

DI 317530

rijkswaterstaat
dienst getijdewateren
nr. C-4704, 2

bibliotheek

715

2. Onderzoek naar de transportmechanismen van slib
in zout/zoet omstandigheden II

Slibonderzoek

Rijkswaterstaat

Waterloopkundig Laboratorium

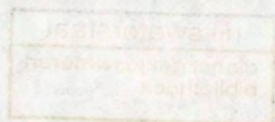
Rapport 2. Onderzoek naar de transportmechanismen van slib
in zout/zoet omstandigheden II

W. van Leussen

november 1981

Slibonderzoek

Rijkswaterstaat
Waterloopkundig Laboratorium



INHOUD

	blz.
<u>1</u> <u>Inleiding</u>	1
<u>2</u> <u>Onderzoek naar de transportmechanismen van slib in zout/zoetomstan-</u> <u>digheden</u>	2
<u>3</u> <u>Onderzoek naar de fysische en fysisch-chemische processen</u>	4
3.1 Flokkulatie.....	5
3.2 Valsnelheid.....	9
3.3 Sedimentatie.....	14
3.4 Gedrag slibdeken van hoge concentratie.....	20
3.5 Konsolidatie.....	24
3.6 Erosie.....	27
3.7 Transport.....	34
<u>4</u> <u>Prototypemetingen</u>	35
<u>5</u> <u>Ontwikkeling wiskundige modellen</u>	38
<u>6</u> <u>Hydraulisch modelonderzoek</u>	39
<u>7</u> <u>Diskussie</u>	52

REFERENTIES

BIJLAGEN

FIGUREN

1 Inleiding

Reeds geruime tijd wordt het belangrijk geacht om bij het getijgootonderzoek naast het onderzoek naar zout/zoetstromingen ook onderzoek te verrichten naar slibverschijnselen ([1], [2]). Overeenkomstig verslag M 896-40 zal de aanpak van deze studie slibonderzoek fundamenteel van opzet zijn en zich speciaal richten op de transportmechanismen van slib in zout/zoetomstandigheden. Uitgangspunt hierbij zijn de praktijkproblemen in de Nederlandse getijwateren op het gebied van sedimentatie en waterkwaliteit.

In 1981 is een werkgroep RWS/WL opgericht, met als eerste opdracht te komen tot een "programma voor slibonderzoek". Als eerste aanzet tot een gesprek in deze werkgroep diende de nota "Onderzoek naar de transportmechanismen van slib in zout/zoetomstandigheden" [3]. Naast een overzicht van slibverschijnselen in estuaria en een inventarisatie van praktijkproblemen en middelen om praktijkproblemen met slibverschijnselen op te lossen werd een opzet aangegeven van het in getijgootkader uit te voeren onderzoek. Om een zo open mogelijke discussie in de werkgroep te verkrijgen werd detaillering van het onderzoek daarbij bewust achterwege gelaten.

De bespreking van de nota vond plaats op 22 juli 1981. De werkgroep ging akkoord met de in de nota aangegeven grote lijn en afgesproken werd deze verder uit te werken. Deze uitwerking zal plaatsvinden in deze nota. Hierbij is dezelfde indeling gevolgd als in de vorige nota. De resultaten van de voorstudie naar het inbouwen van slibverschijnselen in wiskundige modellen zullen in een afzonderlijke nota worden gepresenteerd.

Bij elk onderdeel worden voorstellen gedaan voor uit te voeren onderzoek. Een volgende stap zal zijn het toekennen van prioriteiten aan de diverse onderdelen en het vervolgens opstellen van een werkplan voor het in getijgootkader uit te voeren slibonderzoek voor de eerstkomende jaren. Belangrijk is ook te komen tot een keuze van de slibsoorten, waarop het onderzoek zal worden uitgevoerd.

2 Onderzoek naar de transportmechanismen van slib in zout/zoetomstandigheden

Over de processen die bij slibverschijnselen in estuaria een rol spelen bestaan nog vele onduidelijkheden, met name wat de kwantitatieve beschrijving betreft. Als meest waarschijnlijke invloeden op het transport en de afzetting worden veelal genoemd:

1. dynamische processen van het water in het estuarium: circulatiestromen en menging, alsmede golven ten gevolge van wind
2. agglomeratieprocessen, die de valsnelheid van de deeltjes doen toenemen.
3. eigenschappen van de deeltjes zelf.

Voor een globale beschrijving van deze verschijnselen wordt verwezen naar hoofdstuk 2 van [3]. In bijlage I is dit schematisch samengevat. De topografie, de rivierafvoer en de getijwerking zijn de belangrijkste factoren die de waterbeweging en de menging in het estuarium beïnvloeden, terwijl ook de aardrotatie (Coriolis-effekt) en de wind van invloed kunnen zijn. Als gevolg hiervan zal een bepaalde zoutverdeling in het estuarium optreden, terwijl deze weer, samen met de genoemde invloedsfactoren, van invloed is op de in het estuarium optredende circulatiestromen.

Behalve via de invloed op de waterbeweging beïnvloedt het zoutgehalte de slibbeweging ook wegens de sterke afhankelijkheid van de eigenschappen van het slib van de zoutconcentratie (invloed opgeloste zouten op flokkulatie-eigenschappen, erosie-eigenschappen, etc.).

Uit bijlage I blijken de vele interacties die er tussen de diverse processen bestaan. Dit maakt een goede voorspelling van de slibbeweging niet eenvoudig, aangezien er dan immers voldoende kennis moet bestaan van elk van de op deze beweging van invloed zijnde grootheden. In bijlage I is ook aangegeven de invloed van biologische processen op de eigenschappen van het slib. Een kwantitatieve beschrijving hiervan zal uit de biologische hoek moeten komen.

Een overzicht van het in getijgootkader uit te voeren slibonderzoek is weergegeven in bijlage II. Hierbij is een indeling gemaakt naar:

- fysische en fysisch-chemische eigenschappen
- prototype-metingen
- wiskundige modellen
- hydraulisch modelonderzoek.

Deze onderdelen kunnen evenwel niet los van elkaar worden gezien en zullen dan

ook simultaan worden uitgevoerd. Elk onderdeel heeft immers zijn specifieke bijdrage, maar ook zijn beperkingen. Zo zal bij het onderzoek de interpretatie van buitenmetingen een belangrijke plaats dienen in te nemen, omdat er bij het nabootsen van de slibbeweging onder invloed van dichtheidsstromen in hydraulische modellen allerlei schaalearkten te verwachten zijn. Evenwel zal in het prototype door variatie van de randvoorwaarden nooit een stationaire situatie bereikt worden, terwijl vele processen elkaar gelijktijdig beïnvloeden en het uitvoeren van nauwkeurige metingen in het prototype niet eenvoudig is. Hydraulisch modelonderzoek in de getijgoot biedt daarentegen mogelijkheden om onder systematisch te variëren goed gedefinieerde omstandigheden nauwkeurig onderzoek te doen naar inhomogene stromingen en slibtransporten. Dergelijke proeven zijn noodzakelijk om te kunnen beschikken over toetsingsmateriaal voor de te ontwikkelen wiskundige modellen. Omgekeerd zijn deze modellen weer nodig bij de interpretatie van in de getijgoot uitgevoerde proeven. Het fysisch en fysisch-chemisch onderzoek zal moeten leiden tot meer inzicht in de basisprocessen die aan het slibgedrag ten grondslag liggen, als erosie, flokkulatie, sedimentatie, etc.. Ook zullen in dit kader uitgevoerde proeven de eigenschappen moeten vastleggen van bij natuurmetingen en modelproeven gebruikte slibsoorten. De hieruit volgende gegevens zijn noodzakelijk voor de interpretatie van de meetresultaten. Ook bij de wiskundige modelleringen zijn deze gegevens nodig voor de beschrijving van de uitwisselingsprocessen bij de bodem en de valsnelheid van de slibdeeltjes.

In de volgende hoofdstukken zal elk van deze onderdelen van het onderzoek nader worden uitgewerkt.

3 Onderzoek naar de fysische en fysisch-chemische processen

Door de zeer kleine afmetingen van de slibdeeltjes en de daarbij behorende grote verhouding tussen oppervlak en massa spelen de oppervlaktekrachten een belangrijke rol. De kolloïdale eigenschappen treden met name op bij de deeltjes met afmetingen kleiner dan $1\ \mu\text{m}$. De grootte van de hierbij optredende aantrekkende en afstotende krachten tussen de deeltjes hangen, behalve van de eigenschappen van de deeltjes zelf, in belangrijke mate af van de eigenschappen van het water.

Het zijn deze fysisch-chemische eigenschappen, die het gedrag van slib sterk doen onderscheiden van dat van grovere materialen als bijvoorbeeld zand. Kan bij zand gerekend worden met een konstante valsnelheid, bij slib wordt deze bepaald door de tengevolge van flokkulatie ontstane vloggrootte, welke weer een functie is van bijvoorbeeld de slibsoort, de slibconcentratie, de zoutconcentratie en de turbulentie in het water. Over een getijperiode kan deze dan ook belangrijk variëren. Een ander belangrijk verschil is dat de erosiesnelheid bij zand ongeveer gelijk is aan die waarbij sedimentatie optreedt. Bij fijne slibdeeltjes is als gevolg van de bindingskrachten tussen de deeltjes de snelheid, waarbij erosie optreedt, belangrijk groter dan die waarbij sedimentatie optreedt.

Hoewel de zich op zeer kleine schaal afspelende verschijnselen van overheersend belang zijn voor het gedrag van slib bedoelt het onderzoek naar de fysisch-chemische processen niet een onderzoek naar de verschijnselen op microschaal, als bijvoorbeeld elektrische bindingskrachten, maar een onderzoek naar de als gevolg hiervan op macro-schaal optredende processen als sedimentatie, erosie, etc.. Wel zal vanzelfsprekend bij het onderzoek een grondige kennis van deze kolloïdale verschijnselen aanwezig moeten zijn. Hiervoor wordt verwezen naar [5] en [6], terwijl gedetailleerde informatie over het gedrag van kleimineralen gevonden kan worden in bijvoorbeeld [7] en [8].

In de volgende paragrafen zullen deze processen, welke aan de slibtransporten ten grondslag liggen, nader worden beschouwd. Er zal telkens summier worden ingegaan op hetgeen hierover in de literatuur bekend is. Uitgebreidere aandacht zal hieraan worden besteed bij de uitvoering van de studie naar de fysische en fysisch-chemische eigenschappen van slib. Overigens is een uitgebreid overzicht reeds te vinden in [9].

Het lijkt zinvol in de eerste fase van het slibonderzoek reeds te starten met deze bureaustudie, gekombineerd met het uitvoeren van proeven op enige slibsoorten om dit gedrag vast te leggen en te bestuderen. Op deze wijze kan dan reeds ervaring en gevoel voor het slib worden opgebouwd, die nodig zijn bij een op verantwoorde wijze uitvoeren van hydraulisch onderzoek met slib (zie hfdst. 6). Ook bij de te zijner tijd in de getijgoot uit te voeren proeven met slib zullen begeleidende fysisch-chemische proeven moeten worden uitgevoerd om de noodzakelijke gegevens van het toegepaste materiaal vast te leggen.

Bij de opzet van het onderzoek zal ook aangegeven moeten worden op welke slibsoorten de proeven zullen worden uitgevoerd. Aangezien de praktijkproblemen in de Nederlandse getijwateren uitgangspunt zijn, zullen dit Nederlandse slibsoorten dienen te zijn. Dit is temeer van belang, aangezien de te bepalen gegevens over het algemeen een sterk empirische inslag hebben, en dus alleen voor het betreffende slib geldig zijn. Voor het in de getijgoot uit te voeren systematisch onderzoek naar slibverschijnselen zal als voorwaarde aan het slib gesteld moeten worden, dat de eigenschappen reproduceerbaar zijn. Dit zou kunnen betekenen dat het daar toegepaste slib geen of nagenoeg geen organische bestanddelen zal mogen bevatten. Overigens moet wel bedacht worden dat de organische bestanddelen de eigenschappen van het slib sterk kunnen beïnvloeden. Het onderzoek naar de fysisch-chemische eigenschappen van slib zal dan ook moeten leiden tot een keuze van het in de getijgoot toe te passen slib.

Het onderzoek naar de fysisch en fysisch-chemische processen zal ook een eerste aanzet moeten geven bij het zoeken naar de in schaalmodellen toe te passen modelmaterialen (zie hfdst. 6). Bij toepassing van modelmaterialen gaat een sterke voorkeur uit naar het gebruik van een natuurlijke slibsoort.

Een schematisch overzicht van het onderzoek naar de fysisch en fysisch-chemische processen is weergegeven in bijlage III.

3.1 Flokkulatie

Van overheersend belang in het gedrag van slibdeeltjes in water zijn de flokkulatieverschijnselen, waarbij de fijne slibdeeltjes samenkleven en vlokken vormen. De individuele deeltjes zijn namelijk zo klein en hebben dientengevolge zulke kleine valsnelheden, dat zij niet of slechts zeer langzaam tot bezinken zouden komen. Door de flokkulatie ontstaan evenwel vlokken met valsnelheden die vele malen groter zijn. Wel zullen deze vlokken een groot percentage

Bijvoorbeeld [10]:

slibdeeltje met diameter $5 \mu\text{m}$ en soortelijk gewicht 2700 kg/m^3 : $v_w = 0,002 \text{ cm/s}$

vlok met diameter $500 \mu\text{m}$ en 95% water: $v_w = 0,4 \text{ cm/s}$.

De achtergronden van dit gedrag worden gevormd door fysisch-chemische processen in het slib-watermengsel. Sterk geschematiseerd komt dit op het volgende neer. De slibdeeltjes hebben door diverse oorzaken een negatieve lading. Hierdoor worden positieve ionen uit het water naar het slibdeeltje toegetrokken, om hun eigen elektrische lading te neutraliseren. Vanwege de warmtebeweging der molekulen vindt tegelijkertijd een diffusief transport van deze positieve ionen plaats vanaf het slibdeeltje, omdat de concentratie positieve ionen afneemt met toenemende afstand tot het slibdeeltje. Een slibdeeltje zal dus omringd zijn van een diffusieve laag kationen, waarvan de dikte van deze zogenaamde "dubbellaag" bepaald wordt door het evenwicht van de elektrische aantrekkingskrachten en de warmtebeweging (zie fig. 1). Wanneer twee deeltjes met een dergelijke diffusieve dubbellaag elkaar naderen zullen zij elkaar afstoten ten gevolge van de wolk positieve ionen die zij om zich heen verzameld hebben. In figuur 2 is de afstotingsenergie V_R weergegeven als functie van de afstand tot het slibdeeltje. In deze figuur is ook de energie V_A behorend bij de aantrekkingskrachten tussen de deeltjes weergegeven ten gevolge van de Van der Waals krachten. Deze laatste krachten nemen snel af met de afstand tot het deeltje. Middels een gestreepte lijn is in deze figuur de som van beide energieën uitgezet, zijnde de netto-energie: afstoting positief en aantrekking negatief.

De Van der Waals krachten zijn onafhankelijk van de eigenschappen van het water. De afstotende krachten zijn evenwel afhankelijk van de hoeveelheid positieve ionen in het water. Een toename van de ionconcentratie in het water vermindert het diffusieve transport van positieve ionen rondom het slibdeeltje, aangezien dit transport sterk afhankelijk is van de concentratiegradiënt. Als gevolg hiervan zal de dubbellaag bij hoge concentraties sterk worden samengedrukt (vergelijk fig. 2a en 2b). Enige waarden voor de "dikte" van de dubbellaag (uit [6]):

koncentratie pos. ionen (mol/l)	"dikte" dubbellaag (A)	
	monovalente ionen	divalente ionen
0,01	1000	500
1	100	50
100	10	5

Uit figuur 2b blijkt ook dat, wanneer de concentratie positieve ionen in het water maar groot genoeg is, een botsing tussen twee deeltjes altijd samenklonteren betekent. Drake [12] noemt hiervoor een zoutgehalte van 2-5^o/oo als punt van optreden van flokkulatie. Whitehouse, Jeffrey en Debrecht [11] constateerden dat flokkulatie abrupt begon bij een zoutgehalte van 1 à 7^o/oo.

Zoutgehalten boven 2^o/oo bleken voor kaoliniet en illiet geen toename van de flokkulatie meer te geven. Dat bleek wel het geval bij montmorilloniet (vgl. fig. 3b). Volgens Einstein en Krone [13] leidt bij een zoutgehalte van meer dan 1^o/oo een botsing tussen deeltjes steeds tot samenkleven van de deeltjes.

Behalve de mineralogische samenstelling blijkt ook de sedimentconcentratie een belangrijke parameter te zijn bij de invloed van het zoutgehalte op de flokkulatieverschijnselen (zie fig. 3a). Ook de soort zout is van invloed. Zo vonden bijvoorbeeld Peirce en Williams [14] dat met gewoon zout in water bij een zoutgehalte van 4,65^o/oo volledige flokkulatie was opgetreden, terwijl dit bij 2,15^o/oo het geval was voor zeewater, dat zouten van diverse mineralen bevat.

Naast de beschreven fysisch-chemische processen zijn ook fysische verschijnselen noodzakelijk voor het optreden van flokkulatie, namelijk botsingen tussen de deeltjes. De voornaamste oorzaken van botsingen zijn:

- de Brownse beweging
- de snelheidsgradiënten in de waterbeweging (turbulentie)
- de onderlinge verschillen in valsnelheid tussen de deeltjes, waardoor de grotere deeltjes bij het vallen de kleinere inhalen.

Voor een beschrijving van de botsingskansen ten gevolge van deze oorzaken wordt verwezen naar [15]. Botsingen ten gevolge van de Brownse beweging spelen slechts een belangrijke rol in het allereerste stadium van de flokkulatie,

wanneer de deeltjes nog zeer klein zijn, of in situaties met zeer hoge slib-koncentraties. Voor vlokken groter dan $2\text{ }\mu\text{m}$ zullen met name de botsingen ten gevolge van snelheidsgradiënten in de waterbeweging een belangrijke bijdrage leveren aan de flokkulatie. Deze wordt in estuaria dan ook de belangrijkste oorzaak geacht, met name waar de waterbeweging sterk turbulent is, zoals in stroming achter paalwerken etc. [13]. Botsingen ten gevolge van verschillen in valsnelheid kunnen van belang zijn in situaties met kleine stroomsnelheden, zoals ten tijde van hoog- en laagwaterkentering. De vlokken moeten dan wel reeds een bepaalde grootte bezitten, terwijl ook voldoende variatie in vlog-grootte aanwezig moet zijn.

De door de snelheidsgradiënten op de vlokken uitgeoefende schuifspanningen hebben tot gevolg dat de vloggrootte beperkt is vanwege de maximale schuif-spanning die een vlog kan weerstaan. Krone geeft in [16] relaties tussen de maximale vloggrootte en de schuifspanning in een laminaire stroming.

Uit de hierbij door hem in een viskositeitsmeter uitgevoerde proeven bleek ook dat de laagste snelheidsgradiënten tot vlokken met de laagste schuifsterkte leiden. Met name de door Brownse beweging of door verschil in valsnelheid gevormde vlokken bezitten een lage schuifsterkte.

Een grote onbekende in het flokkulatieproces is de invloed van de turbulentie op de vloggrootte. Over een getijperiode varieert deze namelijk sterk (vgl. fig. 4a), zodat verwacht mag worden dat dit ook met de valsnelheden van de slibvlokken het geval zal zijn. In welke mate dit het geval is, is niet bekend. Wel blijkt uit figuur 6 een belangrijk verschil in valsnelheid van de slibdeeltjes bij doottij en bij springtij.

Behalve de genoemde fysisch-chemische oorzaken voor het optreden van flokkula-tie kunnen ook biologische processen vermoedelijk hierop een sterke invloed hebben. Zo wordt voor de Chesapeake Bay door Schubel vastgesteld dat de daar aangetroffen vlokken organisch gebonden agglomeraten betreffen [17]. Uiterwijk Winkel [4] heeft in 1975-1976 een onderzoek gedaan naar het sedimentatiegedrag van Rijnslib. Uit dit onderzoek, dat beperkt bleef tot het in de rivier zwe-vende slib, bleek dat de vlogvorming vermoedelijk sterk beïnvloed wordt door biologische processen in het slib en de aktiviteit van vooral bakteriën, algen en protozoën. Deze organismen bleken onder meer de fysisch-chemische en mecha-nische eigenschappen van het slib te beïnvloeden. In hoeverre in de Nederland-se getijwateren met hogere zoutgehalten de vlogvorming door biologische dan

wel door fysisch-chemische oorzaken dominant is, is niet bekend.

ONDERZOEK

In bijlage IV is het onderzoek naar flokkulatieverschijnselen schematisch weergegeven. De volgende aspecten komen hierin aan de orde:

- Aangezien de slibproblemen in de Nederlandse getijwateren uitgangspunt zijn voor het in getijgootkader uit te voeren slibonderzoek, lijkt het van primair belang te weten of daar de flokkulatieverschijnselen door biologische, dan wel door fysisch-chemische oorzaken worden bepaald. Om hier meer duidelijkheid over te verkrijgen zal inbreng vanuit de biologische hoek noodzakelijk zijn.
- Om meer inzicht te krijgen in de vlokvorming van de Nederlandse slibsoorten c.q. in de getijgoot te gebruiken slibsoorten, zal onderzoek moeten worden uitgevoerd naar de diverse factoren die hierop van invloed zijn, zoals zoutgehalte, turbulentiegraad, slibkoncentratie, etc.. Op proeven hiertoe wordt in hoofdstuk 3.2 bij het onderzoek naar de valsnelheden van de vlokken nader teruggekomen.
- De grootte van de vlokken wordt beperkt vanwege de door het water op de vlokken uitgeoefende schuifspanning. Om hier meer inzicht in te verkrijgen verdient het aanbeveling onderzoek uit te voeren naar de sterkte van de vlokken van slib uit de Nederlandse getijwateren, c.q. van bij het getijgootonderzoek toegepast slib.
- Om bij de in de getijgoot uit te voeren proeven voldoende bodemruwheid te verkrijgen zullen ruwheidselementen worden toegepast (zie hfdst. 6). Vanwege de door deze elementen opgewekte turbulentie zal het flokkulatieproces hierdoor belangrijk kunnen worden beïnvloed. Aangezien hierover in de literatuur geen kwantitatieve gegevens bestaan, zullen proeven het nodige inzicht moeten verschaffen (bijv. proeven in stroomgootje met en zonder ruwheidselementen).

3.2 Valsnelheid

Een belangrijke parameter bij het modelleren van slibtransporten is de valsnelheid w_s van het deeltje. Voor ronde deeltjes in stilstaand water geeft de wet van Stokes hiervoor een goede beschrijving:

$$w_s = \frac{g}{18\nu} \frac{\rho_d - \rho_w}{\rho_w} \cdot D^2 \quad (1)$$

met: w_s = valsnelheid

g = versnelling zwaartekracht

ν = kinematische viscositeit

ρ_d = dichtheid deeltje

ρ_w = dichtheid water

D = diameter deeltje.

Een voorwaarde hierbij is dat het Reynoldsgetal $Re = w_s \cdot D / \nu$ voldoende klein is. ($Re < 1$). Voor deeltjes met een dichtheid $\rho_d = 2650 \text{ kg/m}^3$ betekent dit $D < 100 \text{ }\mu\text{m}$.

De door flokkulatie ontstane slibvlokken hebben evenwel geen ronde vorm en bestaan voor een groot gedeelte uit water. Direkte toepassing van de formule van Stokes is dan ook niet eenvoudig. Vaak wordt daarom gesproken van een zogenaamde ekwivalente diameter, zijnde die diameter die een rond zandkorreltje ($\rho_d = 2650 \text{ kg/m}^3$) zou hebben volgens de formule van Stokes, wanneer die een valsnelheid heeft gelijk aan die van de slibvlok.

Diverse onderzoeken zijn uitgevoerd om de valsnelheid van slibdeeltjes te bepalen (bijv. [18], [19], [20]). De proeven werden grotendeels uitgevoerd in een verticale buis, zowel in stilstaand water als wel met een daarin opgewekt turbulentieveld, bijvoorbeeld middels een in de buis bewegend rooster [18].

Uit deze onderzoeken bleken de volgende invloeden op de valsnelheid:

a. invloed concentratie:

Bij lage concentraties ($C < C_1 \text{ mg/l}$) blijkt, omdat de deeltjes zeer weinig interacties vertonen, de valsnelheid konstant te zijn. De valsnelheid neemt in de tijd langzaam toe door voortgaande flokkulatie. De uiteindelijke valsnelheid van de gevormde vlokken blijkt dan te kunnen worden beschreven door:

$$w_s = K \cdot C^m \quad (2)$$

met: K = empirische konstante

C = concentratie gesuspenderde deeltjes

m = empirische exponent.

Bij grotere concentraties ($C_1 < C < C_2$) treedt er "gehinderde bezinking" op. Men pleegt de valsnelheid dan meestal te beschrijven met de Richardson-Zaki relatie [24]:

$$w_s = w_o (1-\phi)^a \quad (3)$$

w_o = valsnelheid van de individuele vlokken

ϕ = volume concentratie van gesuspenderde vlokken

a = konstante ($a \approx 5$).

Voor het San Francisco Bay Mud vond Krone [15] dat $C_1 \approx 300$ mg/l en $C_2 \approx 10.000$ mg/l. Voor concentraties groter dan 10.000 mg/l vond hij dat de dichtheid zo groot was, dat de vlokken de stroming van het water tussen de vlokken hinderden (vorming "fluid-mud"-layer).

Naast de bovengenoemde invloed van de concentratie ten gevolge van interacties op de valsnelheid van de vlokken, is de concentratie via de flokkulatieverschijnselen ook van invloed op de valsnelheid. Immers een grote concentratie betekent veel botsingen en dus grote vlokken (vgl. hfdst. 3.1 en fig. 3).

b. invloed diepte

Door McLaughlin werden proeven uitgevoerd in een \emptyset 9,52 cm buis, lang 1,20 m, waarbij op een drietal plaatsen de concentratie werd gemeten. Uitgaande van een concentratie van 655 ppm bleken er op één diepte van 60, 80 en 90 cm belangrijke verschillen in valsnelheid. De valsnelheid bij 90 cm vanaf het oppervlak bleek aanzienlijk groter dan die bij 60 cm (zie fig. 7).

In Wallingford zijn proeven uitgevoerd in een buis met een lengte van 9,20 m. De concentratie bleek met de diepte toe te nemen tot een bepaalde afstand. Deze afstand bleek afhankelijk van de beginkoncentratie (voor een concentratie van 800 mg/l in elk geval kleiner dan 2 m [22]). Op het moment van schrijven van deze nota kon nog niet beschikt worden over de resultaten van deze metingen [23].

c. invloed zoutgehalte

Ten gevolge van de invloed van het zoutgehalte op de flokkulatieverschijnselen (zie hfdst. 3.1) heeft dit een belangrijke invloed op de valsnelheid. In figuur 3 zijn enkele resultaten weergegeven. Boven een bepaald zoutgehalte blijkt er weinig invloed meer te zijn.

d. invloed turbulentie

Zoals beschreven in hoofdstuk 3.1 heeft de turbulentie op een tweetal wijzen invloed op de valsnelheid:

- turbulentie verhoogt de botsingskans, zodat grotere vlokken ontstaan
- turbulentie beperkt de vloggrootte wegens optredende schuifspanningen.

Het is evenwel niet eenvoudig om de turbulentiegraad van het water in een estuarium te meten.

Omdat het nog moeilijker is deze turbulentiestructuur in het laboratorium na te bootsen, is door Owen [25] een apparaat ontwikkeld om de valsnelheden direkt in het prototype te meten (zie fig. 5). Uit deze resultaten bleken bij een bepaalde sedimentkoncentratie belangrijke verschillen in valsnelheid tussen situaties bij springtij en bij doodtij (zie fig. 6).

Voor een stationaire situatie is, uitgaande van een logaritmisch verloop van de stroomsnelheid en een parabolisch verloop van de turbulente uitwisselingskoëfficiënt te berekenen dat de concentratie C_2 op een diepte z voor uniforme deeltjes verloopt als:

$$\frac{C_z}{C_a} = \left(\frac{a}{d-a}\right)^\zeta \left(\frac{d-z}{z}\right)^\zeta \quad (4)$$

met: a = referentiehoogte, waar $C = C_a$

d = waterdiepte

$\zeta = w/\kappa u_*$

κ = Von Karman konstante

u_* = schuifspanningssnelheid.

Door de in de Savannah Harbor gemeten concentraties en stroomsnelheden te vergelijken met deze theoretische concentratieverdeling en uitgaande van =

0,4 komt Krone [26] tot de volgende valsnelheden bij respectievelijk spring- en doottij:

station nr.	valsnelheden (mm/s)		
	springtij	gemiddeld getij	doottij
109 + 667 eb	8,5	11,6	9,1
vloed	10,1	-	3,7
125 + 500 eb	4,3	27,7	25,6
vloed	10,1	5,2	14,3
130 + 500 eb	46,0	-	4,9
vloed	29,9	-	12,2

De resultaten vertonen nogal wat spreiding, terwijl bovendien de sedimentconcentraties niet zijn aangegeven. In estuaria zal overigens slechts zelden aan alle voorwaarden voor deze methode voldaan worden.

e. invloed temperatuur

Vanwege de invloed van de temperatuur op de viscositeit heeft deze vanzelfsprekend ook een grote invloed op de valsnelheid.

f. invloed mineralogische samenstelling

Aangezien het flokkulatieproces beïnvloed wordt door de mineralogische samenstelling van het sediment, is deze ook van invloed op de valsnelheid (vgl. fig. 3b). Omdat iedere slibsoort weer een andere samenstelling heeft, betekent dit dat voor elke slibsoort de valsnelheid apart zal moeten worden bepaald.

g. invloed afwijking van gemiddelde valsnelheid

Bij de afwezigheid van de invloed van flokkulatie en gehinderde bezinking leidt McLanghlin voor de 1-dimensionale bezinking de volgende vergelijking af [19]:

$$\frac{\partial(wc)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma^2 c + w^2 c) = 0 \quad (5)$$

met: σ = standaardafwijking van de valsnelheid van de deeltjes.

Naast de gemiddelde valsnelheid dient dus ook aandacht aan de verdeling van de valsnelheden van het sedimentmonster te worden besteed.

ONDERZOEK

In bijlage V is het onderzoek naar de valsnelheden schematisch weergegeven. De volgende aspecten komen hierin aan de orde:

- Onderzoek naar de valsnelheden in stilstaand water van Nederlandse slibsoorten c.q. in de getijgoot te gebruiken slibsoorten. Deze proeven zullen worden uitgevoerd in een vertikale perspex buis, waarbij het zoutgehalte, de slibsoort, de slibconcentratie, en de waterdiepte zullen worden gevarieerd. Vergelijkingen zullen worden gemaakt met in de literatuur voor andere slibsoorten gevonden relaties.
- Om de invloed van de turbulentie op de valsnelheid te onderzoeken verdient het aanbeveling ook proeven uit te voeren, waarbij in de buis, bijvoorbeeld door een oscillerend rooster, een turbulentieveld in het water wordt opgewekt. Het is van belang om hierbij de turbulentiegraad van het water vast te leggen.
- Aangezien de vlok grootte, en daarmee de valsnelheid, in het prototype in belangrijke mate wordt bepaald door de turbulentie in het water en deze vooralsnog moeilijk in het laboratorium kan worden nagebootst, wordt het meten van valsnelheden in het prototype belangrijk geacht. Indien mogelijk dient dan ook de turbulentiegraad in het prototype te worden vastgelegd, opdat goede vergelijkingen mogelijk zijn met de onder het vorige punt genoemde proeven.
- Het in de tijd op dezelfde slibmonsters diverse malen uitvoeren van valsnelheidsbepalingen zal moeten aangeven in welke mate de eigenschappen van het slib reproduceerbaar zijn. Waarschijnlijk zal de hoeveelheid organische stof hiervoor reeds een indicatie zijn. Dergelijke gegevens zijn nodig in verband met de keuze van de slibsoort voor de getijgootproeven.

3.3 Sedimentatie

Wanneer de valsnelheid van de deeltjes bekend is, is de afzetting van deze deeltjes in stilstaand water eenvoudig te berekenen, aangezien de sedimentatie dan simpel het produkt is van de concentratie bij de bodem en de valsnelheid

van de deeltjes c.q. vlokken. In stromend water is de situatie ingewikkelder. Het verticale transport wordt bepaald door de valsnelheid en het verticale transport door turbulente diffusie. Bij voldoende hoge stroomsnelheden vormen de grote snelheidsgradiënten bij de bodem een hinderpaal voor de vlokken om de bodem te bereiken. Een grote moeilijkheid voor het beschrijven van deze processen is tevens dat de grootte van de vlok, en dus ook de valsnelheid, afhankelijk is van de turbulentiegraad.

Uitgebreide studies naar de sedimentatie van slib in stromend water zijn uitgevoerd aan de universiteiten van California en Florida door Einstein, Krone, Partheniades en Mehta ([28], [15], [29], [30], [32]), terwijl door het Waterloopkundig Laboratorium dergelijk onderzoek is uitgevoerd in het kader van de studie van de Demerara River [31].

Het onderzoek werd uitgevoerd in een stroomgoot en in een carousel. Resultaten van dit onderzoek zullen onderstaand kort worden gememoreerd:

a. onderzoek in stroomgoot

Door Krone zijn proeven uitgevoerd in een stroomgoot met recirculatie [15]. De goot was 30 m lang, 0,90 m breed en de waterdiepte bedroeg ca. 0,30 m. Het gebruikte sediment betrof San Francisco Bay Mud. Er bleek een kritieke schuifspanning τ_d te bestaan, waarvoor geldt dat bij $\tau > \tau_d$ geen sedimentatie optreedt. De waarschijnlijkheid P dat een deeltje dat de bodem bereikt zich ook aan de bodem zal hechten wordt door Krone gelijkgesteld aan:

$$P = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_d} \quad (6)$$

waarbij τ_b de bodemschuifspanning is.

Voor $\tau_b < \tau_d$ kan de sedimentatiesnelheid dan worden beschreven door

$$\frac{dm}{dt} = C w_s \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}\right) \quad (7)$$

waaruit blijkt dat deze sterk afhangt van de concentratie C (kg/m^2) van gesuspendeerde deeltjes.

Enige resultaten van deze proeven zijn afgebeeld in figuur 8, waar het verloop van de concentratie als functie van de tijd staat weergegeven bij verschillende stroomsnelheden en diverse beginkoncentraties C_0 . Krone onderscheidt drie gebieden:

$C_0 < 300 \text{ mg/l}$: de concentratie neemt exponentieel af met de tijd

$$\frac{C}{C_0} = e^{-K_0 t} \quad (8)$$

(Er is een te verwaarlozen invloed van het flokkulatieproces)

$300 < C_0 < 10.000 \text{ mg/l}$: $\log \frac{C}{C_0} = -K_2 \log t$ (9)

(Flokkulatie t.g.v. onderlinge botsingen der deeltjes)

$C_0 > 10.000 \text{ mg/l}$: een drietal periodes blijkt op te treden:

1e periode: concentratie ongeveer konstant

2e periode: langzame afname concentratie

3e periode: snellere afname concentratie

De snellere afname van de concentratie blijkt op te treden zodra $C < 10.000 \text{ mg/l}$. De langzame afzetting voor $C > 10.000 \text{ mg/l}$ wordt veroorzaakt door de bij deze hoge concentraties optredende kontakten tussen de deeltjes en doordat de waterstroming tussen de deeltjes wordt gehinderd ("fluid mud").

Opmerkelijk in figuur 8b is de zeer snelle afname van de concentratie, wanneer door een bewegend rooster extra turbulentie in het water wordt opgewekt.

De kritieke schuifspanning bij deze proeven was: $\tau_d = 0,06 \text{ Pa}$. Voor het Thames mud werden middels proeven in een stroomgootje in Wallingford zelfde waarden voor τ_d gevonden [33].

Partheniades deed onderzoek aan dezelfde slibsoort. Hoewel zijn gootproeven voornamelijk op erosie betrekking hadden, voerde hij ook enige sedimentatieproeven uit [34]. De proeven werden uitgevoerd tot een zekere evenwichtssitua-

tie was bereikt. Vervolgens werd de proef voortgezet met een lagere stroomsnelheid, etc.. Iedere snelheid bleek in staat een bepaalde concentratie in stand te houden, zodat bij een plotselinge reductie van de stroomsnelheid een plotselinge vermindering van de concentratie optrad. Bij de lagere snelheden trad deze sprong niet meer op, hetgeen wordt toegeschreven aan het feit dat daar alleen nog maar kleideeltjes in suspensie zijn (zie fig. 9). Beneden een bepaalde snelheid bleek uiteindelijk al het slib zich af te zetten ($u = 0,5 \text{ fps} \approx 0,15 \text{ m/s}$).

b. onderzoek in carousel

Bij de sedimentatie van slib spelen de valsnelheden van de slibvlokken een overheersende rol. De grootte van deze vlokken en daarmee de valsnelheid wordt o.a. bepaald door de in het water optredende turbulentie. Een nadeel van een goot met recirculatie is dan ook dat de vloggrootte in belangrijke mate bepaald zal worden door de eigenschappen van de pomp en de retourleiding. Om deze problemen te omzeilen zijn door Partheniades [35] en Mehta [32] proeven uitgevoerd in een zogenaamde carousel. Dit apparaat bestaat uit een roterend kanaal en een roterende ring (fig. 10). Een nadeel van dergelijke apparaten is het optreden van secundaire stromingen (fig. 11). Door de snelheden van het kanaal en de ring in de juiste verhouding te kiezen wordt er voor gezorgd dat de invloed van de secundaire stromingen minimaal is. De afmetingen van deze apparaten waren:

carousel bij M.I.T.	: gem. diameter = 0,8 m; kanaalbreedte = 0,19 m; diepte = 0,30 m
carousel bij Universiteit van Florida:	gem. diameter = 1,50 m; kanaalbreedte = 0,20 m; diepte = 0,45 m

Er werden vier typen sediment bestudeerd:

- kaoliniet klei (fabriekspoeder)
- San Francisco Bay mud
- Maracaibo sediment
- mengsel 50% kaoliniet + 50% Bay mud.

Voor de proeven met kaoliniet werd zowel gedestilleerd water als zout water toegepast. De overige proeven werden alleen met zout water uitgevoerd. De beginkoncentratie C_0 werd gevarieerd van 1000 tot 26000 mg/l en de toegepaste diepten waren 152, 229, 305 en 330 mm. Enige resultaten zijn weergegeven in

figuur 12. Na een korte periode van snelle sedimentatie blijkt een evenwichts-situatie C_{eq} te worden bereikt. Alleen vlokken die sterk genoeg zijn om de bij de bodem optredende schuifspanning te weerstaan zullen zich afzetten. Vlokken met relatief lage schuifsterkte zullen in twee of meer kleinere delen uiteenvallen en weer in suspensie gaan.

De concentratie C_{eq} bevat uiteindelijk dus vlokken die te zwak of te klein zijn voor de turbulente schuifspanning bij de bodem. Uit figuur 12c blijkt dat er een konstante verhouding bestaat tussen de beginkoncentratie C_0 en C_{eq} , afhankelijk van de bodemschuifspanning τ_b en vanzelfsprekend ook van het type sediment. Uit deze figuur blijkt ook het bestaan van een minimum bodemschuifspanning, waar beneden alle sediment in suspensie uiteindelijk sedimenteert.

Uit proeven met een radio-actieve tracer konkludeert Krone dat simultaan erosie en sedimentatie optrad [15]. Partheniades et al [37] tonen evenwel aan, door verversing van het water tijdens een proef op het moment dat de evenwichtskoncentratie C_{eq} bereikt is, dat na het bereiken van het evenwicht er geen simultane erosie en afzetting plaatsvindt. De oorzaak hiervan is dat de schuifspanning, waarbij erosie optreedt, belangrijk groter is dan de schuifspanning, waar beneden sedimentatie plaatsvindt, zoals ook gekonstateerd is bij door het WL uitgevoerde proeven [31].

Gekonkludeerd kan worden dat de afzetting van geflokkuleerd slib in stromend water in belangrijke mate beheerst wordt door de turbulentie van het water in een zone vlak bij de bodem (zie ook [36]). Bij onderzoek naar sedimentatie van geflokkuleerd slib verdient het dan ook aanbeveling de turbulentie bij de bodem te meten.

ONDERZOEK

In bijlage VI is het onderzoek naar sedimentatieverschijnselen schematisch weergegeven. De volgende aspecten komen hierin aan de orde:

- Onderzoek naar het sedimentatiegedrag van slib zal worden uitgevoerd in een stroomgoot en/of carousel. Wat de goot betreft kan gedacht worden aan de vuilwatergoot, de zandgoot in De Voorst, of een van de goten in het gotenlaboratorium (zie bijlage XIV). Een beperking van deze goten is dat het zoutgehalte niet kan worden gevarieerd. Een nadeel van stroomgoten met recirculatie is dat het vlokformingsproces in belangrijke mate bepaald wordt door de pomp en het leidingsysteem. Een carousel heeft dit nadeel niet. Een

dergelijk apparaat is bij het WL evenwel niet beschikbaar. Een ander voordeel van de carousel is dat slechts een geringe hoeveelheid slib nodig is voor een proef (bijv. in carousel \emptyset 1,50 m met $h = 0,20$ m, $b = 0,20$ m is bij een concentratie van 10.000 mg/l nog geen 4 kg slib nodig). Men zou kunnen overwegen naast de getijgoot een carousel beschikbaar te hebben voor het doen van principe-proeven naar het sedimentatie- en erosiegedrag van slib, waarvan de resultaten dan weer gebruikt kunnen worden voor het interpreteren van in de getijgoot uitgevoerde proeven onder invloed van getij, stromingen en zoutgehalte (zie hfdst. 6), alsmede van prototypemetingen (zie hfdst. 4). Bij de genoemde proeven zullen het zoutgehalte, de slibsoort, de initiële slibconcentratie, de stroomsnelheden en de waterdiepte moeten worden gevarieerd.

- Van overheersend belang in het sedimentatieproces zijn de valsnelheden van de geflokkuleerde deeltjes. De resultaten van de onder het vorige punt genoemde proeven zullen dan ook vergeleken worden met die van het in de hoofdstukken 3.1 en 3.2 genoemde onderzoek naar de flokkulatieverschijnselen en valsnelheden.
- Aangezien de sedimentatieprocessen in de natuur uitgangspunt zijn voor het onderzoek, wordt het van groot belang geacht in het prototype waargenomen sedimentatieverschijnselen (afzetting op bodem en verloop concentratie gesuspendeerde deeltjes over getijperiode) te vergelijken met op dezelfde slibsoort in het laboratorium uitgevoerde sedimentatieproeven.
- Behalve op Nederlandse slibsoorten c.q. in de getijgoot toe te passen slibsoorten lijkt het nuttig proeven uit te voeren met enkele pure kleisoorten. Behalve dat dan meer inzicht verkregen wordt hoe bepaalde kleimineralen van invloed zijn op het sedimentatieproces mag een homogener sedimentatieproces verwacht worden en een meer gelijkmatige opbouw van de bodem. Dergelijke proeven kunnen door hun simpeler gedrag sterk bijdragen aan het verkrijgen van het noodzakelijke inzicht in het sedimentatieproces (zie ook vierde aandachtspunt bij onderzoek erosie in hfdst. 3.6).
- Proeven met ruwheidselementen zullen moeten aangeven hoe deze het sedimentatieproces beïnvloeden. Inzicht hierin is nodig wanneer in de getijgoot proeven met ruwheidselementen worden uitgevoerd (zie hfdst. 6).
- Aangezien het sedimentatieproces in belangrijke mate bepaald wordt door de turbulentie in het water, en met name vlak bij de bodem, verdient het aanbeveling deze turbulentiestructuur te meten (bijv. middels Laser-Doppler snelheidsmeter).

3.4 Gedrag slibdeken van hoge concentratie

Karakteristiek voor vele estuaria is het optreden van een zogenaamde troebelings- of "turbidity-maximum". Zeewaarts van dit punt is de gemiddelde stroming bij de bodem landwaarts gericht, terwijl deze bovenstrooms van dit punt een zeewaartse richting heeft (invloed gravitatiecirculatie). Ook bij nagenoeg vertikaal volledig gemengde estuaria, zoals de Thames, treedt deze landinwaartse stroming bij de bodem op. De sterkte van dit troebelingsmaximum blijkt over het algemeen afhankelijk van ([38]):

- a. de hoeveelheid gesuspendeerde deeltjes in de rivier en in de zee
- b. de sterkte van de circulatiestromen in het estuarium
- c. de valsnelheid van de deeltjes.

Ter plaatse van dit troebelingsmaximum vindt bij voldoende lage stroomsnelheden (bijv. bij kentering) een belangrijke afzetting plaats van slibvlokken. Wanneer deze afzetting sneller plaatsvindt dan de snelheid waarmee het konsolidatieproces zich voltrekt, kan zich een slibdeken bij de bodem vormen van zeer hoge concentraties (10.000 à 300.000 ppm). De dikte van deze laag kan soms wel diverse meters bedragen. In de literatuur staat deze slibdeken bekend als "fluid mud", "sling mud" en "crème de vase". Voorbeelden van estuaria, waarin een dergelijke slibdeken wordt aangetroffen, zijn: de Thames [39], Chao Phya estuarium [40], Gironde [41], Loire [42], Bristol Channel [43] en de Rotterdamse Waterweg [43].

De vorming van deze slibdeken vindt plaats bij doottij, terwijl deze bij springtij weer geheel of gedeeltelijk in suspensie gebracht wordt. Bij hoge rivierafvoer wordt de slibdeken meer zeewaarts aangetroffen, analoog met de plaats van het troebelingsmaximum.

De over een springtij-doottij-cyclus in de Severn voorkomende slibconcentratieprofielen zijn weergegeven in figuur 13. Er is over het algemeen een scherpe afscheiding tussen het oppervlak van de slibdeken en de zich er boven bevindende suspensie met veel lagere concentratie.

Volgens [40] kan de slibdeken op een tweetal wijzen aan het slibtransport deelnemen:

- a. de slibdeken kan gemakkelijk worden geërodeerd
- b. de slibdeken kan zelf verplaatsen.

In [30] bestrijdt Partheniades evenwel de ook in [45] genoemde mogelijkheid dat transport van afgezet slib zou kunnen plaatsvinden ten gevolge van zwaartekracht of stroming. Als reden wordt genoemd dat de slibdeken ook in de meest losse pakking een bepaalde schuifsterkte bezit. Alleen door erosie zou het slib weer in suspensie kunnen gaan. Ook Owen [46] meent dat de slibdeken niet door de getijstroken kan worden getransporteerd. Wel kunnen dichtheidsstromen ontstaan wanneer er voldoende steile bodemhellingen aanwezig zijn, afhankelijk van de dichtheid van het slib-watermengsel, van de orde 1:500 tot 1:100. Hij konkludeert dan ook dat de beweging van de slibdeken eerder een functie is van de topografie van het estuarium dan van de getijstromingen. Dit komt ook overeen met de resultaten van het door Krone in een stroomgoot uitgevoerde onderzoek [15].

Door Kirby en Parker [47] zijn in de Severn evenwel sliblagen bij de bodem waargenomen met concentraties groter dan 15.000 mg/l, die zich met snelheden van 0,30 tot 0,40 m/s voortbewogen. Een voorbeeld van een door hen gepresenteerde meting uit het Europoortgebied is weergegeven in figuur 14. Bij deze meting blijkt van 11.00-17.00 uur een laag van hoge concentratie ($C > 40.000$ mg/l) voorbij te trekken, met een scherpe afscheiding tot het er boven liggende water met relatief lage concentratie (ca. 350 mg/l). Per m' breedte blijkt deze laag in 4 uur bij te dragen aan een transport van minstens 60 ton sediment [47].

Zeer langzame voortbeweging van de slibdeken is ook waargenomen in de Loire. Metingen met een radio-actieve tracer wijzen hier op snelheden van gemiddeld 0,017 m/s [49]. Uit proeven van Nichols et al blijkt dat suspensies van 80.000 mg/l à 160.000 mg/l bij afzetting op een helling groter dan 1:100 in beweging blijven [50]. Aan dergelijke als dichtheidsstromen langs hellingen lopende troebelingsstromen ("turbidity currents") is zowel vanuit de geologische als baggertechnische hoek onderzoek verricht (zie bijv. [51], [52], [53], [54]).

Als groot verschil tussen het gedrag van recent afgezet slib ("fluid mud") en gekonsolideerd slib ("hard mud") wordt in [48] genoemd het feit dat het grensvlak tussen de slibdeken en het bovenliggende water bij voldoende hoge stroomsnelheden instabiel kan worden, terwijl dit bij het gekonsolideerde slib niet het geval is. Dit heeft tot gevolg dat bij watersnelheden groter dan deze kritieke snelheden er menging optreedt tussen de slibdeken en het er bovenliggende water, hetgeen het slib zeer snel in suspensie brengt. Het gekonsoli-

deerde slib erodeert langzaam. Als waarden voor de kritieke snelheid worden genoemd 0,2 tot 1 m/s, afhankelijk van de slibconcentratie in de slibdeken. In [55] wordt evenwel gemeend dat het in suspensie brengen van de slibdeken gebeurt door het direkt in suspensie brengen van deeltjes uit de slibdeken in plaats van door verstoringen van het grensvlak. Op grond van in de Severn gemeten Richardson-getallen konkluderen Parker et al [60] dat de stabiliteit van het grensvlak niet belangrijk beïnvloed wordt door het stabiliserend effect van de dichtheidsgradiënt op de turbulentie, maar veroorzaakt wordt door de tijds- en concentratie-afhankelijke valsnelheden van het sediment.

De rheologische eigenschappen van het zich in hoge concentraties bij de bodem bevindende slib worden veelal bepaald met een viskositeitsmeter [56]. Voor slib uit de Rotterdamse Waterweg zijn in [130] resultaten van viskositeitsbepalingen gegeven voor diverse sedimentconcentraties. Enige resultaten hiervan zijn weergegeven in figuur 15, waaruit een pseudo-plastisch materiaalgedrag volgt. Uit de bij zeer lage snelheden uitgevoerde proeven blijkt geen duidelijke te overwinnen schuifspanning (fig. 16).

Voor het slib uit de Thames wordt in [57] voor de zich als een Bingham-vloeistof gedragende sliblaag als initiële schuifsterkte genoemd:

$$\tau_B \approx 4,3 \cdot 10^{-5} C^{5/2} \text{ (dyne/cm}^2\text{)}, \text{ met } C = \text{concentratie (kg/m}^3\text{)}$$

voor $15 < C < 120 \text{ kg/m}^3$.

In [40] zijn, uitgaande van de resultaten van viskositeitsbepalingen, berekeningen uitgevoerd voor de beweging van een dikke laag slib bij de bodem voor een tweetal gevallen:

- beweging van het slib ten gevolge van een door het bovenliggende water op de sliblaag uitgeoefende schuifspanning
- beweging van het slib ten gevolge van het eigen gewicht; het grensvlak ligt hierbij onder een helling.

In figuur 17b zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven. Een helling van ca. 4 cm/km in de waterspiegel blijkt snelheden van enkele tientallen cm/s in het slib te kunnen opwekken. De hellingen van het grensvlak uit het tweede geval vereisen een grotere steilheid.

Een belangrijke invloed op het gedrag van de sliblaag zullen golven kunnen

hebben. Door de orbitaalbeweging worden bewegingen in de sliblaag opgewekt, waardoor het konsolidatieproces wordt vertraagd en de sliblaag gemakkelijk erodeerbaar blijft (vergelijk fig. 18). De orbitaalbewegingen zullen sterker in de sliblaag doorwerken naarmate:

- de golven sterker zijn
- de waterdiepte geringer is
- de viscositeit van het slib-watermengsel kleiner is.

Gekonkludeerd kan worden dat er met betrekking tot het gedrag van de sliblaag van zeer hoge concentratie bij de bodem nog vele onduidelijkheden bestaan. Wel is duidelijk dat deze slibdeken in het slibtransport een belangrijke rol kan spelen.

ONDERZOEK

In bijlage VII is het onderzoek naar het gedrag van sliblagen met hoge concentraties slibdeeltjes schematisch weergegeven. De volgende aspecten komen hierbij aan de orde:

- Proeven in een stroomgoot met een slibdeken op de bodem zullen inzicht moeten verschaffen in de wijze waarop deze laag met hoge concentratie slibdeeltjes deelneemt aan het transportproces van slib (erosie op grensvlak of transport door horizontale snelheden in sliblaag). Bij deze proeven zal de slibsoort, de slibconcentratie, het zoutgehalte, de laagdikte, de konsolidatietijd en de stroomsnelheid worden gevarieerd. Wat het zoutgehalte betreft zal zowel de invloed van deze waarde in het poriënwater in de slibdeken en die in het water boven de sliblaag worden onderzocht, alsmede de invloed van het verschil in deze zoutgehalten.
- De vorengenoemde proeven zullen ook aan moeten geven of de stabiliteit van het grensvlak tussen de sliblaag en het water een belangrijke bijdrage levert in het transportproces van het slib.
- De proeven met troebelingsstromen betreffen het onderzoek naar dichtheidsstromen met hoge concentraties slibdeeltjes langs diverse bodemhellingen, alsmede het transport van deze lagen wanneer uitsluitend het grensvlak een bepaalde helling bezit. Informatie hierover is voor de praktijk van belang bij het ontwerpen van een slibput [102] en de verspreiding van slib bij dumpen in zee.
- Middels rotoviskometerproeven kunnen de rheologische eigenschappen van slib-watermengsels kwantitatief worden vastgelegd. Deze informatie is nodig bij

beschouwingen over het gedrag van sliblagen van hoge concentraties slibdeeltjes bij de bodem.

- Om de modelproeven te controleren op eventuele schaaleardeffekten wordt het belangrijk geacht de bij deze in het laboratorium uitgevoerde proeven gekonstateerde verschijnselen te vergelijken met in de natuur waargenomen gedrag. Het nauwkeurig meten van bewegingen in de sliblaag bij de bodem is overigens niet eenvoudig.

