

01 R 783 - II



waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

zandtransport in suspensie

berekening zandtransport in suspensie bij een
permanente en eenparige stroming

AFGEHANDELD

verslag onderzoek

R 783 deel II

maart 1980

19.AUG.1980

BIBLIOTHEEK
Waterlooplekundig Laboratorium
Postbus 177 - DELFT
NEDERLAND

zandtransport in suspensie

berekening zandtransport in suspensie bij een
permanente en eenparige stroming

verslag onderzoek

R 783 deel II

maart 1980

INHOUD

blz.

<u>1</u>	<u>Inleiding</u>	1
<u>2</u>	<u>Gevoeligheid van de concentratieverdeling voor een aantal parameters</u> .	2
2.1	Algemeen	2
2.2	Invloed verdeling ε_s op concentratieverdeling	2
2.3	Invloed absolute waarde ε_s op concentratieverdeling	4
2.4	Invloed sedimentvolume op concentratieverdeling	4
2.5	Invloed $W(c)$ op concentratieverdeling	5
2.6	Invloed $\kappa(c)$ op concentratieverdeling	6
2.7	Konklusies	7
<u>3</u>	<u>Keuze randvoorwaarde bij de bodem</u>	8
3.1	Beschouwde mogelijkheden	8
3.2	Literatuurstudie entrainment	8
3.3	Bodemconcentratie als functie van stroom- en materiaalparameters	16
3.4	Keuze	16
<u>4</u>	<u>Afleiding uitdrukking concentratie bij de bodem</u>	17
4.1	Nauwkeurigheid gebruikte methode	17
4.2	Berekening concentratie bij de bodem uit gootwaarnemingen	20
4.3	Koncentratie bij de bodem als functie van stroom- en materiaal- parameters	23
4.4	Bruikbaarheid gevonden relatie tussen c_o en $u_{*'}'$	24
<u>5</u>	<u>Berekening suspensietransport</u>	27
5.1	Methode waarbij c_o gedefiniëerd op $y = k/33$ een functie is van $u_{*'}'$	27
5.2	Methode waarbij c_o gedefiniëerd op $y = k$ een functie is van $u_{*'}'$	27
<u>6</u>	<u>Toetsing aan gootwaarnemingen</u>	29
<u>7</u>	<u>Toetsing aan natuurmetingen</u>	31
<u>8</u>	<u>Samenvatting</u>	34
<u>9</u>	<u>Konklusies en aanbevelingen voor verder onderzoek</u>	37
9.1	Konklusies	37
9.2	Aanbevelingen voor verder onderzoek	37

LITERATUUR

APPENDICES

TABELLEN

- 1...4 Aandeel laagje bij de bodem ter dikte van $k/33$ in het totale suspensie-transport S_0 voor verschillende c_0
- 5 Resultaten van 86 gootmetingen en de daaruit berekende concentratie bij de bodem
- 6 Vergelijking schuifspanningssnelheid uit snelheidsprofiel en uit verhang
- 7 Berekende k -waarde met schuifspanningssnelheid uit snelheidsprofiel
- 8 Resultaten berekening proef 38
- 9 Resultaten berekening proef 6
- 10 Resultaten van 105 gootmetingen gebruikt voor de toetsing van de berekeningsmethode voor suspensietransport

FIGUREN

- 1 Beschouwde verdelingen uitwisselingscoëfficiënt van sediment
- 2...5 Invloed verdeling uitwisselingscoëfficiënt van sediment op concentratieverdeling voor verschillende Z-waarden
- 6 Invloed absolute waarde uitwisselingscoëfficiënt van sediment op concentratieverdeling
- 7...10 Invloed in rekening brengen van door sediment ingenomen volume op concentratieverdeling voor verschillende Z-waarden
- 11 Invloed valsnelheid als functie van concentratie op concentratieverdeling
- 12 en 13 Vergelijking concentratieverdeling volgens W.L. met concentratieverdeling volgens Hjelmfelt en Lenau voor $c_a = 5$ en 10%
- 14...17 Invloed κ als functie van concentratie op concentratieverdeling voor verschillende Z-waarden
- 18 Beddingvorm als functie van stroom- en materiaalparameters volgens Simons en Richardson
- 19 Wrijvingsfaktor f' voor stroming over een vlak bed volgens Lovera en Kennedy
- 20 c_o op $y = k/33$ als functie van $\frac{u_*'}{W}$
- 21 c_o op $y = k/33$ als functie van $\frac{u_*'}{W}$
- 22...31 c_o op $y = k/33$ als functie van $\frac{u_*'}{W}$ voor verschillende korreldiameters
- 32 c_o op $y = k/33$ als functie van $\frac{u_*'}{W}$
- 33 Kumulatieve frekwentiefuncties voor c_o wanneer alle parameters worden gevarieerd
- 34 S_o als functie van c_o
- 35 c_o op $y = k/33$ als functie van $\frac{u_*'}{W}$ voor verschillende korreldiameters
- 36 c_o op $y = k$ als functie van $\frac{u_*'}{W}$ voor verschillende korreldiameters
- 37 en 38 Afwijking tussen berekend en gemeten transport als functie van het percentage waarnemingen

SYMBOLLEN

dimensie

A	oppervlakte; konstante	L^2 ; -
B	konstante	-
C	konstante	-
C_D	konstante in uitdrukking voor sleepkracht	-
C_L	konstante in uitdrukking voor liftkracht	-
D	korreldiameter	L
F_D	sleepkracht	MLT^{-2}
F_L	liftkracht	MLT^{-2}
F_N	normale kracht	MLT^{-2}
F_T	tangentiale kracht	MLT^{-2}
Fr	getal van Froude	-
Q	debiet	L^3T^{-1}
R	hydraulische straal	L
Re	getal van Reynolds	-
S	totaal suspensietransport	$ML^{-1}T^{-1}$
S_{ber}	berekend suspensietransport	$ML^{-1}T^{-1}$
S_{gem}	gemeten suspensietransport	$ML^{-1}T^{-1}$
T	temperatuur	$^{\circ}C$
W	valsnelheid	LT^{-1}
$W(c)$	valsnelheid bij concentratie c	LT^{-1}
$W(o)$	valsnelheid bij concentratie c = 0	LT^{-1}
$Z = \frac{W}{\beta k u_*}$	exponent in de concentratieverdeling	-
a	afstand tot bodem; konstante	L; -
b	breedte; konstante	L; -
c	concentratie	-
c_a	concentratie op $y = a$ boven de bodem	-
c_b	concentratie bij de bodem	-
c_m	gemiddelde concentratie over de diepte	-
c_o	maximum concentratie bij de bodem	-
f	wrijvingsfactor van Darcy-Weisbach	-
f'	idem betrokken op de korrels	-
f''	idem betrokken op de beddingvorm	-
g	versnelling van de zwaartekracht	LT^{-2}
h	waterdiepte	L
i	verhang	-
k	maat voor bodemruwheid; konstante	L; -

SYMBOLLEN (vervolg)

n	aantal; konstante	-
p	natte omtrek; druk	L; ML ⁻¹ T ⁻²
$s = \frac{\rho_s}{\rho}$	relatieve dichtheid	-
t	tijd	T
\bar{u}	gemiddelde stroomsnelheid in x-richting	LT ⁻¹
$u_{\frac{x}{x}}$	schuifspanningssnelheid in x-richting	LT ⁻¹
$u'_{\frac{x}{x}}$	schuifspanningssnelheid betrokken op de korrels	LT ⁻¹
u_c	stroomsnelheid bij de bodem voor begin van beweging	LT ⁻¹
u_d	sedimentatiesnelheid	LT ⁻¹
u_e	erosiesnelheid	LT ⁻¹
v	stroomsnelheid	LT ⁻¹
x	horizontale afstand in stroomrichting	L
y	vertikale afstand	L
α	helling talud	-
β	relatie tussen ϵ_s en ϵ_m ; konstante	-
ϵ_m	uitwisselingscoëfficiënt van impuls	L ² T ⁻¹
ϵ_s	uitwisselingscoëfficiënt van sediment	L ² T ⁻¹
η	relatieve diepte	-
κ	konstante van Von Karman	-
$\kappa(c)$	konstante van Von Karman als functie van concentratie	-
μ	dynamische viscositeit; gemiddelde waarde	ML ⁻¹ T ⁻¹
ν	kinematische viscositeit	L ² T ⁻¹
ρ	dichtheid van water	ML ⁻³
ρ_s	dichtheid van sediment	ML ⁻³
ϕ	helling van natuurlijk talud	-
ψ	empirische correctiefactor van Ordonez	-
σ	standaardafwijking	-

ZANDTRANSPORT IN SUSPENSIE

Berekening zandtransport in suspensie bij een permanente en eenparige stroming

1 Inleiding

In dit verslag wordt een methode gepresenteerd, waarmee bij een permanente en eenparige stroming het zandtransport in suspensie kan worden berekend. Bij de opzet van deze methode is gebruik gemaakt van de uit de literatuur bekende kennis, zoals die is vastgelegd in het verslag R 783 deel I: "Zandtransport in suspensie; studie diffusietheorie". De methode is semi-empirisch en is afgeleid aan de hand van gootwaarnemingen.

In hoofdstuk 2 wordt de gevoeligheid nagegaan van de concentratieverdeling voor een aantal parameters. In hoofdstuk 3 wordt een keuze gemaakt voor de randvoorwaarde bij de bodem. In hoofdstuk 4 wordt een uitdrukking afgeleid voor de concentratie bij de bodem. In hoofdstuk 5 wordt een tweetal berekeningsmethoden voor zandtransport in suspensie gegeven. In de hoofdstukken 6 en 7 worden de berekeningsmethoden getoetst aan respectievelijk gootwaarnemingen en de natuur.

De opdracht voor dit onderzoek is gegeven door de Hoofdafdeling Waterloopkunde van de Deltadienst van Rijkswaterstaat.

Het onderzoek is verricht door ir. N.J. v. Wijngaarden, die ook dit verslag heeft samengesteld.

2 Gevoeligheid van de concentratieverdeling voor een aantal parameters

2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt de gevoeligheid van de concentratieverdeling voor een aantal belangrijke parameters nagegaan. De volgende parameters zullen achtereenvolgens worden behandeld:

- de verdeling van de uitwisselingscoëfficiënt van sediment
- de absolute waarde van de uitwisselingscoëfficiënt van sediment
- het in rekening brengen van door sediment ingenomen volume
- de valsnelheid als functie van de concentratie
- de "konstante" κ als functie van de concentratie

Bij de parameters, waarbij de concentratie bij de bodem een rol speelt, worden voor deze concentratie ongewoon hoge waarden genomen met de bedoeling de invloed goed tot uiting te laten komen.

2.2 Invloed verdeling ϵ_s op concentratieverdeling

Volgens het onderzoek van Jobson en Sayre, waarbij de invloed van de verdeling van ϵ_s op de concentratieverdeling is berekend voor het geval van aan het wateroppervlak geïnjecteerd materiaal, is de verdeling van ϵ_s niet zo belangrijk (zie paragraaf 5.2 van verslag R 783, deel I). De bij het onderzoek van Jobson en Sayre gebruikte verdelingen zijn:

$$1 \quad \epsilon_s = \kappa h u_{*} \eta (1-\eta)$$

$$2 \quad \epsilon_s = 1/6 \kappa h u_{*}$$

$$3 \quad \epsilon_s = 1/3 \kappa h u_{*} (1-\eta)$$

waarbij $\eta = \frac{y}{h}$.

Het gemiddelde voor alle verdelingen is: $\bar{\epsilon}_s = 1/6 \kappa h u_{*}$. Alleen voor de verdeling nr. 1 is $\epsilon_s = 0$ voor $\eta = 0$.

Voor de bovengenoemde en andere verdelingen van ϵ_s zijn de bijbehorende concentratieverdelingen met elkaar vergeleken.

De volgende verdelingen zijn onderzocht (zie figuur 1):

- 1 Rouse : $\epsilon_s = \kappa h u_{*} \eta (1-\eta)$
- 2 Hunt : $\epsilon_s = 5/3 \kappa h u_{*} (1-\eta) \{1 - (1-\eta)^{\frac{1}{2}}\}$
- 3 Form. A: $\epsilon_s = 1/3 \kappa h u_{*} \eta$
- 4 Form. B: $\epsilon_s = 1/3 \kappa h u_{*} (1-\eta)$
- 5 Form. C: $\epsilon_s = 1/6 \kappa h u_{*}$

Het gemiddelde voor alle verdelingen bedraagt weer: $\bar{\epsilon}_s = 1/6 \kappa h u_{*}$.
 Ingevuld in de diffusievergelijking van de vorm:

$$\epsilon_s \frac{dc}{dy} + cW = 0$$

worden de volgende uitdrukkingen voor de concentratieverdelingen gevonden:

- 1 Rouse : $\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a}\right)^Z$
- 2 Hunt : $\frac{c}{c_a} = \left\{ \left(\frac{h-y}{h-a}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1 - \left(\frac{h-a}{h}\right)^{\frac{1}{2}}}{1 - \left(\frac{h-y}{h}\right)^{\frac{1}{2}}}\right) \right\}^{1,2Z}$
- 3 Form. A: $\frac{c}{c_a} = \left(\frac{a}{y}\right)^{3Z}$
- 4 Form. B: $\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-y}{h-a}\right)^{3Z}$
- 5 Form. C: $\frac{c}{c_a} = e^{-\frac{6Z}{h}(y-a)}$

In de figuren 2...5 zijn deze concentratieverdelingen voor een aantal waarden van Z weergegeven. In alle gevallen is als referentie genomen $a/h = 0,05$. Het blijkt, dat de concentratieverdeling volgens Hunt niet veel afwijkt van die volgens Rouse. Voor $y/h > 0,5$ wijkt ook de concentratieverdeling volgens Form. C nauwelijks van die volgens Rouse af. Voor $y/h < 0,5$ geeft Form. C grotere concentraties, maar de verschillen zijn kleiner naarmate Z kleiner wordt. De concentratieverdelingen volgens Form. A en Form. B wijken het meest af, met de grootste afwijkingen bij Form. A. In tegenstelling tot wat Jobson en Sayre vonden blijkt de concentratieverdeling niet geheel ongevoelig voor de verdeling van ϵ_s . De concentratieverdeling voor een konstante ϵ_s sluit nog redelijk aan bij die voor een parabolische verdeling van ϵ_s , vooral voor kleine waarden van Z.

2.3 Invloed absolute waarde ϵ_s op concentratieverdeling

De absolute waarde van ϵ_s wordt bepaald door de faktor β :

$$\epsilon_{s_1} = \beta \epsilon_s \quad (2.1)$$

Als wordt uitgegaan van de concentratieverdeling volgens Rouse, dan geldt:

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^{Z/\beta} \quad (2.2)$$

$$\text{Stel: } Z_1 = \frac{Z}{\beta}$$

Wanneer $Z = 0,50$, dan is:

$$\text{voor } \beta = 2 \rightarrow Z_1 = 0,25$$

$$\text{voor } \beta = 1 \rightarrow Z_1 = 0,50$$

$$\text{voor } \beta = 0,5 \rightarrow Z_1 = 1,00$$

In figuur 6 is voor verschillende waarden van β de concentratieverdeling weer-gegeven. Als referentie is genomen: $a/h = 0,05$. Hoewel de aannamen van β extreem zijn, blijkt hieruit toch wel de gevoeligheid voor de waarde van β .

2.4 Invloed sedimentvolume op concentratieverdeling

Om deze invloed na te gaan wordt uitgegaan van de diffusievergelijking volgens Hunt. Voor ϵ_s wordt de door Rouse gebruikte parabolische verdeling aangehouden. De op deze wijze gevonden concentratieverdeling ziet er als volgt uit:

$$\frac{c}{c_a} = \frac{\left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^{Z_1}}{(1-c_a) + c_a \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^{Z_1}} \quad (2.3)$$

De dimensieloze concentratie is een functie van c_a . In de figuren 7...10 worden voor verschillende waarden van Z de concentratieverdelingen, waarbij rekening

is gehouden met het door het sediment ingenomen volume (Rouse nieuw) vergeleken met de concentratieverdelingen volgens Rouse (Rouse oud). In alle gevallen is als referentie genomen $a/h = 0,05$. Het blijkt, dat de invloed van het in rekening brengen van het door het sediment ingenomen volume niet zo groot is, maar dat, zoals is te verwachten, de concentratie toeneemt met toenemende c_a .

2.5 Invloed $W(c)$ op concentratieverdeling

Er is uitgegaan van de diffusievergelijking volgens Hunt:

$$\varepsilon_s \frac{dc}{dy} + (1-c) cW = 0 \quad (2.4)$$

Uit het literatuuronderzoek (zie paragraaf 4.4.1 van verslag R 783 deel I) is gebleken, dat voor het sediment, dat bij suspensietransport gebruikelijk is, de volgende uitdrukking voor de valsnelheid als functie van de concentratie het best met metingen overeen komt (Richardson en Zaki):

$$W(c) = W(o) (1-c)^{4,45} Re^{-0,1} \quad (2.5)$$

De exponent $4,45 Re^{-0,1}$ is afhankelijk van $Re = W D/\nu$ en is voor sediment van $D = 150 \text{ à } 200 \mu\text{m}$ ongeveer gelijk aan 4. De uitdrukking voor $W(c)$ wordt dan:

$$W(c) = W(o) (1-c)^4 \quad (2.6)$$

De aldus gevonden uitdrukking sluit goed aan bij de metingen van Brauer en Kriegel. $W(c)$ ingevuld in de diffusievergelijking levert de volgende vergelijking op:

$$\ln \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^Z = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{n(1-c)^n} - \sum_{n=1}^4 \frac{1}{n(1-c_a)^n} + \ln \left(\frac{1-c_a}{c_a} \frac{c}{1-c} \right) \quad (2.7)$$

Hierin is de randvoorwaarde ($y=a, c=c_a$) verwerkt. Met behulp van een benaderingsmethode is voor elke waarde van y/h een waarde voor c/c_a berekend, zodanig, dat de fout in c ten hoogste 10/00 bedraagt.

Voor c_a is 10% aangehouden. De op deze wijze gevonden concentratieverdeling is voor een aantal waarden van Z in figuur 11 (W.L.) weergegeven en vergeleken met de voor hoge concentraties aangepaste concentratieverdeling volgens Rouse

(Rouse nieuw; deze concentratieverdeling verschilt met die van Rouse door toepassing van de diffusievergelijking volgens vergelijking (2.4)). Als referentie is genomen $a/h = 0,05$. Het blijkt, dat door het invoeren van de valsnelheid als functie van de concentratie de concentraties groter worden. De invloed is groter naarmate de waarde van Z kleiner is. Dit is ook te verwachten, daar de dan optredende concentraties groter zijn, waardoor de valsnelheid meer wordt gereduceerd.

De door Hjelmfelt en Lenau gebruikte valsnelheid als functie van de concentratie (zie paragraaf 5.1 van verslag R 783 deel I) geldt alleen voor concentraties kleiner dan 10%, omdat voor grotere concentraties de afwijking met de metingen van Brauer en Kriegel te groot worden. In de figuren 12 en 13 zijn voor een aantal waarden van Z de concentratieverdelingen volgens W.L. vergeleken met die volgens Hjelmfelt en Lenau. Voor de in deze figuren gegeven concentratieverdelingen volgens W.L. is uitgegaan van de diffusievergelijking volgens Rouse om een goede vergelijking mogelijk te maken. Figuur 12 geeft de concentratieverdelingen voor $c_a = 5\%$ en figuur 13 voor $c_a = 10\%$. In alle gevallen is als referentie genomen $a/h = 0,05$. Het blijkt, dat de concentraties volgens W.L. kleiner zijn dan die volgens Hjelmfelt en Lenau. De verschillen zijn voor $c_a = 10\%$ geringer dan voor $c_a = 5\%$. Dit is begrijpelijk, daar bij Hjelmfelt en Lenau de valsnelheid onvoldoende afneemt met de concentratie.

2.6 Invloed $\kappa(c)$ op concentratieverdeling

Uitgegaan wordt van de door Ippen gegeven κ als functie van de concentratie (zie paragraaf 4.3.2 van verslag R 783 deel I):

$$\kappa(c) = \kappa \frac{1 + c_m \frac{\rho_s - \rho}{\rho}}{1 + 2,5 \frac{c}{c_o}} \quad (2.8)$$

Hierin is c_o de concentratie bij de bodem en c_m de gemiddelde concentratie over de hoogte. c_m is berekend voor het geval, dat ϵ_s konstant is (Form. C, zie paragraaf 2.2):

$$c_m = \frac{c_o}{6Z} (1 - e^{-6Z})$$

De exponent in de formule van Rouse:

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^{Z'} \quad (2.9)$$

wordt dan:

$$Z' = Z \frac{1 + 2,5 c_o}{1 + \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{c_o}{6Z'} (1 - e^{-6Z'})} \quad (2.10)$$

In de figuren 14...17 zijn voor een aantal waarden van Z de op deze wijze gevonden concentratieverdelingen (Rouse met $\kappa(c)$) vergeleken met de concentratieverdelingen volgens Rouse (Rouse), waarbij de bodemconcentratie is gevariëerd. In alle gevallen is als referentie genomen $a/h = 0,05$. Het blijkt, dat als gevolg van het in aanmerking nemen van κ als functie van de concentratie de concentraties kleiner worden; naarmate c_o groter wordt nemen de verschillen toe.

2.7 Konklusies

- De concentratieverdeling is niet geheel ongevoelig voor de verdeling van ϵ_s . De concentratieverdeling voor een konstante ϵ_s sluit echter vooral voor kleine waarden van Z nog redelijk aan bij die voor een parabolische verdeling van ϵ_s . Veel gevoeliger is de concentratieverdeling voor de absolute waarde van ϵ_s .
- Het in rekening brengen van het door het sediment ingenomen volume werkt concentratieverhogend, maar de invloed is niet groot.
- Zowel de valsnelheid (als functie van de concentratie) als de koëfficiënt κ (als functie van de concentratie) zijn van invloed op de concentratieverdeling. Het verschil is, dat de invloed van de concentratie op de valsnelheid concentratieverhogend en op de koëfficiënt κ concentratieverlagend werkt. Hierbij speelt voor de valsnelheid de concentratie ter plaatse een belangrijke rol, terwijl voor de koëfficiënt κ de plaatselijke concentratie ook wel meespeelt, maar de concentratie bij de bodem (vooral voor de grotere Z-waarden) maatgevend is.

3 Keuze randvoorwaarde bij de bodem

3.1 Beschouwde mogelijkheden

Rekening houdend met het gevoeligheidsonderzoek van hoofdstuk 2 en uitgaande van de bestaande kennis, zoals die is neergelegd in verslag R 783 deel I, is het mogelijk een redelijk goede beschrijving te geven van de verdeling van de concentratie in de vertikaal. Anders is het gesteld met de randvoorwaarde bij de bodem. Het is gebruikelijk de bodemconcentratie te bepalen uit het bodemtransport, waarbij een aanname wordt gedaan voor de dikte van de laag waarbinnen dit transport plaatsvindt. Per onderzoeker worden nogal uiteenlopende dikten voor de bodemlaag gehanteerd, waardoor grote verschillen in de berekende transporten ontstaan.

Een betere benadering is wellicht uit te gaan van het uitwisselingsmechanisme van sediment bij de bodem (entrainment). In dit hoofdstuk wordt een korte samenvatting gegeven van hetgeen in de literatuur (tot 1973) hierover bekend is.

Een andere mogelijkheid is een relatie te vinden tussen de bodemconcentratie en één of meer stroom- en materiaalparameters.

3.2 Literatuurstudie entrainment

Over het uitwisselingsmechanisme van sediment bij de bodem (entrainment) is in de literatuur niet veel bekend.

Sutherland [1] geeft gebaseerd op laboratoriumwaarnemingen een kwalitatieve beschouwing over de wijze waarop deeltjes door een turbulente stroom worden bewogen. Het blijkt, dat de beweging van sediment hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door het doordringen van wervels door de viskeuze sublaag. De viskeuze sublaag is daardoor instabiel. De indruk wordt gewekt, dat waterdeeltjes vanuit de sublaag worden gelanceerd in de stroom.

Sutherland heeft experimenten uitgevoerd met een "pulsating jet", waarmee hij het proces heeft gesimuleerd. Hij komt tot de volgende hypothese voor entrainment:

bij het begin van beweging:

- turbulente wervels dringen in de viskeuze sublaag en treffen de korrels.

- de wervelende beweging van het water versterkt plaatselijk de schuifspanning en veroorzaakt het rollen van de korrels.
- bij duinen begint de beweging het eerst, daar, waar de meeste turbulentie kan worden verwacht.

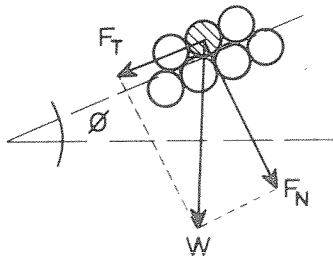
bij grote sedimenttransporten

- turbulente wervels treffen de buiten het oppervlak uitstekende korrels.
- de buiten het oppervlak uitstekende korrels worden door stroomsnelheden, die een hoek maken met de bodem, in de hoofdstroom geworpen.
- drukgradiënten en botsing van de korrels resulteren in een liftkracht op de korrels.
- bij duinen helpt de vorm van de duinen het entrainmentproces.

Le Feuvre [3] leidt met behulp van een nieuwe theorie voor het begin van bewegen een uitdrukking af voor de opname-snelheid van sediment bij de bodem.

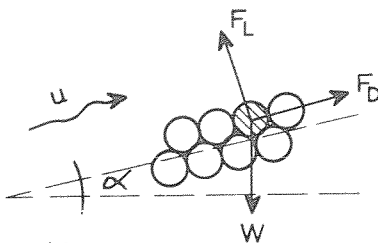
Het begin van beweging wordt gebaseerd gedacht op de werking van drie krachten: sleepkracht, liftkracht en zwaartekracht. Andere krachten worden niet in beschouwing genomen: quasi-permanente beschouwing.

De simpelste vorm van begin van beweging is:



$$\operatorname{tg} \phi = \frac{F_T}{F_N} \quad (3.1)$$

Meer gekompliceerd wordt het wanneer water over het sediment stroomt:



Nu geldt:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{F_D - W \sin \alpha}{W \cos \alpha - F_L} \quad (3.2)$$

waarbij:

$$F_D = C_D k_1 D^2 \frac{\rho u^2}{2} \quad (3.3)$$

$$F_L = C_L k_2 D^2 \frac{\rho u^2}{2} \quad (3.4)$$

De konstanten k_1 en k_2 hebben betrekking op de korrelvorm:

$$W = k_3 (\rho_s - \rho) g D^3 \quad (3.5)$$

Vergelijkingen (3.3), (3.4) en (3.5) ingevuld in vergelijking (3.2) geeft:

$$\frac{u_c^2}{(s-1) g D} = \frac{2 k_3 (\operatorname{tg} \phi \cos \alpha + \sin \alpha)}{k_1 + k_2 \frac{C_L}{C_D} \operatorname{tg} \phi} \frac{1}{C_D} \quad (3.6)$$

waarbij:

u_c = stroomsnelheid bij bodem voor begin van beweging

s = relatieve dichtheid: ρ_s / ρ

Voor een halve bol geldt: $C_L = 0,8 C_D$. In werkelijkheid steekt een deeltje meer of minder uit en kan onderdruk aanwezig zijn. Aangenomen wordt, dat $C_L = C_D$. Bovendien wordt aangenomen, dat $k_1 = k_2$ en $C_D = k_4 C'_D$, waarbij C'_D geldt voor een vrij vallend deeltje met hetzelfde Reynolds getal.

Vergelijking (3.6) gaat nu over in:

$$\frac{u_c^2}{(s-1) g D} = \left(\frac{\operatorname{tg} \phi \cos \alpha + \sin \alpha}{1 + \operatorname{tg} \phi} \right) \frac{\kappa}{C'_D} \quad (3.7)$$

waarbij $\kappa = 2 k_3 / (k_1 k_4)$.

κ is onafhankelijk van de oriëntatie van de krachten. Onderzoek wijst uit, dat $\kappa = 8,2$.

Onder aanname van een logaritmische snelheidsverdeling en gebruikmakend van verricht onderzoek berekent Le Feuvre met vergelijking (3.7) de hoogte boven de bodem, waarop u_c optreedt: $y = 0,6 D$ met $D =$ diameter deeltjes. Vergelijking (3.7) is door Le Feuvre gecontroleerd door hiermee de parameter van Shields te berekenen. Hij vindt een goede overeenkomst bij $\kappa = 8,2$ en $y = 0,6 D$.

Le Feuvre stelt, dat de mate van opnemen van sediment evenredig is met het verschil tussen F_T / F_N en $\operatorname{tg} \phi$ ($= F_T / F_N$ bij het begin van beweging).

Er wordt aangenomen dat bij over elkaar rollende deeltjes F_L verwaarloosbaar is, zodat vergelijking (3.2) overgaat in:

$$\frac{F_T}{F_N} = \frac{F_D - W \sin \alpha}{W \cos \alpha} \quad (3.8)$$

Substitutie van de vergelijkingen (3.3) en (3.5) in vergelijking (3.8) geeft:

$$\frac{F_T}{F_N} = \frac{C'_D}{\kappa \cos \alpha} \frac{u^2}{(s-1) g D} - \operatorname{tg} \alpha \quad (3.9)$$

met $\kappa = 8,2$ en $y = 0,6 D$.

Het vertikaal transport wordt uitgedrukt in een snelheid (= transport per eenheid van bodemoppervlak per eenheid van tijd):

$$u_t = u_e - u_d \quad (3.10)$$

De opname-snelheid (u_e) is dus een functie van (zie vergelijking (3.9)):

$$\frac{u_e}{u} = f \left[\frac{C'_D}{8,2 \cos \alpha} \frac{u^2}{(s-1) g D} - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \phi \right] \quad (3.11)$$

Le Feuvre heeft een apparaat ontwikkeld, waarmee hij het verband van vergelijking (3.11) heeft bepaald:

$$\frac{u_e}{u} = 10^{-3} \left[\frac{C'_D}{8,2 \cos \alpha} \frac{u^2}{(s-1) g D} - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \phi \right]^{5/2} \quad (3.12)$$

waarbij: u_e , u = stroomsnelheid juist boven de bodem op $2,2 D_m$

D = diameter sediment

α = talud helling

ϕ = helling van het natuurlijk talud

s = relatieve dichtheid: ρ_s/ρ

g = versnelling van de zwaartekracht

C'_D = weerstandskoefficiënt voor vallend deeltje in stilstaand water

Het door Le Feuvre afgeleide verband geldt slechts voor de situatie van het vlakke bed.

Engelund [2] heeft een verband afgeleid, dat ook geldt voor een sinusvormig bed. De grondgedachte is, dat bij een permanente en eenparige stroom dichtbij de bodem de gemiddelde concentratie niet gehandhaafd wordt door de turbulente men-

ging van de stroom, maar door drukgradiënten.

De bewegingsvergelijking in tensor-notatie is:

$$\frac{dv_i}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.13)$$

Dichtbij de bodem wordt de dichtheid ρ van het water-sediment mengsel beïnvloed door de concentratie:

$$\rho = \rho_o \{1 + (s-1) c\} \quad (3.14)$$

met

$$s = \frac{\rho_s}{\rho_o}$$

Omdat het om kleine verschillen gaat, kan vergelijking (3.14) als volgt worden geschreven:

$$\frac{1}{\rho} \approx \frac{1}{\rho_o} \{1 - (s-1) c\} \quad (3.15)$$

In de bewegingsvergelijking wordt gesubstitueerd:

$$\begin{aligned} v_i &= u_i + u'_i \\ p &= \bar{p} + p' \\ c &= \bar{c} + c' \end{aligned} \quad (3.16)$$

Bij een eenparige en permanente stroom gaat na middeling over de tijd vergelijking (3.13) over in:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j + \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{(s-1)}{\rho_o} \overline{\frac{\partial p'}{\partial x_i} c'} + g_i + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3.17)$$

Het krachtenspel op een deeltje vlak bij de bodem, waar de turbulentie gering is (viskeuze sublaag), ziet er als volgt uit:



$$\frac{1}{2} C_D A \rho v^2 = 3 \pi \mu D v \text{ (Stokes gebied)}$$

$$\rho_s g + \frac{\partial p}{\partial x_2} + (\text{liftkracht, die van dezelfde vorm is als de drukgradiënt})$$

De bewegingsvergelijking voor een sedimentdeeltje wordt nu:

$$- m \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} = (\rho g s + \frac{\partial p}{\partial x_2}) \frac{\pi}{6} D^3 - 3 \pi \mu D v \quad (3.18)$$

met x_1 = stroomrichting

x_2 = richting loodrecht op de bodem

In de evenwichtssituatie verdwijnt gemiddeld over de tijd de traagheid, zodat:

$$\rho g s + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_2} = \frac{18 \mu}{D^2} \bar{v} \quad (3.19)$$

In het volledig turbulente gebied geldt:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_2} = - \bar{\rho} g \text{ en } \bar{v} = W$$

Ingevuld in vergelijking (3.19) levert dit de formule voor de valsnelheid in het Stokes-gebied (kleine waarden van $Re = W D/\nu$):

$$W = \frac{(s-1) \rho g D^2}{18 \mu} \quad (3.20)$$

De uitdrukking voor de valsnelheid geeft ingevuld in vergelijking (3.19):

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_2} = - \rho g + \frac{\partial p^*}{\partial x_2} \quad (3.21)$$

waarbij:

$$- \frac{1}{\rho g (s-1)} \frac{\partial p^*}{\partial x_2} = 1 - \frac{\bar{v}}{W} \quad (3.22)$$

Uit vergelijking (3.17) betrokken op x_2 wordt verkregen:

$$\frac{\partial p^*}{\partial x_2} = -\bar{\rho} \frac{\partial u_2'^2}{\partial x_2} + (s-1) \frac{\partial p'}{\partial x_2} c' \quad (3.23)$$

Gesubstitueerd in vergelijking (3.22) geeft:

$$c' \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{p'}{\rho g} \right) = \frac{\bar{v}}{W} - 1 + \frac{1}{(s-1)g} \frac{\partial u_2'^2}{\partial x_2} \quad (3.24)$$

De betekenis van het bovenstaande kan als volgt worden verduidelijkt. Wanneer de schuifspanningssnelheid een zekere waarde heeft overschreden en de aanvoer van sediment in een goot met betonnen wanden en bodem is niet te groot, dan zal het sediment niet in contact komen met de bodem: wash load. Het linker lid van vergelijking (3.24) wordt verwaarloosbaar klein (immers weinig sediment, zodat $c' \approx 0$).

Uit vergelijking (3.22) blijkt, dat wanneer de drukgradiënt $\partial p^*/\partial x_2$ gelijk is aan de zwaartekracht $\rho g(s-1)$ de deeltjes gaan zweven ($\bar{v}=0$); als $\partial p^*/\partial x_2$ groter is, ontstaat er een buffer ($\bar{v} < 0$).

