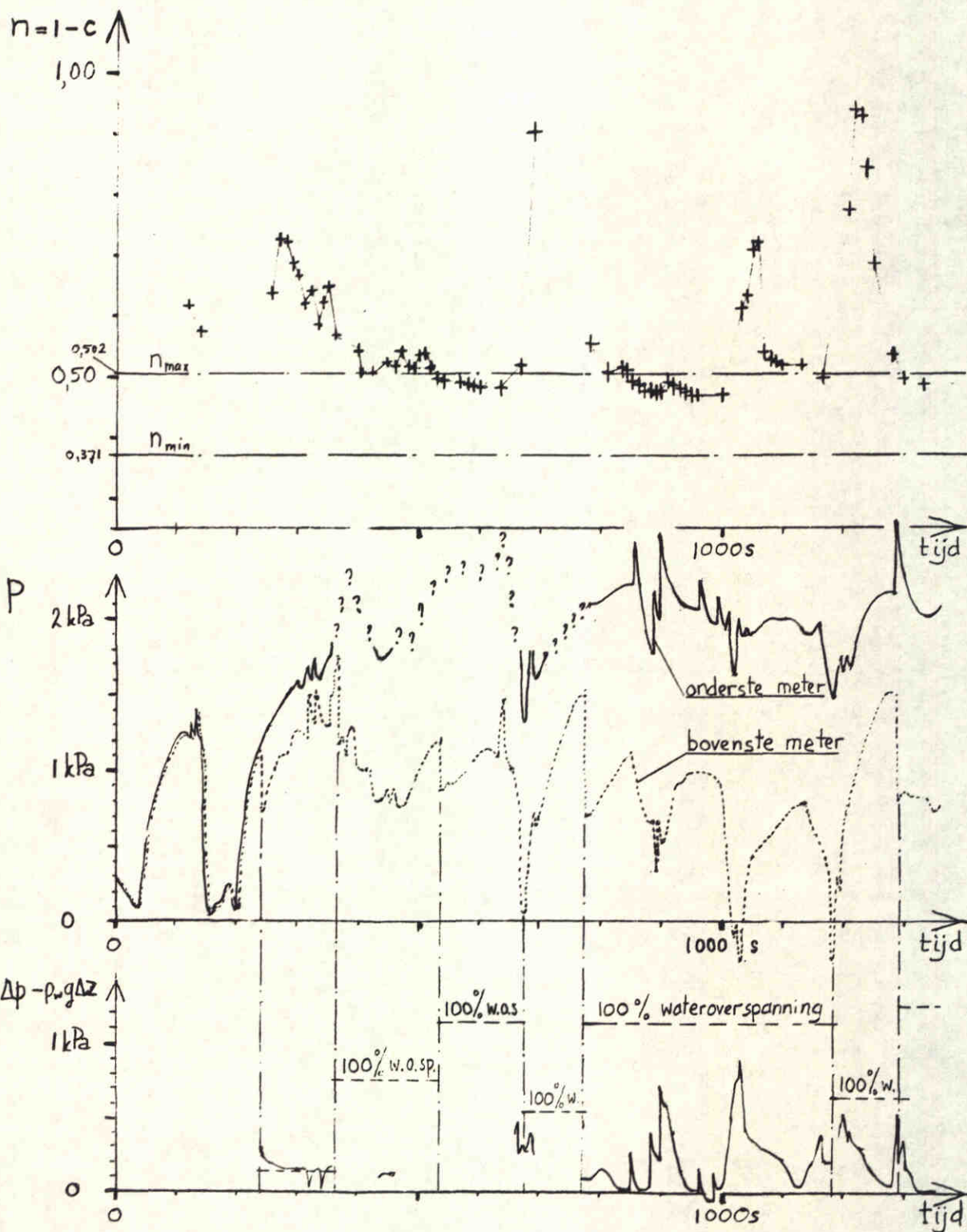
FIG. 4