3.5 Konsolidatie

Men spreekt van konsolidatie wanneer er na bezinking een laag ontstaat waarin de waterspanningen afnemen en de korrelspanningen toenemen. Hierdoor ontstaat een dichtere pakking van het korrelskelet met als gevolg een grotere sterkte en weerstand tegen afschuiving.

Door diverse onderzoekers wordt hierbij een aantal fasen onderscheiden [46]:

- initiële fase (ca. 10 uur): snelle toename van de dichtheid, wegens ontsnappen van water door de ruimten tussen de vlokken
- tweede fase (ca. 500 uur) : langzamer proces van konsolidatie, waarbij water ontsnapt door het bed en door drainagekanalen
- derde fase : zeer langzame konsolidatie.

Omdat in estuaria het konsolidatieproces door diverse oorzaken wordt beïnvloed, als baggeractiviteiten, getijstromingen, sedimentatie en erosie, wordt onderzoek naar het konsolidatiegedrag meestal in een laboratorium uitgevoerd. Dit betreffen dan proeven in een vertikale buis, waarvoor allerlei lengten en diameters worden toegepast. Als voorbeeld zijn enkele gegevens van dergelijke proeven weergegeven in figuur 19, uitgevoerd in een perspexbuis \varnothing 95 mm, waarbij lengten werden toegepast van 0,06 m tot 2,00 m. Ook in deze figuur is een drietal fasen te onderscheiden.

In figuur 19b zijn de hierbij optredende gemiddelde dichtheden uitgezet als functie van de tijd. Proeven met kleinere initiële concentraties lijken uiteindelijk naar ongeveer dezelfde concentraties te gaan als die met grotere beginwaarden. Een dunne laag blijkt sneller te konsolideren dan een dikke laag, omdat het uit te drijven water een minder lange afstand heeft af te leggen. De uiteindelijke dichtheid is evenwel groter naarmate de hoogte groter is. Ook neemt de dichtheid toe met de diepte. Een voorbeeld daarvan is weerge-

geven in figuur 20. Het watergehalte als functie van de diepte blijkt o.a. afhankelijk van de soort kleimineralen en het zoutgehalte van het water [61].

Volgens Migniot [20] verloopt de gemiddelde concentratie in de konsoliderende sliblaag volgens:

$$C = \alpha \log t + \beta \quad (10)$$

waarbij α een koëfficiënt is die met name afhangt van de diameter van de deeltjes en β een koëfficiënt, die verband houdt met de eigenschappen van het water. Voor elke fase in het konsolidatieproces gelden andere waarden voor deze koëfficiënten: zie figuur 21.

Door het Hydraulics Research Station in Wallingford zijn proeven uitgevoerd in buizen van 9,2 m en 1,8 m lengte, overeenkomend met respectievelijk de waterdiepte in de havens in prototype en de maximale diepte van de beschikbare goten [22]. Uit de resultaten van deze proeven blijkt (zie fig. 22) dat de waterdiepte en concentratie niet, maar de dikte van de laag wel van invloed is op de uiteindelijk te bereiken dichtheid.

Na de afzetting van slib treden geochemische processen op, die resulteren in een groot aantal stofomzettingen. Deze processen zijn voor een groot deel van biochemische aard en berusten op de aanwezigheid van organische stof in het sediment. Deze organische stoffen zijn onderhevig aan microbiologische afbraakprocessen, hetgeen gasontwikkeling tot gevolg heeft. De snelheid van deze microbiologische afbraakprocessen, en dus de gasontwikkeling, is afhankelijk van de temperatuur. (N.B.: het konsolidatieproces is zelf ook afhankelijk van de temperatuur). De gasontwikkeling in het slib verstoort het konsolidatieproces. Indien de gasbellen in het slib blijven zitten, dan is dit dankzij de afschuifspanning van het slib. Bij toenemende konsolidatie zal door een moeilijkere ontwijking het gasgehalte in het slib toenemen. Aangezien de schuifspanning van het slib toeneemt met de diepte, zullen in het onderste deel van de sliblaag meer gasbellen blijven dan in het bovenste deel van de sliblaag.

De temperatuur, het gehalte aan organische stof en het zoutgehalte hebben een belangrijke invloed op het konsolidatieproces. In [21] worden deze invloeden als volgt samengevat:

- a. de temperatuur : - direkte invloed namelijk op de viskositeit van het poriënwater:
verhoging → snellere konsolidatie
- indirecte invloed namelijk via de biochemische processen:
verhoging → grotere gasontwikkeling
- b. het organische stofgehalte: - verhoging → grotere gasontwikkeling
- c. het zoutgehalte : - door een toename van het zoutgehalte worden de bakteriële afbraakprocessen geremd:
verhoging → kleinere gasontwikkeling.

Aangezien het de verwachting is, dat de erosiesnelheid afhankelijk is van de schuifsterkte van de gekonsolideerde sliblaag, wordt van het slib deze schuifsterkte bepaald. Veelal wordt hiervoor een rotoviskometer gebruikt, waarbij in het slib een roterend lichaam wordt gebracht en de daarbij opgewekte schuifspanning wordt geregistreerd.

Migniot [58] vond experimenteel voor verschillende soorten natuurlijk slib de relatie:

$$\tau_y = n \cdot C^{4.5} \quad (11)$$

De waarde van n is sterk afhankelijk van de slibsoort en het zoutgehalte van het water. Het kennen van de relatie tussen de schuifspanning en de slibconcentratie voor een bepaalde slibsoort is van belang, omdat het in de praktijk vaak moeilijk is de schuifsterkte vast te stellen, terwijl het bepalen van de dichtheid aanzienlijk eenvoudiger blijkt te zijn, zoals bijvoorbeeld met behulp van een transmissiesonde c.q. backscatteringssonde (nukleaire dichtheidsmeting apparatuur).

N.B.: In tegenstelling tot het boven gestelde volgt uit het onderzoek van Partheniades [30] dat de erosie en erosiesnelheid niet afhankelijk zijn van de dichtheid en schuifsterkte van de afgezette sliblaag. In hoofdstuk 3.6 wordt hier nader op teruggekomen.

ONDERZOEK

In bijlage VIII is het onderzoek naar het konsolidatieproces schematisch

weergegeven. De volgende aspecten komen hierbij aan de orde:

- Konsolidatieproeven worden uitgevoerd in een verticale perspex buis, waarvan de lengte en diameter worden gevarieerd. Het gedrag van het afgezette slib wordt hierin bestudeerd als functie van de tijd. Deze proeven moeten inzicht geven in de wijze waarop de diverse parameters het konsolidatieproces beïnvloeden, zoals het zoutgehalte, de waterdiepte, de concentratie, gesuspenderde deeltjes en de turbulentie in het water.
- Het bestuderen van het konsolidatieproces in prototype is nagenoeg onmogelijk. Wel kan in prototype, bijvoorbeeld middels nukleaire dichtheidsmetingen, de dichtheid van de bodem worden bepaald. Door voor een bepaalde slibsoort de dichtheid te relateren aan andere eigenschappen van het gekonsolideerde slib, kunnen vergelijkingen gemaakt worden tussen het bodemgedrag in model en prototype.

3.6 Erosie

Erosie is het aantasten van de bodem door de waterbeweging en het in beweging raken (in suspensie gaan) van het sediment waaruit die bodem is opgebouwd. Het is een interactie tussen water en bodem, waarbij de afzonderlijke eigenschappen van water en bodem en de verbanden daartussen een rol spelen.

De erosie van de bodem blijkt op diverse wijzen te kunnen plaatsvinden:

- a. het losraken van deeltjes of aggregaten aan het oppervlak van de bodem
- b. het instabiel worden van het grensvlak tussen een zich bij de bodem bevindende sliblaag en het er boven stromende water
- c. het losbreken van grotere gedeelten uit de bodem ten gevolge van het overschrijden van de bodemschuifweerstand.

Onderzoek naar erosie van de bodem heeft zich voornamelijk gericht op niet-kohesieve materialen [62]. Het gedrag hiervan is evenwel geheel verschillend van die van de kohesieve materialen. Voor niet-kohesieve materialen, zoals zand, wordt de weerstand tegen erosie met name bepaald door het gewicht onder water van de afzonderlijke korrels. Voor een bodem, bestaande uit kohesieve materialen, wordt deze weerstand bepaald door de elektrochemische krachten tussen de deeltjes. De erosiesnelheid van een dergelijke bodem is daarom niet alleen afhankelijk van de deeltjesgrootte en de schuifweerstand, maar ook van de mineralogische samenstelling, de chemische eigenschappen van het boven de bodem stromende water en van het poriënwater, de temperatuur en waarschijnlijk

nog vele andere factoren.

De onderzoeken naar erosie waren er meestal op gericht relaties te vinden tussen de erodeerbaarheid van de bodem en enkele parameters voor het stromende water, en de eigenschappen van de bodem. Wat de bodem betreft kan dan gedacht worden aan de schuifweerstand, de plasticiteitsindex, de vloeigrens, de dichtheid, etc.. Deze onderzoeken leidden tot bepaalde empirische relaties voor een bepaalde slibsoort, vaak ook nog afhankelijk van de proefopstelling, maar gaven weinig inzicht in de mechanismen die bij erosie een rol spelen.

De erosiebestendigheid wordt meestal gegeven als de kritieke waarde van een hydraulische parameter (stroomsnelheid, schuifspanning aan de bodem of schuifspanningssnelheid) waarbij een begin van aantasting optreedt. Dergelijke proeven zijn uitgevoerd door Hjulström [63] en Sundborg [64]. Overeenkomstig de presentatie van Postma [38] zijn deze resultaten weergegeven in figuur 23. In deze figuur is ook aangegeven de snelheid, waarbij sedimentatie optreedt. Bij de sedimenten met zeer kleine afmetingen blijkt er een belangrijk verschil tussen de snelheid, waarbij erosie optreedt, en die, waarbij het sediment zich afzet op de bodem. Tevens blijkt er bij de fijne deeltjes van bepaalde afmetingen een grote range van kritieke erosiesnelheden te bestaan, afhankelijk van de mate van consolidatie.

Als voorbeeld van de afhankelijkheid van de erosiesnelheid van de mate van consolidatie en daarmee van het watergehalte zijn in figuur 24 resultaten weergegeven van op slib uit Brits Guiana [31] uitgevoerde erosieproeven. Ook uit de proeven van Southard et al [65] blijkt dat de schuifspanning om erosie te veroorzaken afhangt van het watergehalte. De toename van de erosieweerstand met afnemend watergehalte wordt veroorzaakt door de hierbij optredende toename van de kohesieve bindingskrachten tussen de deeltjes. Aangezien deze krachten sterk afhangen van de mineralogische samenstelling van het sediment, spreekt het vanzelf dat voor elke slibsoort dit verband weer anders is.

In [31] wordt bij dergelijke proeven opgemerkt dat de aldus verkregen kritieke erosiesnelheid niet noodzakelijk gelijk hoeft te zijn aan die welke in de natuur worden gevonden, omdat de turbulentiestructuur en intensiteit in beide gevallen niet gelijk is. Tevens kan de wijze waarop de bodem tot stand is gekomen een belangrijke invloed hebben op de erosiebestendigheid. Bij de genoemde laboratoriumproeven betrof dit een bezinken van deeltjes in stil-

staand water. In werkelijkheid komt de bodem tot stand onder invloed van stromingen en golven, hetgeen tot een bodem met hogere erosieweerstand leidt.

Aangezien de klassifikatiegegevens van de sedimenten, zoals plasticiteitsindex, volgens Raudkivi en Hutchison [67] weinig basisinformatie geven over het slib, verwachten zij alleen een beter inzicht in het erosieproces, wanneer de eigenschappen van het slib worden gedefinieerd in fysisch-chemische begrippen. In dit kader pleiten zij er ook voor te beginnen met experimenten met zuivere mineralen onder goed gedefinieerde omstandigheden. Door Croad [90] worden de resultaten van erosieproeven geïnterpreteerd op basis van de "rate process theory".

Uit het onderzoek van Arulanandan et al [68] blijkt dat de structuur van het afgezette slib en de schuifsterkte bepaald wordt door de kationen adsorptie verhouding SAR (Sodium Adsorption Ratio):

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

en het zoutgehalte van het poriënwater.

De SAR-waarde geeft de verhouding weer van de betreffende ionen in meq/l kationen van lage valentie (Na^{+}) en hoge valentie (Ca^{2+} en Mg^{2+}). De achtergrond hiervan is dat in kleisoorten met hogere valentie-ionen een relatief sterke structuur ontstaat met zeer dunne waterlaagjes. Bij hoge SAR-waarden zullen de afstotende krachten tussen de deeltjes zo groot zijn dat zij een belangrijke zwelling van de klei veroorzaken. Hierdoor is dan een lagere schuifspanning nodig om het kleipakket te eroderen.

Tezamen met de proefopstelling zijn in figuur 25 enige resultaten van het onderzoek weergegeven. Uit figuur 25c blijkt bij een bepaalde bodemschuifspanning een belangrijke invloed van de SAR-waarde op de erosiesnelheid en uit figuur 25d tevens een invloed van het zoutgehalte van het poriënwater, met name bij kleine SAR-waarden. Dat ook het zoutgehalte van het eroderende water een belangrijke invloed heeft op de erosiesnelheid blijkt uit figuur 25e. Wanneer de zoutconcentratie van het eroderende water gelijk aan of groter is dan die van het poriënwater wordt geen erosie verwacht. Wanneer de zoutconcentratie in het eroderende water lager is dan in het poriënwater kan water door

middel van osmose het kleipakket binnentrekken en zwellings veroorzaken en zodoende de erosieweerstand van de klei verminderen.

Bij onderzoek naar de erodeerbaarheid van kohesieve sedimenten wordt in de literatuur meestal onderscheid gemaakt tussen onderzoek op volledig gekonsolideerde materialen en vers afgezet sediment. Hoewel de aan erosie ten grondslag liggende basismechanismen in beide gevallen gelijk zullen zijn, is de aanpak van het onderzoek veelal verschillend [69]. Het merendeel van het onderzoek is uitgevoerd op volledig gekonsolideerd materiaal in verband met de stabiliteit van kanalen en vaarwegen. Diverse apparaten zijn hierbij ontwikkeld om in het laboratorium de kritieke schuifspanning te meten en deze te korreleren met gemakkelijk meetbare eigenschappen van het sediment. Zo vonden bijvoorbeeld Smerdon en Beasley [70]:

$$\tau_c = 0,0034 (PI)^{0,84}$$

met: τ_c = kritieke schuifspanning (psf)

PI = plasticiteitsindex.

Door Dunn [71] werden erosieproeven uitgevoerd, waarbij de eroderende kracht werd opgewekt door een waterstraal. Voor PI-waarden van 10 à 20 hoorden schuifspanningen van 17 à 24 Pa, terwijl volgens de formule van Smerdon en Beasley hierbij waarden van 1 à 2 Pa horen. Voor een verder overzicht van op gekonsolideerde klei uitgevoerd onderzoek wordt verwezen naar [72].

Het onderzoek naar vers afgezet slib is er meestal op gericht meer greep te krijgen op de mechanismen die een rol spelen bij de interactie tussen het water en de slibdeeltjes, om zo te komen tot de voor erosie relevante parameters van het slib en het water [69].

Krone [15] bestudeerde erosie van vers afgezet slib in een stroomgoot met recirculatie. De stroomsnelheid werd hierbij stapsgewijs opgevoerd en de concentratie gesuspendeerde deeltjes gemeten (zie fig. 26). Uit de proeven blijkt dat de erosiesnelheid afneemt met de tijd, hetgeen Krone toeschrijft aan de toenemende concentratie van gesuspendeerde deeltjes. Deze hogere concentratie zou de sedimentatie vergroten en daardoor de netto erosie verkleinen. Proeven van Partheniades [29] op dezelfde slibsoort geven ook een afname van de erosiesnelheid in de tijd te zien, zowel geleidelijk als abrupt (zie

fig. 27). Door het troebele water te vervangen door schoon water toont hij aan dat de erosiesnelheid onafhankelijk is van de concentratie van het gesuspendeerde slib. Veranderingen in de erosiesnelheid worden door Partheniades toegeschreven aan veranderingen in bodemgeometrie ten gevolge van erosie, veranderingen in oppervlak bodem door afzetting van zand, cementatie ten gevolge van ijzeroxiden, of niet-uniforme eigenschappen van de bodem als functie van de diepte. Uit figuur 28 blijkt dat de erosiesnelheid sterk afhangt van de bodemschuifspanning na overschrijden van een bepaalde drempelwaarde. De bodem bij serie II in deze figuur had een iets lagere sterkte en een iets hoger watergehalte dan de bodem bij serie I. De hogere erosieweerstand wordt toegeschreven aan ijzeroxide in het water bij serie II, dat het oppervlak van de bodem beïnvloedt.

Uit het onderzoek van Krone bleek dat de structuur van de bodem afhangt van de wijze van afzetting en de tijd, die sinds de afzetting is verlopen. Een in stromend water gevormde bodem heeft meer weerstand tegen erosie dan die, welke in stilstaand water is gevormd. De veranderingen in de tijd zijn het sterkst in de beginperiode na afzetting. Dit stemt overeen met o.a. door Terwindt en Breusers uitgevoerde proeven [73] (zie fig. 29).

De erosieproeven van Partheniades [29] hadden als belangrijkste doel de invloed van de schuifsterkte van het bodemmateriaal op de erosie te onderzoeken. Bij een faktor 100 in schuifsterkte bleek de kritieke schuifspanning, waarbij erosie optreedt, van dezelfde orde van grootte te zijn, terwijl bij een bepaalde bodemschuifspanning ook de erosiesnelheden ongeveer gelijk waren. Gekonkludeerd werd dat de erosieweerstand van een bodem konstant is en niet beïnvloed wordt door de schuifsterkte van het materiaal. Dat de erosieweerstand niet afhankelijk is van de konsolidatiegraad heeft vanzelfsprekend als voorwaarde dat de door de stroming opgewekte schuifspanning kleiner blijft dan de schuifsterkte van het bodemmateriaal.

Opvallend bij de proeven van Partheniades is dat door de erosie in de bodem een smalle, rechte en relatief diepe groef ontstaat, iets buiten het midden van de goot. Hij verklaart dit uit de plaats van maximale turbulentie, ten gevolge van bij de wanden van de goot opgewekte secundaire stromingen. Over bodemvormen ten gevolge van erosie van kohesieve sedimenten is in de literatuur nog weinig bekend. Uit een beperkt aantal door Allen uitgevoerde experimenten [74] blijkt bij toename van de gemiddelde stroomsnelheid de bodem de

volgende verschijnselen vertoont:

1. longitudinale rechte groeven
2. longitudinale meanderende groeven
3. opengeploegde kuilen
4. erosie-ribbels in dwarsrichting.

Deze bodemvormen zijn weergegeven in figuur 30.

In Wallingford worden proeven uitgevoerd in een recirculatiegoot, breed 0,30 m en diep 0,20 m [76]. Het aanbrengen van de bodem vindt plaats middels een 2 m hoge bezinktank, die op de goot geplaatst wordt en na de vorming van de bodem, ca. 5 cm hoog, wordt verwijderd (zie fig. 31). De meetsectie is 7,50 m lang, terwijl de totale lengte 17,40 m is. Voor de drie onderzochte slibsoorten blijkt de dichtheid van de aldus gevormde bodem te verlopen als aangegeven in figuur 32a. Bij een bepaalde bodemschuifspanning zal tot een bepaalde diepte erosie optreden (fig. 36b). De bij deze diepte horende dichtheid is in figuur 32c uitgezet tegen de bijbehorende bodemschuifspanning.

Door Migniot [58] is voor vers afgezet slib de volgende relatie opgesteld tussen de kritieke schuifspanningssnelheid en de schuifweerstand τ_y van het bodemmateriaal:

$$\begin{aligned} U_{*c} &= 0,018 \tau_y^{\frac{1}{4}} \text{ voor } \tau_y < 1,5 \text{ Pa} \\ U_{*c} &= 0,016 \tau_y^{\frac{1}{2}} \text{ voor } \tau_y > 1,5 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (12)$$

Lambermont en Lebon [77] breiden deze formules uit door ook de variatie van de dichtheid over de diepte er in te betrekken.

De erosiesnelheid als functie van de optredende bodemschuifspanning is volgens Partheniades [29] en Cormault [78] te schrijven als:

$$\frac{dm}{dt} = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) \quad (13)$$

met: M = konstante (= erosiesnelheid bij $\tau_b = 2\tau_e$)

τ_e = kritieke schuifspanning voor erosie.

Enige waarden: Thames slib : $M = 1,7 \text{ g/m}^2/\text{s}$ [79]

Gironde slib: $M = 0,2 \text{ g/m}^2/\text{s}$ [78].

Een belangrijke rol bij het opwervelen van sediment speelt het zogenaamde "bursting process" ([80], [81]). Deze uitbarstingen van wervels bij de bodem leiden tot een intermitterend karakter van de turbulente stroming, waarbij piekwaarden in de turbulente schuifspanningen worden gemeten die 10 à 30 maal zo groot zijn als de gemiddelde turbulente schuifspanning ([82]). Aan de studie naar het bursting-process is de laatste jaren veel aandacht besteed (zie bijvoorbeeld [83] en [84]). Een dergelijke kortstondige en plaatselijke verhoging van de intensiteit van de turbulentie kan een grote hoeveelheid slib in suspensie brengen, maar ook grotere deeltjes, die normaal over de bodem worden getransporteerd.

Behalve de in dit hoofdstuk genoemde fysische en fysisch-chemische processen kunnen ook biologische processen een belangrijke bijdrage leveren aan de erosie van afgezet slib. Diverse organismen kunnen het afgezette sediment omroeren, doorgraven of op andere wijze verstoren (zie bijv. [85]).

Gekonkludeerd kan worden dat er nog vele onduidelijkheden bestaan over de mechanismen die aan het erosieproces ten grondslag liggen, en dat er nog weinig algemeen geldige regels bestaan die de erosie van een willekeurig kohesief sediment kunnen beschrijven. Voor het met behulp van een wiskundig model beschrijven van de slibverschijnselen is het beschikken over een goede erosieformulering van groot belang.

ONDERZOEK

In bijlage IX is het onderzoek naar erosieverschijnselen schematisch weergegeven. De volgende aspecten komen hierin aan de orde:

- Erosieproeven zullen worden uitgevoerd in dezelfde faciliteit als de sedimentatieproeven (zie hfdst. 3.3). Bij deze in een stroomgoot en/of carousel uit te voeren proeven zullen de stroomsnelheden, de slibsoort, het zoutgehalte, de konsolidatietijd en de laagdikte bij een bepaalde konsolidatietijd, alsmede de concentratie gesuspendeerde deeltjes worden gevarieerd. Ook zal de invloed van de wijze waarop de bodem is gevormd worden onderzocht (vergelijk verschil in erosieweerstand tussen in stilstaand water en in stromend water gevormde bodem). Het visueel volgen van het erosieproces wordt belangrijk geacht om vast te stellen op welke wijze de erosie plaatsvindt (bijv. losraken deeltjes of grotere stukken).
- Nadat inzicht is verkregen hoe het erosieproces van de diverse parameters

afhangt zal een erosiefunctie moeten worden opgesteld, die als invoer nodig is in de wiskundige modellen.

- Een vergelijking tussen de resultaten van de erosieproeven en in de natuur optredende erosiesnelheden wordt van groot belang geacht. Het is in de natuur evenwel zeer moeilijk om erosiesnelheden te meten. Wel kunnen in de natuur gestoken ongeroerde bodemonsters in de goot worden beproefd, en de aldus verkregen erosiesnelheden worden vergeleken met die van in de goot gevormde bodems.
- Behalve op Nederlandse slibsoorten c.q. in de getijgoot toe te passen slibsoorten lijkt het nuttig proeven uit te voeren met enkele zuivere kleimineralen. Behalve dat dan meer inzicht verkregen wordt over de invloed van bepaalde kleimineralen op het erosieproces mag een meer gelijkmatige opbouw van de bodem verwacht worden. Dergelijke proeven kunnen door hun simpeler gedrag sterk bijdragen aan het verkrijgen van het noodzakelijke inzicht in het erosieproces. Overigens zullen ook bij pure klei zich eerst de grootste vlokken afzetten, hetgeen een zekere stratifikatie van de bodem tot gevolg heeft. Dat dit de erosie als functie van de tijd belangrijk kan beïnvloeden blijkt wel uit figuur 33.
- Proeven met ruwheidselementen zullen moeten aangeven hoe deze het erosieproces beïnvloeden. Inzicht hierin is nodig wanneer in de getijgoot proeven met ruwheidselementen worden uitgevoerd (zie hfdst. 6).
- Omdat in de literatuur niet precies bekend is welke eigenschappen van de bodem het meest dominant zijn in het erosieproces, zullen van de te eroderen bodem de eigenschappen nauwkeurig moeten worden vastgelegd. Dit betreffen zowel parameters als schuifsterkte, plasticiteitsindex, vloeigrens en dichtheid, als de fysisch-chemische eigenschappen van het slib: kationen adsorptie verhouding, mineralogische samenstelling, etc..
- Informatie over de invloed van biologische processen op de erosieverschijnselen, zoals het verstoren van de afgezette sedimentlaag door bepaalde organismen, zal vanuit de biologische hoek moeten komen. Ook de invloed van mogelijke gasontwikkeling in afgezet slib zal in de beschouwingen moeten worden betrokken.

3.7 Transport

Het horizontale transport van slib vindt plaats als met de stroming meebewegende gesuspenderde deeltjes of als een zich langs de bodem voortbewegende sliblaag met hoge concentratie slibdeeltjes. Voor het laatstgenoemde proces wordt verwezen naar hoofdstuk 3.4. In dit hoofdstuk zal de aandacht gericht zijn op het suspensietransport.

Het horizontale transport van gesuspenderde deeltjes per eenheid van breedte is gelijk aan het produkt van de snelheid en de slibconcentratie, geïntegreerd over de totale waterdiepte:

$$q_s = \int_0^h u(z) C(z) dz \quad (34)$$

Voor deze berekening zullen dus de verticale snelheids- en concentratieverdeling bekend moeten zijn (vergelijk fig. 48).

In een permanente stromingssituatie wordt de verdeling van het sediment over de vertikaal bepaald door de valsnelheid w_s van de deeltjes en het diffusieve transport tengevolge van de turbulentie. In een evenwichtssituatie geldt:

$$w_s \cdot C + \epsilon_s \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (35)$$

waarbij ϵ_s de turbulente diffusiecoëfficiënt is voor de sedimentdeeltjes [104]. Veelal wordt gesteld:

$$\epsilon_s = \beta \cdot \epsilon_m, \quad (36)$$

waarbij ϵ_m de uitwisselingscoëfficiënt is voor impuls. Voor fijne deeltjes is de konstante β gelijk aan 1.

Om de diffusievergelijking (35) op te lossen moet ϵ_s bekend zijn als functie van de plaats. Overeenkomstig de Boussinesq-benadering is de turbulente schuifspanning te schrijven als

$$\tau_y = \rho \overline{u'v'} = \rho \epsilon_m \frac{du}{dz} \quad (37)$$

In een permanente, eenparige en tweedimensionale stroming in het verticale vlak geldt:

$$\tau_z = \tau_b \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (38)$$

Uitgaande van de mengweglengtetheorie van Prandtl met

$$u' = l_m \frac{du}{dz} \quad (39)$$

$$v' = l_m \frac{dv}{dz},$$

waarbij de mengweglengte l_m een maat is voor de gemiddelde afstand waarover de deeltjes zich bewegen ten opzichte van de gemiddelde stroom, geldt dan:

$$\tau_z = \rho l_m^2 \frac{du}{dz} \left| \frac{du}{dz} \right| \quad (40)$$

$$, \text{ zodat } \epsilon_m = l_m^2 \left| \frac{du}{dz} \right| \quad (41)$$

Met $l_m = \kappa \cdot z \cdot \sqrt{1 - \frac{z}{h}}$ ontstaat de bekende logaritmische snelheidsverdeling (vgl. [105]):

$$\boxed{\frac{u - u_{\max}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{h}} \quad , \quad (42)$$

met $u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$ = schuifspanningssnelheid

en $\kappa = 0,4$ = Von Kármán konstante.

u_{\max} = snelheid aan oppervlak
 h = waterdiepte

Voor de turbulente uitwisselingscoëfficiënt geldt dan:

$$\epsilon_m = \kappa u_* \left(1 - \frac{z}{h}\right) z \quad (43)$$

Integratie van de diffusievergelijking (35) met deze uitwisselingscoëfficiënt geeft de volgende concentratieverdeling [106]:

$$\frac{C}{C_a} \left[\frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right]^Z \quad (44)$$

$$, \text{ met } Z = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad (45)$$

C_a = concentratie op hoogte $z = a$

Het probleem bij toepassing van deze vergelijking is dat de concentratie C_a op $z = a$ bekend moet zijn. Bij zandtransporten wordt veelal geprobeerd deze af te leiden uit bodemtransportformules (zie bijv. [108]). Vergelijking (44) geeft een concentratie van nul bij het oppervlak en een oneindige concentratie bij de bodem, hetgeen niet realistisch is. Verder blijkt uit vergelijking (44) dat naarmate Z kleiner is de concentratie meer homogeen verdeeld is over de vertikaal (vgl. fig. 49).

Enige waarden:

$$h = 10,00 \text{ m}; \quad u = 1 \text{ m/s}; \quad u_* = 0,05 \text{ m/s}$$

$$\text{zanddeeltje } d_{50} = 200 \text{ } \mu\text{m}; \quad w_s = 35 \text{ mm/s} \rightarrow Z \approx 1,75$$

$$\text{slibdeeltje } w_s = 0,7 \text{ mm/s} \rightarrow Z \approx \frac{1}{29}$$

Sinds de dertiger jaren, waarin vergelijking (44) werd gepresenteerd, zijn door verschillende onderzoekers aanvullingen gepresenteerd. Zo hield Hunt [108] in de afleiding ook rekening met het door het sediment ingenomen volume. In plaats van vergelijking (35) ontstaat dan de diffusievergelijking:

$$(1 - C) C w_s + \epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (46)$$

die voor $C \ll 1$ weer overgaat in vergelijking (35), hetgeen bij de bodem niet het geval is. Voor een overzicht van deze aanvullingen wordt verwezen naar [109].

Uit proeven van Coleman en Anderson [127] bleek dat een betere benadering kon worden verkregen met een turbulente uitwisselingscoëfficiënt ϵ_s , die parabolisch verloopt voor $\frac{z}{h} < 0,5$ en konstant is voor $\frac{z}{h} > 0,5$. De concentratie behoeft dan ook niet meer nul te zijn aan het wateroppervlak.

Door het Waterloopkundig Laboratorium wordt veelal uitgegaan van [128]:

$$\frac{z}{h} < 0,5 : \varepsilon_s(z) = 4 \cdot \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \varepsilon_{s,\max} \quad (47a)$$

$$\frac{z}{h} > 0,5 : \varepsilon_s(z) = \left[\alpha_1 + \alpha_1 \left(\frac{w_s}{u_*} \right)^{\alpha_3} \right] u_* h, \quad (47b)$$

met $\alpha_1 = 0,13$,	$\alpha_2 = 0,20$,	$\alpha_3 = 2,12$	voor rivieren
$\alpha_1 = 0,1$,	$\alpha_2 = 0,38$,	$\alpha_3 = 4,01$	voor gootproeven.

De volgende concentratieverdelingen worden dan verkregen (vgl. fig. 49):

$$\frac{z}{h} < 0,5 : \frac{C}{C_a} = \left[\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right]^{Z'} \quad (48a)$$

$$\frac{z}{h} > 0,5 : \frac{C}{C_a} = \left[\frac{a}{a-h} \right]^{Z'} \cdot e^{-4Z' \left(\frac{z}{h} - 0,5 \right)} \quad (48b)$$

$$, \text{ met } Z' = \frac{h \cdot w_s}{4 \varepsilon_{s,\max}} \quad (49)$$

Door diverse onderzoekers zijn metingen in de natuur en in goten uitgevoerd om de vorengenoemde relaties te verifiëren (zie bijvoorbeeld [110]). Uit dergelijk onderzoek bleek o.a.:

a. De concentratieverdeling vertoonde een goede overeenkomst met de exponentiële verdeling, als opgegeven door (44). De bij de proeven optredende waarde van Z bleek evenwel vaak belangrijk af te wijken van de theoretische waarde volgens formule (45), met name bij grote waarden van Z . (zie fig. 50). Als belangrijke oorzaken worden genoemd de invloed van grote concentraties bij de bodem en veranderingen in de uitwisselingscoëfficiënten tengevolge van de gesuspendeerde deeltjes ([113], [114]).

b. De aanwezigheid van sediment blijkt van invloed op de snelheidsverdeling (zie fig. 51a). De achtergrond hiervan is dat het zwevende sediment de turbulentie dempt. In de beschrijving van het snelheidsprofiel kan dit tot uitdrukking worden gebracht in een variabele κ -waarde (vgl. fig. 51b), waar κ is uitgezet als functie van dat deel van de wrijvingsenergie die gebruikt wordt om de vallende deeltjes in suspensie te houden). Coleman

[114] pleit voor het konstant houden van κ en brengt de invloed van het gesuspendeerde sediment op de snelheidsverdeling op andere wijze in rekening. De demping van de turbulentie betekent vanzelfsprekend een reductie in de mengweglengte l_m .

c. De hydraulische weerstand van de waterloop kan beïnvloed worden door de hoeveelheid gesuspendeerde deeltjes (vgl. [113]).

Het vorengenoemde onderzoek is uitgevoerd op verschillende zandsorten. Bij soortgelijke proeven met slib zal het flokkulatieproces een komplicerende faktor zijn, omdat de valsnelheid dan niet meer konstant is, maar een functie van de omstandigheden en voorgeschiedenis. Het onderzoek naar flokkulatie en valsnelheid (zie hoofdstuk 3.1 en 3.2) is er op gericht hierin meer inzicht te verkrijgen. Aangezien bovendien door de kleine valsnelheid het gesuspendeerde slib redelijk homogeen over de vertikaal verdeeld is, bestaat over soortgelijk onderzoek met slib in de litteratuur weinig gegevens. In fig. 52 zijn enkele resultaten gegeven van proeven met slib in een carousel, waar de snelheid over het grootste gedeelte van de vertikaal vrijwel konstant is (fig. 52a). In fig. 52b wordt een vergelijking gemaakt tussen de op een drietal plaatsen gemeten concentraties en het theoretisch verloop bij een konstante ϵ_s voor de situatie van $C = C_{eq}$ (zie hoofdstuk 3.3 voor definiering C_{eq}). Uit de in fig. 52 opgenomen tabel blijkt een afhankelijkheid van w_s/ϵ van de bodemschuifspanning en de concentratie slibdeeltjes op het tijdstip $t = 0$.

Door Gust zijn proeven met een kleisuspensie uitgevoerd in een recht gootje met afmetingen $4,00 \times 0,108 \times 0,14 \text{ m}^3$ [116]. Zoals te zien in fig. 53a geven de proeven met slib een duidelijk ander snelheidsprofiel bij de bodem dan proeven met schoon water en zandkorrels. De vergroting van de viskeuze grenslaag heeft een aanzienlijk lagere weerstandskoefficiënt tot gevolg (fig. 53b). Als een van de mogelijke mechanismen die hierbij een rol spelen wordt de opbouw en afbraak van vlokken kleideeltjes genoemd [117].

De in dit hoofdstuk genoemde theorieën hebben betrekking op een permanente, eenparige en tweedimensionale stroming. Het getijgootonderzoek richt zich evenwel op situaties met getijwerking en invloed van dichtheidsverschillen tengevolge van variaties in het zoutgehalte. Hierdoor ontstaan dichtheidsstromen die vaak van overheersend belang blijken te zijn voor het slibtransport in

een estuarium (zie hoofdstuk 2 uit slibnota nr. 1 [8]). Een varierend zoutgehalte in de vertikaal heeft een belangrijke invloed op de turbulente uitwisselingsprocessen en daarmee op de verticale concentratieverdeling van het slib. Voor een overzicht van de invloed van gelaagdheid op de verticale uitwisselingsprocessen wordt verwezen naar [118].

In hoofdstuk 2 uit slibnota nr. 1 [3] is van dergelijke getijstudies een kwalitatief beeld geschetst. Als functie van de tijd kunnen de snelheids- en concentratieprofielen sterk variëren (vergelijk fig. 54). Een stationaire situatie zal hier nooit of zelden worden bereikt. Bovendien zal van de bodem losgekomen slib enige tijd nodig hebben om zich over de vertikaal te verspreiden. Voor fijne sedimenten ($d_{50} = 38 \mu\text{m}$; $\bar{w}_s = 0,74 \text{ mm/s}$) wordt in [119] uit metingen in de Noordzee bij Texel een opwaartse verspreidingssnelheid van 2 mm/s genoemd, zodat bij een waterdiepte van 10 m een bij de bodem gevormde wolk van fijn sediment 80 minuten nodig heeft om het oppervlak te bereiken. In deze tijd heeft het snelheidsprofiel zich reeds weer gewijzigd en een evenwichtssituatie wordt dus niet bereikt.

Is de vorm van de concentratieverdeling een gevolg van de verticale uitwisselingsprocessen en de valsnelheid van de slibdeeltjes, voor de werkelijke hoeveelheid in suspensie zijnde slibdeeltjes zijn de uitwisselingsprocessen met de bodem bepalend (erosie en sedimentatie). Het totale slibtransport wordt dan ook voornamelijk door deze processen bepaald. Voor het onderzoek naar deze processen wordt verwezen naar de betreffende hoofdstukken.

Behalve door het verticale transport kan de concentratieverdeling in de vertikaal soms ook belangrijk worden beïnvloed door het horizontaal advektieve transport. Fig. 55 geeft hiervan een voorbeeld uit het Mersey-estuarium. De concentratie slibdeeltjes wordt op een drietal diepten bepaald als functie van de tijd. De eerste piek betreft plaatselijk geërodeerd slib, terwijl de grotere piek betrekking heeft op materiaal uit het bovenstroomse gedeelte. De erosie vindt met name plaats in het bovenstroomse gedeelte van het estuarium, terwijl het meetpunt zich bevindt in de Narrows. Dit verklaart ook waarom de tweede piek eerder bereikt wordt naarmate het meetpunt zich dichterbij het oppervlak bevindt. Het advektief transport kan dominant zijn wanneer ter plaatse een beperkte hoeveelheid te eroderen slib beschikbaar is. Dit kan er toe leiden dat er concentratieverdelingen ontstaan met de kleinste concentra-

tie aan de bodem en de grootste nabij het oppervlak (zie fig. 55b op 2,5 uur na hoog water).

Bij het onderzoek naar het transport van slib in getijwateren zullen de voor dergelijke situaties kenmerkende verschijnselen aan de orde komen. Het fijne sediment reageert met een zekere vertraging op veranderingen in de stroomsnelheid, omdat bij afnemende snelheid de deeltjes tijd nodig hebben om de bodem te bereiken en omgekeerd bij toenemende snelheid om zich over de doorsnede te verspreiden. Ook de asymmetrie in het verloop van de snelheid van de waterdeeltjes in een getijsituatie en het verschil tussen kritieke erosie- en sedimentatiesnelheden kunnen een belangrijke rol spelen bij de slibverschijnselen in een estuarium. Karakteristiek voor dergelijke situaties is ook het optreden van een zgn. troebelingsmaximum. Voor een overzicht van dergelijke verschijnselen zij verwezen naar [38].

Gekonkludeerd kan worden dat er in de litteratuur veel onderzoek is gepresenteerd met betrekking tot het transport van zand in permanente, eenparige tweedimensionale stromingen, maar dat voor het transport van slib in getijsituaties er nog vele onduidelijkheden bestaan. Met name is er behoefte aan gedetailleerde metingen van het verloop van de snelheid en concentratie gesuspendeerde slibdeeltjes over de doorsnede. Bij de interpretatie van dergelijke metingen zal beschikt moeten kunnen worden over een wiskundig model, waarin de uitwisselingsprocessen in de vertikaal juist kunnen worden gesimuleerd. Hierbij wordt gedacht aan het model DISTRO, uitgebreid met slib (vergelijk hoofdstuk 7 uit slibnota nr. 3). In het huidige DISTRO-model (2d-vertikaal), waarmee de zout- en snelheidsverdeling kan worden berekend, wordt de turbulentie, analoog aan formule (41), beschreven met een mengweglengte-benadering. De damping van de turbulentie door dichtheidsverschillen wordt in rekening gebracht door de turbulente uitwisselingscoëfficiënten door impuls en massa te vermenigvuldigen met een dempingsfaktor, die weer een funktie is van het Richardsongetal Ri :

$$\text{impuls: } E_m = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| F(Ri) \quad (50)$$

$$\text{massa : } E_z = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| G(Ri) \quad (51)$$

$$, \text{met } Ri = - \frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (52)$$

Een onderwerp van studie bij de ontwikkeling van dit model is de vraag in hoeverre met deze mengweglengte-benadering met empirische dempingsfuncties goede voorspellingen voor de snelheids- en zoutverdeling mogelijk zijn, dan wel dat hogere orde turbulentiemodelleringen zullen moeten worden ingebouwd (bijv. k-ε model, vergelijk [122]). Het onderzoek naar de verticale uitwisselingsprocessen in stromingssituaties met getijwerking en dichtheidsverschillen vormt een onderdeel van het getijgootonderzoek (zie [2]).

Het resulterend transport van gesuspendeerde deeltjes in een estuarium wordt sterk beïnvloed door de in het estuarium optredende reststromen [123]. Behalve door de reeds genoemde dichtheidsverschillen worden deze veroorzaakt door wind en de interactie van de getijbeweging met de topografie van de bodem en de oevers [124].

In het kader van het toegepast onderzoek voor de waterstaat, stromen en transportverschijnselen TOW-B [125] wordt hier onderzoek naar verricht. Ook in rechte goten kunnen de optredende sekundaire stromingen een belangrijke invloed hebben op de verdeling van het gesuspendeerde sediment [126].

ONDERZOEK

In bijlage X is het onderzoek naar het transport van gesuspendeerde slibdeeltjes schematisch weergegeven. De volgende aspecten komen hierbij aan de orde:

- Natuurmetingen in getijwateren, waarbij nauwkeurig het verloop van de concentratie en de snelheid als functie van de plaats en de tijd worden geregistreerd, zullen een belangrijke bijdrage moeten leveren bij het verkrijgen van meer inzicht in het transport van gesuspendeerde slibdeeltjes. Het is daarbij met name ook van belang de metingen tot vlak bij de bodem uit te voeren en de valsnelheden van de slibvlokken ter plaatse vast te stellen, terwijl het bovendien aanbeveling verdient om ook de turbulente fluktuaties te meten.
- Proeven in de getijgoot zullen moeten aangeven op welke wijze het suspensie-transport beïnvloed wordt door de diverse in deze proefinstelling in te stellen invloedsgrontheden (vgl. hoofdstuk 6).

- Om de resultaten van natuurmetingen en/of getijgootproeven te interpreteren en meer inzicht te verkrijgen in de processen, die van belang zijn bij het suspensietransport, dient beschikt te worden over een rekenmodel, waarmee de verticale uitwisselingsprocessen goed kunnen worden beschreven. Het wiskundig model DISTRO, uitgebreid met slib, lijkt hiervoor het aangewezen model.
- Voor de beschrijving van het suspensietransport in een estuarium is een grondige kennis vereist van de verticale uitwisselingsprocessen in situaties met dichtheidsverschillen en van de uitwisselingsprocessen met de bodem. De eerstgenoemde processen vormen een gedeelte van het getijgootonderzoek als omschreven bij projekt nr. PB12 en PB13 in verslag M 896-40, terwijl de laatstgenoemde onderdeel zijn van de in hoofdstuk 3.3 t/m 3.6 beschreven onderzoeken.
- Reststromen spelen een belangrijke rol in het suspensietransport van slib in estuaria. In TOW-B kader wordt onderzoek verricht naar reststromen. Nagegaan zou kunnen worden of ten behoeve van het slibonderzoek aan een aantal aspecten nog nadere aandacht besteed dient te worden.

4 Prototypemetingen

Aangezien er bij het nabootsen van de sedimentbeweging onder invloed van dichtheidsstromen in hydraulische modellen allerlei schaaleffekten kunnen optreden, dient bij het slibonderzoek de uitvoering en interpretatie van buitenmetingen een belangrijke plaats in te nemen. Wel dient er hierbij rekening mee gehouden te worden dat door variatie van de randvoorwaarden nooit een stationaire situatie zal worden bereikt (zie ook hfdst. 6).

Bij deze metingen valt zowel te denken aan het interpreteren van reeds uitgevoerde metingen als aan het opzetten van metingen, gericht op het onderzoek naar speciale verschijnselen.

Het spreekt vanzelf dat het beschikken over goede meettechnieken bij een buitenmeting een eerste vereiste is. Voldoende gedetailleerde profielen van snelheid, zoutgehalte en concentratie gesuspendeerde deeltjes zullen bepaald moeten worden tot vlak bij de bodem. Ook de temperatuur en de "omstandigheden" zullen nauwkeurig moeten worden vastgelegd. De processen vlak bij de bodem zijn vooral van belang, omdat zich hier de hoogste concentraties aan deeltjes bevinden en daardoor van grote invloed zijn op de optredende sedimenttransporten. Het zijn evenwel juist de uitwisselingsprocessen bij de bodem (afzetting en erosie), waarover nog vele onduidelijkheden bestaan. Bij een buitenmeting zullen ook de fysisch-chemische eigenschappen van het sediment moeten worden vastgelegd.

Tussen het uitvoeren c.q. interpreteren van buitenmetingen en het fundamentele onderzoek naar de mechanismen bij slibtransport dient een voortdurende samenwerking te bestaan. Naarmate meer inzicht in de mechanismen bestaat zal een buitenmeting beter kunnen worden voorbereid. Anderzijds kan vanuit de resultaten van buitenmetingen worden aangegeven welke aspecten bij het slibtransport dominant zijn en nader worden onderzocht. Immers de praktijkproblemen in de Nederlandse getijwateren op het gebied van sedimentatie en waterkwaliteit zijn uitgangspunt bij het getijgootonderzoek naar de transportmechanismen van slib. Ook zal door vergelijking van meetgegevens uit de natuur en uit het hydraulisch modelonderzoek meer inzicht verkregen kunnen worden in de invloed van bepaalde schaaleffekten.

Een buitenmeting kan ook worden opgevat als een onderzoekmiddel (schaal 1:1 proef)

voordeel: - geen schaaleardeffekten

nadeel : - randvoorwaarden niet eenvoudig te variëren

- vele processen spelen gelijktijdig en beïnvloeden elkaar
- geen stationaire situatie
- nauwkeurig meten is niet eenvoudig.

Enige vragen, waarop middels een buitenmeting een antwoord gezocht kan worden zijn:

- ontstaat sediment in suspensie uit ter plaatse opgewerveld materiaal of wordt dit aangevoerd?
- hoe reageren slibverschijnselen op een hogere bovenafvoer?
- hoe reageren slibverschijnselen op een kleinere getijwerking?
- welke mechanismen treden op bij de aanslibbing van havens?
- hoe gedraagt zich in de rivier teruggestorte baggerspecie?

Prototypemetingen zullen ook gebruikt worden om wiskundige modellen te toetsen. Gezien de complexiteit van de systemen in de natuur en het niet bereiken van een stationaire situatie als gevolg van de voortdurend variërende randvoorwaarden en de diverse tijdschalen die hierbij spelen, zal een toetsing van de wiskundige modellen evenwel in eerste instantie moeten komen van de in de getijgoot uit te voeren proeven met slib (zie hfdst. 6).

Om inzicht te verkrijgen in de in een estuarium optredende slibverschijnselen is het van belang de herkomst van het materiaal te kennen. Door het uitvoeren van een nauwkeurige sedimentbalans kan dit worden vastgesteld. Het verkrijgen van de hierbij benodigde nauwkeurigheid vereist evenwel een zeer grote inspanning.

ONDERZOEK

In bijlage II is de plaats van prototypemetingen binnen het in getijgootkader uit te voeren slibonderzoek schematisch weergegeven. In bijlage XI is dit verder uitgewerkt. Hierin komen de volgende onderwerpen aan de orde:

- Voor bepaalde doeleinden zijn reeds vele natuurmetingen verricht met betrekking tot slib. Een inventarisatie zou gemaakt kunnen worden van metingen, die een bijdrage kunnen leveren aan het slibonderzoek. Eventueel kunnen deze

resultaten opnieuw bewerkt en geïnterpreteerd worden.

- Bij de diverse onderdelen uit hoofdstuk 3 is reeds aangegeven hoe natuurmetingen een belangrijke bijdrage dienen te leveren aan het inzicht in de diverse bij slibverschijnselen optredende fysische en fysisch-chemische processen (vgl. bepaling valsnelheden in [25]).
- Omdat bij het simuleren van slibverschijnselen in de getijgoot allerlei schaaleffekten kunnen optreden dienen prototypemetingen te worden uitgevoerd om na te gaan of het in de getijgoot waargenomen slibgedrag overeenstemt met dat uit de natuur.
- Een nauwkeurig uitgevoerde buitenmeting kan een belangrijke bijdrage leveren in het slibgedrag ten gevolge van bepaalde invloedsgrootheden (bijv. invloed haven [87], [88]).
- Hoewel toetsingsmateriaal voor de wiskundige modellen in eerste instantie van getijgootproeven zal moeten komen, zullen vergelijkingen met prototypegegevens moeten aangeven met welke betrouwbaarheid de ontwikkelde numerieke modellen in de praktijk kunnen worden toegepast.

5 Wiskundige modellen

Bij het beheer van estuaria is een wiskundig model een van de hulpmiddelen om het effect na te gaan van een bepaalde ingreep op de in het estuarium optredende slibverschijnselen. Daarnaast kan het wiskundige model ook een belangrijk onderzoekinstrument zijn, wanneer het wordt gebruikt in voortdurende wisselwerking met resultaten van hydraulische modelproeven en/of prototypemetingen.

Uitgangspunt voor numerieke berekeningen van slibtransport is de massabalansvergelijking [40]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot C \vec{V}_2 = \nabla \cdot E \nabla C + S \quad (14)$$

met: C = concentratie sediment

$$\vec{V}_2 = u \vec{i} + (v + v_s) \vec{j} + w \vec{k}$$

u, v, w = snelheid vloeistofdeeltjes

E = turbulente diffusiecoëfficiënt (eigenlijk: diffusietensor)

S = bron/put term om toevoeging of verwijdering sediment aan te geven.

Het voordeel van wiskundige modellen boven hydraulische schaalmodellen is dat geen hinder wordt ondervonden van schaafeffekten. Een voorwaarde om met behulp van wiskundige modellen goede voorspellingen voor het slibgedrag te kunnen maken is wel dat de fysische processen voldoende bekend zijn en middels vergelijkingen c.q. formules kunnen worden beschreven. Over deze processen bestaan nog vele onduidelijkheden, met name wat betreft de valsnelheden van de deeltjes en de beschrijvingen van de erosie-, sedimentatie- en konsolidatieprocessen. Het getijgootonderzoek is erop gericht deze processen beter te leren kennen en parameters te vinden waarmee deze processen kunnen worden beschreven (zie ook hfdst. 6). Ook aan de bepalingsmethoden van deze parameters wordt daarbij aandacht geschonken (zie hfdst. 3). Daarnaast zijn getijgootproeven noodzakelijk voor het leveren van toetsingsmateriaal voor de wiskundige modellen.

Op het inbouwen van slibverschijnselen in wiskundige modellen, dat parallel aan de studie naar de fysische mechanismen bij slibtransporten zal worden uitgevoerd, zal in een aparte nota nader worden ingegaan.

6 Hydraulisch modelonderzoek

Variaties in de rivierafvoer en de bijbehorende slibvracht, alsmede variaties in de getijbeweging beïnvloeden de eb- en vloeddebeten en, meestal met een zekere naijling, ook de slibgehalten en -afvoeren in de estuaria en zeegaten. Deze variabiliteit is er de oorzaak van dat in de natuur meestal geen korrelaties zijn gevonden tussen rivierafvoer, getijhoogte, wind (golven) en gemeten slibgehalten over de vertikaal in het estuarium [89]. Het uitvoeren van proeven in een hydraulisch model biedt de mogelijkheid om de randvoorwaarden nauwkeurig in de hand te houden en hun invloed systematisch te onderzoeken.

Voor een dergelijk systematisch hydraulisch onderzoek onder goed gedefinieerde omstandigheden is de nieuwe getijgoot zeer geschikt. Dit onderzoek zal gericht zijn op het gedrag van slib bij bepaalde geometrische situaties onder invloed van:

- getij
- stroming
- zoutgehalte.

Het unieke van de getijgoot is dat het kan worden opgevat als een prototype-estuarium waarin onder systematisch te variëren goed gedefinieerde omstandigheden nauwkeurig onderzoek naar inhomogene stromingen en slibtransporten kan worden uitgevoerd. Geen enkel echt estuarium biedt die mogelijkheid in dezelfde mate.

Het hydraulisch modelonderzoek in de getijgoot naar slibverschijnselen kan worden onderverdeeld in een drietal doelstellingen:

- a. principe-onderzoek naar de transportmechanismen van slib
- b. het leveren van gegevens om de wiskundige modellen te toetsen
- c. het ontwikkelen van modeltechnieken en modelmaterialen om de in de natuur optredende slibverschijnselen betrouwbaar in hydraulische modellen te kunnen reproduceren.

In hoofdstuk 5.2.4 van [3] is dit verder uitgewerkt.

In dit hoofdstuk zal een nadere uitwerking plaatsvinden van het in de getijgoot uit te voeren slibonderzoek.

De nieuwe getijgoot is een combinatie van een getijgoot en een permanentiegoot [91]. In figuur 34 is een situatieschets gegeven.

Deze goot heeft de volgende afmetingen:

- effectieve gootlengte tussen zee- en rivierrand: 96 m
- inwendige breedte van de goot: 1,00 m
- inwendige konstruktiehoogte (vanaf de bodem): 1,00 m.

Via de zich aan de rivierzijde bevindende getijtank kunnen diverse gootlengten worden gerealiseerd.

De capaciteiten van de goot zijn onderstaand samengevat:

- middenstand ter plaatse van zee: $h_0 = 0,10 - 0,90$ m
- getijslag: $2a_0 = \text{max. } 0,15$ m
- getijperiode: $T = 30 - 1600$ s
- zeedichtheid tot $\rho = 1030$ kg/m³
- rivieraafvoer $Q_f = 0 - 30$ l/s
- variabel rivierdebiet (getijtankdebieten) tussen +80 l/s (instromend) en -80 l/s (uitstromend)
- de maximale capaciteit van de "skimmers" van het zeebassin (bedoeld om de zoete bovenlaag weg te halen) is totaal 60 l/s
- maximale afvoer naar riool (of reservoir in ZZ-hal): 32 l/s.

Voor de permanentiegoot gelden debieten tussen ca. 10 en 100 l/s, zowel voor de onder- als bovenlaag.

Voor een kwalitatieve beschrijving van de in estuaria optredende slibverschijnselen wordt verwezen naar hoofdstuk 2 uit [3]. Naast de vlokformingsprocessen, waarop de turbulentie een grote invloed heeft, spelen hierbij de uitwisselingsprocessen met de bodem, als sedimentatie en erosie, een zeer belangrijke rol. Zoals weergegeven in figuur 35 zal over bepaalde perioden van het getij erosie c.q. sedimentatie optreden. Aangezien $\tau_d < \tau_e$ zullen er ook perioden zijn, waarin noch sedimentatie noch erosie optreedt.

De in de getijgoot uit te voeren proeven met slib worden onderstaand in een drietal categorieën beschreven:

- a. proeven met slibeigenschappen op prototypeschaal
- b. proeven met slibeigenschappen op modelschaal
- c. permanentieproeven.

Overeenkomstig de afspraken in de vergadering van de Werkgroep Slibonderzoek dd. 22 juli 1981 zal het onderzoek in de getijgoot gestart worden met een oriënterend systematisch onderzoek. Hierbij wordt gedacht aan proeven als te beschrijven onder categorie a. De hierbij waargenomen verschijnselen geven dan richting aan de opzet van het verdere onderzoek.

a. proeven met slibeigenschappen op prototypeschaal

In de periode 1968-1979 is in de oude getijgoot uitgebreid onderzoek verricht naar de verschillende processen, die de zoutindringing beïnvloeden. Enige resultaten van het hiertoe uitgevoerde systematische onderzoek staan weergegeven in figuur 36 en 37 ([92], [93]). Bij de in de nieuwe getijgoot uit te voeren proeven zullen de randvoorwaarden zodanig moeten zijn, dat $L_1 < 96$ m. Bij het systematisch onderzoek in de oude getijgoot stond een reproductie van de zouttoestand in de Rotterdamse Waterweg centraal. De referentieproef betrof de situatie bij in 1956 uitgevoerde metingen ($n_L = 640$; $n_h = 64$). Vanuit deze situatie werd vervolgens telkens één variabele gevarieerd. De instelling bij deze proef was:

waterhoogte	$h_0 = 0,216$ m
gootlengte	$L = 179,16$ m
bovenafvoer	$Q_f = -0,0029$ m ³ /s
getijslag	$2a_0 = 0,025$ m
zoutgehalte zee	$S = 30$ kg/m ³
ruwheid goot	$C = 19$ m ^{1/2} /s
breedte goot	$b = 0,671$ m.

Voor de uitwisselingsprocessen met de bodem zijn, naast de eigenschappen van het slib zelf, de over de getij optredende bodemschuifspanningen, en daarmee ook de stroomsnelheden, van overheersend belang. Figuur 38 geeft een beeld van het verloop van de over de waterdiepte gemiddelde stroomsnelheden over een getijperiode bij de in de oude getijgoot uitgevoerde proeven. In verband met hun invloed op erosie en sedimentatie zijn de maximale stroomsnelheden tijdens eb en vloed verzameld in figuur 39 en 40 als functie van de diverse invloeds-grootheden. Met name de getijslag en de bodemruwheid (Chezy-waarde) blijken hierop een belangrijke invloed te hebben.

Wegens de vertrokken schaal moet een extra ruwheid in het model worden toegepast. Deze werd bij bovengenoemde proeven verkregen door verticale weerstands-

staafjes (5 x 5 mm). Er zijn ook proeven uitgevoerd met weerstandsplaatjes op de bodem. Ondanks dezelfde ruwheid, bepaald onder permanentie-omstandigheden in zoet water, blijkt uit figuur 41 dat de soort weerstandselementen een belangrijke invloed heeft op de zoutindringing, gelaagdheid en op de optredende snelheden.

Aangezien de praktijkproblemen in de Nederlandse getijwateren uitgangspunt zijn voor het in getijgootkader uit te voeren slibonderzoek verdient het de voorkeur een Nederlandse slibsoort bij de proeven toe te passen. Voor een systematische onderzoek moet hieraan wel de eis gesteld worden dat de eigenschappen van deze slibsoort reproduceerbaar zijn, hetgeen betekent dat het slib geen of nagenoeg geen organische delen zal mogen bevatten.

Over de sedimentatie- en erosie-eigenschappen van de Nederlandse slibsoorten is weinig bekend. Voor slib uit de Thames geven Odd en Owen [57] de volgende waarden:

sedimentatie: $\tau_d = 0,06 \text{ Pa}$ (afzetting bij $\tau_b < \tau_d$)

erosie : $\tau_e = 0,2 \text{ à } 0,5 \text{ Pa}$ (erosie bij $\tau_b > \tau_e$).

Met $\tau_b = \rho_w \cdot g / C^2 \cdot \bar{U}^2$ zou dit voor de getijgootproeven met $C = 19 \text{ m}^2/\text{s}$ betekenen dat, indien de invloed van de weerstandsstaafjes op de erosie- en sedimentatieverschijnselen even wordt vergeten, sedimentatie zou optreden bij $\bar{U} \leq 0,047 \text{ m/s}$ en erosie bij $\bar{U} \geq 0,085 \text{ à } 0,134 \text{ m/s}$.

N.B.: De werkelijke bodemschuifspanning is vanzelfsprekend veel lager, omdat de weerstand in belangrijke mate het gevolg is van de weerstand van de staafjes op de waterstroom. In [94] wordt de Chézy-waarde van de gladde goot geschat op $67 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Anderzijds is bij de toepassing van staafjes de snelheid vrij konstant over de hoogte en daardoor de snelheidsgradiënt bij de bodem groter dan in situaties zonder staafjes. Bovendien is er de invloed van de gravitatiecirculatie als gevolg van dichtheidsverschillen op het snelheidsprofiel.

In 1975 zijn improviserderwijs enkele proeven met slib uitgevoerd in de oude getijgoot. Hierbij werd zowel bovenstrooms als benedenstrooms slib geïnjecteerd (zie fig. 42). Sedimentatie bleek pas op te treden bij proeven met een getijslag $2a_0 = 0,0125 \text{ m}$ ($\bar{u}_{\text{max}} \approx 0,09 \text{ à } 0,11 \text{ m/s}$), terwijl erosie achter de staafjes optrad bij een proef met $2a_0 = 0,025 \text{ m}$ en $Q_f = 9 \text{ l/s}$ ($\bar{u}_{\text{max}} \approx 0,13 \text{ à } 0,17 \text{ m/s}$). Bij deze proeven werd geprobeerd de situatie in de Rotterdamse

Waterweg na te bootsen. Er bleken duidelijke verschillen op te treden tussen de verschijnselen in prototype en model. Gekonkludeerd werd dat voor een juiste simulatie van prototypesituaties de eigenschappen van het in het model te gebruiken slib zullen moeten worden aangepast [96] (bijvoorbeeld met chemicaliën behandeld slib). Onder punt b zal hierop worden teruggekomen.

Stel voor de getijgoot met een slibafzetting op de bodem, zonder staafjes of andere ruwheidselementen, de Chézy-waarde eens $C = 45 \text{ m}^2/\text{s}$. Voor het eerder genoemde Thames slib is de kritieke snelheid voor sedimentatie dan $0,11 \text{ m/s}$ en die voor erosie $0,20 \text{ à } 0,32 \text{ m/s}$. Deze snelheden vertonen een goede overeenkomst met de waarden die Postma [38] geeft voor ongekonsolideerd slib (zie fig. 23).

Wanneer proeven in de getijgoot zouden worden uitgevoerd met stroomsnelheden als bij het in de oude getijgoot uitgevoerde systematische onderzoek, zou een situatie ontstaan als weergegeven in figuur 43a. Hierbij is uitgegaan van $u_* = \sqrt{g/C \cdot \bar{u}}$, met $C = 60 \text{ m}^2/\text{s}$ voor het prototype en $C = 45 \text{ m}^2/\text{s}$ voor het model en $u_{*d} = 0,0078 \text{ m/s}$ en $u_{*e} = 0,014 \text{ m/s}$. Per getijperiode zou in het model, in tegenstelling tot de overeenkomstige prototypesituatie, weinig of geen erosie optreden en belangrijke sedimentatie. In figuur 43b is op overeenkomstige wijze het verloop van de schuifspanningssnelheid weergegeven bij de proef uit het in de oude getijgoot uitgevoerde systematische onderzoek met de grootste getijslag ($2a_0 = 0,075 \text{ m}$). In de ebperiode blijkt hier ook in het model erosie op te treden.

N.B.: In de bovenstaande beschouwingen is geen rekening gehouden met de invloed van dichtheidsverschillen en ruwheidselementen op de snelheidsverdeling en daarmee op de werkelijke bodemschuifspanning. De in de nieuwe getijgoot uit te voeren proeven zullen hier meer inzicht in moeten verschaffen.

Het is duidelijk dat dergelijke proeven niet geschikt zijn om greep te krijgen op slibverschijnselen onder invloed van getij, stroming en zoutgehalte. Of de eigenschappen van het slib zullen moeten worden verschaald, of de snelheden zullen moeten worden aangepast. Voor de eerste oplossing wordt verwezen naar punt b. Wat de tweede oplossing betreft kan gedacht worden aan proeven als aangegeven in figuur 44. Voor de randvoorwaarden, met name de getijslag, zijn zodanige waarden gekozen, dat de bodemschuifspanning in dezelfde orde van grootte ligt als in het prototype. Tegelijkertijd is ook de bovenafvoer zoda-

nig vergroot, dat de maximale zoutindringingslengte kleiner is dan 96 m.

Zoals reeds in het begin van dit hoofdstuk opgemerkt zijn de proeven overeenkomstig het voorbeeld in figuur 44 niet een afbeelding van een bestaand estuarium, maar moet de getijgoot zelf als een uniek estuarium worden gezien, dat zeer geschikt is voor systematisch onderzoek van inhomogene stromingen en slibtransporten. Aangezien prototypeslib wordt toegepast en de bodemschuifspanningen in het model van dezelfde orde van grootte zijn als in prototype, kan gesteld worden dat de uitwisselingsprocessen bij de bodem op dezelfde wijze plaatsvinden als in het prototype. Stelt men bovendien dat de tijdschaal n_T gelijk is aan de diepteschaal n_h , dan geldt bovendien dat de concentraties gesuspendeerde deeltjes in model en prototype gelijk zijn. Naast deze uitwisselingsprocessen bij de bodem zijn ook de flokkulatieverschijnselen van belang. Volgens Overbeek [5] is de botsingskans tussen de deeltjes:

$$I_s = \frac{8}{\pi} \cdot C \cdot \frac{\rho_w}{\rho_d} \frac{du}{dy} \quad (C \ll 1) \quad (15)$$

met: I_s = aantal botsingen per seconde
 C = concentratie van de deeltjes
 du/dy = lokale snelheidsgradiënt.

De helft van het aantal deeltjes is uitgevlokt na een tijd τ (halfwaardetijd):

$$\tau = \frac{\pi \ln 2}{8C \frac{\rho_w}{\rho_d} \cdot \frac{du}{dy}} \quad (16)$$

Hieruit volgt:

$$n_\tau = n_C^{-1} \cdot n_{\rho_w}^{-1} \cdot n_{\rho_d} \cdot n_h \cdot n_u^{-1} \quad (17)$$

Met $n_C = n_{\rho_w} = n_{\rho_d} = 1$ leidt dit tot:

$$n_\tau = \frac{n_h}{n_u} \quad (18)$$

Wanneer uitgegaan wordt van de tijdschaal n_T gelijk is aan n_h moet, om het flokkulatieproces op schaal te doen plaatsvinden, dus gelden: $n_u = 1$.

De opzet van de proeven was zodanig dat de snelheden in de orde van grootte van die in het prototype waren. Gekonkludeerd kan dus worden het op bovengenoemde wijze in de getijgoot uitvoeren van proeven met prototypeslib een goede weergave is van de in werkelijkheid optredende processen. Wel zal de invloed van de konsolidatietijd op de uitwisselingsprocessen bij de bodem verschillen van die in prototype.

b. proeven met slibeigenschappen op modelschaal

Onder punt a werden proeven beschreven, waarbij de getijgoot zijn eigen estuarium is. In de meeste gevallen zal men bij hydraulisch onderzoek evenwel een bestaand estuarium willen nabootsen. Ondanks de sterke schematisatie bleek het ook in de getijgoot mogelijk de waterstanden, debieten en zoutindringing van bestaande estuaria te modelleren (zie [95], Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot). Bij enkele oriënterende proeven met slib bleken belangrijke verschillen in de slibverschijnselen in het model en in prototype. De oorzaak hiervan was dat het slib niet de juiste modeleigenschappen bezat [96].

Naast de onder punt a genoemde proeven zijn ook proeven in de getijgoot, waarbij de situatie uit een bestaand estuarium wordt gesimuleerd, van belang, omdat dan kan worden nagegaan of de in de goot waargenomen verschijnselen overeenstemmen met die in het prototype. Zoals beschreven in hoofdstuk 4 dienen immers prototypemetingen een belangrijke bijdrage te leveren aan het in getijgootkader uit te voeren slibonderzoek.

Dynamische gelijkvormigheid van prototype en model in vlaktemodellen met dichtheidsstromen betekent dat de Froude-getallen in beide gevallen gelijk zijn, evenals de dichtheidsverschillen [97].

Er geldt dan:

$$n_u = n_h^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$n_{\Delta\rho} = 1 \quad (20)$$

met n_u = schaalfactor voor horizontale snelheid
 n_h = schaalfactor voor hoogte
 $n_{\Delta\rho}$ = schaalfactor voor dichtheidsverschillen.

Evenals het getijmodel Rijnmond was de oude getijgoot een simulatie van de Rotterdamse Waterweg, met $n_h = 64$ en $n_L = 640$, en dus $\delta = n_L/n_h = 10$ en $n_u = 8$.

Als gevolg van het vertrokken zijn van het model moet de bodemruwheid worden vergroot, evenals de menging. In de getijgoot worden hiertoe weerstandsstaafjes (5 x 5 mm) over de volle waterdiepte aangebracht of weerstandplaatjes op de bodem. Soms werd de menging bevorderd door luchtinblazen. Bij proeven met slib zijn de bodemplaatjes minder geschikt, omdat hun invloed zal afnemen bij afzetting van slib op de bodem. Ook lijkt het inblazen van lucht niet wenselijk, aangezien dan mogelijk kleine luchtbelletjes zich gaan hechten aan slibdeeltjes.

Onderstaand zullen enkele aan het slib te stellen eisen kort worden toegelicht.

Valsnelheid

$$\text{Uit } t = L/u \text{ volgt: } n_t = n_L \cdot n_u^{-1} = n_L \cdot n_h^{-\frac{1}{2}} \quad (21)$$

$$\text{Uit } t = h/w \text{ volgt: } n_t = n_h \cdot n_w^{-1} \quad (22)$$

Opdat de deeltjes in model en prototype dezelfde baan beschrijven moet dus gelden voor de valsnelheid w_s :

$$n_{w_s} = n_L^{-1} n_h^{3/2} = \frac{n_h^{\frac{1}{2}}}{\delta} \quad (23)$$

Erosie en sedimentatie

In figuur 45a is het verloop van de snelheid geschetst over een getijperiode voor een situatie in prototype en model ($n_h = 64$; $n_L = 640$). Opdat in het model en prototype op dezelfde plaatsen en tijden erosie zal optreden, zullen de snelheden, waarbij erosie begint op te treden, zich tot elkaar moeten verhouden als in deze figuur is aangegeven.

Het zijn evenwel niet de gemiddelde snelheden, maar de schuifspanningssnelheden c.q. schuifspanningen bij de bodem die bepalend zijn voor de erosie.

In een permanente stromingssituatie is, wanneer de weerstand geleverd wordt door de bodem, de bodemschuifspanning te berekenen volgens:

$$\tau_b = \rho_w \cdot \frac{g}{C^2} \cdot \bar{u}^2, \quad (24)$$

met C = Chézy-koëfficiënt.

In figuur 45 b is het verloop van de aldus berekende bodemschuifspanningen weergegeven. Bij de getijgootproeven doet zich nu het probleem voor dat de weerstand voor een belangrijk deel geleverd wordt door de weerstandsstaafjes en voor een minder groot deel door de bodem ($C = 19 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ voor goot met staafjes en $C = 67 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ voor gladde goot). In figuur 45b is daarom ook een schatting voor de werkelijke bodemschuifspanning weergegeven, uitgaande van $\tau_b = \rho_w \cdot g / C_b^2 \cdot \bar{u}^2$ met $C_b = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. Hoe groot de werkelijke bodemschuifspanning is, zal experimenteel moeten worden vastgesteld.

Voor het op de juiste schaal weergeven van de uitwisselingsprocessen bij de bodem zal moeten gelden:

$$n_{\tau_e} = n_{\tau_d} = n_{\tau_b} \quad (25)$$

Uit figuur 45b blijkt wel dat de kritieke schuifspanningen voor erosie en sedimentatie in het model aanzienlijk kleiner zijn dan in het prototype. Immers uit $\tau_b = \rho_w \cdot g / C^2 \cdot \bar{u}^2$ volgt:

$$n_{\tau_b} = n_c^{-2} \cdot \frac{n^2}{u} = \frac{n_h}{n_c^2} \quad (26)$$

Eendimensionaal geldt de transportvergelijking:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + P_1 - D_1, \quad (27)$$

met P_1 = erosie-term ($(dm/dt)/h$)

D_1 = sedimentatie-term.

De erosie wordt vaak beschreven door:

$$\frac{dm}{dt} = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) \quad (28)$$

Uit de 1D-vergelijking volgt nu: $n_M \cdot 1 \cdot n_h^{-1} = n_u \cdot n_C \cdot n_L^{-1}$

$$\text{of: } n_M = \frac{n_h^{\frac{1}{2}}}{\delta} \cdot n_C \quad (29)$$

Anders geschreven:

$$n_C = n_M \cdot \delta \cdot n_h^{-\frac{1}{2}} \quad (30)$$

De sedimentatie wordt dikwijls beschreven door:

$$\frac{dm}{dt} = w_s \cdot C \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}\right)$$

Opdat sedimentatie en erosie op gelijke schaal plaatsvinden moet dus gelden:

$$n_{ws} \cdot n_C = n_M$$

$$\text{of: } n_C = n_M \cdot n_{ws}^{-1} = \frac{n_h^{\frac{1}{2}}}{\delta} \cdot n_C \cdot \frac{\delta}{n_h^{\frac{1}{2}}} = n_C \quad (31)$$

Hieruit volgen dus geen nieuwe voorwaarden.

Wanneer de eigenschappen van het slib zodanig op schaal gebracht zijn dat $n_{\tau_e} = n_{\tau_d} = n_{\tau_b}$, alsmede $n_{ws} = n_h^{\frac{1}{2}}/\delta$, dan bepaalt de erosieconstante M in feite de schaalfactor voor de concentratie via $n_C = n_M \cdot \delta \cdot n_h^{-\frac{1}{2}}$. Dit geeft dan meteen aan welke concentraties aan de randen moeten worden opgelegd.

Tijdschaal bodemprocessen

Uitgaande van een zelfde soortelijke massa van het materiaal in model en prototype geldt voor de tijdschaal van de bodemprocessen:

$$n_t = \frac{n_h}{n_{\left(\frac{dm}{dt}\right)}} = \frac{n_h}{n_M} = n_h^{\frac{1}{2}} \cdot \delta \cdot n_C^{-1} \quad (32)$$

Uit de Froude-schaal volgde voor de stroming: $n_t = n_L \cdot n_h^{-\frac{1}{2}}$.

Gelijkstelling van beide tijdschalen leidt tot:

$$n_C = 1 \quad (33)$$

Om de slibtransporten op dezelfde tijdschaal weer te geven als die van de waterstromingen moet de concentratie gesuspendeerde deeltjes in model en prototype dus gelijk zijn. Dit legt dan wel een eis op aan de konstante M uit de erosiefunctie.

Evenwel hebben geringe wijzigingen in een sedimenttransporten en de bodemligging bijna geen invloed op de waterbeweging, zodat de slibtransporten en morfologische verschijnselen op een andere tijdschaal mogen worden weergegeven.

Het op de juiste schaal reproduceren van zowel de valsnelheden als de uitwisselingsprocessen bij de bodem is geen eenvoudige zaak. In [99] wordt daartoe gewerkt met behandeld natuurlijk slib (model van de Loire: $n_L = 1250$, $n_h = 140$). Welke fysisch-chemische behandeling is toegepast wordt evenwel niet vermeld.

De valsnelheid wordt in belangrijke mate bepaald door de slibconcentratie, het zoutgehalte en de turbulentie in het water (vgl. fig. 46a,b). Het flokkulatieproces kan worden beïnvloed door toevoeging van bepaalde chemicaliën (vgl. fig. 46c). Wat de invloed van de weerstandsstaafjes is op het flokkulatieproces is niet bekend. Bij de door Krone in een stroomgoot uitgevoerde proeven bleek wel dat het plaatsen van een rooster in de stroming de sedimentatiesnelheid zeer sterk beïnvloedde [15]. Experimenten zullen hierin meer inzicht moeten verschaffen (vergelijk hfdst. 3.3).

Door de gevoeligheid van de kohesieve eigenschappen van slib voor bepaalde chemicaliën kunnen ook de erosie-eigenschappen door bepaalde toevoegingen worden beïnvloed. Een voorbeeld hiervan is gegeven in figuur 47b.

Gekonkludeerd kan worden dat er in principe mogelijkheden bestaan om met behandeld slib prototypesituaties in een model te simuleren. Om dit in de getijgoot te realiseren zal hiertoe reeds vroegtijdig begonnen moeten worden met het hiertoe benodigde fysisch-chemisch onderzoek (vgl. hfdst. 3).

c. permanentieproeven

Zoals weergegeven in figuur 34 bevat de nieuwe getijgoot een permanentiegedeelte voor onderzoek aan 2-lagen stromingen. De lengte van dit permanentiegedeelte is variabel van 10 tot 60 m. In dit gedeelte zou slibonderzoek kunnen worden uitgevoerd als in hoofdstuk 3.3 aangegeven voor stroomgoten met recirculatie. Ook hier geldt dat het vlokformingsproces beïnvloed zal worden door de eigenschappen van het pomp- en leidingsysteem. Met name kan in deze opstelling de afzetting en erosie van slib in gelaagde stromingssituaties worden onderzocht, alsmede hoe in dergelijke stromingssituaties het opgewervelde slib zich over de vertikaal verspreidt. In de literatuur is hierover niets bekend.

ONDERZOEK

In bijlage XIII is schetsmatig het in de getijgoot uit te voeren onderzoek weergegeven. De volgende onderdelen komen hierin aan de orde:

- Overeenkomstig de afspraken in de vergadering van de Werkgroep Slibonderzoek dd. 22 juli 1981 zal het onderzoek in de getijgoot gestart worden met een oriënterend systematisch onderzoek. Hierbij wordt gedacht aan proeven als beschreven onder punt a. De hierbij waargenomen verschijnselen geven dan richting aan de opzet van het verdere onderzoek.
- Om de resultaten van deze proeven te kunnen interpreteren zal middels proeven inzicht moeten zijn verkregen in de eigenschappen en het gedrag van het slib (valsnelheden, erosie-eigenschappen, etc.; zie hfdst. 3: onderzoek naar de fysische en fysisch-chemische eigenschappen).
- Alvorens proeven op Froude-schaal in de getijgoot uit te kunnen voeren zal beschikt moeten kunnen worden over een geschikt modelmateriaal (bijv. met chemicaliën behandeld natuurlijk slib). Het onderzoek naar deze modelmaterialen zal dan ook vroegtijdig moeten worden gestart.
- Het in grote lijnen simuleren van een bestaand estuarium in de getijgoot biedt de mogelijkheid de in het model waargenomen slibverschijnselen te vergelijken met die in prototype. Hierdoor ontstaat de mogelijkheid tot enerzijds een controle op eventueel in het model optredende schaafeffekten en anderzijds het opsporen van bepaalde in het estuarium optredende transportmechanismen, die met de beperkte meetmogelijkheden in het prototype niet zouden zijn gekonstateerd.
- Wanneer het systematische onderzoek een zekere afronding heeft verkregen en meer inzicht is ontstaan hoe de diverse randvoorwaarden doorwerken op de

slibverschijnselen, alsmede voldoende greep is verkregen op het op schaal weergegeven van slibverschijnselen in estuaria, kan het onderzoek in de getijgoot worden voortgezet met het onderzoek naar de invloed van geometrische variaties op de slibverdeling, etc.. Als onderwerpen kunnen genoemd worden:

- invloed havens op slibverdeling
 - invloed kribben op slibverdeling
 - verspreidingen van lozingen gesuspendeerde deeltjes
 - invloed breedte/dieptevariaties op de slibverdeling
 - tijdschalen en invloed plotselinge hoge bovenafvoer op het slibgedrag
 - invloed luchtbellenscherm op slibverdeling
 - stroming van bij de bodem aanwezige slibdeken naar een slibput.
 - etc..
- In het permanentiegedeelte van de getijgoot kan onderzoek worden uitgevoerd naar erosie- en sedimentatieprocessen als omschreven bij punt c.
 - Evenals bij het zout/zoetonderzoek geldt ook voor het slibonderzoek de behoefte aan nauwkeurig kunnen meten van de turbulente waterbewegingen en transporten in inhomogene stromingssituaties. Onder eigen speurwerk wordt door het WL momenteel onderzoek uitgevoerd naar de toepasbaarheid van de Laser-Doppler snelheidsmeter. Wanneer de resultaten van dit onderzoek positief uitvallen lijkt het gewenst in het kader van het slibonderzoek een projektvoorstel te maken om metingen te verrichten naar turbulente grootheden die bij de slibtransporten van groot belang kunnen zijn (bijv. turbulentiestructuur i.v.m. flokkulatie, burst-verschijnselen i.v.m. erosie, etc.).
 - Het hoeft geen betoog, dat een voorwaarde voor slibonderzoek in de getijgoot is het kunnen beschikken over voldoende nauwkeurige meetapparatuur. Naar slibkoncentratiemeters voor toepassing bij natuurmetingen wordt momenteel door het WL speurwerk uitgevoerd ([100], [101]). Ook voor laboratoriumomstandigheden zullen slibkoncentratiemeters ontwikkeld moeten worden.

7 Diskussie

1. De in getijgootkader uit te voeren studie slibonderzoek richt zich met name op de transportmechanismen van slib in zout/zoetomstandigheden. Overeenkomstig rapport M 896-40 zal deze studie fundamenteel van opzet zijn. Uitgangspunt hierbij zijn de praktijkproblemen in de Nederlandse getijwateren op het gebied van sedimentatie en waterkwaliteit.
2. In bijlage I zijn schematisch de processen weergegeven, die bij slibverschijnselen in estuaria een rol spelen. De dynamische processen van het water, zoals circulatiestromen en menging, alsmede de agglomeratieprocessen tussen de deeltjes spelen hierin een belangrijke rol. De vele interacties die er bestaan tussen de diverse processen maken een goede voorspelling van de slibbeweging niet eenvoudig, aangezien er dan immers voldoende kennis moet bestaan van elk van de op deze beweging van invloed zijnde grootheden. In bijlage I is ook aangegeven de invloed van biologische processen op de eigenschappen van slib. Een kwantitatieve beschrijving hiervan zal uit de biologische hoek moeten komen. Dit geldt ook voor de biologische invloed op processen als erosie.
3. Een overzicht van het in getijgootkader uit te voeren slibonderzoek is weergegeven in bijlage II. Bij dit onderzoek, dat moet leiden tot inzicht in het gedrag van slib onder invloed van getij, stroming en zoutgehalte, is een indeling gemaakt naar:
 - fysische en fysisch-chemisch onderzoek
 - prototypemetingen
 - wiskundige modellen
 - hydraulisch modelonderzoek.Deze onderdelen kunnen evenwel niet los van elkaar worden gezien en zullen dan ook simultaan dienen te worden uitgevoerd. Elk onderdeel heeft immers zijn specifieke bijdrage, maar ook zijn beperkingen.
4. Bijlage III geeft een overzicht van het onderzoek naar de fysische en fysisch-chemische processen. Dit onderzoek moet leiden tot inzicht in de diverse basisprocessen als flokkulatie, sedimentatie, etc.. Het lijkt zinvol in de eerste fase van het onderzoek reeds te starten met deze bureaustudie, gekombineerd met het uitvoeren van proeven op enige

slibsoorten om dit gedrag vast te leggen en te bestuderen. Op deze wijze kan dan reeds ervaring en gevoel voor het slib worden opgebouwd, die nodig zijn bij het op verantwoorde wijze uitvoeren van hydraulisch onderzoek met slib (hfdst. 6).

N.B.: Ook bij de te zijner tijd in de getijgoot uit te voeren proeven met slib zullen begeleidende fysisch-chemische proeven moeten worden uitgevoerd om de noodzakelijke gegevens van het toegepaste materiaal vast te leggen.

5. Een keuze zal moeten worden gemaakt van de slibsoorten, waarop het onderzoek zal worden uitgevoerd. Aangezien de praktijkproblemen in de Nederlandse getijwateren uitgangspunt zijn voor het onderzoek, zullen dit Nederlandse slibsoorten dienen te zijn. Voor het in de getijgoot uit te voeren systematische onderzoek naar slibverschijnselen zal als voorwaarde aan het slib gesteld moeten worden, dat de eigenschappen reproduceerbaar zijn. Dit betekent dat het daar toegepaste slib geen of nagenoeg geen organische bestanddelen zal mogen bevatten. Ter verdieping van het inzicht is het zinvol ook enige pure kleimineralen te beproeven.

6. Onderzoek naar de fysische en fysisch-chemische processen, die aan de slibtransporten ten grondslag liggen, is gesplitst in de volgende onderdelen:

flokkulatie	(hfdst. 3.1 en bijlage IV)
valsnelheid	(hfdst. 3.2 en bijlage V)
sedimentatie	(hfdst. 3.3 en bijlage VI)
slibdeken	(hfdst. 3.4 en bijlage VII)
konsolidatie	(hfdst. 3.5 en bijlage VIII)
erosie	(hfdst. 3.6 en bijlage IX)
transport	(hfdst. 3.7 en bijlage X).

In elk hoofdstuk wordt een korte schets gegeven van hetgeen hierover in de literatuur bekend is en een voorstel gedaan voor onderzoek. In de genoemde bijlagen zijn deze voorstellen schematisch weergegeven. Nadat overeenstemming bestaat over de opzet van het onderzoek voor elk der onderdelen zullen prioriteiten moeten worden aangegeven.

7. Aangezien de in de natuur optredende processen uitgangspunt zijn voor het onderzoek wordt bij elk onderdeel een vergelijking met in prototy-

pesituaties te meten verschijnselen zeer belangrijk geacht (bijv. meten valsnelheden in prototype met Owen tube).

8. Voor het onderzoek naar sedimentatie en erosie zal een keuze moeten worden gemaakt met betrekking tot de faciliteit, waarin het onderzoek zal worden uitgevoerd (stroomgoot en/of carousel: zie hfdst. 3.3 blz. 18 en 19).
9. Bij verschillende processen speelt de turbulentie-intensiteit en turbulentiestructuur een belangrijke rol. Er bestaat dan ook de behoefte de turbulente waterbewegingen en transporten in inhomogene stromingssituaties te meten. Onder eigen speurwerk wordt door het WL momenteel onderzoek uitgevoerd naar de toepasbaarheid van de Laser-Doppler snelheidsmeter. Wanneer de resultaten van dit onderzoek positief uitvallen lijkt het gewenst in het kader van het slibonderzoek een projektvoorstel te maken om metingen te verrichten naar turbulente grootheden die bij de slibtransporten van groot belang kunnen zijn (bijv. turbulentiestructuur i.v.m. flokkulatie, burst-verschijnselen i.v.m. erosie, etc.).
10. Zoals aangegeven in hoofdstuk 4 dient bij het slibonderzoek de uitvoering en interpretatie van natuurmetingen een belangrijke plaats in te nemen. Dit kan zowel het bewerken en interpreteren van reeds bestaande meetgegevens zijn, als het uitvoeren van nieuwe buitenmetingen om in bepaalde processen meer inzicht te verkrijgen (zie bijlage XI).
11. Op het inbouwen van slibverschijnselen in wiskundige modellen, dat parallel aan de studie naar de fysische mechanismen bij slibtransporten zal worden uitgevoerd, zal in een afzonderlijke nota worden ingegaan.
12. Hydraulisch onderzoek in de getijgoot zal gericht zijn op het gedrag van slib bij bepaalde geometrische situaties onder invloed van:
 - getij
 - stroming
 - zoutgehalte.

Het unieke van de getijgoot is dat het kan worden opgevat als een prototype-estuarium waarin onder systematisch te variëren goed gedefinieerde omstandigheden nauwkeurig onderzoek naar inhomogene stromingen en slibtransporten kan worden uitgevoerd. Geen enkel echt estuarium

biedt die mogelijk in dezelfde mate.

13. In hoofdstuk 6 is het in de getijgoot uit te voeren onderzoek uitgewerkt en in bijlage XIII schematisch weergegeven. Dit onderzoek is onderverdeeld in een drietal categorieën:

- a. proeven met slibeigenschappen op prototypeschaal
- b. proeven met slibeigenschappen op modelschaal
- c. permanentieproeven.

Overeenkomstig de afspraken in de vergadering van de Werkgroep Slibonderzoek dd. 22 juli 1981 zal het onderzoek in de getijgoot gestart worden met een oriënterend systematisch onderzoek. Hierbij wordt gedacht aan proeven als beschreven onder punt a. De hierbij waargenomen verschijnselen geven dan richting aan de opzet van het verdere onderzoek.

REFERENTIES

1. Waterloopkundig Laboratorium en Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde; 1976
Programma voor getijgootonderzoek; M 896-35; W76 B905L
2. Waterloopkundig Laboratorium en Rijkswaterstaat, Deltadienst, Hoofdafdeling Waterloopkunde; 1978
Getijgootonderzoek: projectenbeschrijving, M 896-40, F7734D00
3. Waterloopkundig Laboratorium, 1981
Nota getijgootonderzoek: "Onderzoek naar de transportmechanismen van slib in zout/zoetomstandigheden", M 896
4. UITERWIJK WINKEL, A.P.B.; 1976
Microbiologische aspecten en het sedimentatiegedrag van rivierslib; Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, district Zuid-West: nota nr. 44.006.01
5. KRUYT, H.R.; 1952
Colloid Science; Volume I
Elsevier Publ. Co.
6. OLPHEN, H. van; 1963
An introduction to Clay Colloid Chemistry
Interscience Publishers, New York
7. GRIM, R.E.; 1953
Clay Mineralogy, McGraw-Hill, New York
8. American Society of Civil Engineers; 1961
Physico-chemical properties of soils - a symposium
Transactions ASCE, Vol. 26, Part I; pp. 697-794

REFERENTIES (vervolg)

9. Waterloopkundig Laboratorium; 1976
Onderzoek eigenschappen van slib
Vooronderzoek betreffende flocculatie, sedimentatie, consolidatie en erosie
Verslag literatuuronderzoek; R 988
10. EDZWALD, J.K., UPCHURCH, J.B. en O'MELRA, C.R.; 1974
Congulation on estuaries
Environmental Science and Technology, 8, pp. 58-63
11. WHITEHOUSE, M.G., JEFFREY, L.M. en DEBRECHT, J.D.; 1960
Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters
In: A. Swinford (ed.): Clay and Clay Minerals, Oxford, Pergamon, pp. 1-79
12. DRAKE, D.E.; 197
Suspended sediment transport and mud deposition on continental shelves
Chapter 9 in: D.J. Stanley and D.J.P. Swift (Eds). Marine Sediment Transport and Environmental Management. Joe Wiley & Sons, N.Y., pp. 127-158
13. EINSTEIN, H.A. en KRONE, R.B.; 1961
Estuarial sediment transport patterns
Journal of the Hydr. Div., Vol. 87
14. PEIRCE, T.J. en WILLIAMS, D.J.; 1966
Experiments on certain aspects of sedimentation of estuarial muds
Proc. Inst. Civ. Engrs., Vol. 34; pp. 391-402
15. KRONE, R.B.; 1962
Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes
Univ. California, Hyd. Eng. Lab. and Sanit. Eng. Res. Lab.

REFERENTIES (vervolg)

16. KRONE, R.B.; 1963
A study of rheologic properties of estuarial sediments
Technical Bulletin 7
Committee on Tidal Hydraulics, Corps of Engineers, US Army, Waterway
Experiment Station, Vicksburg, Mississippi
17. Schubel, J.R.; 1972
Distribution and Transportation of Suspended Sediment in Upper
Chesapeake Bay
In: B.W. Nelson (ed.): Environmental Framework of Coastal Plain-
Estuaries; Memoir 133 of the Geological Society of America, pp. 151-
167
18. DOBBINS, W.E.; 1944
Effect of turbulence on sedimentation
Transactions ASCE, Vol. 109, pp. 629-656
19. McLAUGHLIN, R.T.; 1961
Settling properties of suspensions
Trans. ASCE, Vol. 126, pp. 1734-1786
20. MIGNIOT, C.; 1968
Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et
de leur comportement sous des actions hydrodynamiques
La Houille Blanche, no. 7, pp. 591-620
21. RIWA en RID; 1979
Slib in Rijn en Maas
Een beschrijving van de kwalitatieve en kwantitatieve aspecten van
slib in de Rijn en de Maas in relatie tot de drinkwatervoorziening
Deel II Theoretische aspecten
22. Hydraulics Research Station, Wallingford; 1968
Properties and behaviour of muds
Hydraulics Research 1967, pp. 56-57

REFERENTIES (vervolg)

23. OWEN, M.W.; 1970
A detailed study of the settling velocities of an estuary mud
Report no. Int. 78. Hydraulics Research Station, Wallingford, England, September 1970
24. RICHARDSON, J.F. en ZAKI, W.N.; 1954
The sedimentation of a suspension of uniform spheres under conditions of viscous flow
Chem. Eng. Science; Vol. 3, pp. 65-73
25. OWEN, M.W.; 1971
The effect of turbulence en the settling velocities of silt flocs
Proceedings 14th Congress of IAHR, Paris, Volume 4, pp. D4-1 - D4-5
26. KRONE, R.B.; 1972
A field study of flocculation as a factor in estuarial shoaling processes
Technical Bulletin no. 19, Committee on Tidal Hydraulics, Vicksburg, Mississippi
27. OWEN, M.W.; 1976
Determination of the settling velocities of cohesive muds
Hydraulics Research Station, Wallingford; Report no. IT161
28. EINSTEIN, H.A. en KRONE, R.B.; 1962
Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water
J. Geophys. Res., Vol. 67 no. 4, pp. 1451-1464
29. PARTHENIADES, E.; 1965
Erosion and deposition of cohesive soils
Proc. ASCE Journ. of Hydraulics Division, Vol.91, no. HY1, pp.105-139

REFERENTIES (vervolg)

30. PARTHENIADES, E.; 1971
Erosion and deposition of cohesive materials; Chapter 25 in: River Mechanics (H.W. Shen (ed.)); Colorado State University, Fort Collins, Colorado
31. Delft Hydraulics Laboratory; 1962
Demerara coastal investigation
Report on Siltation of Demerara Bar Channel and Coastal Erosion in British Guiana
32. MEHTA, A.J. en PARTHENIADES, E.; 1975
An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediment
Journal of Hydr. Research 13, no. 4; pp. 361-381
33. Hydraulics Research Station; 1970
Thames Estuary flood prevention investigation: mathematical silt model studies; the effect of a half tide barrier at either Woolwich or Blackwall on siltation in the estuary
Report no. EX 479, HRS Wallingford
34. PARTHENIADES, E.; 1965
Erosion and deposition of cohesive soils
Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 91, No. Hy1, pp. 105-139
35. PARTHENIADES, E., KENNEDY, J.F., ETTER, R.J. en HAYER, R.P.; 1966
Investigations of the depositional behavior of fine cohesive sediments in an annular rotating channel
Rep. No. 96, Hydrodynamics Lab., MIT, Cambridge, Mass.
36. PARTHENIADES, E.; 1977
Unified View of Wash Load and bed material load
Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 103, HY9, pp. 1037-1057

REFERENTIES (vervolg)

37. PARTHENIADES, E., CROSS, R.H. en AYIRA, A.; 1968
Further results on the deposition of cohesive sediments
Proc. Eleventh Conf. on Coastal Engrs., Vol. 1, Ch. 47, pp. 723-742

38. POSTMA, H.; 1967
Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment
In: Estuaries, G.H. Lauff (ed.), pp. 158-179; Amer. Assoc. Adrianc. Sci.; Publ. 83; Washington

39. INGLIS, C.C. en ALLEN, F.H.; 1957
The regimen of the Thames estuary as effected by currents and river flows
Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 7, pp. 827-868

40. Nedeco; 1965
A study on the siltation of the Bangkok Port Channel
Vol. I: Summary and Conclusions
Vol. II: The field investigation
Vol. III:
Netherlands engineering consultants The Hague - Holland

41. ALLEN, G.P. SANZY, G. en CASTEING, P.; 1976
Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde Estuary, France
In: M. Wiley (ed.) Estuarine Processer, Vol. II, pp. 63-81

42. GALLENNE, B.; 1974
Study of fine material in suspension in the estuary of the Loire and its dynamic grading
Estuarine and coastal marine sciences, 2, pp. 261-272

43. KIRBY, R. en PARKER, W.R.; 1977
The Physical characteristics and environmental significance of fine sediment suspensions in estuaries
Symposium on Estuaries, Geophysics and the Environment Geophysics Research Board

REFERENTIES (vervolg)

44. KIRBY, R. en PARKER, W.R.; 1979
Observation of fine sediment behaviour
In: First International conference on cohesive sediments, Cambridge
45. IPPEN, A.T. (ed.); 1966
Estuary and coastline hydrodynamics; McGraw-Hill
46. OWEN, M.W.; 1977
Problems in modeling of transport, erosion and deposition of cohesive sediments
In: E.D. Goldberg et al (eds.). The Sea, Volume 6, Marine Modelling, hoofdstuk 12, pp. 515-537
47. KIRBY, R. en PARKER, W.R.; 1980
Fine sediment studies relevant to dredging practice and control
Proc. Second International Symposium on Dredging Technology, Texas A&M University, pp. 15-26
48. ALLERSMA, E., HOEKSTRA, A.J. en BIJKER, E.W.; 1967
Transport patterns in the Chao Phya Estuary
Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 47
49. ALLEN, G.P. BONNEFILLE, R., COURTOIS, G. en MIGNIOT, C.; 1974
Processus de sédimentation des vases dans l'estuaire de la Gironde; la Houille Blanche no. 1/2, pp. 129-136
50. NICHOLS, M., FAAS, R. en THOMPSON, G.; 1979
Estuarine fluid mud: its behavior and accumulation
Final report to Virginia Institute of Marine Science, Gloucester Point, Virginia
51. KUENEN, P.H.; 1950
Turbidity currents of high density
Rept. 18th Int. Geol. Congress, part 8, London; pp. 44-52

REFERENTIES (vervolg)

52. KUENEN, P.H.; 1965
Experiments in connection with turbidity currents and clay suspensions
Celston Res. Soc., Univ. Bristol
53. MIDDLETON, G.V.; 1966 en 1967
Experiments on density and turbidity currents
I. Motion of the head, Can. J. Earth Sci, 3, pp. 523-546
II. Uniform flow of density currents, Can. J. Earth Sci., 3, pp. 627-637
III. Reposition of sediment; Can. J. Earth Sci., 4, pp. 475-505
54. KONING, J. de; 1970
Neue Erkenntnisse beim Gewinnen und Transport von Sand in Spülprojekt Venserpolder, VOI Berichte no. 158; Bauen im Ausland
55. LEAN, G.H.; 1980
Estimation of maintenance dredging for navigation channels
Hydraulics Research Station, Wallingford
56. EINSTEIN, H.A.; 1941
The viscosity of highly concentrated underflows and its influence on mixing
Trans. Amer. Geoph. Un., Hydrology, pp. 597-603
57. ODD, M.V.M. en OWEN, M.W.; 1972
A two layer model of mud transport in the Thames Estuary
Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Supplement 1972 (IX), Reper 7517 S, pp. 175-205
58. MIGNIOT, C.; 1977
Action des courants, de la houle et du vent sur les sediments
La Houille Blanche, no. 1, pp.9-47

REFERENTIES (vervolg)

59. LHERMITTE, M.P.; 1958
Contribution à l'étude de la couche limite des houles progressives
Application aux mouvements de matériaux sous l'action des houles;
Paris, imprimerie nationale, COEC no. 136

60. PARKER, W.R., SMITH, T.J. en KIRBY, R.; 1980
Observation of density stratification due to suspended fine sediment
Second International Symposium on stratified flows, Vol. II, pp. 955-966

61. EINSELE, G., OVERBECK, R., SCHWARZ, H.U. en UNSOLD, G.; 1974
Mass physical properties sliding and erodibility of experimentally deposited and differently consolidated muds
Sedimentology, 21, pp. 339-372

62. GRAF, W.H.; 1971
Hydraulics of sediment transport
New York, McGraw-Hill

63. HJULSTRÖM, F.; 1935
The morphological activity of rivers as illustrated by rivers Fyris
Bull. Geol. Inst. Uppsala,
Vol. 25, (Ch. III)

64. SUNDBORG, A.; 1956
The river Klazälven: A study of fluvial processes
Geogr. Ann., 38, pp. 127-316

65. SOUTHARD, J.B., YOUNG, R.A. en HOLLISTER, D.C.; 1971
Experimental erosion of calcareous ooze
J. Geophys. Res. 76, pp. 5903-5909

REFERENTIES (vervolg)

66. SOUTHARD, J.B.; 1974
Erodibility of fine abyssal sediment
In: A.L. Inderbitzen (ed.): Deep Sea Sediments, Physical and Mechanical properties
Plenum Press; pp. 367-379

67. RAUDKIVI, A.J. en HUTCHISON, D.L.; 1974
Erosion of kaolinite clay by flowing water
Proceedings of Roy. Soc. London, A 337, no. 1611, pp. 537-554

68. ARULANANDAN, K., LOGANATHAN, P. en KRONE, R.B.; 1975
Pore and eroding fluid influences on surface erosion of soil
Journal of the Geotechn. Engineering Division, Vol. 100, no. GT1, pp. 51-66

69. PARTHENIADES, E. en PAASWELL, R.E.; 1970
Erodibility of channels with cohesive boundary
Proc. ASCE, Journ. of the Hydraulics Division, Vol. 96, HY3, pp. 755-771

70. SMERDON, E.T. en BEASLY, R.P.; 1959
The tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soils. Research Bulletin 715
University of Missouri, College of Agriculture, Agr. Exp. Station

71. DUNN, I.S.; 1959
Tractive resistance of cohesive channels
Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. ASCE, Vol. 85, no. SM3, pp. 1-24

72. PAASWELL, R.E.; 1973
Causes and mechanisms of cohesive soil erosion: The state of the art
Highway Research Board, 135, no. 52, pp. 52-73

REFERENTIES (vervolg)

73. TERWINDT, J.H.J. en BREUSERS, H.N.C.; 1972
Experiments on the origin of flaser, lenticular and sand-clay alternating bedding
Sedimentology, Vol. 19, no. 1/2; pp. 85
74. ALLEN, J.R.L.; 1969
Erosional current marks of weakly cohesive mud beds
J. Sedim. Petrol., 39, pp. 607-623
75. ALLEN, J.R.L.; 1971
Transverse erosional marks of mud and rock, Their physical and geological significance
Sedim. Geol. 5, pp. 165-385
76. THORN, M.F.C. en PARSONS, J.G.; 1980
Erosion of cohesive sediments in estuaries: an engineering guide
Proceedings of Third International Symposium on Dredging Technology; Bordeaux, 5-7 March 1980, pp. 349-358
77. LAMBERMONT, J. en LEBON, G.; 1978
Erosion of cohesive soils
Journal of Hydraulic Research, Vol. 16, no. 1, pp. 27-44
78. CORMAULT, P.; 1971
Determination experimentale du debit solide d'erosion de sediment fins cohesifs
Proc. 14 congr. IAHR, Paris
79. HARRISON, A.J.M. en OWEN, M.W.; 1971
Siltation of fine sediments in estuaries
Paper D1, Proc. 14 congr. IAHR, Paris
80. JACKSON, R.G.; 1976
Sedimentological and fluid dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 77, part 5, pp. 531-560

REFERENTIES (vervolg)

81. SUMER, S.M. en DEIGAARD, R.; 1979
Experimental investigations of motions of suspended heavy particles and the bursting process
Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering Technical University of Denmark; Series paper no. 23

82. HEATHERSHAW, A.D.; 1976
Measurements of turbulence in the Irish Sea Benthic Boundary Layer
In: I.N. McCave (ed.): The Benthic Boundary Layer, Plenum Press; pp. 11-32

83. MOLLO-CHRISTENSEN, E.; 1973
Intermittency in large-scale turbulent flows
Ann. Rev. Fluid Mech. 5, pp. 101-118

84. NAKAGAWA, H. en NEZU, I.; 1981
Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open channel flow
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 104, pp. 1-43

85. RHOADS, P.C.; 1963
Rates of sediment reworking by *Yoldia limatula* in Buzzards Bay, Massachusetts and Long Island Bay
Journal of Sedimentary Petrology, 33, pp. 723-727

86. EISMA, D. en KALF, J.; 1980
The formation of small particles and aggregated in the Rhine estuary
Netherlands Journal of Sea Research; 14 (2); pp. 172-191

87. SANTEMA, P.; 1954
Enkele beschouwingen over de aanslibbing van havens langs de Rotterdamse Waterweg
De Ingenieur, 66e jrg. no. 2, blz. B1-B8

REFERENTIES (vervolg)

88. Waterloopkundig Laboratorium; 1958
Bottlekplan, deel II; berekening slibbezwaar
Rapport M 552
89. Werkgroep Slib Rijkswaterstaat; 1976
Slib in deltawateren
90. CROAD, R.N.; 1981
Physics of erosion of cohesive soils
Thesis University of Auckland, Private Bag, Auckland, New Zealand
91. Waterloopkundig Laboratorium; 1979
Programma van eisen zout/zoetgoot
92. Waterloopkundig Laboratorium; 1970
Reproductie zouttoestand getijrivieren; Systematisch onderzoek variatie randvoorwaarden en stromingskondities
Rapport M 896-X
93. Waterloopkundig Laboratorium; 1971
Reproductie zouttoestand getijrivieren; Dimensie-analyse zoutindringing; Systematisch onderzoek
Rapport M 896-XV
94. Waterloopkundig Laboratorium; 1970
Reproductie zouttoestand getijrivieren; onderzoek bodemruwheid
Rapport M 896-IX
95. Waterloopkundig Laboratorium; 1970
Reproductie Rotterdamse Waterweg in getijgoot
Rapport M 896-VI
96. Waterloopkundig Laboratorium; 1980
Toepasbaarheid getijmodel Rijnmond voor onderzoek sedimentatieproblematiek; verkennend onderzoek in getijmodel Rijnmond en getijgoot, S 269-I

REFERENTIES (vervolg)

- 97 Waterloopkundig Laboratorium; 1981
Grondslagen waterhuishoudkundig onderzoek ten behoeve van het Noorde-
lijk Deltabekken in het Getijmodel Rijnmond
Rapport M 1350-XI
- 98 REES, A.J. van, KUUR, P. van der, STROBAND, H.J.; 1974
Experiences with tidal salinity model Europoort
Delft Hydraulics Laboratory, Publ. 125
- 99 CAILLAT, J.M. en MIGNIOT, C.; 1981
Modelisation de la vase et de la salinité dans un estuaire
XIX congress IAHR New. Delhi, India, Vol. V, paper no.9
- 100 Waterloopkundig Laboratorium; 1980
Slibconcentratiemeters; Inventarisatie en evaluatie
Speurwerkverslag S 453 deel I
- 101 Waterloopkundig Laboratorium; 1981
Slibconcentratiemeters; Oriënterende experimentele vergelijking
Speurwerkverslag S 453 deel II
- 102 BOCHOVE, G. van, RIJT, R. van en VEEN, R. van der; 1980
Silt pumping station at Europoort
Land + Water International, no. 41; pp. 27-32
- 103 THORN, M.F.C.; 1975
Deep tidal flow over a fine sand bed
16th Congress International Association for Hydraulic Research, Sao
Paulo, Paper A 27, pp. 217-233
- 104 Schmidt, W; 1925
Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen
Probleme der Kosmischen Physik, Volume 7, Hamburg

REFERENTIES (vervolg)

- 105 Delft Hydraulics Laboratory; 1973
Computational methods for the vertical distribution of flow in shallow water
Report on literature study, Report 152
- 106 ROUSE, H.; 1937
Modern conceptions of the mechanics of turbulence
Trans. Am. Soc. Civil Congr., Vol. 102, pp. 463-505
- 107 EINSTEIN, H.A.; 1950
The bed-load function for sediment transportation in open channel flows
U.S. Rept. Agric. Soil Conserv. Serv., Techn. Bulletin no. 1026
- 108 HUNT, J.N.; 1954
The turbulent transport of suspended sediment in open channels
Proc. Roy. Soc. London, Vol. 224 A, pp. 322-335
- 109 Waterloopkundig Laboratorium; 1973
Zandtransport in suspensie, studie diffusietheorie
Verslag literatuuronderzoek, R 783 deel I
- 110 VANONI, V.A.; 1946
Transportation of suspended sediment by water
Trans. ASCE, Vol. 111, pp. 67-133
- 111 EINSTEIN, H.A. en N. CHIEN; 1954
Second approximation to the solution of the suspended-load theory
Univ. Calif. Inst. Eng. Res., nr. 3
- 112 EINSTEIN, H.A. en N. CHIEN; 1955
Effects of heavy sediment concentration near the bed on velocity and sediment distribution
M.R.D. Sediment series no. 8, Univ. of Calif., Berkeley, Californië

REFERENTIES (vervolg)

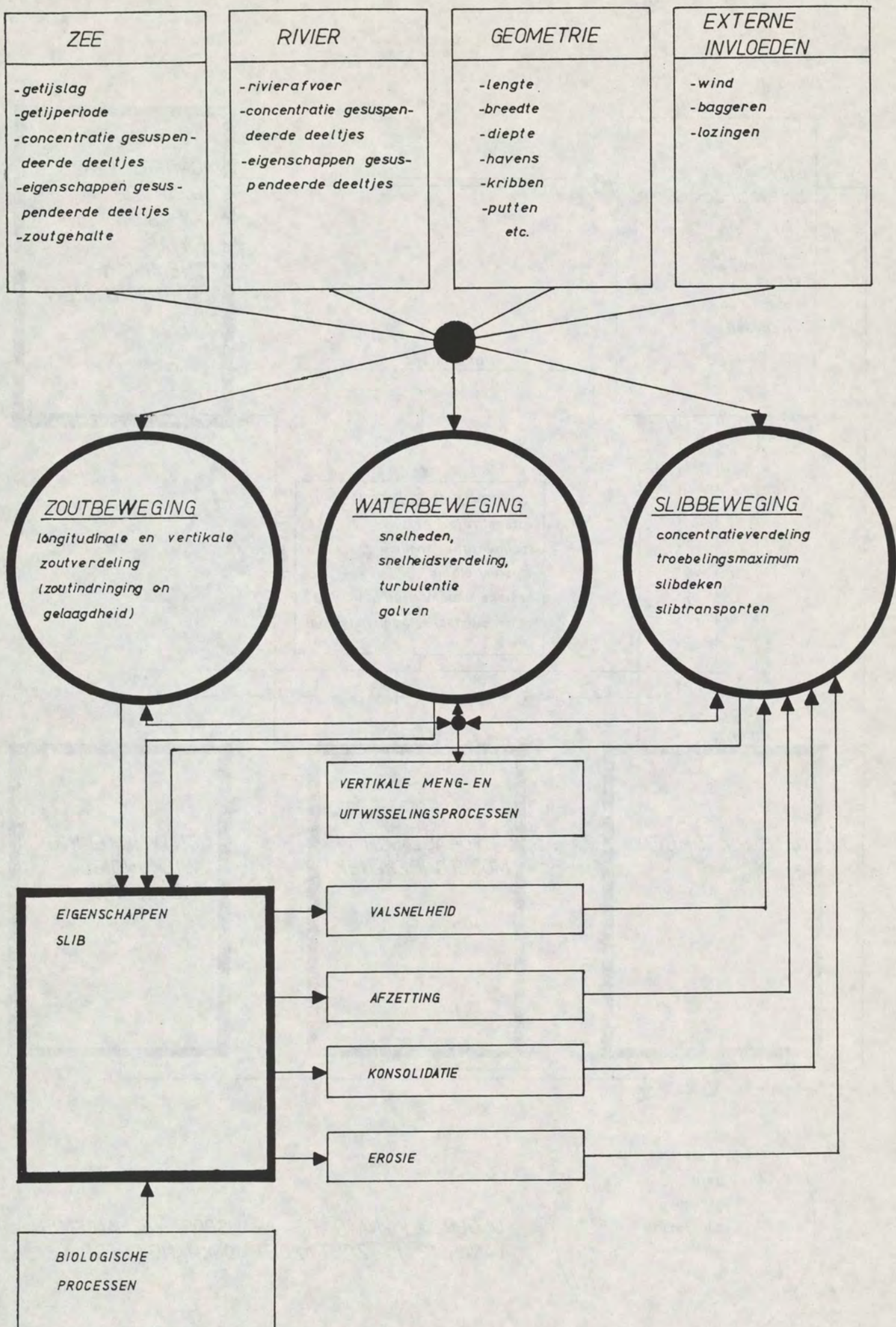
- 113 VANONI, V.A., en G.N. NICOMOS; 1960
Resistance properties of sediment-laden streams
Trans. ASCE, Volume 125-I
- 114 COLEMAN, N.L.; 1981
Velocity profiles with suspended sediment
Journal of Hydraulic Research, 19, no. 3; pp. 211-229
- 115 MEHTA, A.J. en E. PARTHENIADES; 1973
Depositional behavior of cohesive sediments
Technical Report no. 16; Coastal and Oceanographic Engineering Lab.
University of Florida, Gainesville, Florida
- 116 GUST, G.; 1976
Observations on turbulent-drag reduction in a dilute suspension of
clay in sea-water
Journal of Fluid Mechanics, Vol. 75, part 1, pp. 27-47
- 117 LUMLEY, J.L.; 1969
Drag reduction of additives
Annual review of Fluid Mechanics, 1, pp 367
- 118 KARELSE, M.; 1974
Vertical exchange coefficients in stratified flows: Data and empirical correlations
Hoofdstuk 2 uit: Momentum and mass transfer in stratified flows,
report on literature study, R 880
- 119 JOSEPH, J.; 1954
Die Stickstoffführung von Gezeitenströmung als Austauschproblem
Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A, Band
7, pp. 482-501

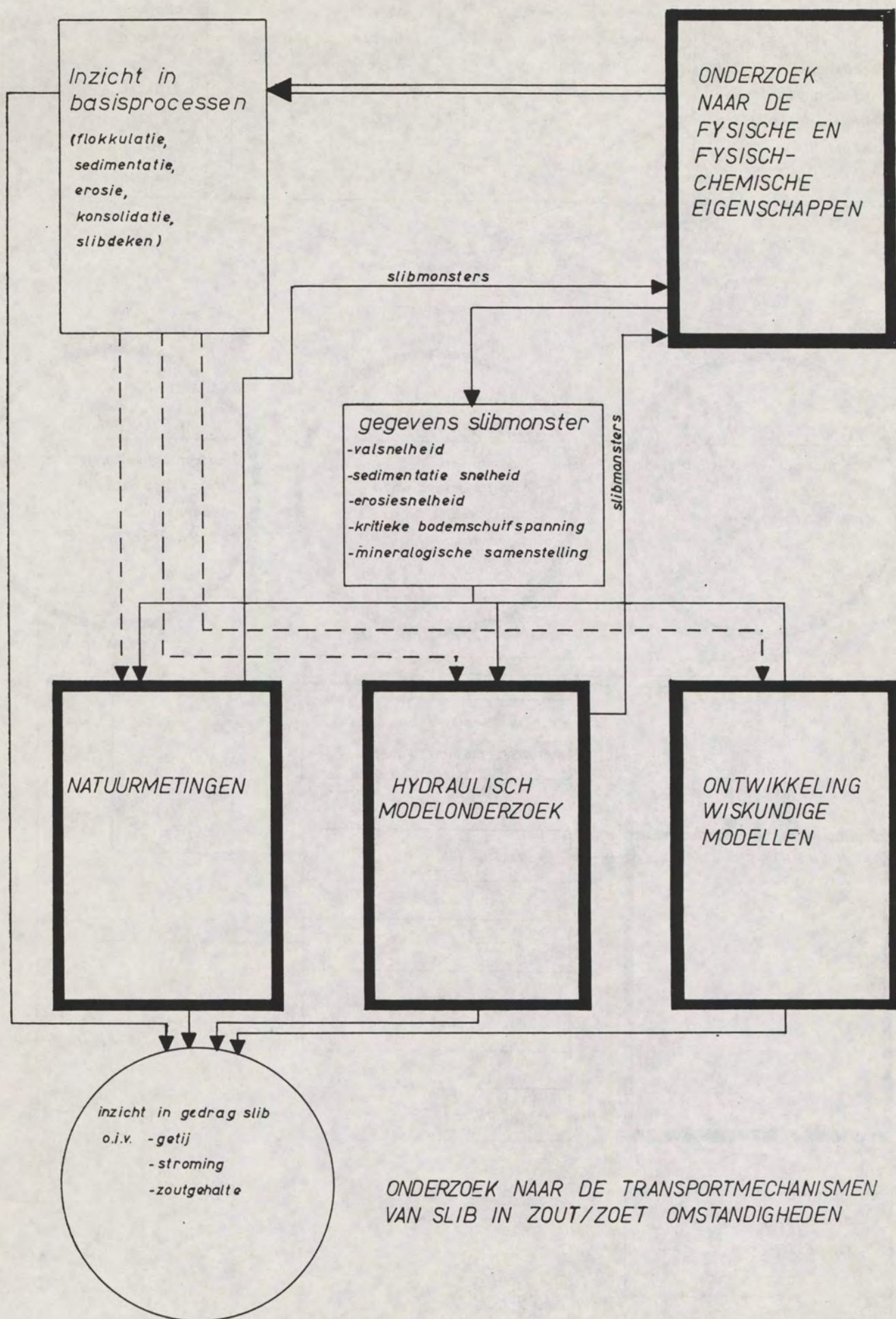
REFERENTIES (vervolg)

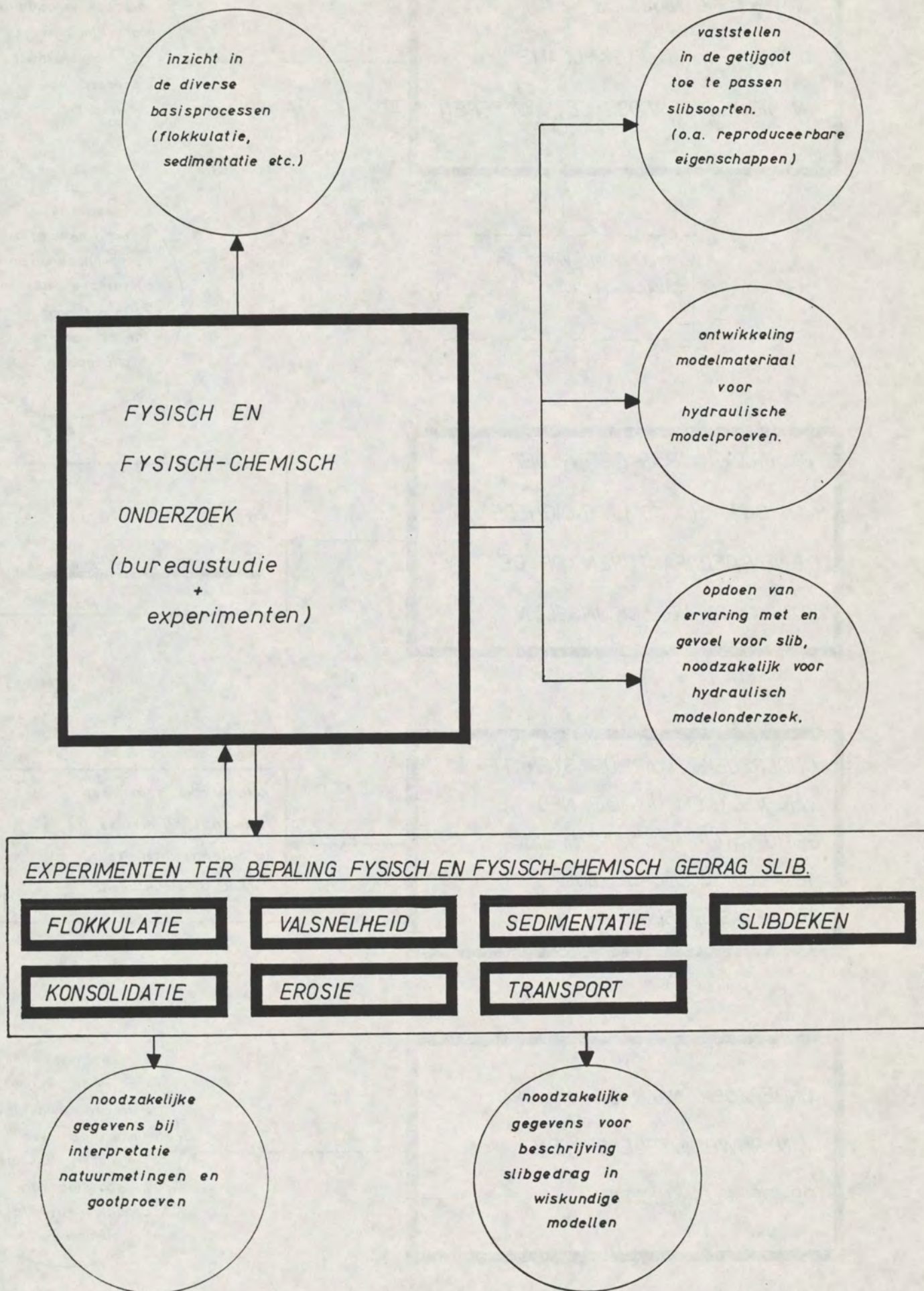
- 120 HALLIWELL, A.R. en B.A. O'CONNOR; 1966
Suspended sediment in a tidal estuary
Proc. of the tenth Conference on Coastal Engineering, Tokyo
Am. Soc. of Civ. Engineer, Vol. 1, Part 2, pp. 687-706
- 121 PERRELS, P.A.J. en M. KARELSE, 1981
A two-dimensional, laterally averaged model for salt intrusion in estuaries
Hoofdstuk XIII in: H.B. Fischer (ed.): Transport Models for Inland and Coastal Waters
Proceedings of a Symposium on Predictive ability, Academic Press, New York
- 122 Rodi, W.; 1980
Turbulence models and their application in hydraulics
State of the art review
Edited by IAHR
- 123 ZIMMERMAN, I.T.F.; 1981
Dynamics, diffusion and geomorphological significance of tidal residual eddies
Nature, 290, pp. 549-555
- 124 DRONKERS, J. en J.T.F. ZIMMERMAN; 1981
Some principles of mixing in tidal lagoons
Invited lecture at the "International Symposium on Coastal lagoons", Bordeaux, 8-14 september 1981
- 125 ABRAHAM, G., G.C. VAN DAM, A.G. VAN OS, J. VOOGT; 1981
Toegepast onderzoek voor de waterstaat. Stroom en Transportverschijnselen. Middellange-termijnonderzoeksplan
Waterloopkundig Laboratorium, verslag R 1706

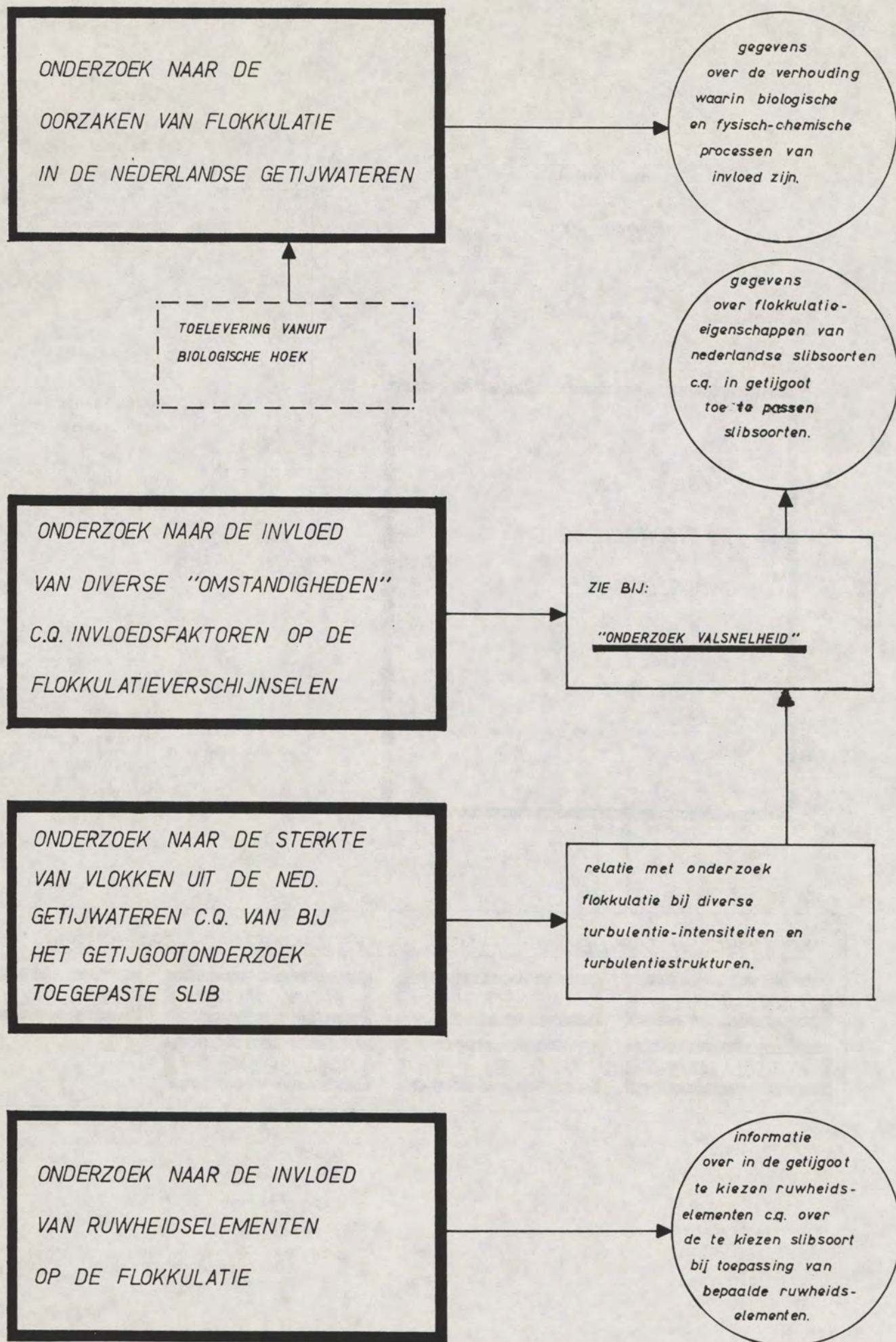
REFERENTIES (vervolg)

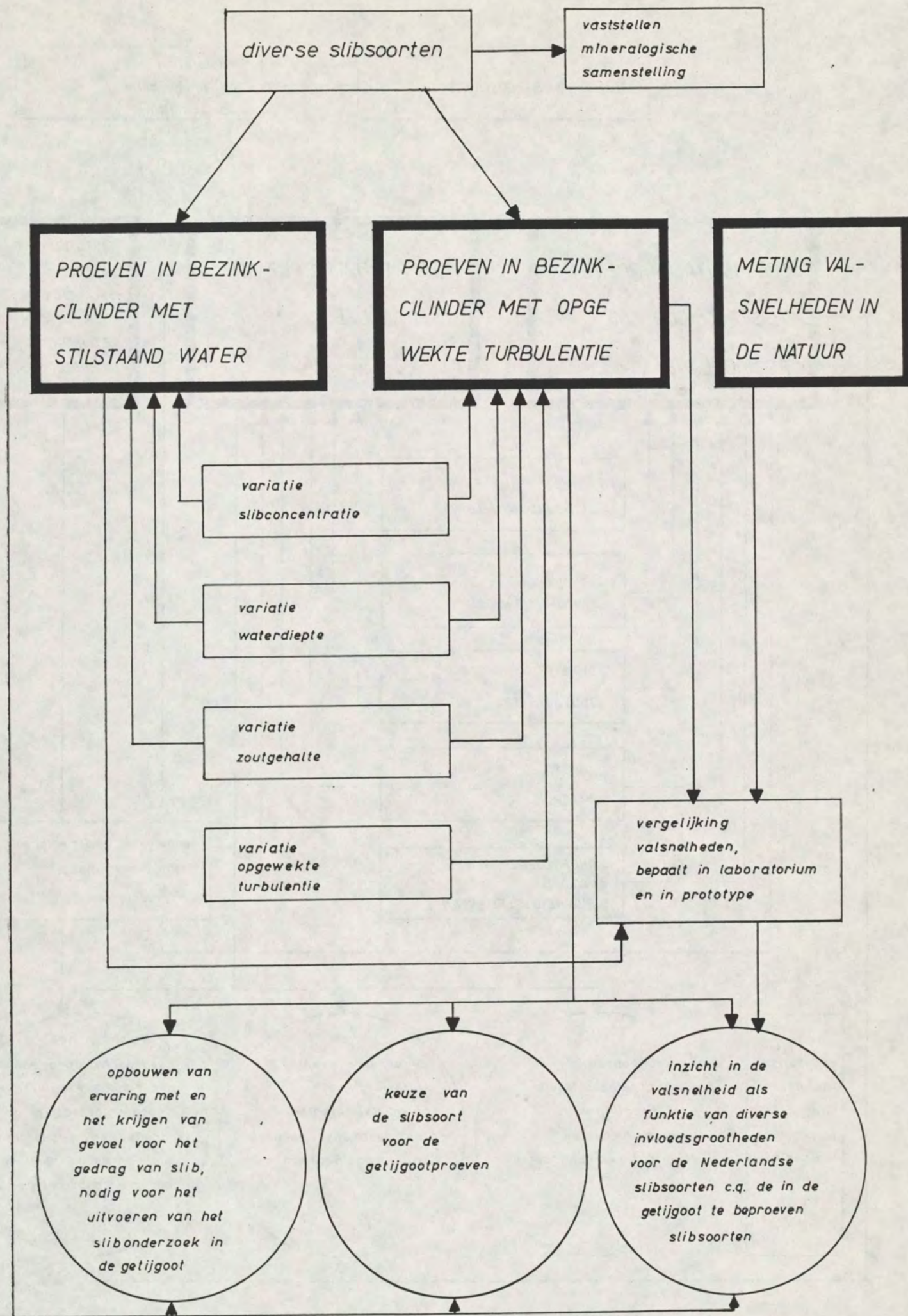
- 126 CHIN, C-L en MESPARRAN, J.E.; 1966
Effects of secondary flow on sediment transport
Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 92, no. HY 5,
pp. 57-70
- 127 COLEMAN, N.L.; 1970
Flume studies of the sediment transfer coefficient
Water Resources Research, Vol. 6, no. 3, pp. 801-809
- 128 KERSSENS, P.J.M., A. PRINS en L.C. van RIJN; 1979
Model for suspended sediment transport
Proc. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 105, No. HY5,
pp. 461-476
Ook: Delft Hydraulics Laboratory Publication no. 221, november 1979
129. Meade, R.H.; 1972
Transport and deposition of sediments in estuaries
In: Nelson, B.W. (Ed.) Environmental Framework of Coastal Plain
Estuaries. Geol. Soc. Amer. Memoir 133, Boulder, CO: 91-120
130. Williams, D.I.A. and James, A.E.; 1978
Rheology of Brisbane and Rotterdam muds
Reports to Hydraulics Research Station, Wallingford, U.K., Depart-
ment of Chemical Engineering, University College, Swansea, U.K.
131. Mehta, A.J. and Partheniades, E.; 1979
Kaolinite resuspension properties
Techn. Note, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 104,
No. HY4, Proc. Paper 14477, April, pp. 409-416

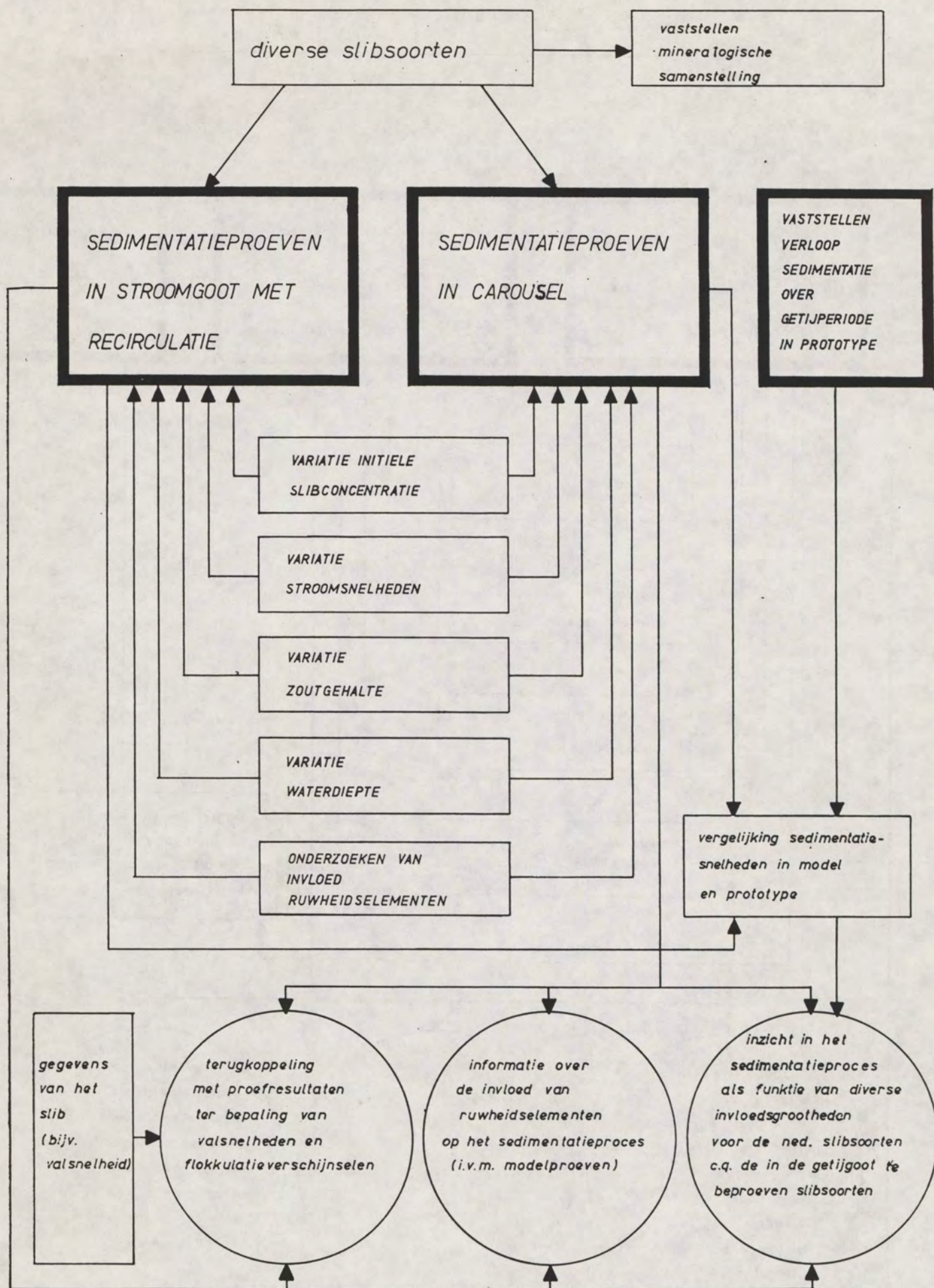


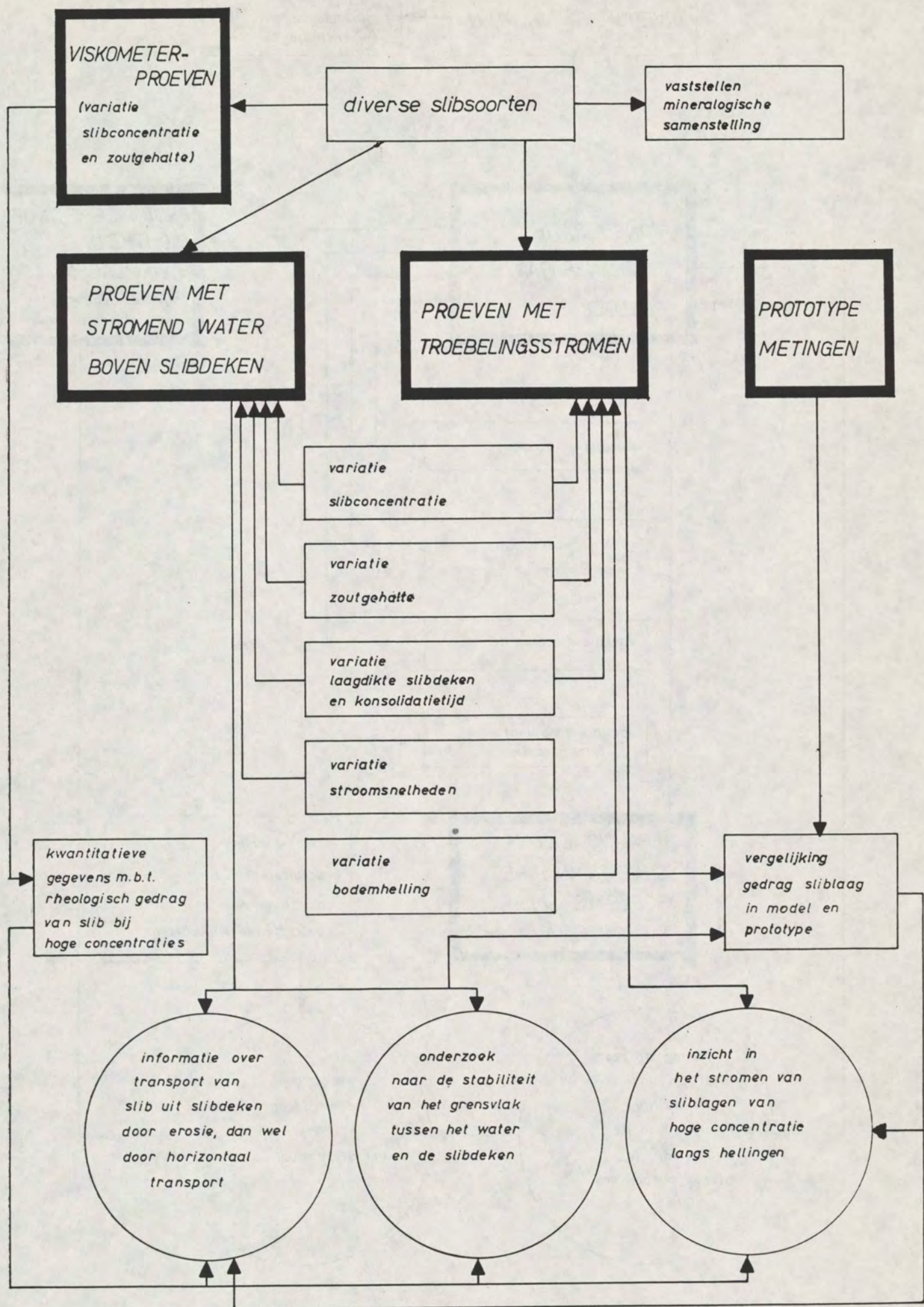


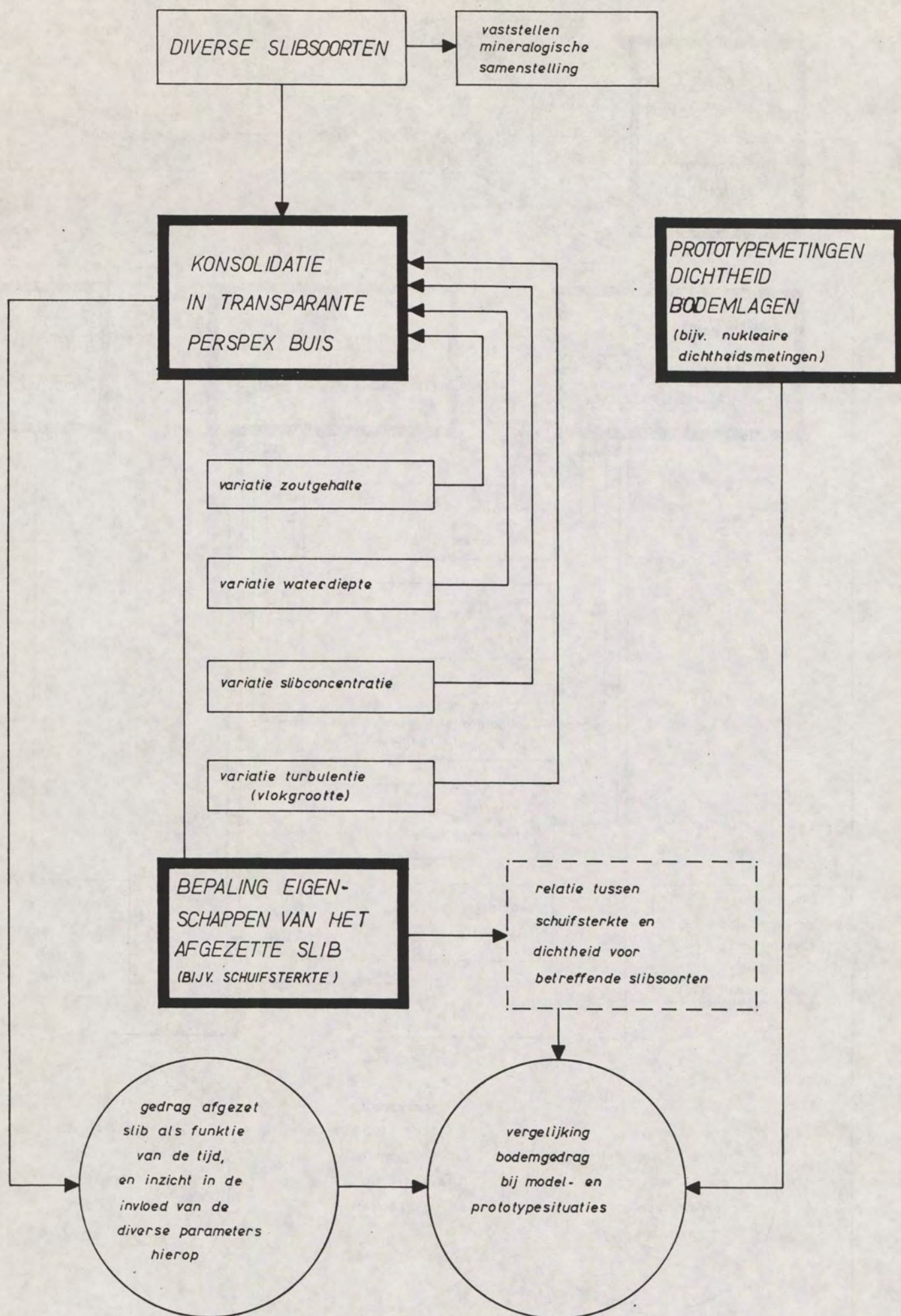


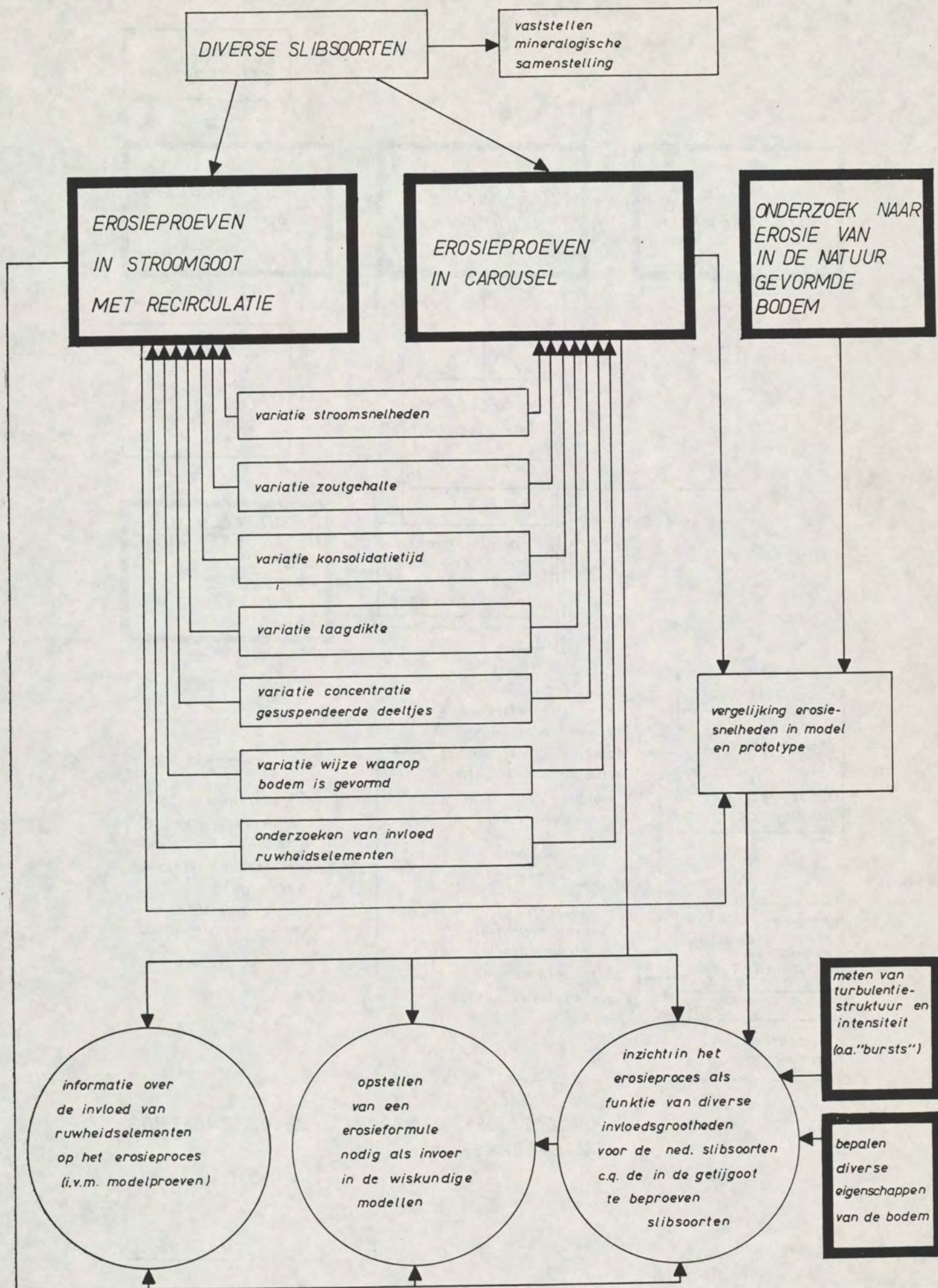


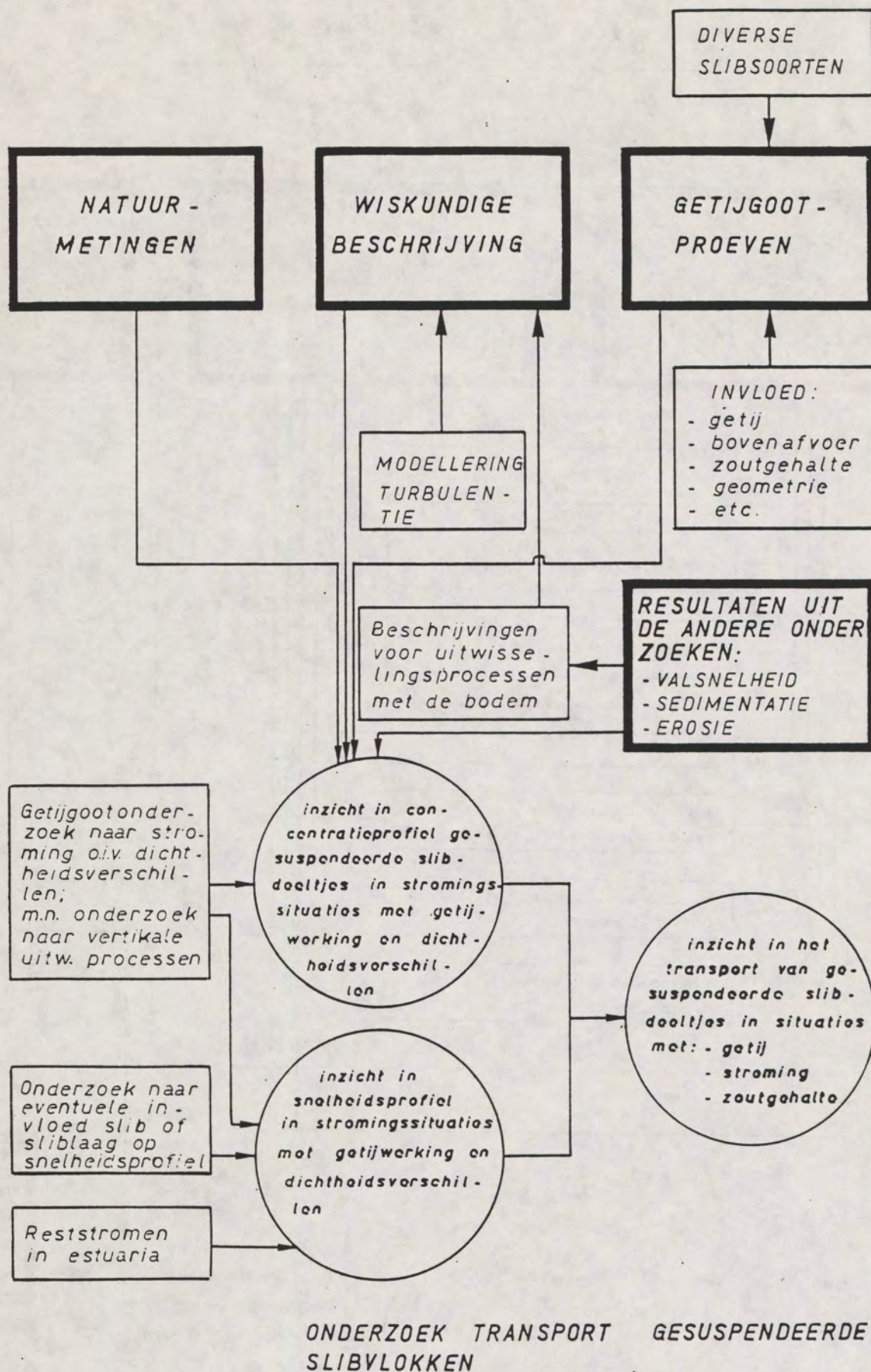


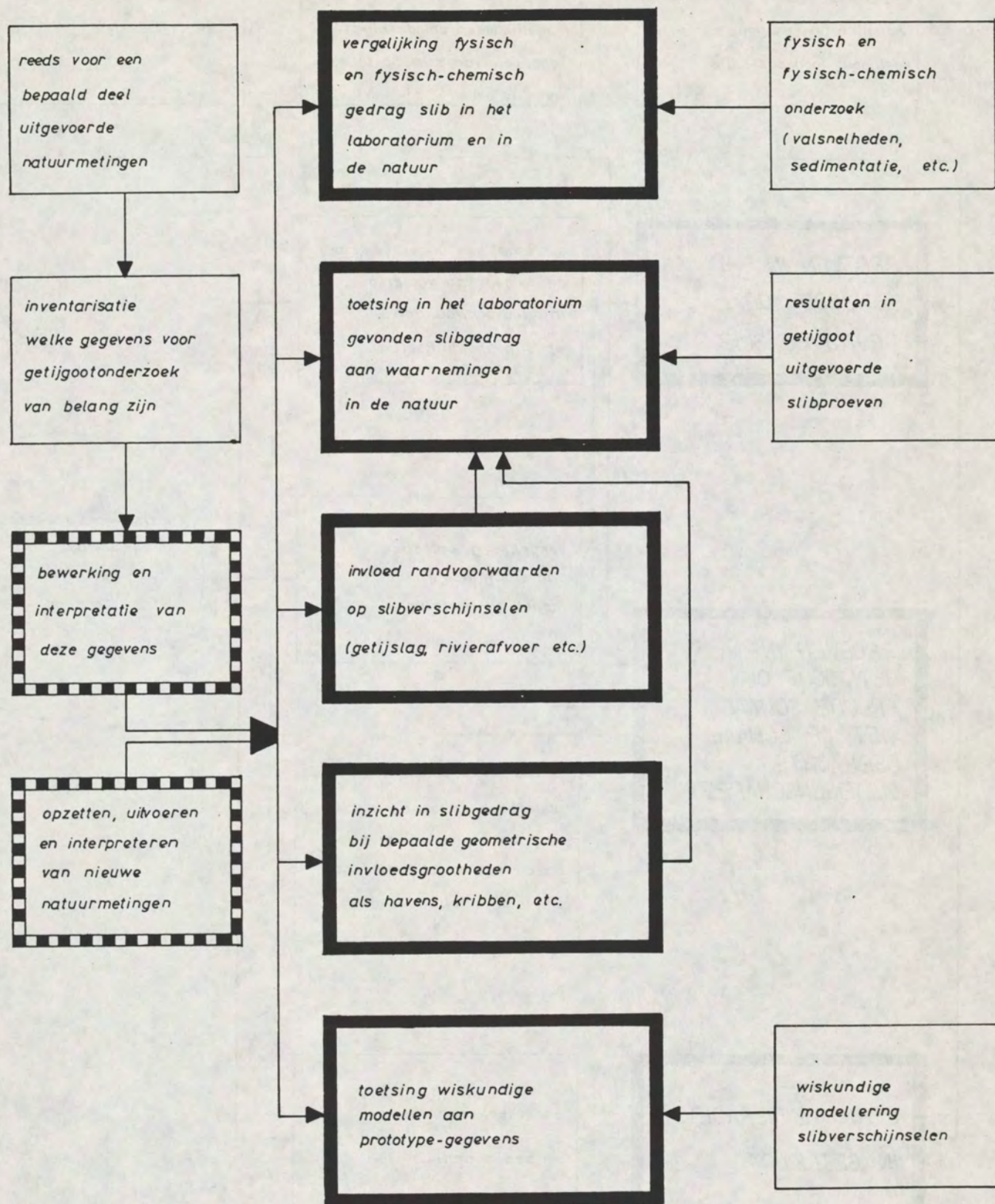


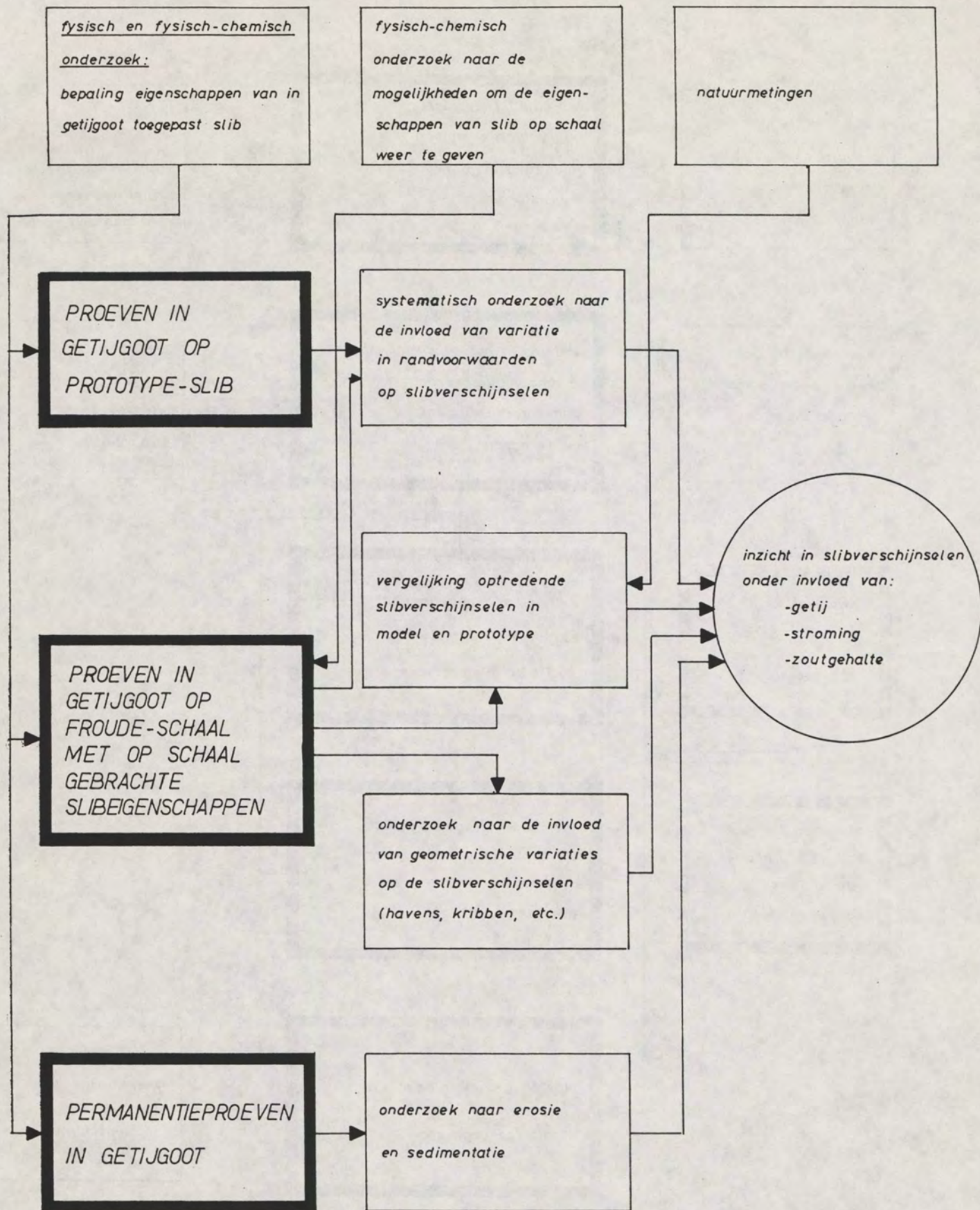












Facilities

		laboratory	length (m)	width (m)	construction height (m)	max. water depth (m)	5) wave generator 4) and wave period range (s)	max. wave height (m)	wind velocity (m/s)	water circulation (m ³ /s)	sediment transport 5) 6)	available pressure (bar)
WIND WAVE FLUMES												
8 m wind wave flume	1)	D	100	8	2.45	0.80	I	0.30	15	1	(+)	
4 m wind wave flume	1)	D	100	2	2.45	0.80	I	0.30	15	0.5	-	
wind wave flume	1)	V	100	4	2.00	0.80	I	0.30	25	2	-	
WAVE FLUMES												
Delta flume	1)	V	233	5	7.00	5.00	I	2.50	—	—	+	
Schelde flume	1)	V	55	1.00		1.00	I	0.30				
large wave flume	1)	V	100	3.00	3.00	2.50	I	0.30			(+)	
wave flume Room 5		D	30	0.50		0.50	R	0.20		0.05		
Penta flume		V	36	5.00	1.50	1.40	0.6 - 2.74	0.50		2.2	(+)	
flume 1		D	60	1.00		1.50	R	0.40		0.5	(+)	
flume 3		D	55	2.50		1.20	I	0.40		0.5	(+)	
wave tunnel		V	4	0.30	0.60	0.40	I	—	—	0.02	+	1
FLUMES												
large flume	1)	V	100	3.00	3.00	2.75	I	0.30		12	(+)	
tussenpadgoot		V	30	0.75	0.90					0.75	—	
small sand flume		V	30	0.50	0.60					0.03	+	
large sand flume		V	60	1.50	1.00	0.90				0.80	+	
experimental flume		D	6	0.80	1.10	1.00				0.80	—	
flume 2		D	45	1.00		1.60				0.70		
flume 4		D	35	5.00		1.20				1.00		
flumes 5 and 6		D	25	0.50		0.70				0.25		
suspended sediment flume	3)	D	30	1.00	1.50					1.25	(+)	
WAVE AND CURRENT BASINS												
wave and current basin		V	25	25		1.20	0.9 - 3	0.50		2.40	(+)	
wave basin Delft	2)	D	38	36		0.45	0.5 - 2	0.12		0.90	(+)	
Schelde basin	1)	V	25	11		0.50	I	0.25				
Harbour basin	1)	V	35	35		0.50	I	0.20				
CALIBRATION FACILITIES												
calibration flume for current/ flow meters		D	23	1.00	1.25	1.00				—	—	
calibration flume for current/ flow meters		V	20	0.60		0.70						
calibration rig for flow meters		D	25	Ø1.20						1.60		2
TESTING CIRCUITS												
test rig for valves		D	40	1.00						1.60		0.1 - 16
test rig for water and dredging pumps		D		Ø0.20						0.25		0.1 - 16
test rig for non-return valves		D	13	Ø0.20						0.2		0.1 - 6
test rig for acceptance test of pumps		D	6	3.00	2.40	2.20				0.2		

D = Delft laboratory

V = De Voorst laboratory

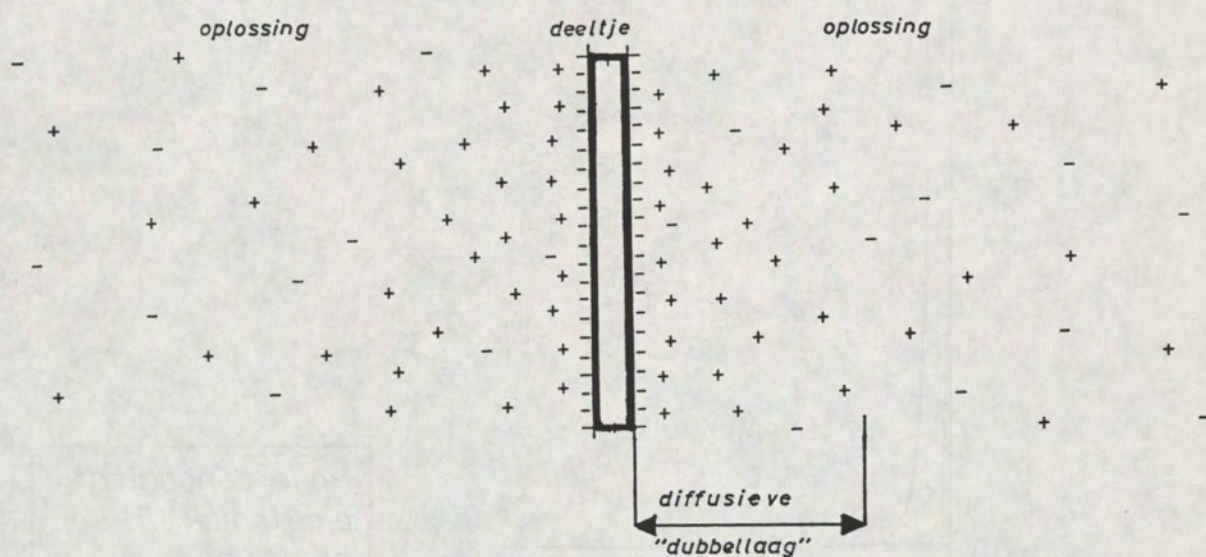
1) equipped with programmable wave generator

2) equipped with snake-type wave generator

3) circular flume

4) + = usual (+) = possible - = impossible

5) I = irregular R = regular



Uit: (6)

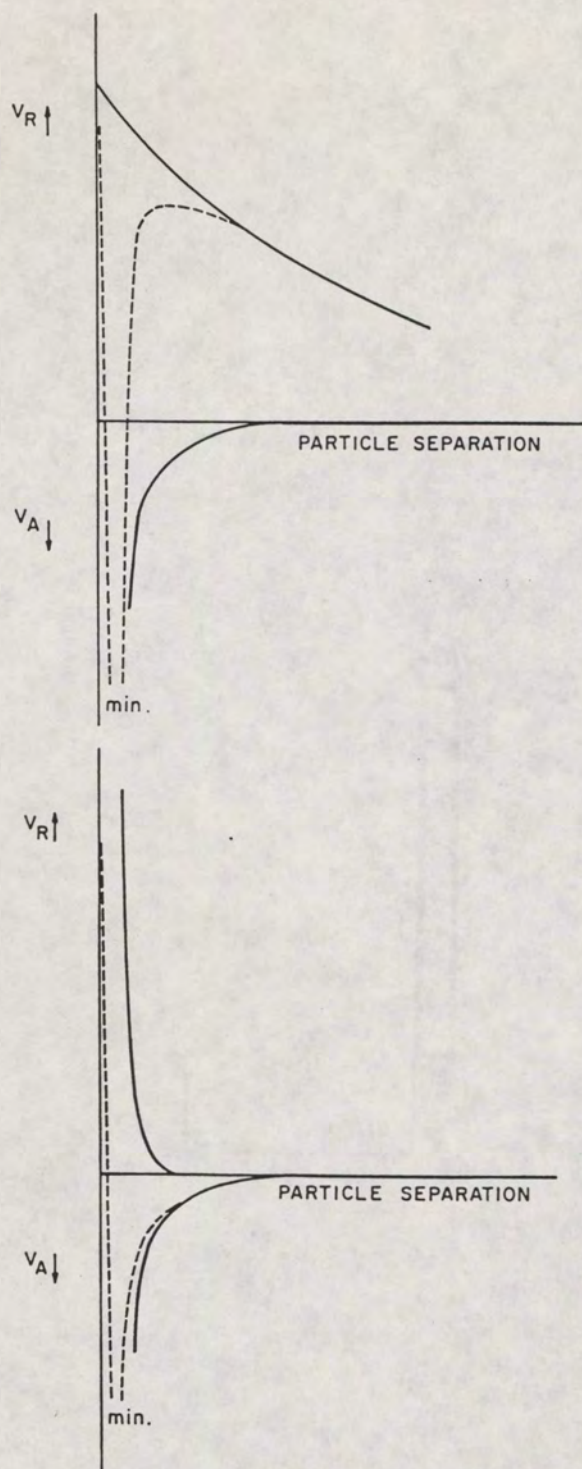
SLIBDEELTJES MET DIFFUSIEVE "DUBBELLAAG."

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

M 896

Fig. 1.

A4



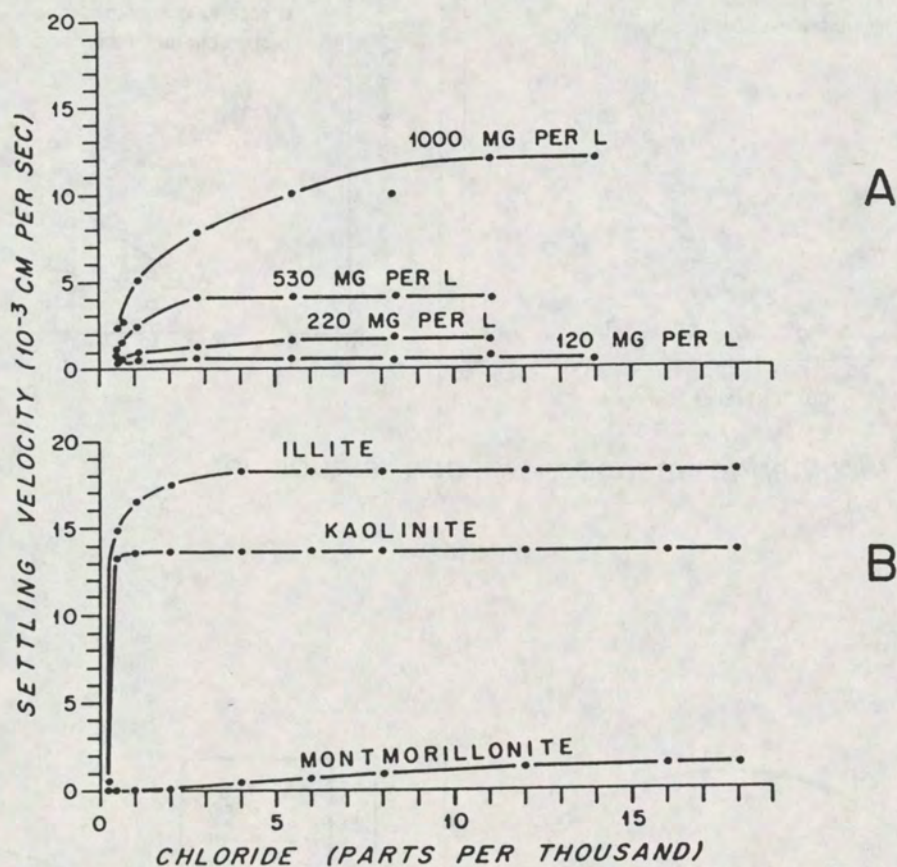
Lage concentratie
elektrolyet in
oplossing.

Hoge concentratie
elektrolyet in
oplossing.

V_A = aantrekkingsenergie.
 V_R = afstotingsenergie.
 ----- = netto interactie-energie.

Uit: (C).

AANTREKKINGS- EN AFSTOTINGSENERGIE ALS FUNCTIE		
VAN DE AFSTAND TOT DEELTJE.		A4
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM		Fig. 2.



Results of laboratory experiments on relations between settling velocities of fine-grained materials and chloride content of water. A. Different initial concentrations of mud from San Francisco Bay, consisting of illite, montmorillonite, kaolinite, quartz, chlorite, organic matter, and amorphous iron oxides (Krone, 1962, p. 21). B. Different clay minerals in suspensions of 2,000 mg clay per liter of water at 26° (Whitehouse and others, 1960, p. 34).

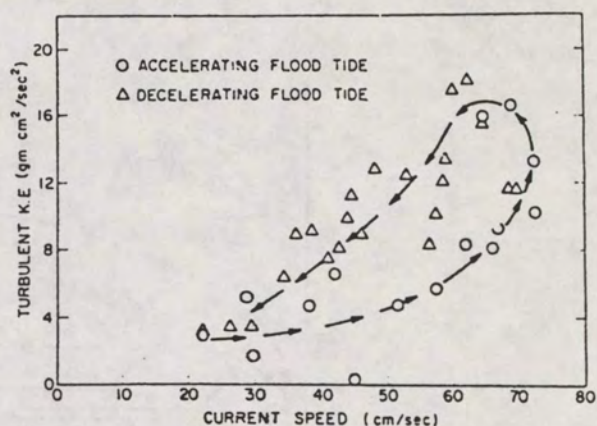
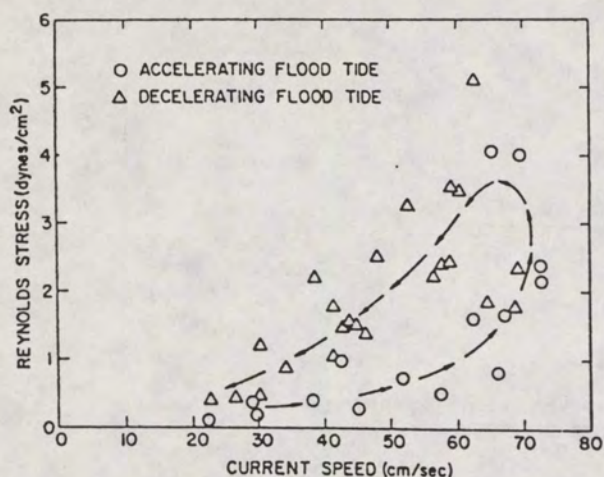
Uit: (99).

VALSNELHEID ALS FUNKTIE VAN HET ZOUTGEHALTE.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

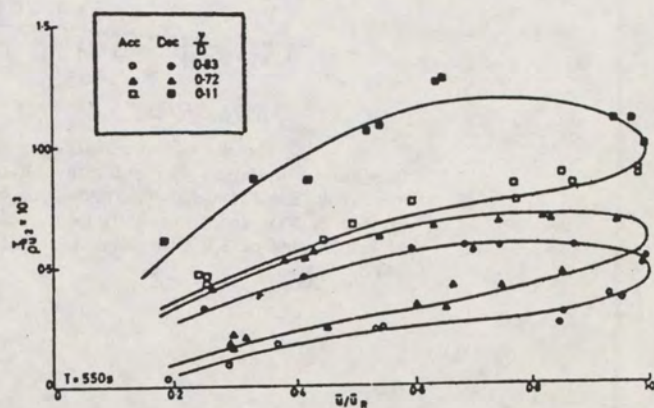
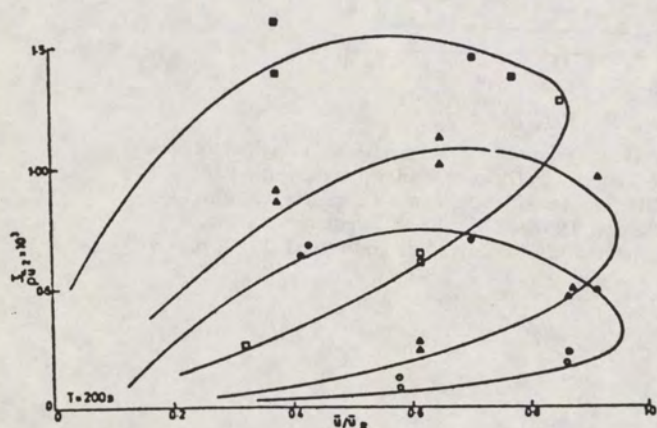
A4

Fig. 3.



Resultaten turbulentie-metingen in een estuarium.

Uit:(104).



Resultaten turbulentie-metingen in laboratoriumgoot.

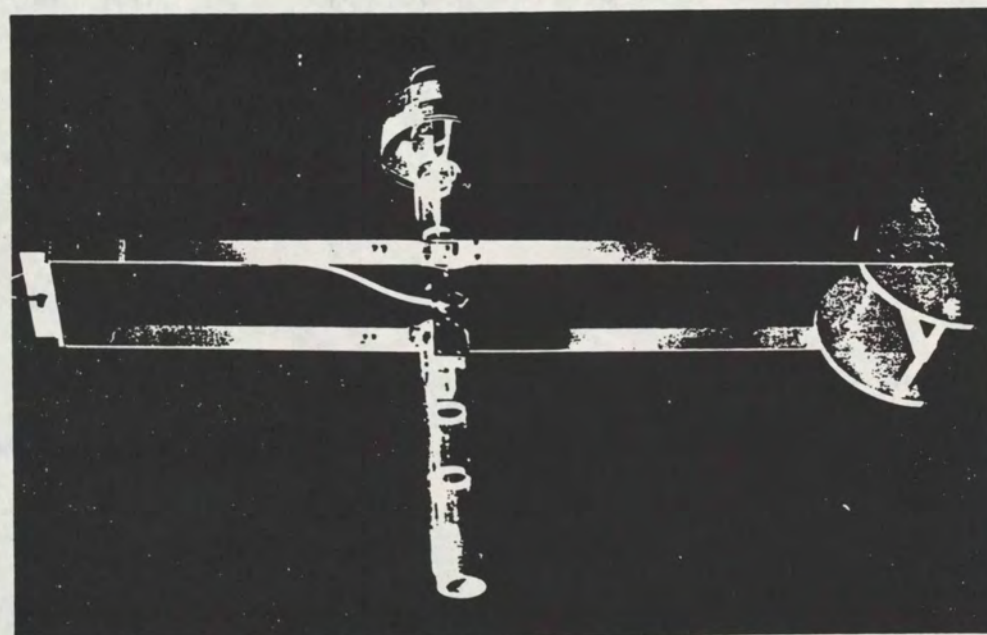
Uit:(105).

VARIATIE TURBULENTE ENERGIE EN TURBULENTE
SCHUIFSPANNING OVER VLOEDPERIODE.

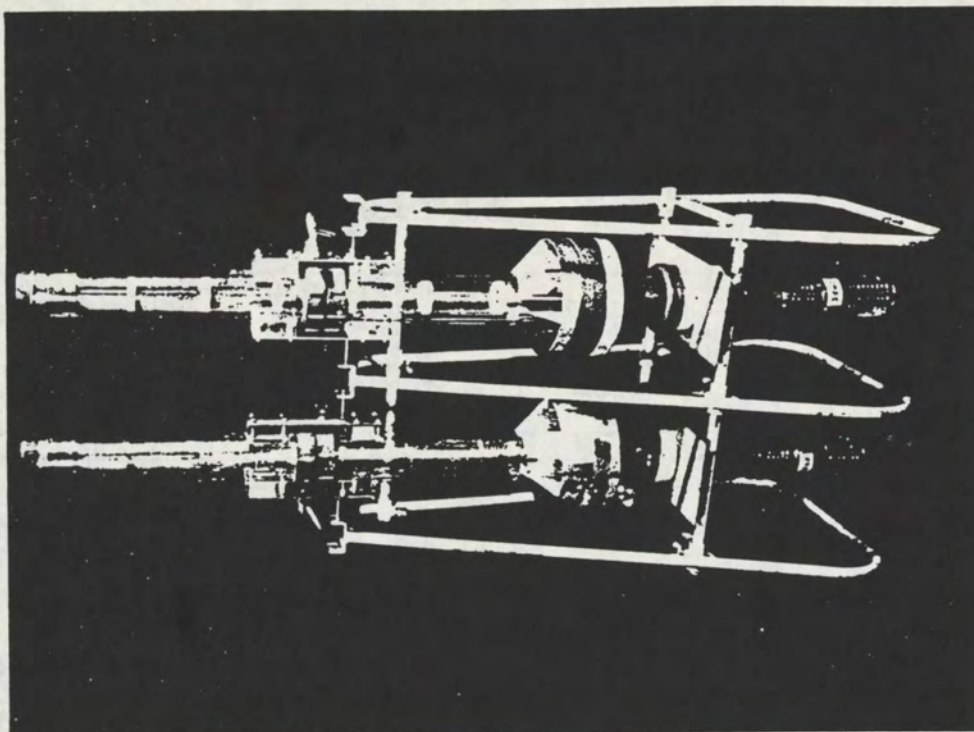
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 4.



1 Settling velocity sampling tube in submerged position



2 Settling velocity sampling tubes in sedimentation position

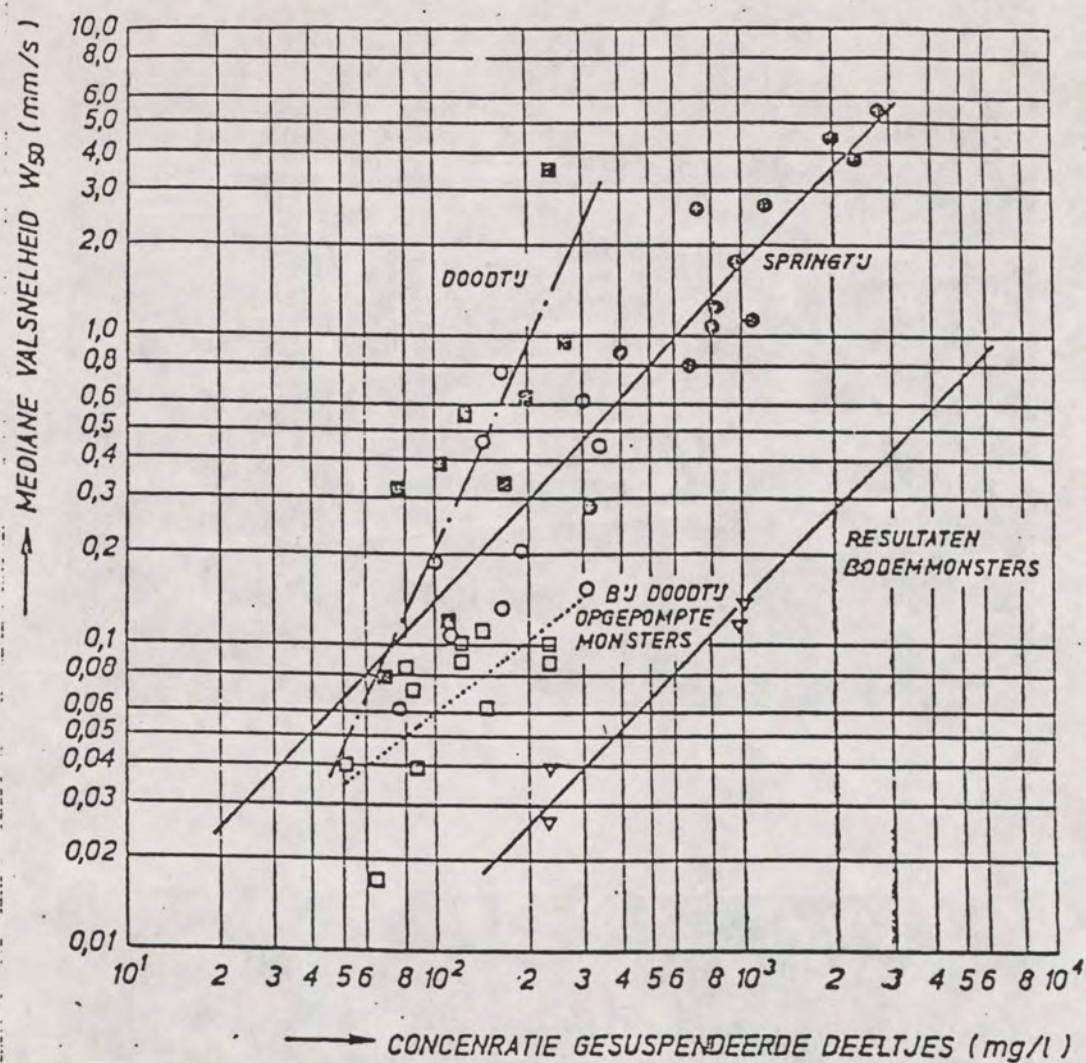
Uit: (27).

SETTLING TUBE VAN OWEN.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 5.



- SPRINGTJ, WOOLWICH, BEPALING MET MONSTERBUIS VAN OWEN
- SPRINGTJ, TILBURY, BEPALING MET MONSTERBUIS VAN OWEN
- DOODTJ, WOOLWICH, BEPALING MET MONSTERBUIS VAN OWEN
- DOODTJ, WOOLWICH, OPGEpompte MONSTERS
- ▼ BODEM GESTOKEN MONSTERS

Uit: (25).

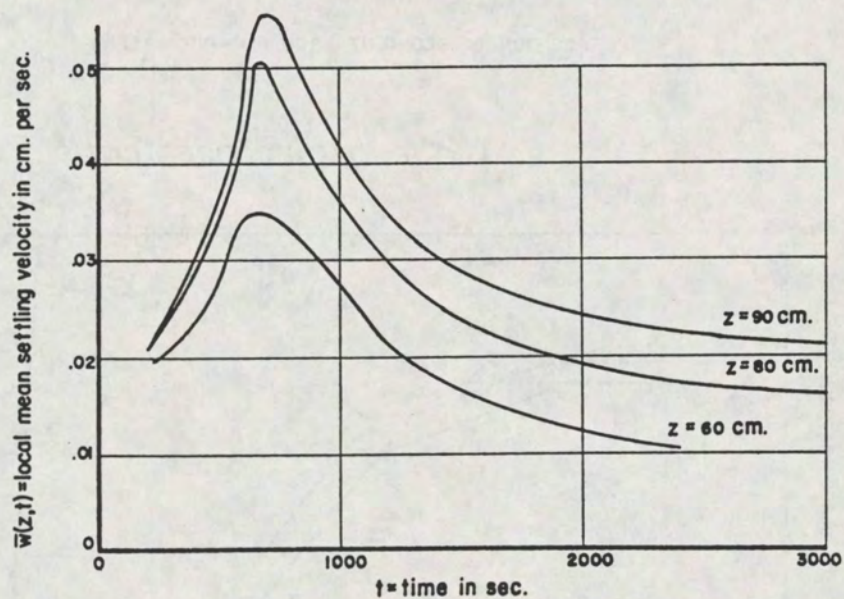
THAMES ESTUARIUM.

GEMETEN VALSNELHEDEN VAN THAMES SLIB.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 6.



LOCAL MEAN SETTLING VELOCITY AS A FUNCTION OF TIME.
BENTONITE CLAY AND ALUM IN WATER

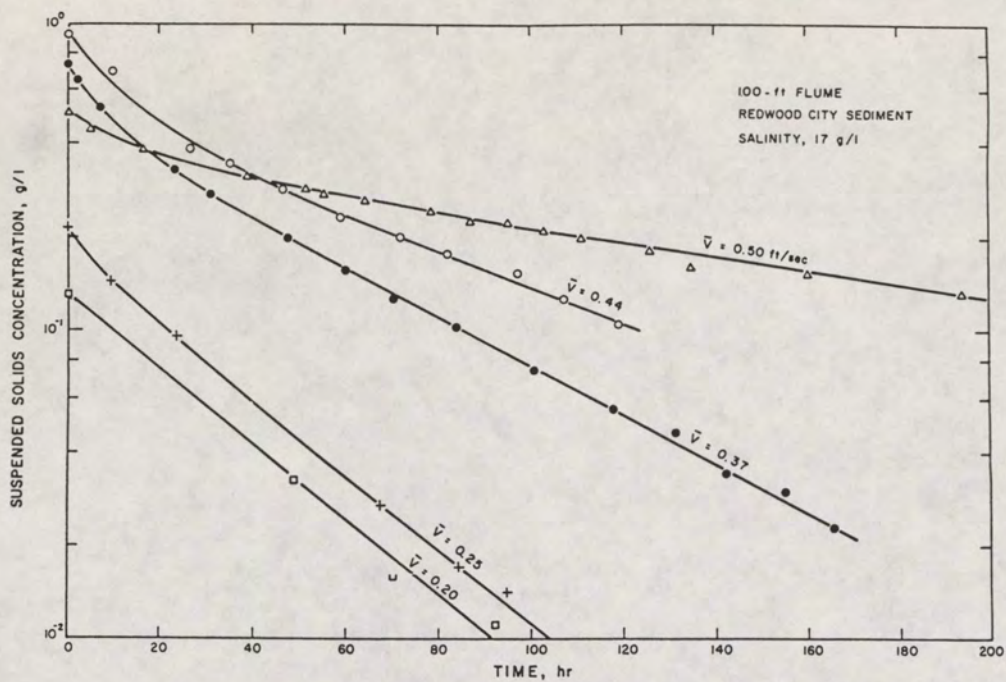
Uit: (19).

VALSNELHEID IN BEZINKCILINDER ALS FUNKTIE VAN
TIJD EN PLAATS.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

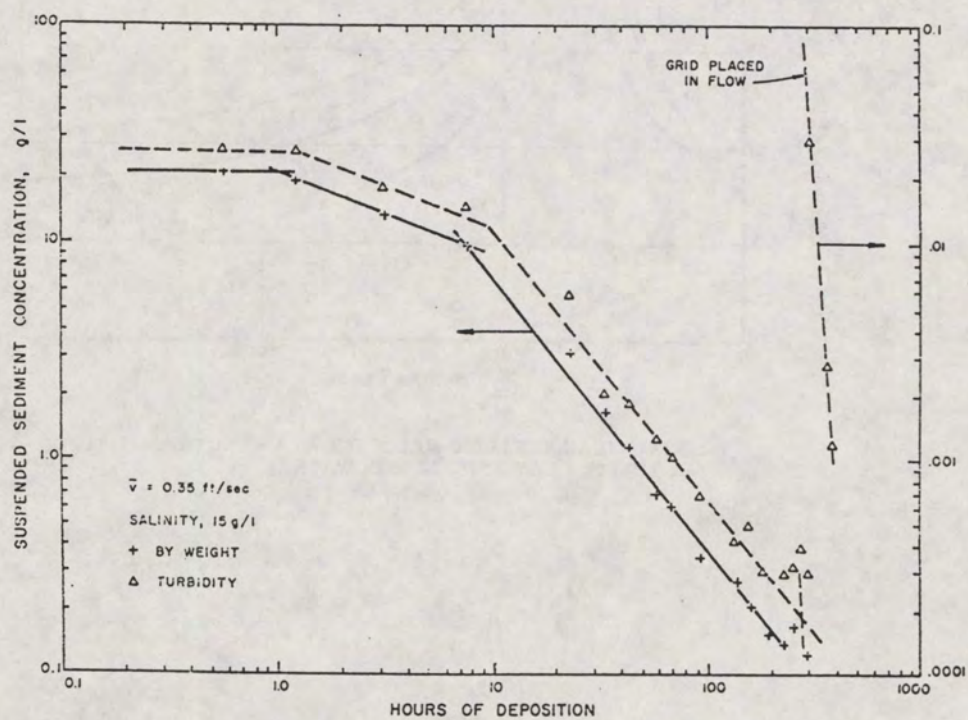
A4

Fig. 7



DEPOSITION OF SEDIMENT FROM FLOWING WATER

(Lage beginconcentratie).



DEPOSITION OF FLOCCULATED SEDIMENT IN FLUME

Uit: (15).

(Hoge beginconcentratie).

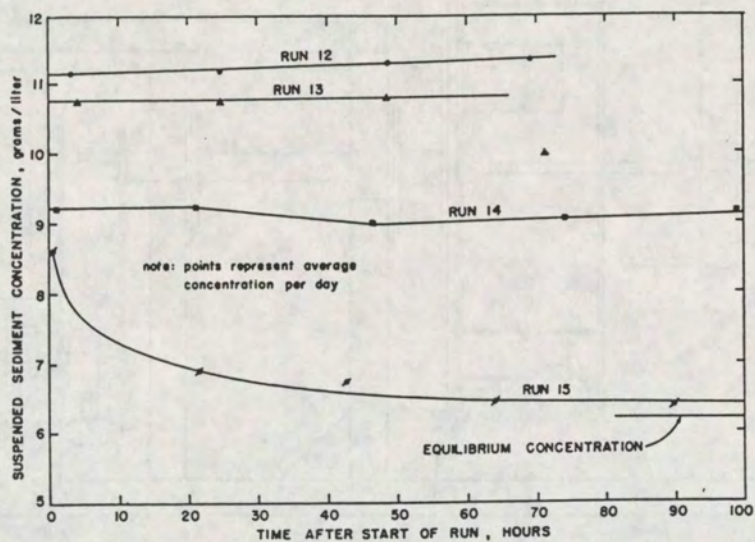
RESULTATEN SEDIMENTATIE-PROEVEN IN STROOMGOOT

(KRONE 1962).

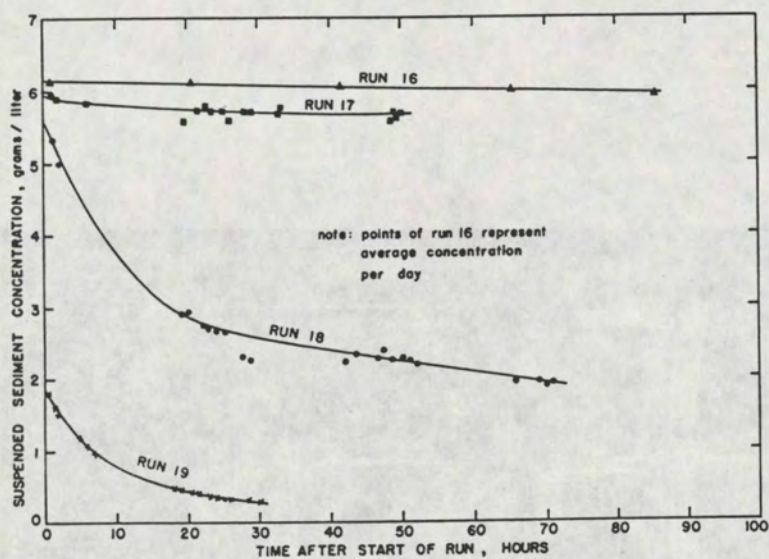
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 8.



A1 FIG. 5.—SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION IN THE FLUME WATER VERSUS TIME (SUMMARY OF RUNS 12 THROUGH 15, SERIES I_a)



B1 SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION IN THE FLUME WATER VERSUS TIME (SUMMARY OF RUNS 16 THROUGH 19, SERIES I_a)

Uit:(29).

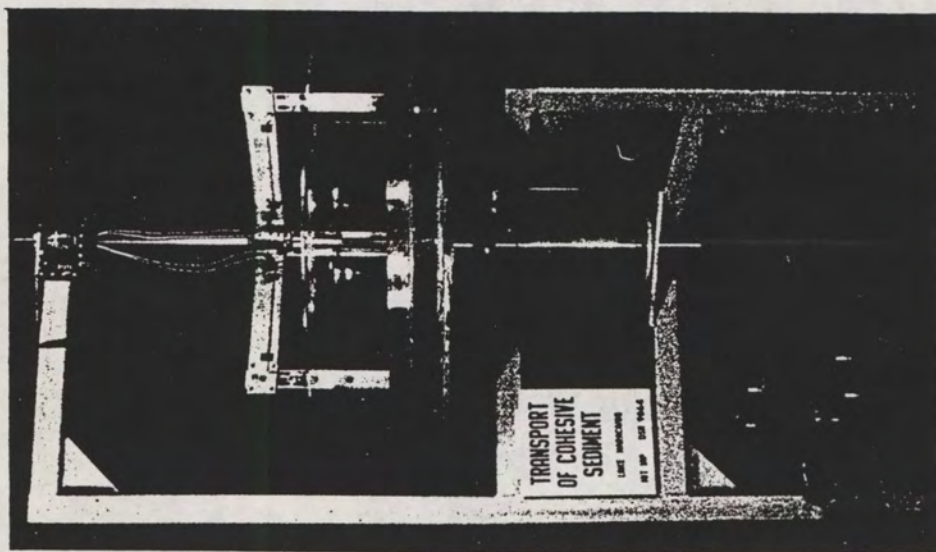
RESULTATEN SEDIMENTATIEPROEVEN IN STROOMGOOT

(PARTHENIADES 1965).

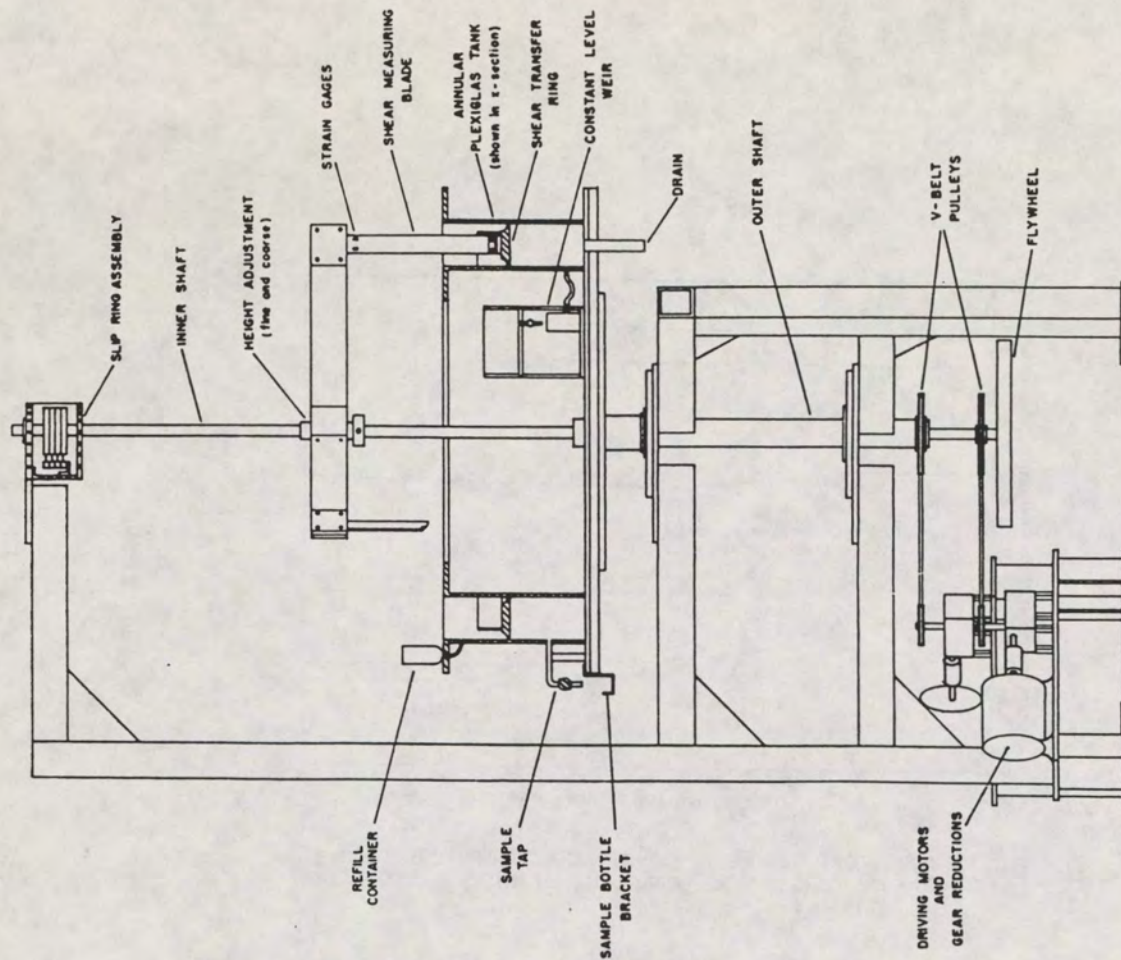
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 9.



Experimental Apparatus



Schematic Drawing of Rotating Apparatus

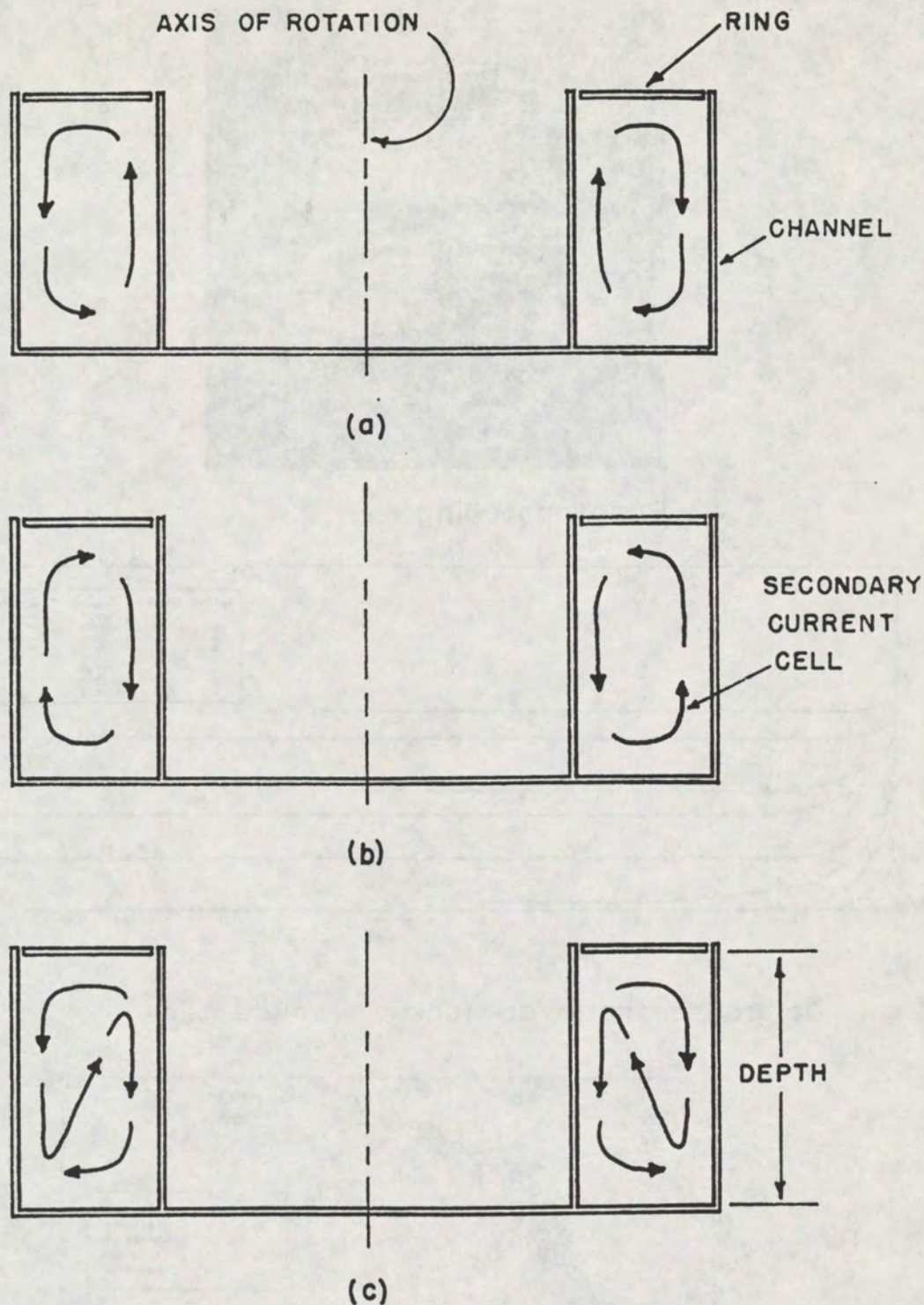
Uit:(35).

AFBEELDING CAROUSEL.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 10.



Secondary Currents in the Rotating Apparatus
 (a) Ring Only Rotating (b) Tank Only Rotating (c) Both Rotating

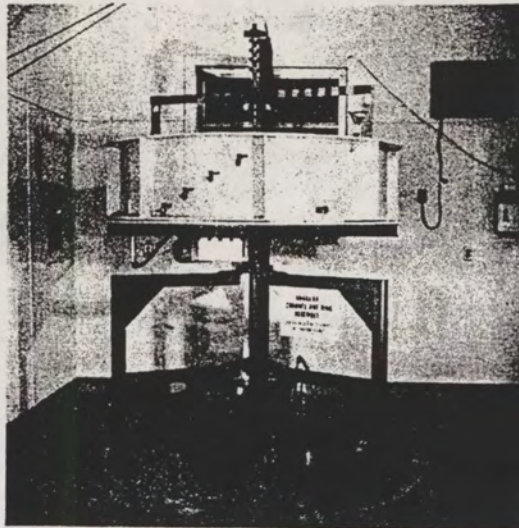
Uit:(35).

SECONDAIRE STROMINGEN IN CAROUSEL.

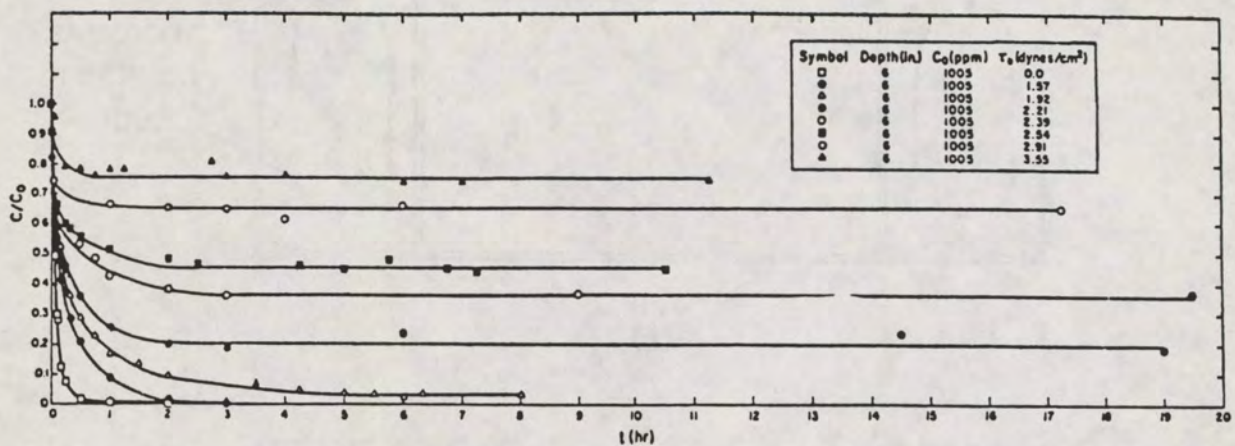
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

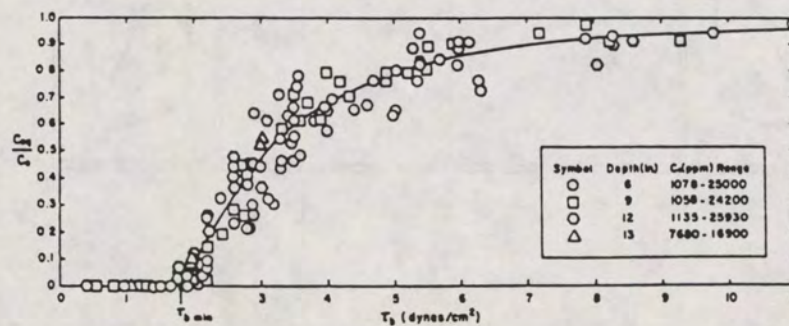
Fig.11.



Proefopstelling



De concentratie als functie van de tijd.



C_{eq} als functie van de bodemschuifspanning τ_b .

C_{eq} = uiteindelijke evenwichtsconcentratie.

C_0 = beginconcentratie.

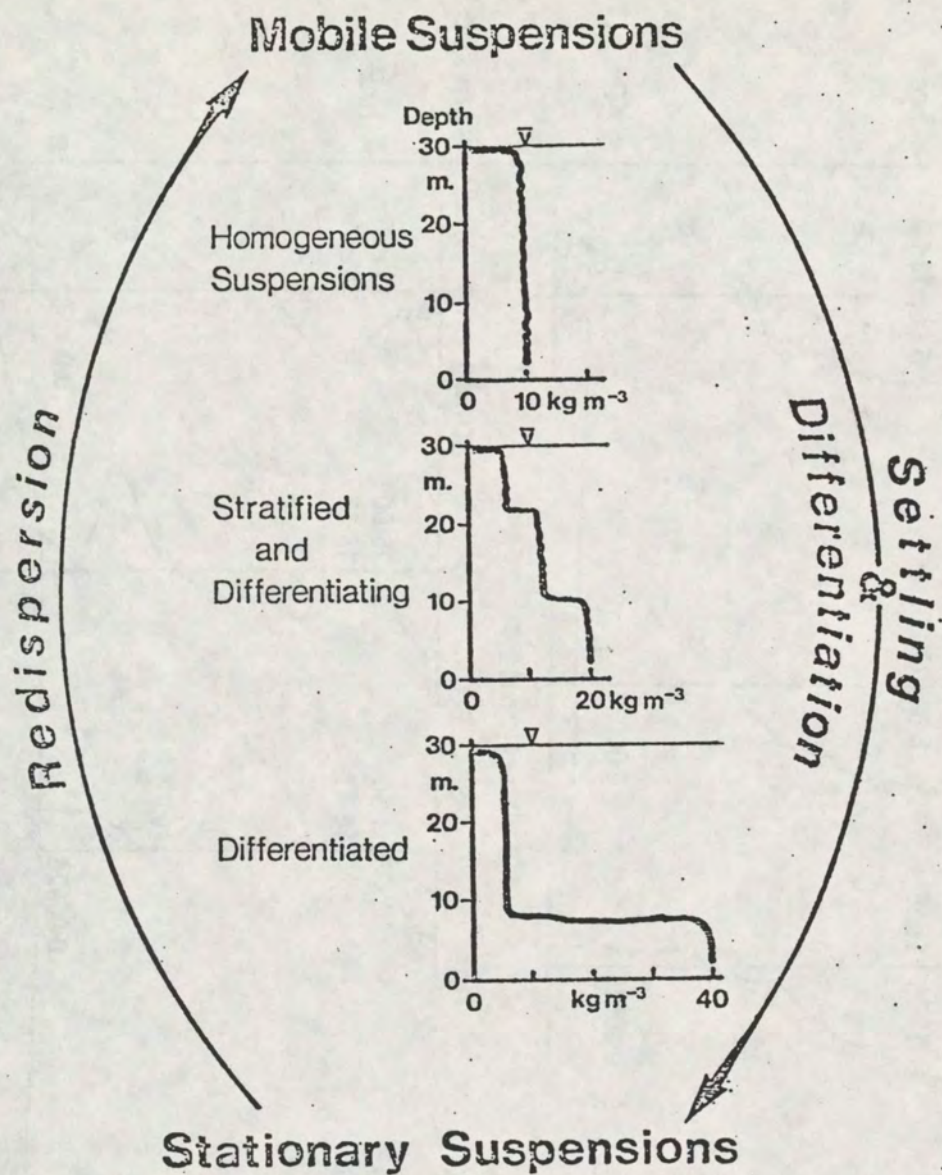
Uit : (32)

DE CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES ALS
FUNKTIE VAN TIJD EN BODEMSCHUIFSPANNING.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

FIG.12.



Development of suspension structures observed over one energy cycle. This sequence is observed over slack water on spring tides and is followed in general terms during the cycle from Springs to Neaps, and vice versa.

Uit: (44).

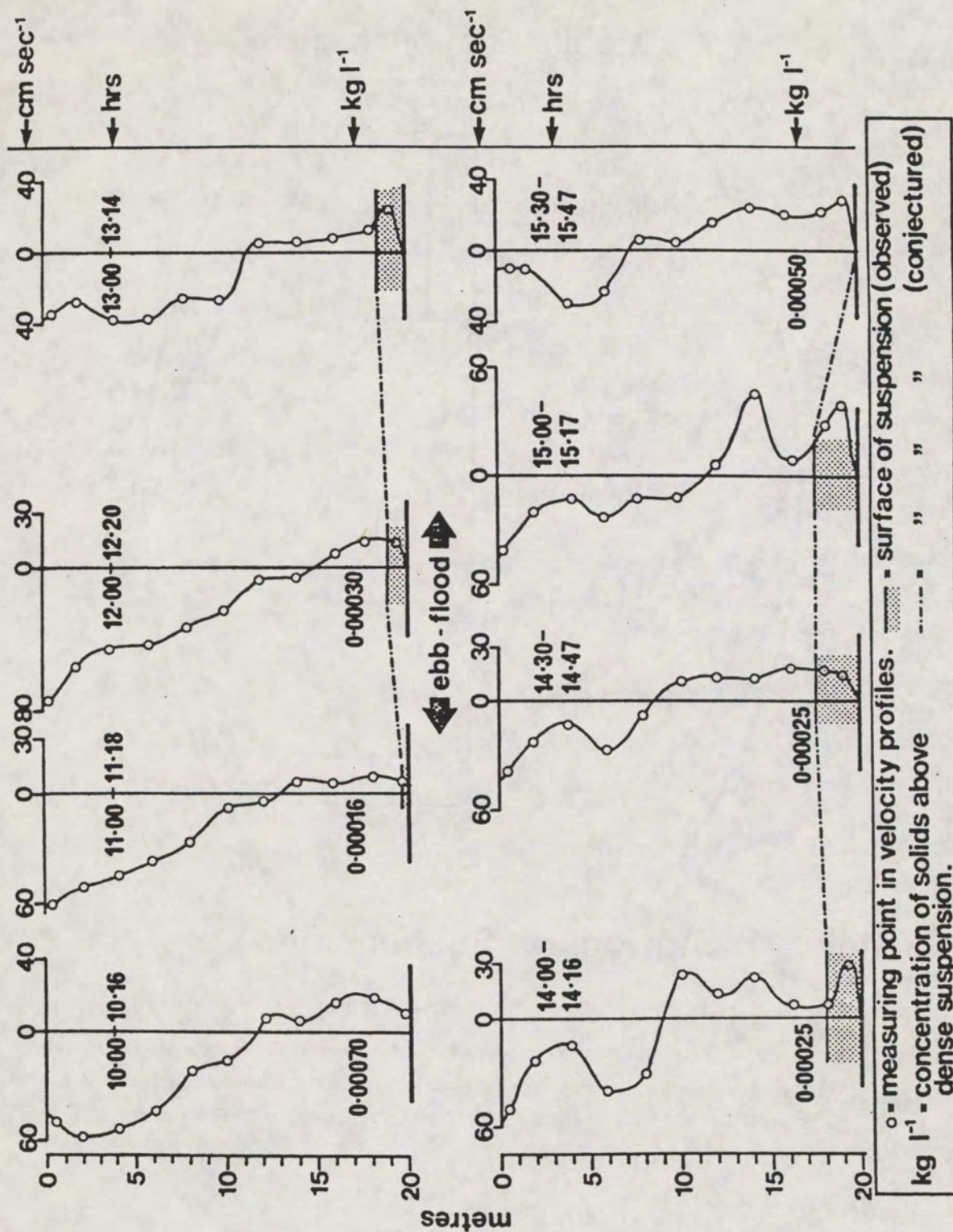
SLIBCONCENTRATIEPROFIELEN IN SEVERN IN

SPRINGTIJ - DOODTIJ - CYCLUS.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig.13.



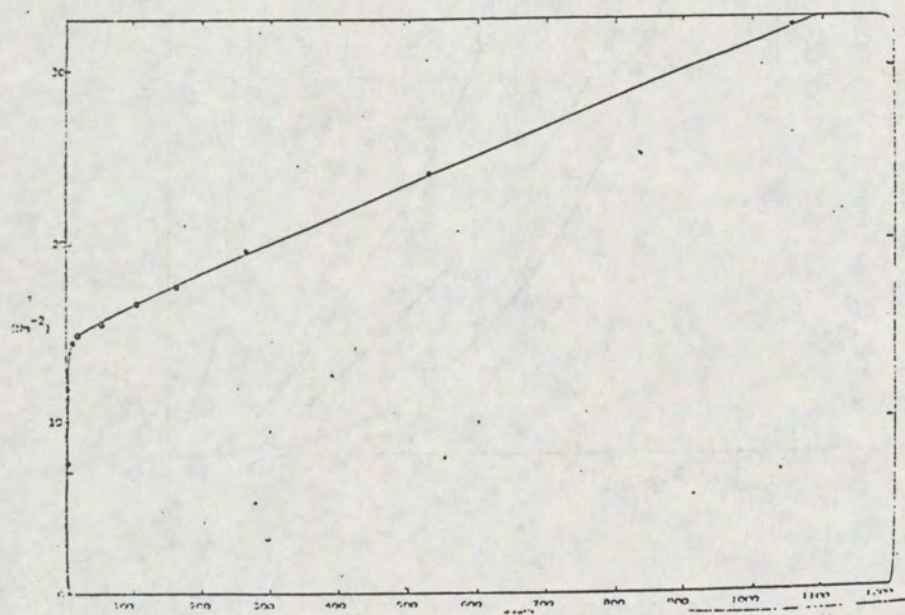
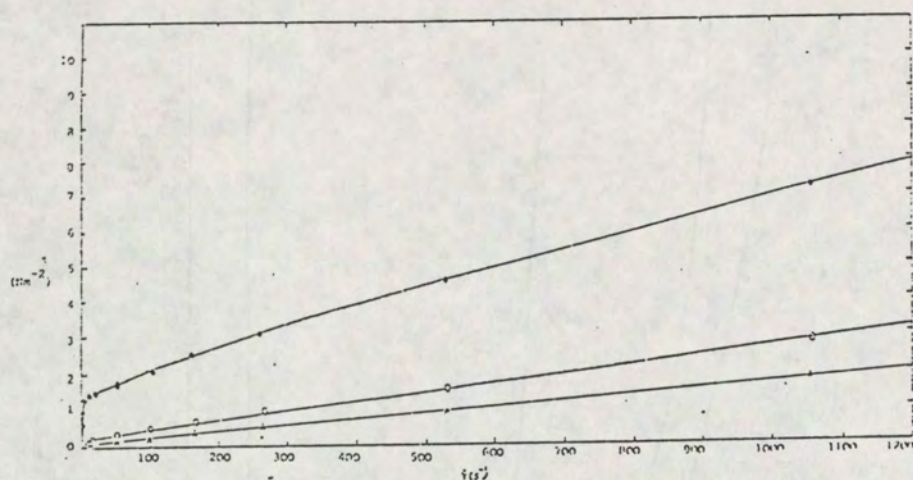
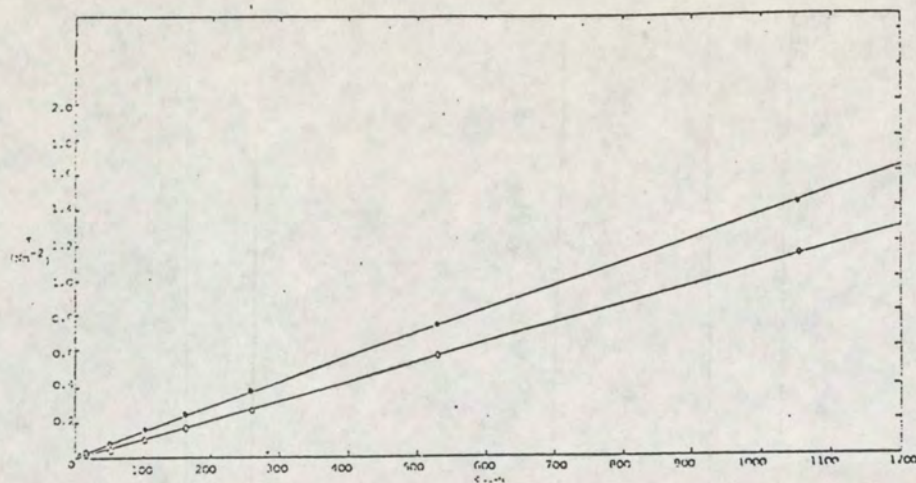
Uit:(47).

RESULTATEN METINGEN STROOMSNELHEDEN
EN CONCENTRATIES GESUSPENDEERDE
DEELTJES IN EUROPOORT.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig.14.



Uit:(108).

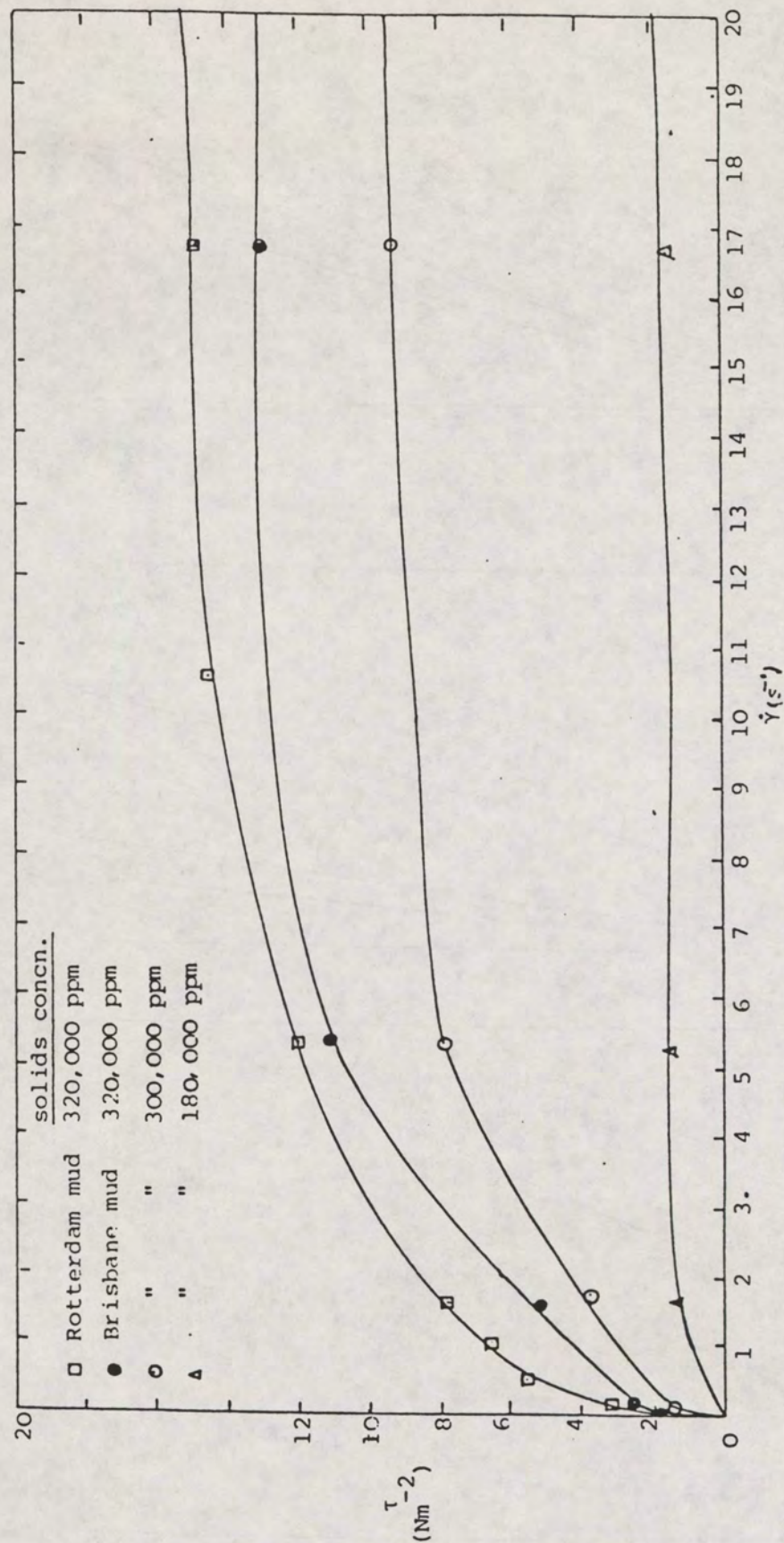
RESULTATEN VISCOMETERPROEVEN OP SLIB UIT

ROTTERDAMSE WATERWEG.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 15.



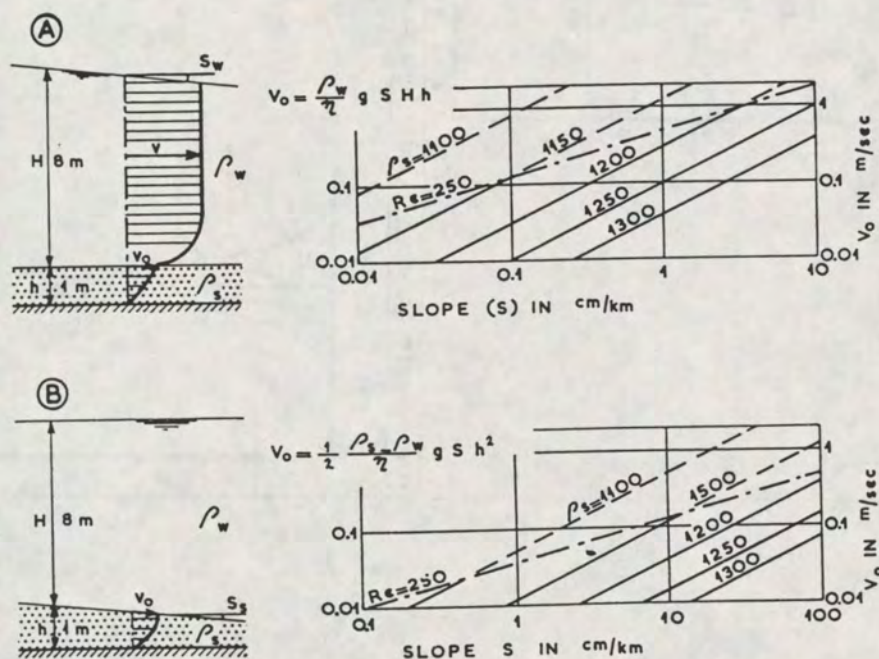
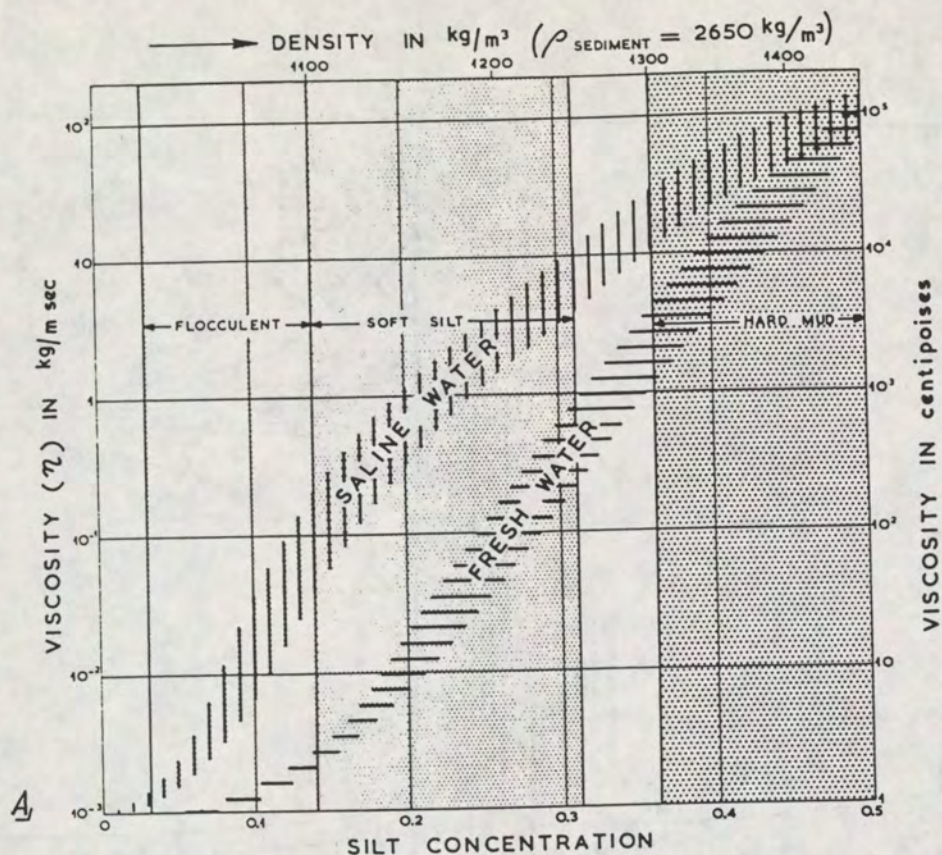
Uit:(109).

RESULTATEN VISCOMETERPROEVEN OP SLIB UIT
ROTTERDAMSE WATERWEG BIJ ZEER LAGE
SNELHEDEN.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 16.



B Computed velocities of soft silt under a layer of water in two simplified cases
a. Horizontal layer under flowing water; b. Sloping layer under stagnant water

Uit:(40).

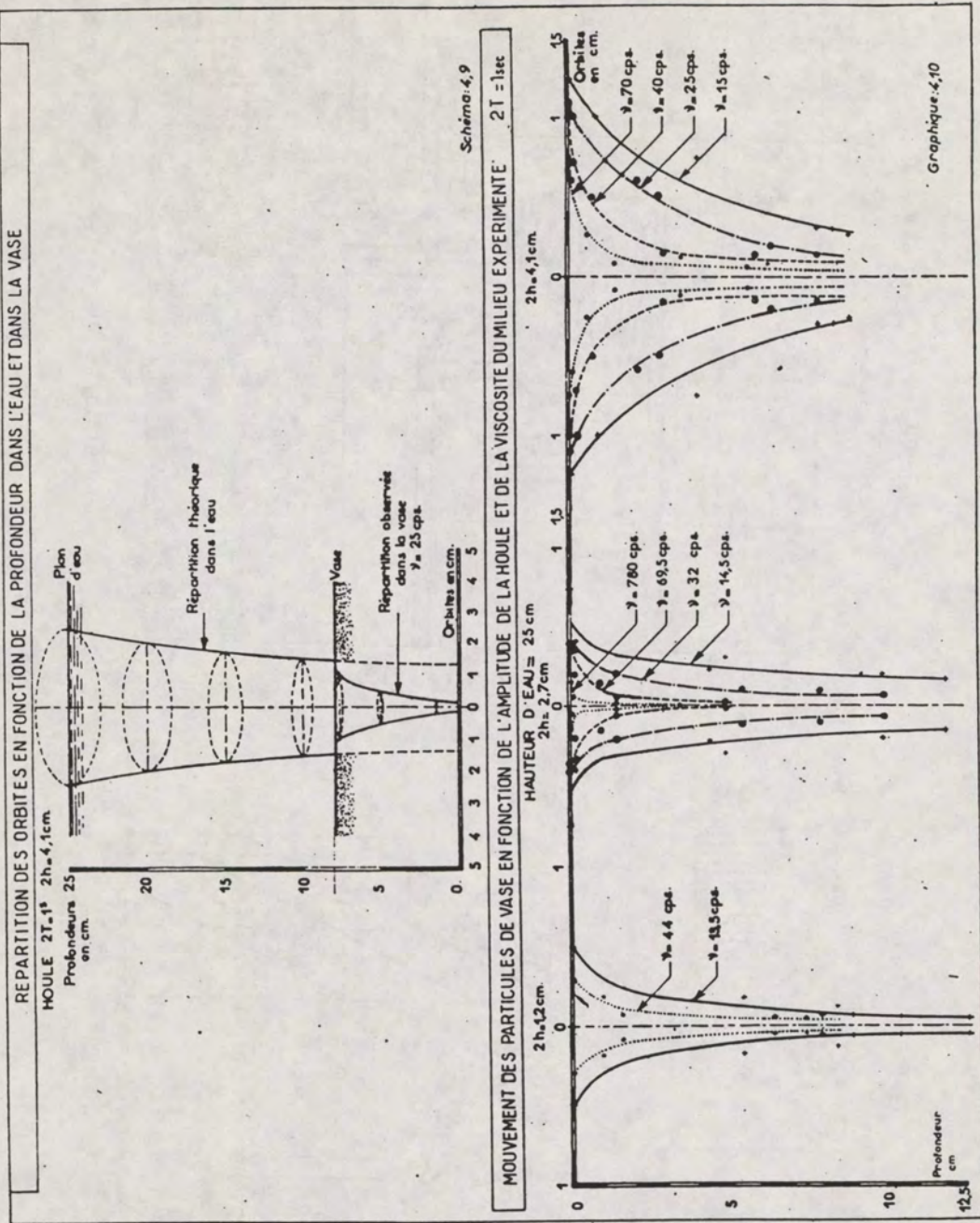
BEREKENDE SNELHEDEN IN SLIBLAAG, UITGAANDE

VAN GEMETEN VISCOSITEIT.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig.17.



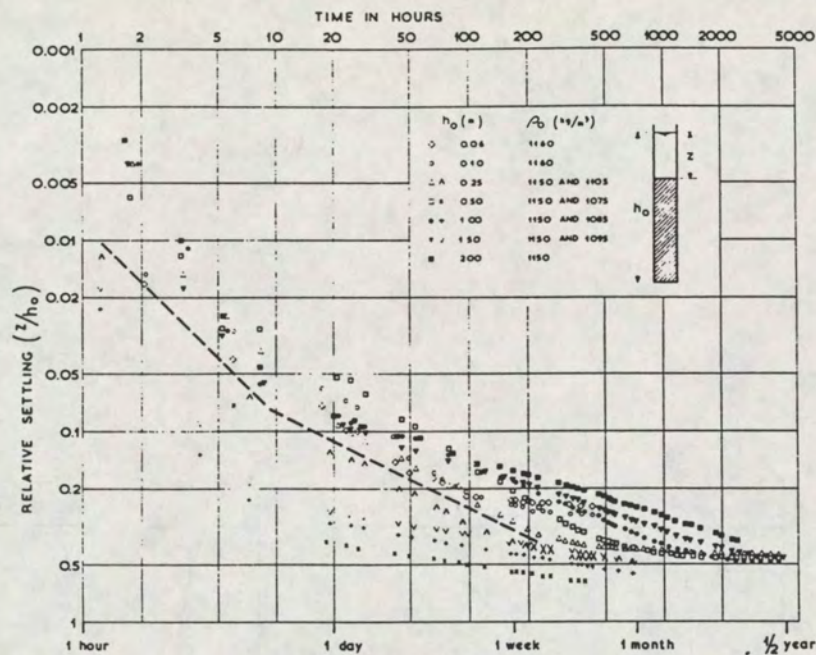
Uit: (59).

BEWEGINGEN IN SLIBLAAG T.G.V. GOLVEN.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

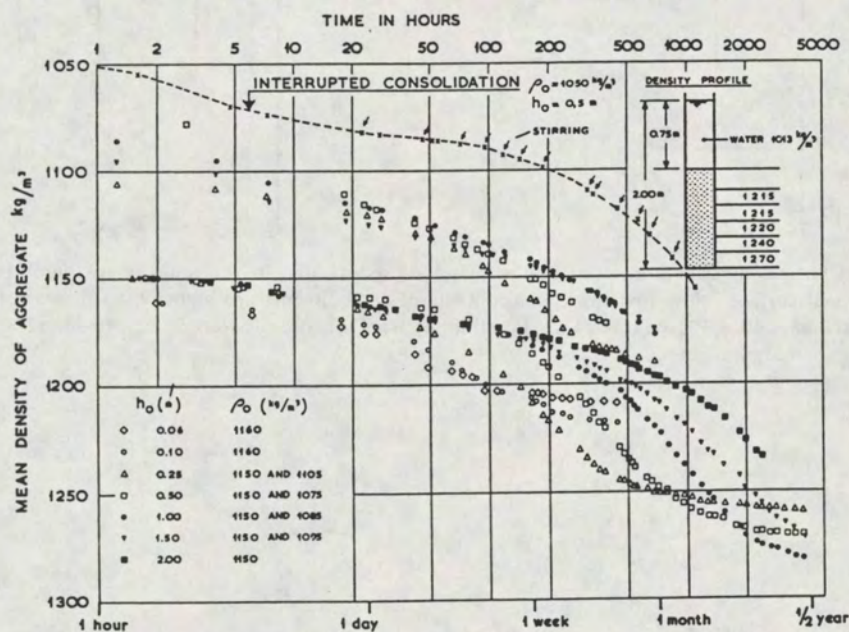
A4

Fig. 18.



A

The settling of soft silt in cylinders, plotted against time



B

The density of consolidating soft silt, plotted against time

Uit: (40).

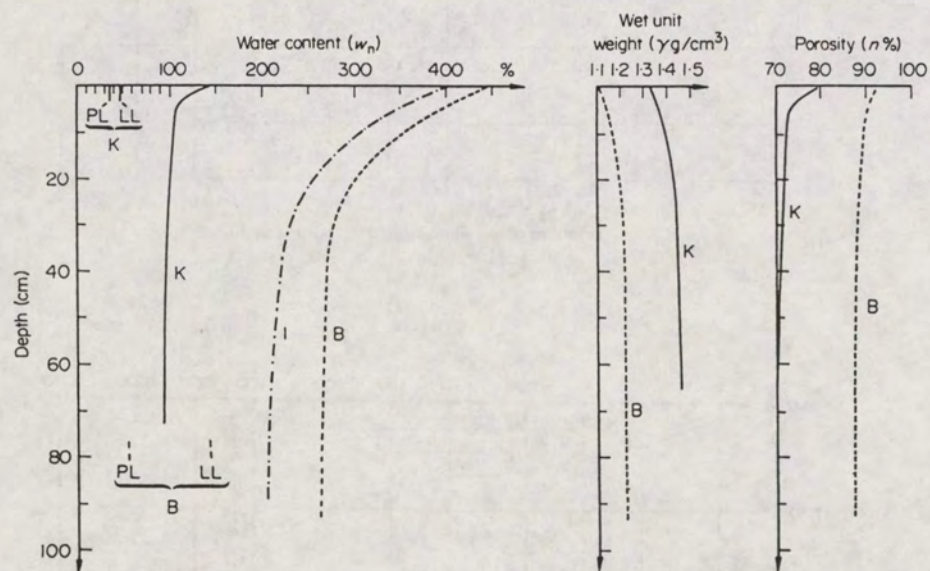
RESULTATEN KONSOLIDATIEPROEVEN OP SLIB

UIT BANGKOK BAR CHANNEL.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 19.



Mass physical properties of the materials sedimented in the tank versus depth below the sediment surface. Note that the water contents of all sediments are higher than the corresponding liquid limits. PL = Plastic limit, LL = liquid limit, B = Ca-bentonite (tap water), I = illite (tap water), K = kaolinite (sea-water).

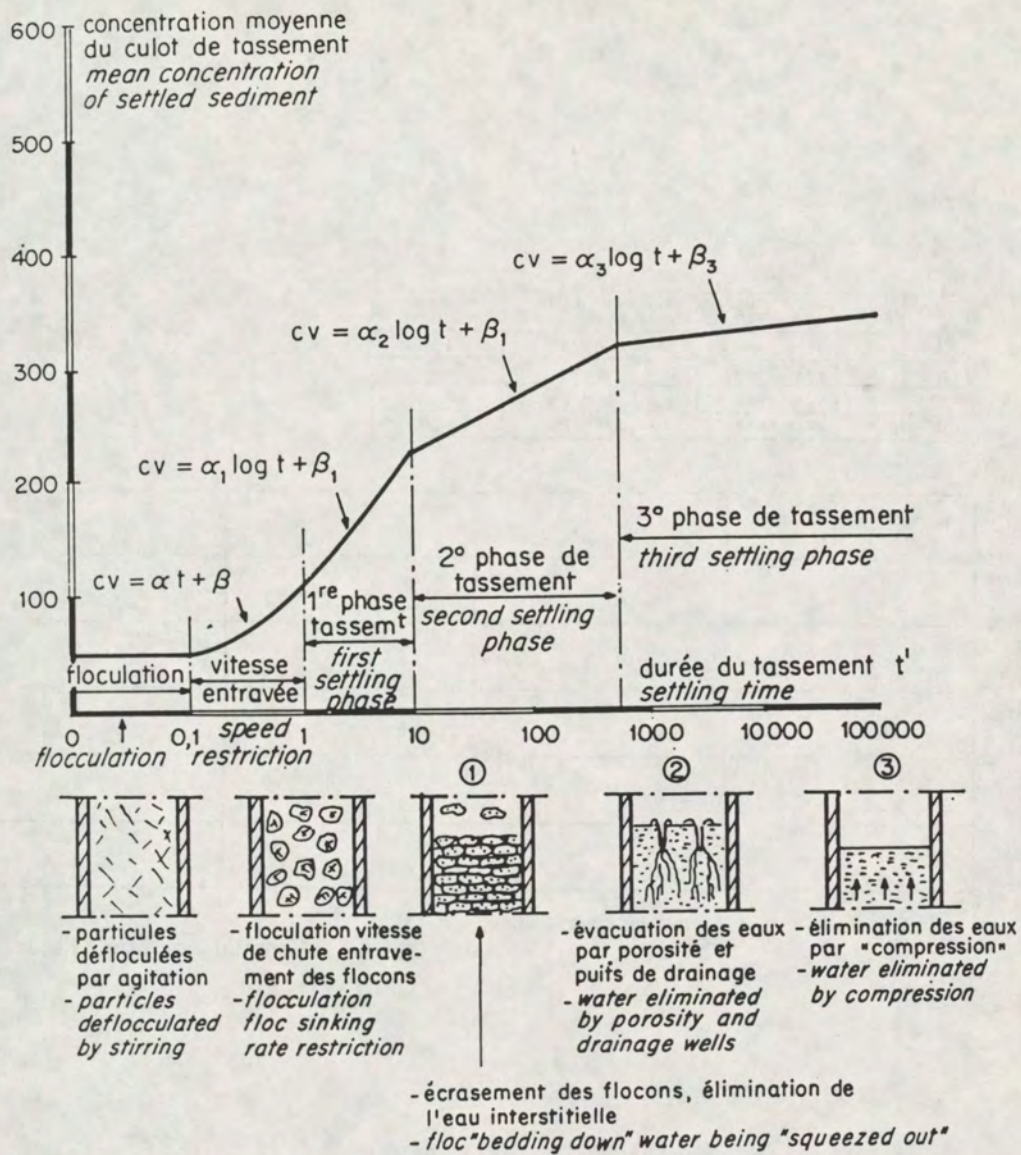
Uit: (61).

VERLOOP DICHTHEID MET DIEPTE IN AFGEZETTE
SLIBLAAG.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 20.



Graphique montrant les différentes phases du tassement.

Graphical representation of bedding-down phases.

Uit:(20).

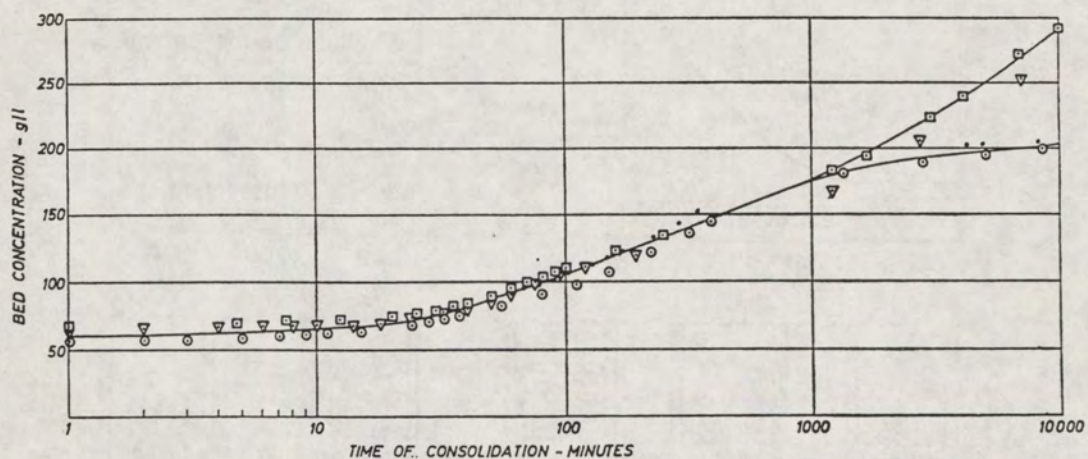
VERSCHILLENDE FASEN UIT HET KONSOLIDATIEPROCES.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 21.

TEST	SYMBOL	DEPTH OF WATER DURING SETTLING	DEPTH OF WATER DURING CONSOLIDATION	NOMINAL CONCENTRATION
I	○	1.8 m (6 FT)	1.8 m (6 FT)	4 g/l
II	□	92 m (30 FT)	92 m (30 FT)	4 g/l
III	▽	92 m (30 FT)	1.8 m (6 FT)	4 g/l
IV	*	92 m (30 FT)	92 m (30 FT)	8 g/l



Consolidation of mud beds

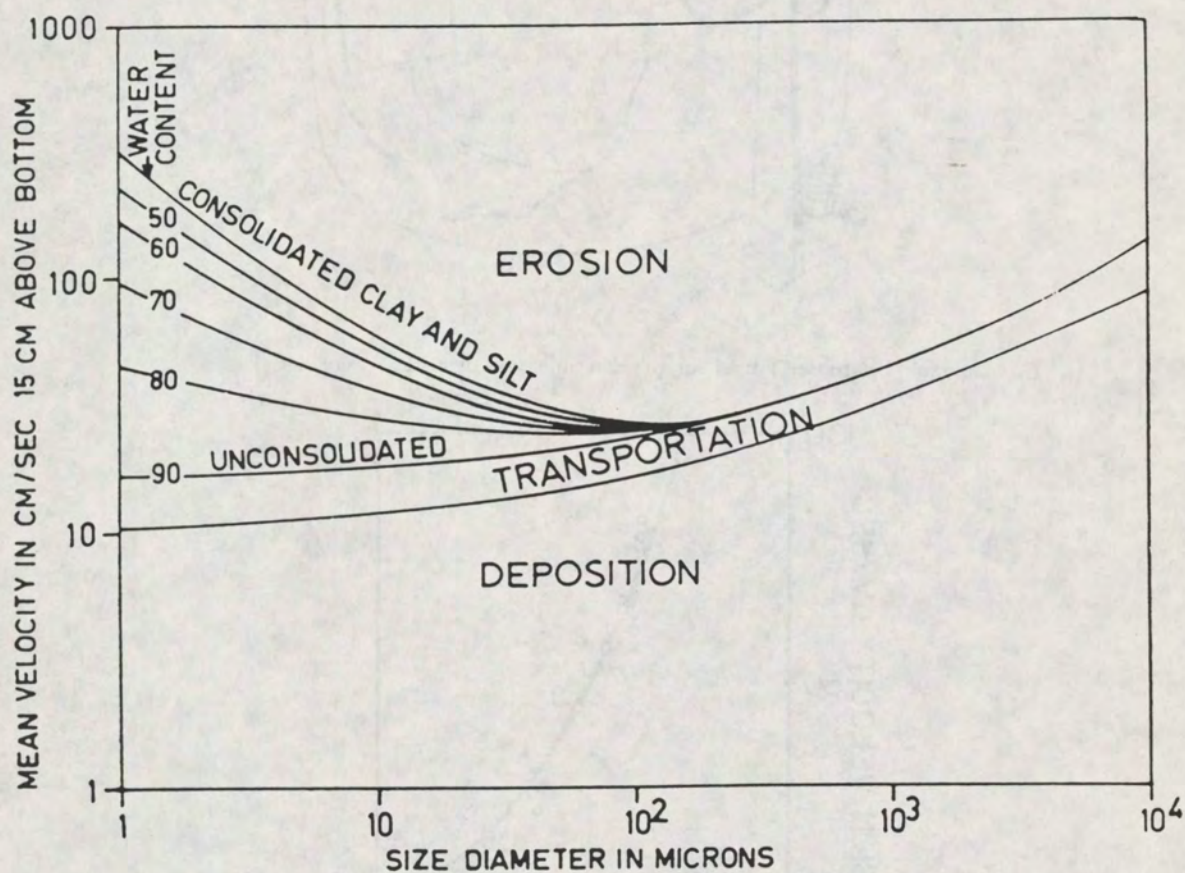
Uit: (22).

INVLOED WATERDIEPTE, LAAGDIKTE EN SEDIMENT-
CONCENTRATIE OP KONSOLIDATIEGEDRAG.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 22.



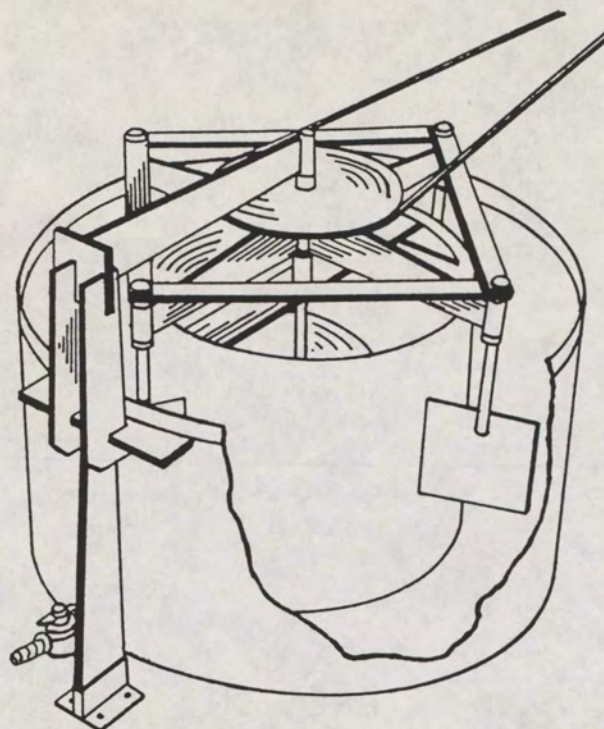
Uit:(38).

BENODIGDE SNELHEDEN VOOR SEDIMENTTRANSPORT.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

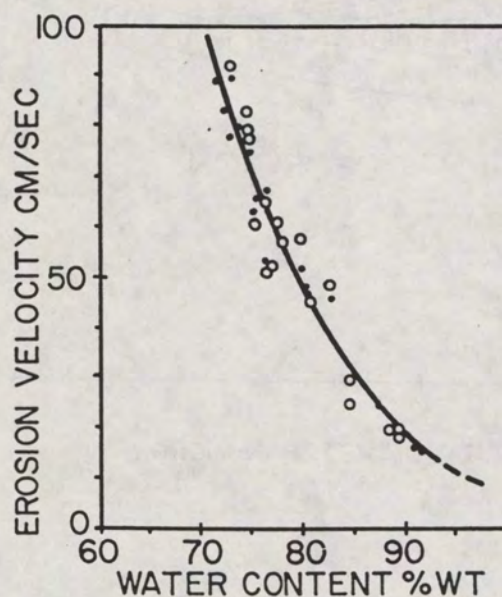
A4

Fig.23.



A]

Circular tank ("carousel") used for the determination of critical velocities.



B]

Erosion velocity and water content (in weight percentages) of a Demerara clay. Mineral composition: 25% quartz, 15% chlorite, 5% feldspar, 25% exp. illite, 15% kaolinite (Demerara Coastal Investigation, 1962). Circles:

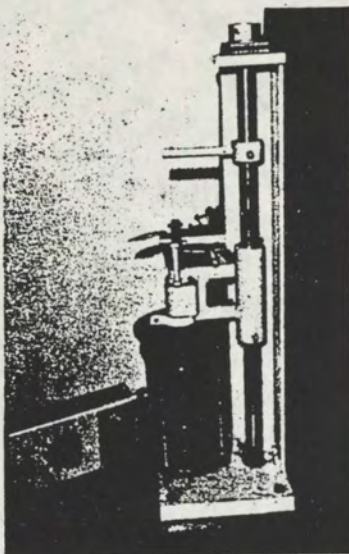
Uit:(38).

EROSIESNELHEID ALS FUNKTIE VAN HET WATERGEHALTE.

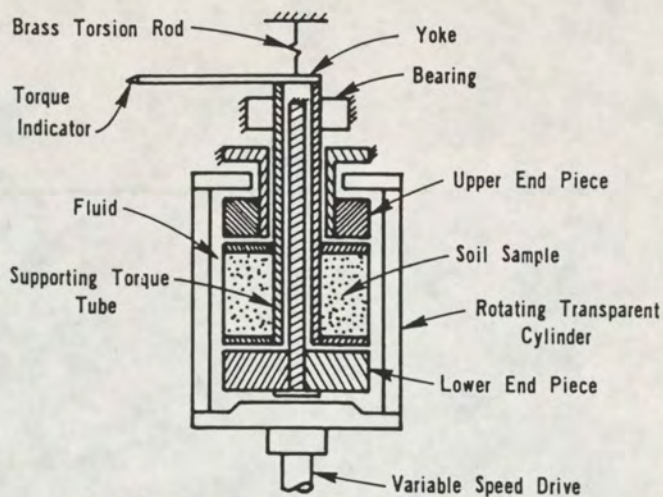
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

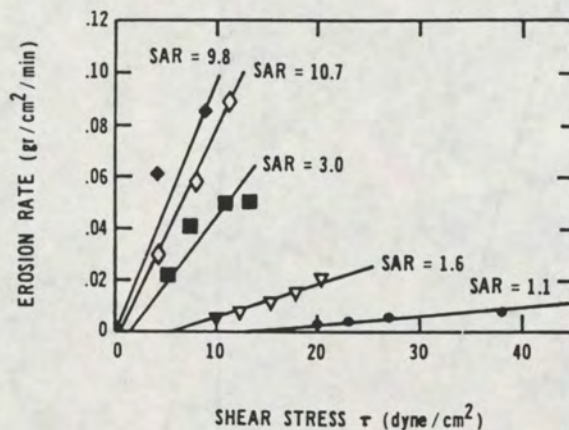
Fig. 24.



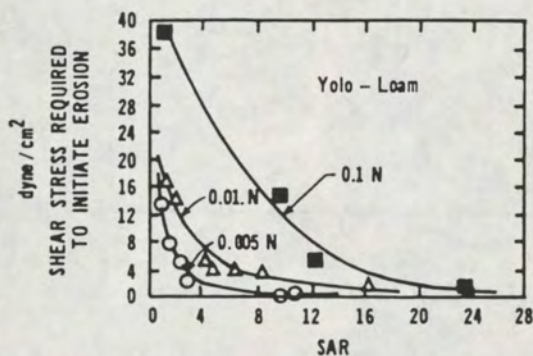
A₁ Rotating Cylinder Erosion Test Apparatus (8)



B₁ Cross-Sectional View of Rotating Cylinder Test Apparatus (8)

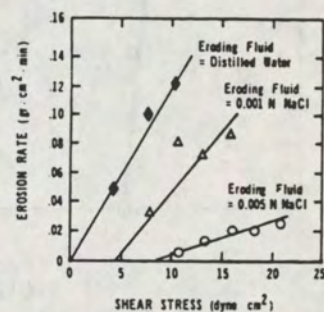


C₁ Relationship Between Erosion and Shear Stress for Different SAR-Yolo Loam, Concentration 0.005 N - $w/c = 23\%$



D₁ Relationship Between Critical Shear Stress and SAR for Different Pore Water Electrolyte

Uit: (68).



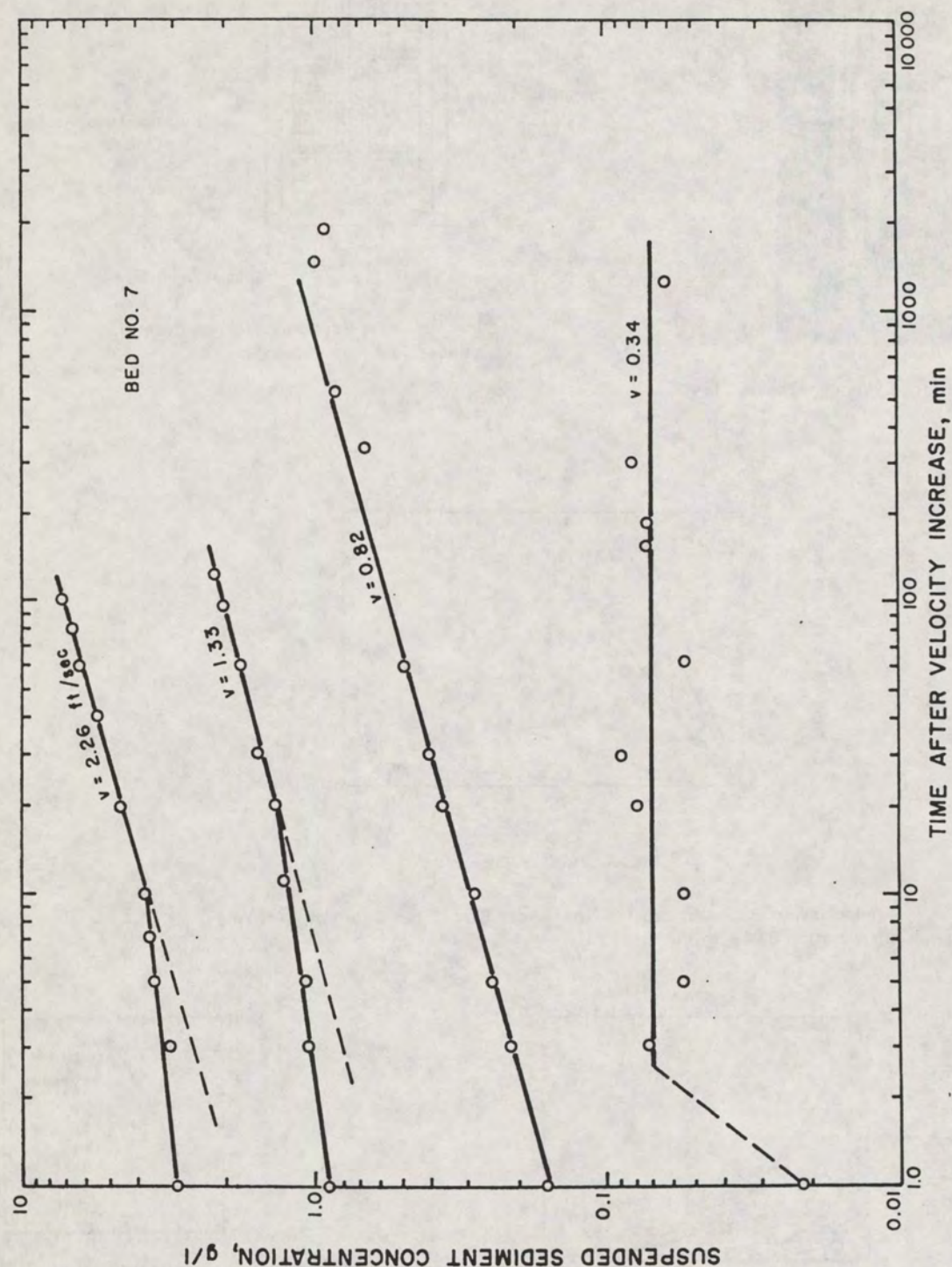
E₁ Relationship Between Erosion Rate and Shear Stress for Different Concentration of Eroding Fluid-Yolo Loam, SAR ~35, $\sigma = 2.0$ mmhos/cm, Pore Fluid = 0.02 N

INVLOED SAR EN ZOUTGEHALTE OP EROSIESNELHEID.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 25.



SEDIMENT SCOUR WITH SMALL INCREMENTS OF FLOW VELOCITY

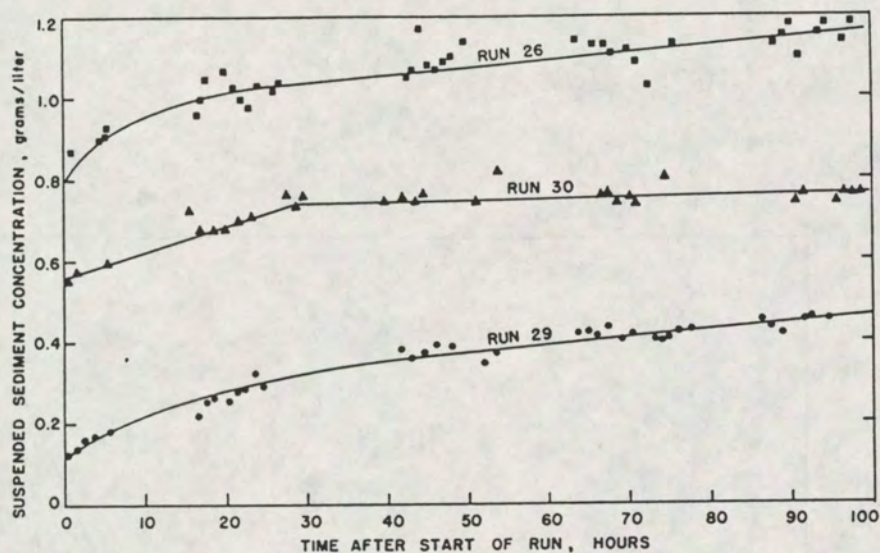
Uit:(15).

CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD BIJ EROSIEPROEVEN.
(KRONE 1962).

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

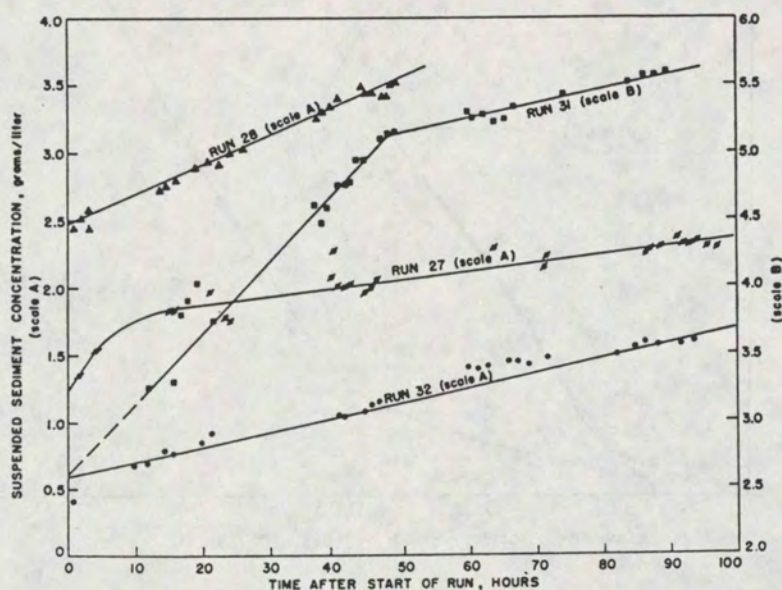
A4

Fig. 26.



A₁

SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION IN THE FLUME WATER
VERSUS TIME (SUMMARY OF RUNS 26, 29, AND 30, SERIES III)



B₁

SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION IN THE FLUME WATER
VERSUS TIME (SUMMARY OF RUNS 27, 28, 31, AND 32, SERIES III)

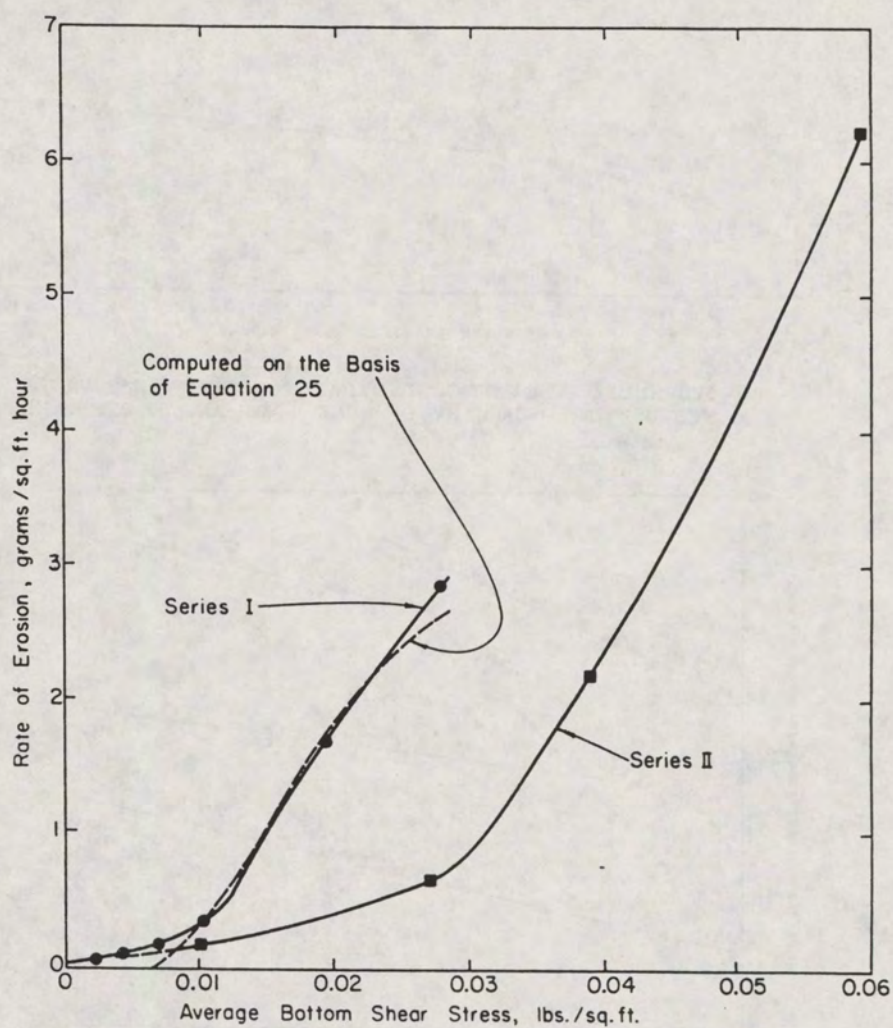
Uit: (34).

CONCENTRATIE GESUSPENDEERDE DEELTJES ALS FUNKTIE
VAN DE TIJD BIJ EROSIEPROEVEN.
(PARTHENIADES 1965).

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 27.



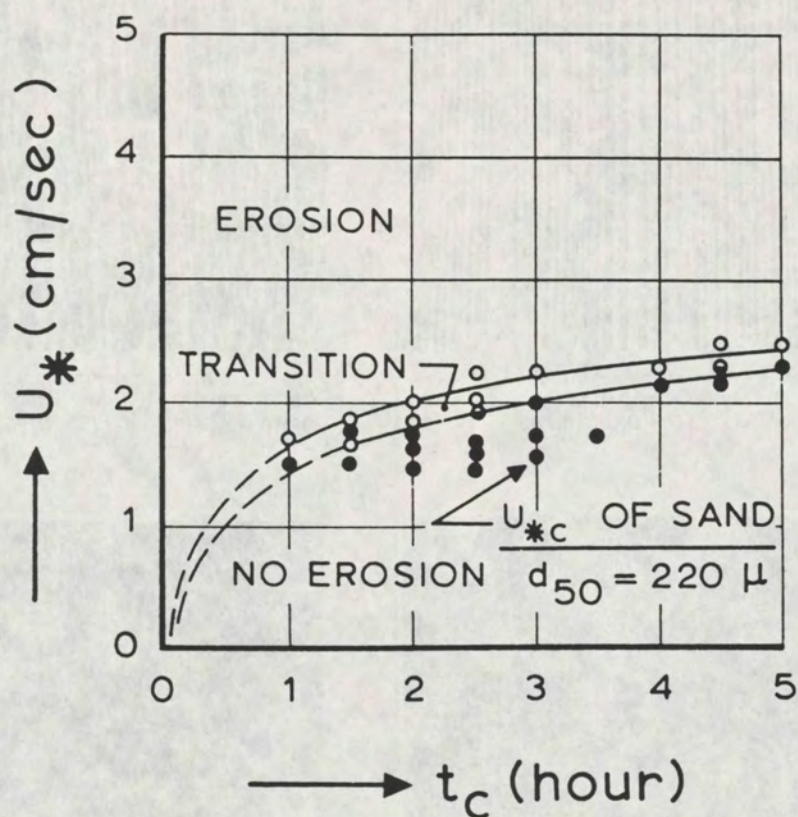
Uit: (34).

EROSIESNELHEID ALS FUNKTIE VAN DE GEMIDDELDE
BODEMSCHUIF SPANNING.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 28.



MUD I
 $\rho_w = 1010 \text{ kg/m}^3$
 $c_o = 16.5 \text{ g/l}$
 WATERDEPTH $\approx 25 \text{ cm}$
 THICKNESS OF MUDLAYER $\approx 2 \text{ cm}$
 ○ STRONG EROSION OF MUDLAYER
 ● NO OR SLIGHT EROSION OF MUDLAYER

Critical shear velocity (U_{*c}) in relation to consolidation time (t_c).

Uit:(73).

KRITIEKE SCHUIFSPANNINGSSNELHEID VOOR EROSIE
 ALS FUNKTIE VAN DE KONSOLIDATIETIJD.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

Fig. 29.

A4



Mold of rectilinear longitudinal grooves. Run 2 (table 1). Flow from bottom to top. Width of bed shown is 27 cm. ($\bar{U} = 0,30 \text{ m/s}$)



Mold of longitudinal meandering grooves. Run 4 (table 1). Flow from bottom to top. Bed shown is 27 cm wide. ($\bar{U} = 0,38 \text{ m/s}$)



Mold of flute marks produced in Run 6 (table 1). Flow from bottom to top. Width of bed shown is 15.5 cm. ($\bar{U} = 0,60 \text{ m/s}$)



Mold of transverse erosional features produced in Run 8 (table 1). Flow from bottom to top. Width of bed shown is 18 cm. ($\bar{U} = 1,38 \text{ m/s}$)

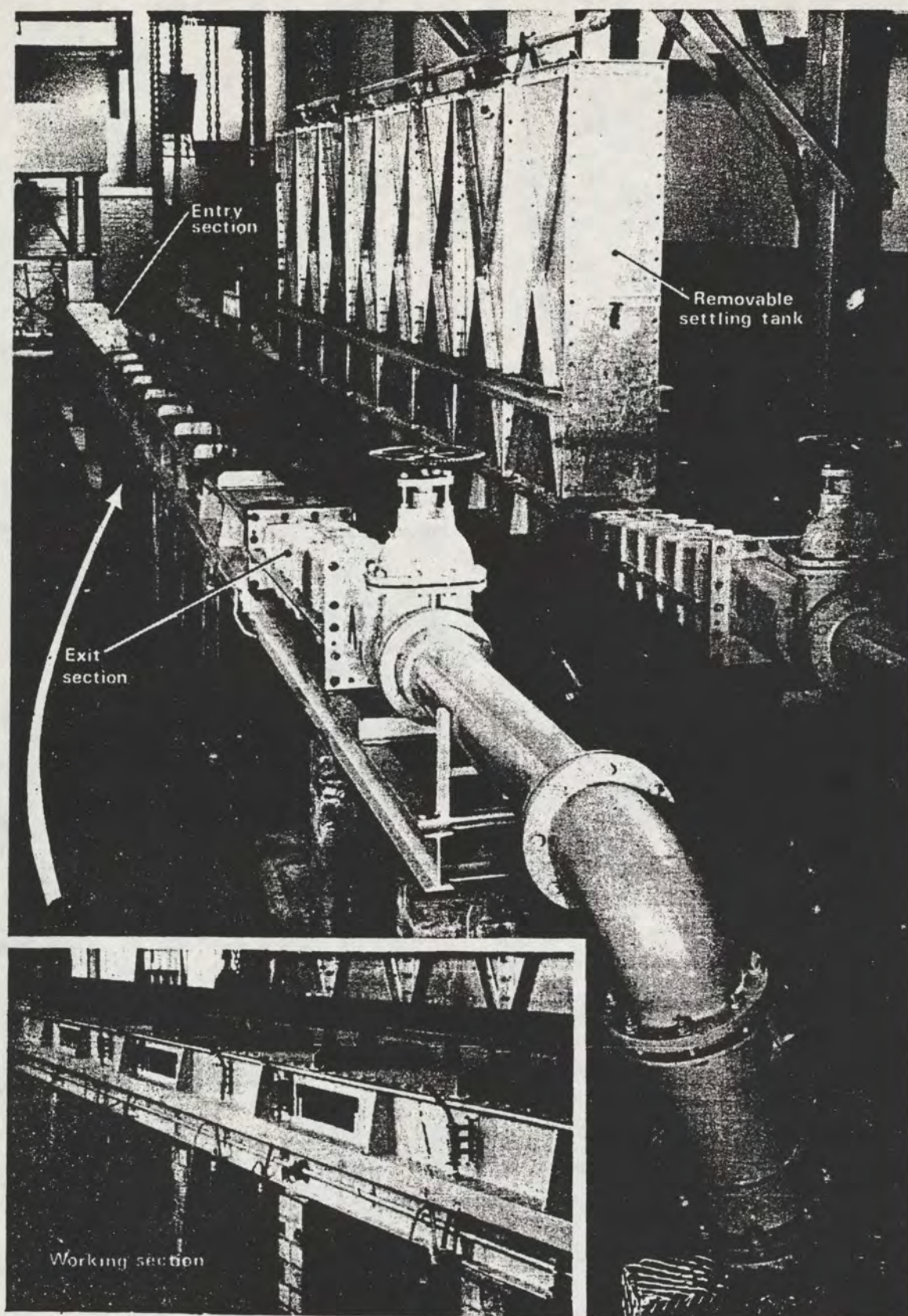
Uit:(74). ; afbeeldingen van bodem gemaakte mallen.

BODEMVORMEN BIJ EROSIEPROEVEN.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 30.



HRS recirculating mud erosion flume

Uit: (76).

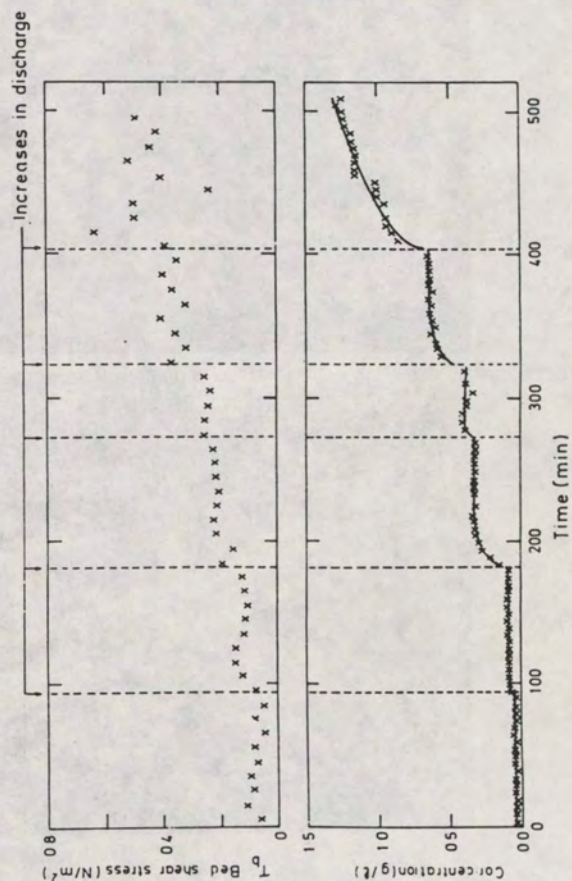
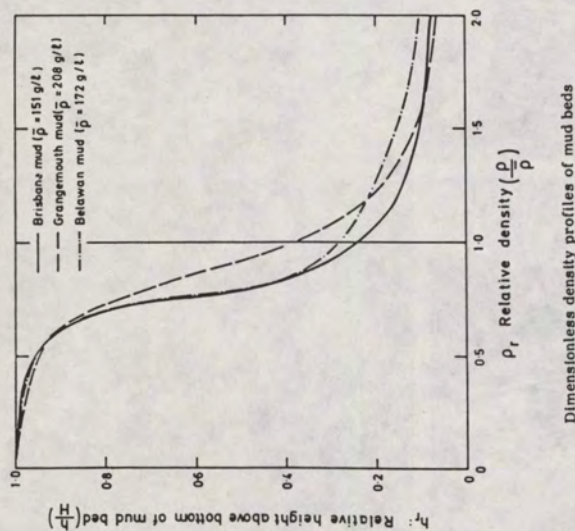
OPSTELLING VOOR EROSIEPROEVEN IN WALLINGFORD.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

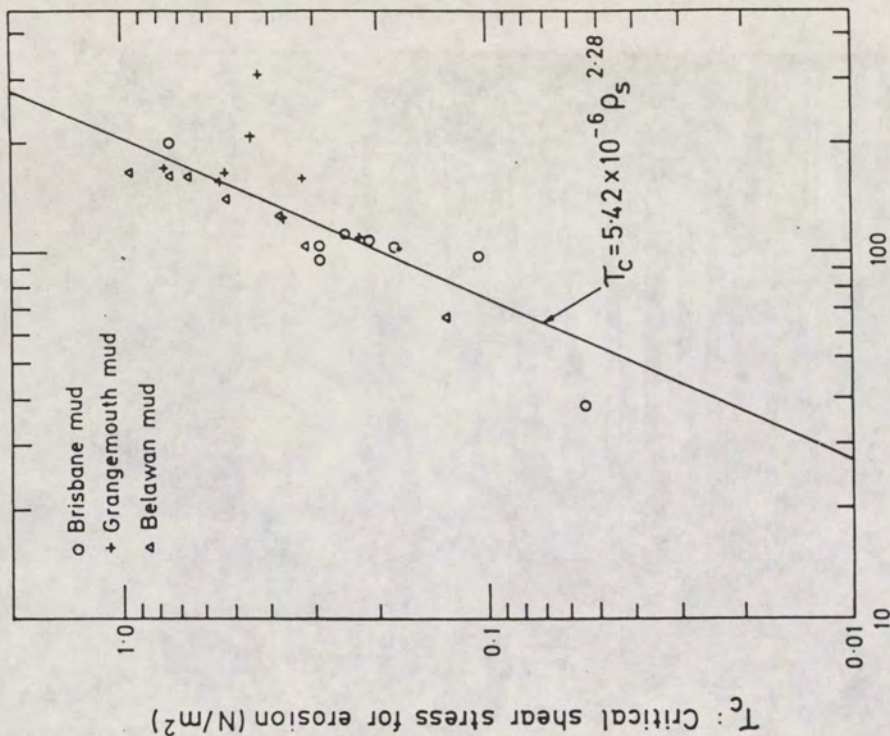
Fig. 31.

A4

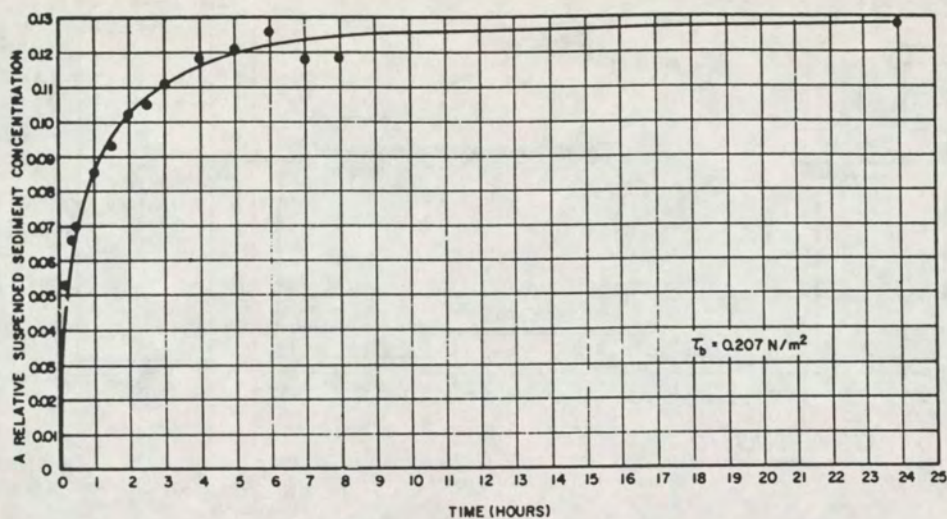
Uit: (57).



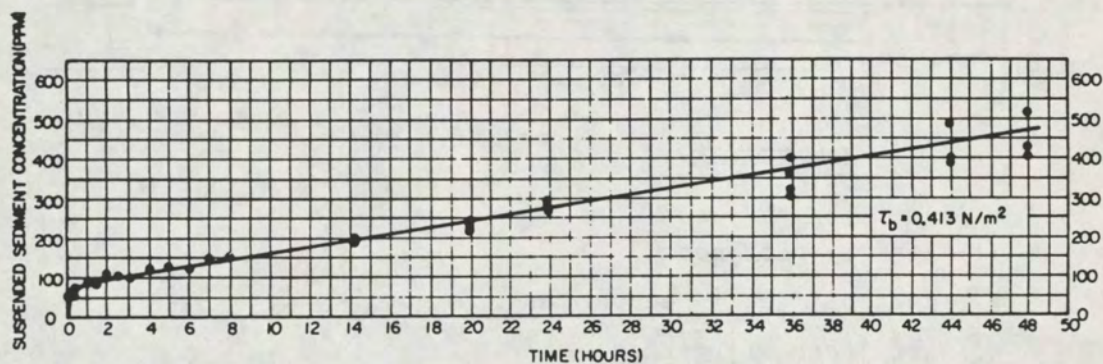
Example of erosion test results



Critical shear stress for erosion



—Relative Suspended Sediment Concentration versus Time for Stratified Bed
at $\tau_b = 0.207 \text{ N/m}^2$



Suspended Sediment Concentration versus Time for Uniform Bed at $\tau_b = 0.413 \text{ N/m}^2$

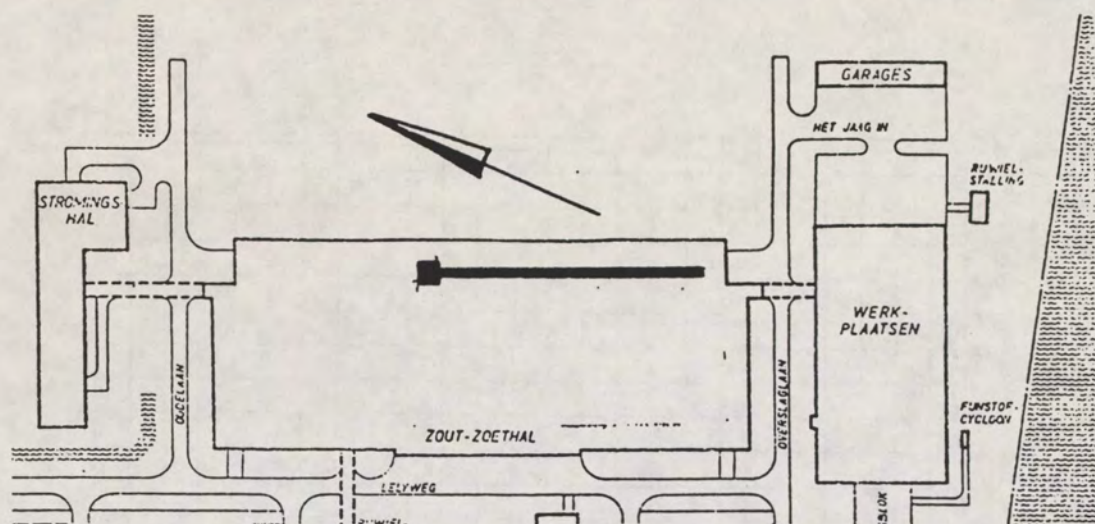
Uit: (123)

EROSIEPROEVEN OP GESTRATIFICEERDE EN
UNIFORME BODEM.

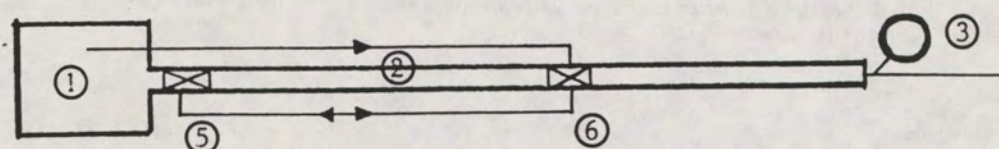
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

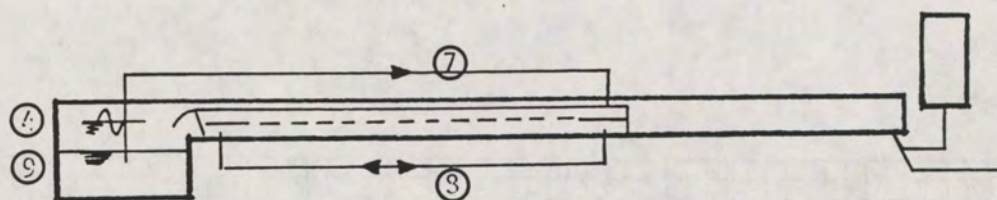
Fig. 33.



a, situatie



b, bovenaanzicht



c, zijaanzicht

- ① zee bij getijgoot
- ② goot bij getij- en permanentiegebruik
- ③ getijtank bij getijgoot
- ④ waterstand bij gebruik als getijgoot ("zoute zee")
- ⑤ in- en uitstroomkonstruktie bij permanentiegebruik
- ⑥ in- en uitstroomkonstruktie bij permanentiegebruik
- ⑦ permanentieleiding bovenlaag
- ⑧ permanentieleiding onderlaag
- ⑨ waterstand bij gebruik als permanentiegoot ("zoete zee")

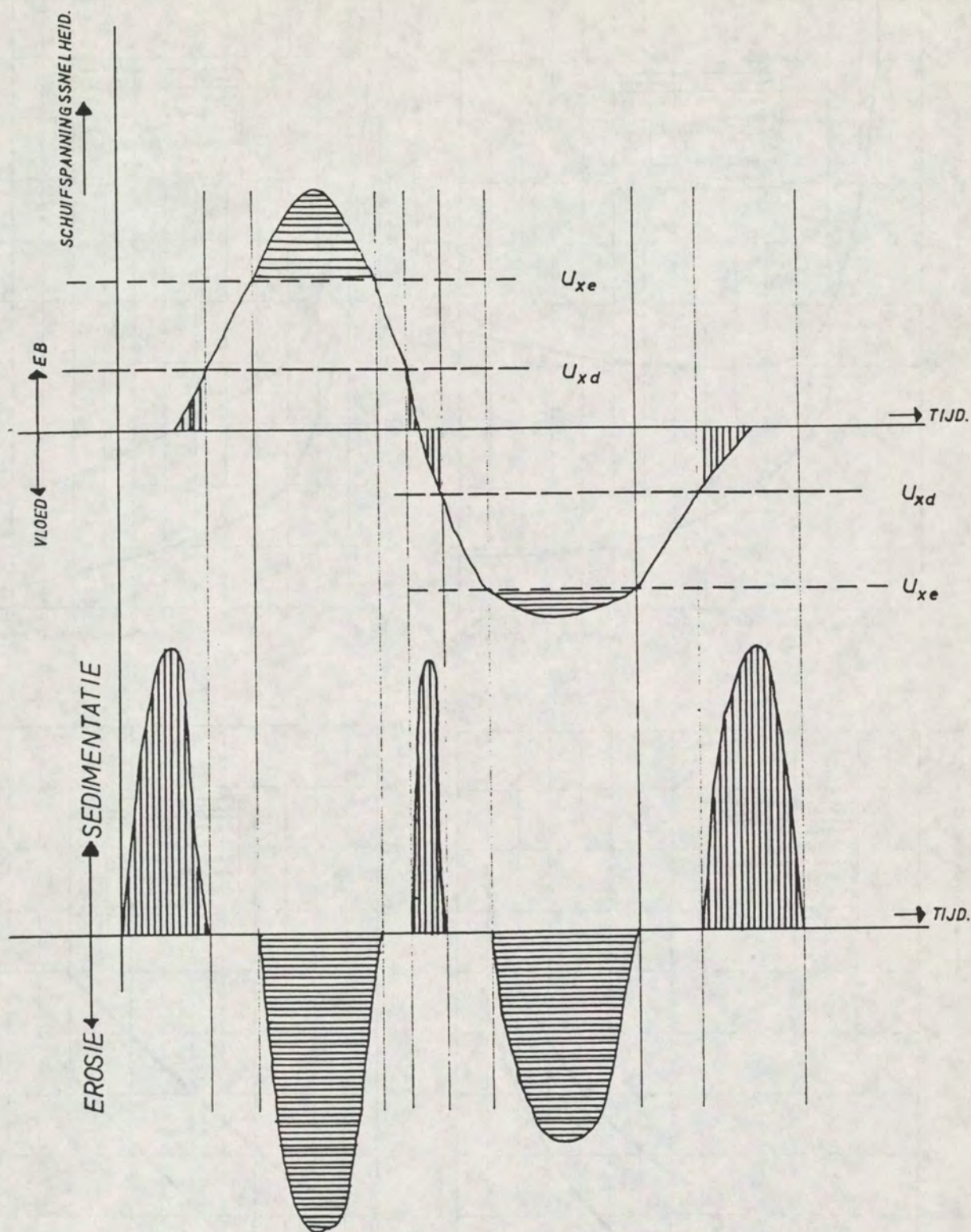
Uit: (91).

OPSTELLING GETIJGOOT.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 34.



U_{xe} = kritieke schuifspanningssnelheid voor erosie.
 U_{xd} = kritieke schuifspanningssnelheid voor sedimentatie.

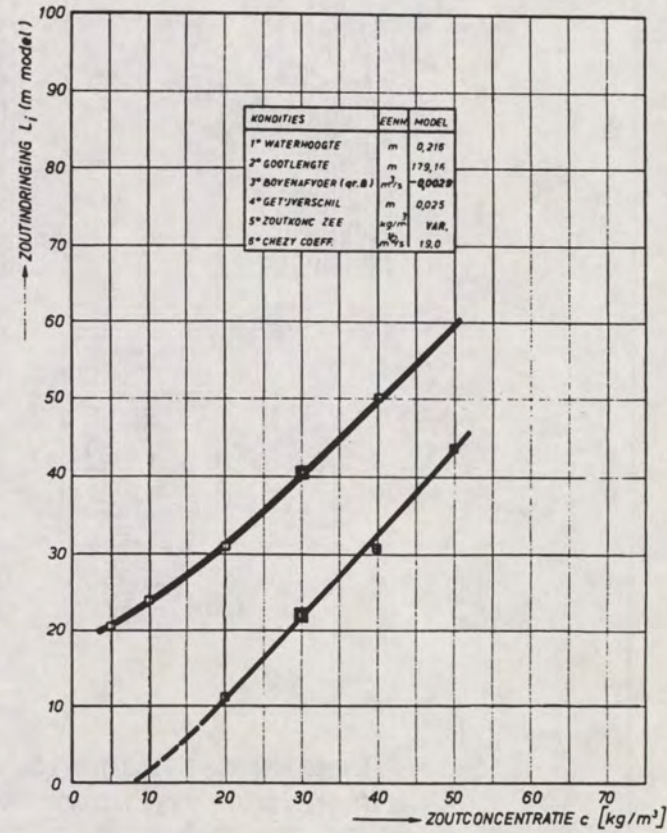
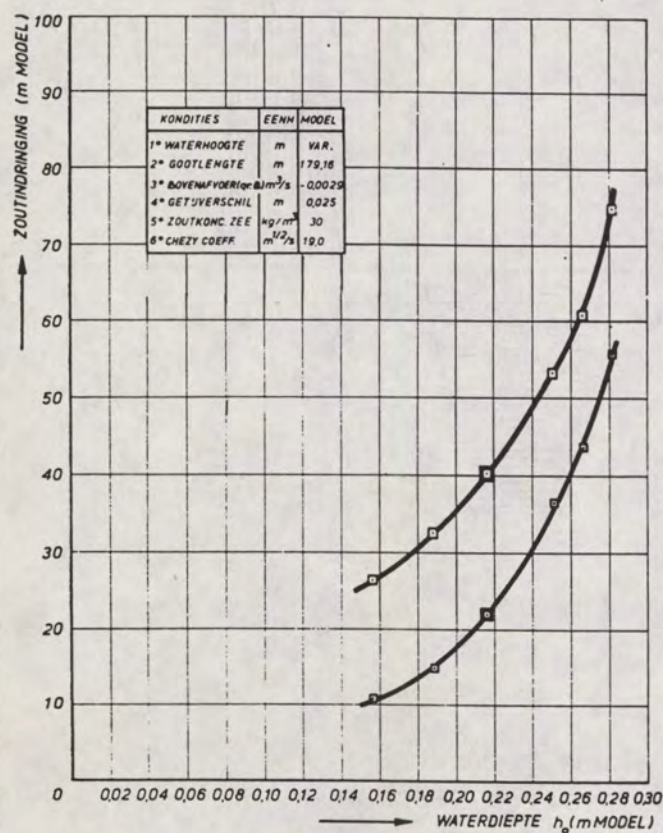
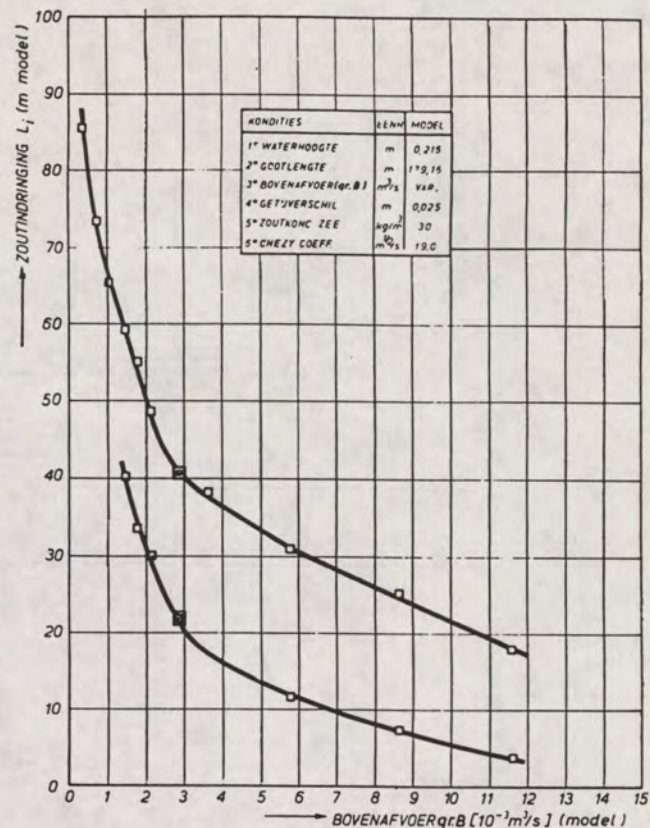
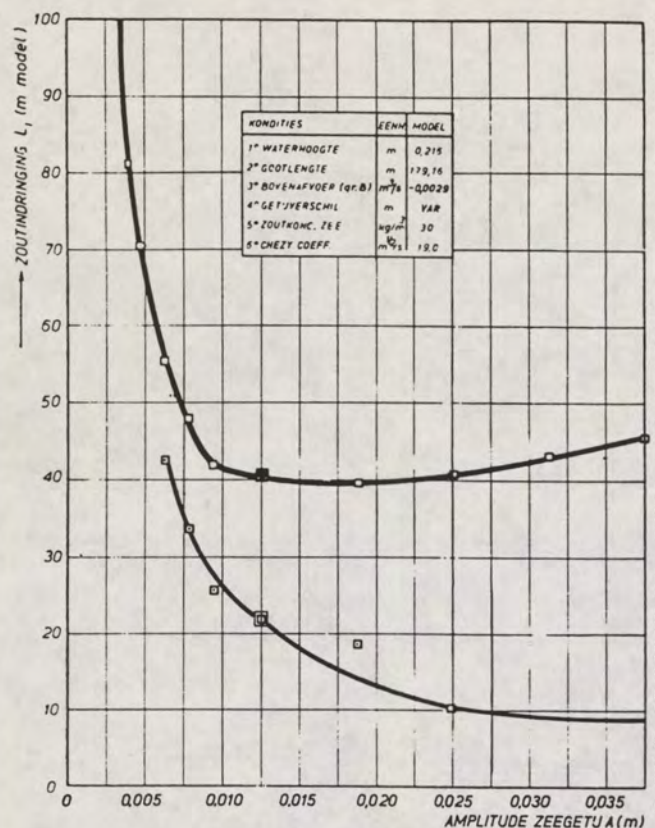
SEDIMENTATIE	: $U_x < U_{xd}$
EROSIE	: $U_x > U_{xe}$

SEDIMENTATIE EN EROSIE OVER GETIJPERIODE.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 35.



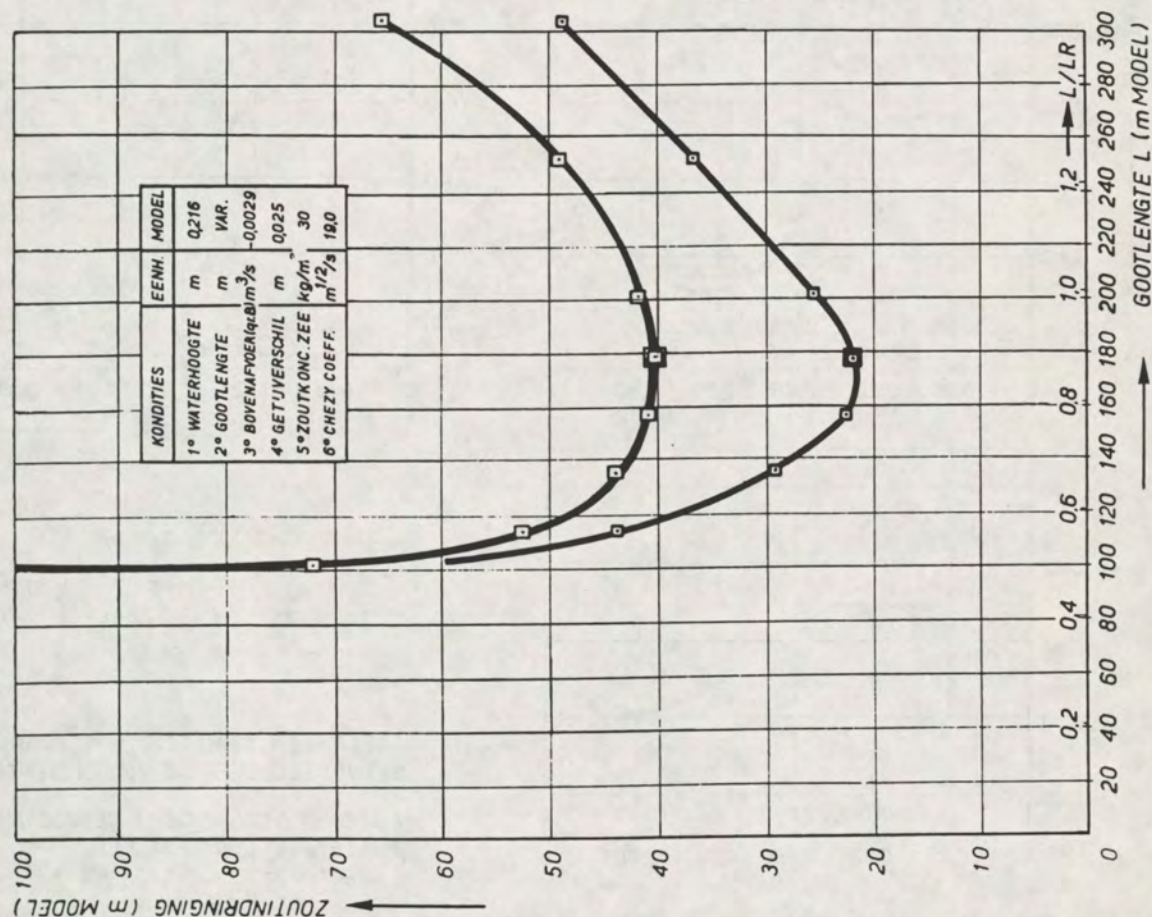
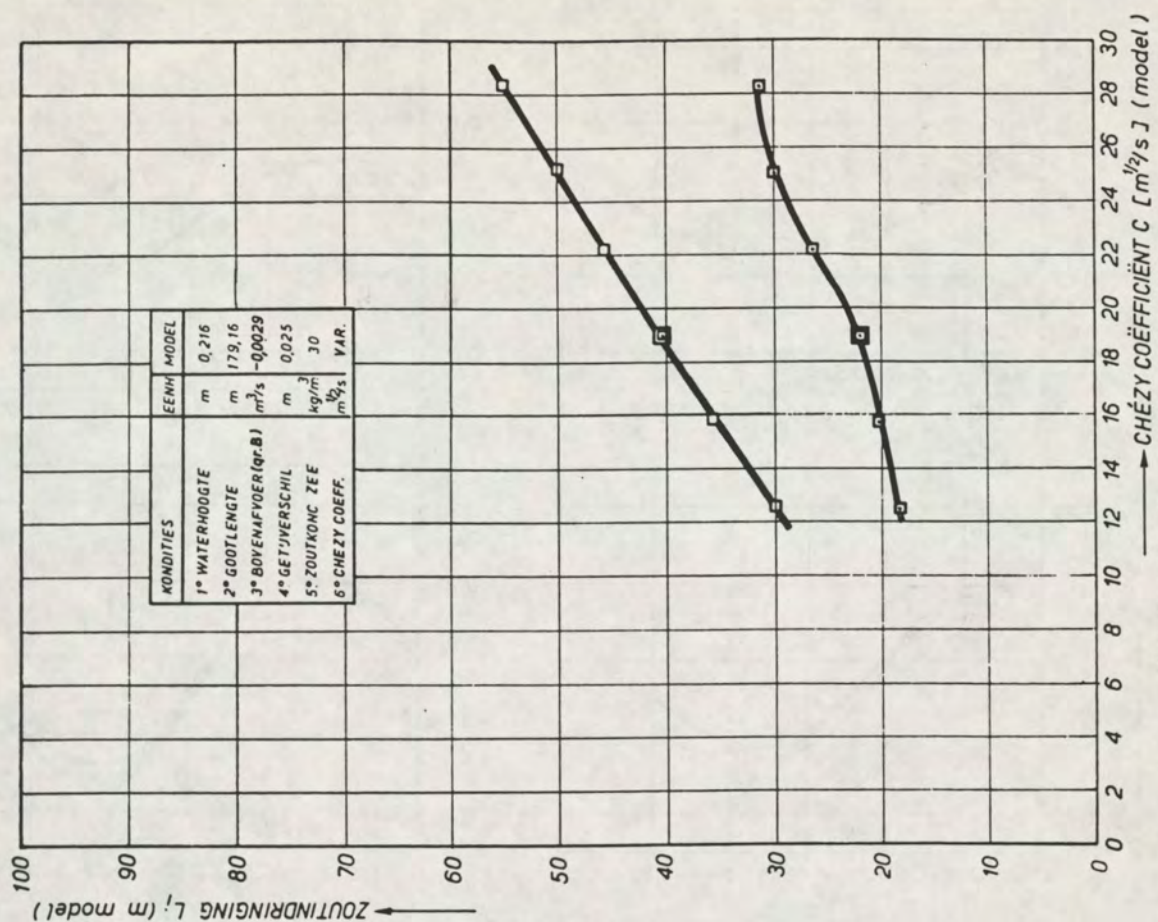
Uit:(93).

MAXIMALE EN MINIMALE ZOUTINDRINGING BIJ VARIATIE
GETIJAMPLITUDE, RIVIERAFVOER, WATERDIEPTE EN
ZOUTCONCENTRATIE ZEE.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 36.

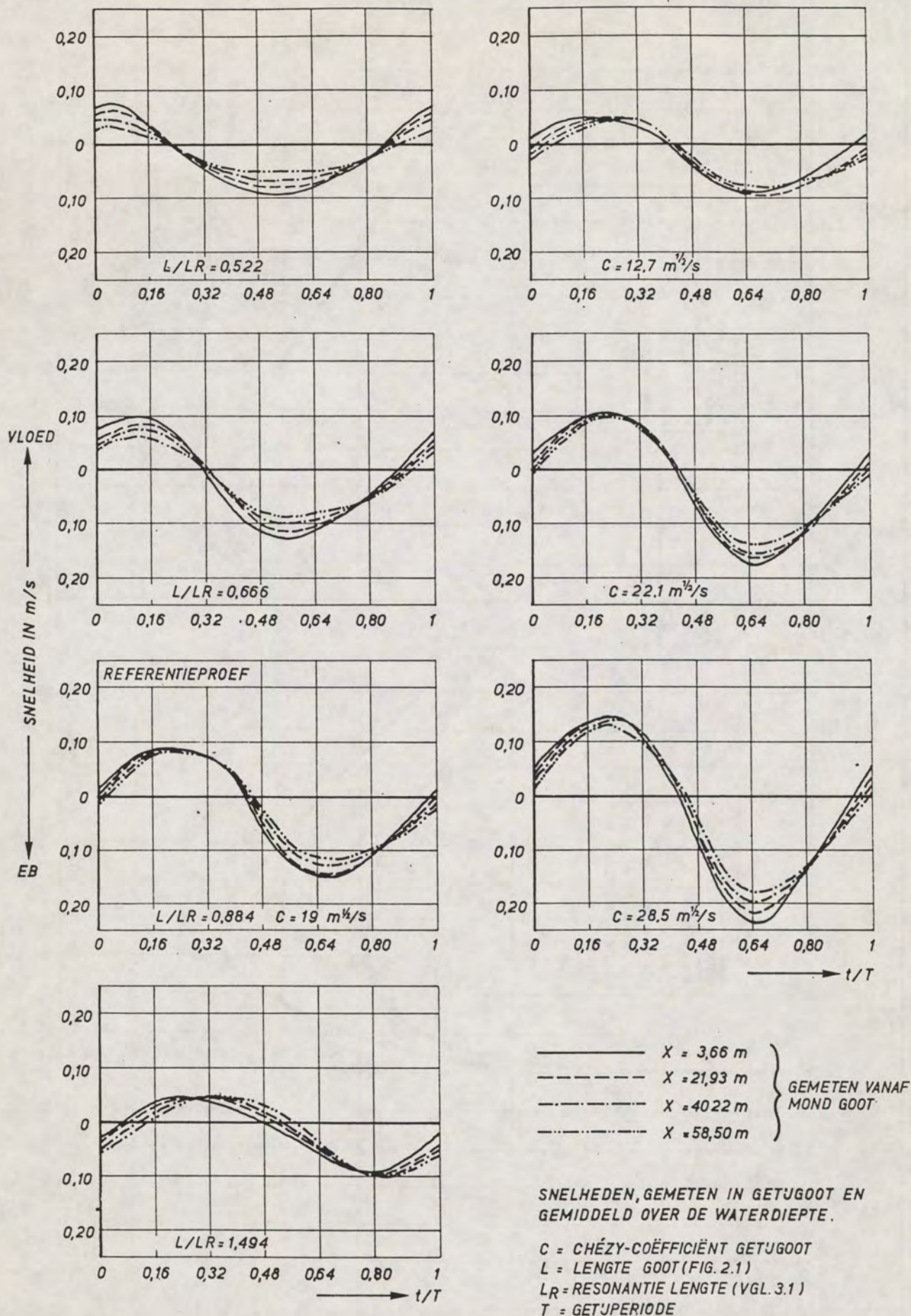


MAXIMALE EN MINIMALE ZOUTINDRINGING BIJ
VARIATIE GOOTLENGTE EN RUWHEID
(CHEZY-KOËFFICIËNT).

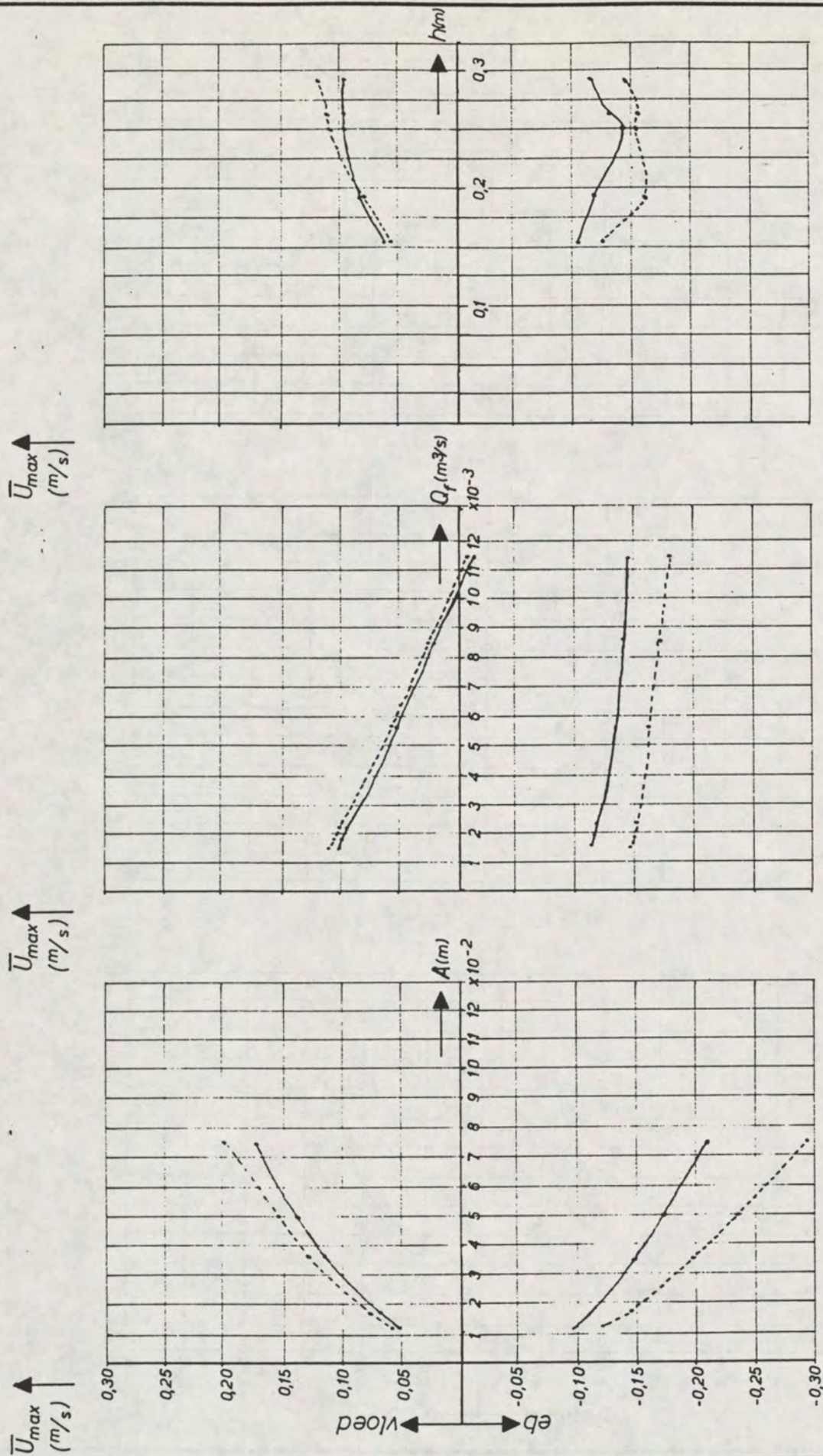
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 37.



GEMIDDELDE SNELHEDEN - INVLOED
LENGTE EN CHEZY-COËFFICIËNT



waterdiepte

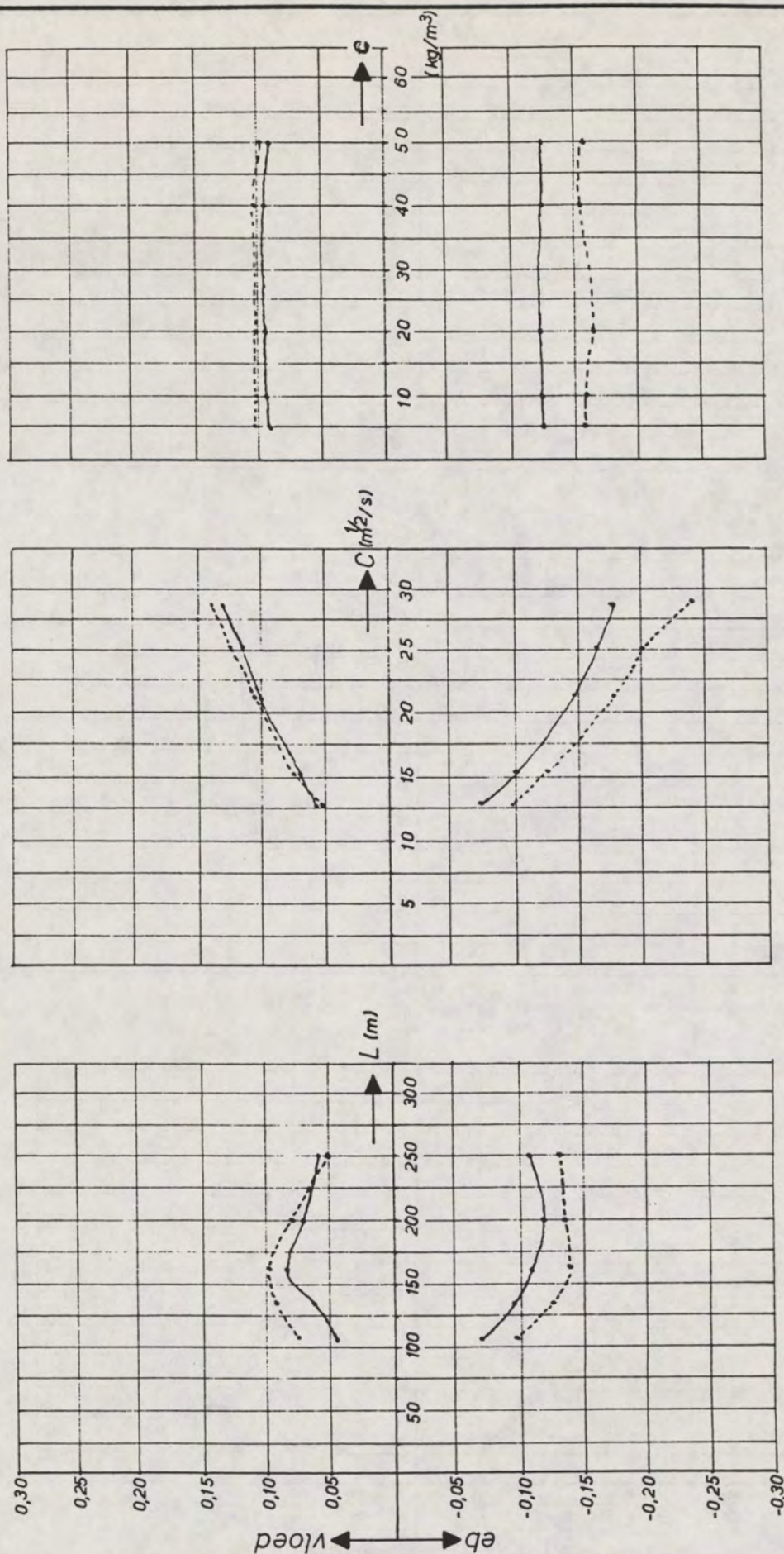
rivierafoer

amplitude zegetij
 ----- max. gemiddelde snelheid t.p.v. $x/dx = 3$
 — = max. gemiddelde snelheid t.p.v. $x/dx = 14$

MAXIMALE GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN BIJ VARIATIE
 GETIJAMPLITUDE, RIVIERAFVOER EN WATERDIEPTE.

\bar{U}_{max}
(m/s)

\bar{U}_{max}
(m/s)



zoutconcentratie

ruwheid

gootlengte

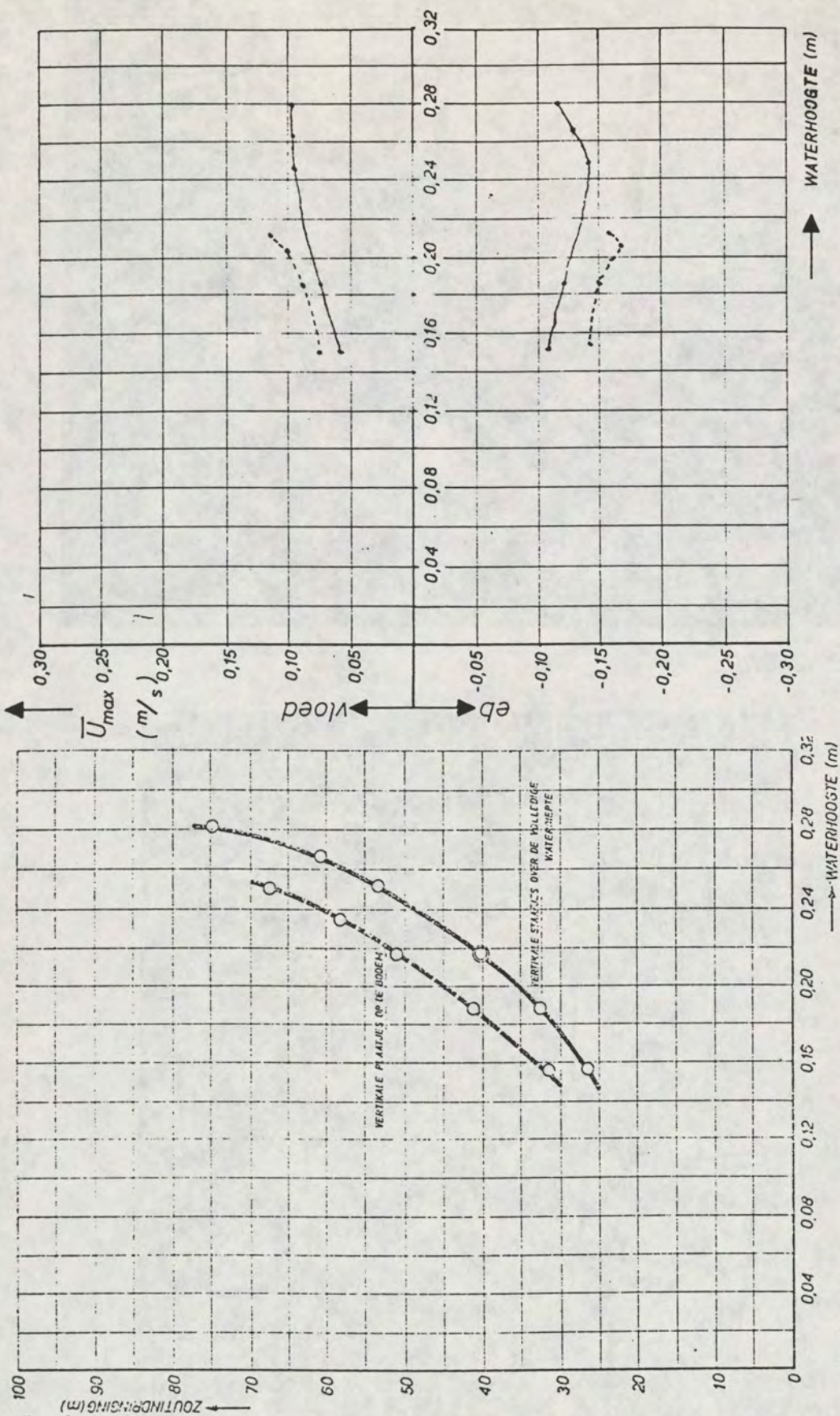
----- max. gemiddelde snelheid t.p.v. $x/dx = 3$
 ——— max. gemiddelde snelheid t.p.v. $x/dx = 14$

MAXIMALE GEMIDDELDE STROOMSNELHEDEN BIJ VARIATIE
 GOOTLENGTE, RUWHEID EN ZOUTCONTRATIE.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 40.



Uit: (92).

(maximale gemiddelde snelheden t.p.v. $x/dx=14$)

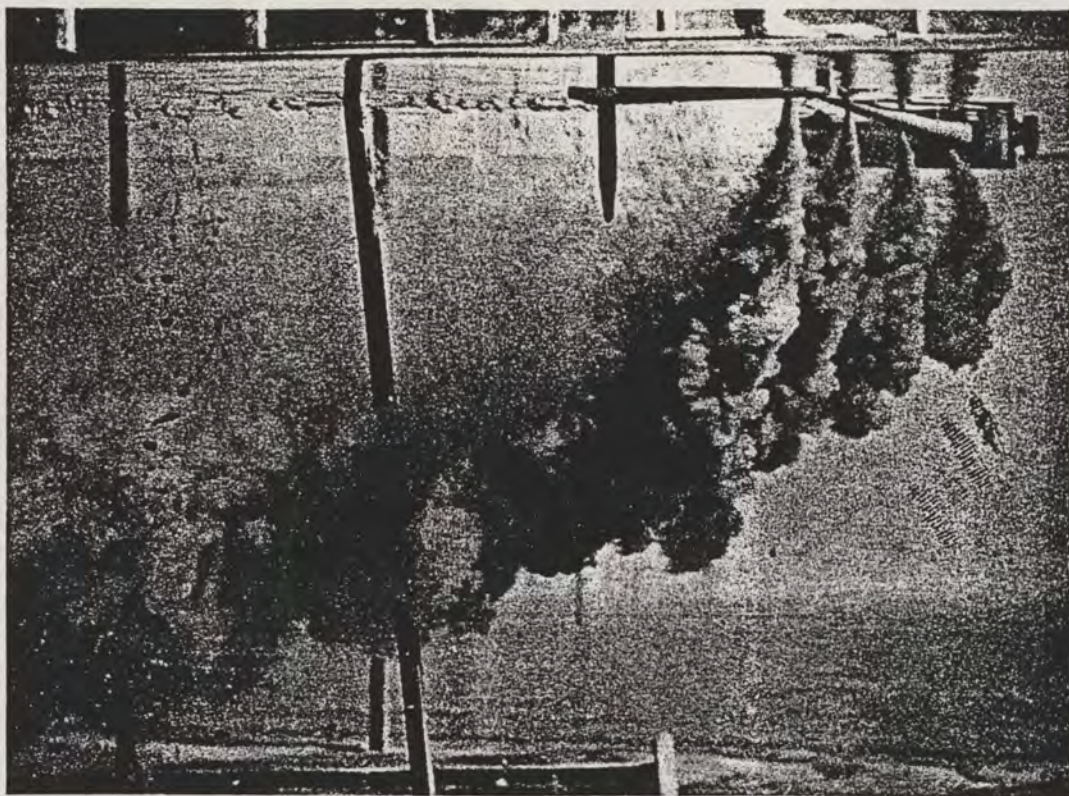
— = verticale staafjes over volledige waterdiepte
 - - - = verticale plaatjes op de bodem

INVLOED SOORT RUWHEID OP MAXIMALE
 ZOUTINDRINGING EN STROOMSNELHEDEN.

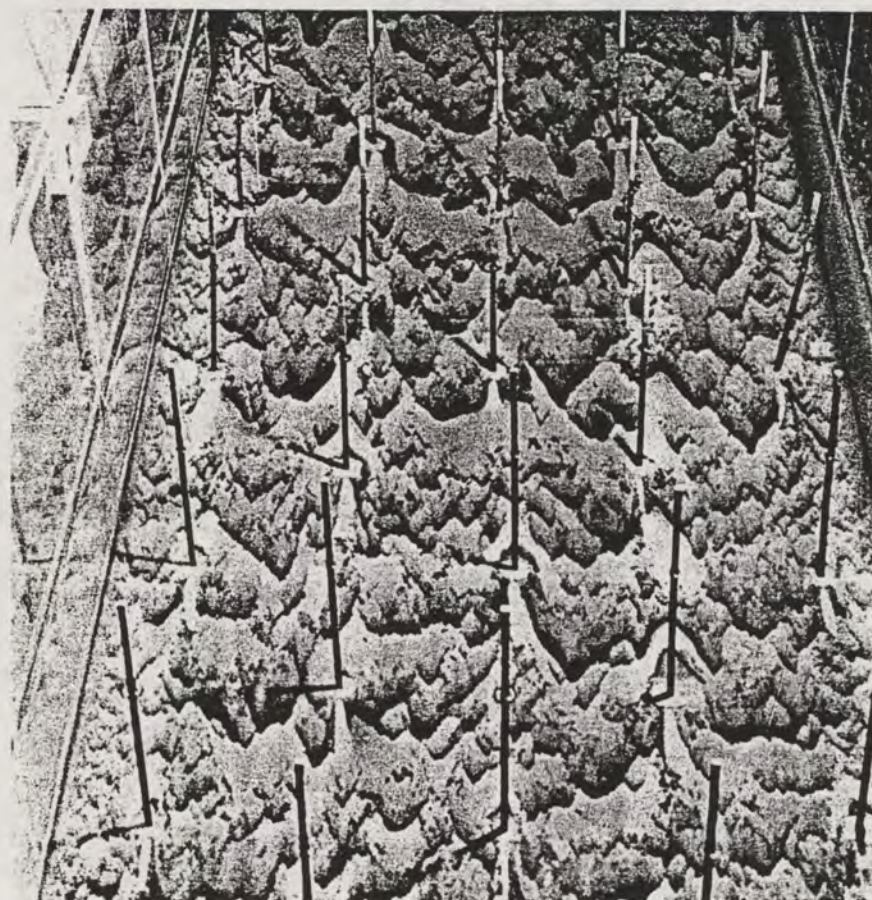
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig. 41.



(a) SLIBINJECTIE



(b) SLIBAFZETTING

Uit: (34).

PROEF MET SLIB IN GETIJGOOT
OPNAMEN VAN DE PROEF

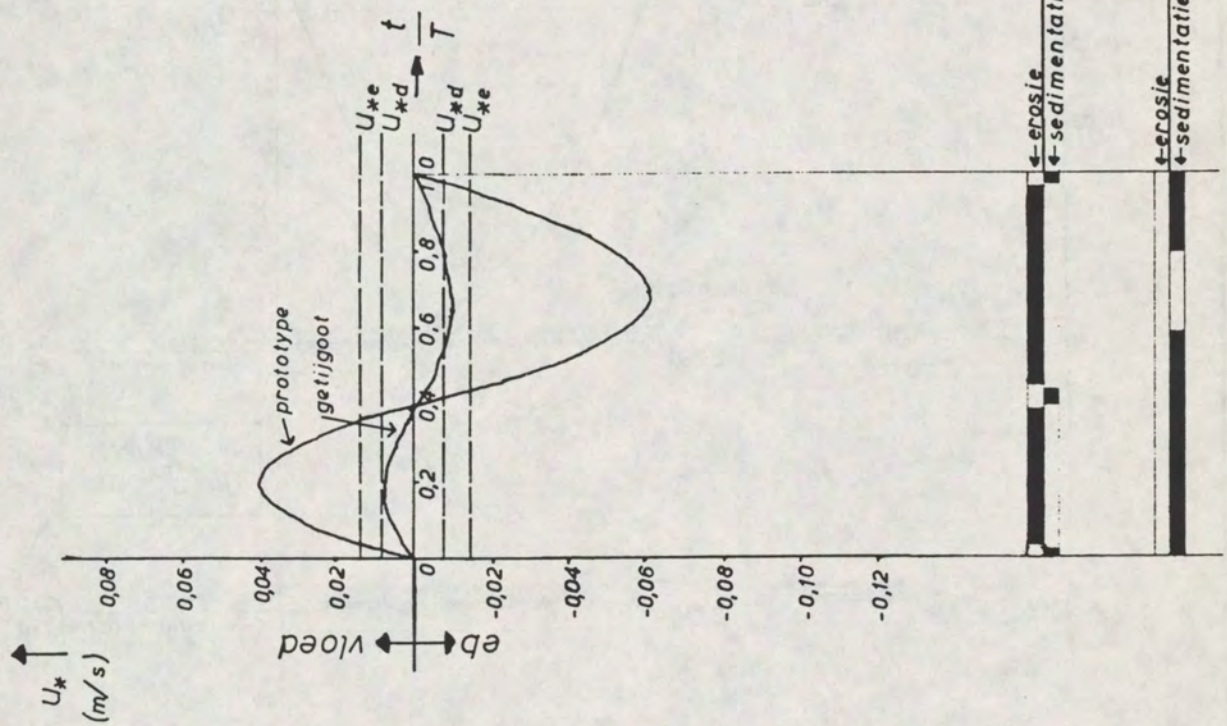
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

S 269 - 1062

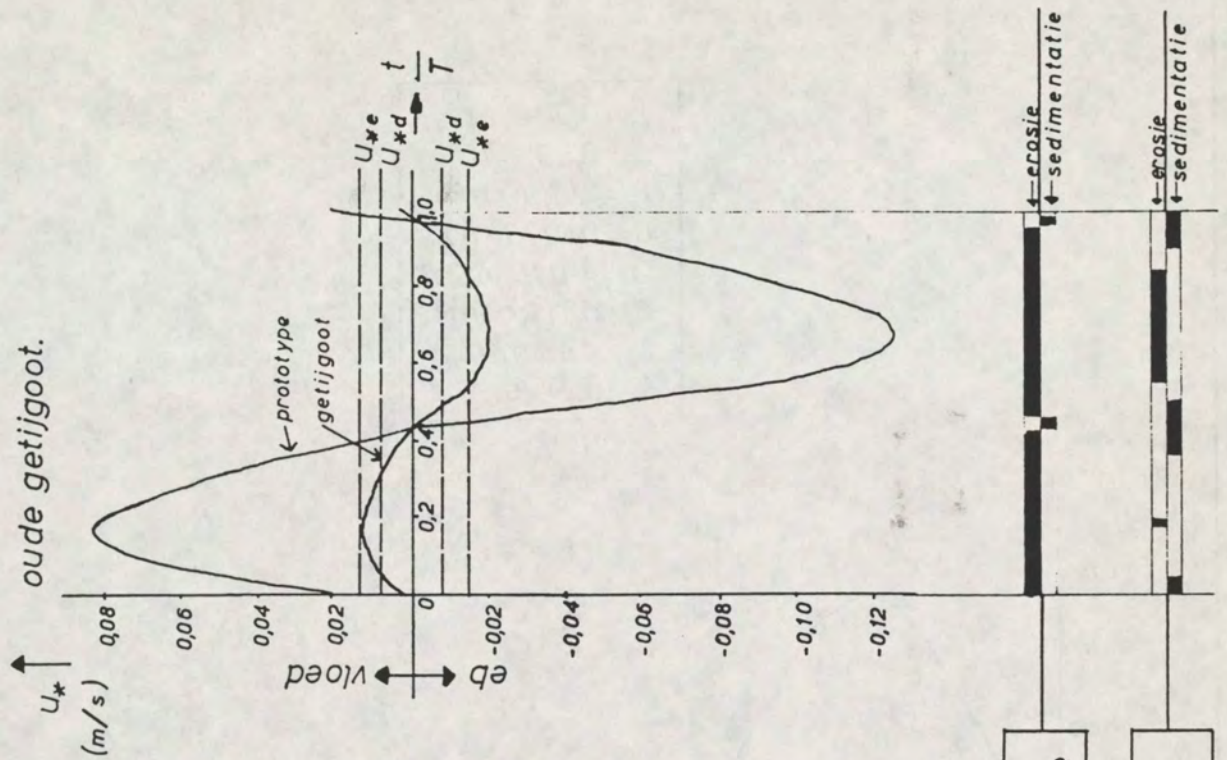
FIG. 42.

A4

a. Referentieproef uit systematisch onderzoek in oude getijgoot.



b. Proef met grootste getijslag uit systematisch onderzoek in oude getijgoot.



situatie
prototype

situatie
model

EROSIE EN SEDIMENTATIE BIJ PROEF IN
GETIJGROOT EN IN PROTOTYPE.

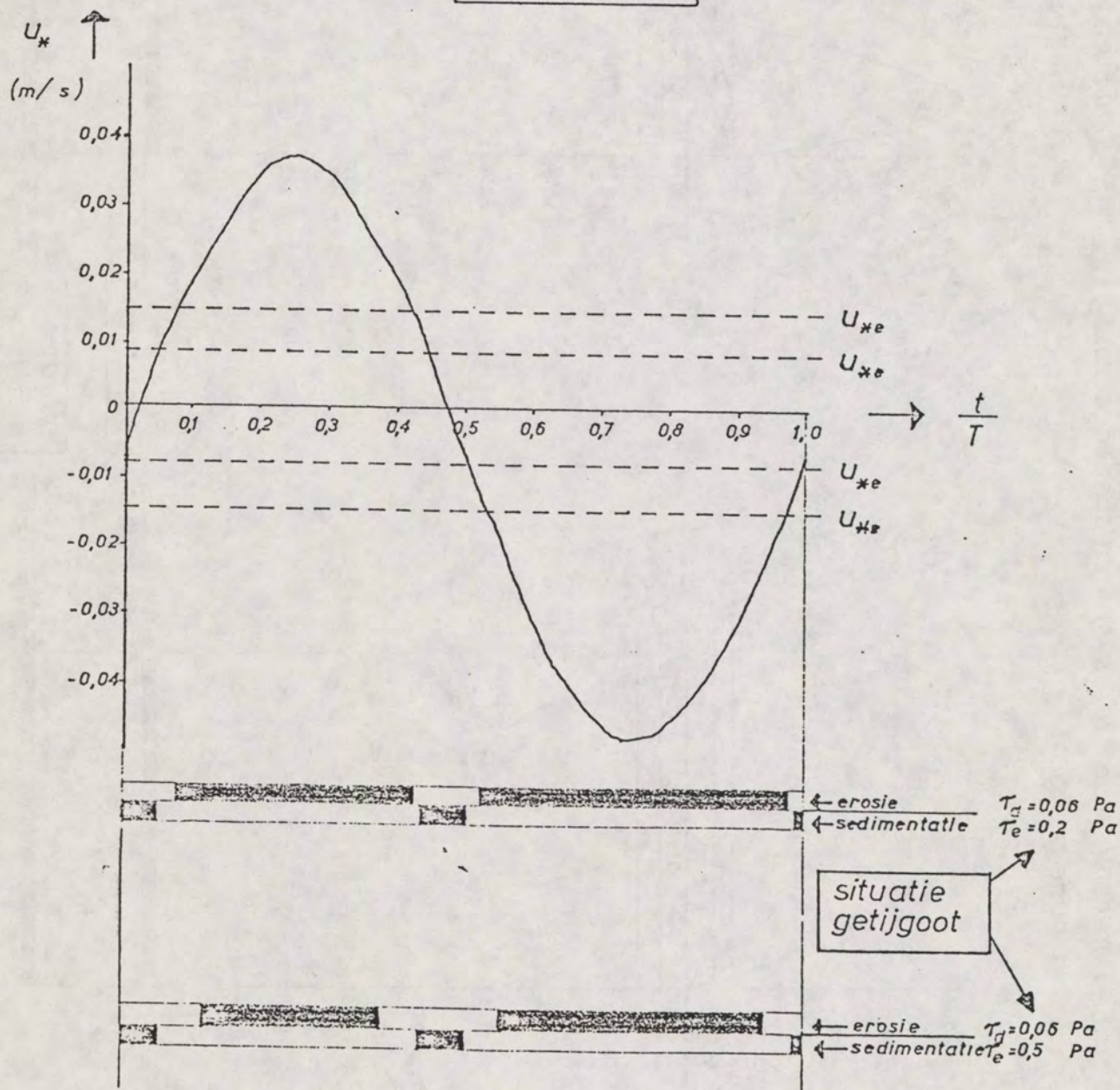
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

Fig.43.

Getijgootproef voor slibonderzoek op prototype-slib.

$b = 1,00 \text{ m}$
 $h_0 = 0,20 \text{ m}$
 $L = 179,16 \text{ m}$
 $Q_r = 0,0173 \text{ m}^3/\text{s}$
 $2a_0 = 0,15 \text{ m}$
 $S = 30 \text{ kg/m}^3$
 $C = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$
 $T = 559 \text{ s}$



EROSIE EN SEDIMENTATIE

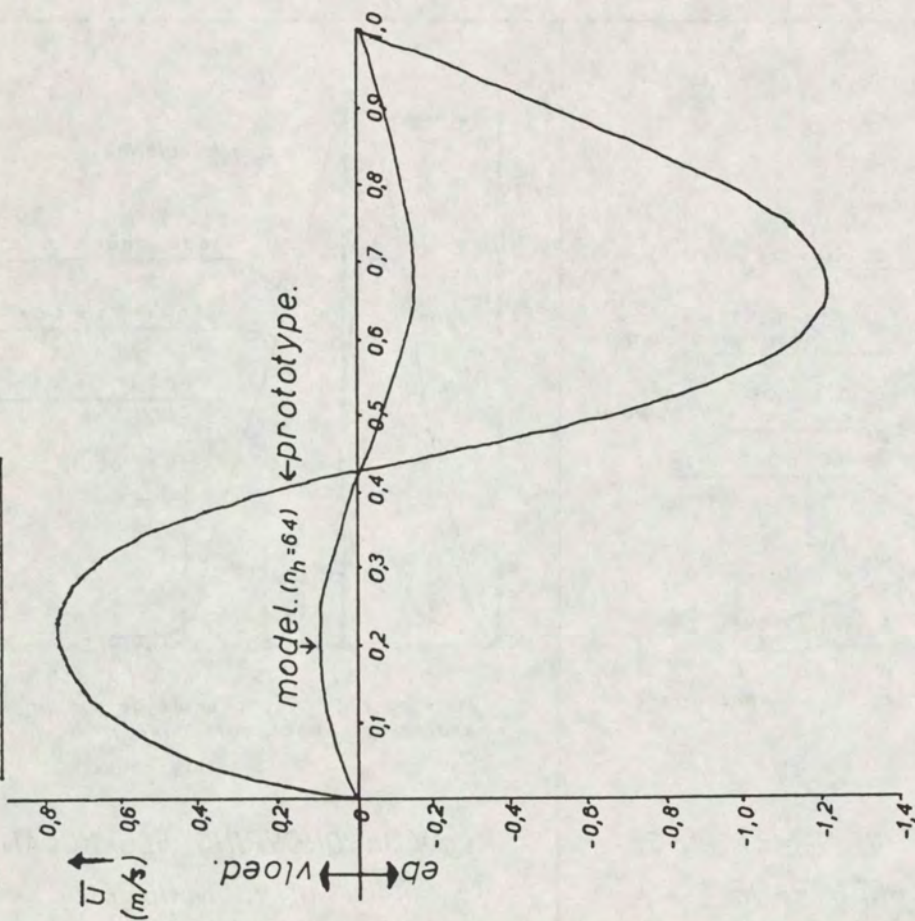
BIJ GETIJGOOTPROEF.

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

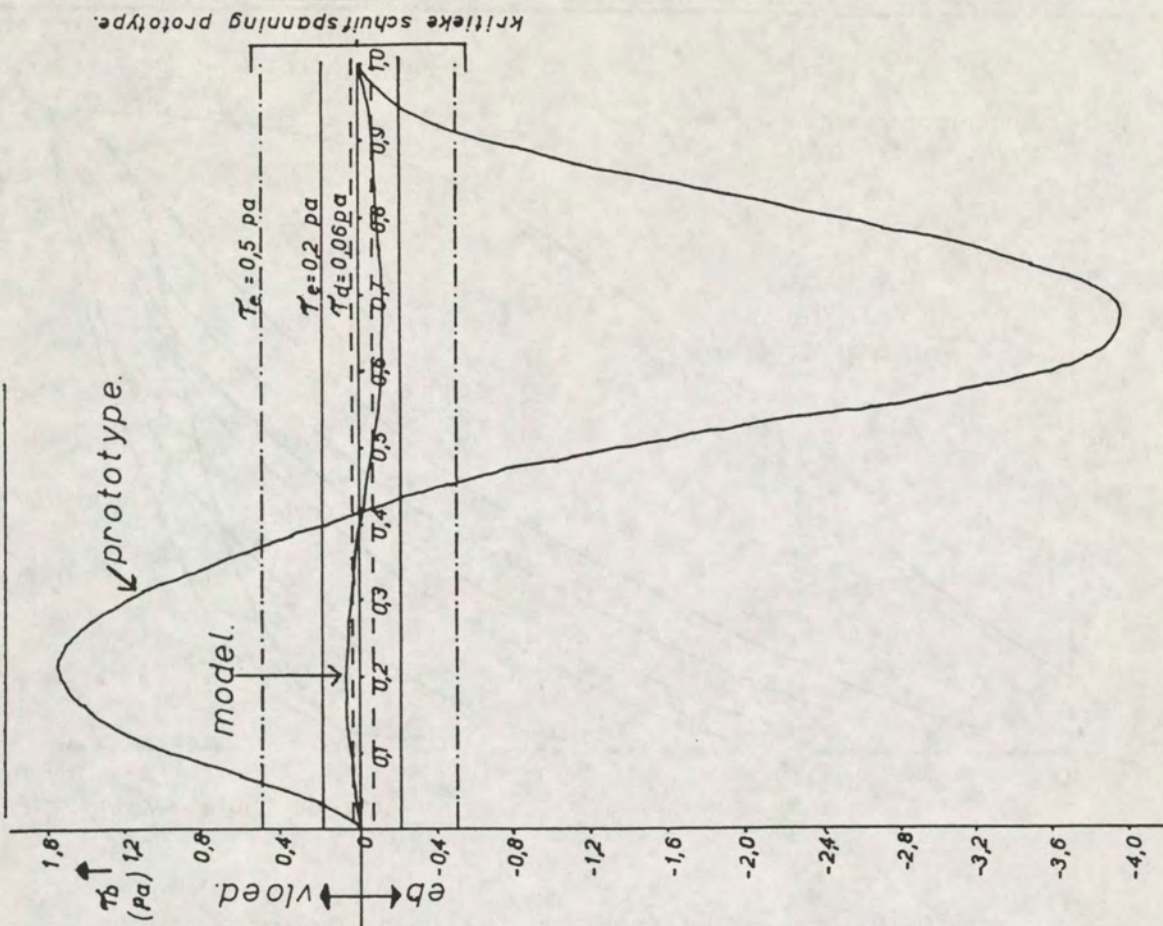
A4

Fig. 44.

A. STROOMSNELHEDEN.



B. BODEMSCHUIFSPANNINGEN.



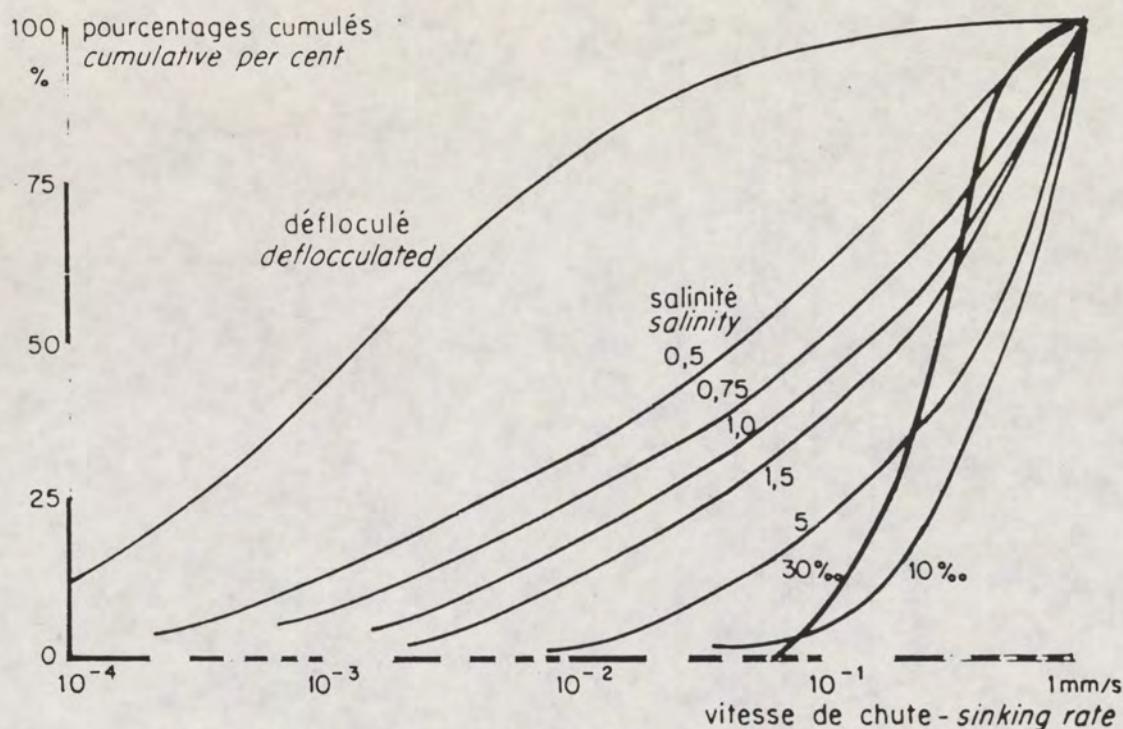
Referentieproef uit systematisch onderzoek in oude getijgoot.

BODEMSCHUIFSPANNINGEN IN MODEL
EN PROTOTYPE.

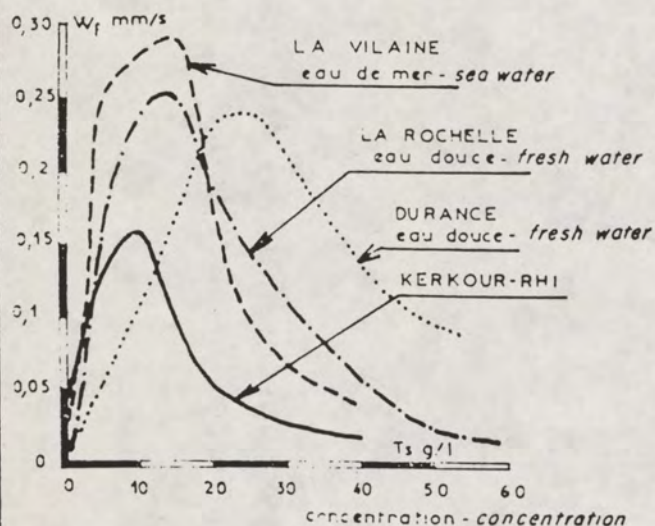
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

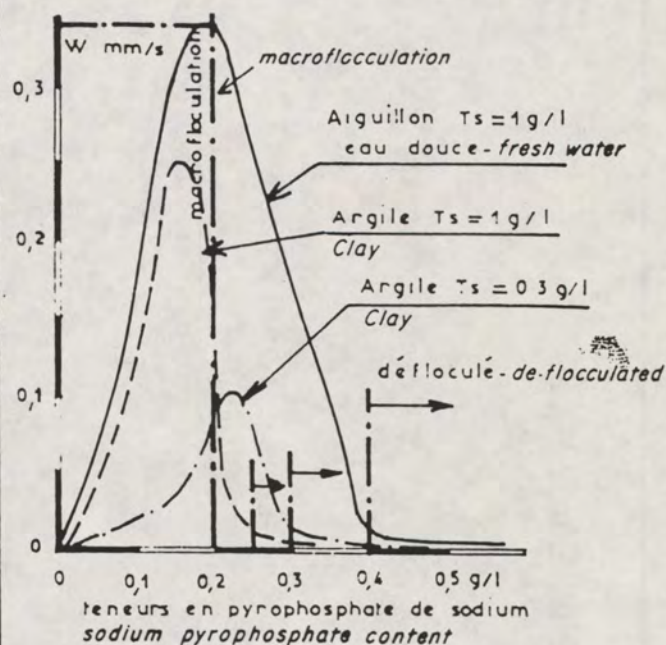
Fig. 45.



(a) OPTREDEN VAN FLOKKULATIE BIJ TOENAME ZOUTKONCENTRATIE



(b) FLOKKULATIE IN SAMENHANG MET SLIBKONCENTRATIE



(c) BEVORDERING FLOKKULATIE MET UITVLOKMIDDEL

FLOKKULATIE SLIBMATERIAAL IN
SAMENHANG MET VLOEISTOFMILIEU

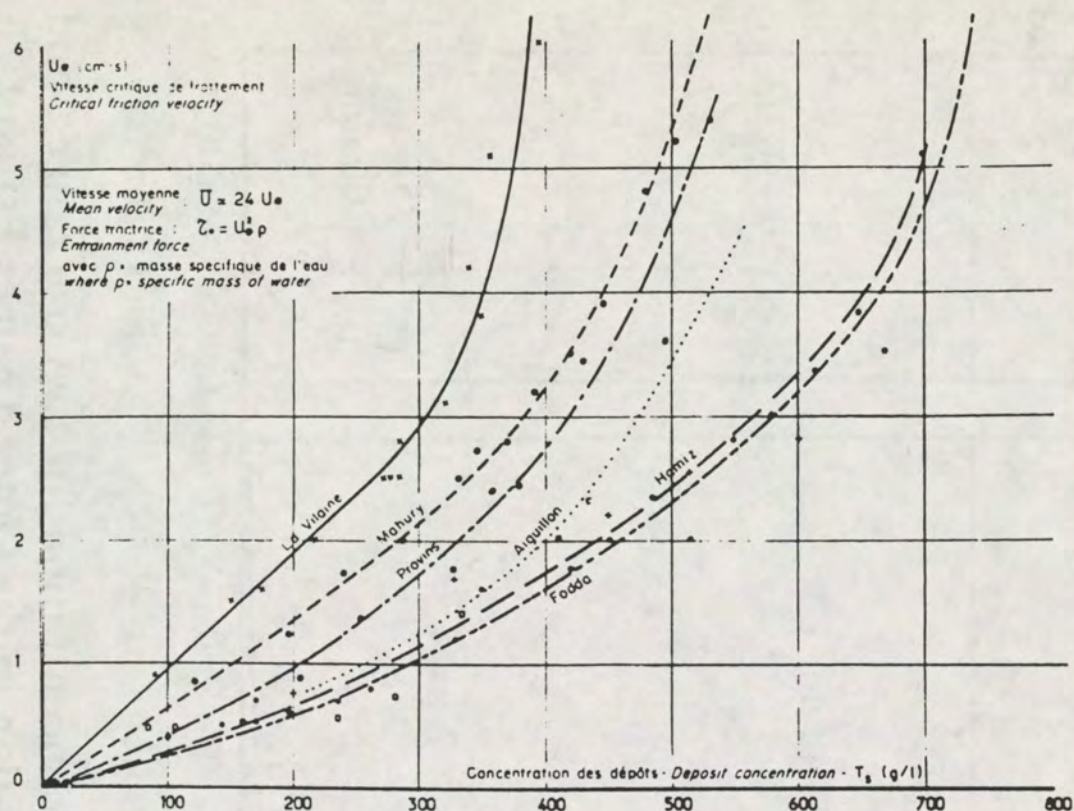
REF MIGNIOT (1968)

A4

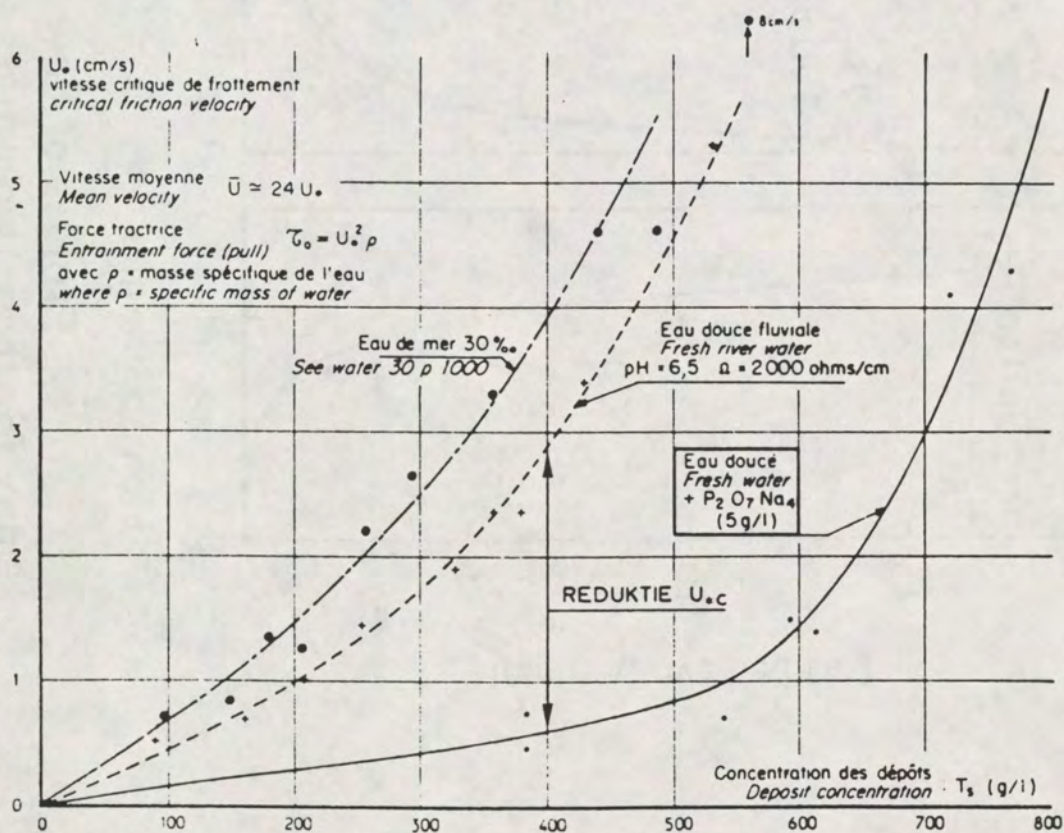
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

S.269-1022

FIG. 46.



(a) ERODEERBAARHEID IN SAMENHANG MET KONCENTRATIE BU DIV. SLIBSOORTEN



(b) ERODEERBAARHEID BEHANDELD SLIB t.o.v. NIET-BEHANDELD SLIB

ERODEERBAARHEID SLIBMATERIALEN
BEINVLOEDING ERODEERBAARHEID

REF. MIGNIOT (1968)

K_M

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

S.269-1023

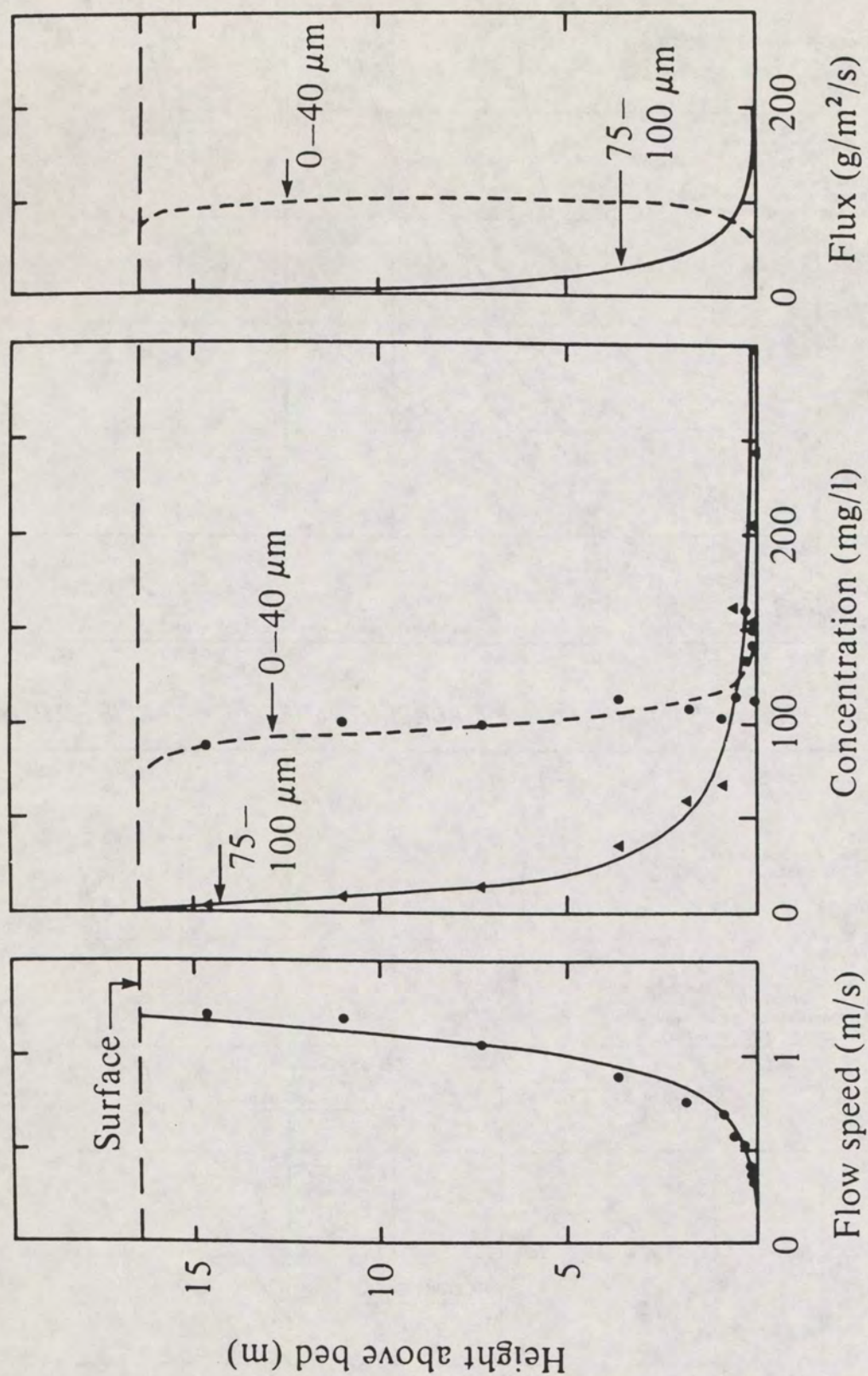
FIG. 47

UIT : (103)

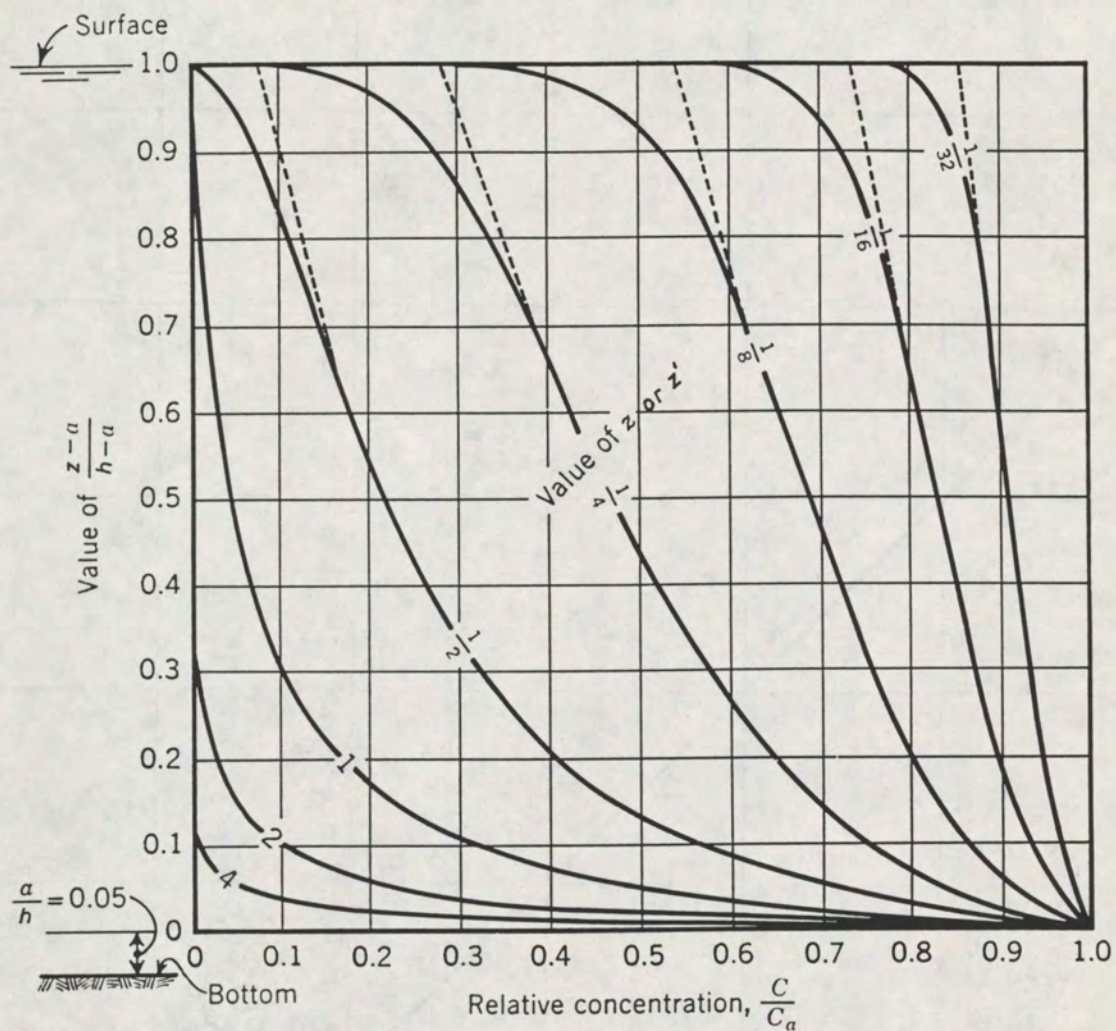
TRANSPORT VAN FIJN ZAND

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

fig: 48



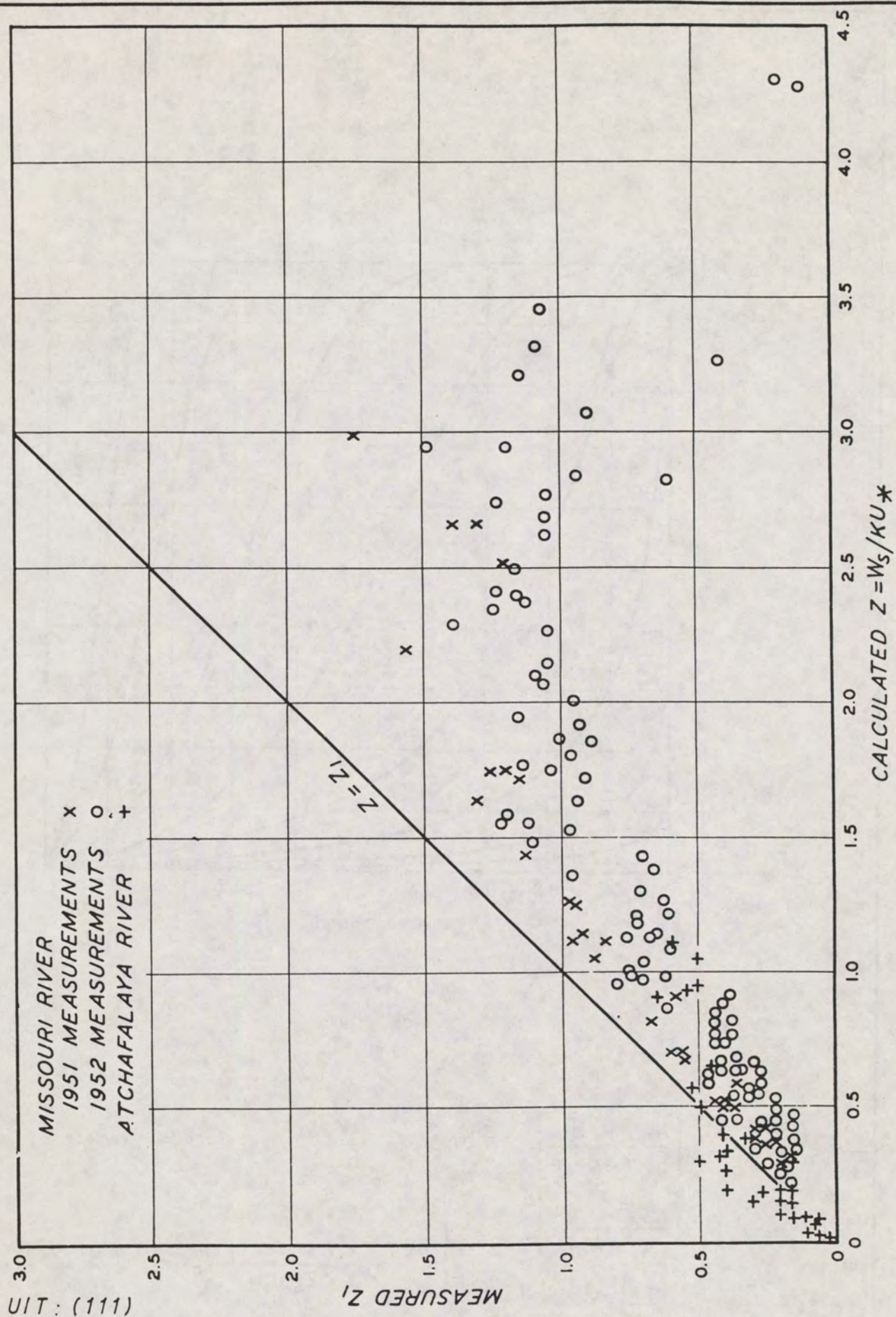
Profiles of flow speed, concentration for two size ranges, and flux for these two ranges for a station in the Outer Thames Estuary. (From Thorn, 1975b.)



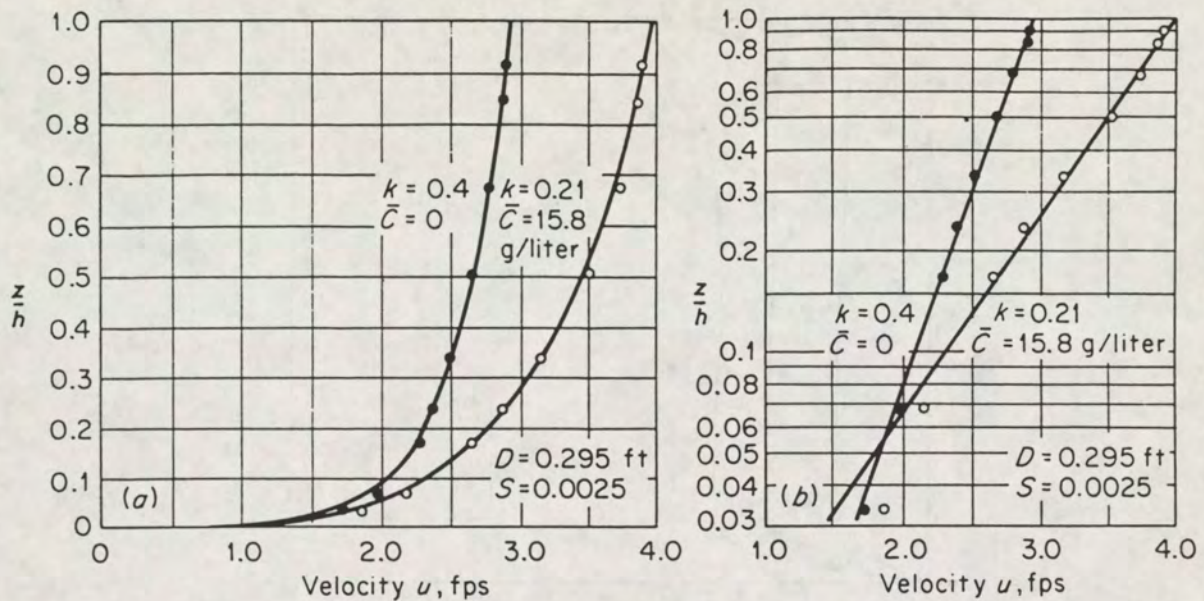
$$\frac{C}{C_a} = \left[\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right]^Z, \text{ met } Z = \frac{W_s}{K U_*} \quad (\text{parabolisch verloop } \epsilon_s)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{z}{h} < 0,5: \frac{C}{C_a} = \left[\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right]^{Z'} \\ \frac{z}{h} \geq 0,5: \frac{C}{C_a} = \left[\frac{a}{h-a} \right]^{Z'} \cdot e^{-4Z'(\frac{z}{h}-0,5)} \end{array} \right\} \text{ met } Z' = \frac{h W_s}{4 \epsilon_{s, \max}} \quad \left(\begin{array}{l} \text{parabolisch verloop } \epsilon_s \text{ voor } \\ z < 0,5 \text{ en konstante } \epsilon_s \text{ voor } z \geq 0,5 \end{array} \right)$$

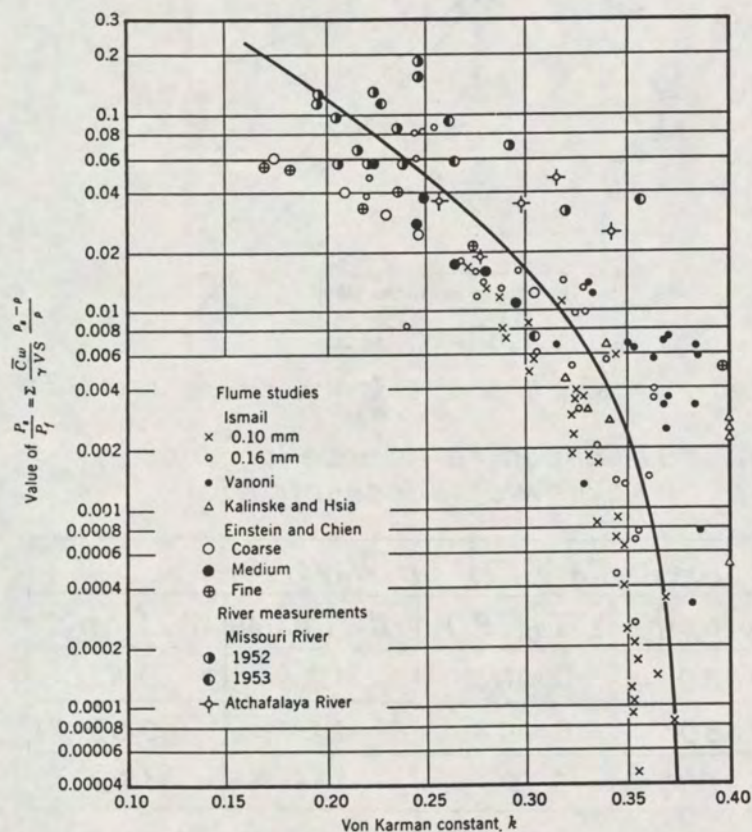
THEORETISCHE CONCENTRATIEVERDELING VOOR
DIVERSE WAARDEN VAN Z of Z'



VERGELIJKEN BEREKENDE EN GEMETEN
WAARDEN VAN Z

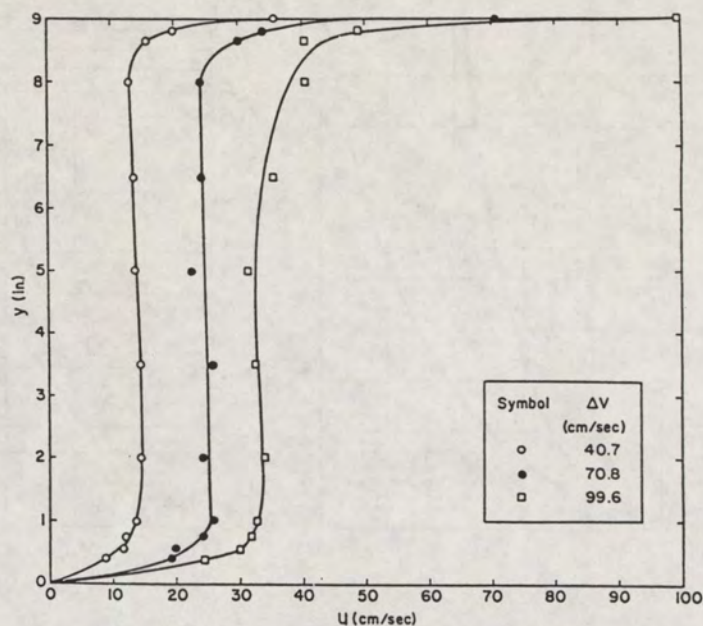


a) Invloed sedimentconcentratie op snelheidsprofiel (uit:113)

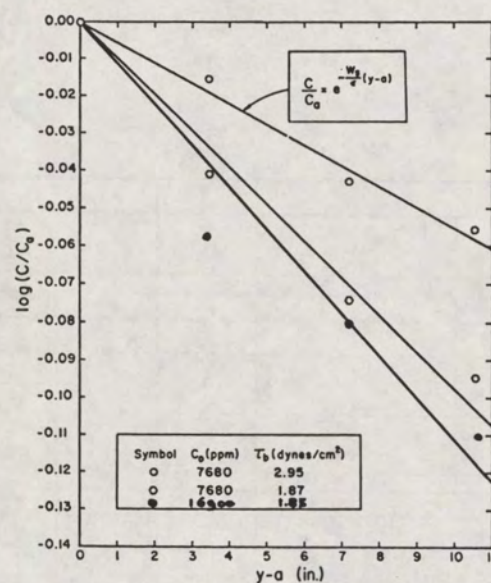


b) Variatie Von Karman konstante k met sedimentconcentratie (uit:112)

INVLOED SEDIMENTCONCENTRATIE OP SNEL-
HEIDSPROFIEL EN VON KARMANKONSTANTE



a) Snelheidsprofiel bij proeven in carousel met waterdiepte $h=0,23$ m



b) Concentratieverdeling bij evenwichtsc concentratie

invloed C_0 en T_b op W_S/E			
C_0 (ppm)	T_b (P)	U_* (mm/s)	W_S/E (m ⁻¹)
7680	0,305	17	0,51
7680	0,194	14	0,87
16900	0,194	14	1,02

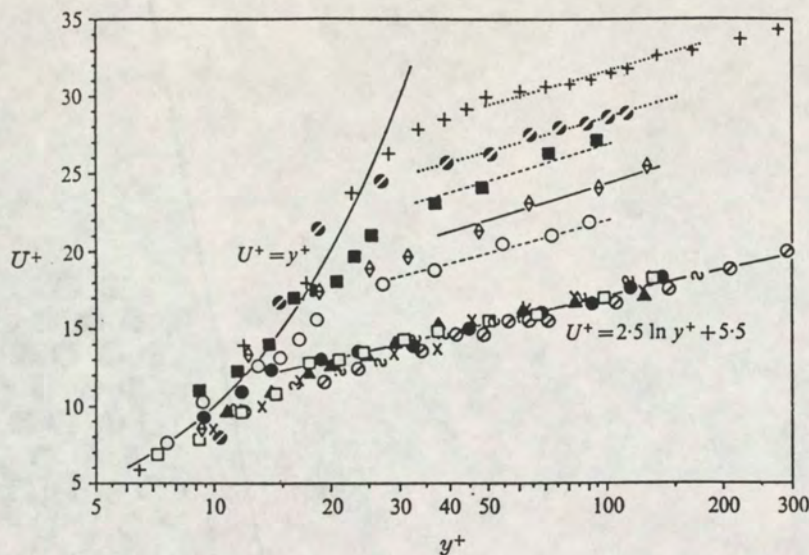
UIT: (115)

RESULTATEN CAROUSELPROEVEN

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

fig:52



$$U^+ = \frac{\bar{U}}{U_*}$$

$$y^+ = \frac{y U_*}{\nu}$$

a) Mean streamwise velocity distributions.

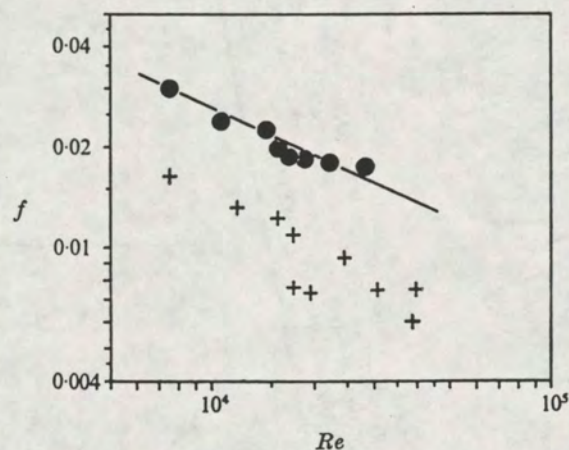
Newtonian
Quartz sand/fresh water

Re_U	
5600	●
8000	□
9600	×
10400	▲
15300	~
20000	○

Non-Newtonian flow systems
Mud bottom/clay suspension

Re_U	
5400	○
8500	■
10800	◊
24600	+
27800	◐
	} non-eroding
	} eroding

Drag reduction in a suspension of clay



b) Coefficient of friction $f = 8(u_* / \bar{U})^2$ as function of equivalent pipe Reynolds number $Re = 4\bar{U}R/\nu$ (and suspension parameters) for experimental smooth open-channel flows. ●, pure water/sand bottom; +, sea-water/clay suspension with mud bottom.

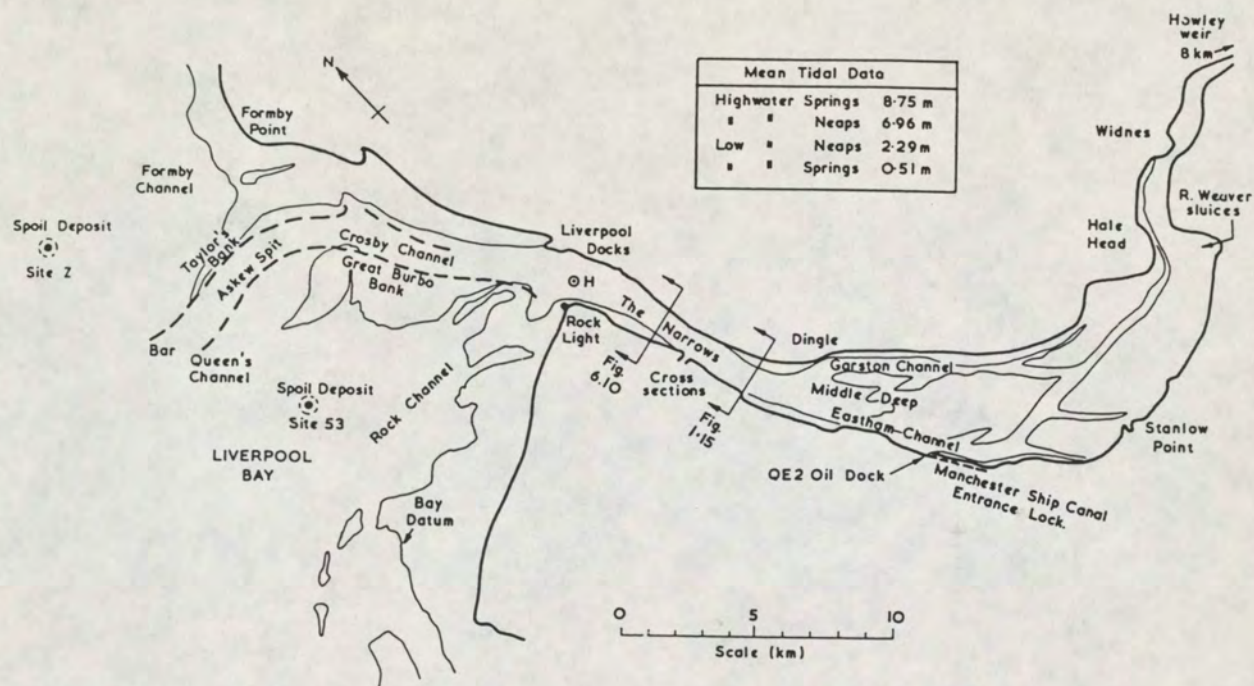
UIT: (116)

INVLOED SLIB OP STROMING

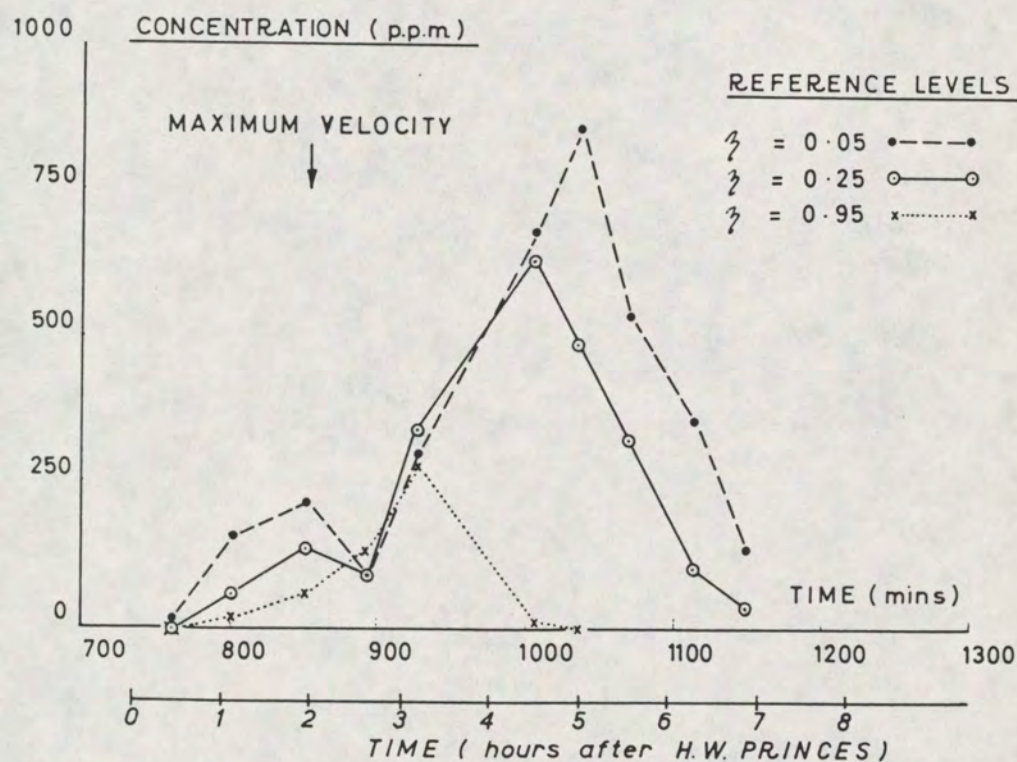
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

fig: 53



a) Plattegrond Mersey estuarium en gedeelte Liverpool Bay



b) Variatie slibconcentratie met de diepte en de tijd

UIT: (120)

VARIATIE SLIBCONCENTRATIE MET DE
DIEPTE EN DE TIJD IN THE NARROWS
VAN HET MERSEY ESTUARIUM

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

A4

fig: 55