Bij toename van de aanvoer van sediment verandert de structuur van de stroom op nog onbekende wijze. Het linker lid van vergelijking (3.24) kan niet langer meer worden verwaarloosd. De transportcapaciteit is bereikt wanneer het linker lid zo groot wordt, dat bovengenoemde buffer verdwijnt: $\bar{v} = 0$. Vergelijking (3.24) gaat dan over in:

$$c' \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{p'}{\rho g} \right) = \frac{1}{(s-1)g} \frac{\partial u_2'^2}{\partial x_2} - 1 \quad (3.25)$$

Het linker lid van vergelijking (3.25) moet altijd positief zijn, want een periode met kleine concentratie ($c' < 0$) wordt vergezeld van een grotere liftkracht ($\partial p'/\partial x_2 < 0$) en een periode met grote concentratie ($c' > 0$) van een kleinere liftkracht ($\partial p'/\partial x_2 > 0$) om het evenwicht te handhaven. Dus c' en $\partial p'/\partial x_2$ hebben altijd hetzelfde teken.

Vergelijking (3.25) wordt dimensieloos gemaakt met:

$$\xi = \frac{u_* x_2}{v} ; p'/\rho u_*^2 ; u_2'^2/u_*^2$$

Hierbij wordt de concentratie aan de bodem c_b ingevoerd.

$$\frac{u_*^3 c_b}{g v} \underbrace{\left\{ \frac{c'}{c_b} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{p'}{\rho u_*^2} \right) \right\}}_a = \frac{u_*^3}{(s-1) g v} \underbrace{\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u_*'^2}{u_*} \right)}_b - 1 \quad (3.26)$$

a en b zijn konstant voor een gegeven s.

Engelund vindt dus de volgende "entrainment"-vergelijking:

$$(s-1) c_b = \frac{b}{a} - \frac{(s-1) g v}{a u_*^3} \quad (3.27)$$

Bovenstaande vergelijking geldt onder de volgende omstandigheden:

- vlak of sinusvormig bed
- deeltjes kleiner dan de dikte van de viskeuze sublaag
- in hoofdzaak suspensietransport

Engelund heeft berekeningen uitgevoerd met behulp van de grafieken van Einstein voor c_b , waaruit blijkt, dat vergelijking (3.27) asymptotisch nadert tot $c_b \approx 0,3$.

Uit vergelijking (3.27) volgt, dat er geen transport optreedt, als:

$$\frac{u_*^3}{(s-1) g v} < \frac{1}{b} \quad (c_b \leq 0)$$

Berekeningen van Engelund wijzen uit, dat $b \approx 0,5$. Er moet tenslotte nog worden opgemerkt, dat de invloed van de concentratie op de valsnelheid in bovenstaande beschouwing is verwaarloosd. Ook is geen rekening gehouden met de liftkracht. De benadering lijkt nogal spekulatief.

3.3 Bodemconcentratie als functie van stroom- en materiaalparameters

De beschrijving van de verdeling van de concentratie in de vertikaal geldt niet voor $y = 0$ (bodem), maar wel voor een kleine afstand van de bodem. Wanneer de bodemconcentratie wordt gedefiniëerd op een kleine afstand van de bodem en daar beneden konstant wordt verondersteld kan met behulp van de beschrijving van de concentratieverdeling en snelheidsverdeling over de vertikaal het totale sedimenttransport over de hoogte worden berekend. Gegeven het totale sedimenttransport uit metingen kan omgekeerd de bodemconcentratie worden berekend. De aldus gevonden bodemconcentratie kan vervolgens worden gekorreleerd aan stroom- en materiaalparameters.

3.4 Keuze

Uit paragraaf 3.2 blijkt, dat een bruikbaar uitwisselingsmechanisme aan de bodem niet direkt voorhanden is. Het door Le Feuvre afgeleide verband geldt slechts voor een situatie met een vlak bed. De door Engelund gegeven uitdrukking voor de concentratie aan de bodem geldt voor zowel het vlakke bed als een sinusvormig bed. De plaats is evenwel niet duidelijk gedefiniëerd.

De in paragraaf 3.3 beschreven methode kan gemakkelijk worden uitgevoerd. Cooper en Peterson [4] hebben de resultaten van laboratoriumproeven van verschillende onderzoekers verzameld en in een overzichtelijke vorm gepubliceerd. Gebruikmakend van deze gegevens kan voor uiteenlopende omstandigheden de concentratie aan de bodem worden berekend en gekorreleerd aan stroom- en materiaalparameters.

In dit verslag wordt gebruik gemaakt van de in paragraaf 3.3 beschreven methode voor de bepaling van de concentratie bij de bodem.

4 Afleiding uitdrukking concentratie bij de bodem

4.1 Nauwkeurigheid gebruikte methode

Bij de in paragraaf 3.3 beschreven methode wordt uitgegaan van een berekening van het suspensietransport te beginnen op een kleine afstand van de bodem.

De concentratieverdeling kan worden afgeleid uit de diffusievergelijking van de vorm:

$$\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} + (1-c) c W(c) = 0 \quad (4.1)$$

waarbij: $W(c) = W(o) (1-c)^4$. (4.2)

Vergelijking (4.2) wordt gesubstitueerd in vergelijking (4.1). Dit geeft na enig herleiden:

$$\int_{c_o}^c \frac{dc}{(1-c)^5 c} = - \int_{y_o}^y \frac{W(o)}{\epsilon_s} dy \quad (4.3)$$

Voor de uitwisselingscoëfficiënt van sediment ϵ_s wordt de parabolische verdeling aangehouden:

$$\epsilon_s = \kappa(c) u_{*} y \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (4.4)$$

waarbij: $\kappa(c) = 0,385 \left(\frac{1 + c_m (\rho_s - 1)}{1 + 2,5 c_o}\right)$ (4.5)

Vergelijking (4.4) gesubstitueerd in vergelijking (4.3) geeft na enig herleiden:

$$\sum_{n=1}^4 \frac{1}{n (1-c)^n} - \sum_{n=1}^4 \frac{1}{n (1-c_o)^n} + \ln \left(\frac{1-c_o}{c_o} \frac{c}{1-c}\right) = \ln \left(\frac{1 - \frac{y}{h}}{\frac{y}{h}} \frac{\frac{y_o}{h}}{1 - \frac{y_o}{h}}\right)^Z \quad (4.6)$$

waarbij: $Z = \frac{W(o)}{\kappa(c) u_{*}}$ (4.7)

Voor de snelheidsverdeling staan de volgende vergelijkingen ter beschikking:

logaritmische snelheidsverdeling:

$$\frac{u}{u_{\text{max}}} = \frac{1}{\kappa(c)} \ln \left(\frac{33 y}{k} \right) \quad (4.8)$$

logaritmische snelheidsverdeling volgens Einstein en Ning Chien:

$$\frac{y}{h} < 0,1 : \frac{u}{u_{\text{max}}} = 5,75 \frac{\sqrt{1 + \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} c_m}{\sqrt{1 + \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} c_o} \log A' \frac{y}{k} \quad (4.9)$$

$$\frac{y}{h} > 0,1 : \frac{u}{u_{\text{max}}} = 17,66 + \frac{2,3}{\kappa(c)} \log \left(\frac{y}{35,45 k} \right)$$

logaritmische snelheidsverdeling volgens Ordonez en Ippen:

$$\frac{y}{h} < 0,1 : \frac{u - u_{\text{max}}}{u_{\text{max}}} = \frac{1}{\kappa(c)} \ln \left(\frac{y}{h} - \psi \ln \frac{y}{h} \right) \quad (4.10)$$

$$\frac{y}{h} > 0,1 : \frac{u - u_{\text{max}}}{u_{\text{max}}} = \frac{1}{\kappa(c)} \ln \left(\frac{y}{h} \right)$$

waarbij ψ varieert van 0,001 tot 0,02.

Vergelijking (4.9) heeft het bezwaar, dat A' onbekend is. Vergelijking (4.10) heeft het bezwaar, dat ψ sterk varieert en u_{max} bekend moet zijn. De vergelijkingen (4.8), (4.9) en (4.10) hebben gemeen, dat ze geen eindige waarde geven voor $y = 0$.

Wanneer het rekenproces wordt begonnen op $y = k/33$ heeft vergelijking (4.8) de voorkeur.

Het suspensietransport wordt dus berekend te beginnen op een afstand $y_0 = k/33$. Voor de concentratieverdeling wordt vergelijking (4.6) gebruikt en voor de snelheidsverdeling vergelijking (4.8). Het op deze wijze berekende suspensie-

transport omvat niet het transport in een laagje ter dikte van $k/33$ bij de bodem. De hierdoor gemaakte fout wordt hierna voor een aantal gevallen berekend. Bij deze berekening wordt aangenomen, dat de fout bij benadering overeenkomt met het verschil in berekend transport, wanneer de berekening wordt gestart op $y = k/33$ en op $y = 2k/33$.

De volgende parameters zijn gevariëerd:

- de verhouding schuifspanningssnelheid tot valsnelheid:

$$\frac{u_{*x}}{W} = 10; 6; 3; 2$$

- de relatieve bodemruwheid: $k/h = 0,033; 0,01; 0,002$
- de concentratie bij de bodem: $c_0 = 0,2; 0,04; 0,008; 0,0016$

De variatie in u_{*x}/W bestrijkt ongeveer het gebied, waarin van suspensietransport kan worden gesproken. De valsnelheid behorend bij u_{*x}/W is zodanig gekozen, dat afhankelijk van de relatieve bodemruwheid de gemiddelde stroomsnelheid (\bar{u}) waarden aanneemt tussen 100 en 200 cm/s. In onderstaande tabel wordt voor elke combinatie de bijbehorende D_{50} van het sediment gegeven.

W cm/s	D_{50} mm	$\frac{u_{*x}}{W}$ -
0,5	0,070	10
1	0,105	6
2	0,170	3
3	0,230	2

De berekening is uitgevoerd voor de eenheid van breedte en hoogte. Een beschrijving van de berekening wordt gegeven in Appendix I. De resultaten zijn samengevat in de tabellen 1 tot en met 4. Hierbij is S_0 het totale suspensietransport over de vertikaal berekend vanaf $y_0 = k/33h$ (kolom 8) en S_1 het totale suspensietransport voor de vertikaal berekend vanaf $y_0 = 2k/33h$ (kolom 9). Het verschil tussen S_0 en S_1 is ΔS (kolom 10). De laatste kolom geeft het verschil ΔS uitgedrukt in ‰ ten opzichte van het totale suspensietransport S_0 . Het blijkt, dat de gemaakte fout voor kleine waarden van Z klein is en toeneemt bij toenemende Z . De grootste fout treedt op bij $Z = 1,948$ en bedraagt 55 ‰ (tabel 1). Daarbij suspensietransport de waarde van Z niet veel groter zal zijn dan deze waarde blijft de gemaakte fout klein. De fout is ook nog afhanke-

lijk van de ruwheid en is bij grote ruwheid groter dan bij kleine ruwheid. Bovendien is de fout bij kleinere waarden van c_0 doorgaans kleiner.

Samenvattend kan worden gezegd, dat het niet meenemen van het laagje ter dikte van $k/33$ bij de bodem een te verwaarlozen fout oplevert in het berekende transport.

4.2 Berekening concentratie bij de bodem uit gootwaarnemingen

4.2.1 Algemeen

De concentratie bij de bodem kan worden bepaald uit het totale transport via een iteratieproces, waarbij gebruik gemaakt wordt van de in paragraaf 4.1 gepresenteerde berekeningsmethode. De concentratie bij de bodem is hierbij gedefiniëerd als de concentratie op een hoogte $y = k/33$ boven de bodem. Bij de berekening is gebruik gemaakt van de resultaten van gootwaarnemingen, zoals die zijn gegeven door Cooper en Peterson [4].

4.2.2 Selektie beschikbare gootwaarnemingen

Niet alle door Cooper en Peterson gegeven gootwaarnemingen zijn bruikbaar. Selektie vond plaats op grond van de volgende overwegingen:

- In tabel 3-1 van hun publikatie geven Cooper en Peterson aan op welke wijze bij de verschillende gootwaarnemingen het transport van sediment is gemeten. Alleen de metingen, waarbij het suspensietransport of het totaal transport is gemeten komen voor gebruik in aanmerking, te weten:
 - Colorado State University - 8 ft flume
 - Colorado State University - 2 ft flume
 - Nomicos
 - Vanoni en Brooks
 - Brooks
 - Barton en Lin
 - Laursen
 - Straub
- De verhouding van de schuifspanningssnelheid tot de valsnelheid (u_{*x}/W) moet groter zijn dan 1,66. Volgens Shinohara en Tsubaki treedt beneden deze waarde geen suspensietransport van betekenis op.
- De gemeten gemiddelde concentratie (c_t) moet groter zijn dan 100 ppm.

- De beddingvorm moet zodanig zijn, dat het bij de berekening aangenomen logaritmische snelheidsprofiel bij benadering juist is. Daarom zijn alleen de resultaten gebruikt, waarbij sprake is van een vlak bed, ribbels of een overgangsgebied. Resultaten waarbij duinen en antiduinen optreden worden dus niet gebruikt. Bij de resultaten van de Colorado State University is de beddingvorm gegeven. Bij de overige resultaten is de beddingvorm bepaald aan de hand van figuur 18 (overgenomen uit het W.L.-rapport S 80-I [6]).
- De parameter k is van de orde van de ribbelhoogte en afhankelijk van de vorm van de ribbels. Als maximum ribbelhoogte kan ongeveer een kwart van de waterdiepte worden aangehouden. Waarden van k in de orde van grootte van de halve waterdiepte zijn derhalve aan de grote kant, maar worden geaccepteerd.

De aldus toegepaste selectie resulteerde in 86 bruikbare gootmetingen.

4.2.3 Berekening en resultaten

Een beschrijving van de toegepaste berekeningsmethode wordt gegeven in Appendix II. De nauwkeurigheid is sterk afhankelijk van de toegepaste stapgrootte in de vertikaal. Vanaf $k/33$ tot k is gerekend met een stapgrootte van $k/297$. Vanaf k tot h met een stapgrootte van $h/100$.

De resultaten worden gegeven in tabel 5 ($y = k/33$). In deze tabel zijn tevens alle bij de berekening gebruikte gemeten grootheden gegeven.

Bij de berekening van c_0 wordt uitgegaan van een permanente situatie. De gebruikte gootmetingen betreffen eveneens een permanente situatie. Het is echter de vraag of het evenwicht zich in alle gevallen tijdens de meting reeds had ingesteld.

Van de 86 bruikbare gootmetingen zijn er 17, waarvan ook snelheidsmetingen in de vertikaal bekend zijn. Het betreft de metingen van de Colorado State University in 8 ft en 2 ft brede goten. De resultaten van deze metingen zijn gepubliceerd door Guy, Simons en Richardson [7]. Tabel 6 geeft een vergelijking van de uit het gemeten snelheidsprofiel berekende schuifspanningssnelheid en de schuifspanningssnelheid berekend uit het verhang.

De konstanten B en C zijn afkomstig uit de vergelijking:

$$u_y = B \log y + C \quad (4.11)$$

$$\text{waarbij: } B = 2,3 \frac{u_{*x}}{k}$$

$$C = 2,3 \frac{u_{*x}}{k} \log \frac{33}{k}$$

De waarden voor B en C zijn bepaald uit het gemeten snelheidsprofiel en overgenomen uit voornoemde publikatie. Het blijkt, dat in alle gevallen de uit het snelheidsprofiel bepaalde schuifspanningssnelheid kleiner is dan de uit het verhang bepaalde. Voor een aantal gevallen is het verschil klein. Er zijn echter ook gevallen, waarbij de uit het verhang berekende schuifspanningssnelheid ongeveer tweemaal zo groot is. Een en ander heeft belangrijke konsekwenties voor de waarde van k/h , zoals ook uit een vergelijking van de laatste twee kolommen van tabel 6 blijkt. De verschillen in de waarde van k/h zijn groot tot zeer groot.

Ter vergelijking wordt in tabel 7 de k -waarde berekend uitgaande van de uit het snelheidsprofiel gevonden waarde van de schuifspanningssnelheid. De berekening verloopt volgens de vergelijking:

$$k = 12 h \exp \left(- \frac{\bar{u}}{u_{*x}} \kappa \right) \quad (4.12)$$

De uit het verhang berekende k -waarde van tabel 6 blijft groter dan de op deze wijze gevonden waarde, maar de verschillen zijn aanzienlijk kleiner.

Uit de hiervoor gegeven beschouwing zou kunnen worden afgeleid, dat de evenwichtssituatie niet altijd wordt bereikt. Een dergelijke konklusie moet echter met het nodige voorbehoud worden getrokken. Het bepalen van u_{*x} uit het gemeten snelheidsprofiel is namelijk onnauwkeurig, terwijl hetzelfde geldt voor het bepalen van u_{*x} uit het verhang (een verhangmeting is doorgaans onnauwkeurig). Het blijkt bovendien, dat de waarde van k/h erg gevoelig is voor de waarde van de schuifspanningssnelheid. Omdat de concentratie bij de bodem c_0 gedefiniëerd is als de concentratie op een hoogte $k/33$ boven de bodem zal een grote fout in de k -waarde voor met name grote waarden van Z resulteren in een grote fout in c_0 .

De ruwheid van een zandbed is sterk afhankelijk van de stroomcondities. Veelal wordt als aanduiding voor deze ruwheid de wrijvingsfaktor f van Darcy-Weisbach gebruikt:

$$f = 8 \left(\frac{u_{*'}}{u} \right)^2 \quad (4.13)$$

Algemeen wordt aangenomen, dat de wrijvingsfaktor f kan worden gesplitst in een deel f' (als gevolg van de korrelruwheid bij een vlak bed) en een deel f'' (als gevolg van de ribbels). Lovera en Kennedy [8] geven f' als functie van $Re = \bar{u} R/\nu$ en R/D_{50} , gebaseerd op een groot aantal metingen voor het vlakke bed (zie figuur 19). Als ondergrens voor f' wordt de relatie van Prandtl aangehouden voor de hydraulisch gladde bodem. Toegepast op de gebruikte gootmetingen kan worden gecontroleerd of de aangegeven bedvorm in overeenstemming is met de relatie tussen f' voor het vlakke bed uit figuur 19 en f berekend uit (4.13). Op een enkele uitzondering na zijn de berekende f -waarden voor het vlakke bed en het overgangsgebied nagenoeg gelijk aan die van figuur 19, terwijl voor de situatie met ribbels f -berekend enige malen groter is.

4.3 Koncentratie bij de bodem als functie van stroom- en materiaalparameters

Een voor de concentratie bij de bodem belangrijke stroomparameter is de schuifspanningssnelheid (u_{*}). De eigenschappen van het materiaal komen voor een belangrijk deel tot uiting in de valsnelheid (W). Bij het opstellen van een relatie tussen de concentratie bij de bodem en de stroom- en materiaalparameters is in eerste instantie van deze parameters uitgegaan.

In figuur 20 wordt de uit de 86 gootmetingen bepaalde c_0 gegeven als functie van u_{*}/W . Er is onderscheid gemaakt in herkomst van de meetpunten. Het blijkt, dat van een relatie tussen c_0 en u_{*}/W geen sprake is.

In figuur 21 wordt c_0 gegeven als functie van u_{*}'/W . Hierbij is u_{*}' de schuifspanningssnelheid betrokken op de korrels alleen, berekend met behulp van de wrijvingsfaktor f' volgens Lovera en Kennedy (zie paragraaf 4.2.3). Er is een tendens waar te nemen van een toename van c_0 bij toenemende u_{*}'/W . De spreiding is evenwel groot. Wanneer rekening wordt gehouden met de D_{50} van het gesuspendeerde materiaal zal de spreiding waarschijnlijk kleiner worden.

De figuren 22 tot en met 31 geven voor verschillende korreldiameter c_0 als functie van u_{*}/W . De aangebrachte streeplijn is een schatting van de beste bij de meetpunten aansluitende rechte.

Vergelijking van de figuren 22 tot en met 31 leert, dat de helling van de rechte nagenoeg hetzelfde is. Een uitzondering hierop vormen de korreldiameters: $D_{50} = 180, 275$ en $325 \mu\text{m}$. De oorzaak hiervan is voor de korreldiameter

$D_{50} = 180 \mu\text{m}$ waarschijnlijk het gebrek aan gespreide (volgens de c_o -as) informatie. Voor de overige korreldiameters waarschijnlijk de te grote diameter. Het blijkt, dat bij een vaste waarde van de concentratie bij de bodem (c_o), bij toenemende D_{50} de waarde voor u'_{*x}/W afneemt. Deze afname kan het gevolg zijn van een toename van W bij gelijkblijvende u'_{*x} . Dit betekent, dat een relatie $c_o = f(u'_{*x})$ zonder rekening te houden met de korreldiameter minder spreiding zal geven. Figuur 32 geeft deze relatie. Rekening houdend met de hiervoor genoemde korreldiameters met een andere helling van de rechte en gelet op de spreiding is de relatie van figuur 32 beter dan die van figuur 21. Een groot bezwaar van de gevonden relatie is het voor vooral de kleinere concentraties flauwe verloop, waardoor bij een kleine fout in u'_{*x} een grote fout optreedt in c_o . In paragraaf 4.4 zal worden nagegaan hoe deze onnauwkeurigheid doorwerkt in het berekende transport.

Als de in figuur 32 gegeven relatie wordt benaderd door een rechte lijn, dan volgt hieruit dat $c_o \propto u'^6_{*x}$. Dit komt overeen met het door Le Feuvre gegeven verband $u_e \propto u^6$ (zie paragraaf 3.2). In de evenwichtssituatie geldt immers: $u_e c_b = W c_o$, zodat $c_o \propto u_e$ of $c_o \propto u^6$ of $c_o \propto u'^6_{*x}$.

4.4 Bruikbaarheid gevonden relatie tussen c_o en u'_{*x}

De in paragraaf 4.3 gevonden relatie tussen c_o en u'_{*x} laat voor een gegeven waarde van u'_{*x} een grote variatie zien in c_o . Om de oorzaak van de spreiding in c_o te bestuderen is voor een tweetal proeven (één met een lage c_o -waarde: proef 38 en één met een hoge c_o -waarde: proef 6) de concentratie c_o bij de bodem opnieuw berekend. De proeven zijn in figuur 32 aangeduid met het teken: X. Het verschil met de eerder uitgevoerde berekening is, dat nu rekening wordt gehouden met een spreiding in de waarden van de parameters, die bij de berekening worden gebruikt. De parameters zijn immers gemeten grootheden met een beperkte nauwkeurigheid. Voor de berekening wordt gebruik gemaakt van een methode waarbij, uitgaande van de relevante parameters met bekende kansverdeling, de c_o wordt berekend. Dit proces wordt vele malen herhaald, waarna de resultaten statistisch worden geanalyseerd. Deze methode wordt beschreven en met voorbeelden toegelicht in het W.L.-verslag S 164 [9]. Bij de berekening worden de volgende parameters gebruikt: Q , b , h , i , c_m , ρ_s , D_{50} en T . Hiervan kunnen de breedte b en de dichtheid van het sediment ρ_s als konstant worden beschouwd.

Voor de spreiding in de parameters Q, h, i, c_m , D_{50} en T wordt een normale verdeling aangehouden, waarbij:

Q : $\sigma/\mu = 0,01$

h : $\sigma/\mu = 0,025$

i : $\sigma/\mu = 0,05$

σ = standaardafwijking

c_m : $\sigma/\mu = 0,05$

μ = gemiddelde waarde

D_{50} : $\sigma/\mu = 0,1$

T : $\sigma/\mu = 0,015$

De gemeten waarden voor de parameters van de gebruikte proeven worden hieronder vermeld:

parameter		proef 38	proef 6
Q	m ³ /s	0,200 x 10 ⁻¹	0,620
b	m	0,851	2,44
h	m	0,073	0,220
i	-	0,280 x 10 ⁻²	0,156 x 10 ⁻²
c_m	-	4,345 x 10 ⁻⁴	1,041 x 10 ⁻³
ρ_s	kg/dm ³	2,65	2,65
D_{50}	m	137 x 10 ⁻⁶	190 x 10 ⁻⁶
T	°C	25,2	18,8

De resultaten van de berekeningen worden gegeven in de tabellen 8 en 9. Behalve c_o wordt ook een aantal andere berekende grootheden gegeven. De eerste kolom geeft de waarden voor het geval alle parameters konstant zijn gehouden. In de overige kolommen worden per geval de gemiddelde waarde (μ) en de verhouding standaardafwijking tot gemiddelde waarde (σ/μ) gegeven voor het geval alle parameters worden gevariëerd. Tabel 8 geeft de resultaten van proef 38 en tabel 9 geeft de resultaten van proef 6.

Uit de tabellen 8 en 9 blijkt, dat de spreiding in c_o als gevolg van de spreiding in de bij de berekening van c_o gebruikte parameters aanzienlijk groter is dan de spreiding in de parameters afzonderlijk. Proef 6 (hoge c_o -waarde) geeft iets minder spreiding dan proef 38 (lage c_o -waarde).

De gevonden spreiding in c_o bij het verband tussen c_o en $u'_{\frac{x}{\lambda}}$ wordt voor een belangrijk deel uit het bovenstaande verklaard. De gemiddelde waarde μ wijkt af van de waarde gevonden voor het geval alle parameters konstant zijn door de grootte van de bij de berekening genomen steekproef (n = 100). Bij een grotere

steekproef zal de afwijking minder zijn, maar de rekentijd aanzienlijk groter en daarmee ook de kosten.

Figuur 33 geeft voor het geval alle parameters worden gevariëerd de kumulatieve frekwentiefuncties voor c_o , waaruit de spreiding in c_o nog eens duidelijk blijkt.

Om het gevolg van de spreiding in c_o op het transport S_o te onderzoeken is gebruikmakend van de resultaten van de proeven 38 en 6 voor konstante \bar{u} , $u_{*'}^{\prime}$, h en W en verschillende waarden van c_o het transport S_o berekend. In figuur 34 worden de resultaten van deze berekening gegeven. Het blijkt, dat een verandering in c_o procentueel een even grote verandering (bij kleine c_o -waarde: proef 38) of een grotere verandering (bij grote c_o -waarde: proef 6) oplevert in het transport S_o .

Bij bovenstaande beschouwing is aangenomen, dat een verandering in c_o geen konsekwenties heeft voor de andere parameters, zoals bijvoorbeeld de stroomsnelheid. Een verandering in c_o is volgens het hiervoor genoemde verband $c_o = f(u_{*'}^{\prime})$ alleen mogelijk wanneer ook de stroomsnelheid verandert, immers:

$$c_o = f(u_{*'}^{\prime})$$

$$u_{*'}^{\prime} = \sqrt{\frac{f' \bar{u}^2}{8}}$$

$$f' = f(Re, R/D_{50})$$

$$Re = \frac{\bar{u} R}{\nu}$$

In dit licht bezien zal het transport S_o procentueel nog meer toenemen dan uit figuur 34 blijkt. Dit geldt met name voor de grote waarden van c_o .

Uit het voorgaande is gebleken, dat de grote spreiding in c_o voor een belangrijk deel wordt veroorzaakt door de spreiding in de bij de berekening van c_o gebruikte parameters.

Bovendien heeft een spreiding in c_o procentueel een minstens even grote spreiding in S_o tot gevolg.

In figuur 35 wordt c_o als functie van $u_{*'}^{\prime}$ voor verschillende korreldiameters gegeven, waarbij tevens het geldigheidsgebied wordt vermeld. Het blijkt, dat de vorm van de krommen niet gelijk is en sterker verschilt naarmate de korreldiameter toeneemt. Het is in dit verband nuttig te memoreren, dat alle resultaten betrekking hebben op gootmetingen.

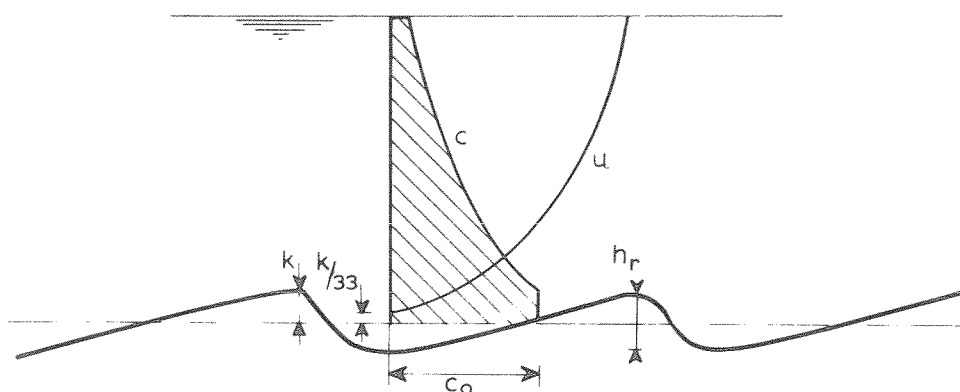
5 Berekening suspensietransport

5.1 Methode waarbij c_0 gedefiniëerd op $y = k/33$ een functie is van u'_x

Gebruikmakend van de in hoofdstuk 4 afgeleide uitdrukking voor de concentratie bij de bodem kan het suspensietransport worden berekend uit stroom- en materiaalparameters. Het verloop van de berekening wordt gegeven in Appendix IV.

5.2 Methode waarbij c_0 gedefiniëerd op $y = k$ een functie is van u'_x

De in hoofdstuk 4 afgeleide uitdrukking voor de concentratie bij de bodem geldt voor c_0 gedefiniëerd op een hoogte $y = k/33$ boven de bodem. Voor een situatie met ribbels lijkt het reëler de verdeling van de concentratie te beginnen op $y = k$ boven een theoretisch nulvlak gedefiniëerd op de halve ribbelhoogte. Beneden $y = k$ is de concentratie $c = c_0 = \text{konstant}$. Bij een logaritmische snelheidsverdeling is de stroomsnelheid $u = 0$ op $y = k/33$ boven het nulvlak. Het transport wordt daarom berekend vanaf $y = k/33$.



De op deze wijze berekende concentratie c_0 op $y = k$ boven de bodem is gegeven in tabel 5 (86 gootmetingen). In figuur 36 is de concentratie c_0 uitgezet tegen u'_x , waarbij onderscheid is gemaakt in korreldiameter. Per korreldiameter liggen de meetpunten ongeveer op een rechte lijn. De verschillende rechte lijnen zijn nagenoeg evenwijdig, terwijl bij een toenemende korreldiameter en gelijkblijvende u'_x de concentratie c_0 afneemt. Een uitzondering hierop vormen de waarnemingen van Nomicos ($D_{50} = 152 \mu\text{m}$). Een vergelijking met figuur 35 leert, dat de correlatie met c_0 op $y = k$ een wat eenduidiger beeld geeft dan die met c_0 op $y = k/33$.

Met behulp van de in figuur 36 gegeven relatie tussen c_0 en u'_x kan het suspensietransport worden berekend uit stroom- en materiaalparameters. De berekening verloopt in grote lijnen zoals de berekening in Appendix IV.

6 Toetsing aan gootwaarnemingen

Om de in hoofdstuk 5 gepresenteerde methoden te kunnen toetsen moeten waarnemingen beschikbaar zijn, welke niet voor de afleiding van de relatie $c_o = f(u'_x)$ zijn gebruikt. Van de bij de afleiding gebruikte gootwaarnemingen van Cooper en Peterson zijn alleen die metingen gebruikt, waarbij een vlak bed optrad of een bed met ribbels. Hoewel bij een bed met duinen de logaritmische snelheidsverdeling niet altijd een juiste benadering voor het snelheidsprofiel zal zijn, is voor het toetsen toch gebruik gemaakt van metingen, waarbij een bed met duinen optrad (62 gootmetingen). Bovendien is gebruik gemaakt van een 43-tal gootmetingen van de University of Southampton [10]. De beddingvorm bij de meeste metingen bestond uit ribbels, hoewel bij een aantal ook duinen of een vlak bed optrad. De resultaten van de in totaal 105 gootmetingen zijn gegeven in tabel 10.

In de figuren 37 en 38 wordt het percentage waarnemingen gegeven als functie van de afwijking. De afwijking wordt hier gedefiniëerd als het quotient $S_{ber.} / S_{gem.}$. Figuur 37 geeft de afwijking voor het geval c_o gedefiniëerd is op $y = k/33$ (figuren 32 en 35). Het blijkt, dat het wel of niet in rekening brengen van de invloed van de korreldiameter (D_{50}) geen effect heeft op de nauwkeurigheid. Voor circa 47% van de waarnemingen ligt de berekende waarde tussen $\frac{1}{2}$ en 2 maal de gemeten waarde. Figuur 38 geeft de afwijking voor het geval c_o gedefiniëerd wordt op $y = k$. Het blijkt, dat voor circa 53% van de waarnemingen de berekende waarde ligt tussen $\frac{1}{2}$ en 2 maal de gemeten waarde. De methode, waarbij c_o gedefiniëerd wordt op $y = k$, is dus iets nauwkeuriger dan die waarbij c_o gedefiniëerd wordt op $y = k/33$. Ter vergelijking is in figuur 38 tevens de afwijking gegeven voor de methode van Ackers en White, zoals die is gepubliceerd door White, Milli en Crabbe [11]. Zij hebben gebruik gemaakt van meer dan 1000 gootmetingen en 260 metingen in natuurlijke waterlopen. Bij de selectie van de metingen zijn de metingen, waarbij $Fr > 0,8$, niet meegenomen (om de meer complexe transportverschijnselen te vermijden). De afwijking van de methode van Ackers en White is dus gebaseerd op een veel groter aantal waarnemingen, waaronder in tegenstelling tot de in dit verslag gebruikte waarnemingen ook natuurmetingen. Het blijkt, dat voor 68% van de waarnemingen de berekende waarde tussen $\frac{1}{2}$ en 2 maal de gemeten waarde ligt. White, Milli en Crabbe maken onderscheid in een drietal groepen theorieën en hebben die samengevat in een tabel. Aangevuld met de in dit verslag ontwikkelde theorie wordt hieronder de tabel

gegeven.

theorie	percentage waarnemingen waarbij $\frac{1}{2} < \frac{S_{ber}}{S_{gem}} < 2$	percentage waarnemingen binnen toepassingsgebied
<u>groep A</u>		
Ackers en White	68	100
Engelund en Hansen	63	100
Rottner	56	100
c_o op $y = k$	53	100
<u>groep B</u>		
c_o op $y = k/33$	47	100
Einstein (total load)	46	100
Bishop en anderen	39	60
Toffaletti	37	92
<u>groep C</u>		
Bagnold (total load)	22	31
Meyer-Peter en Müller	10	100

Groep A: theorieën waarbij meer dan 50% van de waarnemingen een afwijking heeft binnen het $\frac{1}{2}$ -2 gebied

Groep B: theorieën waarbij 35-50% van de waarnemingen een afwijking heeft binnen het $\frac{1}{2}$ -2 gebied

Groep C: minder algemeen toepasbare theorieën

Aan de hand van het hiervoor gestelde kan worden gekonkludeerd dat de methode waarbij c_o gedefiniëerd wordt op $y = k$ de beste resultaten geeft. Volgens het onderzoek van White, Milli en Crabbe behoort deze methode tot de betere theorieën, maar geeft slechtere resultaten dan de theorieën van Ackers en White, Engelund en Hansen en Rottner.