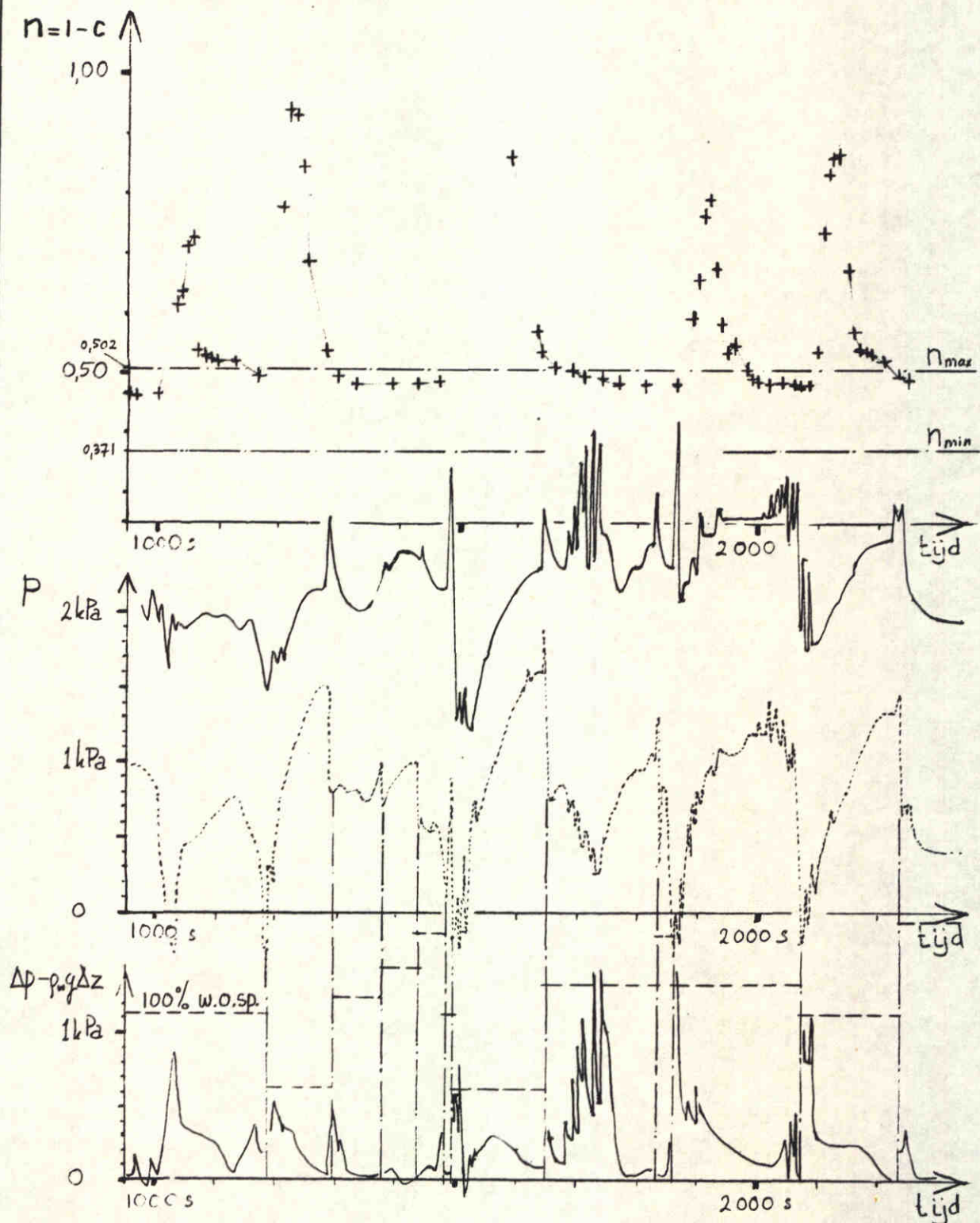
form.