7 Toetsing aan natuurmetingen

Bij de in hoofdstuk 5 gepresenteerde methoden staat de relatie $c_o = f(u'_{\frac{x}{x}})$ centraal. Deze relatie wordt gegeven in de figuren 32, 35 en 36 en is gebaseerd op uitsluitend gootwaarnemingen. Hierdoor is het geldigheidsgebied beperkt, te weten:

$$D_{50} = 90-325 \mu\text{m}$$

$$\bar{u} = 0,24-1,22 \text{ m/s}$$

$$h = 0,05-0,31 \text{ m}$$

Om te kunnen vaststellen in hoeverre de relatie ook voldoet buiten het geldigheidsgebied, met name voor grotere waterdiepten, is de berekeningsmethode getoetst aan natuurmetingen. De toetsing is uitgevoerd met metingen verricht in de Westerschelde en in de Rio Magdalena.

Westerschelde

Voor de toetsing aan metingen in de Westerschelde is gebruik gemaakt van de meetresultaten uit memo 75.8 van de Studiedienst Vlissingen [12]. Dit resulteerde in 20 bruikbare waarnemingen. De waarden van korreldiameter, stroomsnelheid en waterdiepte lagen tussen de volgende grenzen:

$$D_{50} = 121 \mu\text{m}$$

$$\bar{u} = 0,57-1,41 \text{ m/s}$$

$$h = 9,7-15,6 \text{ m}$$

De afwijking tussen het berekend en gemeten transport, gedefiniëerd als het quotiënt $S_{\text{ber}}/S_{\text{gem}}$, blijkt zeer groot te zijn. Van slechts 1 waarneming (5%) ligt de berekende waarde tussen $\frac{1}{2}$ en 2 maal de gemeten waarde. Van 19 waarnemingen (95%) is het quotiënt $S_{\text{ber}}/S_{\text{gem}} > 1$ en bedraagt gemiddeld 1715 voor het geval c_o is gedefiniëerd op $y = k/33$ en 2044 voor het geval c_o is gedefiniëerd op $y = k$. Het berekende transport is dus veel te groot!

In dit verband moet worden opgemerkt, dat de Westerschelde een getijrivier is. Het is mogelijk, dat als gevolg van de versnellende en vertragende stroom gedurende het getij respektievelijk onderverzadiging en oververzadiging optreedt. In dat geval mag de theorie, die geldt voor een permanente, eenparige stroming, hier niet worden toegepast.

Een andere beperking voor deze toetsing is de methode, die voor de meting van de concentraties is toegepast, te weten de flessenmethode. Vooral voor kleine concentraties is deze methode onnauwkeurig en worden er te kleine concentraties gemeten.

Een en ander verklaart, dat er verschillen zullen zijn tussen de berekende en gemeten transporten, maar geen verschillen van de orde van grootte, zoals hiervoor is geconstateerd.

Rio Magdalena

Voor de toetsing aan metingen in de Rio Magdalena is gebruik gemaakt van de meetresultaten uit het "Proyecto Cuenca Magdalena - Cauca" [13].

Alleen die waarnemingen zijn gebruikt, waarvan de gemiddelde stroomsnelheid kleiner was dan 1,22 m/s en dus lag binnen het geldigheidsgebied van de relatie $c_o = f(u_{\frac{x}{\ast}}')$. Dit resulteerde in 176 bruikbare waarnemingen. De waarden van korreldiameter, stroomsnelheid en waterdiepte lagen tussen de grenzen:

$$D_{50} = 41-330 \mu\text{m}$$

$$\bar{u} = 0,37-1,22 \text{ m/s}$$

$$h = 1,4-15,6 \text{ m}$$

De afwijking tussen het berekend en gemeten transport, gedefiniëerd als het quotiënt $S_{\text{ber}}/S_{\text{gem}}$, blijkt ook hier groot te zijn. Van slechts 13 waarnemingen (7%) ligt de berekende waarde tussen $\frac{1}{2}$ en 2 maal de gemeten waarde. Van 158 waarnemingen (90%) is het quotiënt $S_{\text{ber}}/S_{\text{gem}} > 1$ en bedraagt gemiddeld 276 voor het geval c_o is gedefiniëerd op $y = k/33$ en 258 voor het geval c_o is gedefiniëerd op $y = k$.

Hoewel minder dan bij de Westerschelde zijn ook hier de berekende transporten veel te groot.

Na het uitvoeren van de toetsing is bekend geworden, dat de metingen in de Rio Magdalena fouten bevatten. De daar uitgevoerde metingen met de Delftse Fles zijn met een niet-toepasbare ijking uitgewerkt. Een en ander blijkt uit het afstudeerverslag van Dijkman [14].

In 1979 werd door het WL een nieuwe ijking uitgevoerd. Bovendien werd in hetzelfde jaar in een zijrivier van de Donau in Joegoslavië een vergelijkende meting uitgevoerd tussen een vijftal sedimenttransportmeters voor zandtransport in suspensie, waaronder de Delftse Fles en de USP-61. Een voorlopige konklusie uit dit vergelijkend onderzoek is, dat de transporten gemeten met de Delftse Fles (uitgewerkt met de ijkfaktoren, die ook bij de Rio Magdalena-meting zijn gebruikt) een faktor 2 à 3 te klein zijn. De transporten gemeten met de USP-61 zijn daarentegen iets te groot.

Alle gebruikte waarnemingen zijn verricht met de Delftse Fles. De hiervoor gegeven afwijking tussen het berekend en gemeten transport, gedefiniëerd als het quotiënt $S_{\text{ber}}/S_{\text{gem}}$, zal dus kleiner zijn. Het percentage waarnemingen, waarvan

de berekende waarde ligt tussen $\frac{1}{2}$ en 2 maal de gemeten waarde zal iets groter zijn (8% in plaats van 7%). Het percentage waarnemingen, waarvan het quotiënt $S_{ber}/S_{gem} > 1$ zal iets kleiner zijn (84% in plaats van 90%) en zal gemiddeld circa 100 bedragen.

Aan de hand van het bovenstaande kan worden gekonkludeerd, dat de in hoofdstuk 5 gepresenteerde berekeningsmethode, waarbij gebruik wordt gemaakt van de relatie $c_o = f(u'_{*})$ zoals gegeven in de figuren 32, 35 en 36, voor de omstandigheden in de Westerschelde en de Rio Magdalena tot veel te grote sedimenttransporten leidt. Kennelijk is voor grotere waterdiepten de concentratie bij de bodem niet alleen een functie van de schuifspanningssnelheid betrokken op de korrels (u'_{*}), maar ook van de waterdiepte.

8 Samenvatting

In hoofdstuk 2 is de gevoeligheid nagegaan van de concentratieverdeling voor een aantal parameters.

Het blijkt, dat de concentratieverdeling niet geheel ongevoelig is voor de uitwisselingscoëfficiënt van sediment (ϵ_s). De concentratieverdeling voor een konstante ϵ_s sluit echter vooral voor kleine waarden van Z nog redelijk aan bij die voor een parabolische verdeling van ϵ_s (zie de figuren 1...5). Veel gevoeliger is de concentratieverdeling voor de absolute waarde van ϵ_s (zie figuur 6). Het in rekening brengen van het door het sediment ingenomen volume werkt concentratieverhogend, maar de invloed is niet groot (zie de figuren 7...10). Zowel de valsnelheid (als functie van de concentratie) als de coëfficiënt κ (als functie van de concentratie) zijn van invloed op de concentratieverdeling. Het verschil is, dat de invloed van de concentratie op de valsnelheid concentratieverhogend en op de coëfficiënt κ concentratieverlagend werkt. Hierbij speelt voor de valsnelheid de concentratie ter plaatse een belangrijke rol, terwijl voor de coëfficiënt κ de plaatselijke concentratie ook wel meespeelt, maar de concentratie bij de bodem (vooral voor grote Z -waarden) maatgevend is (zie de figuren 11...17).

Rekening houdend met het bovenstaande en uitgaande van de kennis uit verslag R 783 deel I, is het mogelijk een redelijk goede beschrijving te geven van de verdeling van de concentratie in de vertikaal. Anders is het gesteld met de randvoorwaarde bij de bodem. Het is gebruikelijk de bodemconcentratie te bepalen uit het bodemtransport, waarbij een aanname wordt gedaan voor de dikte van de laag, waarbinnen dit transport plaatsvindt. Per onderzoeker worden nogal uiteenlopende dikten voor de bodemlaag gehanteerd, waardoor grote verschillen in de berekende transporten ontstaan.

Een betere benadering is wellicht uit te gaan van het uitwisselingsmechanisme van sediment bij de bodem (entrainment). Hierover is in de literatuur niet veel bekend. Sutherland [1] geeft gebaseerd op laboratoriumwaarnemingen een kwalitatieve beschouwing over de wijze waarop deeltjes door een turbulente stroom worden bewogen. Le Feuvre [3] leidt met behulp van een nieuwe theorie voor het begin van bewegen een uitdrukking af voor de opname-snelheid van sediment bij de bodem (zie vergelijking (3.12)). Deze uitdrukking geldt slechts voor een situatie met een vlak bed. Englund [2] heeft een verband afgeleid, dat ook geldt voor een sinusvormig bed (zie vergelijking (3.27)). De plaats van de concentratie

bij de bodem is evenwel niet duidelijk gedefiniëerd, terwijl de sedimentdeeltjes kleiner moeten zijn dan de dikte van de viskeuze sublaag.

Tenslotte is gekozen voor de methode, waarbij de bodemconcentratie wordt gerelateerd aan een of meer stroom- en materiaalparameters. Hierbij wordt de bodemconcentratie gedefiniëerd op een kleine afstand van de bodem en daar beneden konstant verondersteld. Met behulp van de beschrijving van de concentratieverdeling en snelheidsverdeling over de vertikaal kan dan het totale sedimenttransport worden berekend. Gegeven het totale sedimenttransport uit metingen kan omgekeerd de bodemconcentratie worden berekend en gekorreleerd aan stroom- en materiaalparameters.

Gebruikmakend van gegevens van Cooper en Peterson [4] is voor uiteenlopende omstandigheden de bodemconcentratie berekend en gekorreleerd aan stroom- en materiaalparameters. Een beschrijving van de berekeningsmethode wordt gegeven in Appendix II. In paragraaf 4.1 wordt aangetoond, dat het bij de berekening verwaarlozen van het transport in een laagje met een dikte $k/33$ bij de bodem tot een te verwaarlozen fout in het berekend totaal suspensietransport leidt. De resultaten worden gegeven in tabel 5 en de figuren 32 en 35. De bodemconcentratie c_0 is gedefiniëerd op een afstand $y = k/33$ boven de bodem en gerelateerd aan u'_* . Het blijkt, dat de spreiding in c_0 groot is. Dit wordt veroorzaakt door de spreiding in de voor de berekening van c_0 gebruikte parameters. In paragraaf 4.4 wordt aangetoond, dat een spreiding in c_0 een minstens zo grote spreiding in het berekende totale suspensietransport tot gevolg heeft.

Voor een situatie met ribbels is het reëler de verdeling van de concentratie te beginnen op $y = k$ boven een theoretisch nulvlak gedefiniëerd op de halve ribbelhoogte. Beneden $y = k$ is de concentratie $c = c_0 = \text{konstant}$. Het transport wordt ook in dit geval berekend vanaf $y = k/33$. Gebruikmakend van de gegevens van Cooper en Peterson [4] is op deze wijze de bodemconcentratie c_0 gedefiniëerd op een afstand $y = k$ boven de bodem berekend. De resultaten zijn gegeven in tabel 5 en figuur 36.

Met behulp van de in de figuren 32, 35 en 36 gegeven relatie tussen c_0 en u'_* kan het suspensietransport worden berekend uit stroom- en materiaalparameters. De berekeningsmethode wordt gegeven in Appendix IV.

In hoofdstuk 6 is de berekeningsmethode getoetst aan gootmetingen. Hierbij zijn andere waarnemingen gebruikt dan die voor de afleiding van de relatie $c_o = f(u'_{\frac{x}{x}})$ zijn gebruikt (zie tabel 10). In de figuren 37 en 38 is de afwijking tussen het berekend en gemeten transport gegeven als functie van het percentage waarnemingen. Het blijkt, dat het wel of niet in rekening brengen van de invloed van de korreldiameter (uitgaande van respectievelijk de figuren 35 en 32) geen effect heeft op de nauwkeurigheid. De methode waarbij c_o gedefiniëerd wordt op $y = k$ geeft de beste resultaten. Volgens het onderzoek van White, Milli en Crabbe [11] behoort deze methode tot de betere theorieën, maar geeft slechtere resultaten dan de theorieën van Ackers en White, Engelund en Hansen en Rottner. Hierbij moet nog worden aangetekend, dat de relatie $c_o = f(u'_{\frac{x}{x}})$ uitsluitend gebaseerd is op gootwaarnemingen, waardoor het geldigheidsgebied beperkt is.

In hoofdstuk 7 is nagegaan in hoeverre de relaties uit de figuren 32, 35 en 36 ook voldoen buiten het geldigheidsgebied, met name voor grotere waterdiepten. De berekeningsmethode is daartoe getoetst aan metingen in de Westerschelde en de Rio Magdalena. Het blijkt, dat de berekende transporten veel te groot zijn. Kennelijk is voor grotere waterdiepten de concentratie bij de bodem niet alleen een functie van de schuifspanningssnelheid betrokken op de korrels ($u'_{\frac{x}{x}}$), maar ook van de waterdiepte.

9 Konklusies en aanbevelingen voor verder onderzoek

9.1 Konklusies

- De in dit verslag beschreven methode, waarmee bij een permanente en eenpari-ge stroming het zandtransport in suspensie kan worden berekend, geeft voor laboratoriumomstandigheden goede resultaten en behoort tot de betere theorieën.
- Voor natuuumstandigheden, zoals in de Westerschelde en de Rio Magdalena, leidt de methode evenwel tot veel te grote transporten. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit, dat de bij de methode gebruikte relatie voor de bodemconcentratie: $c_o = f(u'_{\frac{x}{k}})$ gebaseerd is op uitsluitend gootwaarnemingen, waardoor met name voor wat betreft de waterdiepten het geldigheidsgebied beperkt is.

9.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Het uitgevoerde onderzoek heeft het nadeel, dat voor de afleiding van de relatie tussen de concentratie bij de bodem en één of meer stroomparameters alleen gootwaarnemingen zijn gebruikt en het geldigheidsgebied daardoor beperkt is. Vooral wat betreft de waterdiepte bestrijken de gebruikte waarnemingen slechts een klein gebied ($h = 0,05 - 0,31$ m). Waarnemingen bij grotere waterdiepten kunnen doorgaans alleen in de natuur worden gedaan. Natuurmetingen hebben het nadeel, dat ze worden uitgevoerd onder minder goed controleerbare omstandigheden, hetgeen de nauwkeurigheid niet ten goede komt. Bovendien zijn bruikbare natuurmetingen schaars.

In paragraaf 3.2 is gesteld, dat over het uitwisselingsmechanisme van sediment bij de bodem (entrainment) in de literatuur niet veel bekend is en een bruikbaar mechanisme niet voorhanden. Sinds 1973 (de in dit verslag opgenomen literatuurstudie gaat niet verder dan 1973) is meer literatuur hierover verschenen. Opvallend is evenwel, dat de gegeven theorieën slecht experimenteel zijn onderbouwd.

Gezien de hiervoor genoemde overwegingen verdient het aanbeveling het onderzoek verder te richten op het uitwisselingsmechanisme bij de bodem en de kennis hierover te verdiepen door experimenteel onderzoek in een goot met als doel een mathematische beschrijving van het mechanisme.

LITERATUUR

- 1 SUTHERLAND, A.J. (1967),
Proposed mechanism for sediment entrainment by turbulent flows,
Journal of Geophysical Research, Vol. 72, no. 24, pag. 6183-6194
- 2 ENGELUND, F. (1970),
A note on the mechanics of sediment suspension,
Technical University of Denmark, Progress Report no. 21
- 3 LE FEUVRE, A.R. e.a. (1970),
Sediment-pickup function,
Proc. ASCE, Vol. 96, no. HY10, pag. 2051-2063
- 4 COOPER, R.H. en PETERSON, A.W. (1970),
Flume experiments on flow in mobile bed channels,
Proc. ASCE, Vol. 96, no. HY10, pag. 2167-2169
- 5 VANONI, V.A. en BROOKS, N.H. (1957),
Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams,
California Institute of Technology, report no. E-68
- 6 WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM (1969),
Beddingvormen, rapport literatuurstudie,
Rapport S 80-I
- 7 GUY, H.P., SIMMONS, D.B. en RICHARDSON, E.V. (1956-1961),
Summary of alluvial channel data from flume experiments,
Geological survey professional paper 462-I
- 8 LOVEEA, F. en KENNEDY, J.F. (1969),
Friction-factors for flat-bed flows in sand channels,
Proc. ASCE, Vol. 95, no. HY4, pag. 1227-1234
- 9 WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM (1974),
Risico analyse, speurwerkverslag,
S 164

LITERATUUR (vervolg)

- 10 DAVIES, T.R. (1971),
Summary of experimental data for flume tests over fine sand,
University of Southampton, Department of civil engineering, report CE/3/71
- 11 WHITE, W.R., MILLI, H. e.a. (1975),
Sediment transport theories: a review,
Proc. Inst. Civ. Engrs., Vol. 57, Part 2, 1975, pag. 265-292
- 12 RIJKSWATERSTAAT, Studiedienst Vlissingen (1975),
Tweede bericht betreffende een empirische methode ter bepaling van zand-
transporten in de Westerschelde,
memo 75.8
- 13 INSTITUTO COLOMBIANO DE HIDROLOGIA, Meteorologia y Adecuacion de Tierras,
Ministerio de Agricultura, Republica de Colombia (1977),
Proyecto Cuenca Magdalena-Cauca; Convenio Colombo-Holandes,
Informe Final
- 14 DIJKMAN, J. (1978),
Some characteristics of USP-61 and Delft Bottle suspended sediment samplers,
Delft TH, dept. of civ. eng., fluid mechanics group, 1978, Sept.

W	$\frac{u_*}{W}$	$\frac{k}{h}$	u_*	\bar{u}	K	Z	S_0	S_1	ΔS	$\frac{o}{oo}$ t.o.v. S_0
cm/s	-	-	cm/s	cm/s	-	-	gr/m ² s	gr/m ² s	gr/m ² s	
0,5	10	0,033	5	105,4	0,280	0,357	150.169	150.139	30	0,20
0,5	10	0,01	5	129,9	0,273	0,366	128.673	128.663	10	0,08
0,5	10	0,002	5	163,4	0,266	0,376	93.872	93.870	2	0,02
1	6	0,033	6	134,9	0,262	0,635	46.618	46.582	36	0,77
1	6	0,01	6	163,9	0,260	0,642	28.724	28.714	10	0,35
1	6	0,002	6	202,5	0,258	0,647	13.646	13.644	2	0,15
2	3	0,033	6	137,6	0,257	1,297	2.639,1	2.609,1	30,0	11,4
2	3	0,01	6	165,6	0,257	1,298	971,16	962,05	9,11	9,25
2	3	0,002	6	203,3	0,257	1,299	232,15	230,33	1,82	7,85
3	2	0,033	6	137,8	0,257	1,948	434,64	410,78	23,86	55,0
3	2	0,01	6	165,7	0,257	1,948	136,46	129,22	7,24	53,1
3	2	0,002	6	203,4	0,257	1,948	27,801	26,353	1,448	52,0

Tabel 1 Aandeel laagje bij de bodem ter dikte van k/33 in het totale suspensietransport

S_0 voor $c_0 = 0,2$

W	$\frac{u_*}{W}$	$\frac{k}{h}$	u_*	\bar{u}	K	Z	S_0	S_1	ΔS	$\frac{o}{oo}$ t.o.v. S_0
cm/s	-	-	cm/s	cm/s	-	-	gr/m ² s	gr/m ² s	gr/m ² s	
0,5	10	0,033	5	83,2	0,354	0,282	15.572	15.568	4	0,26
0,5	10	0,01	5	100,4	0,353	0,283	13.700	13.699	1	0,07
0,5	10	0,002	5	123,6	0,352	0,284	10.896	10.896	0	0
1	6	0,033	6	100,7	0,351	0,474	5.922,9	5.918,1	4,8	0,81
1	6	0,01	6	121,3	0,351	0,475	4.205,9	4.204,4	1,5	0,36
1	6	0,002	6	149,0	0,350	0,476	2.493,8	2.493,5	0,3	0,12
2	3	0,033	6	101,0	0,350	0,952	505,45	501,87	3,58	7,08
2	3	0,01	6	121,5	0,350	0,952	227,27	226,18	1,09	4,80
2	3	0,002	6	149,1	0,350	0,952	71,349	71,132	0,217	3,04
3	2	0,033	6	101,1	0,350	1,428	84,334	81,683	2,651	31,4
3	2	0,01	6	121,5	0,350	1,429	28,978	28,174	0,804	27,8
3	2	0,002	6	149,1	0,350	1,429	6,4285	6,2676	0,1609	25,0

Tabel 2 Aandeel laagje bij de bodem ter dikte van k/33 in het totale suspensietransport

S_0 voor $c_o = 0,04$

\bar{w} cm/s	$\frac{u_*}{\bar{w}}$ -	$\frac{k}{h}$ -	u_* cm/s	\bar{u} cm/s	K -	Z -	S_0 gr/m ² s	S_1 gr/m ² s	ΔS gr/m ² s	o/oo t.o.v. S_0
0,5	10	0,033	5	77,9	0,378	0,264	2.853,3	2.852,5	0,8	0,28
0,5	10	0,01	5	93,8	0,378	0,264	2.545,1	2.544,8	0,3	0,12
0,5	10	0,002	5	115,1	0,378	0,265	2.072,7	2.072,6	0,1	0,05
1	6	0,033	6	93,7	0,378	0,441	1.147,5	1.146,7	0,8	0,70
1	6	0,01	6	112,7	0,378	0,441	841,82	841,56	0,26	0,31
1	6	0,002	6	138,3	0,378	0,441	523,80	523,75	0,05	0,10
2	3	0,033	6	93,7	0,377	0,883	109,13	108,48	0,65	5,96
2	3	0,01	6	112,7	0,377	0,883	51,812	51,617	0,195	3,76
2	3	0,002	6	138,3	0,377	0,883	17,569	17,530	0,039	2,22
3	2	0,033	6	93,7	0,377	1,325	18,640	18,163	0,477	25,6
3	2	0,01	6	112,7	0,377	1,325	6,6574	6,5127	0,1447	21,8
3	2	0,002	6	138,3	0,377	1,325	1,5446	1,5156	0,0290	18,8

Tabel 3 Aandeel laagje bij de bodem ter dikte van k/33 in het totale suspensietransport
 S_0 voor $c_0 = 0,008$

W	$\frac{u_x}{W}$	$\frac{k}{h}$	u_x	\bar{u}	K	Z	S_0	S_1	ΔS	c/oo t.o.v. S_0
cm/s	-	-	cm/s	cm/s	-	-	gr/m ² s	gr/m ² s	gr/m ² s	
0,5	10	0,033	5	76,8	0,384	0,260	561,84	561,68	0,16	0,28
0,5	10	0,01	5	92,3	0,384	0,260	502,80	502,75	0,05	0,10
0,5	10	0,002	5	113,3	0,384	0,260	411,70	411,69	0,01	0,02
1	6	0,033	6	92,2	0,384	0,434	228,72	228,55	0,17	0,74
1	6	0,01	6	110,8	0,384	0,434	168,98	168,93	0,05	0,30
1	6	0,002	6	136,0	0,384	0,434	106,24	106,23	0,01	0,09
2	3	0,033	6	92,2	0,384	0,869	22,257	22,130	0,127	5,70
2	3	0,01	6	110,9	0,384	0,869	10,693	10,655	0,038	3,56
2	3	0,002	6	136,1	0,384	0,869	3,6869	3,6793	0,0076	2,07
3	2	0,033	6	92,2	0,384	1,303	3,8238	3,7303	0,0935	24,4
3	2	0,01	6	110,9	0,384	1,303	1,3781	1,3498	0,0283	20,5
3	2	0,002	6	136,1	0,384	1,303	0,3233	0,3176	0,0057	17,6

Tabel 4 Aandeel laagje bij de bodem ter dikte van k/33 in het totale suspensietransport
 S_0 voor $c_o = 0,0016$

nummer	bed- vorm	B m/s	C m/s	κ berekend -	h m	u _* (m/s)		k/h (-)	
						sneldheids- profiel	verhang	sneldheids- profiel	verhang
1	r	0,20	0,67	0,380	0,17	0,034	0,038	0,104	0,353
2	r	0,24	0,76	0,371	0,31	0,039	0,041	0,075	0,179
4	tr	0,39	1,46	0,262	0,26	0,044	0,049	0,024	0,069
5	pl	0,42	1,59	0,231	0,24	0,042	0,048	0,022	0,082
6	tr	0,43	1,72	0,237	0,22	0,044	0,055	0,014	0,079
7	pl	0,34	1,44	0,254	0,16	0,037	0,049	0,011	0,140
8	tr	0,38	1,44	0,234	0,26	0,038	0,056	0,020	0,201
9	pl	0,43	1,67	0,233	0,23	0,043	0,058	0,018	0,138
10	pl	-	-	0,243	0,25	-	0,062	-	0,234
11	pl	0,39	1,69	0,217	0,22	0,037	0,062	0,007	0,227
12	pl	0,37	1,62	0,225	0,17	0,036	0,059	0,007	0,202
13	pl	0,38	1,71	0,223	0,16	0,037	0,063	0,007	0,223
14	tr	-	-	0,317	0,22	-	0,070	-	0,470
15	pl	0,70	2,40	0,220	0,17	0,067	0,074	0,076	0,325
16	pl	0,52	2,10	0,264	0,20	0,059	0,085	0,015	0,297
17	pl	0,29	1,67	0,226	0,16	0,028	0,073	0,0004	0,308

r = ribbels

tr = overgangsgebied

pl = vlak bed

Tabel 6 Vergelijking schuifspanningssnelheid uit sneldheidsprofiel en uit verhang

nummer	h m	\bar{u} m/s	$\frac{u}{\kappa}$ snelheidsprofiel m/s	κ -	k m	k/h -
1	0,168	0,356	0,034	0,380	0,038	0,224
2	0,314	0,463	0,039	0,371	0,046	0,147
4	0,262	0,968	0,044	0,262	0,010	0,038
5	0,241	1,040	0,042	0,231	0,010	0,040
6	0,220	1,157	0,044	0,237	0,005	0,024
7	0,156	0,862	0,037	0,254	0,005	0,032
8	0,256	0,978	0,038	0,234	0,007	0,029
9	0,226	1,106	0,043	0,233	0,007	0,030
10	0,250	1,009	-	0,243	-	-
11	0,220	1,142	0,037	0,217	0,003	0,015
12	0,168	1,075	0,036	0,225	0,002	0,014
13	0,159	1,136	0,037	0,223	0,002	0,012
14	0,223	0,717	-	0,317	-	-
15	0,171	1,223	0,067	0,220	0,038	0,224
16	0,204	1,195	0,059	0,264	0,012	0,057
17	0,156	1,180	0,028	0,226	0,0001	0,0009

Tabel 7 Berekende k-waarde met schuifspanningssnelheid uit snelheidsprofiel

	alle parameters konstant	alle parameters gevariëerd	
		gemiddelde waarde μ	σ/μ
R_b/D_{50}	$5,182 \times 10^2$	$5,165 \times 10^2$	0,024
Re	$2,560 \times 10^4$	$2,566 \times 10^4$	0,015
\bar{u}	0,321	0,323	0,024
c_o	$1,01 \times 10^{-2}$	$1,04 \times 10^{-2}$	0,138
S_o	$2,305 \times 10^4$	$2,316 \times 10^4$	0,046
u'_{*}			0,025

Tabel 8 Resultaten berekening proef 38

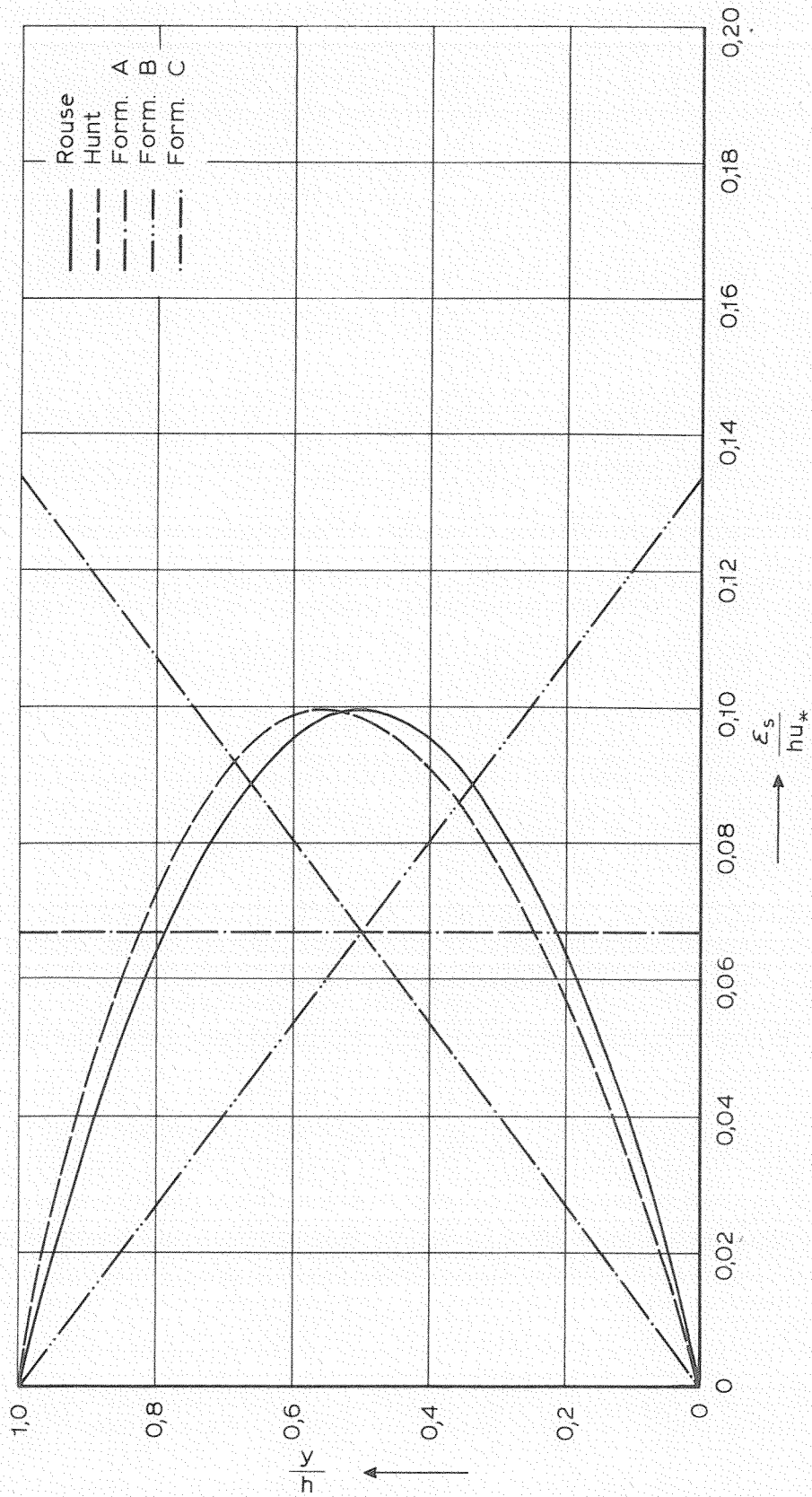
	alle parameters konstant	alle parameters gevariëerd	
		gemiddelde waarde μ	σ/μ
R_b/D_{50}	$1,026 \times 10^3$	$1,020 \times 10^3$	0,028
Re	$2,170 \times 10^5$	$2,169 \times 10^5$	0,014
\bar{u}	1,157	1,163	0,024
c_o	0,250	0,283	0,071
S_o	$1,709 \times 10^6$	$1,718 \times 10^6$	0,046
u'_{*}			0,025

Tabel 9 Resultaten berekening proef 6

bron	nummer	Q m ³ /s	h m	i -	v m ² /s	c _t ppm	ρ _s kg/dm ³	D ₅₀ m	W m/s	b m	bedding- vorm
Colorado State University - 8 ft flume	1	0,382	0,290	0,66 10 ⁻³	1,052 10 ⁻⁶	281	2,65	190 10 ⁻⁶	0,022	2,440	D
	2	0,415	0,284	0,70 10 ⁻³	1,048 10 ⁻⁶	519	2,65	190 10 ⁻⁶	0,022	2,440	D
	3	0,466	0,323	0,83 10 ⁻³	1,073 10 ⁻⁶	836	2,65	190 10 ⁻⁶	0,022	2,440	D
	4	0,573	0,332	0,99 10 ⁻³	1,036 10 ⁻⁶	1300	2,65	190 10 ⁻⁶	0,023	2,440	D
	5	0,196	0,159	0,127 10 ⁻²	1,096 10 ⁻⁶	503	2,65	190 10 ⁻⁶	0,021	2,440	D
	6	0,615	0,311	0,130 10 ⁻²	1,017 10 ⁻⁶	1270	2,65	190 10 ⁻⁶	0,023	2,440	D
	7	0,228	0,186	0,130 10 ⁻²	1,133 10 ⁻⁶	861	2,65	190 10 ⁻⁶	0,022	2,440	D
	8	0,270	0,207	0,140 10 ⁻²	1,057 10 ⁻⁶	1240	2,65	190 10 ⁻⁶	0,022	2,440	D
	9	0,211	0,159	0,147 10 ⁻²	1,045 10 ⁻⁶	999	2,65	190 10 ⁻⁶	0,023	2,440	D
	10	0,230	0,149	0,194 10 ⁻²	1,042 10 ⁻⁶	1210	2,65	190 10 ⁻⁶	0,023	2,440	D
	11	0,538	0,345	0,140 10 ⁻²	1,074 10 ⁻⁶	931	2,65	270 10 ⁻⁶	0,035	2,440	D
	12	0,603	0,314	0,163 10 ⁻²	1,090 10 ⁻⁶	833	2,65	270 10 ⁻⁶	0,035	2,440	D
	13	0,439	0,287	0,167 10 ⁻²	1,148 10 ⁻⁶	704	2,65	270 10 ⁻⁶	0,034	2,440	D
	14	0,189	0,140	0,185 10 ⁻²	1,166 10 ⁻⁶	753	2,65	270 10 ⁻⁶	0,034	2,440	D
	15	0,571	0,326	0,131 10 ⁻²	1,043 10 ⁻⁶	732	2,65	280 10 ⁻⁶	0,037	2,440	D
	16	0,482	0,311	0,134 10 ⁻²	1,118 10 ⁻⁶	549	2,65	280 10 ⁻⁶	0,037	2,440	D
Nomicos	17	0,143 10 ⁻¹	0,078	0,206 10 ⁻²	0,896 10 ⁻⁶	6920	2,65	91 10 ⁻⁶	0,009	0,267	D
	18	0,143 10 ⁻¹	0,078	0,206 10 ⁻²	0,896 10 ⁻⁶	8080	2,65	91 10 ⁻⁶	0,009	0,267	D
	19	0,143 10 ⁻¹	0,078	0,258 10 ⁻²	0,896 10 ⁻⁶	3610	2,65	147 10 ⁻⁶	0,018	0,267	D
	20	0,122 10 ⁻¹	0,071	0,250 10 ⁻²	0,923 10 ⁻⁶	2300	2,65	137 10 ⁻⁶	0,016	0,267	D
	21	0,122 10 ⁻¹	0,074	0,225 10 ⁻²	0,896 10 ⁻⁶	3400	2,65	152 10 ⁻⁶	0,019	0,267	D
Vanoni en Brooks	22	0,328 10 ⁻¹	0,062	0,276 10 ⁻²	1,036 10 ⁻⁶	3000	2,65	137 10 ⁻⁶	0,014	0,851	D
	23	0,108	0,166	0,107 10 ⁻²	0,898 10 ⁻⁶	1150	2,65	137 10 ⁻⁶	0,016	0,851	D
Brooks	24	0,122 10 ⁻¹	0,074	0,250 10 ⁻²	0,965 10 ⁻⁶	1950	2,65	143 10 ⁻⁶	0,016	0,267	D
	25	0,120 10 ⁻¹	0,072	0,240 10 ⁻²	1,220 10 ⁻⁶	2450	2,65	143 10 ⁻⁶	0,014	0,267	D
	26	0,122 10 ⁻¹	0,072	0,225 10 ⁻²	0,896 10 ⁻⁶	4850	2,65	88 10 ⁻⁶	0,008	0,267	D
Barton en Lin	27	0,118	0,125	0,129 10 ⁻²	0,862 10 ⁻⁶	1640	2,65	180 10 ⁻⁶	0,024	1,220	D
	28	0,162	0,183	0,121 10 ⁻²	0,876 10 ⁻⁶	1060	2,65	180 10 ⁻⁶	0,024	1,220	D
	29	0,125	0,238	0,88 10 ⁻³	1,148 10 ⁻⁶	550	2,65	180 10 ⁻⁶	0,020	1,220	D
	30	0,980 10 ⁻¹	0,192	0,87 10 ⁻³	0,988 10 ⁻⁶	480	2,65	180 10 ⁻⁶	0,022	1,220	D
	31	0,112	0,210	0,88 10 ⁻³	1,038 10 ⁻⁶	550	2,65	180 10 ⁻⁶	0,022	1,220	D
	32	0,870 10 ⁻¹	0,198	0,81 10 ⁻³	0,966 10 ⁻⁶	230	2,65	180 10 ⁻⁶	0,023	1,220	D
	33	0,560 10 ⁻¹	0,156	0,88 10 ⁻³	1,038 10 ⁻⁶	260	2,65	180 10 ⁻⁶	0,022	1,220	D
	34	0,756 10 ⁻¹	0,137	0,150 10 ⁻²	0,988 10 ⁻⁶	1230	2,65	180 10 ⁻⁶	0,022	1,220	D
	35	0,532 10 ⁻¹	0,122	0,158 10 ⁻²	0,948 10 ⁻⁶	570	2,65	180 10 ⁻⁶	0,023	1,220	D
	36	0,375 10 ⁻¹	0,110	0,161 10 ⁻²	1,032 10 ⁻⁶	300	2,65	180 10 ⁻⁶	0,022	1,220	D
	37	0,252 10 ⁻¹	0,092	0,160 10 ⁻²	0,834 10 ⁻⁶	110	2,65	180 10 ⁻⁶	0,024	1,220	D
	38	0,588 10 ⁻¹	0,122	0,135 10 ⁻²	0,896 10 ⁻⁶	1010	2,65	180 10 ⁻⁶	0,023	1,220	D
	39	0,739 10 ⁻¹	0,146	0,116 10 ⁻²	0,923 10 ⁻⁶	900	2,65	180 10 ⁻⁶	0,023	1,220	D
	40	0,116	0,223	0,82 10 ⁻³	0,875 10 ⁻⁶	560	2,65	180 10 ⁻⁶	0,023	1,220	D
	41	0,202	0,314	0,61 10 ⁻³	0,868 10 ⁻⁶	560	2,65	180 10 ⁻⁶	0,023	1,220	D
42	0,248	0,421	0,65 10 ⁻³	0,887 10 ⁻⁶	330	2,65	180 10 ⁻⁶	0,023	1,220	D	
Laursen	43	0,796 10 ⁻¹	0,171	0,122 10 ⁻²	0,996 10 ⁻⁶	2250	2,65	110 10 ⁻⁶	0,011	0,915	D
	44	0,180	0,283	0,101 10 ⁻²	0,919 10 ⁻⁶	2700	2,65	110 10 ⁻⁶	0,012	0,915	D
	45	0,829 10 ⁻¹	0,157	0,152 10 ⁻²	0,980 10 ⁻⁶	4240	2,65	110 10 ⁻⁶	0,011	0,915	D
	46	0,740 10 ⁻¹	0,158	0,144 10 ⁻²	0,974 10 ⁻⁶	3130	2,65	110 10 ⁻⁶	0,011	0,915	D
	47	0,110	0,231	0,92 10 ⁻³	0,974 10 ⁻⁶	1560	2,65	110 10 ⁻⁶	0,011	0,915	D
	48	0,133	0,144	0,120 10 ⁻²	0,946 10 ⁻⁶	5150	2,65	110 10 ⁻⁶	0,012	0,915	D
	49	0,131	0,216	0,107 10 ⁻²	0,937 10 ⁻⁶	3050	2,65	110 10 ⁻⁶	0,012	0,915	D

R = ribbels
D = duinen
V = vlak bed

Tabel 10 Resultaten van 105 gootmetingen gebruikt voor de toetsing van de berekeningsmethode voor suspensietransport



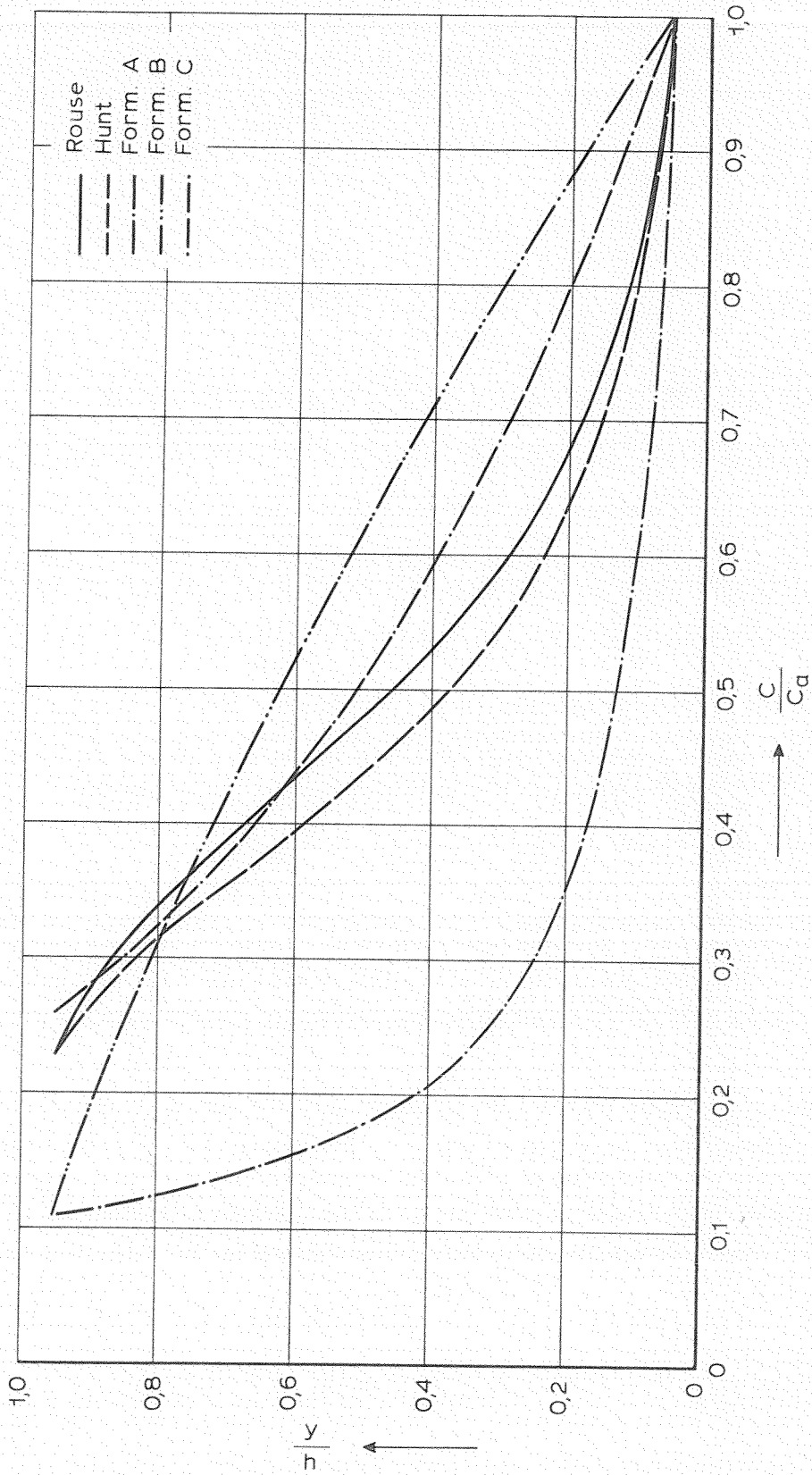
BESCHOUWDE VERDELINGEN UITWISSELINGS -
 KOEFFICIENT VAN SEDIMENT

$K = 0,4$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 1



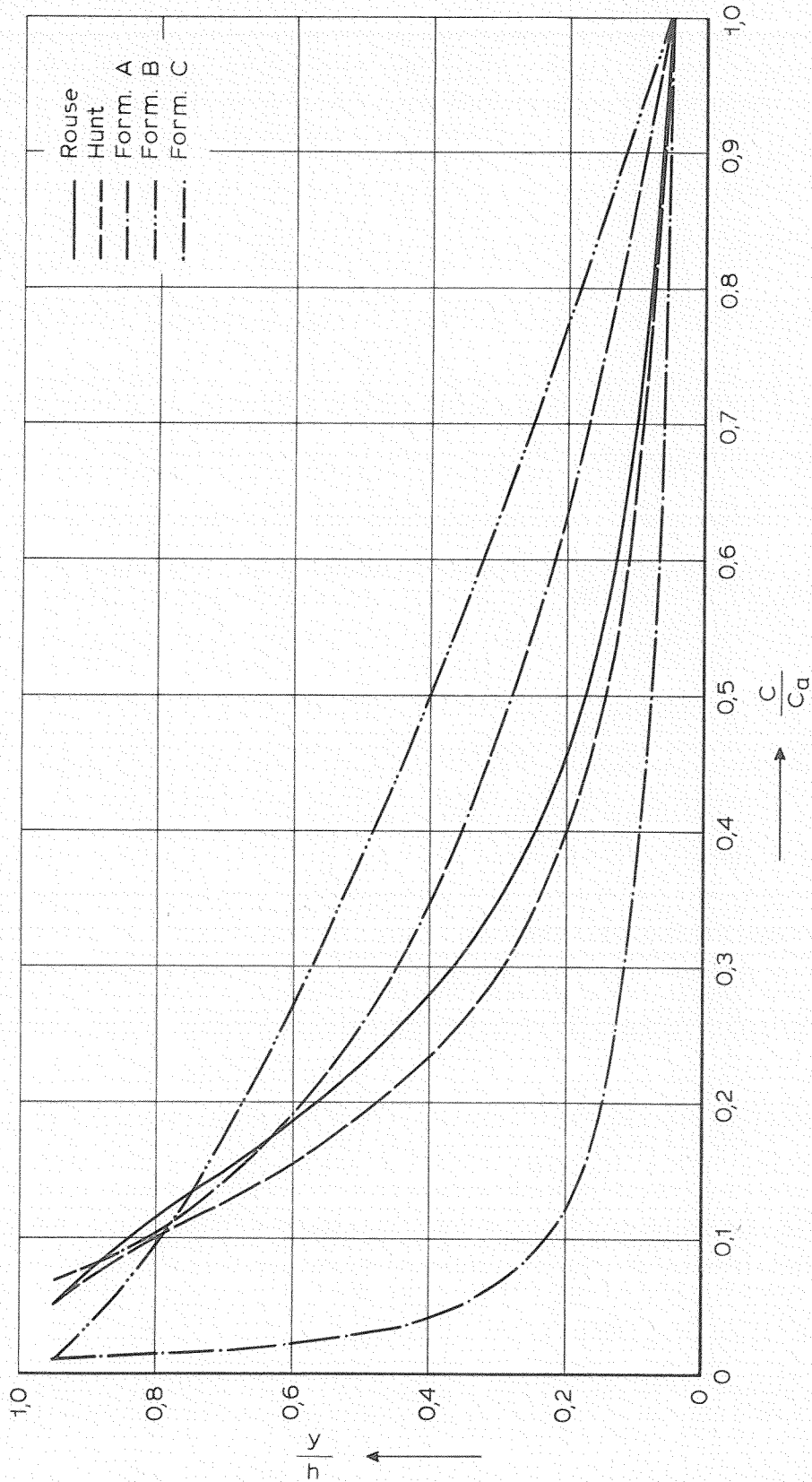
INVLOED VERDELING UITWISSELINGSKOËFFICIËNT
VAN SEDIMENT OP KONCENTRATIEVERDELING

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$Z = 0,25$

R 783

FIG. 2



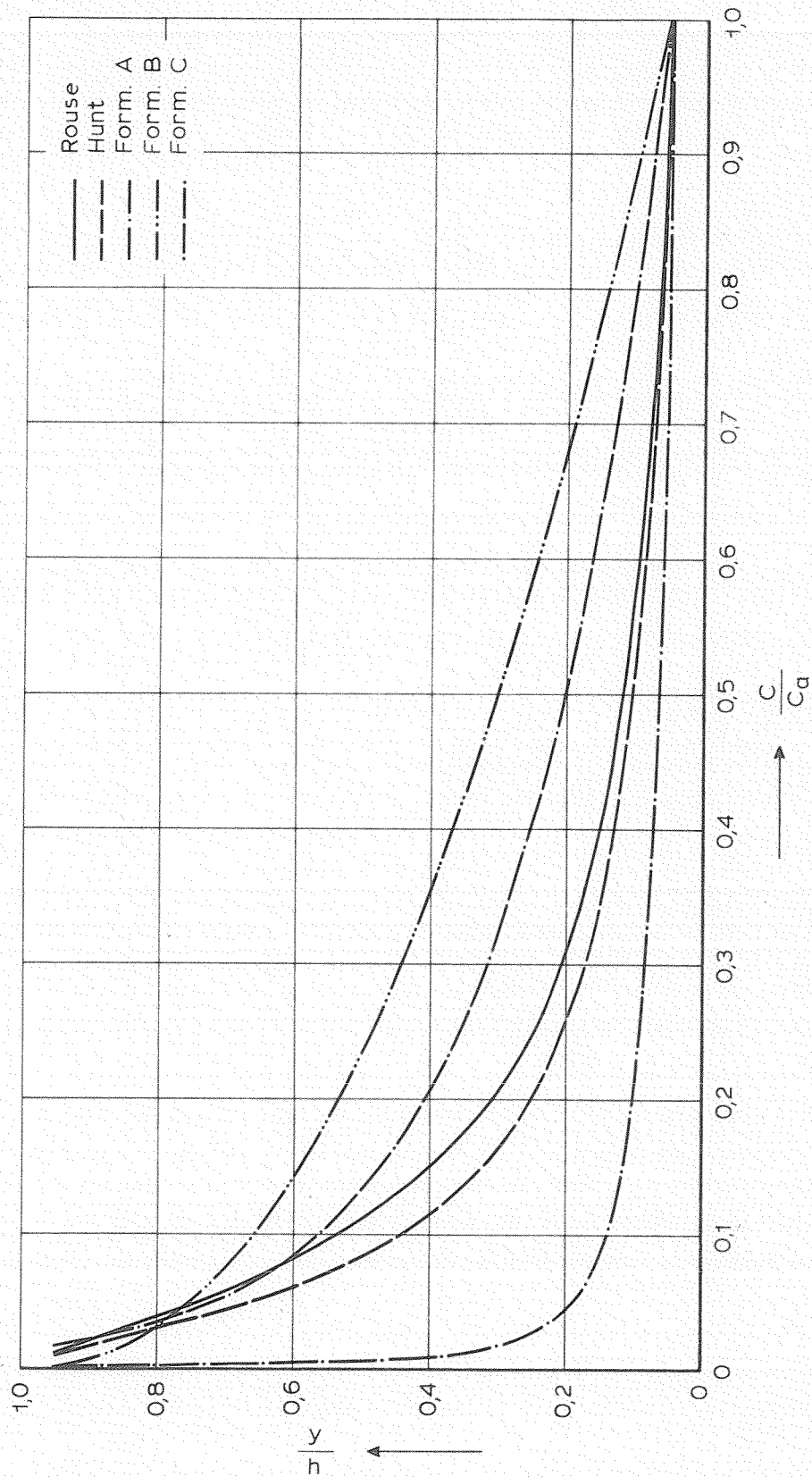
INVLOED VERDELING UITWISSELINGSKOEFFICIËNT
VAN SEDIMENT OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,50$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 3



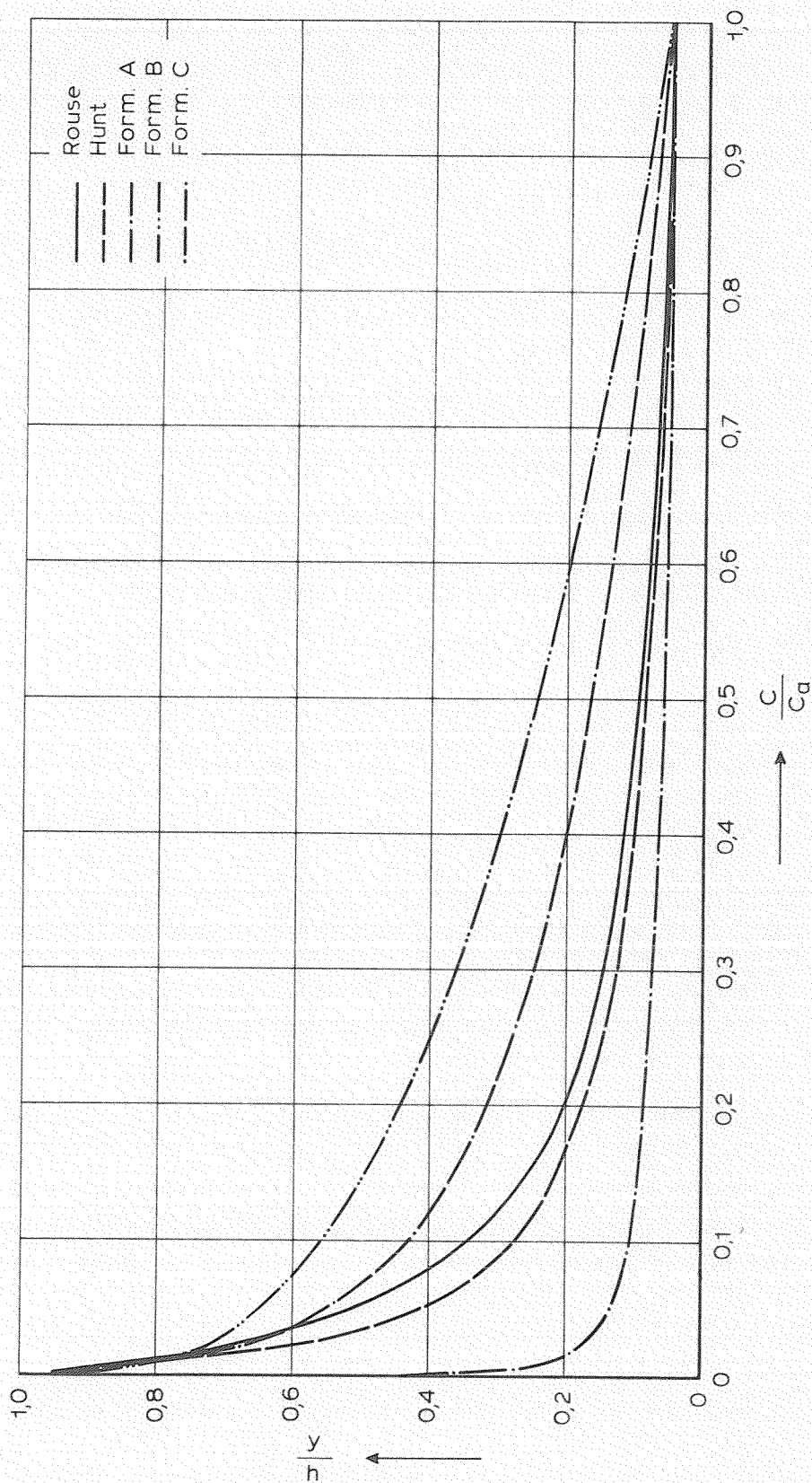
INVLOED VERDELING UITWISSELINGSKOEFFICIËNT
VAN SEDIMENT OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,75$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 4



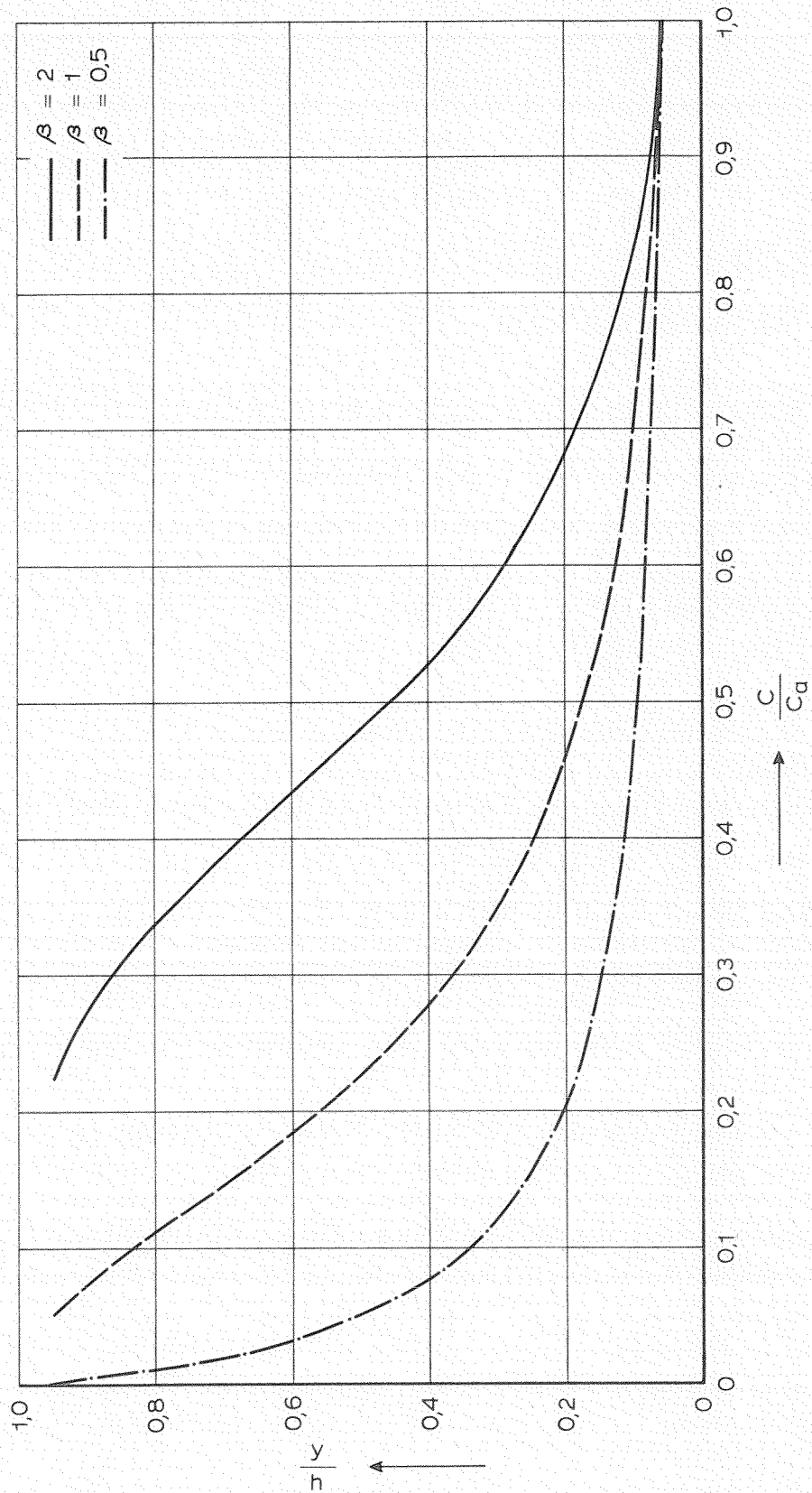
INVLOED VERDELING UITWISSELINGSKOEFFICIENT
VAN SEDIMENT OP KONCENTRATIEVERDELING

Z = 1,00

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 5



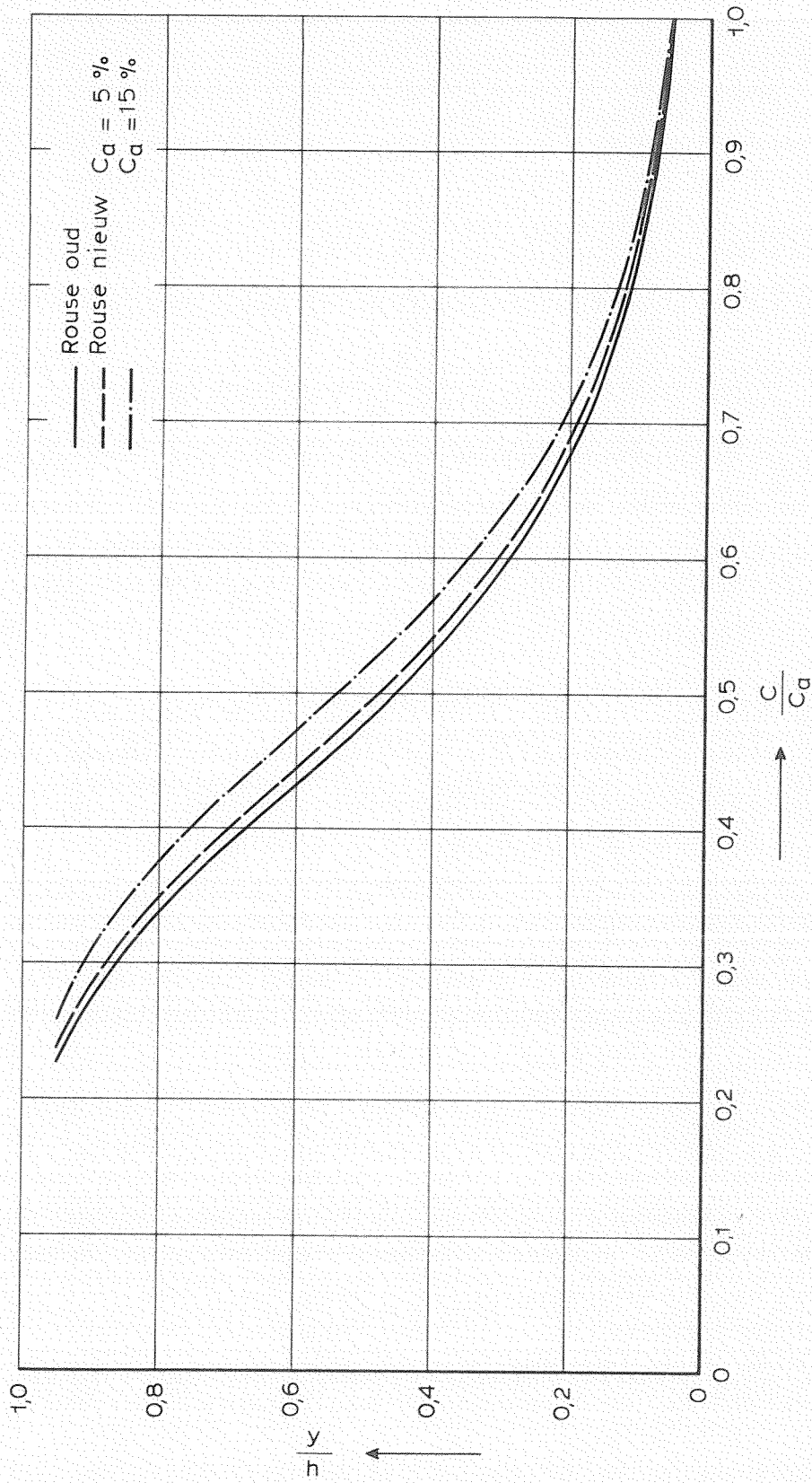
INVLOED ABSOLUTE WAARDE UITWISSELINGSKOËF-
FICIENT VAN SEDIMENT OP KONCENTRATIEVERDELING

Z=0,50

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 6



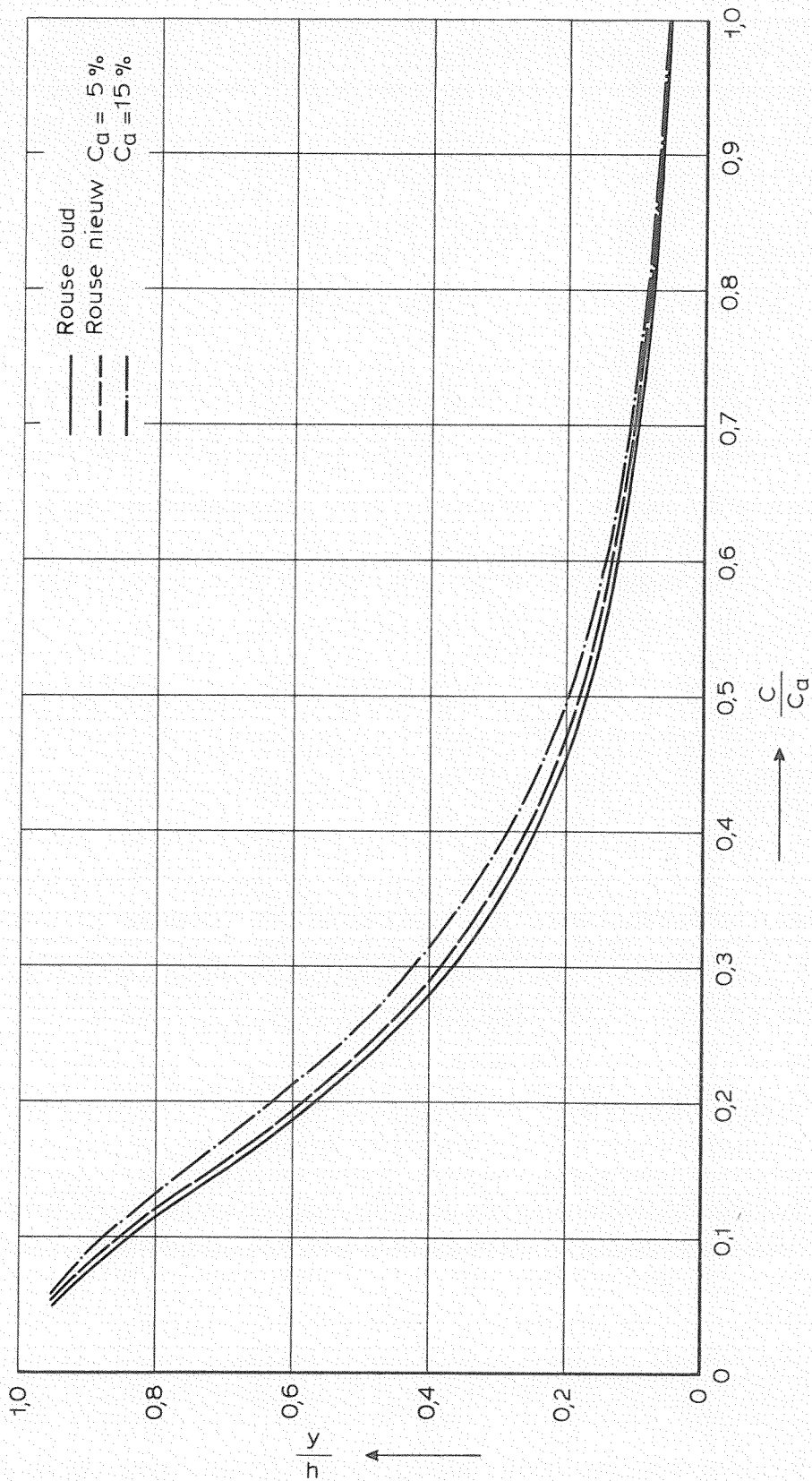
INVLOED IN REKENING BRENGEN VAN DOOR SEDIMENT
INGENOMEN VOLUME OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,25$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 7



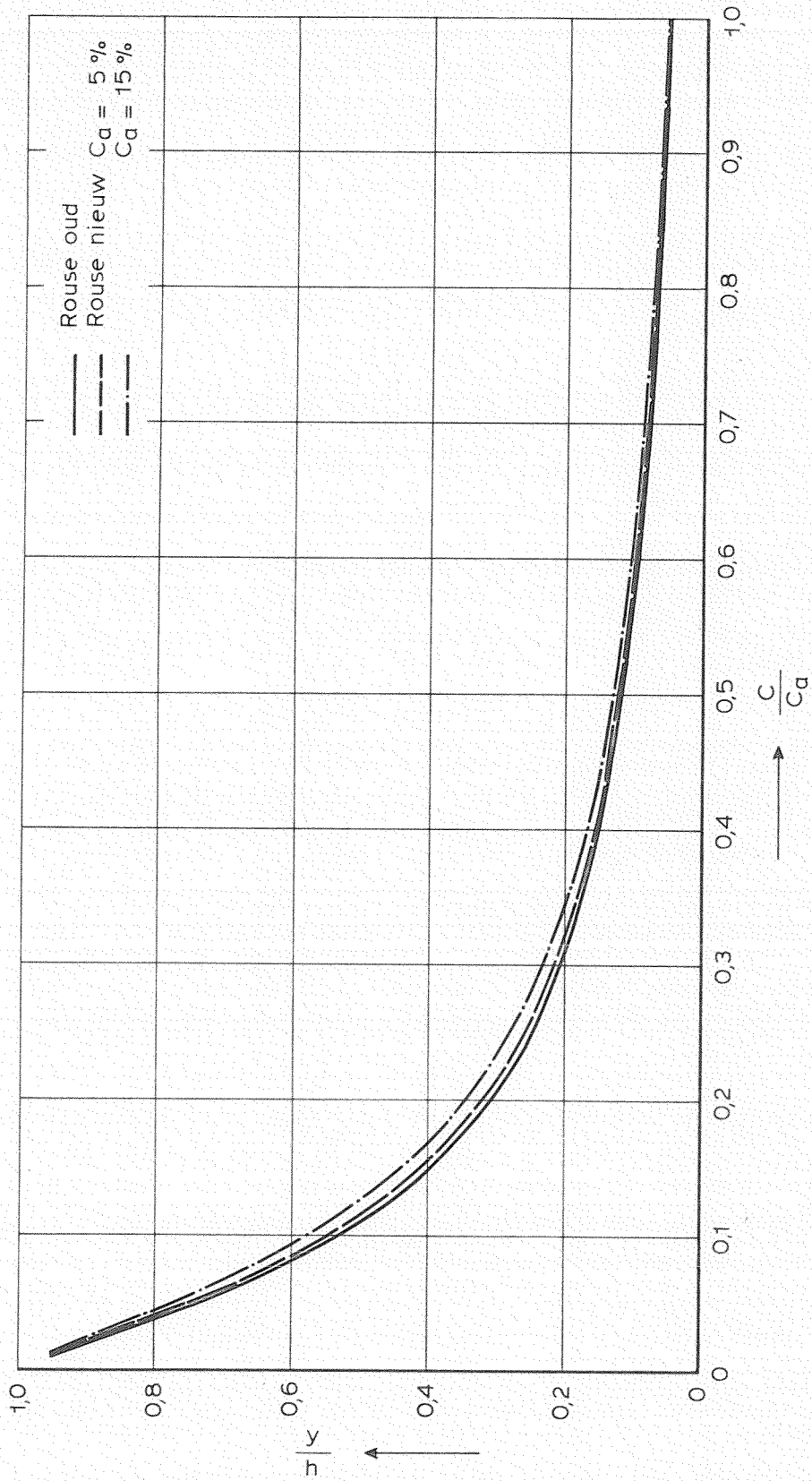
INVLOED IN REKENING BRENGEN VAN DOOR SEDIMENT
INGENOMEN VOLUME OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,50$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 8



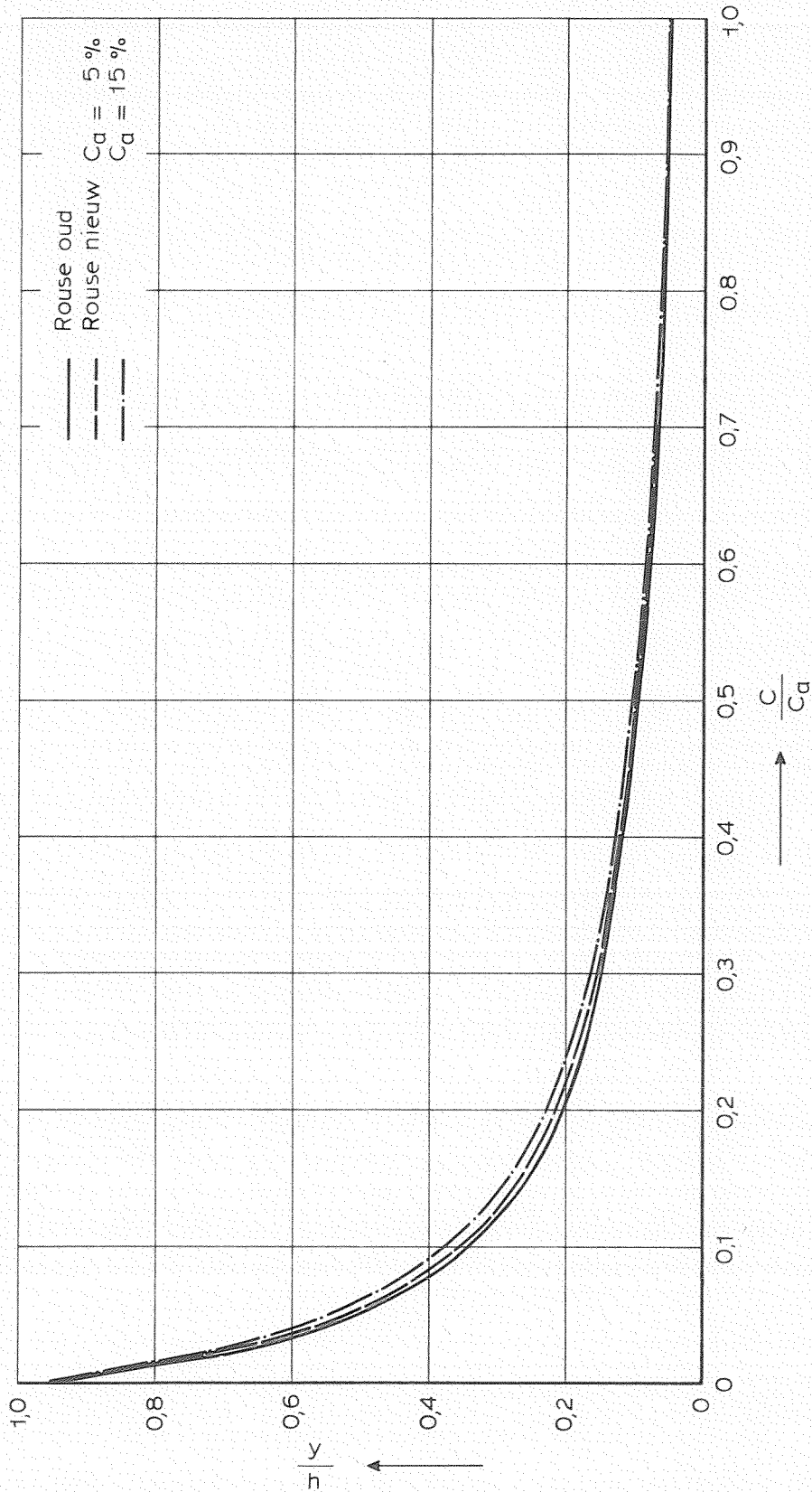
INVLOED IN REKENING BRENGEN VAN DOOR SEDIMENT
INGENOMEN VOLUME OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,75$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 9



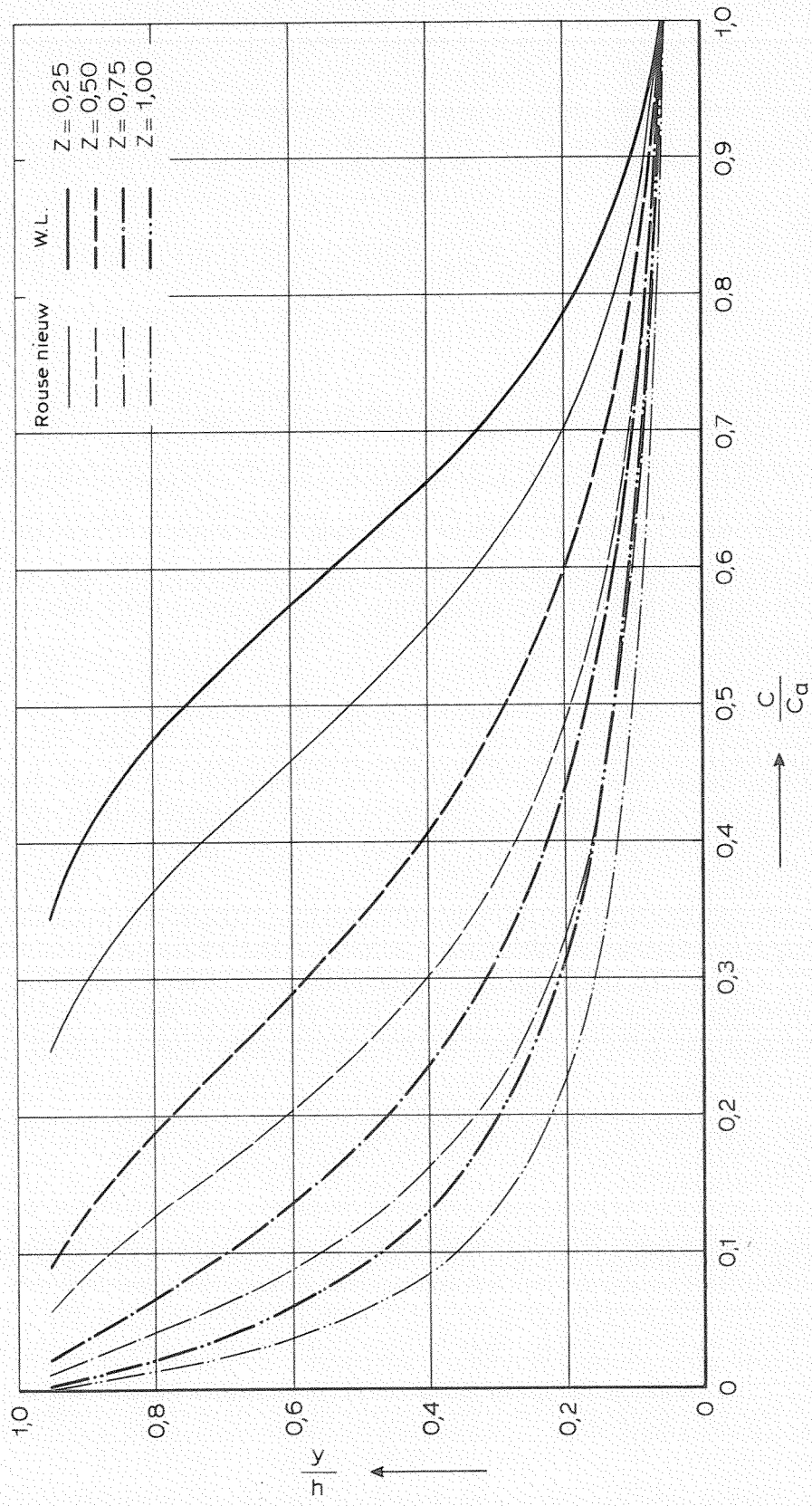
INVLOED IN REKENING BRENGEN VAN DOOR SEDIMENT
 INGENOMEN VOLUME OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 1,00$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 10



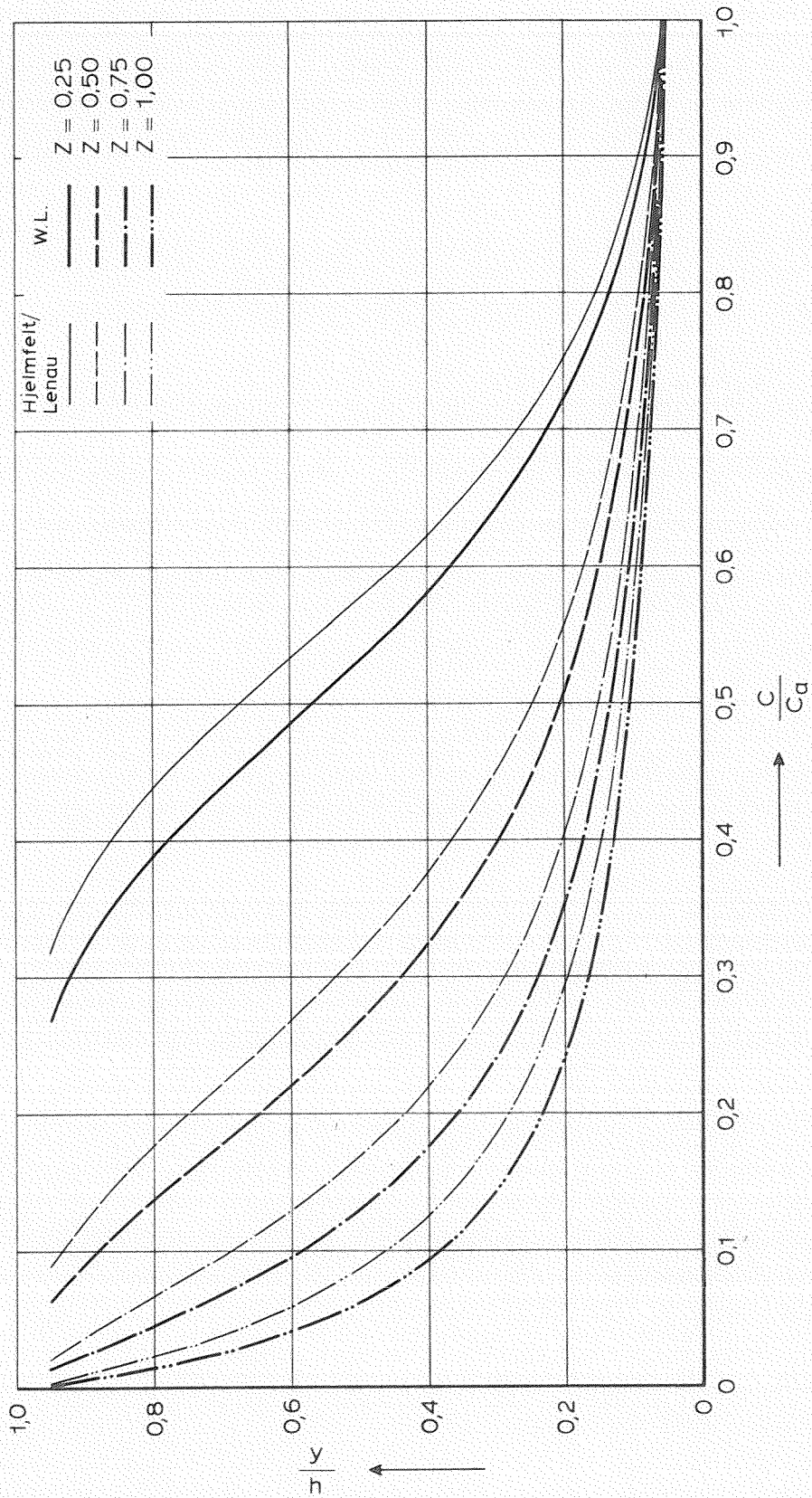
INVLOED VALSNELHEID ALS FUNKTIE VAN
 KONCENTRATIE OP KONCENTRATIEVERDELING

$C_d = 10\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 11



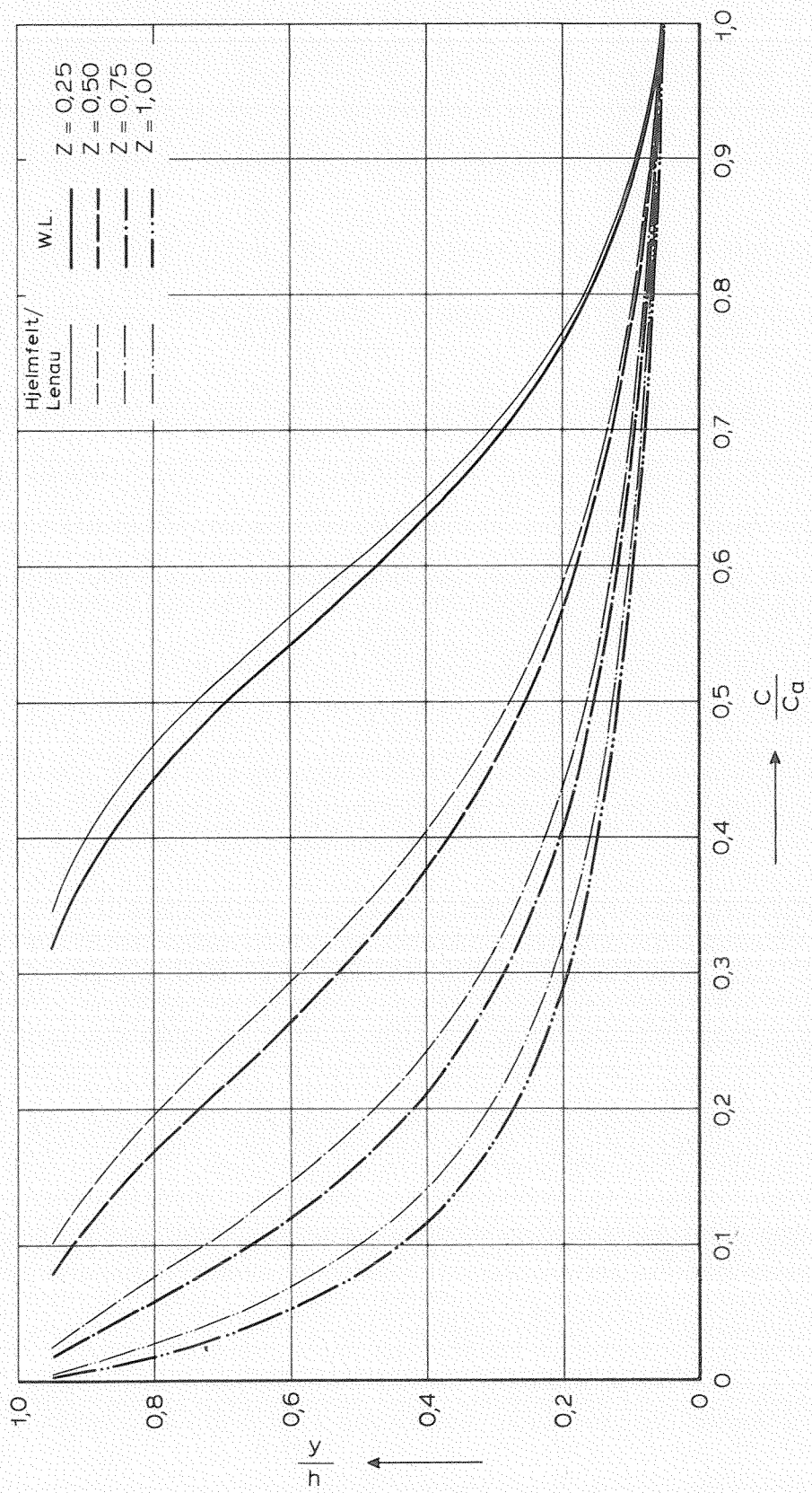
VERGELIJKING KONCENTRATIEVERDELING VOLGENS
 W.L. MET KONCENTRATIEVERDELING VOLGENS
 HJELMFELT EN LENAU

$C_d = 5\%$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

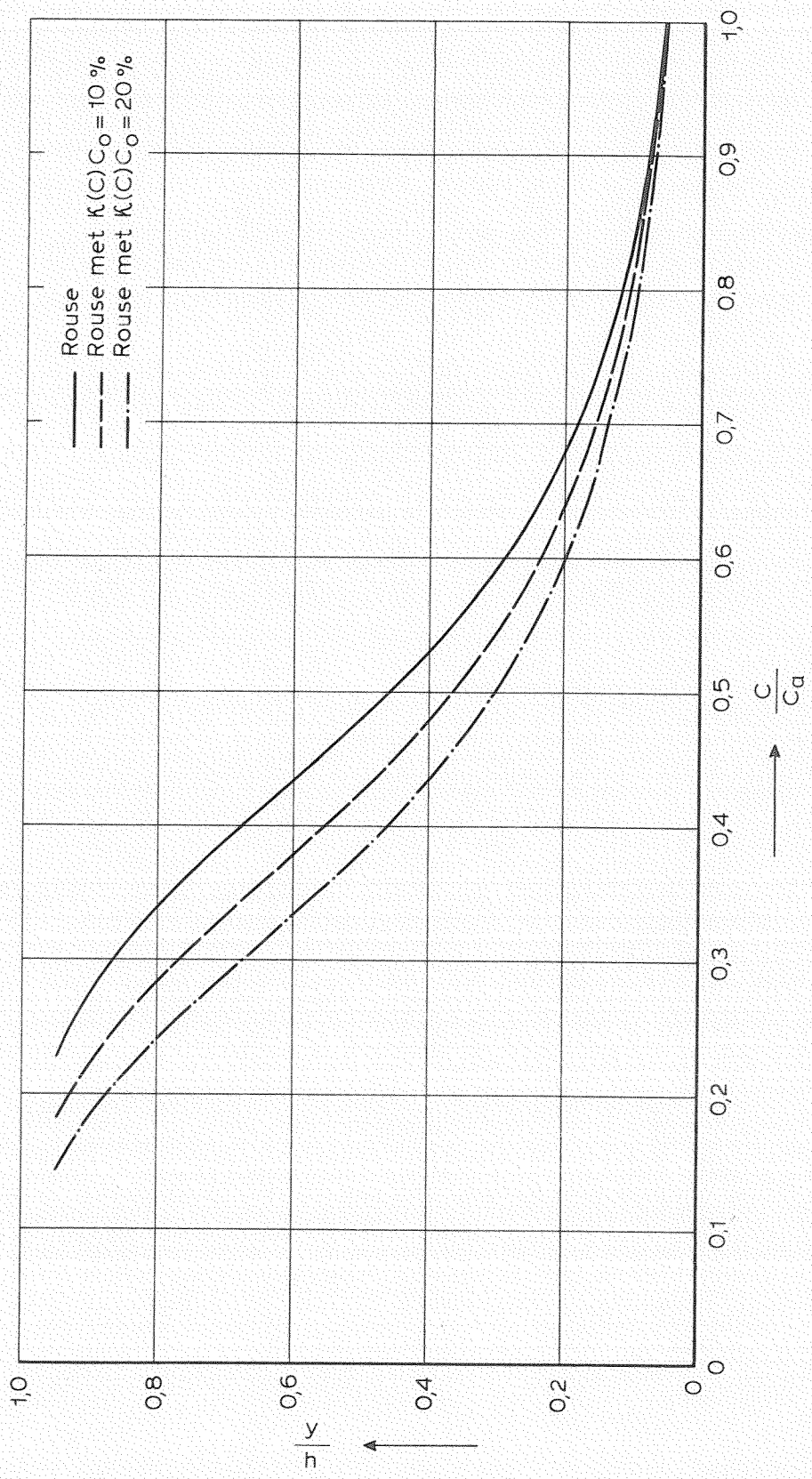
R 783

FIG. 12



VERGELIJKING KONCENTRATIEVERDELING VOLGENS
 W.L. MET KONCENTRATIEVERDELING VOLGENS
 HJELMFELT EN LENAU

$C_a = 10\%$



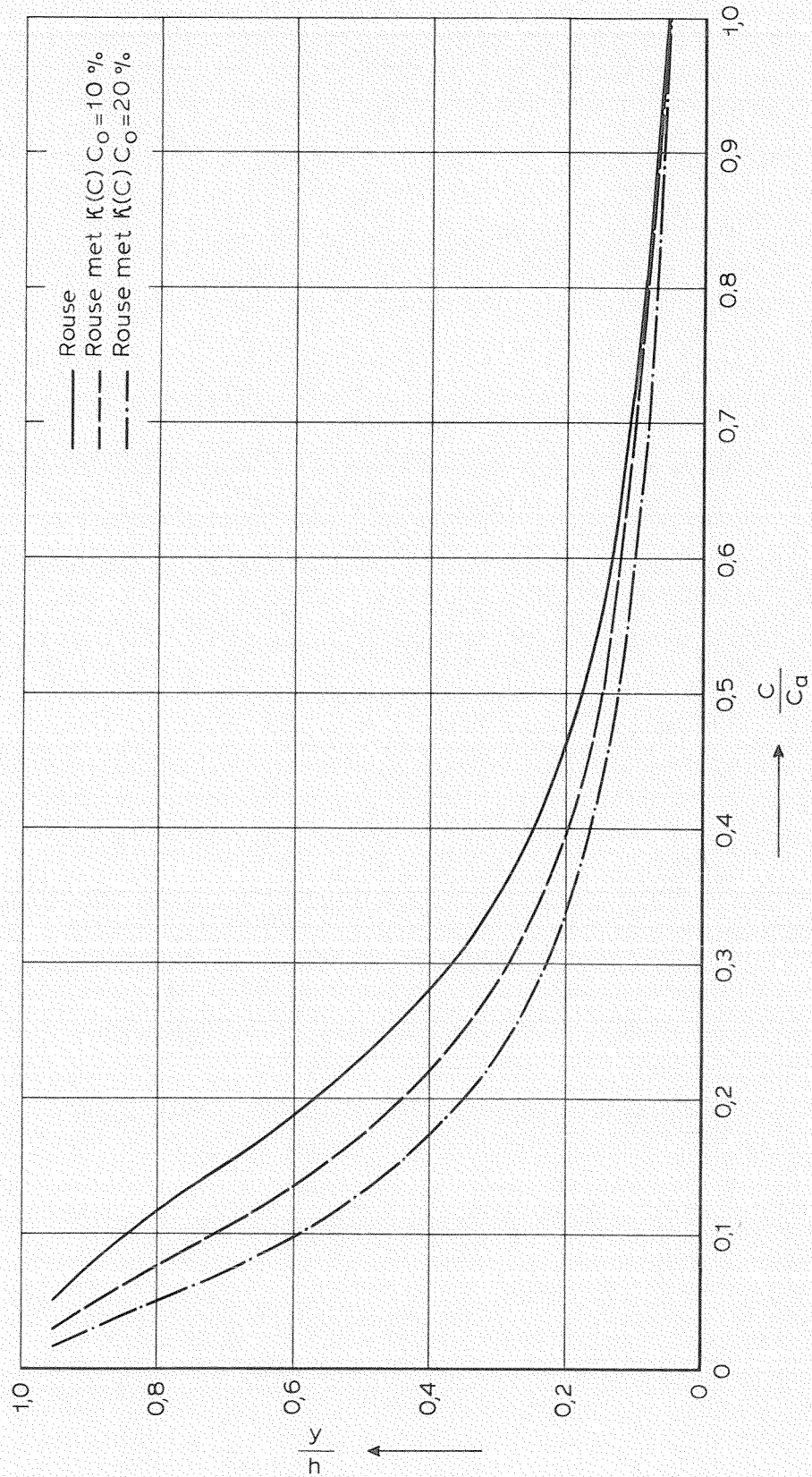
INVLOED K ALS FUNKTIE VAN KONCENTRATIE
OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,25$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 14



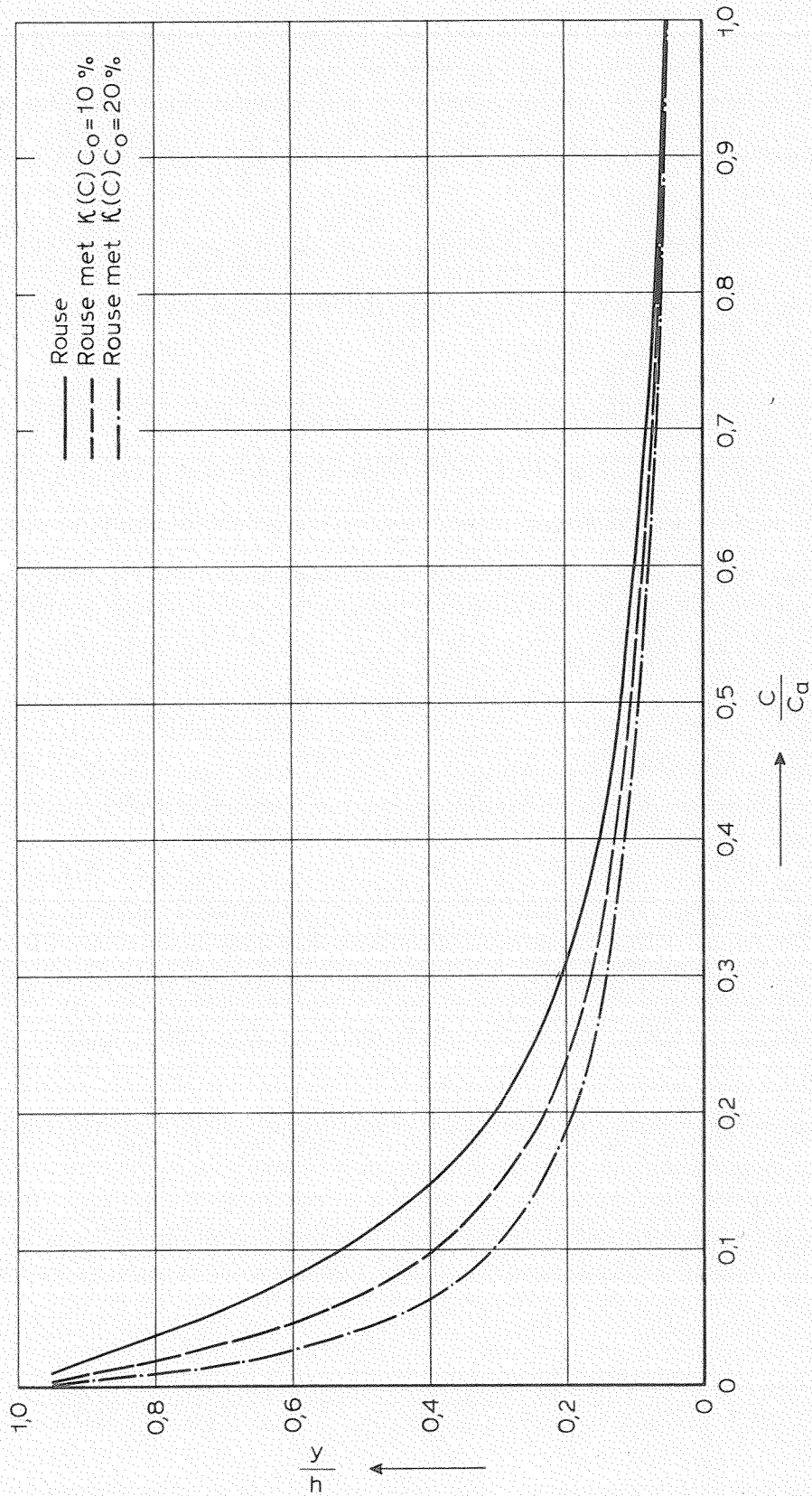
INVLOED κ ALS FUNKTIE VAN KONCENTRATIE
OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,50$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 15



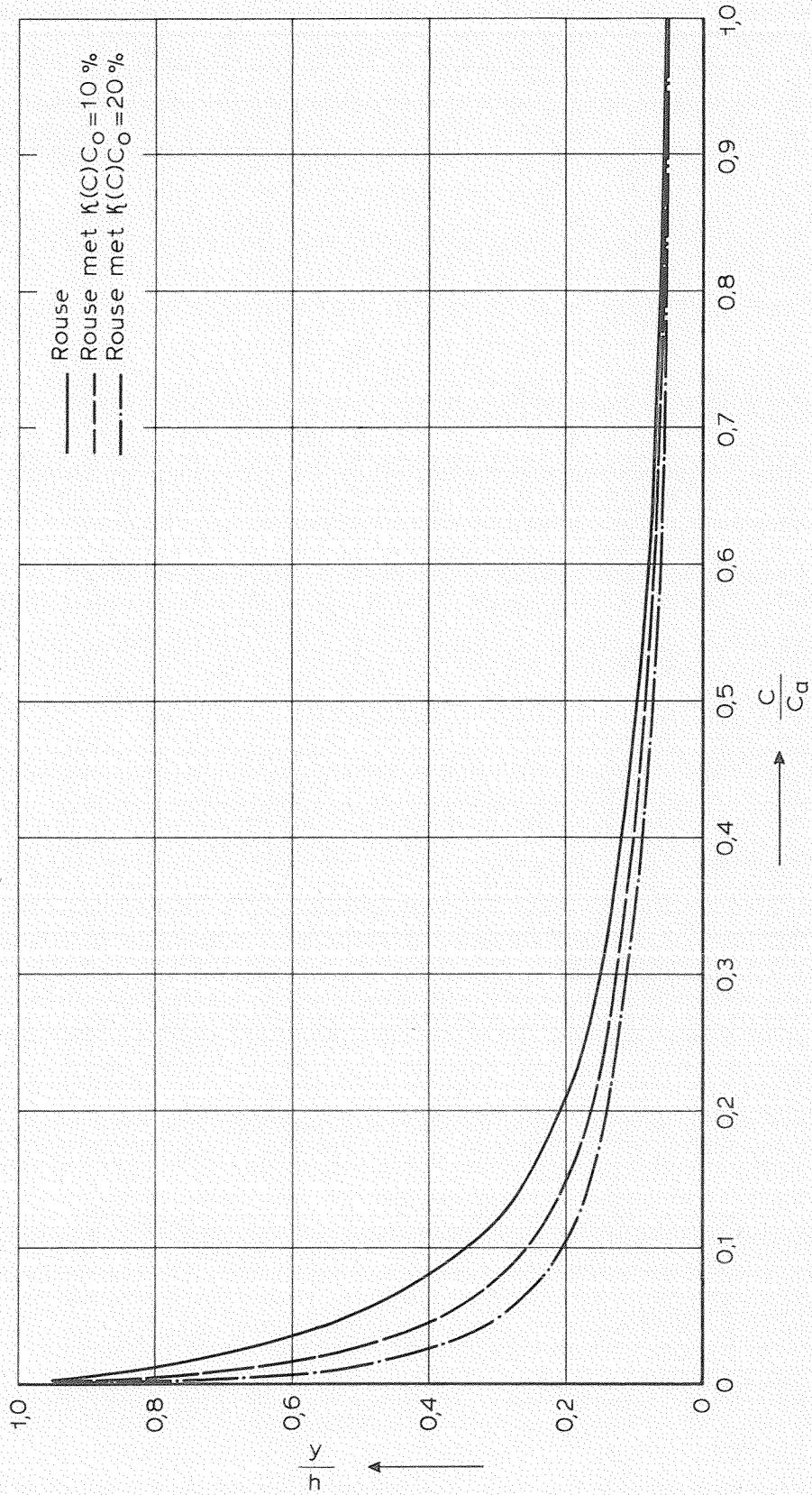
INVLOED κ ALS FUNKTIE VAN KONCENTRATIE
OP KONCENTRATIEVERDELING

$Z = 0,75$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 16



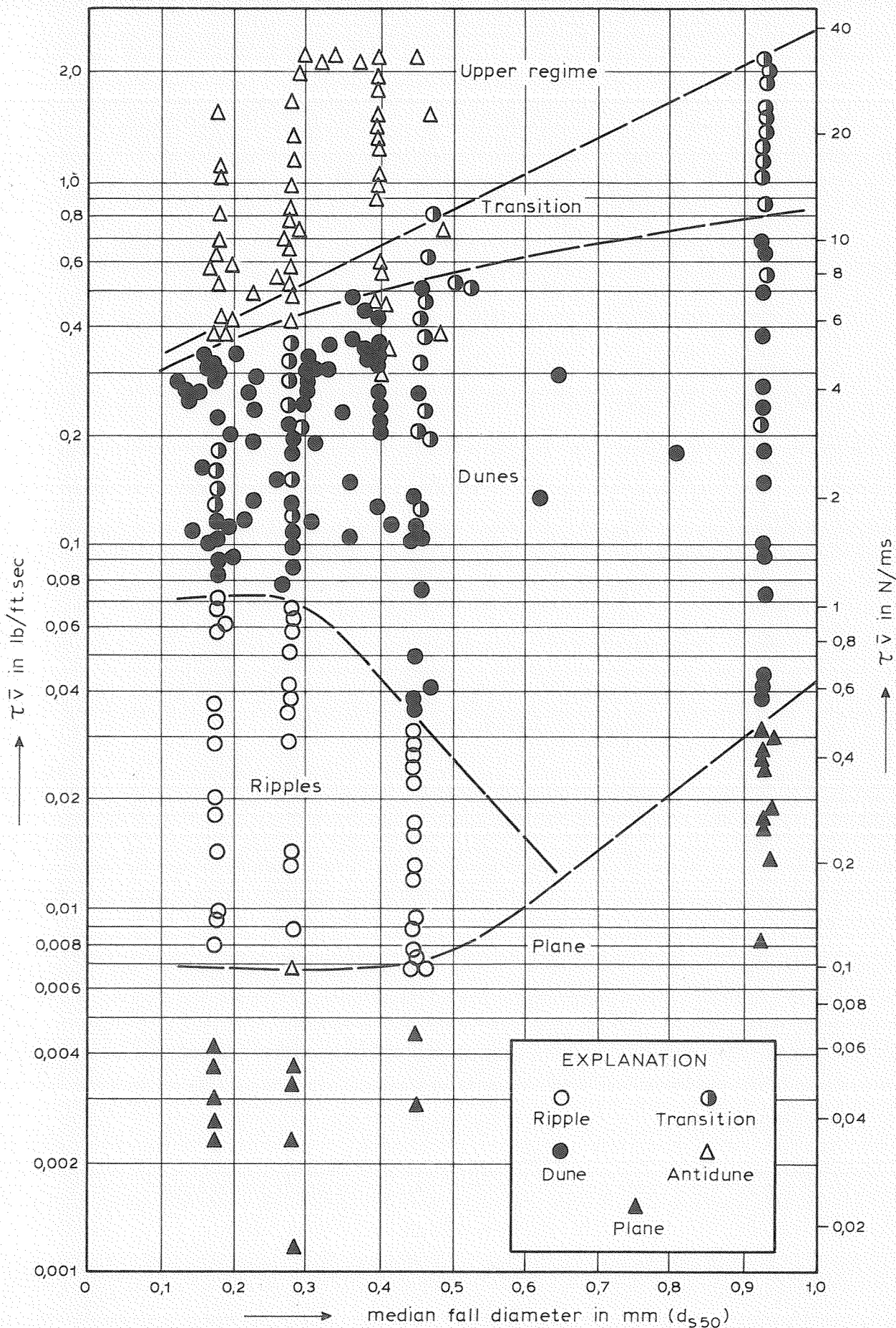
INVLOED κ ALS FUNKTIE VAN KONCENTRATIE
OP KONCENTRATIEVERDELING

Z = 1,00

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

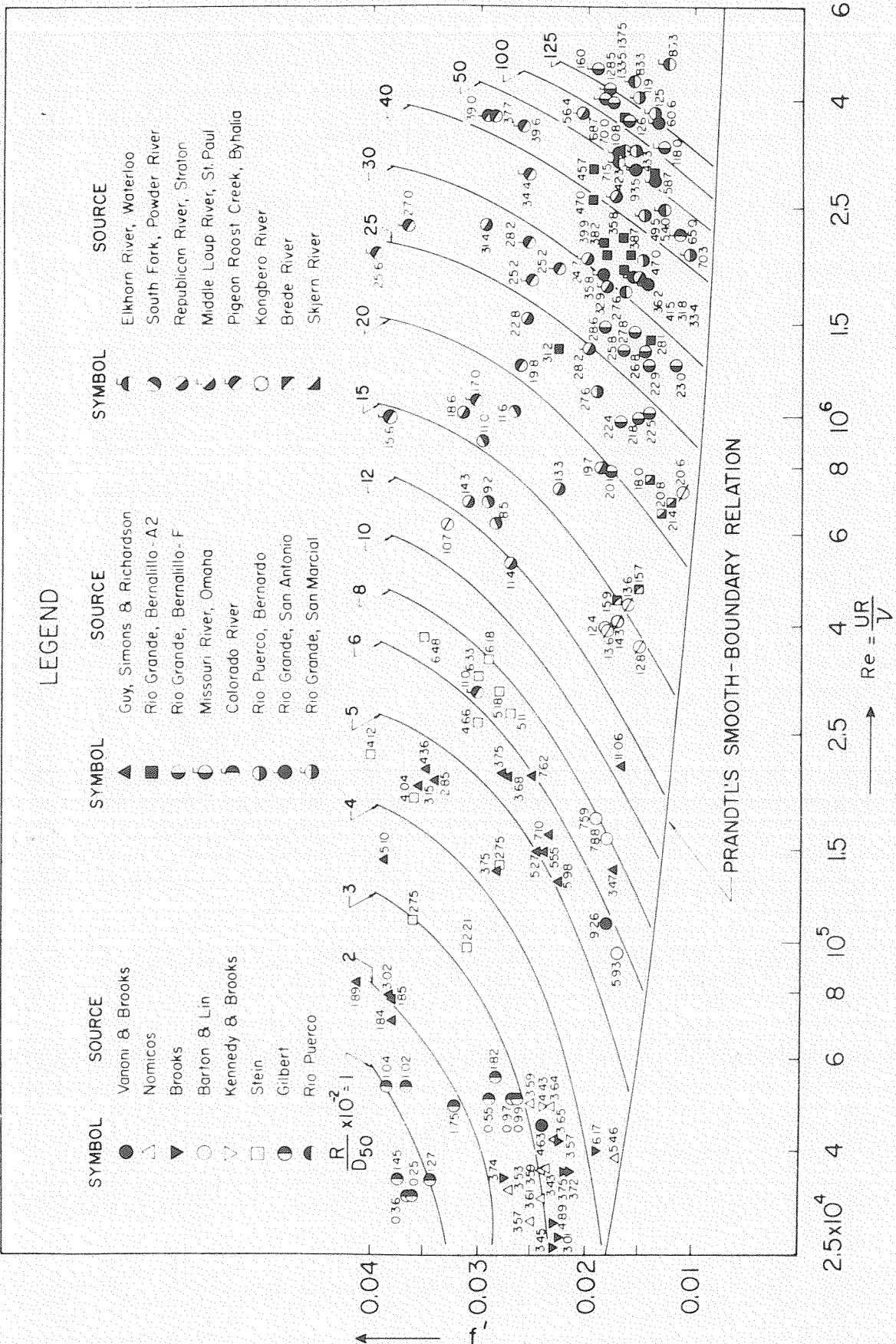
FIG. 17



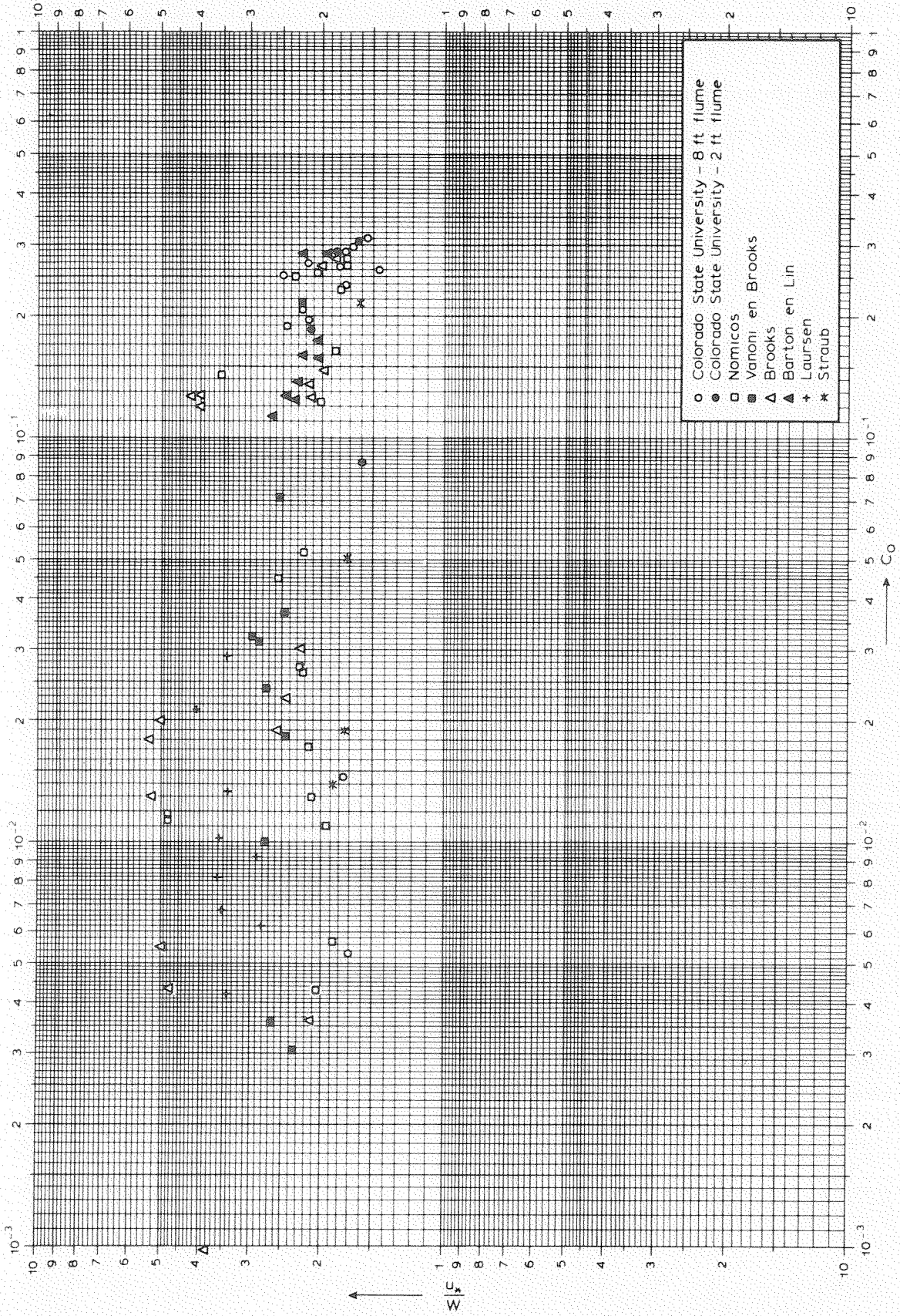
EXPLANATION

○	Ripple	●	Transition
●	Dune	△	Antidune
▲	Plane		

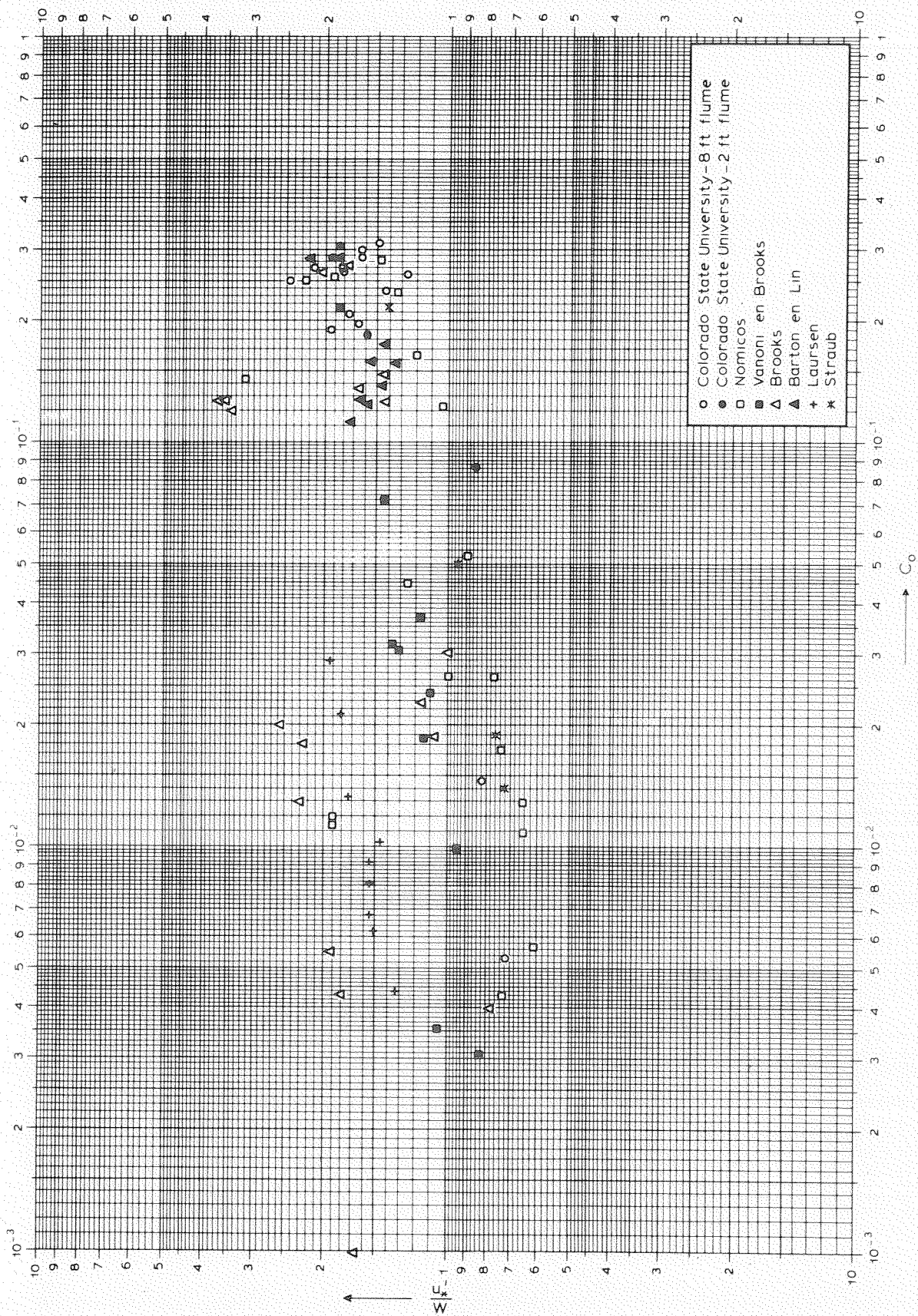
BEDDINGVORM ALS FUNKTIE VAN STROOM- EN
MATERIAALPARAMETERS VOLGENS SIMONS EN
RICHARDSON

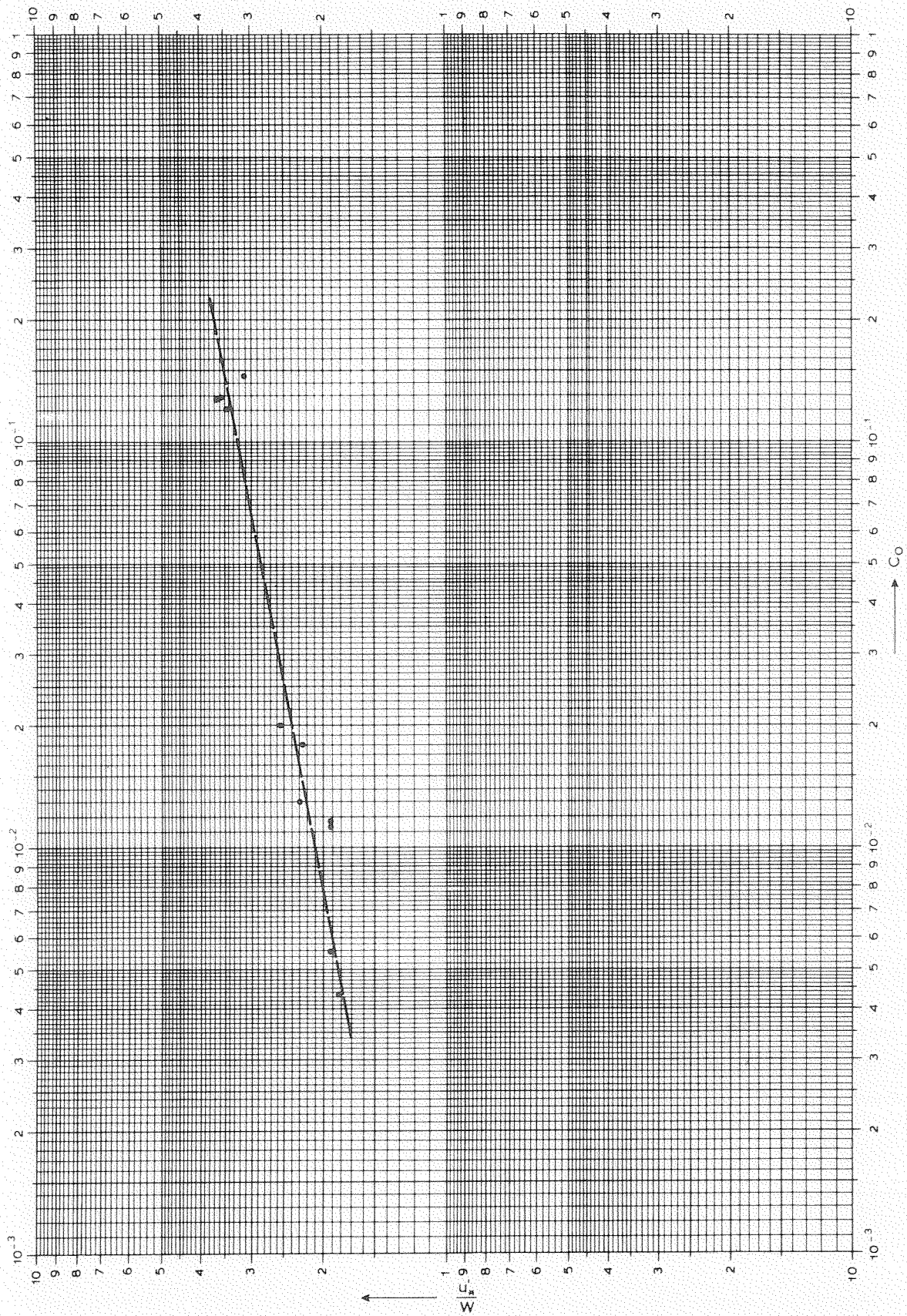


WRIJVINGSFAKTOR f' VOOR STROMING OVER EEN VLAKE BED VOLGENS LOVERA EN KENNEDY



C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_x}{W}$





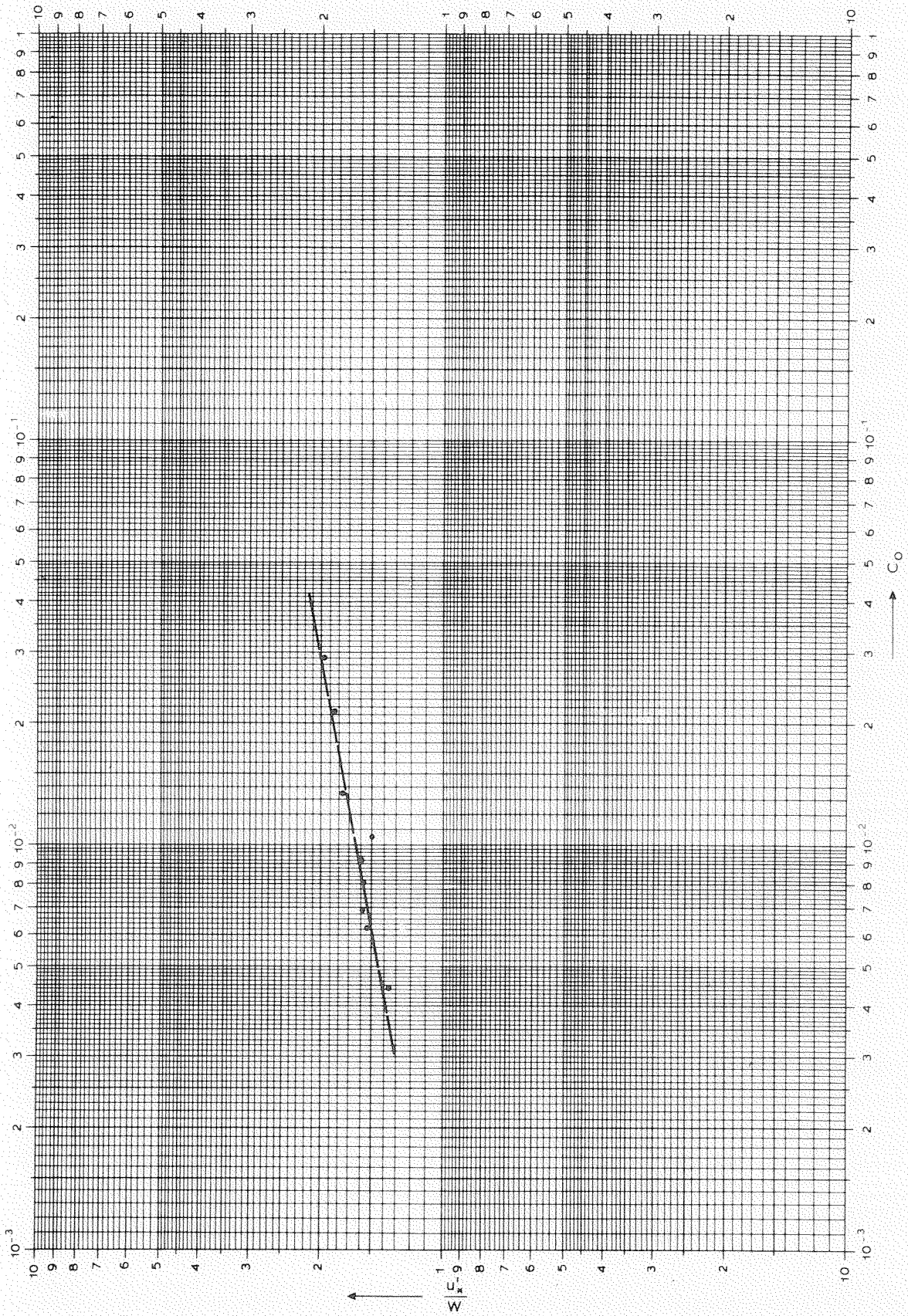
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 90 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 22



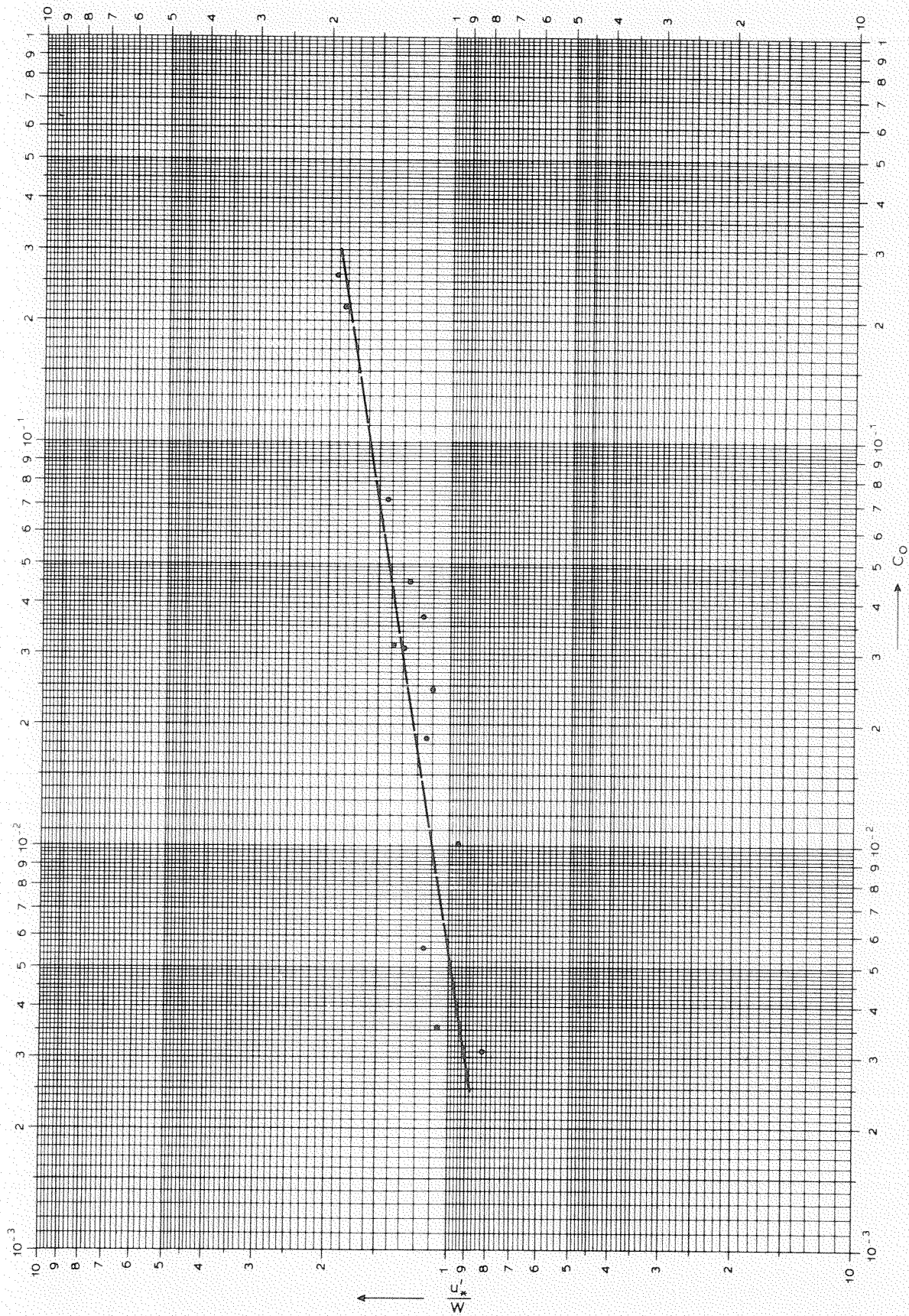
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 110 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 23



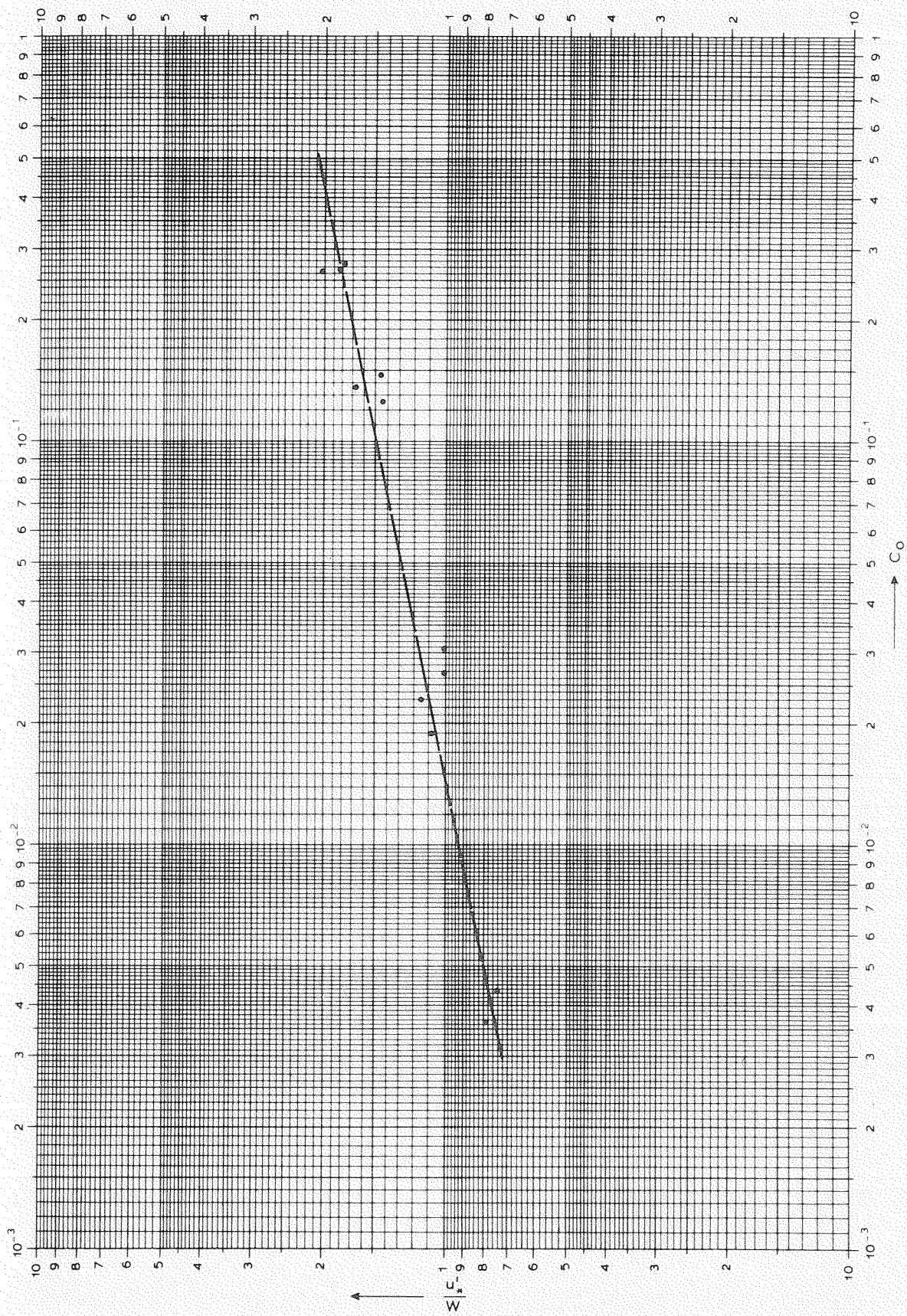
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

$D_{50} = 137 \mu\text{m}$

R 783

FIG. 24



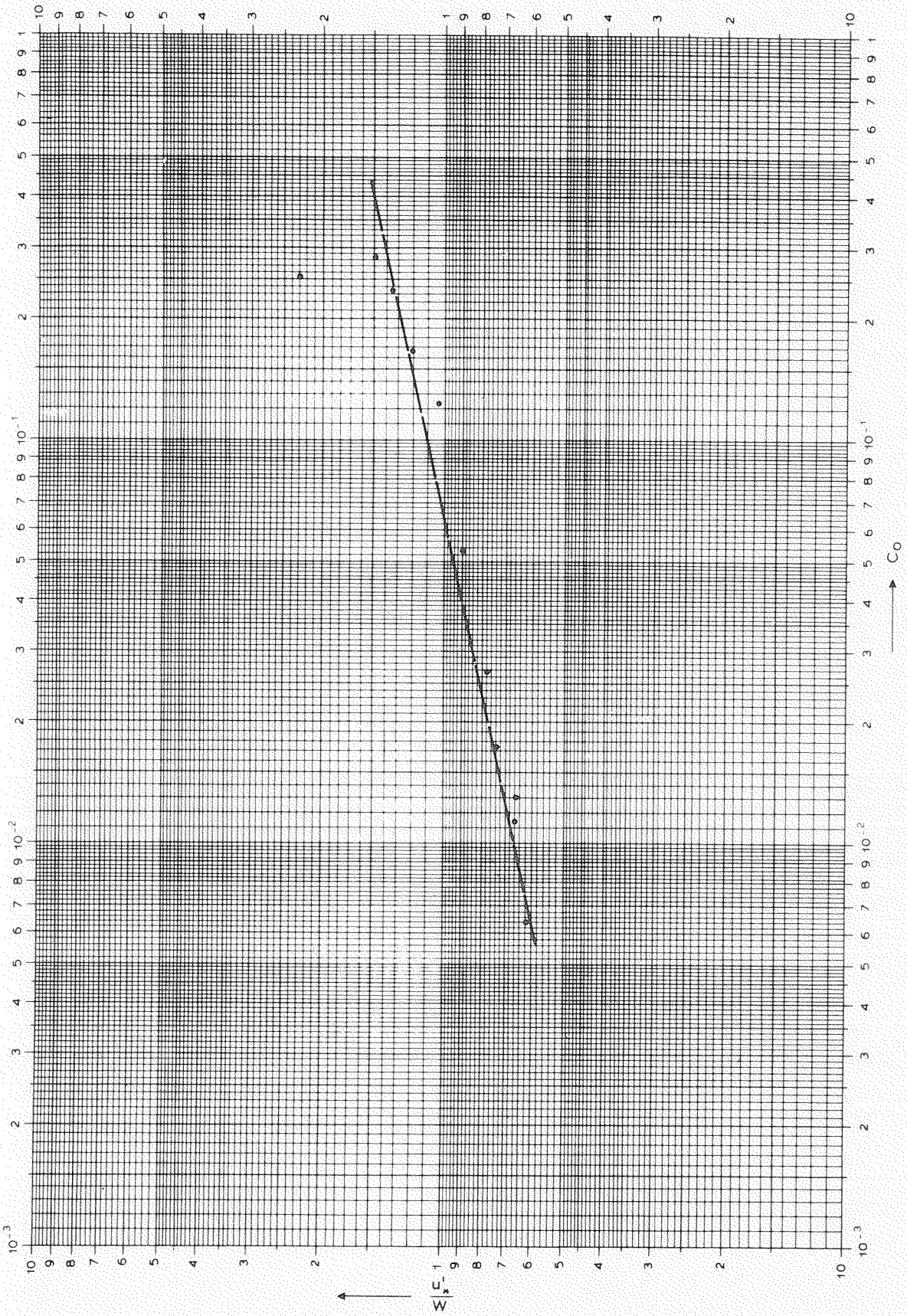
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 144 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 25



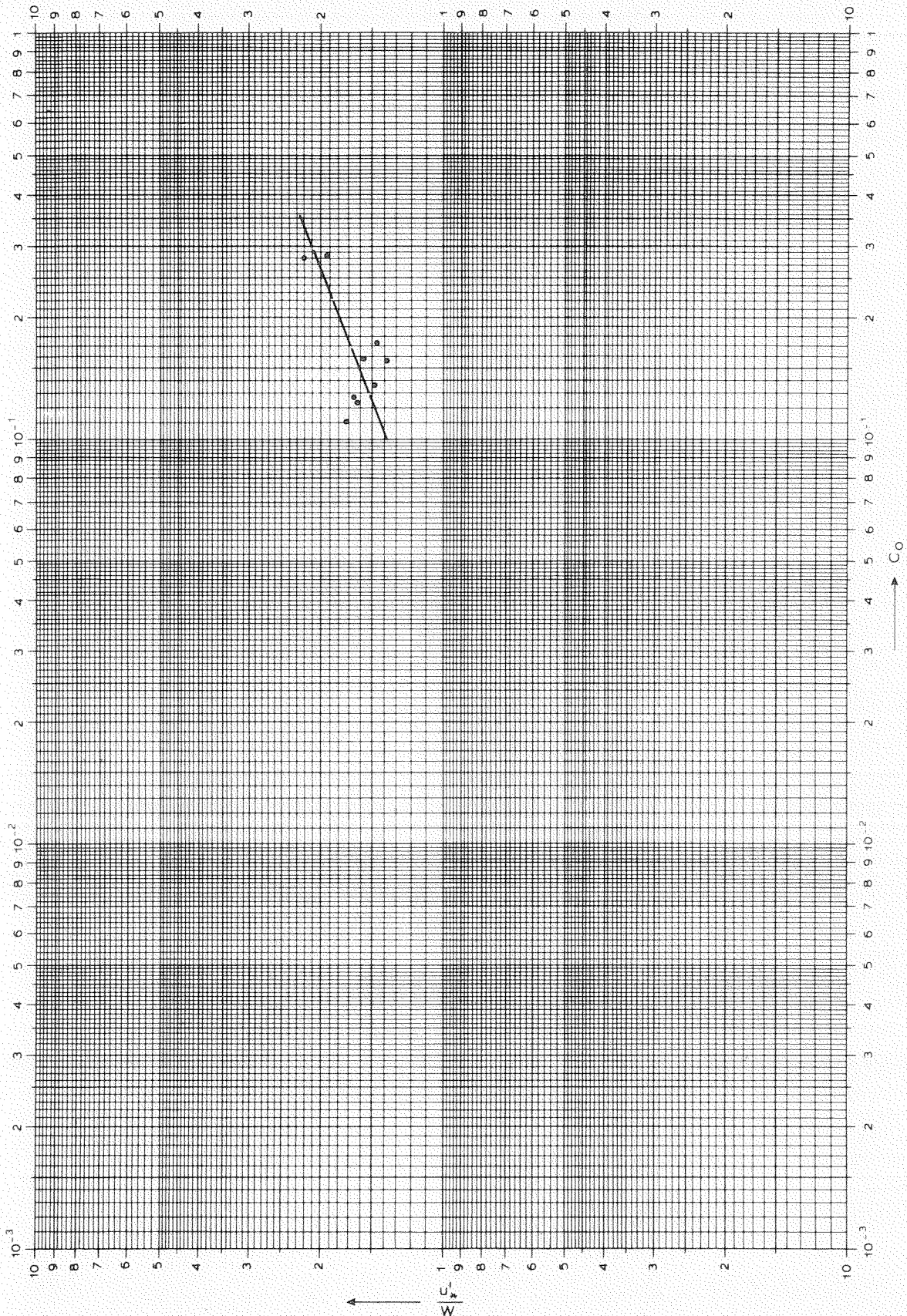
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 152 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG 26



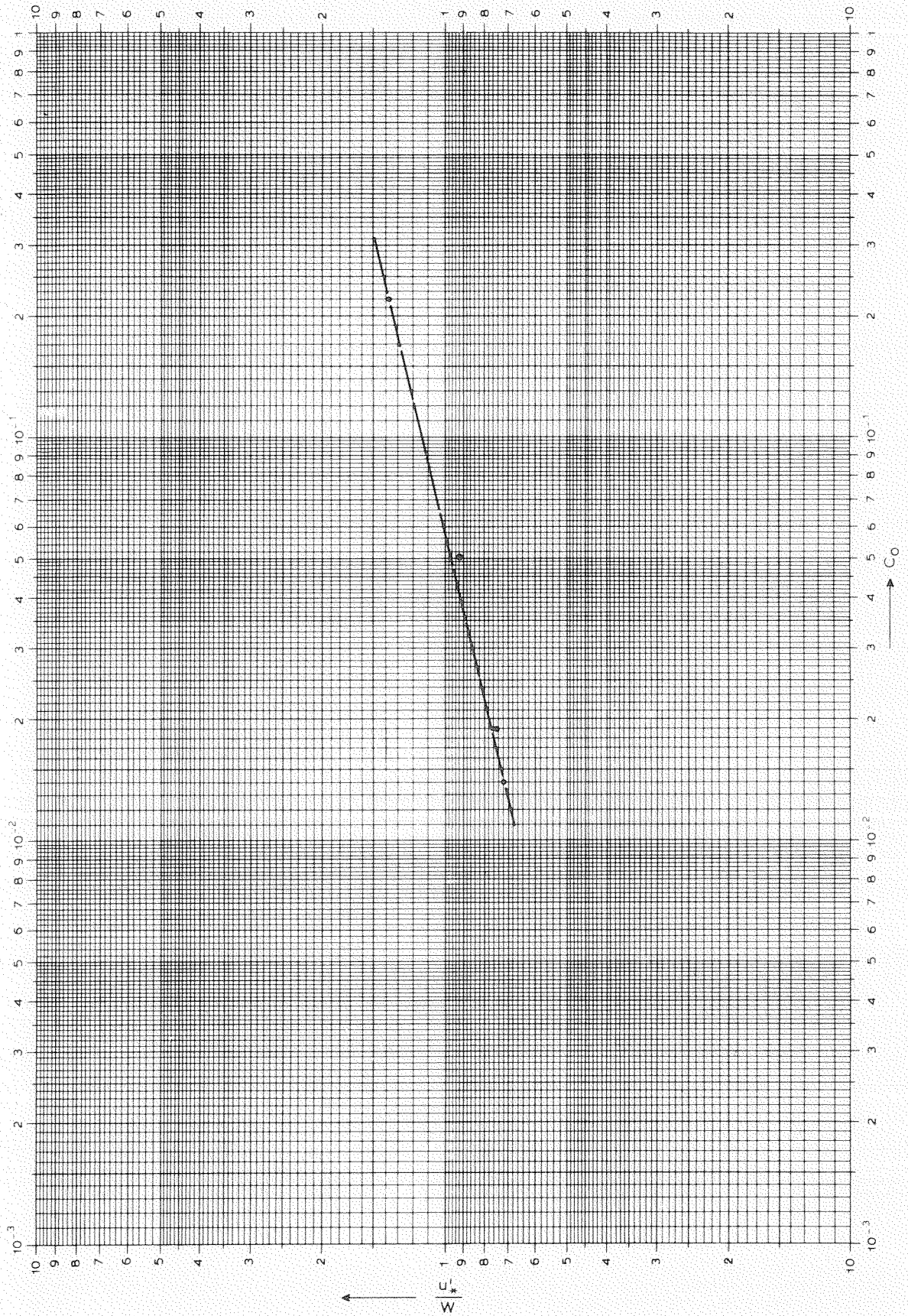
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u'_x}{W}$

$D_{50} = 180 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 27



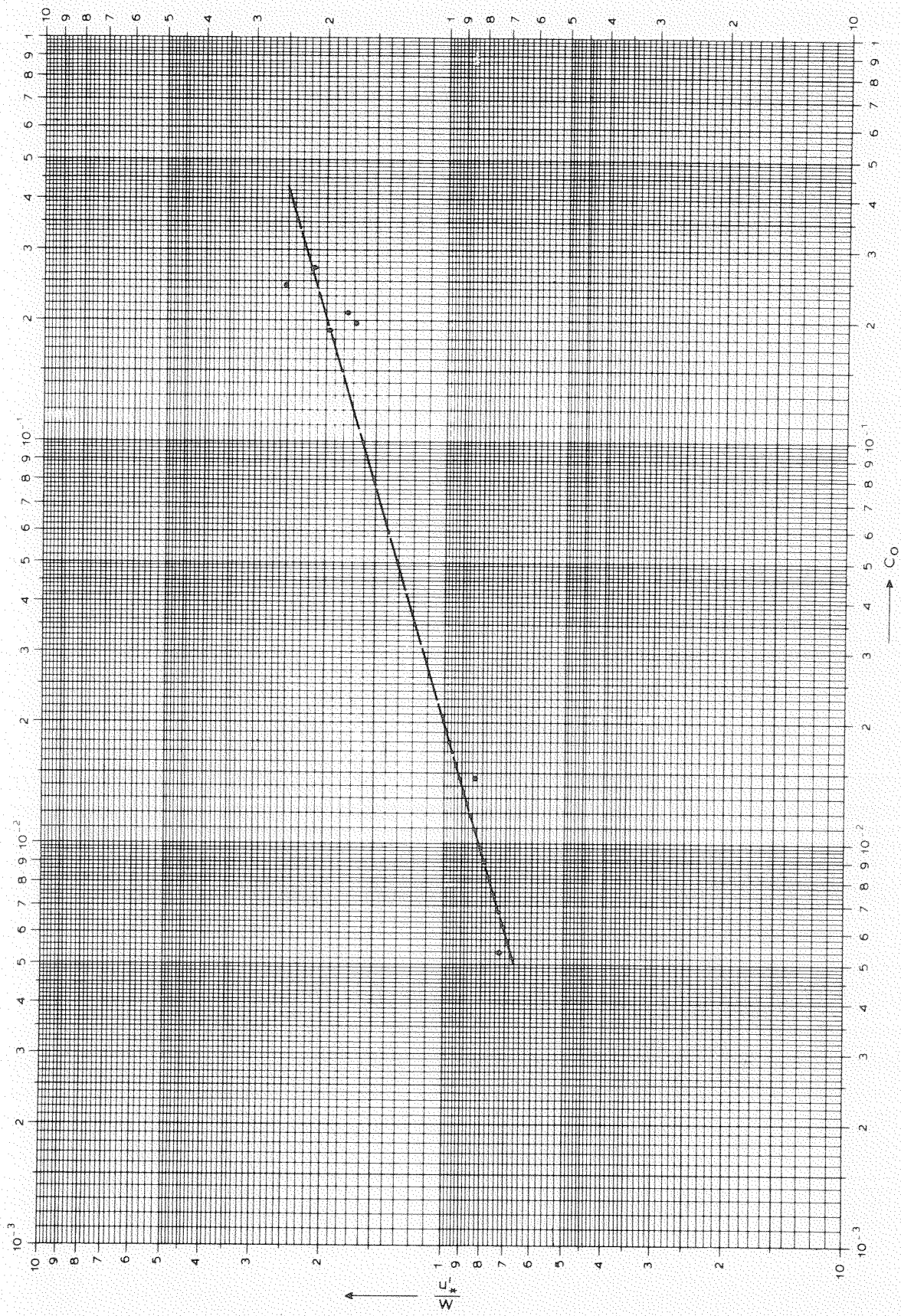
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 185 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 28



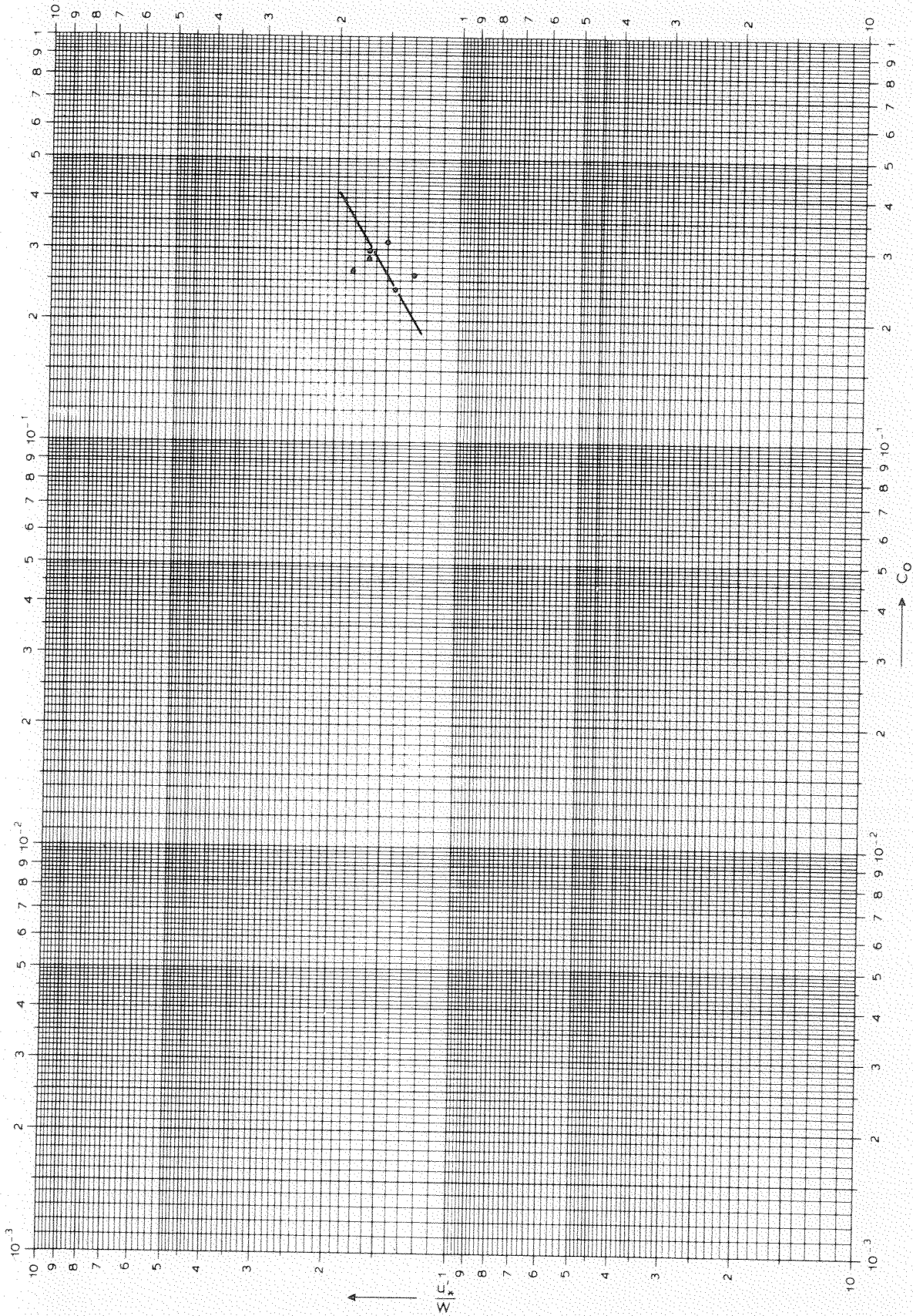
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 190 \mu m$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 29



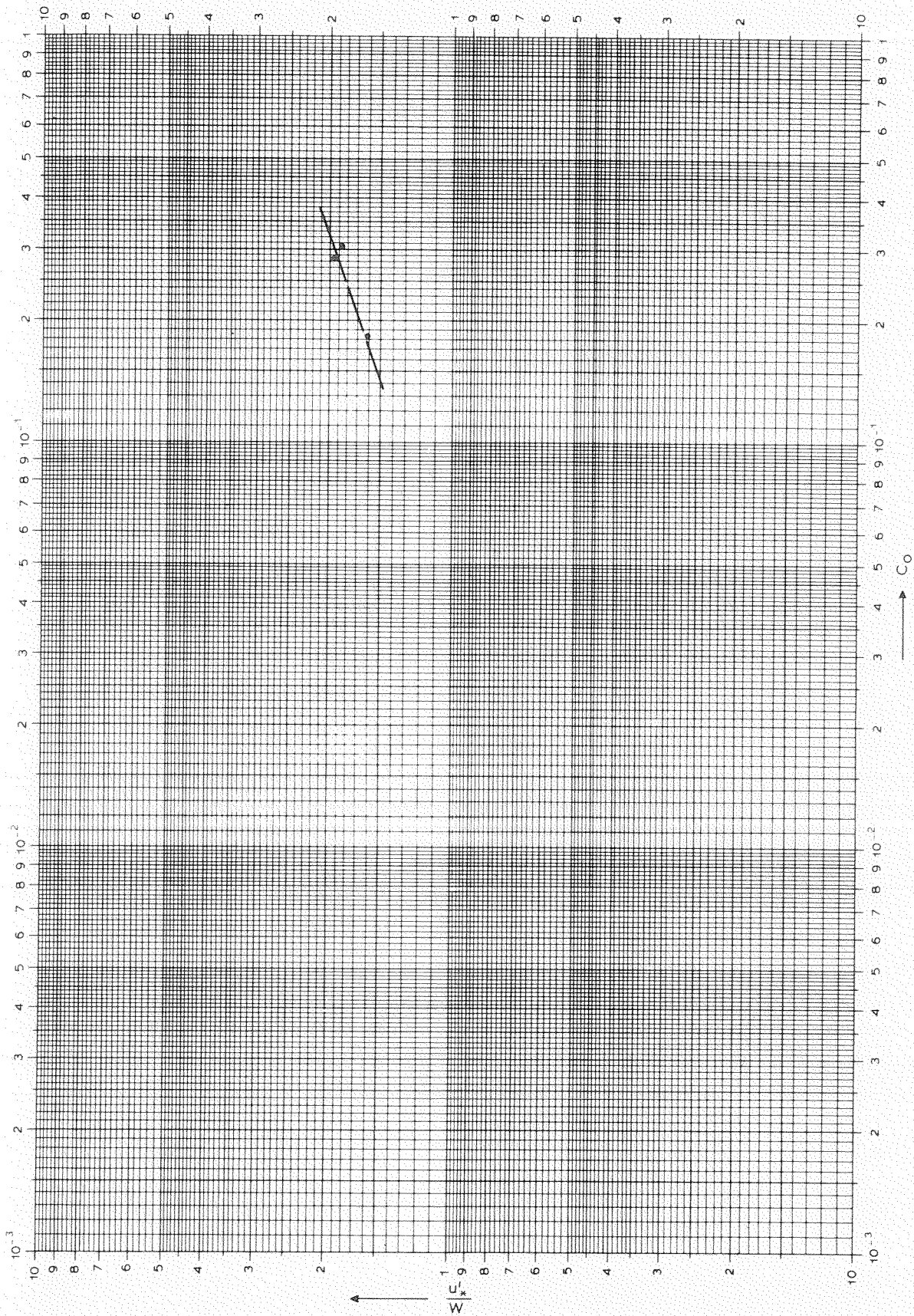
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 275 \mu\text{m}$

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 30



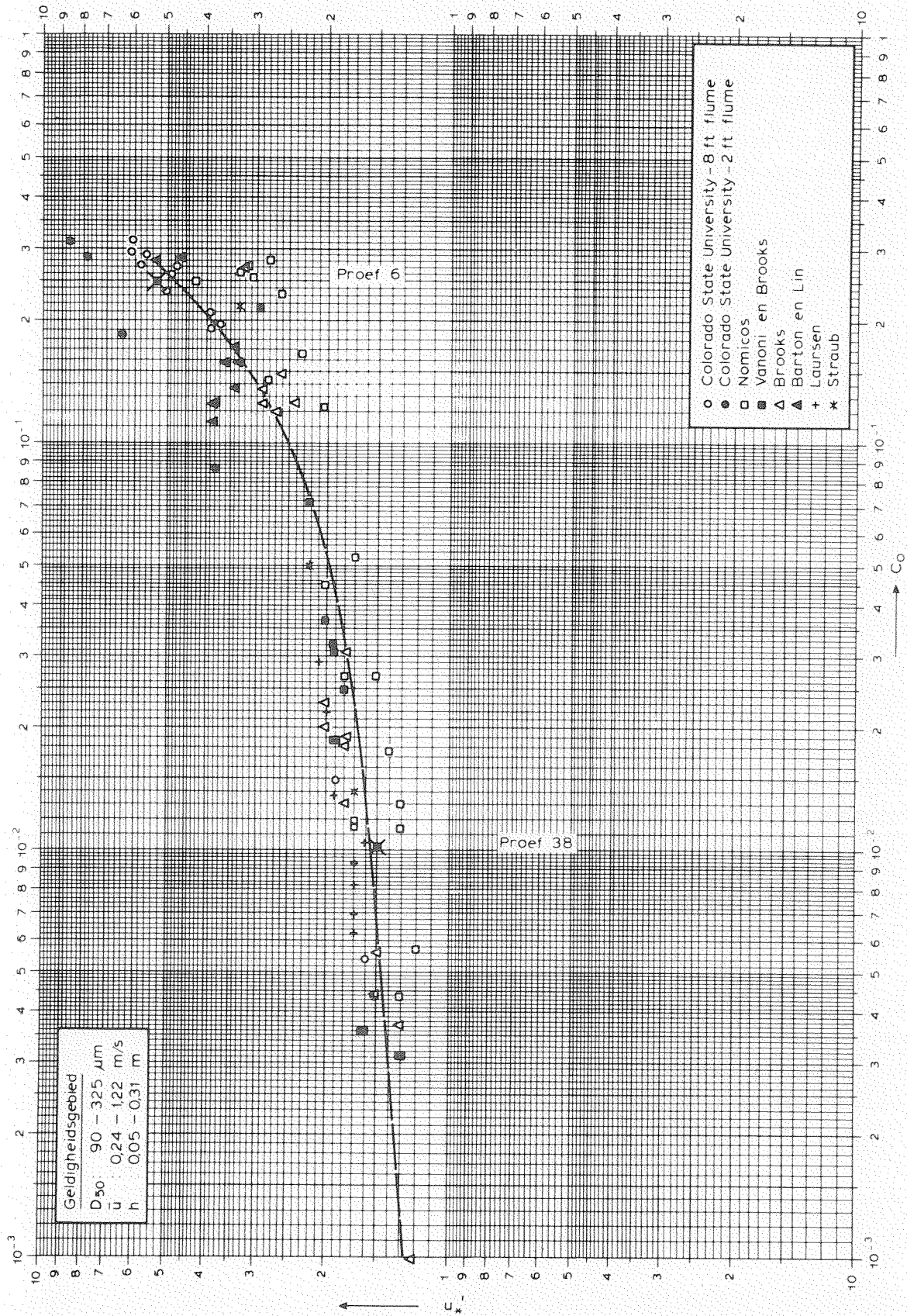
C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN $\frac{u_*'}{W}$

$D_{50} = 325 \mu\text{m}$

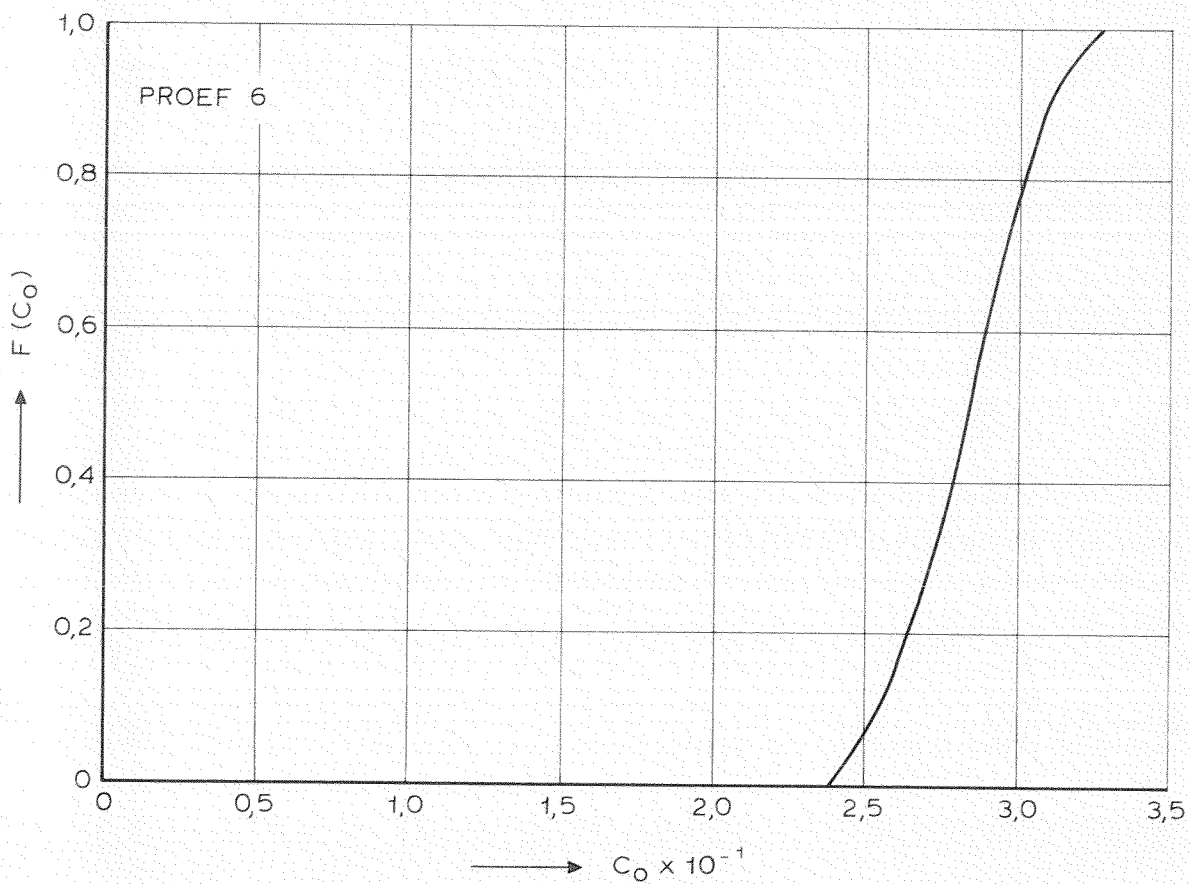
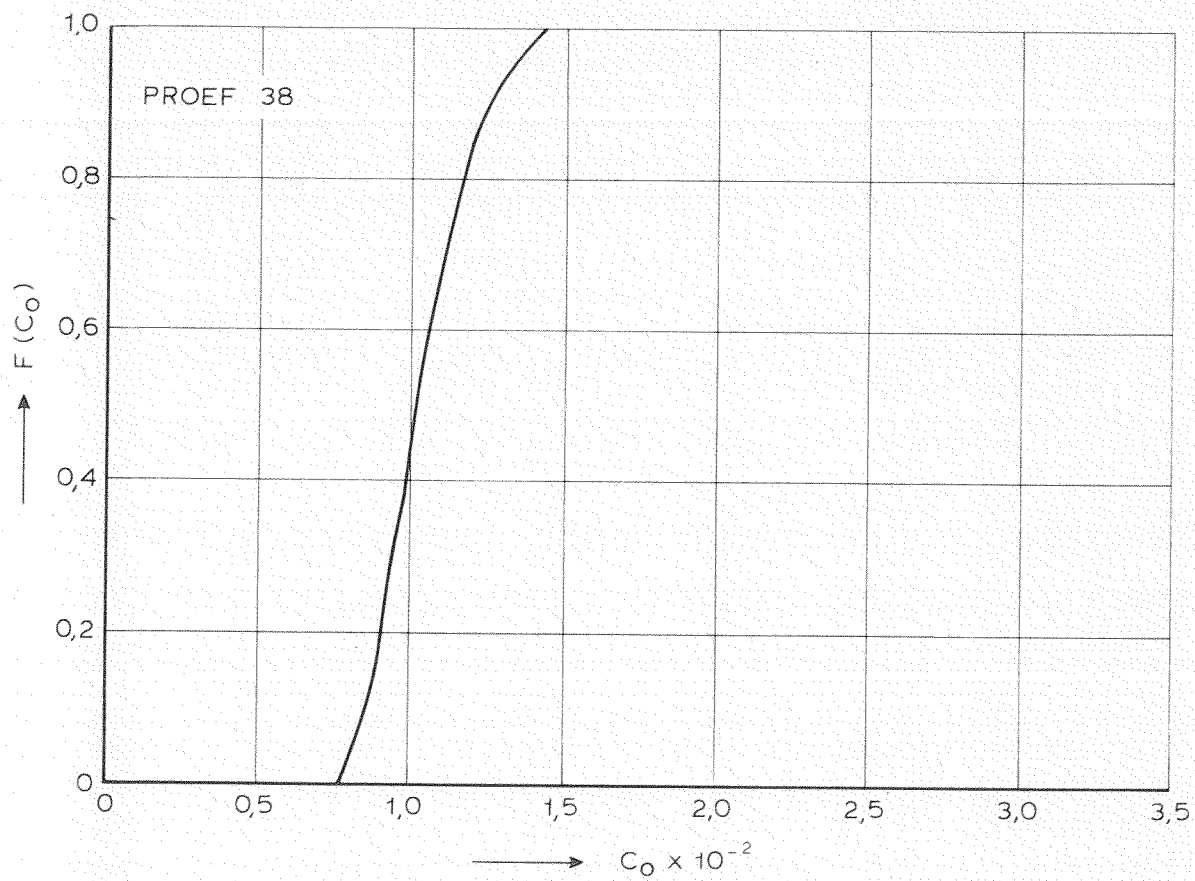
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

FIG. 31



C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN u'_x

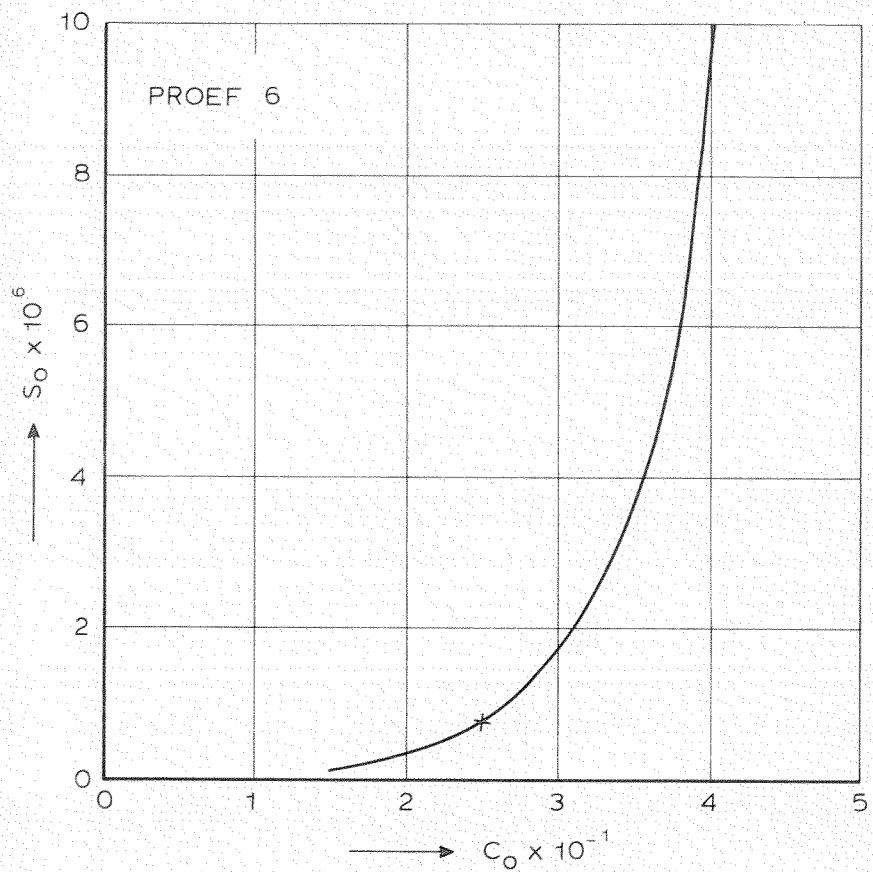
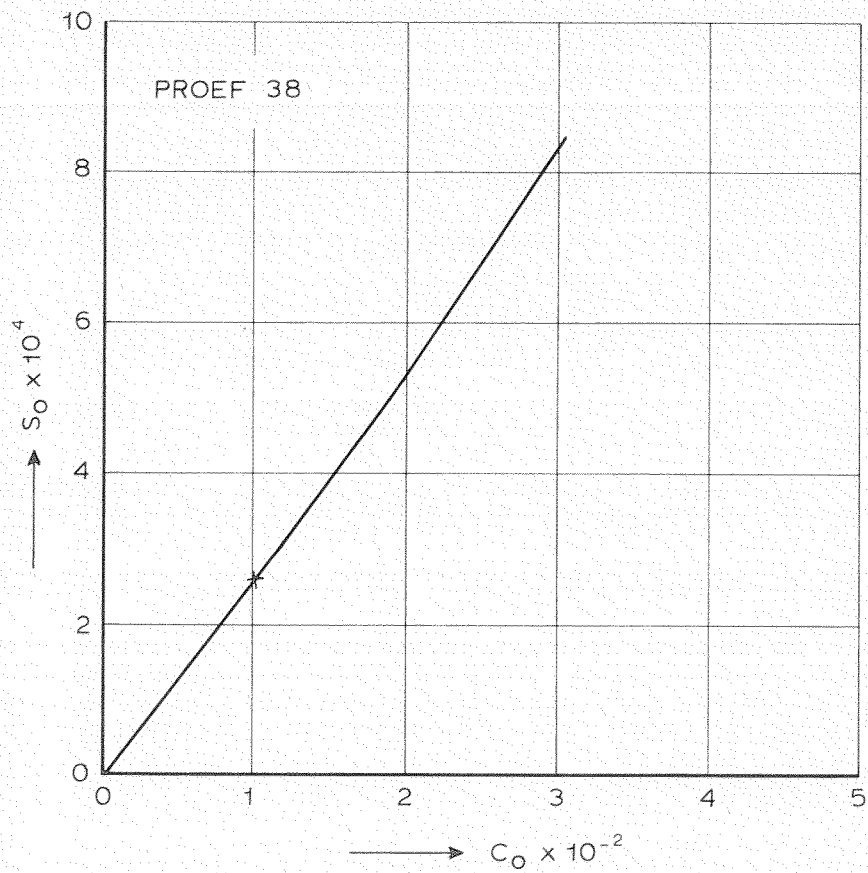


KUMULATIEVE FREKWENTIEFUNKTIES VOOR C_0
 WANNEER ALLE PARAMETERS WORDEN GEVARIIEERD

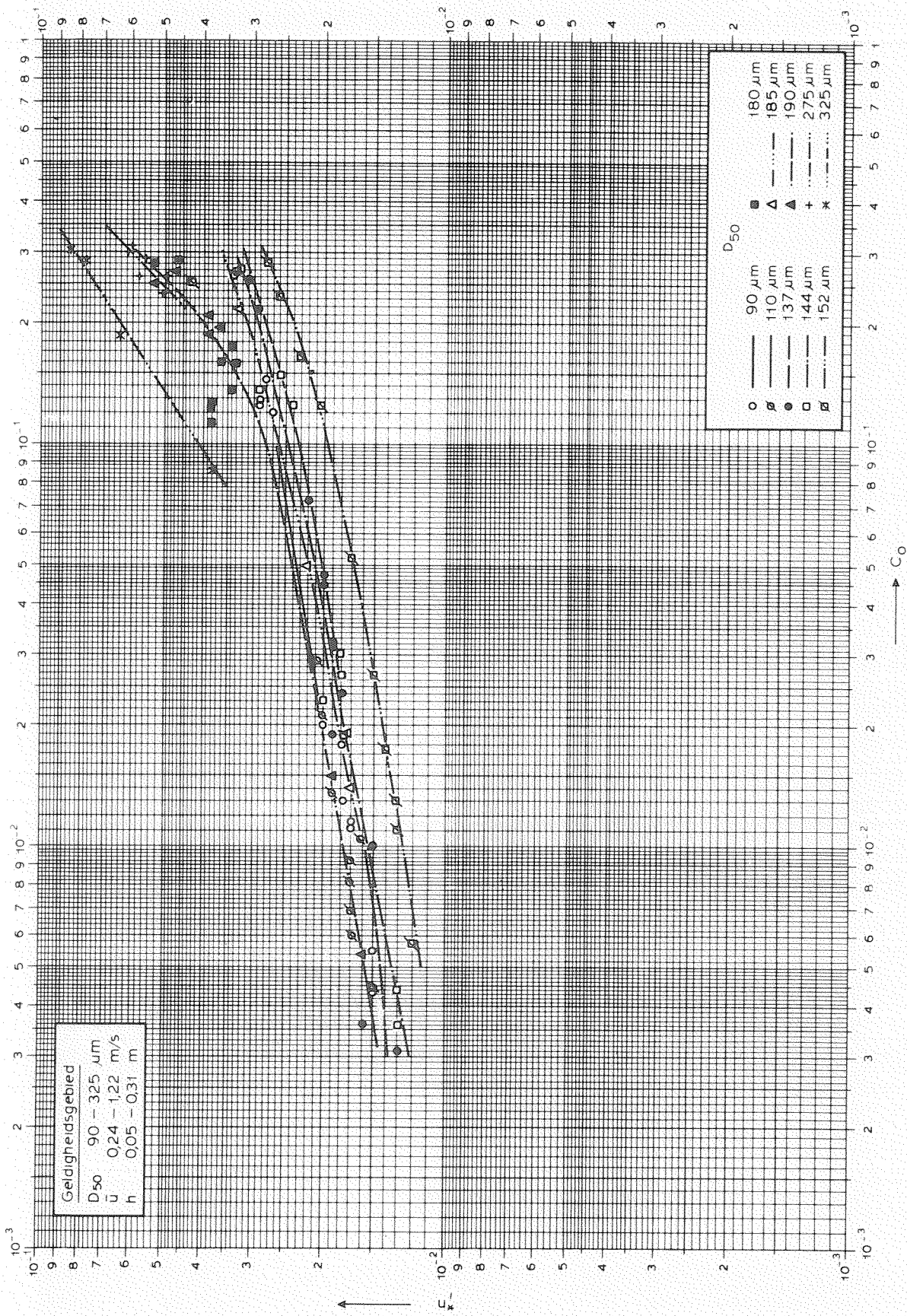
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 783

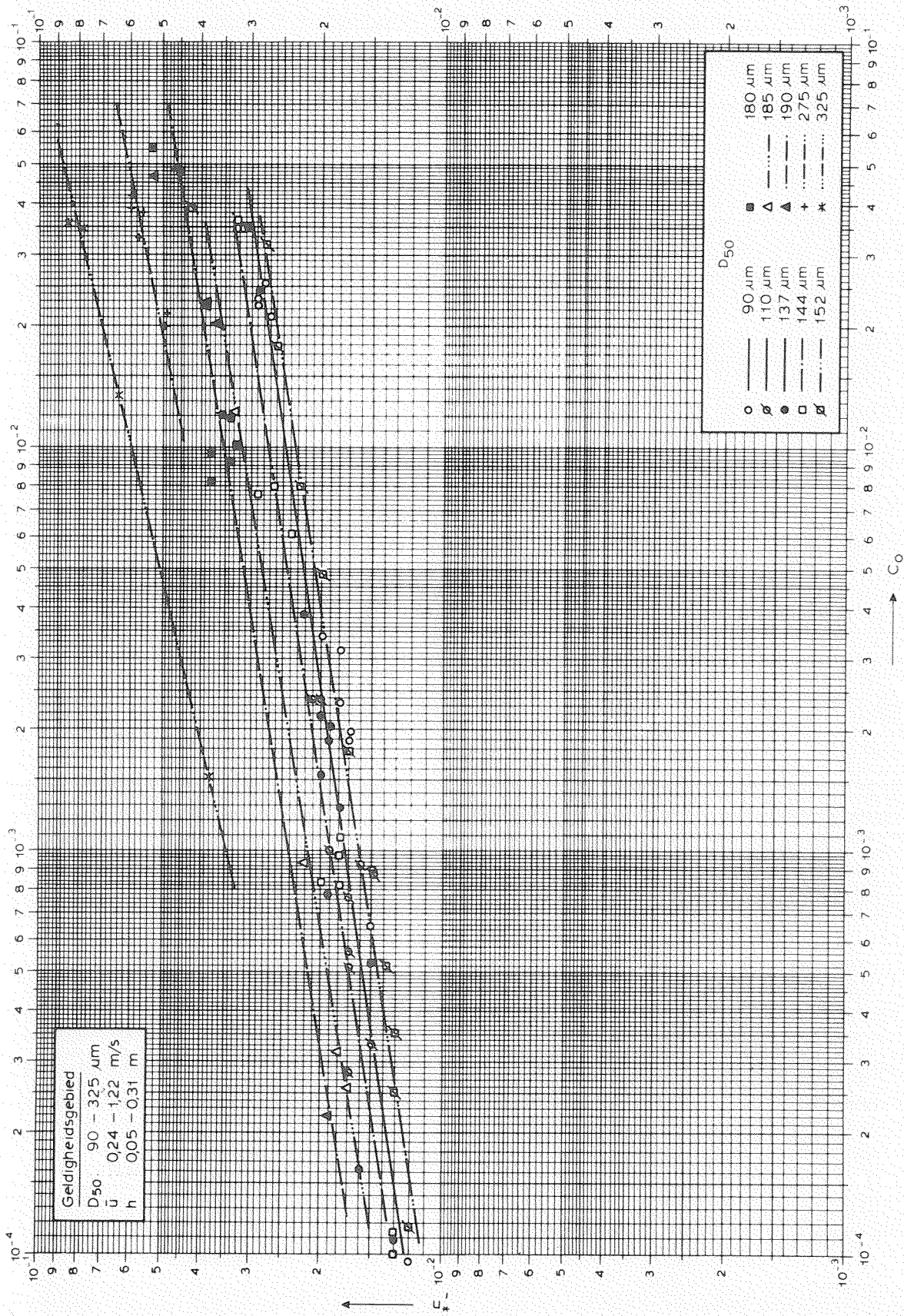
FIG. 33



S_0 ALS FUNKTIE VAN C_0



C_0 OP $y=k/33$ ALS FUNKTIE VAN u_*' VOOR
VERSCHILLENDE KORRELDIAMETERS

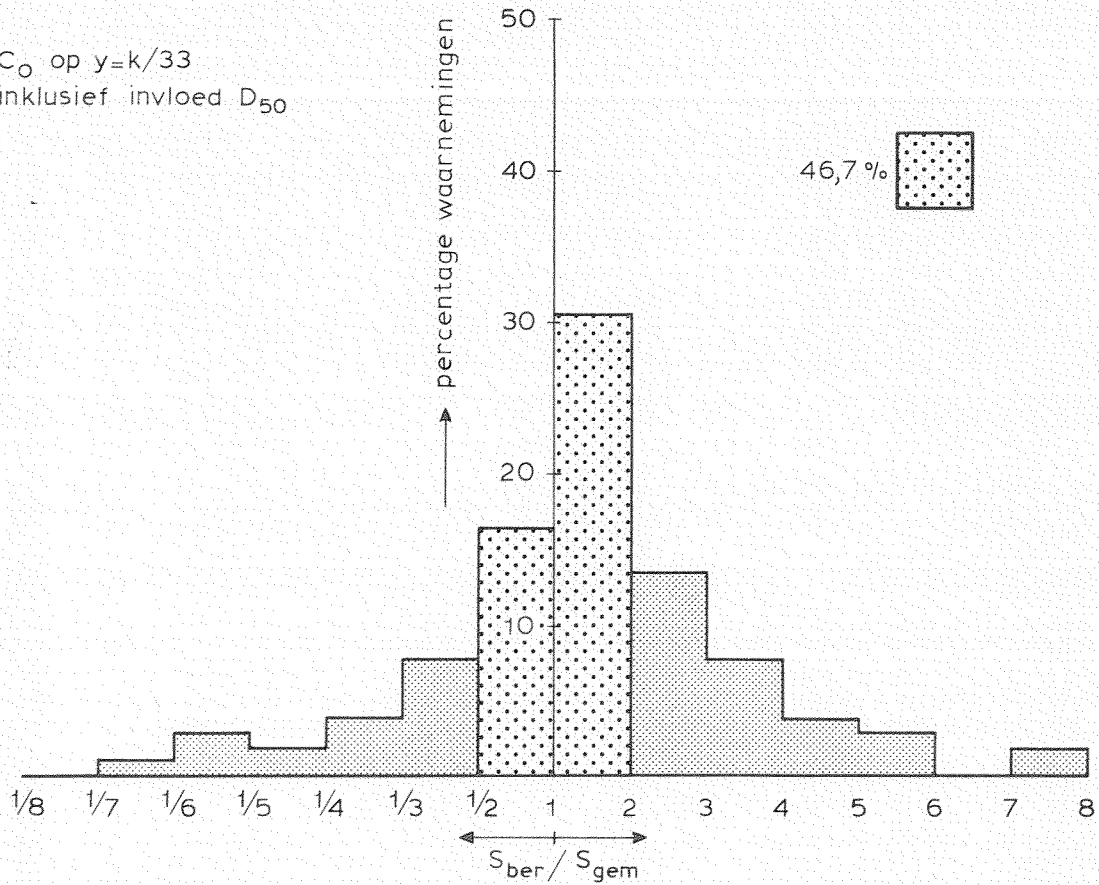


Geldigheidsgebied
 D_{50} 90 - 325 μm
 u 0.24 - 1.22 m/s
 h 0.05 - 0.31 m

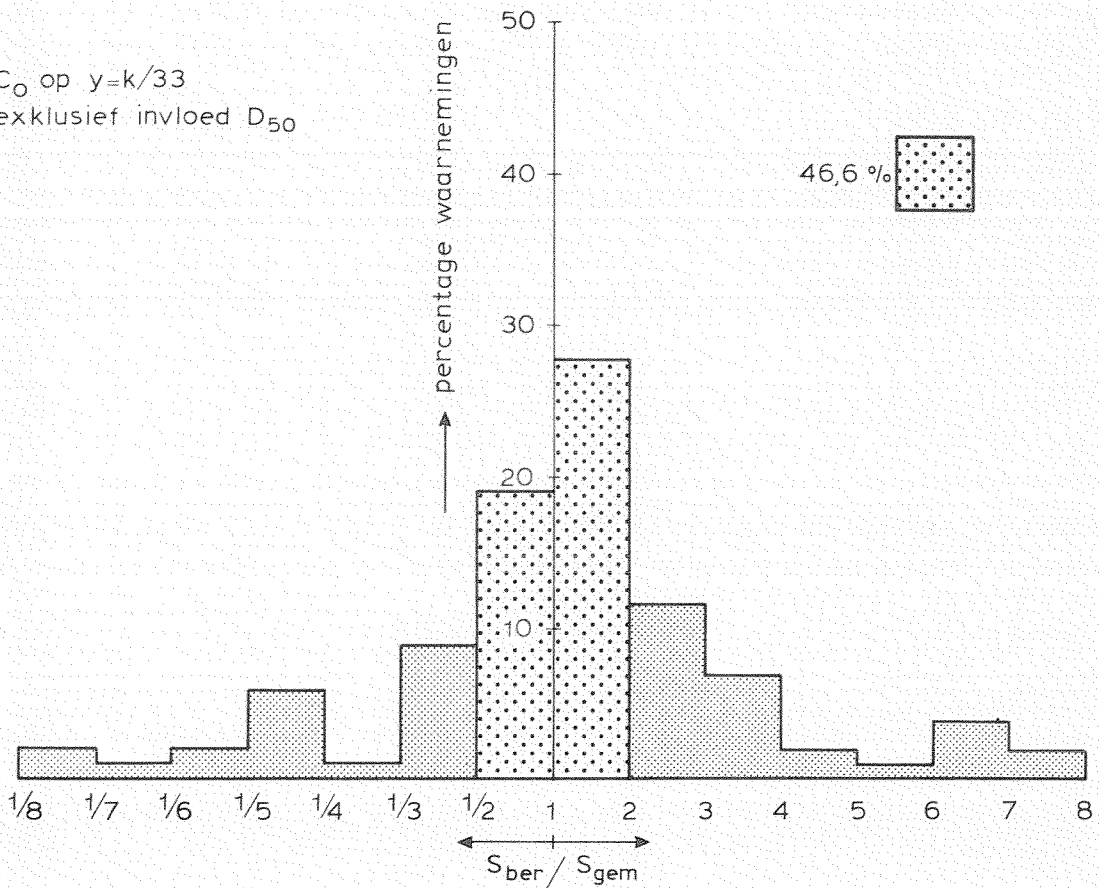
D_{50}

\circ	90 μm	\blacksquare	180 μm
\otimes	110 μm	\triangle	185 μm
\square	137 μm	\blacktriangle	190 μm
\oplus	144 μm	\dots	275 μm
\otimes	152 μm	\dots	325 μm

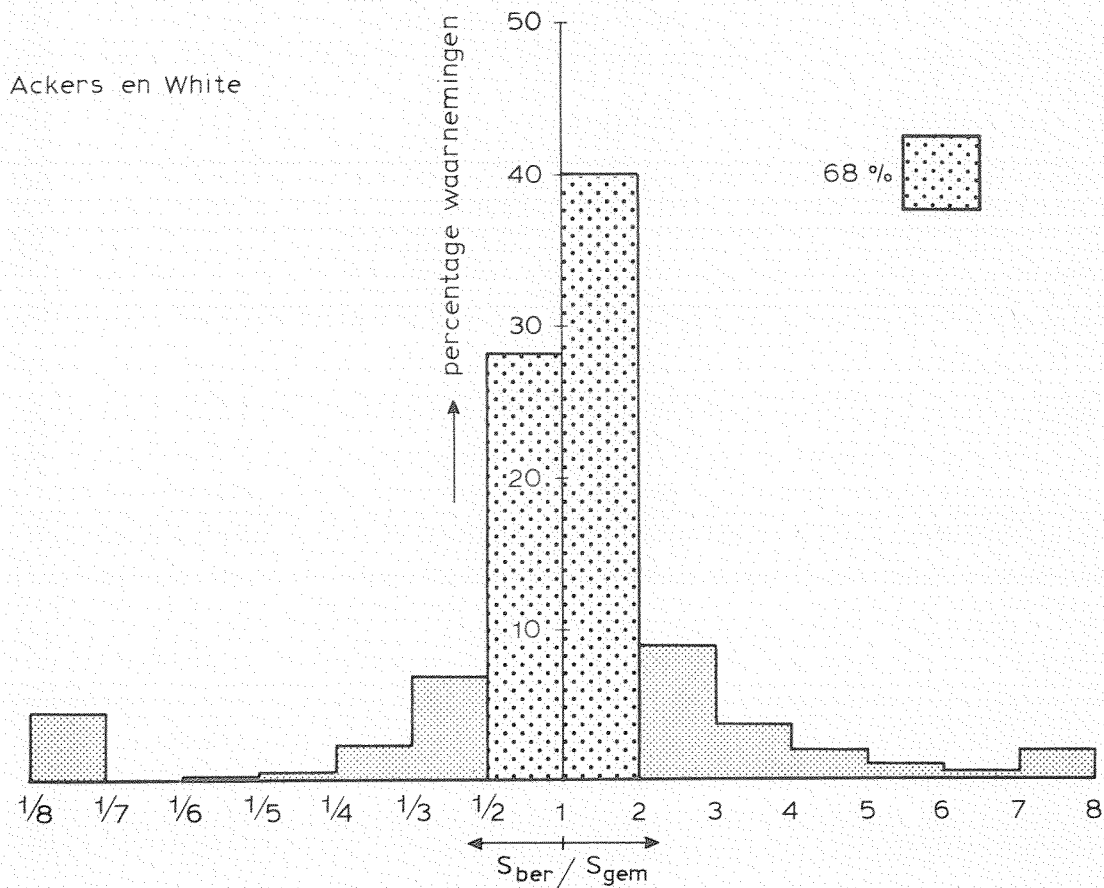
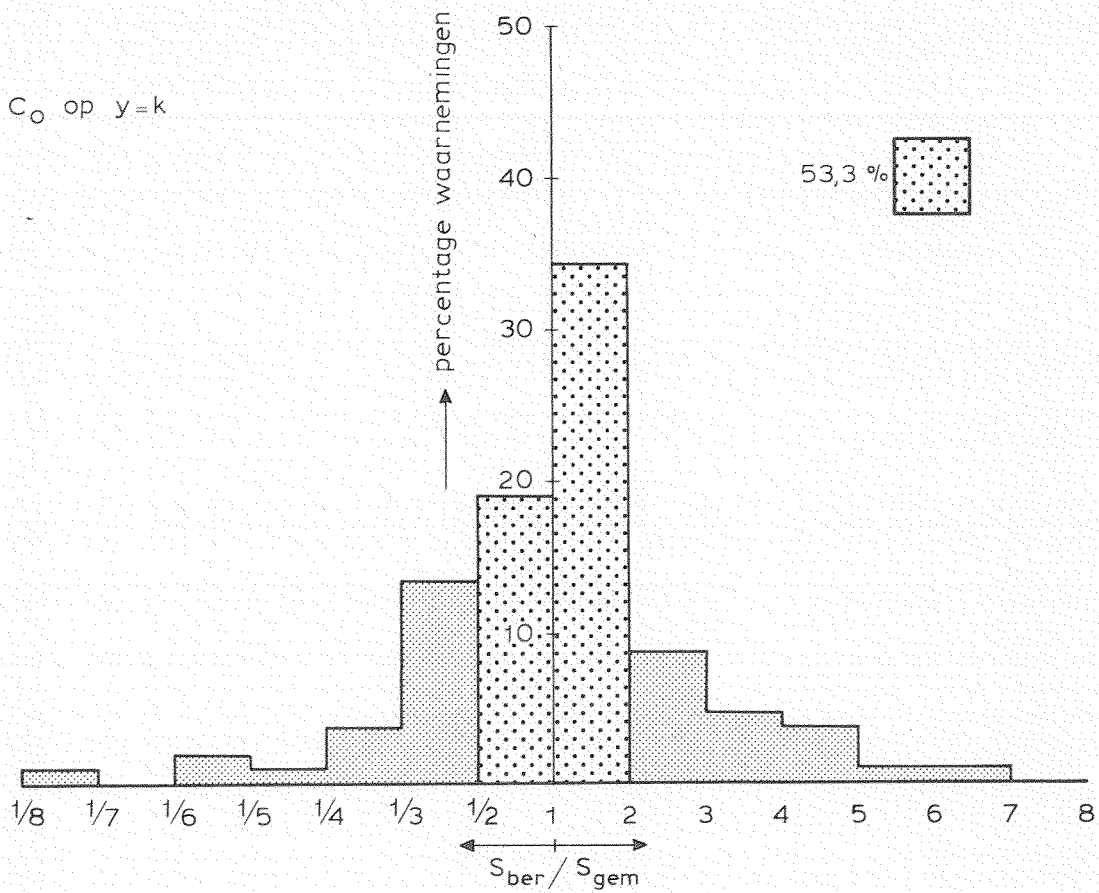
C_0 op $y=k/33$
 inclusief invloed D_{50}



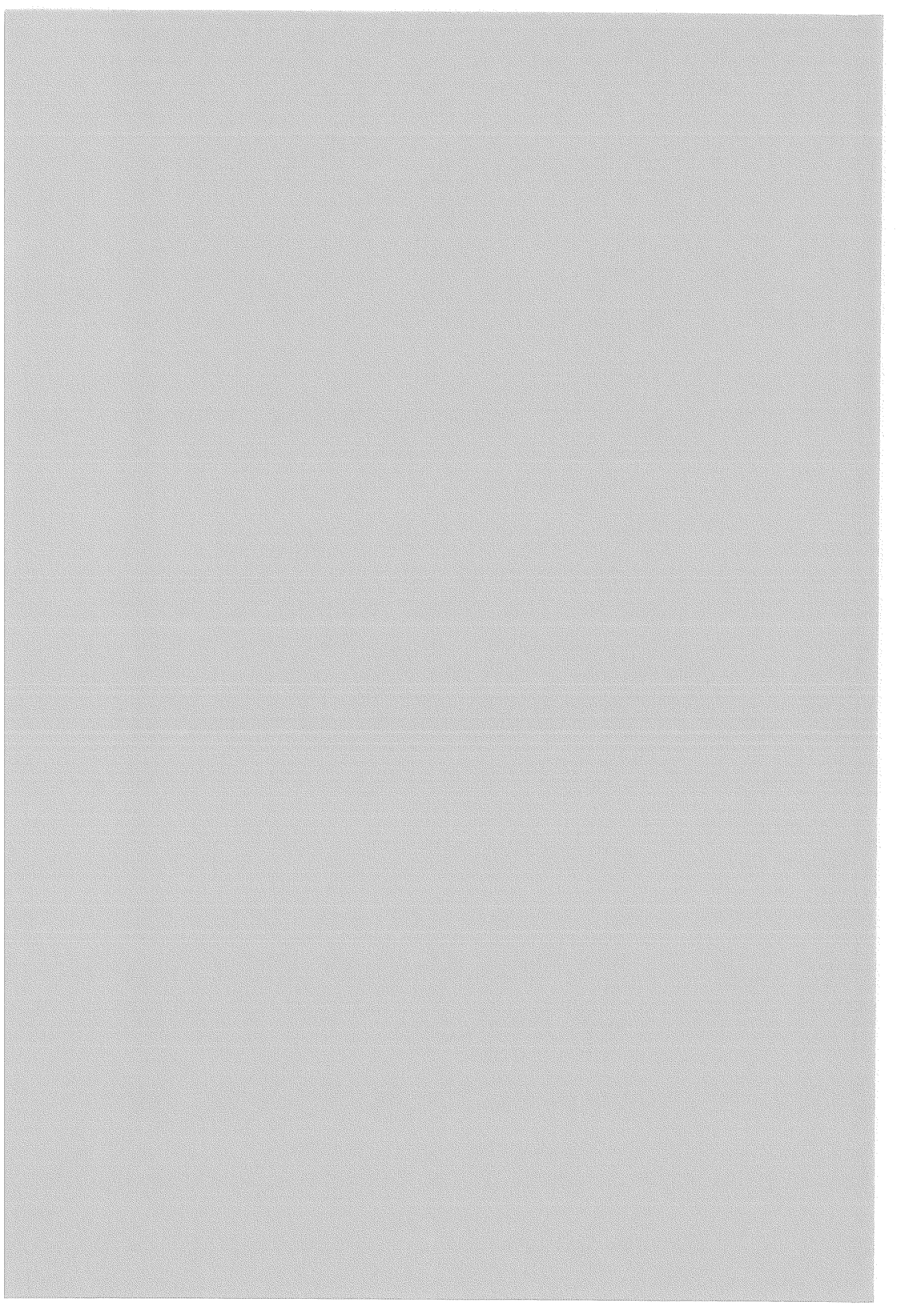
C_0 op $y=k/33$
 exclusief invloed D_{50}



AFWIJKING TUSSEN BEREKEND EN GEMETEN
 TRANSPORT ALS FUNKTIE VAN HET PERCENTAGE
 WAARNEMINGEN



AFWIJKING TUSSEN BEREKEND EN GEMETEN
TRANSPORT ALS FUNKTIE VAN HET PERCENTAGE
WAARNEMINGEN



APPENDIX I Berekening suspensietransport

Gegeven: $\frac{u_*}{W}$; W ; $\frac{k}{h}$; ρ_s ; c_o

Te berekenen: S

Berekening:

1 Startwaarde konstante van Von Karman: $\kappa = 0,385$

2 Benadering parameter $Z = \frac{1}{\frac{u_*}{W} \kappa}$

3 Benadering gemiddelde concentratie over de vertikaal: $c_m = c_o \left(\frac{1 - e^{-6Z}}{6Z} \right)$

4 Berekening konstante van Von Karman: $\kappa = 0,385 \left(\frac{1 + c_m (\rho_s - 1)}{1 + 2,5 c_o} \right)$

5 Berekening parameter: $Z = \frac{1}{\frac{u_*}{W} \kappa}$

6 Berekening koëfficiënt van Chézy: $C = \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln \left(\frac{12}{\frac{k}{h}} \right)$

7 Berekening schuifspanningssnelheid: $u_* = \frac{u_*}{W} W$

8 Berekening gemiddelde stroomsnelheid: $\bar{u} = u_* \frac{C}{\sqrt{g}}$

9 Berekening $\frac{y}{h}$, iteratief met behulp van de volgende vergelijkingen:

diffusievergelijking: $\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} + (1-c) c W(c) = 0$

valsnelheid : $W(c) = W(o) (1-c)^4$

uitwisselingscoëfficiënt van sediment: $\epsilon_s = \kappa(c) u_* y \left(1 - \frac{y}{h} \right)$

-2-

10 Berekening $u_{\frac{y}{h}} : u_{\frac{y}{h}} = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{33 \frac{y}{h}}{\frac{k}{h}} \right)$

11 Berekening transport over stapje $\Delta \left(\frac{y}{h} \right) : \Delta S_{\frac{y}{h}} = c_{\frac{y}{h}} u_{\frac{y}{h}} \Delta \left(\frac{y}{h} \right)$

12 Herhaling 9 tot en met 11, totdat de hele vertikaal is doorgerekend

13 Berekening totaal suspensietransport: $S = \sum_{\frac{y_o}{h}}^1 \Delta S_{\frac{y}{h}}$

14 Berekening gemiddelde concentratie over de vertikaal uit het totaal suspensietransport:

$$c_m = \frac{S}{u}$$

15 Test: $\left| \frac{(c_m)_n - (c_m)_{n-1}}{(c_m)_n} \right| \leq 0.001$

Zo niet, dan berekening vanaf punt 4 herhalen met de c_m van punt 14

16 Uitvoer van totaal suspensietransport S_o

APPENDIX II Berekening concentratie c_o bij de bodem

<u>Gegeven:</u> debiet Q	(m ³ /s)
waterdiepte h	(m)
verhang i	(-)
kinematische viscositeit ν	(m ² /s)
gemiddelde concentratie c_t	(ppm)
dichtheid sediment ρ_s	(kg/dm ³)
diameter sediment D_{50}	(m)
valsnelheid sediment W	(m/s)
gootbreedte b	(m)

Te berekenen: concentratie bij de bodem c_o (-)

Berekening:

1 Omzetten c_t (ppm) in c_m (-): $c_m = \frac{c_t}{\rho_s (10^6 - c_t)}$ (-)

2 Berekening gemiddelde stroomsnelheid: $\bar{u} = \frac{Q}{b h}$

3 Berekening R_b volgens Appendix III

4 Berekening schuifspanningsnelheid: $u_{*b} = \sqrt{g R_b i}$

5 Berekening ruwheid: $\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{\bar{u}}{u_{*b}}$

6 Berekening totaal suspensietransport: $S_o = b h \bar{u} c_m$

7 Aanname c_o (tussen c_m en 0,6)

8 Berekening konstante van Von Karman: $\kappa = 0,385 \left(\frac{1 + c_m (\rho_s - 1)}{1 + 2,5 c_o} \right)$

9 Berekening parameter Z = $\frac{W}{\kappa u_{*b}}$

10 Berekening k-waarde: $k = 12h \exp \left(- \frac{c}{\sqrt{g}} \kappa \right)$

- 11 Berekening c_y , iteratief met behulp van de volgende vergelijkingen:

$$\text{diffusievergelijking: } \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} + (1-c) c W(c) = 0$$

$$\text{valsnelheid: } W(c) = W(o) (1-c)^4$$

$$\text{uitwisselingscoëfficiënt van sediment: } \epsilon_s = \kappa(c) u_x y \left(1 - \frac{y}{h}\right)$$

12 Berekening u_y : $u_y = \frac{u_x b}{\kappa} \ln \frac{33y}{k}$

13 Berekening transport over stapje Δy : $\Delta S_y = b c_y u_y \Delta y$

- 14 Herhaling 11 tot en met 13 totdat de vertikaal is doorgerekend

15 Berekening totaal suspensietransport: $S = \frac{h}{k} \sum \Delta S_y$

16 Test: $\left| \frac{(c_o)_n - (c_o)_{n-1}}{(c_o)_{n-1}} \right| \leq 10^{-4}$

Zo niet, dan andere aanname voor c_o en de berekening vanaf punt 7 herhalen (intervaldeling)

- 17 Uitvoer van bodemconcentratie c_o

Er wordt onderscheid gemaakt tussen een wandsektie en een bodemsektie. De grootheden, die betrekking hebben op de wandsektie krijgen de index w en de grootheden, die betrekking hebben op de bodemsektie de index b. De grootheden zonder index hebben betrekking op het gehele dwarsprofiel.

Voor de hieronder beschreven methode wordt gebruik gemaakt van de volgende grootheden in formules:

A = oppervlakte dwarsprofiel

p = natte omtrek

R = A/p = hydraulische straal (1)

$u_{*} = \sqrt{g R i}$ = schuifspanningssnelheid (2)

f = $8 (u_{*}/\bar{u})^2$ = wrijvingsfaktor (3)

Re = $4 \bar{u} R/\nu$ = getal van Reynolds (4)

De volgende aannamen worden gedaan:

- Het dwarsprofiel kan worden verdeeld in twee sekties; de ene sektie levert een schuifspanning op de bodem en de andere sektie op de wanden. De grenslagen tussen de beide sekties worden beschouwd als oppervlakten zonder schuifspanning en dragen niet bij tot de natte omtrek (p).
- De stroomsnelheid in de wandsektie (u_w) is gelijk aan de stroomsnelheid in de bodemsektie (u_b).
- De formules voor R, u_{*} , f en Re kunnen voor iedere sektie afzonderlijk worden toegepast.
- De ruwheid van de wanden en de bodem is ieder voor zich homogeen.

De te bepalen onbekenden zijn: $(u_{*})_b$, R_b en f_b . Om deze te kunnen berekenen moet f_w bekend zijn.

Wanneer de equivalente korrelruwheid van de wanden bekend is, kan f_w worden bepaald. In dit geval wordt aangenomen, dat de wanden hydraulisch glad zijn, zodat f_w alleen een funktie is van het getal van Reynolds voor de wanden:

$$Re_w = \frac{4 u_w R_w}{\nu} = \frac{4 u R_w}{\nu}$$

Anders geschreven:

$$Re_w = Re \frac{R_w}{R} \quad (5)$$

Uit de vergelijkingen (2) en (3) volgt:

$$g R_w i = \frac{f_w}{8} u^2 \quad (6)$$

en

$$g R i = \frac{f}{8} u^2 \quad (7)$$

Uit de vergelijkingen (6) en (7) volgt:

$$\frac{R_w}{R} = \frac{f_w}{f} \quad (8)$$

Vergelijking (5) wordt dan:

$$\frac{Re_w}{f_w} = \frac{Re}{f} \quad (9)$$

Uitgaande van een grafiek van f als functie van Re voor turbulente stroom door gladde pijpen gegeven door Rouse hebben Vanoni en Brooks een grafiek samengesteld van f als functie van Re/f . Wanneer Re en f bekend zijn is het aldus mogelijk f_w te bepalen.

De geometrie vereist:

$$A = A_b + A_w \quad (10)$$

$R = A/p$ wordt gesubstitueerd in vergelijking (7):

$$A = \frac{p f u^2}{8 g i} \quad (11)$$

Evenzo geldt:

$$A_b = \frac{p_b f_b u^2}{8 g i} \quad (12)$$

en:

$$A_w = \frac{p_w f_w u^2}{8 g i} \quad (13)$$

De vergelijkingen (11), (12) en (13) gesubstitueerd in vergelijking (10) geeft na deling door $u^2/8 g i$:

$$pf = p_b f_b + p_w f_w \quad (14)$$

zodat:

$$f_b = \frac{p}{p_b} f - \frac{p_w}{p_b} f_w \quad (15)$$

Voor een rechthoekig dwarsprofiel met breedte b en diepte h geldt:

$$p = b + 2 h$$

$$p_b = b$$

$$p_w = 2 h$$

Vergelijking (15) gaat nu over in:

$$f_b = f + \frac{2 h}{b} (f - f_w) \quad (16)$$

Analoog aan vergelijking (8) geldt:

$$R_b = R \frac{f_b}{f} \quad (17)$$

De schuifspanningssnelheid wordt dan:

$$(u_{*})_b = \sqrt{g R_b i} \quad (18)$$

APPENDIX IV Berekening suspensietransport uit stroom- en materiaalparameters

<u>Gegeven:</u> debiet Q	(m ³ /s)
waterdiepte h	(m)
verhang i	(-)
kinematische viscositeit ν	(m ² /s)
dichtheid sediment ρ_s	(kg/dm ³)
diameter sediment D_{50}	(m)
valsnelheid sediment W	(m/s)
breedte b	(m)

Te berekenen: transport S (mg/s)

Berekening:

1 Berekening gemiddelde stroomsnelheid: $\bar{u} = \frac{Q}{b h}$

2 Berekening R_b volgens Appendix III

3 Bepaling concentratie bij de bodem op $y = k/33$:

berekening R_b/D_{50}

berekening $Re = \frac{\bar{u} R_b}{\nu}$

bepaling f' uit $f' = f(R_b/D_{50}, Re)$ gegeven in figuur 19

berekening $u'_{\frac{x}{8}} = \sqrt{\frac{f' \bar{u}^2}{8}}$

bepaling c_o uit $c_o = f(u'_{\frac{x}{8}})$ gegeven in de figuren 32 en 35

4 Berekening schuifspanningssnelheid: $u_{\frac{x}{b}} = \sqrt{g R_b i}$

5 Berekening ruwheid: $\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{\bar{u}}{u_{\frac{x}{b}}}$

6 Aanname gemiddelde concentratie: $c_m = \frac{c_o}{100}$

7 Berekening totaal suspensietransport per eenheid van breedte: $S_o = h \bar{u} c_m$

8 Berekening konstante van Von Karman: $\kappa = 0,385 \left(\frac{1 + c_m (\rho_s - 1)}{1 + 2,5 c_o} \right)$

-2-

9 Berekening parameter $Z = \frac{W}{\kappa u_{*b}}$

10 Berekening k-waarde: $k = 12h \exp\left(-\frac{c}{\sqrt{g}} \kappa\right)$

11 Berekening c_y met behulp van de volgende vergelijkingen:

diffusievergelijking: $\epsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} + (1-c) c W(c) = 0$

valsnelheid: $W(c) = W(0) (1-c)^4$

uitwisselingscoëfficiënt van sediment: $\epsilon_s = \kappa(c) u_{*y} \left(1 - \frac{y}{h}\right)$

12 Berekening u_y : $u_y = \frac{u_{*b}}{\kappa} \ln \frac{33y}{k}$

13 Berekening transport over stapje Δy : $\Delta S_y = c_y u_y \Delta y$

14 Herhaling 11 tot en met 13 totdat de vertikaal is doorgerekend

15 Berekening totaal suspensietransport per eenheid van breedte: $S_1 = \frac{h}{k/33} \sum \Delta S_y$

16 Berekening gemiddelde concentratie: $c_m = \frac{S_1}{h \bar{u}}$

17 Test: $\left| \frac{S_1 - S_0}{S_1} \right| \leq 10^{-4}$

Zo niet, dan wordt $S_0 = S_1$ en de berekening vanaf 8 herhalen

18 Uitvoer van totaal suspensietransport: $S = b \rho_s S_1 10^9$ (mg/s)

p.o. box 177

delft

the netherlands