A₄









GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 56 92 23

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

d.d.
87 - 02 - 12

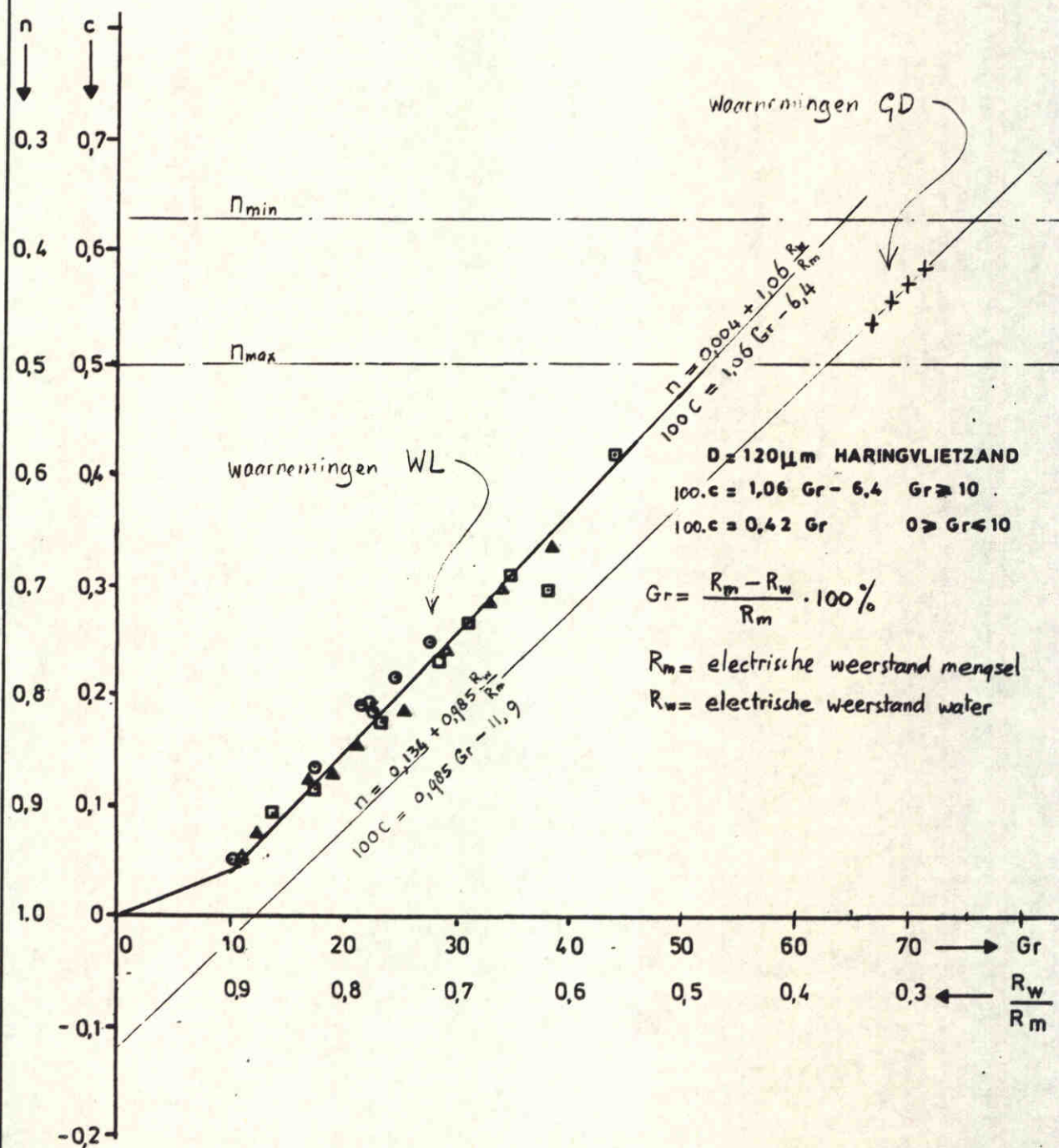
gez.

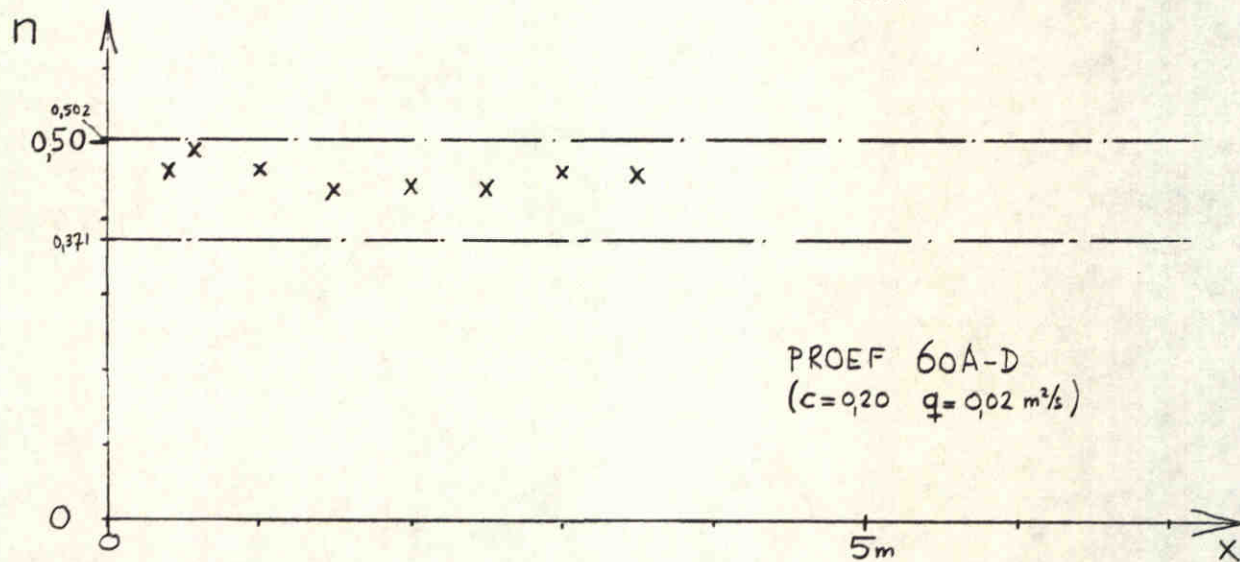
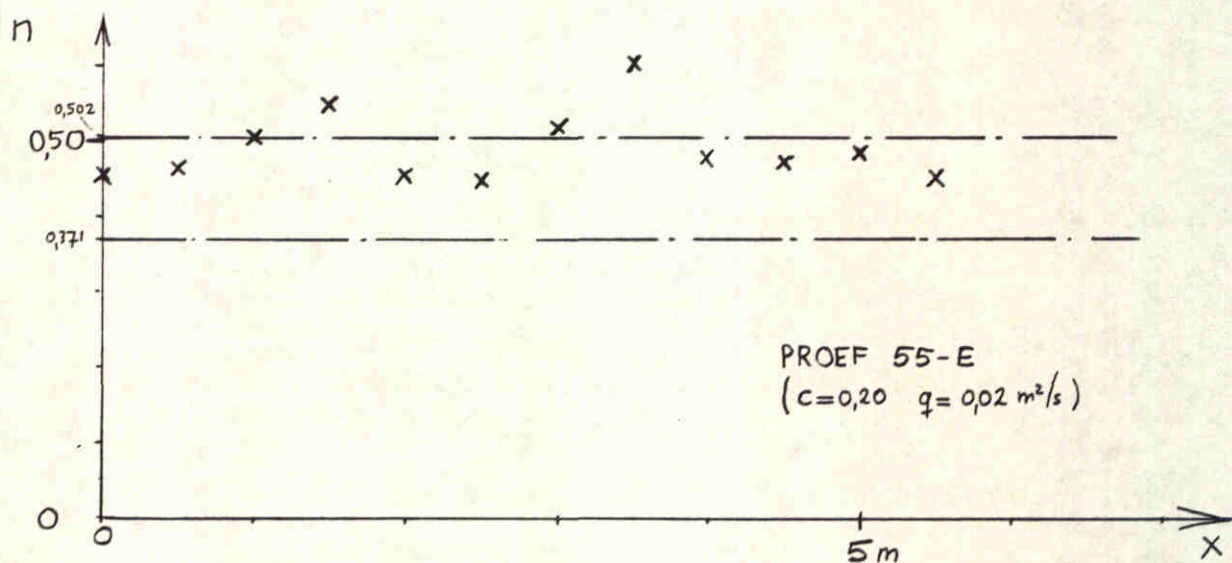
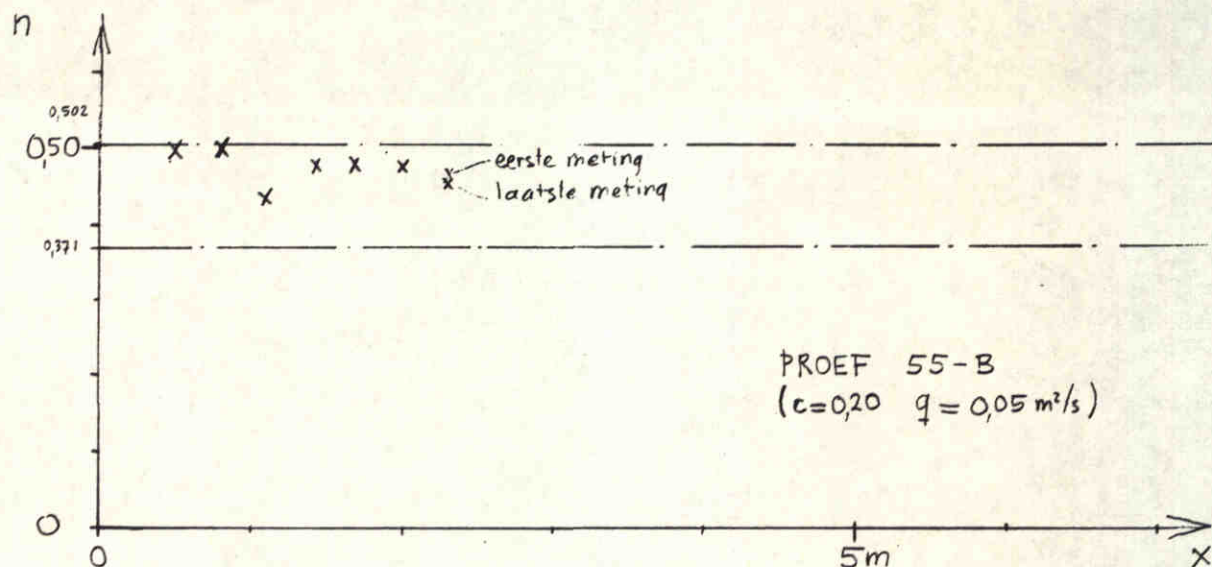
PORIENVOLUME, WATERDRUKKEN EN VOOR PLAATSHOOGTE GECORRIGEERD, DRUKVERSCHIL TIJDENS PROEF 60A - D (VERVOLG)

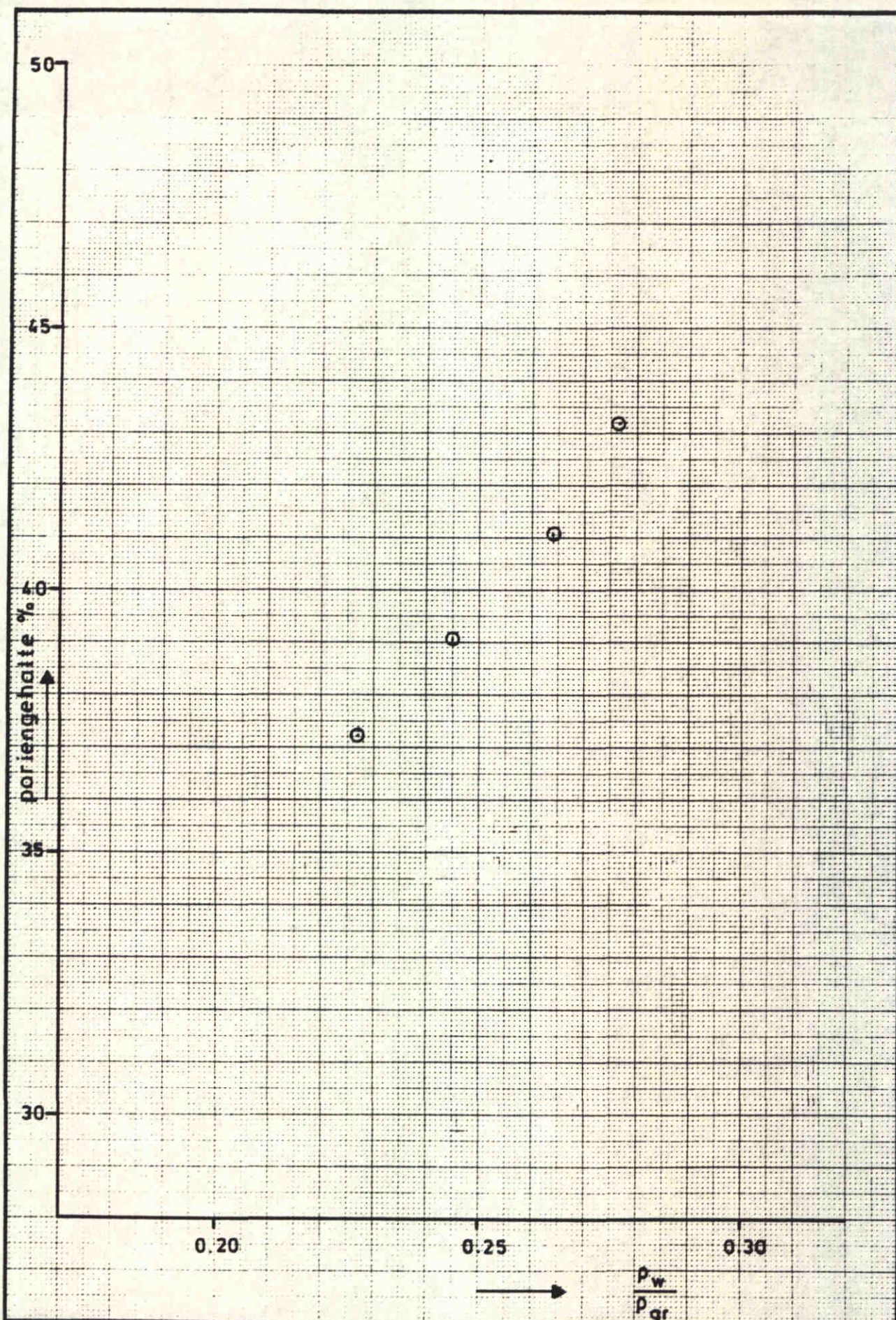
CO- '287140

FIG. 7 B

form.
A4







laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 569223

telex: 38234 soil nl

IJ KING PORIENVOLUME ZAND $D_{50} = 225 \mu m$

$\pm 1400 \Omega cm$

d.d. 87 - 02 - 12

CO - 287140

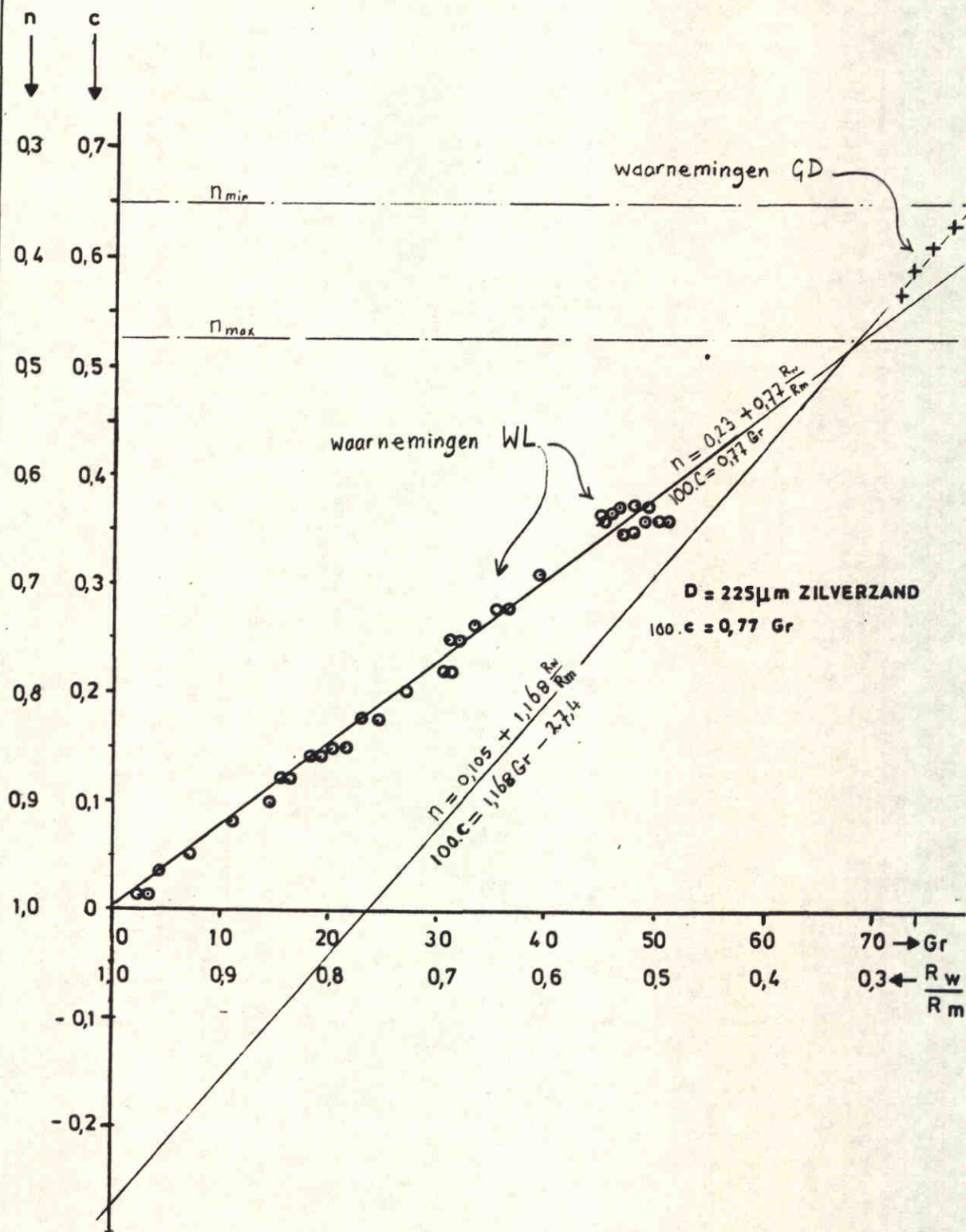
FIG. 11

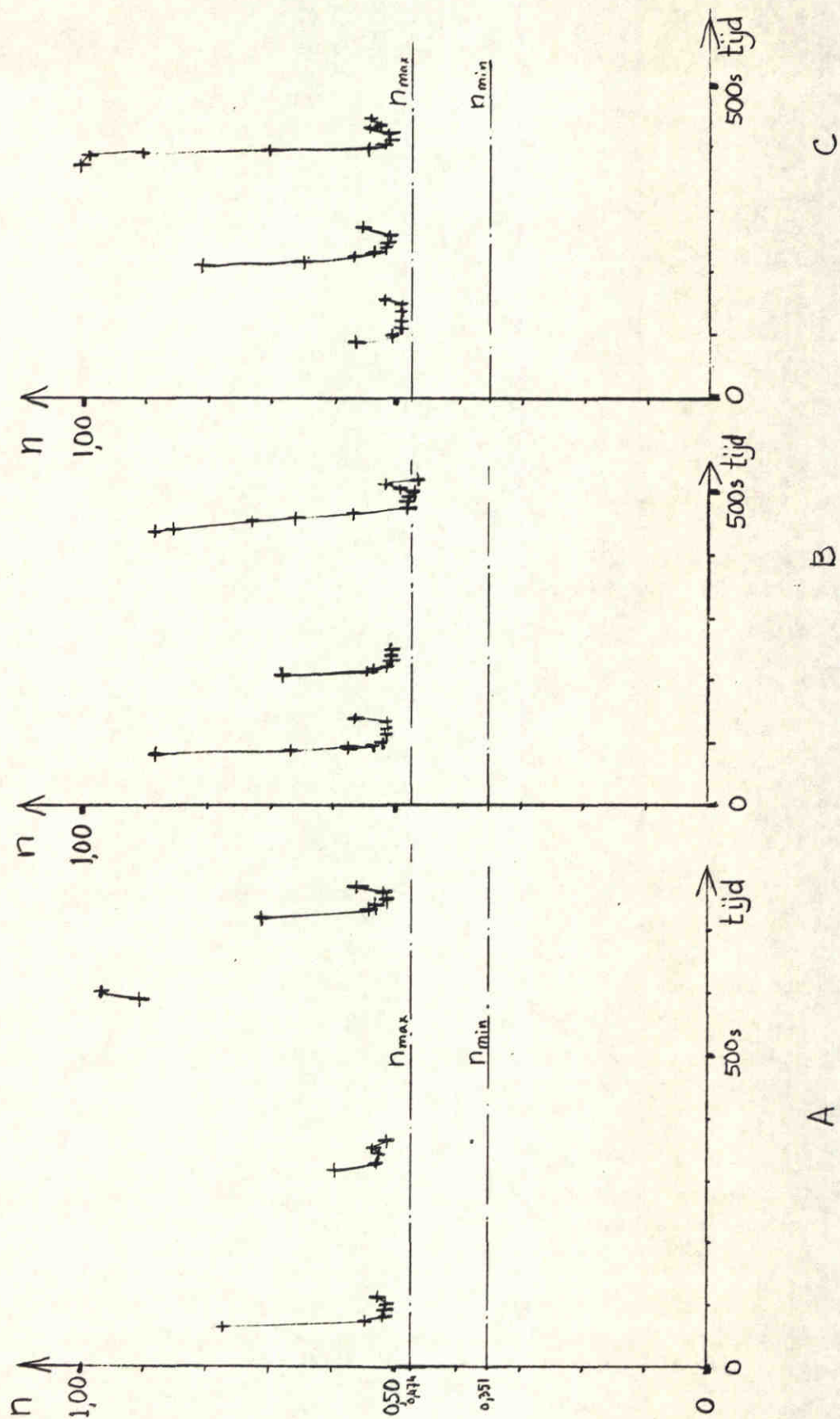
g.e.

g.e.c.

form.

A₄





GRONDMECHANICA
DELFT

Postbus 69, 2600 AB Delft
Telefoon (015) 56 92 23

Telefax (015) 61 08 21
Telex 38234 soil nl

d.d.

87-02-13

get.

gez.

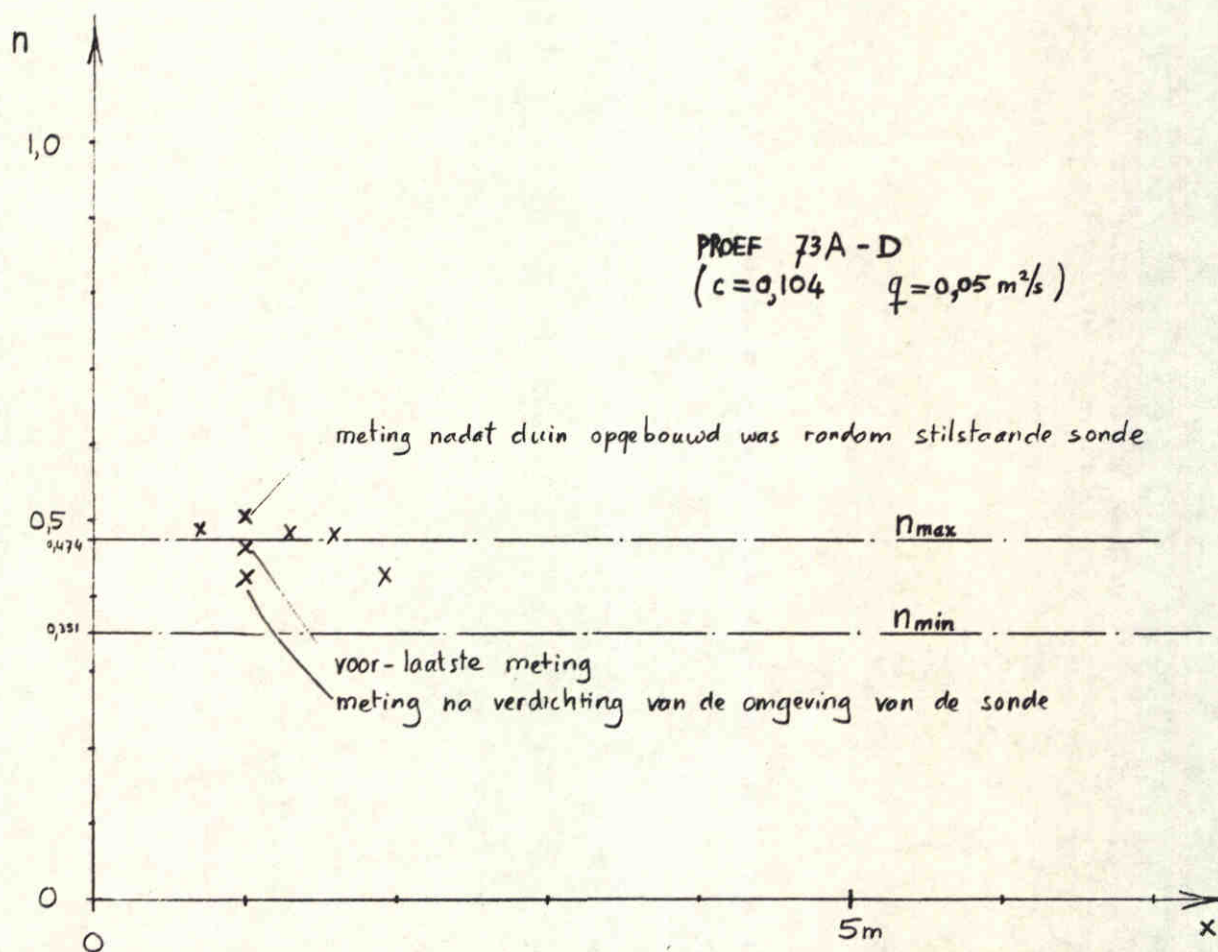
PORIENVOLUME TIJDENS PROEVEN 73A -A, B EN C
($D_{50} = 225 \mu m$ $c = 0,104$ $q = 0,05 m^2/s$)

CO- 287140

FIG. 13

form.

A4



p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands