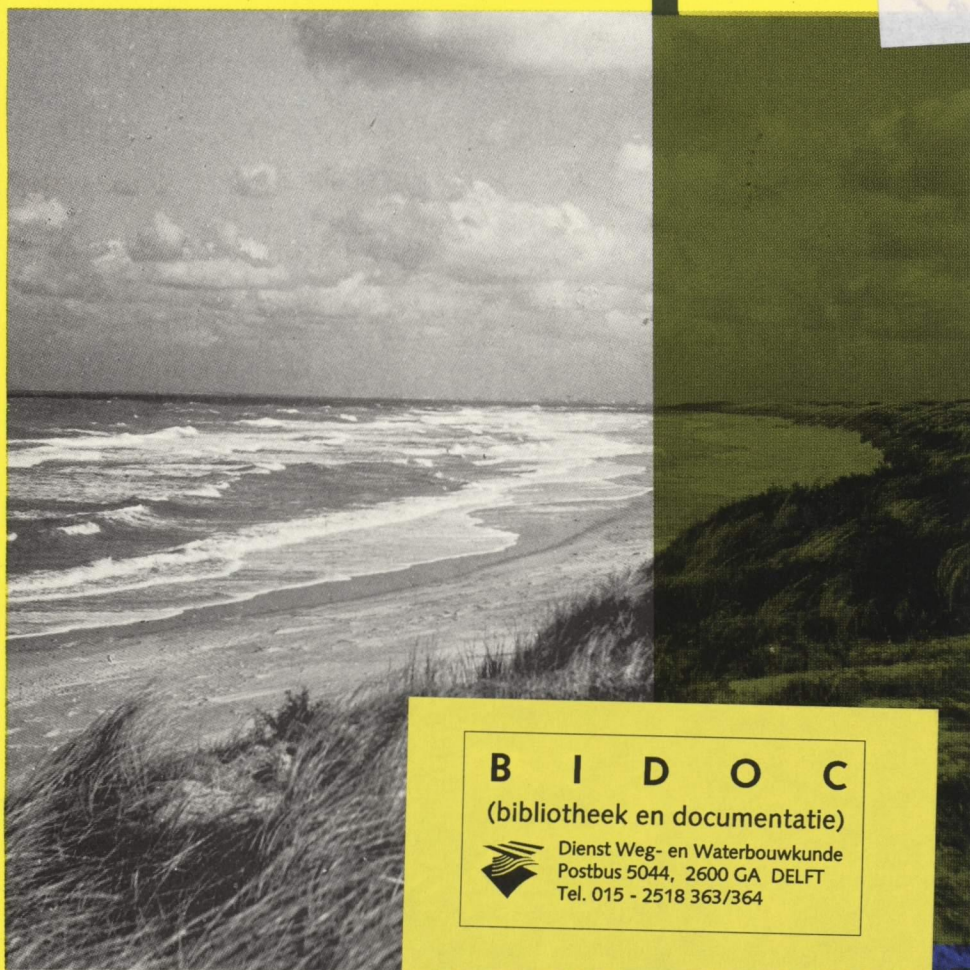


9.3



B I D O C

(bibliotheek en documentatie)



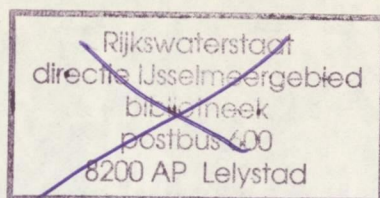
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT
Tel. 015 - 2518 363/364

de

district

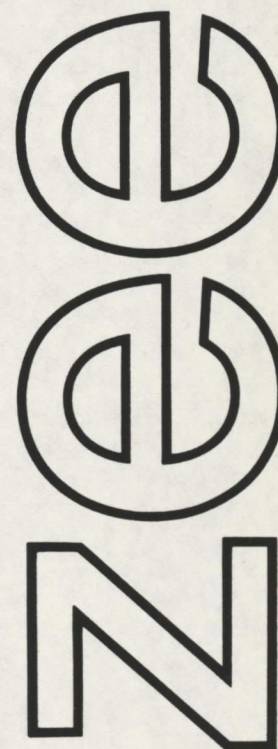
en

kust



Slib

Het thema van het eerste nummer is slib en wel in de zoute getijwateren. In een drietal artikelen worden een aantal aspecten rond het slib belicht, waaraan binnen het district Kust en Zee wordt gewerkt. Met name zijn dat de slib-gehaltebepaling, de eigenschappen van slib en de modellering van de aanslibbing van havens. Uit deze artikelen blijkt duidelijk, dat slib een uitermate ingewikkelde en moeilijk te beschrijven substantie vormt, die nog het nodige aan onderzoeksvragen opwerpt. De kennis op het gebied van het gedrag van slib is nog dermate gering, dat een voldoende nauwkeurig antwoord op de gestelde vragen nauwelijks te geven is. Naar verwachting zullen de vragen uit de samenleving over wat te doen met slib, in ingewikkelder vorm op de Rijkswaterstaat afkomen. Dit onderstreept temeer de noodzaak van het onderzoek om die vragen straks adequaat te kunnen beantwoorden. Daarom heeft het district dan ook in voorbereiding een programma voor het fundamenteel fysisch slibonderzoek voor de zoute getijwateren, waarvan de resultaten t.z.t. zullen worden gepresenteerd.



district kust en

Redactie:
van Alkemadelaan 400
2579 AT 's-Gravenhage
Tel.: 070 - 26 41 01

02 SEP 2005



TEN GELEIDE

Binnen het District Kust en Zee van de directie Waterhuishouding en Waterbeweging bestaat door de geografische spreiding reeds langer de behoefte aan informatieuitwisseling op allerlei gebied.

Vooraf geldt dit het gebied van de advisering en de stand van kennis.

Daartoe worden in het voorjaar en het najaar een voordrachtenochtend gehouden, waarop uit eigen werk presentaties worden gegeven. Vanwege het informatieve karakter wordt dit in besloten KZ-kring gehouden.

Indachtig het gezegde dat gesproken woord vervliegt en geschrift beklijft, is de wens geuit de voordrachten, vast te leggen.

Daarmede wordt de "State of the art" vastgelegd.

Een andere wens was om naar de "omgeving" van het District Kust en Zee informatie te verstrekken, over de lopende zaken in zijn algemeenheid, die aan de orde zijn. M.a.w. waarmede is Kust en Zee bezig en wat kan het zoal adviseren.

Samenvoeging van deze twee wensen heeft geleid tot het inrichten van een Tijdschrift Kust en Zee. Daarbij is gekozen voor één thema per nummer, terwijl getracht zal worden twee nummers per jaar uit te brengen.

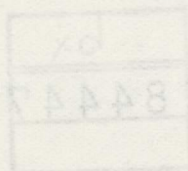
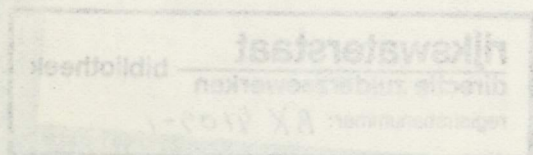
Het opzetten van een "productielijn" voor zo'n tijdschrift heeft nogal wat voeten in de aarde, zowel technisch (uiterlijk moet het aan bepaalde eisen voldoen), alsook productiematig (altijd voldoende copy).

De redactie zal trachten deze taken zo goed mogelijk te vervullen.

Na vele onvermijdelijke aanloop-moeilijkheden is het dan zover en ziet het eerste nummer thans, voorjaar 1983, het licht.

De redactie staat open voor suggesties van eenieder, zowel over opmaak als ook over inhoud of eventuele thema's.

Hopenlijk mag het Tijdschrift Kust en Zee volledig voorzien in een behoefte aan informatie over het district Kust en Zee.



UNIFORME BEPALINGSMETHODE
VAN SLIBGEHALTEN

R.S. Piekhaar
Afdeling Hellevoetsluis

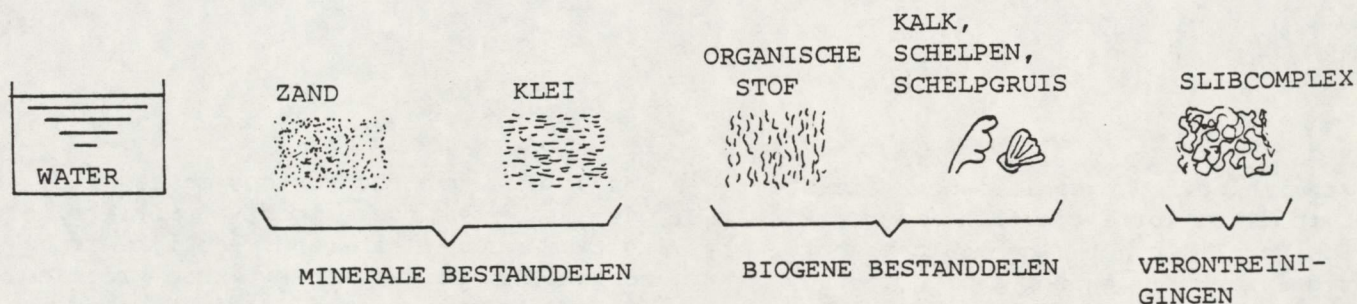
Inleiding:

- a) Wat is slib en wat wordt onder slib verstaan;
- b) Op welke wijze en volgens welke methode worden de slibmonsters in Hellevoetsluis geanalyseerd.

Slib is een algemene benaming voor zowel het zwevende slib - dit zijn alle in zee- en rivierwater aanwezige vaste stoffen - als het bodemslib. Het zwevende slib is voornamelijk afkomstig van geërodeerde bodem lagen - erosie van sedimentafzettingen van industrieel en huishoudelijk afval dat met het stromend water van een rivier wordt meegevoerd en dat zich op bepaalde plaatsen zal kunnen afzetten als bodemslib. Het slib kan vervolgens nog worden onderscheiden in zee- en rivierslib. Alvorens nader in te gaan op de begrippen rivier- en zeeslib is het noodzakelijk om eerst de benaming "slib" nader te preciseren en vervolgens te vermelden wat hier onder slib dient te worden verstaan. Slib is een algemene benaming (verzamelnaam) van al het materiaal, dat in zee- en rivierwater aanwezig is en bestaat uit een mengsel van stoffen van verschillende chemische-, biologische- en mineralogische samenstelling (organische-, anorganische-, colloïdale-, kalkbestanddelen en

verontreinigingen) met een korreldiameter kleiner dan 50 micron. (zie figuur 1). In onderstaande tekening zijn de slibbestanddelen schematisch weergegeven. Hierop is te zien dat slib uit water, zand, klei, organische stof, kalk en verontreiniging bestaat. Op foto 2 zijn de samenstellende bestanddelen van slib te zien.

Bij microscopisch onderzoek van slib blijkt dat het slib dat in de rivieren en in de zee voorkomt vlokvormige bestanddelen bevat, welke zijn samengesteld uit een mengsel van anorganische- en organische bestanddelen. Aan de hand van de microfoto's is te zien dat het slib (foto's 3 en 4) - hier alles wat zwart is - voornamelijk een vlokstructuur heeft. Uit microfoto's is gebleken dat de vlokken zijn opgebouwd uit een skelet van vezels, waaraan zich veel kleine deeltjes kleiner dan 3 micron hebben vast gehecht. De grootte van de vlokken is belangrijk i.v.m. de val- snelheid c.q. sedimentatie-eigenschappen van het slib. Met betrekking tot de vlok- vorming van rivierslib kan nog worden ver- meld, dat deze wordt veroorzaakt zowel door de aanwezigheid van eiwitverbindingen als- mede door de vlezige structuur van de or- ganische stof in het slib.



Figuur 1. Vereenvoudigde voorstelling van de samenstellende bestanddelen van slib.

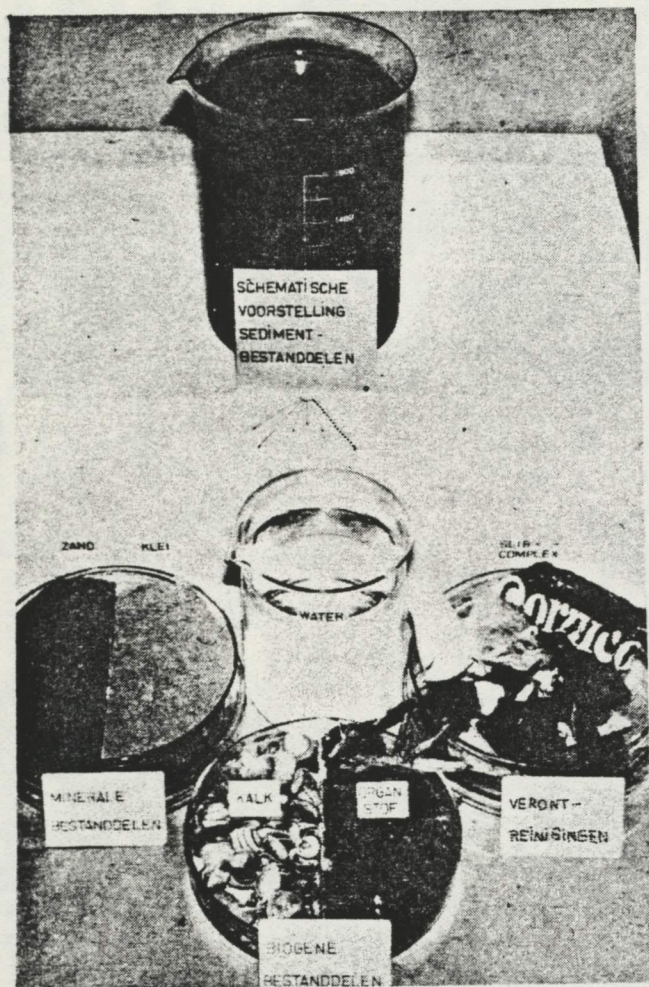


Foto 2

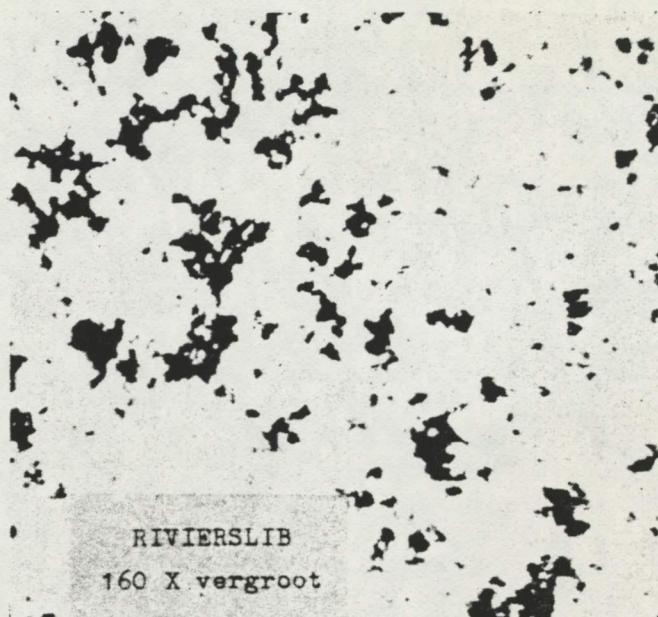


Foto 3



Foto 4

In zeeslib bevinden de mariene sedimenten zich in uitgevlokke toestand (in gecoaguleerde vorm). In het algemeen ontstaat hier de vlokvorming door de in het zeewater aanwezige zouten - electrolyten -, die in staat zijn om gesuspenderde stoffen tot grotere vlokken te verenigen. Op foto 8 is een tweetal bezinkingstoestanden te zien van het rivier- en zeeslib.

Aan de hand van deze foto's is te zien, dat het bezinkingsverloop van rivierslib in twee fasen plaatsvindt - blijkbaar bestaat het rivierslib uit twee fracties, die beiden een verschillende bezinkings-snelheid hebben - terwijl bij zeeslib de sedimentatie geleidelijk verloopt.



Foto 5

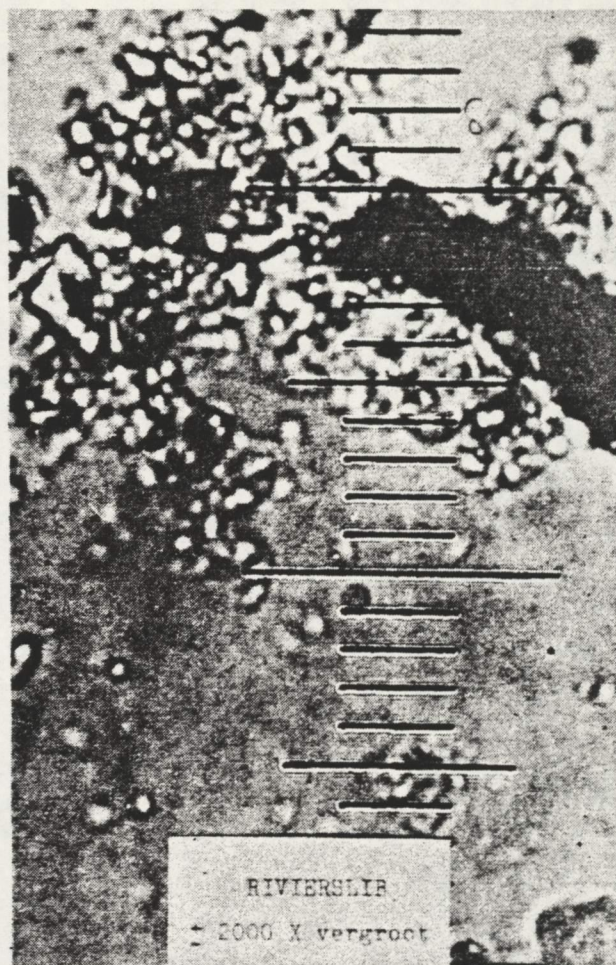


Foto 6

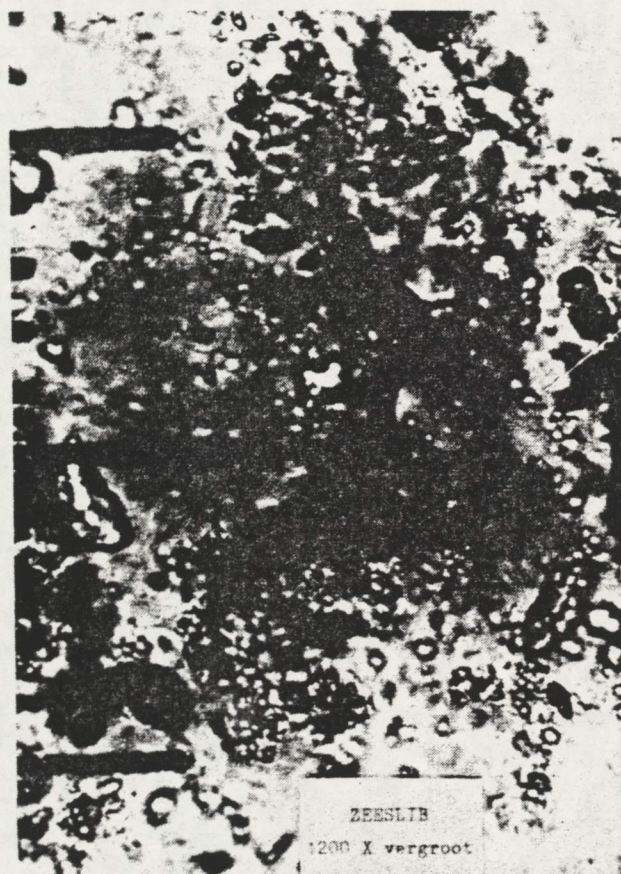
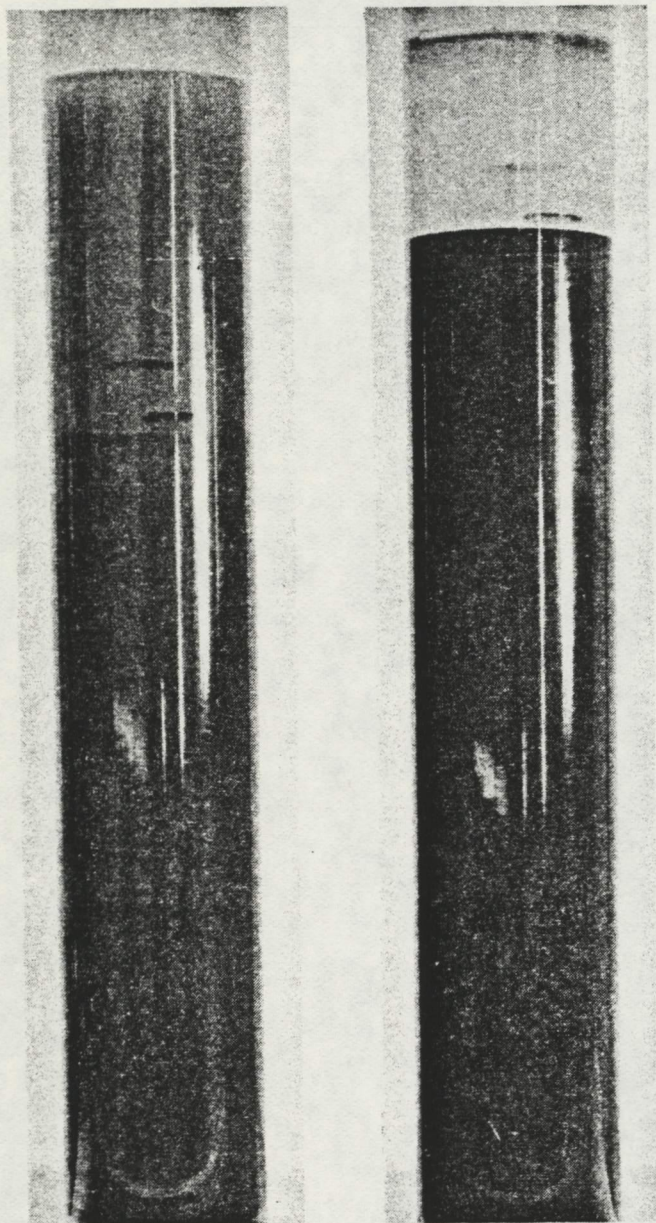


Foto 7



Cylinder 1

Cylinder 2

Foto 8

slibcylinder nr.1: RIVIERSLIB - Hollandsch diep/nabij haven van Moerdijk.

slibcylinder nr.2: ZEESLIB - Noordzee/nabij lichteiland "Goeree"

bij het rivierslib de vlokvorming plaats heeft door de aanwezigheid van organische stoffen (vezels, eiwitverbindingen in water terwijl bij het zeeslib de vlokvorming ontstaat onder invloed van de in het zeewater opgeloste zouten (electrolyten).

Het uitvlokkingsmechanisme is als volgt. De in het rivierslib aanwezige colloïdale deeltjes, die een electrisch negatieve lading hebben, zullen, wanneer deze in aanraking komen met het zeewater, dat veel positieve ionen (Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , etc.) bevat, ontladen worden en daardoor uitvlokken. Dit gebeurt dus wanneer het schone - slibhoudende - rivierwater naar zee stroomt. Tengevolge van de geleidelijke afname in de stroomsnelheid van het water zal eerst het grove materiaal bezinken, waarna vervolgens ook het zeer fijne slibmateriaal.

In het algemeen kan slibtransport ontstaan zowel op natuurlijke wijze - onder invloed van rivierwaterafvoer, getijstroommen en golven - alsook door menselijk ingrijpen, bv. baggerwerk waarbij door een baggermolen het slib wordt opgewoeld waarna dit slib door de stroom naar andere plaatsen wordt meegevoerd. Om een inzicht in het slibtransport te kunnen krijgen dienen metingen in situ te worden uitgevoerd en sedimenthoudende watermonsters te worden genomen. Uit de hoeveelheid slib dat gedurende een bepaalde tijd is gevangen en de in die periode heersende stroomsnelheid kan naderhand het slibtransport worden berekend. Door Rijkswaterstaatsdiensten wordt regelmatig onderzoek en studie verricht naar het slibtransport in de rivieren en het aangrenzende kustgebied. Het verrichten van een studie naar de slibbeweging heeft o.m. tot doel gegevens te verschaffen waarmee bij de uitvoering van waterbouwkundige werken rekening zal moeten worden gehouden. Hiertoe is het noodzakelijk te beschikken over gegevens inzake o.a. het sedimentgehalte, de zoutconcentratie, de stroomsnelheid en de temperatuur van het water, die aan de hand van metingen en waarnemingen in situ alsmede van laboratoriumonderzoek van bodem- en watermonsters kunnen worden verkregen. Met behulp van deze gegevens kunnen o.a.:

1. de relaties tussen het slibgehalte en de rivierwaterafvoer en
2. de gemiddelde slibgehalten van het kustwater

worden bepaald en naderhand slibtransport berekeningen worden uitgevoerd. Er waren tot voor kort bij de onderscheiden Rijkswaterstaatsdiensten verschillende onderzoeksmethoden m.b.t. de bepaling van het slibgehalte van een aan stromend water ontleend watermonster in gebruik - zoals de filtratie - en colorimethode - die als regel nogal tijdrovend zijn en die gebaseerd zijn op onderling niet overeenstemmende definities van het geen onder slib dient te verstaan. Dit leide ertoe dat:

1. In 1964 tijdens een bijeenkomst * waarbij nagenoeg alle rijkswaterstaatsdiensten waren vertegenwoordigd, besloten werd tot invoering van de door dr.J.H.J.Terwindt voorgestelde definitie van slib. Volgens deze definitie dient thans onder slib te worden verstaan het materiaal, dat een 50 μ zeef pas seert en chemisch niet is voorbehandeld ter verwijdering van kalk- en organische bestanddelen. In dit verband moet dan onder zand worden begrepen het materiaal dat op de 50 μ zeef achterblijft.

Met invoering van voornoemde definitie van slib werd beoogd om een betere uniformiteit te verkrijgen in de bepaling van zand en slibgehalten van watermonsters, waardoor de onderlinge vergelijking van analyseresultaten, verkregen bij onderscheiden Rijkswaterstaatsdiensten langs de Nederlandse kust mogelijk is.

2. Door het laboratorium van de Rijkswaterstaat te Hellevoetsluis is op basis van eerdergenoemde definitie van slib een scheitoestel ontwikkeld en waarvan er momenteel reeds vele exemplaren bij verscheidene Rijkswaterstaatsdiensten als standaardlaboratoriumapparaat in gebruik zijn voor het onderzoek van watermonsters op hun zand- en slibgehalte.

Opmerking: m.b.t. de 50 μ grens tussen de zand-slibfracties zij nog vermeld dat:

- uit een onderzoek, dat door de Geologische stichting te Haarlem is uitgevoerd,

is gebleken, dat de fractie $> 50 \mu$ voornamelijk uit mineraalkorrels (zand) bestaat en dat de fractie $< 50 \mu$ is samengesteld uit organisch materiaal, dat o.a. bestaat uit plantenresten, plankton en bacteriën, die tot vlokken zijn samengevoegd.

- de 50 μ grens bij enige RWS-diensten en instellingen reeds werd gehanteerd.

In het hiervolgende zal eerst een korte beschrijving van het slibscheitoestel worden gegeven, waarna de werking ervan zal worden besproken.

Overeenkomstig genoemde definitie van slib zal de werking van het slibscheitoestel in principe moeten berusten op:

- a. de scheiding van de 50 μ fractie d.m.v. nat zeven met een 50 μ zeef en
- b. de scheiding van de vaste stof $< 50 \mu$ en de vloeistof (water) d.m.v. filtratie onder vacuüm.

Daarnaast zal het slibscheitoestel, dat bij het slibonderzoek wordt gebruikt, aan enige voorwaarden moeten voldoen:

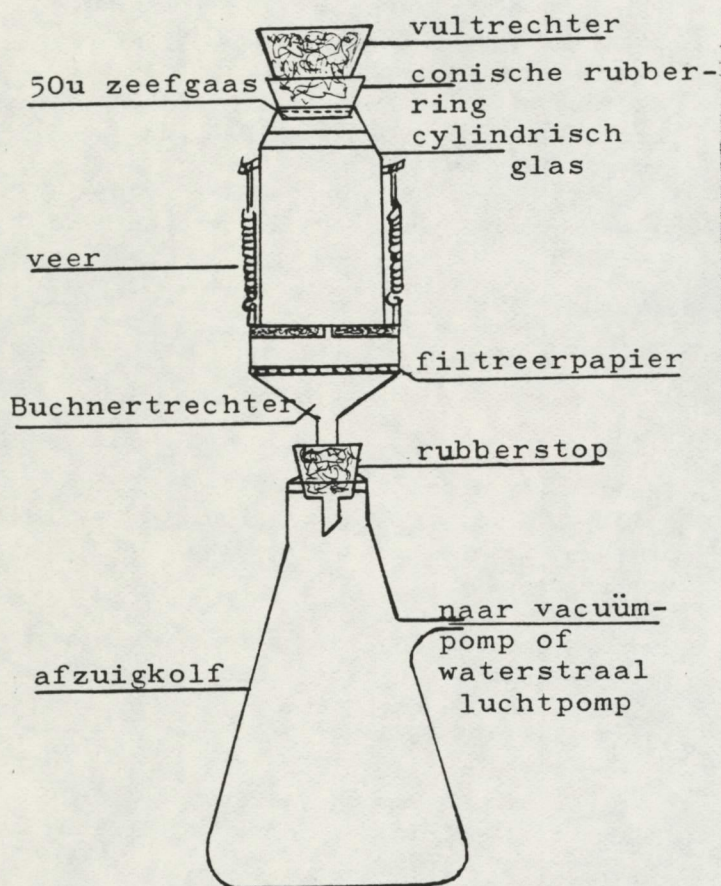
1. slibmonsters van 1 liter moeten ermee kunnen worden behandeld.
2. de bediening moet eenvoudig zijn en
3. het slibgehalte van een watermonster dient snel en nauwkeurig te worden bepaald. (de zand- en de slibfracties moeten m.b.v. een analytische balans op 1 mg nauwkeurig worden bepaald).

Beschrijving van het slibscheitoestel.

Het ontworpen slibscheitoestel (fig.9) bestaat uit een afzuigkolf, die d.m.v. een vacuümslang is verbonden aan een vacuümpomp of een waterstraalluchtpomp. Op de afzuigkolf is een Büchnertrechter bevestigd. In deze Büchnertrechter is een filtreerpapier (rondfilter) en daarop een goed passende glazen cilinder geplaatst.

* De bijeenkomst werd bijgewoond door vertegenwoordigers van het R.I.Z.A., de bodemkundige afdeling van de directie IJsselmeerpolders en de dienst Gem. werken Rotterdam.

Schets slibscheitoestel:



Figuur 9.

De bovenkant van deze glazen cylinder is onder de rand afgesloten met een zeefplaat met een maaswijte van 50μ . Op foto 10 is te zien uit welke onderdelen het slibscheitoestel is samengesteld (gedemonteerd) en op foto 11 een slibscheitoestel, dat op een vacuümpomp is aangesloten. In de regel worden de slibhoudende watermonsters in literflessen en in kratten vervoerd (foto 12). Van elk slibmonster wordt tevoren in het laboratorium eerst het volume bepaald (foto 13).

Werking van het slibscheitoestel.

Het te onderzoeken watermonster wordt, nadat de vacuümpomp of waterstraalluchtpomp in werking is gesteld, op de zeefplaat gegoten (foto 14). Het materiaal met een korreldiameter groter dan 50μ blijft op de zeef liggen, terwijl het materiaal met een korreldiameter kleiner dan 50μ de zeefplaat passeert en in de glazen trechter terecht komt. Het filtreerpapier in de Büchnertrechter zorgt vervolgens voor de scheiding van vaste stof en vloeistof.

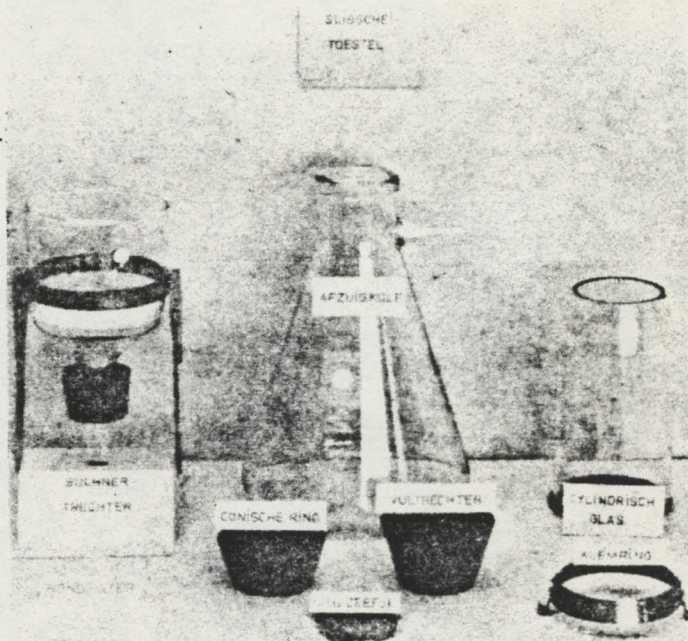


Foto 10

Op het filtreerpapier blijft devaste stof $< 50 \mu$ achter, terwijl de afzuigkolf zich vult met heldere vloeistof (filtraat). Na afloop worden filtreerpapier en zeefplaat uit het toestel verwijderd. Na drogen van beide in een droogstoof (foto 15) bij 105°C wordt door weging van het filtreerpapier (foto 16) het slibgehalte- en door weging van de zeefplaat het zandgehalte in het betrokken watermonster bepaald. Tenslotte zullen nog enige bijzonderheden worden genoemd m.b.t. de methode van monstername, de opslag van de slibmonsters i.v.m. de houdbaarheid, de met het slibscheitoestel te bereiken nauwkeurigheid in de zand- en slibgehalten, alsmede van de aantallen tot nu toe te Hellevoetsluis onderzochte slibmonsters.

Methode van monstername.

Bij de meetafdeling Hellevoetsluis vindt de bemonstering plaats m.b.v. een gehaltemeter of muizenval. Dit monsterapparaat bestaat in principe uit een buis met een inhoud van ongeveer 1 liter, die aan beide uiteinden door kleppen kan worden gesloten en waarmee - in de meeste gevallen - vanaf een meetvaartuig een watermonster b.v. uit een rivier kan worden genomen (foto 17). Bij gebruik van de gehaltemeter dient men erop te letten dat de kleppen geen lekkage vertonen, aangezien anders de buis reeds voor het bereiken van de gewenste diepte met water zal zijn gevuld.

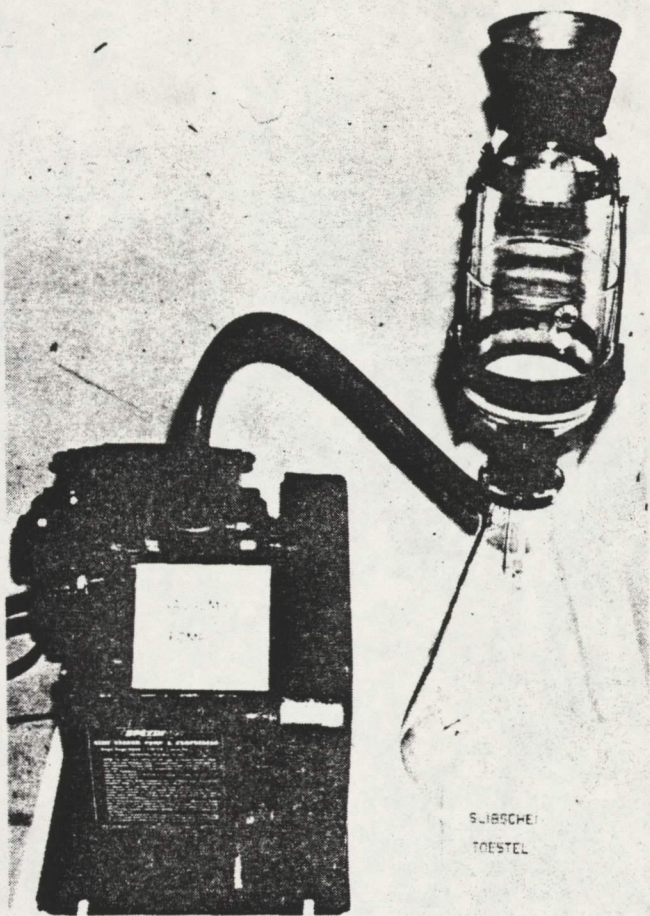


Foto 11



Foto 12



Foto 13

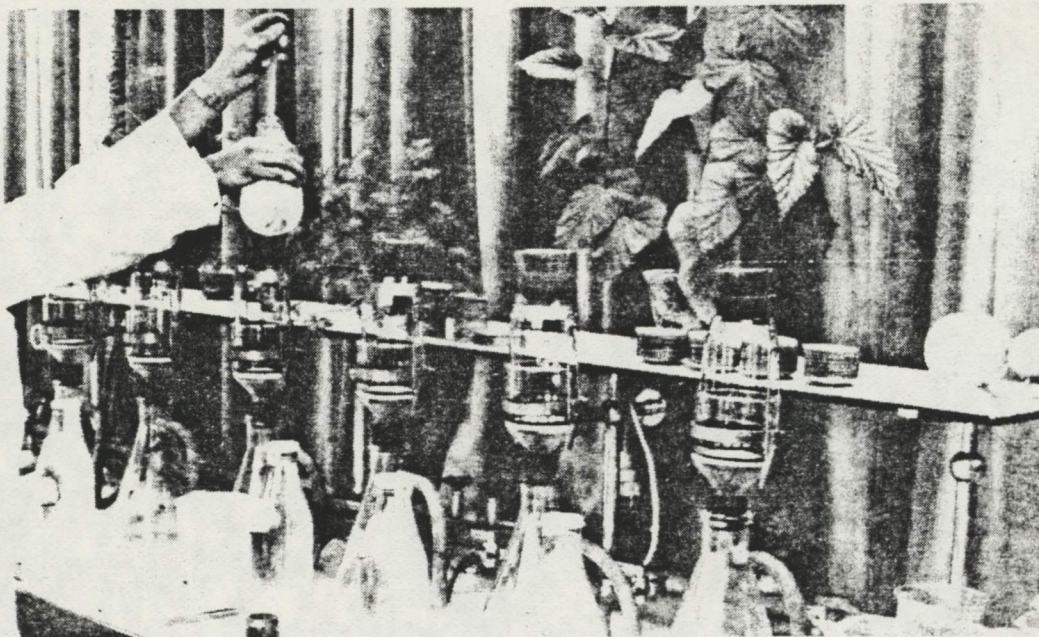


Foto 14

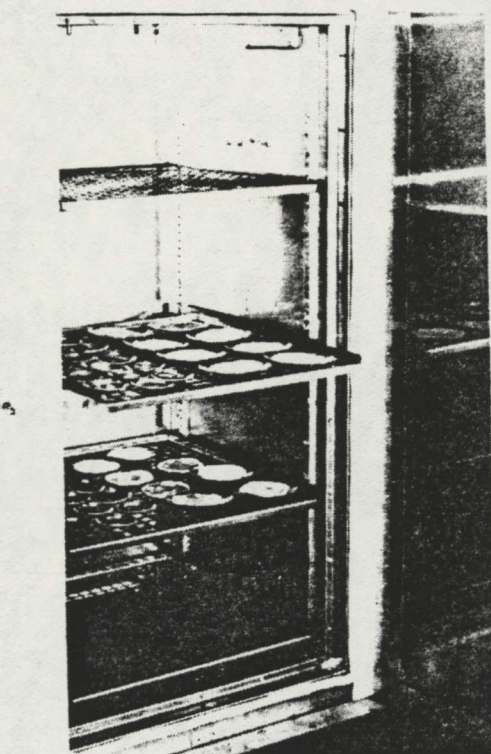
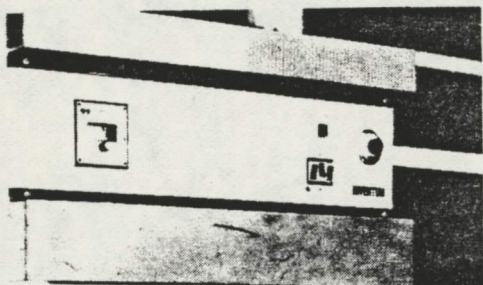


Foto 15

Dit kan eventueel op eenvoudige wijze worden nagegaan door het apparaat in gesloten toestand in het water te laten zakken en vervolgens weer naar boven te halen, waarna zich dan in de buis geen water mag bevinden. Het bemonsteren van het water zowel in een rivier, op zee, alsook in het laboratorium is in de meeste gevallen niet bepaald eenvoudig, vooral wanneer zich in het water nog andere stoffen - bestanddelen - bevinden. Dergelijke stoffen bevinden zich ook in een sedimenthoudend watermonster. De methode van monsternamen is afhankelijk van de wijze van monsteranalyse die wordt toegepast (b.v. i.v.m. de hoeveelheid benodigd monster). Daarnaast is een goed functioneren van het monsterapparaat van belang. Voorts is het een vereiste, dat met het monsternamenapparaat een voldoende hoeveelheid van het watermonster kan worden genomen in verband met de vaak zeer geringe concentraties vaste stof (sediment) in het water.

Een belangrijk aspect is de representativiteit van het verkregen monster. Ten aanzien van de representativiteit van het sedimenthoudend watermonster kan nog worden opgemerkt, dat het watermonster moet voldoen aan de eis, dat het maatgevend is voor het water waar het uit is genomen.



Foto 16

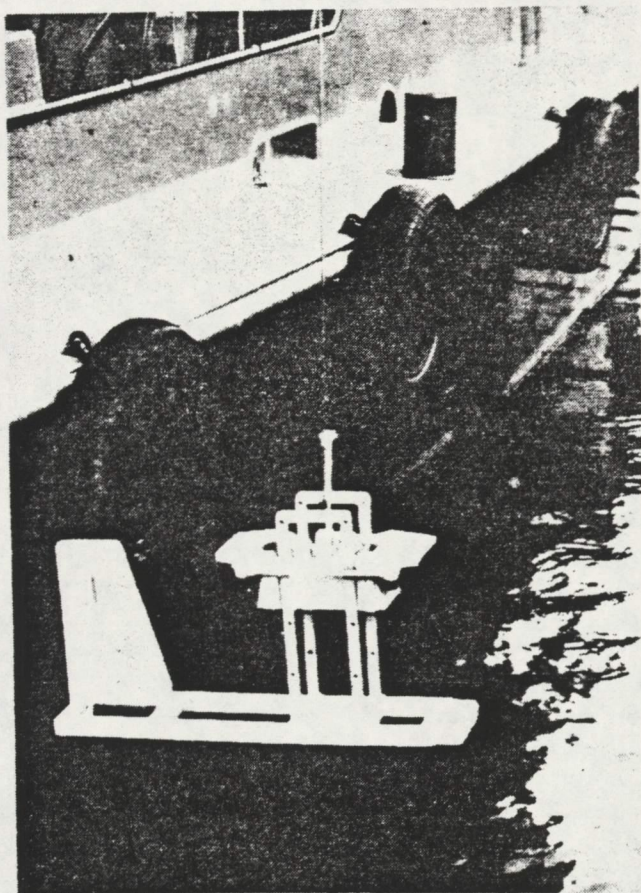


Foto 17

De te bereiken nauwkeurigheid bij de monstername bepaald uiteindelijk de waarde van alle interpretaties, conclusies e.d., die zijn gebaseerd op de uitkomsten van de proeven. De met het slibscheitoestel te bereiken nauwkeurigheden in de analyse-

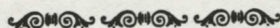
De te bereiken nauwkeurigheid bij de monstername bepaald uiteindelijk de waarde van alle interpretaties, conclusies e.d., die zijn gebaseerd op de uitkomsten van de proeven. De met het slibscheitoestel te bereiken nauwkeurigheden in de analyseresultaten bedragen - blijkens een eerder daartoe verricht onderzoek - resp. 2 á 3% voor sedimentgehalten groter dan 100mg/liter en 3-12% voor sedimentgehalten kleiner dan 100mg/liter. In de loop der jaren is de behoefte aan deze slibgegevens sterk toegenomen, terwijl daarnaast in kwalitatief opzicht ook hogere eisen worden gesteld ten aanzien van de nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid van de bepaling van het slibgehalte in water. Het slibscheitoestel blijkt in voornoemde behoefte duidelijk te voorzien. In het laboratorium te Hellevoetsluis kunnen m.b.v. een opstelling, die bestaat uit een centrale afzuiginrichting, waarop 9 slibscheitoestellen zijn aangesloten, jaarlijks gemiddeld 15.000 slibmonsters worden onderzocht. Tot nu toe zijn sinds 1965 in totaal 175.000 slibmonsters door het laboratorium te Hellevoetsluis onderzocht. Met dit onderzoek zijn twee personen belast.

Opslag slibmonsters i.v.m. de houdbaarheid.

Met betrekking tot de opslag van de slibmonsters dient rekening te worden gehouden met de houdbaarheid van het slib, in het bijzonder m.b.t. de fysisch-chemische veranderingen in het slib bij langdurige opslag welke uiteindelijk van invloed kunnen zijn op de analyseresultaten. Aanvankelijk werd ten behoeve van een lange houdbaarheid van de slibmonsters formale of formaldehyde (formol) toegevoegd als conserveringsmiddel. (in dit verband

dient nog te worden vermeld dat zeewater ook een conserverende werking bezit). In de regel werd aan 1 liter slibhoudendwatermonster 5à - 10 ml 3,6% formaline toegevoegd. Deze methode bleek achteraf beschouwd niet bepaald geschikt te zijn wegens de reactie van formol met ammoniak (NH_3), amino(NH_2)-groepen, eiwitten en slib, waardoor weer andere stoffen worden gevormd, die veranderingen in de eigenschappen van het slib kunnen veroorzaken.

Op grond hiervan worden de slibmonsters sinds enige tijd niet meer met formaline behandeld, doch ten behoeve van een lange houdbaarheid van het slib op een koele en donkere plaats opgesloten bij een temperatuur die ligt tussen de 3 en 6°C. Het is overigens gewenst om, in geval geen bepaalde voorzieningen zijn getroffen ten behoeve van een langere houdbaarheid van de slibmonsters, deze slibmonsters binnen een tijdsperiode van 10-14 dagen na de monsternamen te analyseren.



APPENDIX

De behandeling van de slibmonsters vindt nogal ambachtelijk plaats; De analysemethode die bij het onderzoek van de slibmonsters wordt gebruikt is tamelijk arbeidsintensief.

In de loop der jaren is er al vereenvoudigd door de invoering van nieuwe en snelle behandelingsmethoden en de toepassing van elektronische apparatuur, o.a. t.b.v. de uitvoering van nauwkeurige wegingen (opmerking: per slibmonster dienen 4 wegingen te worden uitgevoerd). In verband hiermee, maar ook tengevolge van de inmiddels kleiner geworden personeelsbestand - in vergelijking tot de voorgaande jaren - werden intern de mogelijkheden tot automatisering van het slibonderzoek nagegaan met als voornaamste doel: het besparen van tijd bij de handelingen m.b.t. de primaire gegevens-

verwerking o.a. bij de etikettering, bij een aantal bewerkingen bij de bepaling van de zand- en slibgehalten, het tabellarisch weergeven van de analyse-resultaten en opslag van de gegevens op een magneetband voor verdere verwerking. Hierbij wordt in principe gedacht aan een processor, die aan de momenteel in gebruik zijnde elektronische balans zou moeten worden gekoppeld, een beeldscherm met toetsenbord, een printer en een data-recorder. Er is in verband hiermee een tijdstudie gemaakt over de verschillende handelingen bij het slibonderzoek. Uit deze tijdstudie is o.m. gebleken dat met betrekking tot de primaire verwerking van de gegevens bij het slibonderzoek maar liefst 40% (d.i. 0,8 manjaren) kan worden geautomatiseerd.

Discussie.

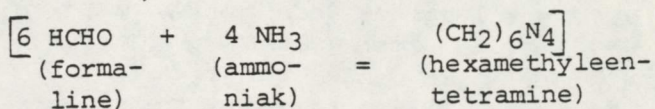
Na afloop van de lezing werd nog de gelegenheid gegeven tot het stellen van vragen.

Dhr. J. G. Gossé van de adviesdienst Vlissingen vroeg zich af of het mogelijk is om naast het volumegehalte van het slibmonster ook het zoutgehalte te bepalen. Vervolgens bracht hij naar voren dat er m.b.t. de houdbaarheid van het slib nu geen formaline meer aan toegevoegd wordt, doch dat bij opslag van de slibmonsters bij een temperatuur tussen de 3-6°C de biochemische processen toch nog doorgaan waardoor veranderingen in de eigenschappen van het slib ontstaan.

Piekhaar deelde hierop mede, dat de slibmonsters die door het laboratorium te Helvoetsluis onderzocht worden in de regel een inhoud hebben van 1 liter, zodat het volume in de meeste gevallen niet hoeft te worden bepaald. Het zoutgehalte wordt meestal apart onderzocht.

M.b.t. de houdbaarheid van het slib is gebleken, dat bij toevoeging van formaline na enige tijd in het slibmonster witachtige colloïdale deeltjes - vaak heel dunne vliesjes of kleine vlokjes - ontstaan, die de filtratie en dus ook de sedimentatie-eigenschappen van het slib beïnvloeden. Wat gebeurt er nu wanneer formaline - an-

dere benaming hiervoor zijn: formol, formaldehyde, methanaldehyde en in de laatste tijd zelfs spaanplaatgas genoemd - aan een slibmonster wordt toegevoegd. In het slib bevinden zich eiwitten en eiwitten zijn zoals bekend opgebouwd uit aminozuren, die carboxyl- (COOH) en aminegroepen (-NH₂) bevatten, de laatste zijn afgeleid van ammoniak (NH₃). Bij toevoeging nu van formaline kan onder bepaalde omstandigheden met ammoniak de stof hexamethyleentetramine ((CH₂)₆N₄) ontstaan:



Opgemerkt zij hierbij dat hexamethyleentetramine '1) o.m. wordt gebruikt bij de bereiding van ijkoplossingen - standaardsuspensies - voor troebelheidsmetingen, o.a. bij de Partech-troebelheidsmeter.

'1) Formaline =
mengsel van 5gr. hydrazinesulfaat
(N₂H₆)SO₄)
en 50gr. hexamethyleentetramine op
1 liter gedemineraliseerd water.

Uit onderzoek is gebleken, dat het bewaren van slib bij een temperatuur tussen de 3 - 6°C ten behoeve van een lange houdbaarheid het meest geschikt is.

Eigenschappen van slib

J.H. de Reus.
adviesdienst Hoorn

Inleiding

In de havens langs de Nederlandse kust en de estuaria worden jaarlijks grote hoeveelheden slib gebaggerd. Om meer inzicht in het transportmechanisme van slib te krijgen worden de eigenschappen bestudeerd. In de hiervoor gepubliceerde lezing van R.S. Piekhaar: "Uniforme bepalingsmethode van slibgehalten" is kort op de definitie van slib ingegaan. Door het Waterloopkundig Laboratorium is in [1] ook een definitie van slib gegeven, die in appendix 1 is opgenomen. In het onderstaande zal blijken dat een éénduidige definitie van slib voorlopig nog ontbreekt. In het kader van een uniform gebruik van de term slib binnen RWS, verdient het aanbeveling een zorgvuldige en éénduidige formulering te geven.

Voor de verdere behandeling wordt onder slib verstaan al het materiaal met een valsnelheid kleiner dan of gelijk aan bolletjes met een diameter van 50 á 63 μ . Verder zij opgemerkt dat voor de diverse laboratoriumbepalingen het slib altijd uit het systeem is gehaald, wat de eigenschappen van het slib verandert en dus de conclusies kan beïnvloeden.

In het onderstaande wordt ingegaan op enige eigenschappen van slib. Achtereenvolgens worden behandeld:

- De samenstelling van slib, zowel de mineralogische als de chemische samenstelling.
- De colloïdechemische eigenschappen.
- De flocculatietheorieën.
- De valsnelheid van het slib ofwel het sedimentatiegedrag.
- De consolidatie van havenslib.
- De erosie van slib.

Veel van de hierna behandelde informatie is ontleend aan het door het Waterloopkundig laboratorium uitgevoerde literatuuronderzoek "Onderzoek eigenschappen van slib" [1].

2 De samenstelling van slib

Granulometrie

Slib is een fijnkorrelig sediment, waarvoor nog geen éénduidige definitie bestaat. Bij de definiëring van zand volgens Normblad N 209 zijn deeltjes met een diameter $> 16\mu\text{m}$ zand (zie figuur 1). In het spraakgebruik wordt vaak een grens van 50 á 63 μm gehanteerd. De Stichting voor Bodemkartering (Stiboka) gebruikt een korrelverdeling in een driehoekig diagram.

Om de korrelgrootteverdeling in één getal weer te kunnen geven, gebruikt men wel het percentage aan deeltjes kleiner dan 16 μm . Voor het West-Europese kustgebied is dit toelaatbaar omdat de korrelgroottesubfracties goed gecorreleerd zijn met deze parameters. Voor de vergelijking van verontreiniging zoals b.v. de zware metalen wordt ook het percentage aan deeltjes $< 16\mu\text{m}$ gehanteerd.

Mineralogische samenstelling

In tegenstelling tot zand dat vrijwel uit één mineraal (kwarts) is opgebouwd is slib uit een groot aantal mineralen samengesteld. De belangrijkste zijn de kleimineralen en kwarts; daarnaast komen in variërende hoeveelheden organische stof en carbonaten voor. De verschillende mineralen domineren in bepaalde korrelgrootte-fracties (in het laboratorium bepaald). De kleimineralen en de organische stof komen in hoofdzaak in de fractie kleiner dan 2 micron voor. In Nederland is het dominerende kleimineraal Illiet. De carbonaten en de veldspaten domineren in de siltfractie (2-63 μm), terwijl kwarts in de meer grovere fracties voorkomt.

De mineralogische samenstelling van een slibmonster zal daarom sterk samenhangen met zijn korrelverdeling (figuur 2).

diameter	nederlandse norm N209/N210	stiboka	duitse norm DIN 4023	amerikaanse norm M.I.T.	britse norm B.S. 1377	Atterberg 1905	Udden Wentworth	Casagrande	Oude MIT norm	bureau of soils	beschrijving	
											microscopisch	macroscopisch
4,75	klei of lutum	lutum frac.	2µ	2µ	2µ	2µ	clay		colloïdale be- standdelen	clay	zeer fijn	
5,0	slib of sloef	silt fractie	Schluff	silt	fine silt	silt	3,9µ	fines (silt or clay)	silt	5µ	fijn	
10,0					medium silt							
20,0					coarse silt					50µ		
50,0	fijn zand	50µ	60µ	60µ	coarse silt	fine sand (No)	62,5µ	sand	60µ		sand	grof
100,0							very fine sand					
200,0							fine sand					
500,0							medium sand					
1,0	grof zand	4,20µ	600µ	coarse sand	coarse sand	coarse sand	1mm	medium	160µ	sand	grof	
2,0							very coarse sand					
5,0	grind	7mm	2mm	2mm	fine gravel	gravel	2mm	gravel	2mm	gravel	zeer grof	
10,0							granules					
20,0							pebbles					
50,0							64mm					
100,0	stenen	grindfractie	6,3mm	gravel	coarse gravel	cobble	cobble	cobble	76mm	cobble		
200,0												
500,0												
100,0	keien	grindfractie	6,3mm	gravel	coarse gravel	cobble	cobble	cobble	76mm	cobble		
200,0												
500,0	blokken											

Fig.1 Overzicht indeling naar korrelgrootte

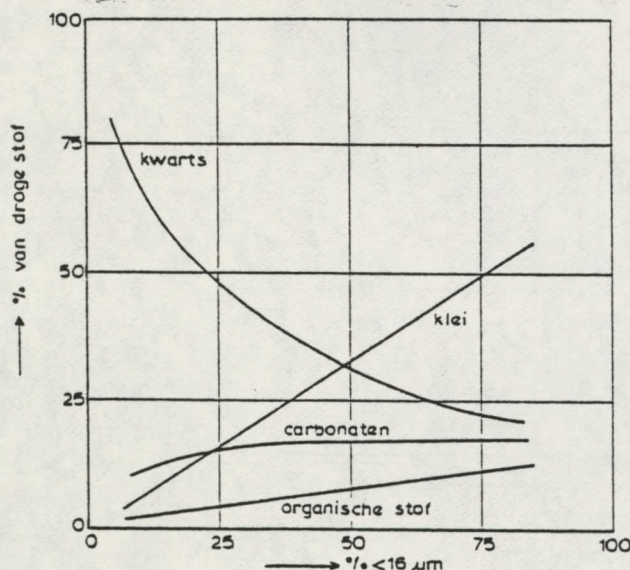


Fig. 2. De hoofdcomponenten in slib uit de 3^e Petroleumhaven.

Deze variatie in mineralogische samenstelling, zelfs binnen één locatie maakt het onmogelijk om individuele monsters van verschillende gebieden of verschillen tussen zwevend en afgezet slib te vergelijken. Teneinde de samenstelling van verschillende gebieden te vergelijken moet de variatie in korrelgrootte worden geëlimineerd. Dit wordt gedaan door de samenstelling steeds op te geven bij hetzelfde percentage aan deeltjes kleiner dan 16 µm.

Uitvoerige onderzoekingen naar verschillen in mineralogische samenstelling tussen zwevend en afgezet slib zijn niet verricht; wel is vast komen te staan dat het organische stofgehalte in het zwevend slib aanzienlijk hoger is dan in dat van afgezet slib.

Chemische samenstelling.

Wordt naar de chemische samenstelling van slib gekeken dan kan onderscheid gemaakt worden in sporenelementen en hoofdelementen. De sporenelementen komen over het algemeen voor in concentraties van p.p.m. (mg/kg). De gehalten aan de hoofdelementen zoals Ca, Si, Mg, Al, K en O wordt grotendeels bepaald door de mineralogische samenstelling (tabel 1). Sporenelementen, zoals b.v.

de zware metalen en fosfaten, zijn ten dele van natuurlijke afkomst, voor een ander deel zijn ze afkomstig van industriële en huishoudelijke lozingen.

element	range (%)	vormen waarin het element voorkomt
silicium	40 - 15	kwarts, veldspaten, kleimineralen
aluminium	1 - 8	kleimineralen, veldspaten
calcium	1.5 - 16	calcite, dolomite, uitwisselbare fractie
ijzer	0.8 - 4	oxiden, sulfiden, silikaten
kalium	1.4 - 2.3	kleimineralen, veldspaten, uitwisselbare fractie
natrium	0.7 - 2.3	veldspaten, uitwisselbare fractie
magnesium	0.4 - 1.4	kleimineralen, dolomite
zwavel	0.1 - 1.5	organische stof, sulfiden, silfaten
zuurstof	54 - 49	kleimineralen, veldspaten, kwarts

tabel 1. De gehalten aan de hoofdelementen in slib.

3 Colloïdchemische eigenschappen van slib.

Deeltjes die colloïdchemische eigenschappen vertonen, hebben over het algemeen afmetingen kleiner dan 1µm. Voor slib zijn dit de kleimineralen en de organische stof. Het colloïdchemische gedrag van systemen die uit één component bestaan is kwantitatief te beschrijven met de zogenaamde dubbellaag theorie. Ten gevolge van de heterogene samenstelling van slib geeft deze theorie slechts een kwalitatieve beschrijving van de colloïdchemische verschijnselen, zoals de flocculatie in een estuarium.

De dubbellaag theorie

Slibdeeltjes bezitten gemiddeld een negatieve oppervlaktelading. De in het water aanwezige positieve ionen worden door de negatieve lading van de slibdeeltjes aangetrokken. Het gevolg hiervan is, dat elk slibdeeltje als het ware omgeven is door een "wolk" van positief geladen ionen die de negatieve lading gedeeltelijk compenseren. De dikte van de waterlaag is afhankelijk van de ionensterkte.

Doordat de deeltjes negatief geladen zijn, zouden ze elkaar, bij afwezigheid van andere krachten, afstoten en er treedt geen flocculatie op. Naast deze afstotende kracht treedt nog een aantrekkende op, de zogenaamde van der Waals-London kracht. Deze aantrekkende kracht werkt over korte afstanden en is niet afhankelijk van de ionensterkte. De aantrekkende en de afstotende kracht zijn functies van de onderlinge afstand (fig. 3). De netto interactie tussen twee

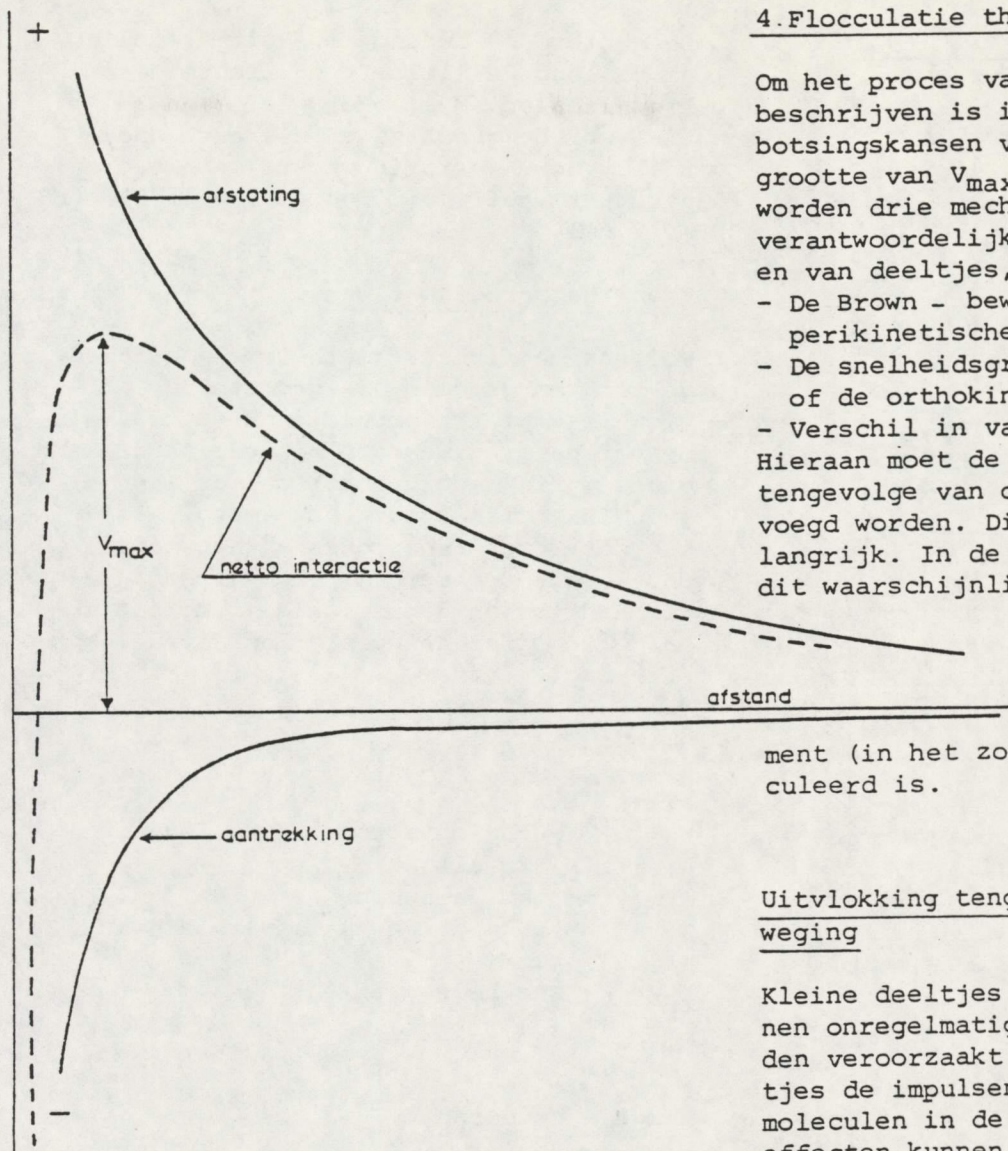


Fig.3. De aantrekkende en afstotende krachten tussen twee colloïdale deeltjes als functie van de afstand.

deeltjes wordt gevonden door deze twee krachten van elkaar af te trekken. Opdat twee deeltjes tot een aggregaat (vlok) samengroeien moet dus de potentiaal-"berg" $V_{\max}$ (Figuur 3) overwonnen worden. Alleen de afstotende kracht is afhankelijk van de ionensterkte en neemt af met toenemende ionensterkte. In een estuarium neemt de ionensterkte in zeewaartse richting toe. Dit heeft tot gevolg dat $V_{\max}$ in dezelfde richting afneemt. De kans dat twee deeltjes tot een aggregaat samengroeien neemt in zeewaartse richting in een estuarium toe. Er treedt flocculatie op. Volgens Einstein en Krone [2] zijn in brak water met een zoutgehalte van meer dan 1000 mg/l de afstotende krachten te verwaarlozen.

4. Flocculatie theorieën

Om het proces van flocculatie te kunnen beschrijven is informatie nodig over de botsingskansen van de deeltjes en de grootte van $V_{\max}$. In de literatuur worden drie mechanismen beschreven die verantwoordelijk zijn voor de botsingen van deeltjes, deze zijn :

- De Brown - beweging of de zogenaamde perikinetische flocculatie.
- De snelheidsgradiënten in het water of de orthokinetische flocculatie.
- Verschil in valsnelheid.

Hieraan moet de koppeling van deeltjes tengevolge van organische stof toegevoegd worden. Dit laatste is zeer belangrijk. In de Nederlandse rivieren is dit waarschijnlijk de oorzaak dat sedi-

ment (in het zoete gebied) reeds geflocculeerd is.

Uitvlokking tengevolge van de Brown-beweging

Kleine deeltjes in een suspensie vertonen onregelmatige bewegingen. Deze worden veroorzaakt doordat bij kleine deeltjes de impulsen t.g.v. de botsingen met moleculen in de vloeistof resulterende effecten kunnen hebben als het aantal botsingen aan één kant groter is dan aan de andere kant. Figuur 4A geeft het verband tussen het aantal botsingen (I_B) per seconde tengevolge van de Brown-beweging als functie van de diameter (d) van de deeltjes en de concentratie (c).

Uitvlokking in een rotatieveld (snelheidsgradiënten).

Dit geval doet zich voor als naast elkaar liggende waterdeeltjes langs elkaar schuiven. Er is dan een snelheidsgradiënt. Met de waterlaag bewegen ook de deeltjes ten opzichte van elkaar. In figuur 4A is tevens een verband gegeven tussen het aantal botsingen per seconde (I_R), snelheidsgradiënt $\frac{du}{dy}$ en de con-

centratie (c). In figuur 4B is een vergelijking gemaakt tussen het aantal botsingen tengevolge van de Brown-beweging (I_B) en turbulentie (I_R). Hieruit volgt dat voor kleine deeltjes, zeg kleiner

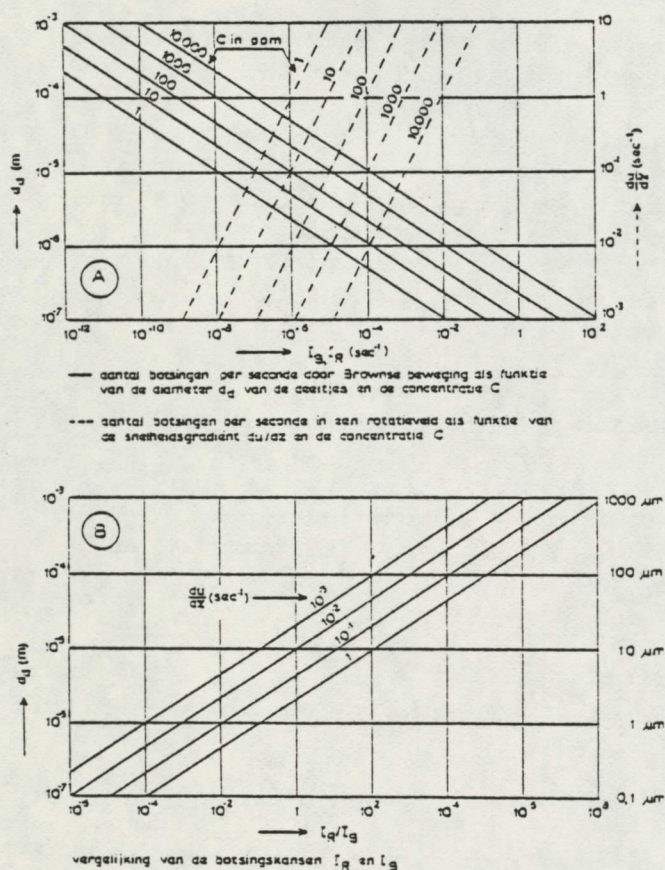


Fig.4. Aantal botsingen tussen de deeltjes t.g.v. de Brown-beweging (I_B) en de turbulentie (I_P).

dan één micron , de Brown-beweging de
hoofdzaak van flocculatie is en bij gro-
tere deeltjes de turbulentie.

Uitvlokking tengevolge van verschil in
valsnelheid.

Als de sedimentdeeltjes in een suspensie verschillende diameters hebben, zullen de valsnelheden van de deeltjes ook verschillen. Het verschil in de dichtheden van de deeltjes geeft ook een heel scala valsnelheden. Volgens Stokes geldt:

$$W = \frac{g}{18\psi} \frac{\rho_d - \rho_w}{\rho_w} d^2$$

Hierin is

W = valsnelheid van het deeltje

g = versnelling van de zwaartekracht

 ν = kinematische viscositeit

ρ_d = dichtheid sedimentdeeltje

ρ_w = dichtheid water

d = diameter deeltje.

De grotere of zwaardere deeltjes zullen al vallend de kleinere of lichte deeltjes inhalen. Mülle [3] geeft een relatie voor de grootste en kleinste deeltjes. Voor kwarts in water (kamertemperatuur) geeft dit respectievelijk 5 μm en 2 μm .

Evenwichtsgrootte vlokken.

Volgens de flocculatietheorieën blijven de vlokken groeien. De grootte van de vlok is echter begrensd door de maximale schuifspanning waaraan hij weerstand kan bieden. Bij deze grootte zal er een evenwicht zijn tussen het aantal vlokken dat wordt afgebroken en het aantal dat wordt opgebouwd. Krone [4] geeft een verband tussen de maximale vloggrootte en de schuifspanning bij laminaire stroming.

$$r_{\max} = \frac{\tau_{\max} \Delta R}{d_u/d_v}$$

hierin is

$$r_{\max} = \text{evenwichtsgrootte van de vlok (straal)}$$
$$\tau_{\max} = \text{schuifspanning}$$
$$\Delta R_{\max} = \text{ruwheid van het oppervlak van de vlok}$$
$$d_u/d_v = \text{snelheidsgradiënt.}$$

Brown. beweging

Uitberekeningen volgt dat deeltjes kleiner dan $0,5 \mu\text{m}$ een scheidingsvlak tussen een suspensie- en helder water kunnen verlaten. Ze worden dus door de Brownse beweging in suspensie gebracht. Dit verklaart mogelijk het dunne overgangslaagje tussen bezonken slib en het daar boven gelegen heldere water.

Krone heeft ontdekt dat $\tau_{\max}$ een functie is van de wijze van samenkleven van de deeltjes. Vlokken van de maximale grootte kunnen nog wel kleinere exemplaren opnemen. De grootte blijft gelijk maar de dichtheid van de vlok neemt dan nog toe. Tevens heeft hij bepaald dat de schuifspanning waaraan de vlok weerstand kan bieden, kleiner kan zijn dan de schuifspanning waaraan het afgezette materiaal weerstand kan bieden.

Dichtheid van de vlok.

Een vlok is een min of meer losgepakt
conglomeraat van korrels die een zekere

binding vertonen en waartussen zich water bevindt. De korrels bestaan uit massief materiaal waarvan de dichtheid groter is dan die van water. Dit houdt in dat de dichtheid van de vlokken kleiner is dan de dichtheid van de afzonderlijke korrels maar hoger dan die van het water.

Effectieve botsingen.

Niet alle botsingen leiden tot de vorming van een vlok. Het aantal effectieve botsingen wordt uitgedrukt in de coëfficiënt α . α is nul wil zeggen geen flocculatie en als α is één dan resulteert elke botsing in de vorming van een aggregaat. De waarde van α wordt meestal experimenteel bepaald. Voor slib en kleimineralen zijn slechts incidentele metingen van het Pamlico estuarium in de U.S.A. bekend (tabel II).

Ion sterkte	waarde van		
	Montmorilloniet	Kaoliniet	Illiet
0,036	0,09	0,04	0,02
0,087	0,11	0,09	0,07
0,343	0,15	0,14	0,07

Tabel II. De waarde van α voor een aantal kleimineralen als functie van de ion-sterkte [5,6].

5 Sedimentatiegedrag.

Voor zanddeeltjes kleiner dan $1 \mu\text{m}$ blijkt de valsnelheid goed overeen te komen met de berekende valsnelheid volgens Stokes. Doordat de vlok uit meerdere deeltjes bestaat neemt de valsnelheid toe (grotere diameter). Door de wateropname neemt de dichtheid van de vlok af maar het volume neemt toe. Migniot [7] heeft een verband gegeven tussen de valsnelheden van vlokken en die van de deeltjes. De maximale flocculatiefactor F is: Hierin is: W = valsnelheid, waarbij 50% van de deeltjes sneller (of langzamer) gaat. De waarde F is omgekeerd evenredig met de diameter (d). Voor een sedimentconcentratie van $10 \text{ kg/m}^3 = 10 \text{ g/l}$ en zee-water met een saliniteit van 30‰ vindt Migniot dat $F \approx 250 d^{-1,8}$. Hieruit is af te leiden

$$W_{\text{vlok}} = \frac{250g}{18v} \Delta d^{0,2} \quad \left(\Delta = \frac{\rho_d - \rho_w}{\rho_w} \right)$$

Dus alle vlokken vallen vrijwel even snel, namelijk als een korrel van $30 \mu\text{m}$ (valsnelheid $0,8 \text{ mm/s}$). In figuur 5 is de waarde van F tegen de valsnelheid en de diameter van de deeltjes uitgezet. Opgemerkt wordt dat Migniot de monsters uit het systeem heeft gehaald. Owen [8] heeft valsnelheden van sediment uit de Theems bepaald. Doordat de valsnelheden gelijk na het nemen van de monsters

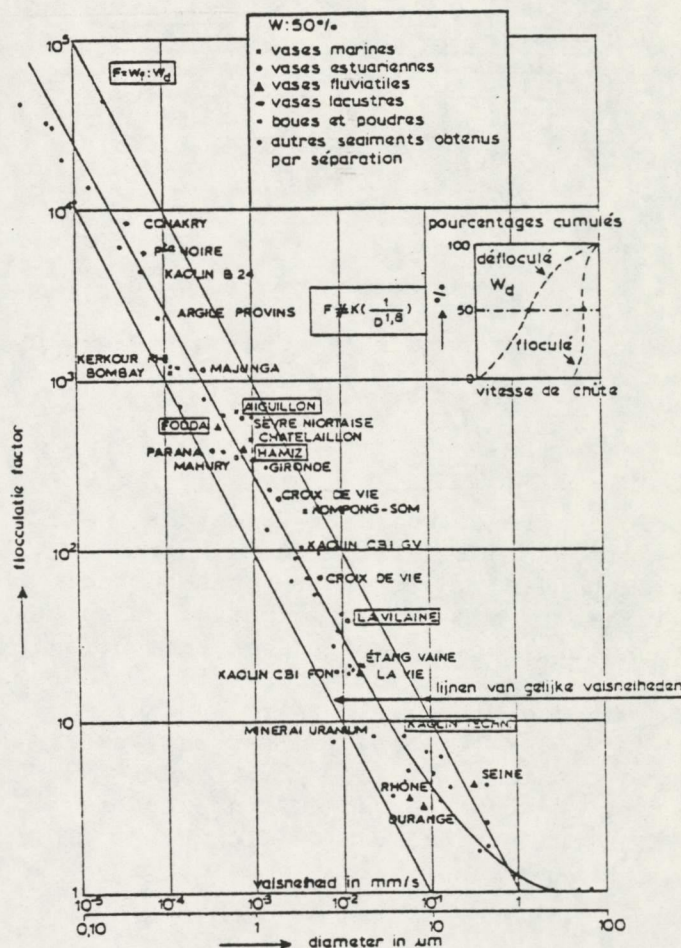


Fig.5. Invloed van de deeltjesgrootte op de flocculatie. (uit [7]).

bepaald zijn, is de invloed van de turbulentie nog aanwezig. Vergelijking van de valsnelheden van dood- en springtij bij gelijke concentratie geeft voor dooldtij hogere valsnelheden (figuur 6). Dit kan erop wijzen dat een toename van de turbulentie een afname van de valsnelheid tot gevolg heeft. Dit kan het gevolg zijn van grotere opwaartse turbulentie stoten, wat niet aannemelijk is, of verklaard worden m.b.v. de zogenaamde burst theorie.

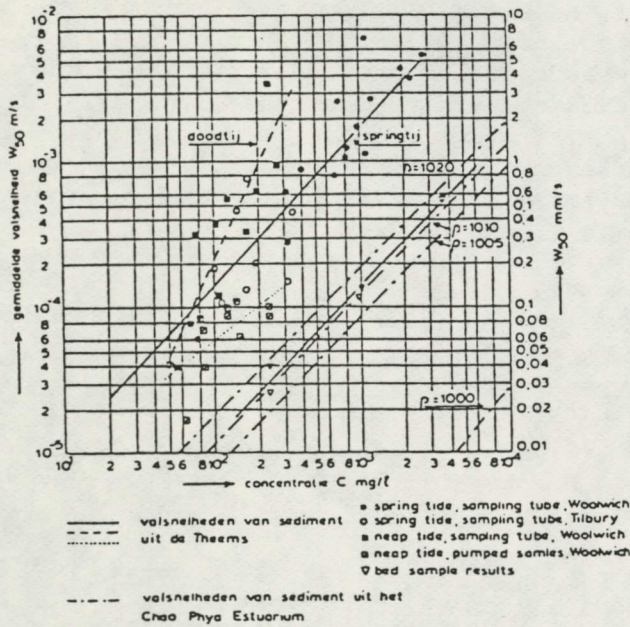


Fig. 6. In de natuur gemeten valsnelheden.

De kleinere valsnelheid is eerder het gevolg van het feit dat de evenwichtsgrootte van de vlokken tijdens springtij kleiner is dan tijdens doottij. Nedeco [9] geeft het verband tussen concentratie en de valsnelheid voor verschillende waarden van de dichtheid van het water. Figuur 7A laat zien dat de valsnelheid toeneemt.

- bij een toename van de concentratie
- bij een toename van de dichtheid (toename zoutgehalte) van het water

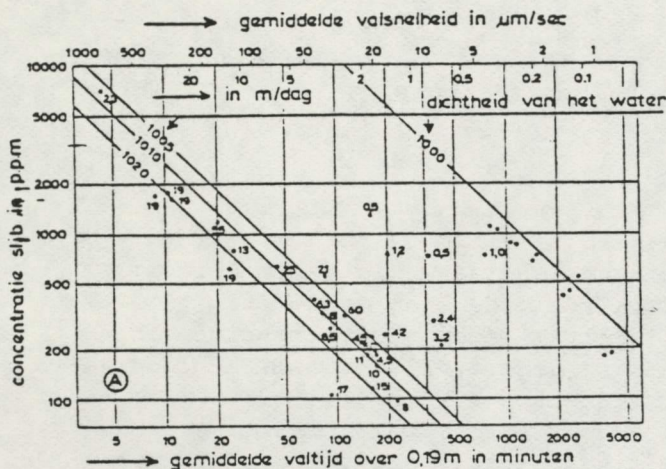


Fig. 7A. Gemeten valsnelheden in het Chao Phya estuarium (Thailand).

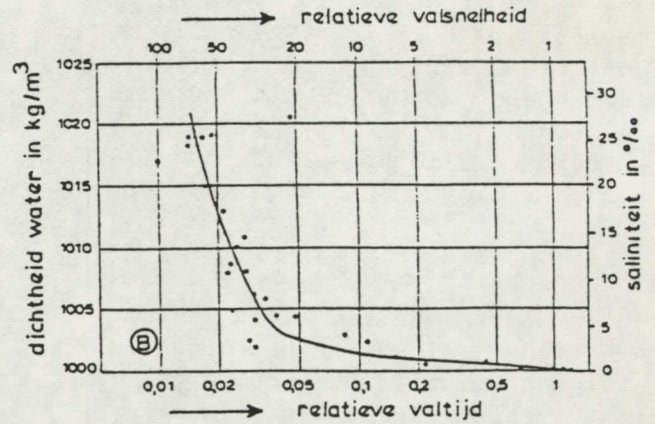


Fig. 7B. Gemeten valsnelheden in het Chao Phya estuarium (Thailand).

De invloed van de concentratie op de valsnelheid is door verschillende onderzoekers onderzocht. Figuur 8 geeft resultaten (overgenomen uit [10]). Het Waterloopkundig Laboratorium [11] heeft met slib uit Guyana de valsnelheden bepaald bij concentraties van 0,1 tot 100 kg/m³ (100 mg/l tot 100 g/l). De valsnelheden zijn zowel in zout als zoet water bepaald. Fig. 9 geeft de resultaten. In [16] wordt de door Thorn bepaalde relatie tussen de valsnelheid en de concentratie gegeven, eveneens in figuur 9 opgenomen.

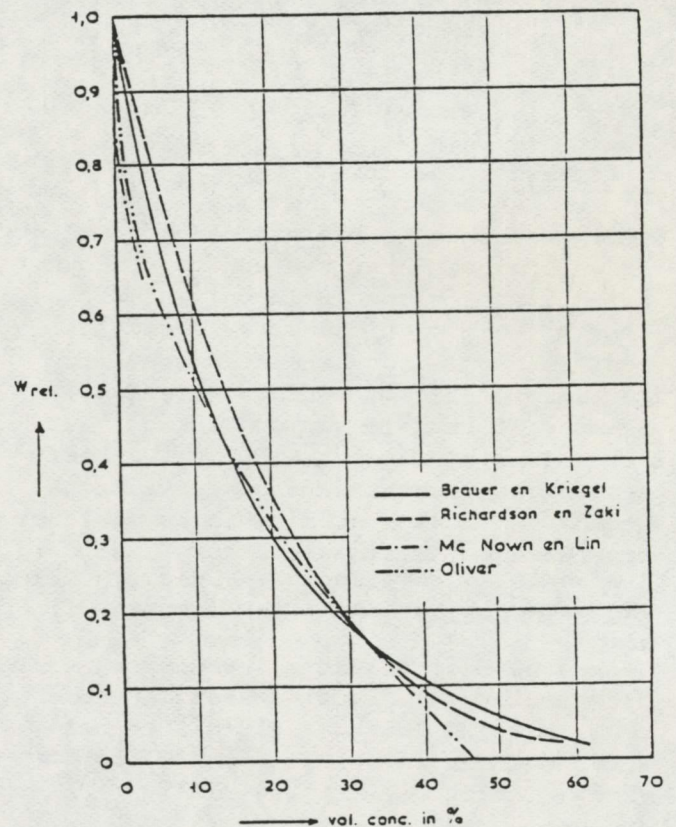


Fig. 8. Invloed van de volume concentratie op de valsnelheid (uit [10]).

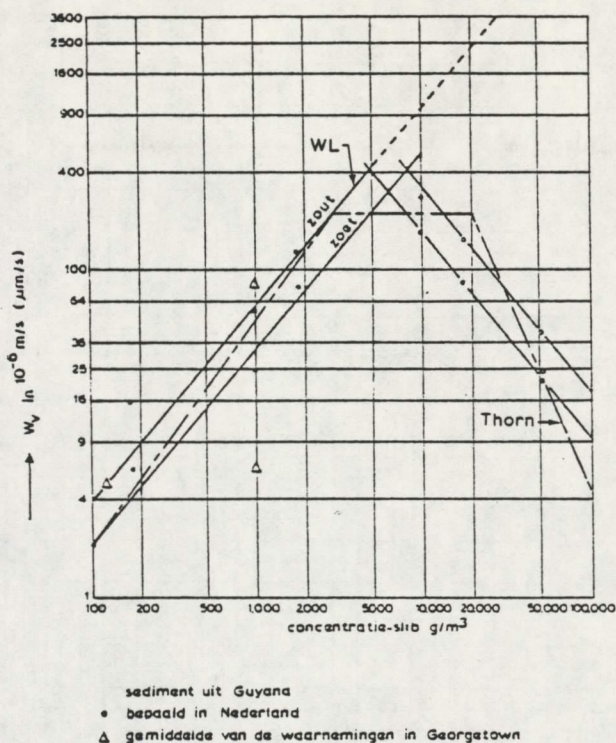


Fig. 9. Verband tussen de concentratie en de valsnelheid

6 Consolidatie.

Onmiddellijk na het aanbrengen van een belasting op een met water verzadigd grondpakket is het volume van de grond nog hetzelfde als voor het belasten; het korrelskelet is nog niet veranderd, dus de korrelspanning evenmin. De belasting wordt eerst geheel door het water opgenomen. De tijdelijke verhoging van de waterspanning wordt over spanning genoemd. Deze overspanning is de oorzaak van het uitdrijven van het water waardoor een samendrukking van het korrelskelet tot stand komt. Dit gaat gepaard met een toename van de korrelspanning en een afname van de waterspanning. Dit gehele proces wordt de consolidatie van grond genoemd. De consolidatietheorie wordt hier niet behandeld. Wel wordt iets gezegd over de bodemprocessen en de consolidatie van havenslib.

Bodemprocessen.

Na de afzetting van slib treden geochemische processen op die resulteren in een aantal stof omzettingen. Deze processen zijn voor een groot deel van biochemische aard en berusten op de aanwezigheid van

organische stof in het sediment. Nadat slib is afgezet bevat het poriënwater zuurstof. Dit wordt echter snel opgebruikt door aerobe bacteriën voor de oxidatie van de in het slib aanwezige organische stof. Tengevolge van dit proces komt kooldioxyde vrij waardoor een verlaging van de zuurgraad optreedt. Nadat de zuurstof is opgebruikt volgt een tweede bacterie soort die nitraten gebruikt voor de oxydatie van de organische stof. Eén van de producten die ontstaat is het gas stikstof. De derde stap in deze volgorde doen de sulfaat reducerende bacteriën. Door deze bacteriën worden sulfaten omgezet in het zwavelwaterstofgas dat net als kooldioxyde goed oplosbaar is in het poriënwater. Het zwavelwaterstofgas reageert met de in het slib aanwezige metaalverbindingen. In de sulfaatreducerende fase ontstaat ook de karakteristieke zwarte kleur in het gereduceerde sediment veroorzaakt door ijzermonosulfide. De laatste fase waarbij methaan ontstaat, treedt vooral op in een zoetwater milieu. Aangezien methaan slecht oplosbaar is in water geeft dit proces aanleiding tot de vorming van gasbellen, zoals bekend van moerasgebieden vandaar ook de naam moerasgas voor methaan.

Consolidatie van havenslib.

Voor slib is moeilijk te zeggen waar de grens ligt tussen sedimentatie en consolidatie. Er wordt nog van sedimentatie gesproken als er nog geen korrelspanningen zijn.

In het kader van het onderzoeksproject "Minimalisering Kosten Onderhoudsbagwerk" zijn door het laboratorium voor Grondmechanica een serie consolidatieproeven uitgevoerd met slib afkomstig uit de Merwede (zoet), Botlek (brak) en Europoort (zout). Doel van deze studie is:

- Onderzoek naar het consolidatiegedrag onder water.
- Onderzoek naar de sterkte-eigenschappen van het slib gedurende de consolidatieperiode.
- Onderzoek naar de relatie tussen in situ te bepalen parameter(s) en de sterkte eigenschappen van het slib.

Figuur 10 (overgenomen uit [12]), geeft resultaten van de consolidatieproeven. Voor consolidatieberekeningen blijkt het laagdikteverloop een slechte parameter

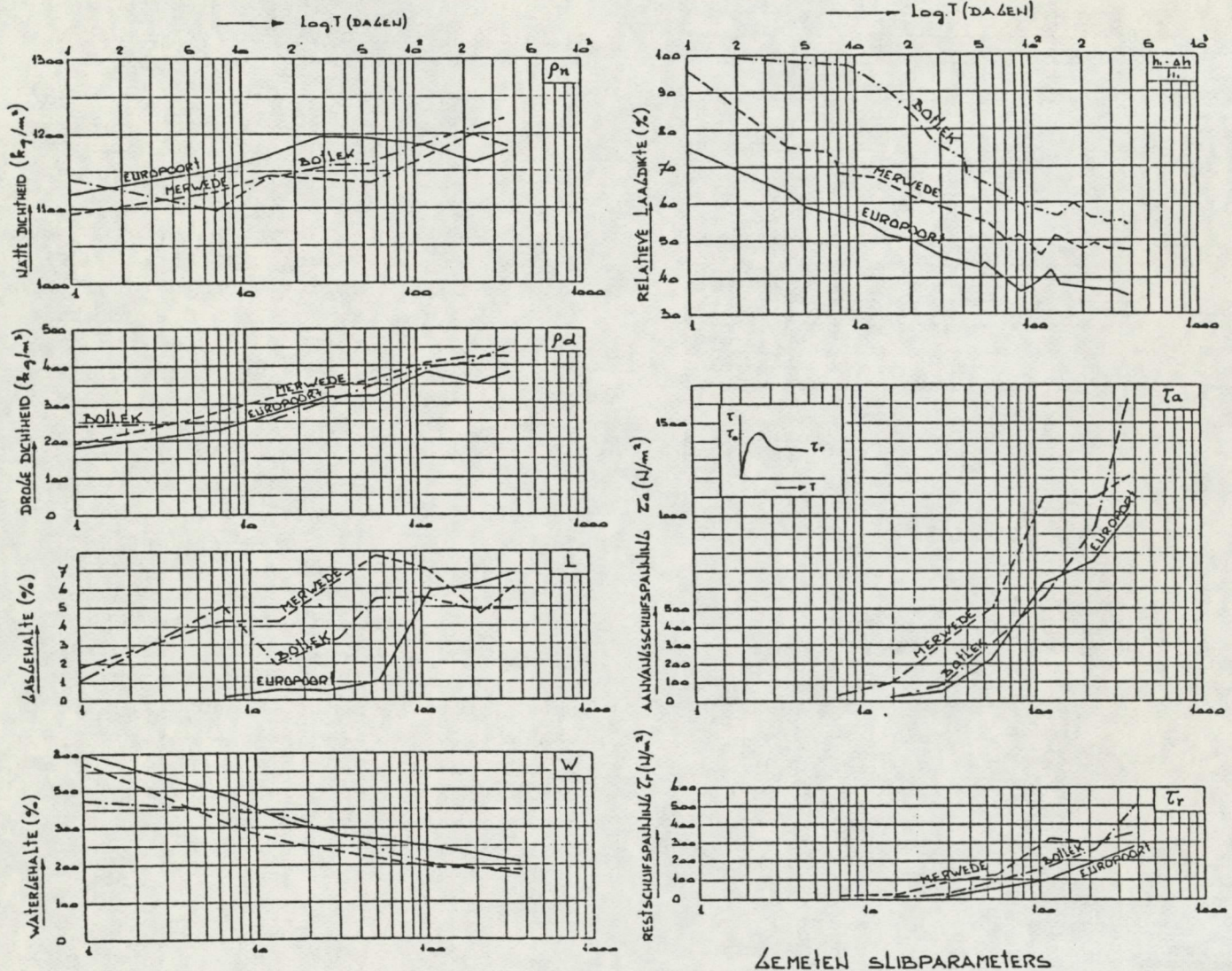


Fig.10. Resultaten consolidatieproeven.
(uit [12]).

te zijn door de grote invloed van de startwaarde van de dichtheid op dit verloop. Een bruikbare parameter is de droge dichtheid (vaste stofgehalte). Het verloop van de laatstgenoemde parameter is afhankelijk van het zandgehalte en de tijd. Uit de resultaten van de proeven blijkt dat de consolidatie van een bepaalde laag onafhankelijk is van de dikte van die laag en het aantal daarna gestorte lagen.

7 Erosie.

De erosie van slib kan door een drietal proces-en veroorzaakt worden. Deze processen zijn:

1. "Oplossen" van zeer fijn materiaal door de Brown-beweging.

2. Instabiel worden van het grensvlak water - soft silt.
3. Het afslijten van een "harde" bodem. Bij cohesieve gronden is de grootte van de kritieke schuifspanning in hoge mate afhankelijk van de consolidatiegraad waarin de grond verkeert. Verschillende onderzoekers hebben apparatuur ontwikkeld om de kritieke schuifspanning in het laboratorium te meten. Anderen hebben geprobeerd correlaties te vinden met gemakkelijk te bepalen eigenschappen zoals b.v.: korrelgrootte, plasticiteitsindex en kritieke schuifspanning.

Instabiel worden grensvlak water soft-silt en afslijten "harde" bodem.

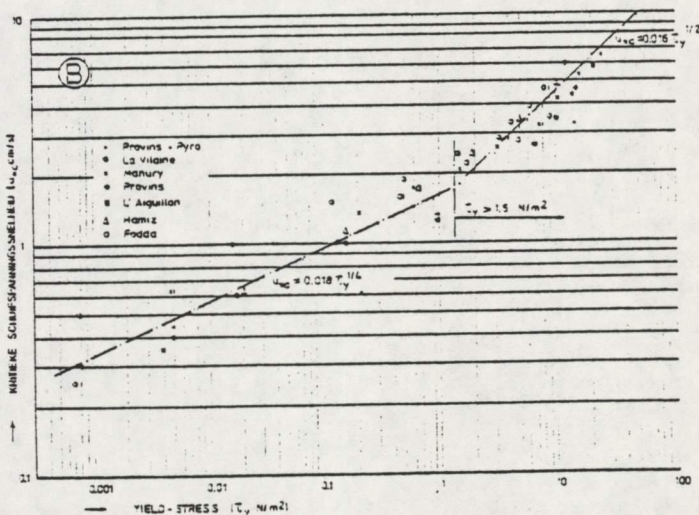
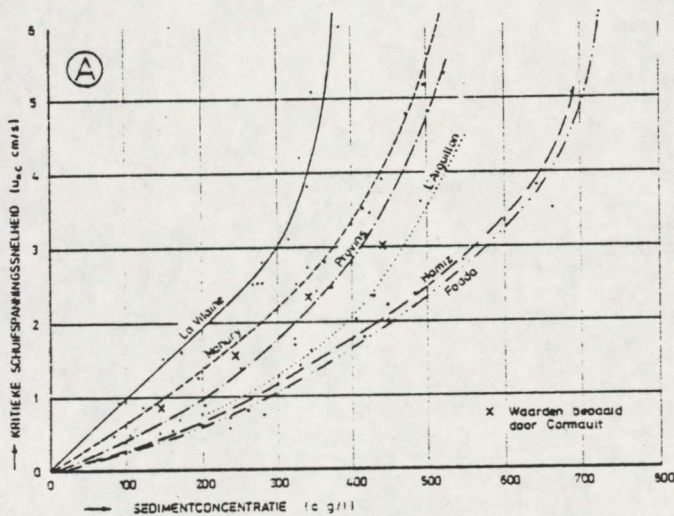
Bij slib bestaat de bodem uit min of meer vaste grond. In dit geval wordt de bodem geërodeerd wanneer:

- de bodem bestaat uit vloeibare modder,
- de op de bodem uitgeoefende schuif-

spanning groter is dan kritieke schuifspanning van het bodemmateriaal.

In het eerste geval vindt tengevolge van instabiliteiten in het grensvlak uitwisseling tussen het water en de vloeibare modder plaats. Een overgang van het ene naar het ander type bodem is niet scherp aan te geven. Deze grens ligt rond een dichtheid van 1200 kg/m^3 (concentratie 300 g/l).

De erodeerbaarheid van slib is door verschillende onderzoekers in stroomgoten bepaald. Cormault [13] vond de volgende betrekking tussen de kritieke schuifspanningssnelheid (u_{*c}) en de concentratie (c):
 $u_{*c} = 0,0055 c + 0,0000026 c^2$ (u_{*c} in cm/s).
 Migniot [7] heeft de erosiebestendigheid van een aantal slibsoorten onderzocht. Figuur 11 geeft de resultaten. Verder



vond hij dat de erosiebestendigheid van in zout water afgezet materiaal een factor 1,7 groter is dan die van in zoet water afgezet materiaal. Verder geeft Migniot [7] nog een relatie tussen de kritieke schuifspanningssnelheid (u_{*c}) en de yield stress (zwichspanning τ_y).
 Voor $\tau_y > 2 \text{ Pa}$ ($\text{Pa} = \text{Pascal} = \text{N/m}^2$) is
 $u_{*c} = 0,016 \tau_y^{1/2}$ ofwel $\tau_c = 0,25 \tau_y$ (volgens de relatie $\tau_c = \rho u_{*c}^2$)
 en voor $\tau_y > 1 \text{ Pa}$

$$u_{*c} = 0,018 \tau_y^{1/4} \text{ ofwel } \tau_c = 0,32 \tau_y$$

Partheniades [14] en Cormault [13] geven voor de berekening van de geërodeerde hoeveelheid slib de volgende vergelijking:

$$\frac{dm_a}{dt} = M \left\{ \left(\frac{u_{*c}}{u_{*c}} \right)^2 - 1 \right\}$$

Hierin is

$\frac{dm_a}{dt}$ = geërodeerde massa per tijds- en oppervlakte-eenheid

u_{*c} = optreden schuifspanningssnelheid

u_{*c} = kritieke schuifspanningssnelheid

M = maat voor erosie.

Voor slib uit de Theems is $M = 1,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{s}}$,

terwijl Cormault voor M vindt $M = 0,2 \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \text{s}}$.

In M zijn de invloeden van eigenschappen van het bodemmateriaal verdisconteerd.

Fig. 11. Erosie bestendigheid van slib.

Appendix 1

Definitie van slib (overgenomen uit [1])

Bij het definiëren van slib dienen verschillende aspecten in beschouwing te worden genomen:

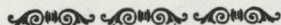
- de korrelgrootte.
Volgens normblad N 209 is slib de fractie, die een valsnelheid heeft, die ligt tussen de valsnelheden van een kwartsbolletje met diameter van 2 μm en 16 μm . Veelal wordt de fractie kleiner dan 50 á 63 μm geklassificeerd als slib.
- de mineralogische opbouw.
In tegenstelling tot zand, dat vrijwel uit één mineraal (kwarts) is opgebouwd, is slib uit een groot aantal mineralen samengesteld. De belangrijkste zijn de kleimineralen en kwarts; daarnaast komen in variërende hoeveelheden organische stof en carbonaten voor.
- reologische en mechanische eigenschap-

pen.

Slib vormt met water een plastisch materiaal met een bepaalde plasticiteitsindex. Dit materiaal heeft cohesieve eigenschappen door interacties tussen de korrels. Het laat zich als een Binghamse vloeistof beschrijven. Volgens Migniot veranderen de eigenschappen niet bij toevoeging van max. 25% zand.

- flocculatie en electro-chemische krachten.
De vorming van vlokken treedt op bij fijne sedimenten, die zijn gesuspendeerd in water waarin elektrolyten zijn opgelost. Deze condities doen zich voor in de brakke en zoute delen van een estuarium.

Uit het bovenstaande blijkt dat slib met een kleine hoeveelheid zand mechanisch als slib is te beschouwen, terwijl het volgens N209 een mengsel van zand en slib is.



LITERATUUR:

- 1 Reus, J.H. de, Davis, P.G.J.,
Salomons, W. en Eijssink, W.D.
onderzoek eigenschappen van slib,
vooronderzoek betreffende flocculatie,
sedimentatie, consolidatie en erosie.
Waterloopkundig laboratorium, R 988,
november 1976.
- 2 Einstein, H.A. and Krone, R.B.
Estuarial sediment transport patterns
Proceedings A.S.C.E. 87, HY 2, March
1961.
- 3 Müller, H.
Kolloidchem. Beihefte
27, 1928.
- 4 Krone, R.B.
A study of rheologic properties of
estuarial sediments
Technical Bulletin no.7 september
1963. University of California.
- 5 Edzwald, J.K., Upchurch, J.B. and
O'Melia, C.R.
Coagulation in estuaries.
Env.Sci-Technol. 8 1974.
- 6 Edzwald, J.K.
Coagulation in estuaries
Ph.D.Thesis. University of North
Carolina.
- 7 Migniot, C.
Etude des propriétés physiques de
différents sédiments très fins et de
leur comportement sous des actions
hydrodynamiques.
La Houille Blanch, 23 no.7, 1968.
- 8 Owen, M.W.
The effect of turbulence of the sett-
ling velocities of silt flocs.
Proceedings 14th Congress. of I.A.H.R.
Paris, 1971.
- 9 NEDECO
Siltation Bangkok Port Chanuel.
The Haque, July 1965.
- 10 Wijngaarden, N.J.van.
Zandtransport in suspensie.
Waterloopkundig laboratorium, R 783,
deel I 1973.
- 11 Diephuis, J.G.H.R.
Report on siltation of Demarara Bar
Chanuel and Coastal Erosion in
British Guyana.
Waterloopkundig laboratorium, 1962.
- 12 Cox, M., Nederlof, L., Rijt, C.van,
Hoek, A.W. van en Veen, R. van der
Slibconsolidatie onder water.
Evaluatie laboratoriumonderzoek.
Gemeentewerken Rotterdam. Ingenieurs-
bureau Havenwerken november 1980,
code: 59.00 - R 8034.
- 13 Cormault, P.
Détermination expérimentale du débit
solide d' érosion de sédiments fins
cohésifs.
Proceedings 14th Congress of I.A.H.R
Paris 1971.
- 14 Partheniades, E.
Erosion and deposition of cohesive
soils.
Journal of the Hydraulics Division,
Vol.91 no. HY 1, Jan. 1965.
- 15 Partheniades, E.
A study of erosion and deposition of
cohesive soils in salt water.
Thesis University of California, 1962.

Slibproblemen in en om de Westerschelde

W.T. Bakker
Adviesdienst Vlissingen

Inleiding

Het slibonderzoek bij de adviesdienst Vlissingen houdt rechtstreeks verband met de problematiek waar deze dienst over adviseert. Voor deze advisering heeft de ingenieur rivierhydraulica bij de adviesdienst maar een klein deel van zijn tijd ter beschikking en men kan zich voorstellen, dat het onderzoek daarom helemaal beperkt moet zijn. Een belangrijk deel van hetgeen volgt is mede dankzij ondersteuning van TH-zijde tot stand gekomen. Een groot deel "losse einden" is echter overgebleven en het lijkt zinnig om ook deze ten toon te stellen. Immers, doel is niet te vertellen hoe goed de adviesdienst Vlissingen is -dat is bekend- maar om een indruk te geven van de probleemcategoriën waar men voor wordt gesteld en met elkaar te bekijken, hoe die in de toekomst beter kunnen worden opgelost dan in het verleden.

Naast het permanente gebrek aan personeelscapaciteiten bij de adviesdienst is tevens de politiek een belangrijk generator van losse einden. Een projekt dat vandaag morgen af moet en morgen inderdaad zodanig af is, dat de operationele gegevens boven tafel zijn is die dag plotseling in de politieke mist verdwenen en iedereen gaat schamper lachen over studiediensten die alsmaar studeren, in plaats van te werken aan het nieuwe politieke paradepaard, dat dan weer plotseling heel urgent is.

Zo zijn tussen 1973 en 1978 de Bochtafsnijding bij Bath en het Baalhoekkanaal sterk vervaagd in de politieke mist. Interessant om te volgen is het wel en wee van de Westerschelde oeververbinding, waar alles is meegemaakt tussen groene lichten, oranje lichten en knipperlichten.

Randvoorwaarde bij adviesdiensten is, dat de belangrijkste opdrachten stootsgewijs op tafel worden geduwd en dat een aantal ook plotseling weer van de tafel af worden geveegd, maar dat men op dat laatste met behoud van de eigen verantwoordelijkheid niet veilig kunt gokken. De vruchten van noeste arbeid zijn naast

de werken in zand, klei en beton die wel uitgevoerd worden, een hoeveelheid kennis over het gebied of over een bepaald mechanisme, die als een Doornroosje een tijdlang in het stof mag inslapen, maar vroeg of laat meestal weer door de prins van een nieuw probleem wordt gewekt. Belangrijk is dat die kennis in de tussentijd dan niet verloren is geraakt. Maar nu het verhaal over slib, men zal zich al wel hebben afgevraagd, waar het bleef. De volgende slibproblemen zullen aan de orde komen:

1e. De Bochtafsnijding bij Bath en

2e. De aanslibbing van havens.

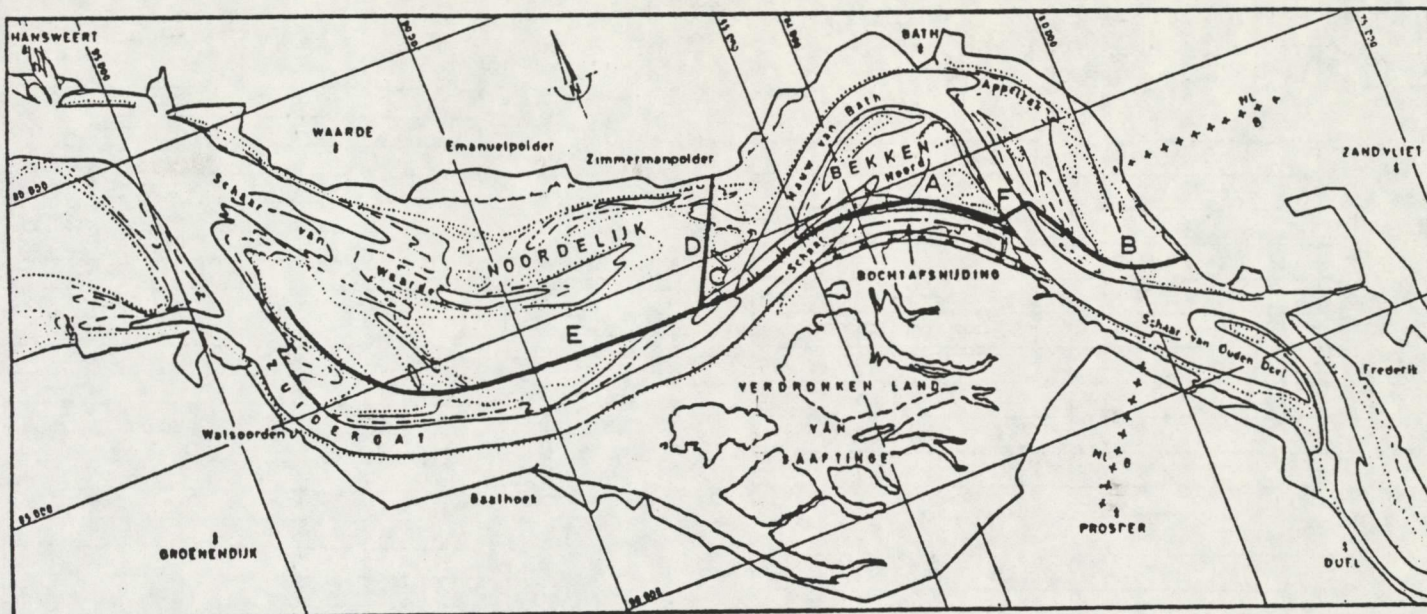
Tenslotte zullen nog enkele recentelijk uitgewerkte gegevens getoond worden.

DE BOCHTAFSNIJDING BIJ BATH

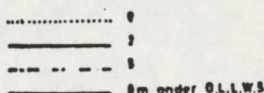
Fig. 1 toont de Bocht van Bath, met de bochtafsnijding en om die te handhaven de aldaar geprojecteerde geleidedam. In 1968-1971 is de dam over de Ballastplaten aangelegd. De twee lage dammen zijn niet veel meer dan een vastleggen van de plaatrand, teneinde geulvorming door dwarsstromen te voorkomen. De overlaat wordt aangelegd om te voorkomen dat de stromen door de bochtafsnijding te sterk worden, immers, het water van het hele kombergingsgebied zou anders door de afsnijding moeten stromen als het Nauw van Bath wordt afgesloten.

Eén van de zaken die men wilde weten was: slibt dit noordelijk bekken niet in de kortste keren dicht of zandt het snel aan. Hier wordt ingegaan op de aanslibbing; over de aanzanding is een aparte studie gemaakt.

Allereerst moet bekend zijn, wat de slibbalans van het gehele gebied is. In een aantal meetpunten waren oppervlakte-monsters 5 à 10 per maand genomen en een aantal vertikaalmetingen uitgevoerd. Deze werden zo goed en zo kwaad als het ging aan elkaar geknoopt, waaruit beelden ontstonden zoals bij Hansweert (fig. 2).



DIPTELIJNEN



RECHTHOENIGE COÖRDINATEN T.O.V. AMERSFOORT
PEILINGEN 1970 - 1971

- A: geleide dam
B: dam over ballastplaten
C: Lage dam, vast-
legging plaatsand.
D: overlaat

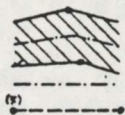
Fig.1 Bochtafsnijding bij Bath.

Te zien is, dat het slibgehalte nogal varieert met het seizoen, mede onder invloed van de rivierafvoer.

Uit dit soort analyses werd gevonden [1 en 2], dat het gemiddelde slibgehalte bij Bath ca 95 mg/l en bij Hansweert 35 mg/l bedroeg.

Daar de gemiddelde rivierafvoer ca 85 m³/s is, zou men na enig vermenigvuldigen tot een afvoer bij Bath van 0,25 miljoen ton per jaar kunnen komen. Echter, hoge afvoeren hangen samen met hoge slibconcentraties. Bij benadering kan worden gesteld, dat het slibgehalte recht evenredig is met de rivierafvoer

TOELICHTING:



GESCHATTE BEGRENZINGEN VAN DE SLIBGEHALTEN,
GEMIDDELD OVER DE MAAND EN OVER DE
VERTIKAAL NABU BOEI 49
GEMIDDELD TUSSEN BOVENGENOMDE BEGRENZINGEN
OPF SLIBGEHALTE, GEMIDDELD OVER DE MAAND
MET (5) AANTAL MONSTERS PER MAAND

*

UIT VERTIKAALMETING Bepaald SLIBGEHALTE
GEMIDDELD OVER DE VERTIKAAL EN OVER DE
MEETDAG ; MEETPUNT 2, NABU BOEI 49

◆

IDEM ; MEETPUNT 1, NABU BOEI 42

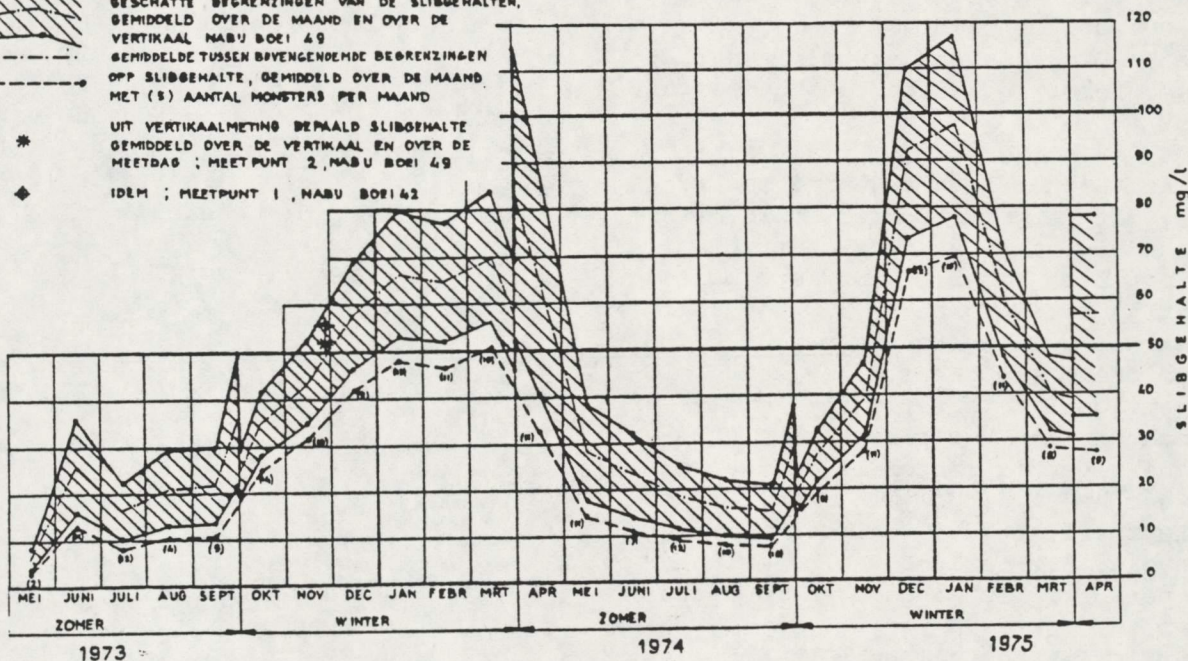


Fig.2 Slibgehalte bij Hansweert van 1973 - 1975.

bij afvoeren kleiner dan $90 \text{ m}^3/\text{s}$; bij hogere afvoeren neemt het slibgehalte echter niet verder toe (zie fig. 3).

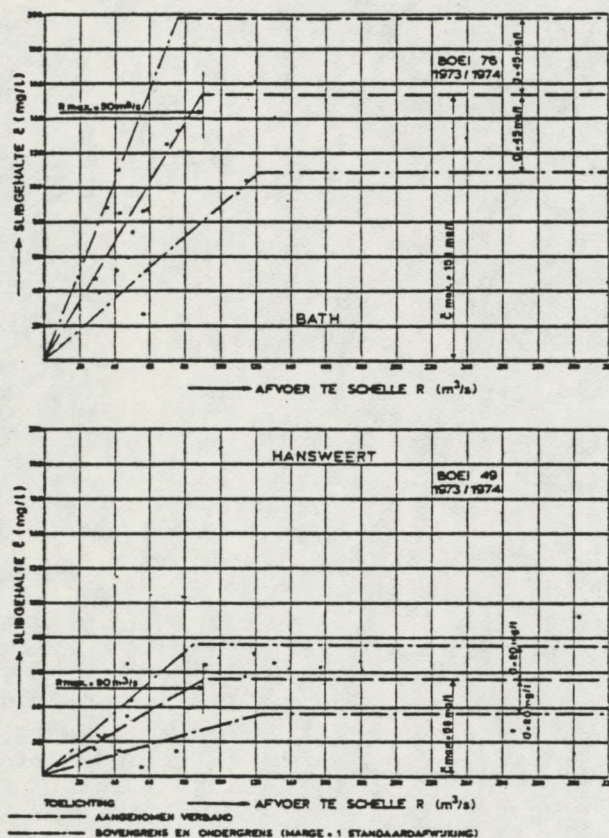


Fig. 3 Slibgehalte als functie van de afvoer voor Bath en Hansweert.

Wat kansrekening leidt dan tot de conclusie dat ten gevolge van deze correlatie de eerder genoemde transporten van $\frac{1}{4}$ en $\frac{1}{10}$ miljoen ton/jaar met een factor 1,44 vermenigvuldigd zouden moeten worden.

Er is echter nog geen rekening mee gehouden, dat de ebstroom gemiddeld meer slib kan bevatten dan de vloedstroom. Zowel bij Bath als bij Hansweert pendelt per getij gemiddeld ca 12.800 ton slib heen en weer. Dit getal is gevonden door het gemiddeld slibgehalte met het gemiddeld getijdebiet te vermenigvuldigen. Stel echter, dat het slibgehalte gedurende de vloed 1% minder is dan gemiddeld, dan heeft dit al een resulterend slibtransport van 0,18 miljoen ton/jaar tot gevolg. Het verloop van het slibgehalte per getij is aangegeven in figuur 4.

Te zien is dat het slibgehalte hoog is bij LW en laag bij HW. Op de fysische oorzaken wordt later teruggekomen.

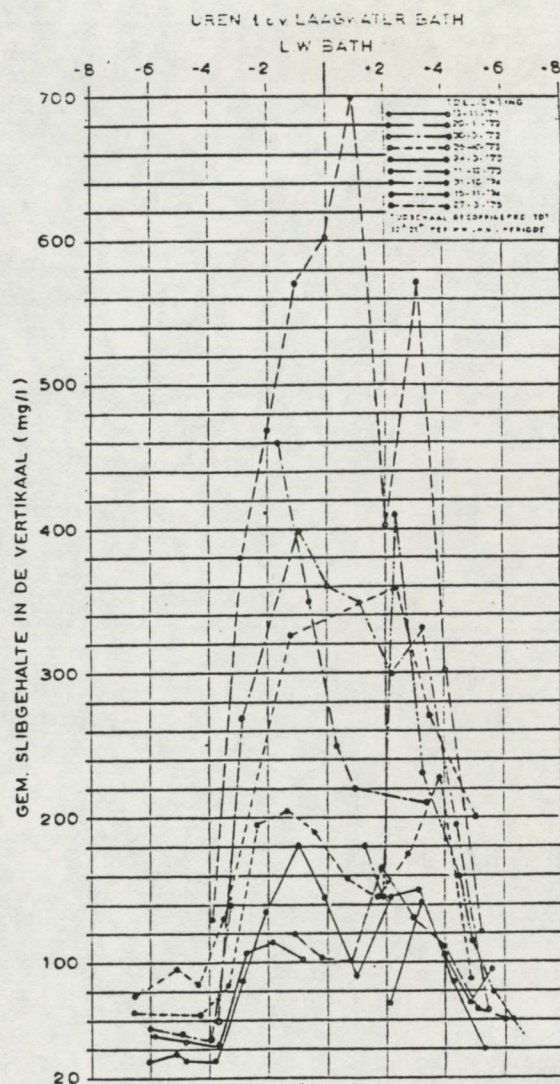


Fig. 4 Slibgehalte als functie van het getij bij Bath.

Om de invloed van deze variatie over het getij op het transport te vinden wordt uitgegaan van bovenstaande formuleringen. Men wilt weten het gemiddelde van $\bar{c}v$, en vindt dit als $\bar{c} \cdot \bar{v}$ plus $\bar{c}' \cdot v'$. Wat is nu $\bar{c}' \cdot v'$, ofwel $\bar{c}' \bar{Q}'$, indien de totale doorsnede wordt bekeken?

$$\begin{aligned} S &= \overline{Qc} \\ &= \bar{Q} \cdot \bar{c} + \overline{Q'c'} \\ &= \bar{c} \left(\bar{Q} + \frac{\overline{Q'c'}}{\bar{c}} \right) \end{aligned}$$

c = concentratie
 S = slibtransport
 Q = debiet
 Overstreping: getijgemiddelde
 Accent : momentane waarde minus getijgemiddelde

Figuur 5 toont hetzelfde verloop als figuur 4 maar nu genormeerd op gemiddeld slibgehalte. Hier is te zien, dat het slibgehalte wisselt tussen ca 50% van het getijgemiddelde tot ca 150% van het getijgemiddelde. Verder is gegeven de variatie van het debiet over het getij, waarbij het rivierdebiet eraf getrokken is en tevens wordt gegeven concentratie maal debiet als functie van het getij. Getijgemiddeld ontstaat een hele kleine afwijking van nul. Die resulteert echter in een bijdrage $\bar{c}'\bar{Q}'$, groot 0,4 miljoen ton/jaar. Dit geeft natuurlijk direkt aanleiding tot de vraag: hoe nauwkeurig

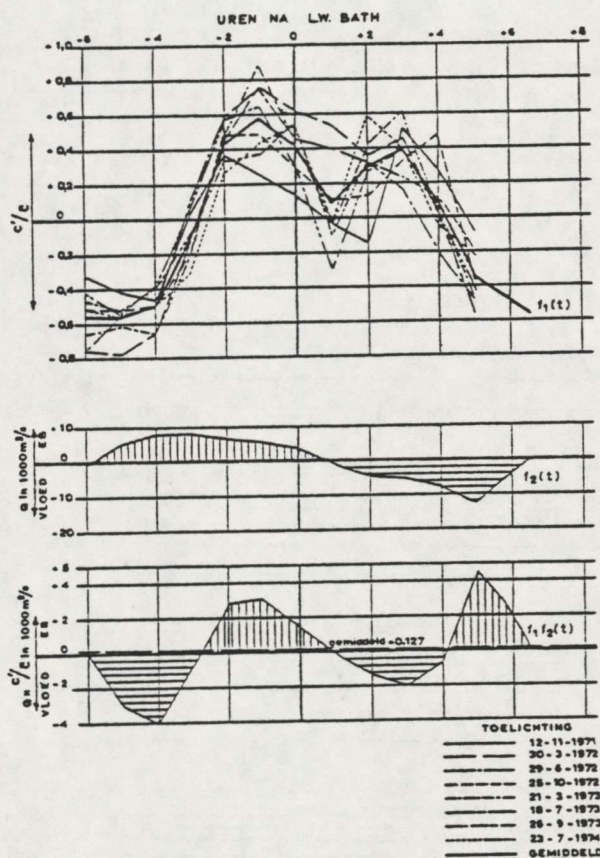


Fig.5. Genormeerde functie van het slibgehalte over het getij bij Bath.

is dat nu? Hieromtrent zijn uitgebreide nauwkeurighedsbeschouwingen uitgevoerd, leidend tot een transport in Bath van: $0,75 \pm 1,2$ miljoen ton/jaar. Op soortgelijke wijze werd voor raai Perkpolder - Waarde gevonden: $0,6 \pm 2$ miljoen ton/jaar. Deze resultaten zijn dus "alles inclusief", $\bar{c}v + \bar{c}'v'$. Welk deel van dit transport komt nu in het Noordelijk Bekken terecht? Om dit te weten te komen is - met behulp van de TH - een ééndimensionaal mathematisch model (zie appendix A) gemaakt met als afhankelijke

variabelen de horizontale snelheid u en de slibconcentratie c en als afhankelijke variabelen de verticale coördinaat z en de tijd t . In horizontale zin wordt uitgegaan van uniformiteit. Het model geeft dus snelheids- en slibconcentratie vertikalen als functie van de tijd. Enige uitkomsten zullen worden getoond.

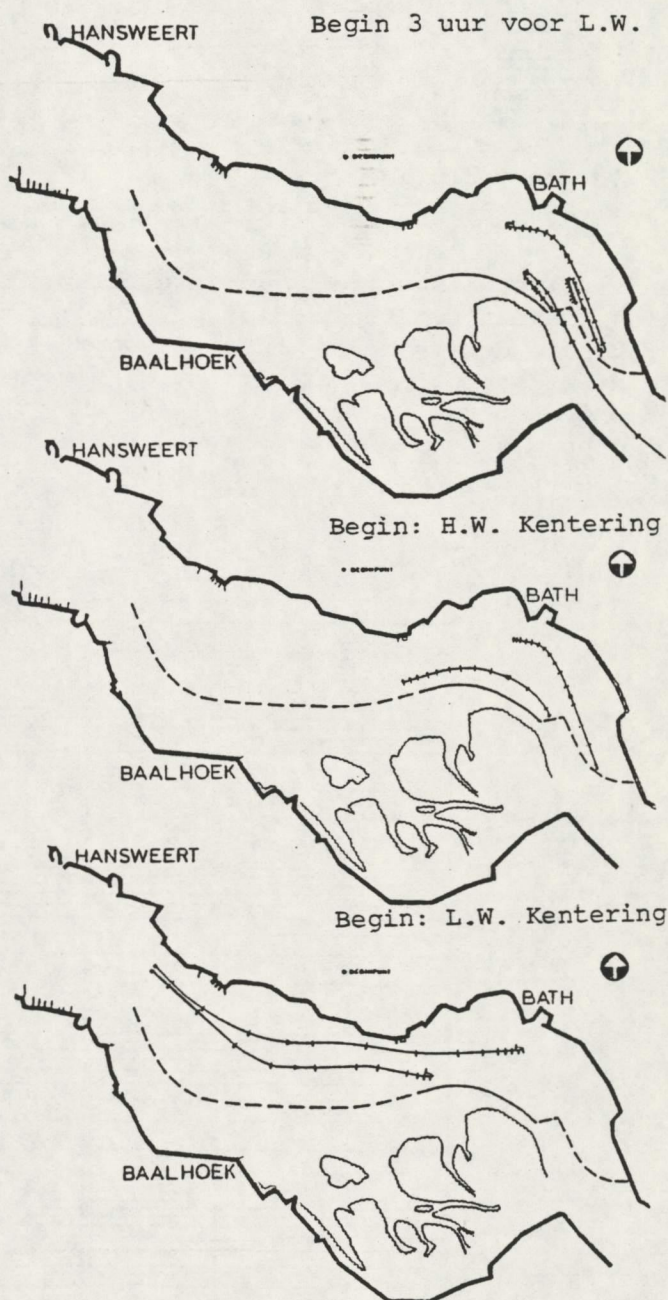


Fig.6 voorbeelden eb- en vloed wegen in een deel van de Westerschelde

Figuur 6 geeft een aantal voorbeelden van de eb- en vloedwegen, die het water in de verschillende getijfasen in het Noordelijk Bekken doorloopt. Het ééndimensionaal model is nu in een Lagrange-systeem meegevoerd met de over de vertikaal gemiddelde watersnelheid. In het

mathematisch model is de invloed van de horizontale dichtheidsgradiënt op de snelheidsvertikaal opgenomen (zie fig. 7).

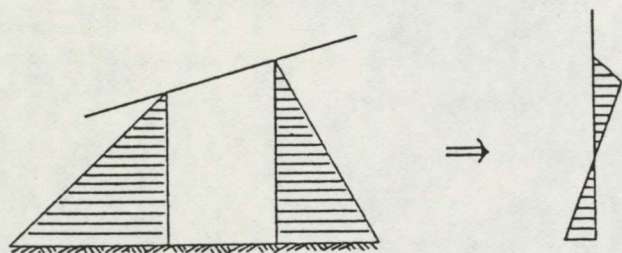


Fig. 7 Drukverloop op een waterkolom bij horizontale dichtheidsgradiënt.

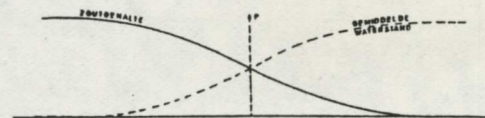


Fig. 8 Stroomsnelheden zonder rivierdebieten

Ten gevolge van het verschil in dichtheid ontstaat een verschil in de hydrostratische drukverdeling, die een soort momentwerking op het water geeft: aan de bodem een stroom in landwaartse en aan het oppervlak een stroom in zeewaartse richting.

Figuur 8 geeft schematisch de resulterende stroomsnelheden per getij na aftrek van het rivierdebiet (zie appendix B)

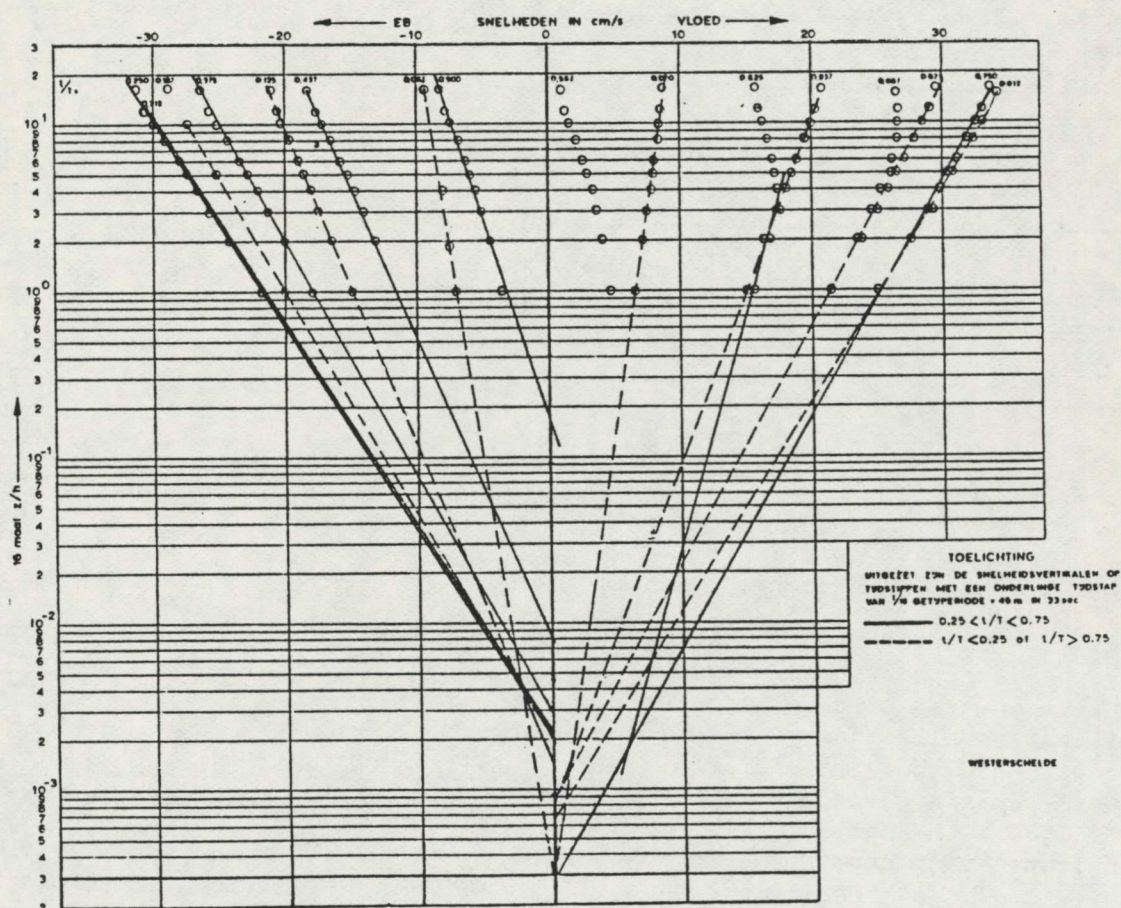


Fig. 10 Snelheidsverticalen logaritmisch uitgezet.

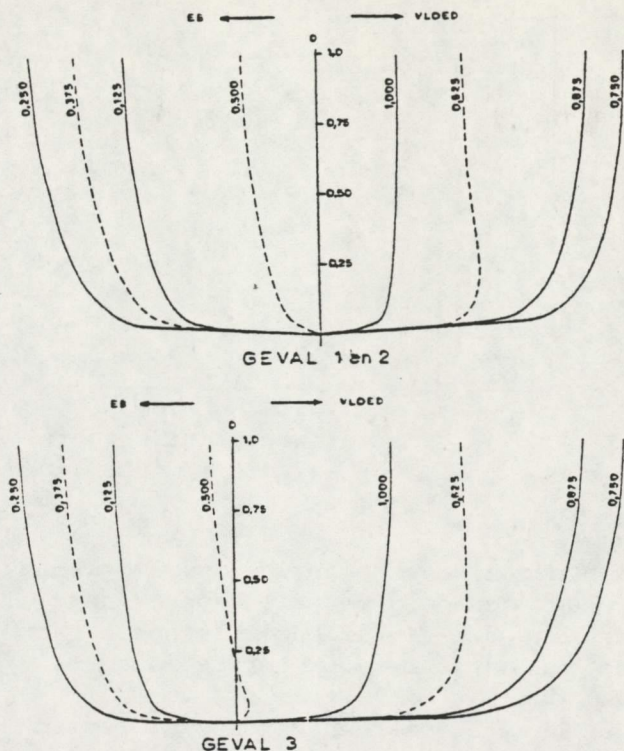


Fig. 9 Snelheidsverticalen in een getijrivier met dichtheidsgradiënt.

Figuur 9 toont voorbeelden van berekende snelheidsverticalen.

In figuur 10 zijn deze snelheden nog eens uitgezet op semi-logaritmisch papier. Hoewel de werkelijke ribbelhoogte steeds gelijk is en de snelheidsvertikaal niet logaritmisch in deze benadering, is het bovenste deel van de snelheidsvertikaal wel door een logarith-

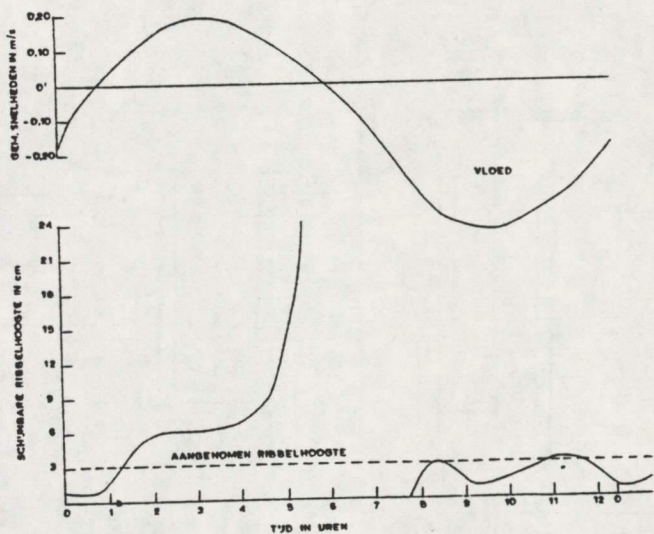


Fig. 11. Schijnbare ribbelhoogte als functie van de tijd.

mische kromme - dus een rechte lijn op semi-logaritmisch papier - te benaderen. Het punt waar deze lijn de nul-as snijdt geeft een maat voor de (schijnbare) ribbelhoogte. Deze varieert dus over het getij.

Figuur 11 toont de variatie van die schijnbare ribbelhoogte over het getij, klein bij vloed, groot bij de eb. Het verschil in eb- en vloedgedrag wordt veroorzaakt door de horizontale zoutgradiënt. Volgens dit model zou de rivier zich bij vloed "gladder" moeten gedragen dan bij eb. Dit wordt door natuurmetingen bevestigd. Uit een groot aantal snelheidsverticalen gemeten in de Westerschelde werd de Chezy-coëfficiënt bepaald [6].

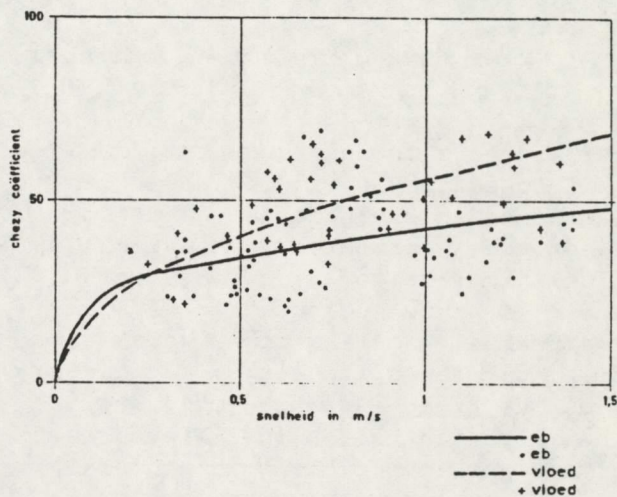


Fig. 12 Chezy-coëfficiënt in Westerschelde.

Deze zijn uitgezet (fig. 12) tegen de over de vertikaal gemiddelde snelheid. De tendens, dat de Chezy-coëfficiënt bij vloed groter is dan bij eb, wordt door deze metingen bevestigd.

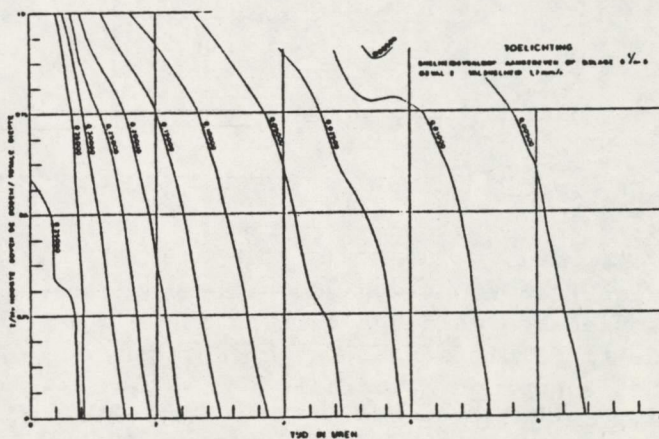


Fig. 13. Concentratieverloop in de tijd

Figuur 13 toont een voorbeeld van het concentratieverloop in de tijd indien men zich vanaf de overlaat met de ebweg mee beweegt door het Noordelijk Bekken. In het begin ter plaatse van de overlaat (fig. 14) is de concentratie boven hoog en onder laag, later verdeelt het slib zich door diffusie en door vrije val over de vertikaal.

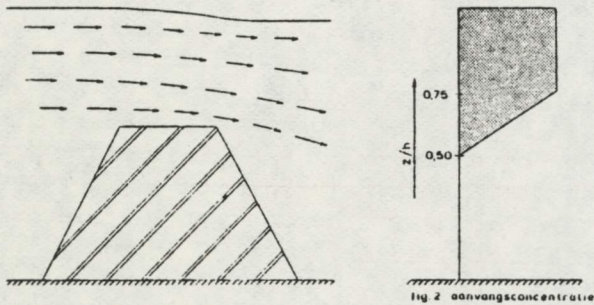


Fig. 14 Aannee stroming en concentratie t.p.v. overlaat Bath.

Figuur 15 geeft op een grotere tijdschaal het slibconcentratieverloop. Na de kentering nemen de snelheden en de diffusie weer toe, waardoor het materiaal zich gelijkmatiger over de vertikaal verdeelt. Daar de snelheden in het bekken betrekkelijk gering zijn, wordt aangenomen, dat een slibdeeltje, dat eenmaal bij de bodem is aangekomen, daar als het ware aan vast blijft kleven en niet meer voor opwerveling in aanmerking komt.

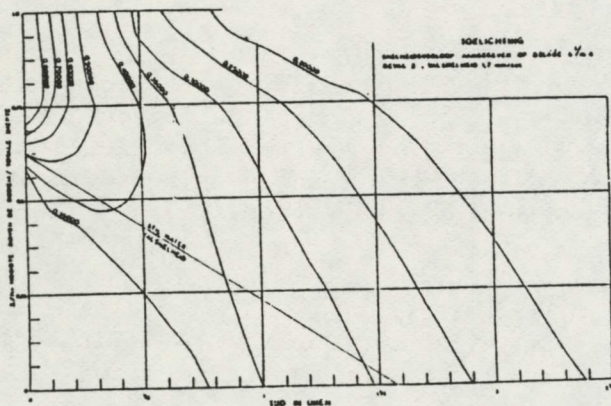


Fig. 15. Concentratieverloop in de tijd.

Figuur 16 toont een voorbeeld van de bezonken hoeveelheden slib in de loop van de tijd, uitgedrukt in percentages van het aanwezige materiaal. Toen een aantal van deze kormmen berekend waren, kon de conclusie getrokken worden, dat zij heel gemakkelijk door

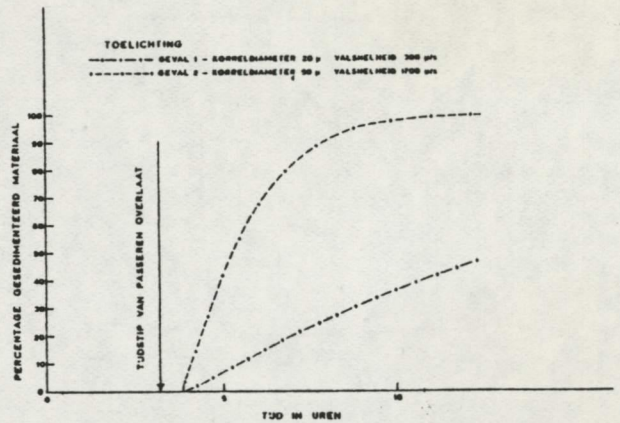


Fig. 16 Percentage gesedimenteerd materiaal als functie van de tijd.

een negatief-exponentieel verloop konden worden benaderd met als nepereringstijd de tijd die een slibdeeltje nodig had om van het oppervlak tot de bodem te vallen.

Een heel simpel benaderend theoretisch model (zie appendix C) gaf hier ook de fysische achtergrond voor. En dit gaf een kortsluitende oplossing voor het probleem.

Uit de theoretische studie kwam naar voren, dat de valsnelheid van het slib erg belangrijk was.

Gepoogd is deze te meten, door een watermonster bij Bath te nemen, dit zo snel mogelijk naar het laboratorium te laten vervoeren en het daar in een sedimentatiekolom te gooien.

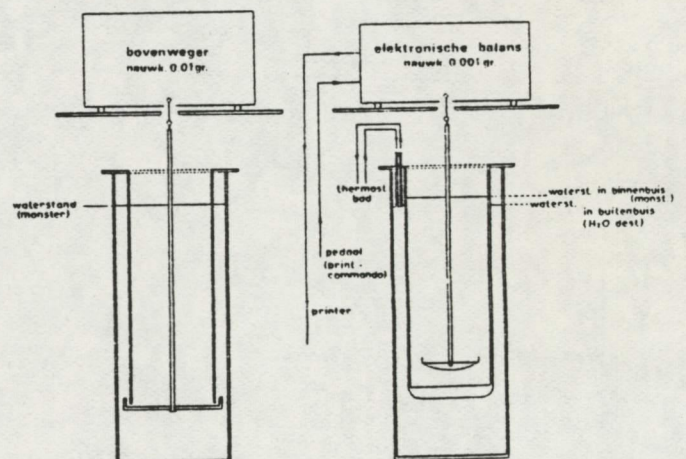


Fig. 17. Voorbeelden van een sedimentatiekolom.

Figuur 17 geeft de verschillende proefopstellingen, die gebruikt zijn. Het monster werd in een cylinder geplaatst;

in deze cylinder werd de weegschaal van een bovenweger geplaatst. Omdat de temperatuur in het laboratorium anders was dan de buitentemperatuur kwamen er gasen uit het water vrij, zodat de schaal omhoog ging in plaats van omhoog. Daarom moest er met een thermostaat omheen gewerkt worden om betere resultaten te verkrijgen. (zie figuur 18).

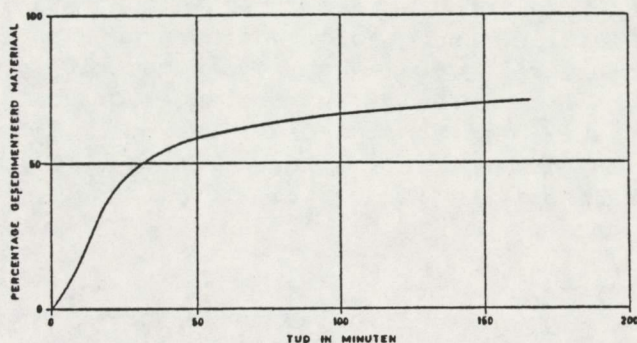


Fig. 18. Percentage gesedimenteerd materiaal als functie van de tijd, temperatuur gecorrigeerd.

Hieruit was met wat fantasie een verdeling in frakties als volgt te verkrijgen.

VALSNELHEID IN μ/s :

160 80 40 20 10

FRACTIE: 42% 14% 14% 14% 16%

Door uit te gaan van een exponentiële afname van de hoeveelheid slib zoals beschreven volgt hieruit een gesedimenteerd deel van het slib als functie van de verblijfsduur (fig. 19).

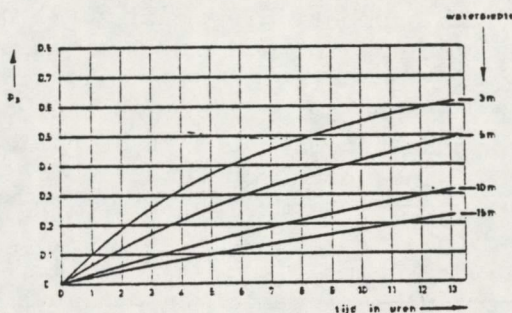


Fig. 19 Gesedimenteerd deel van het slib als functie van de verblijfsduur.

Een diepte van 5 m in het Noordelijk Bekken kwam als het meest reëel naar voren; hiermee werd gerekend.

Voor het water dat het bekken binnen stroomde vanuit de zeezijde vindt men dat vanaf de LW-kentering per getij 845 ton slib bezinkt. Totaal werd gevonden

dat aldus 1,27 miljoen ton/jaar zou bezinken.

Hoe verhouden de hier gevonden valsnelheden zich nu ten opzichte van valsnelheden, gevonden door andere onderzoekers?

Migniot [9] zette de valsnelheden van slibvlokken, respectievelijk in zeewater en in zoet water uit ten opzichte van de slibconcentratie (fig. 20). In deze figuur is met een kruis de w_{50} , gevonden bij Bath weergegeven. Het punt ligt in de buurt van de zeewater-kromme.

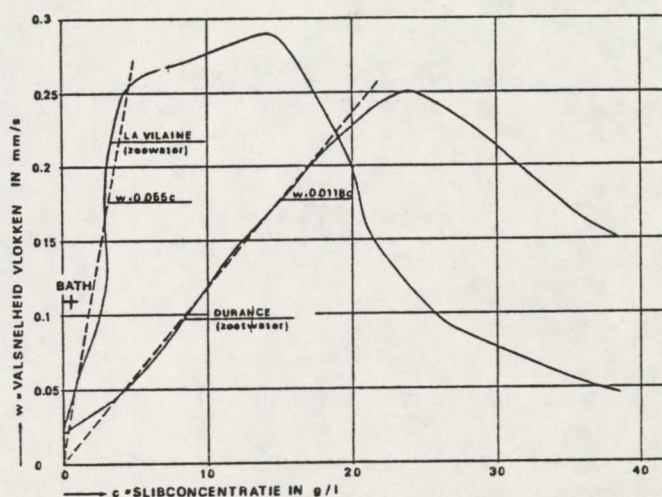


Fig. 20. Verband tussen concentratie en valsnelheid voor vlokken.

Het Waterloopkundig Laboratorium [10] mat valsnelheden in het Chao Phya estuarium.

Ook in deze figuur 21 is het punt "Bath" geplotted en ook hier ligt het praktisch op de zoutwater-kromme. De dichtheid van het water te Bath is ongeveer: $\rho = 1,012$. De valsnelheid wijkt nogal af van de waarden, gemeten door Owen [11] in het Thames estuarium, die eveneens in deze figuur zijn aangegeven.

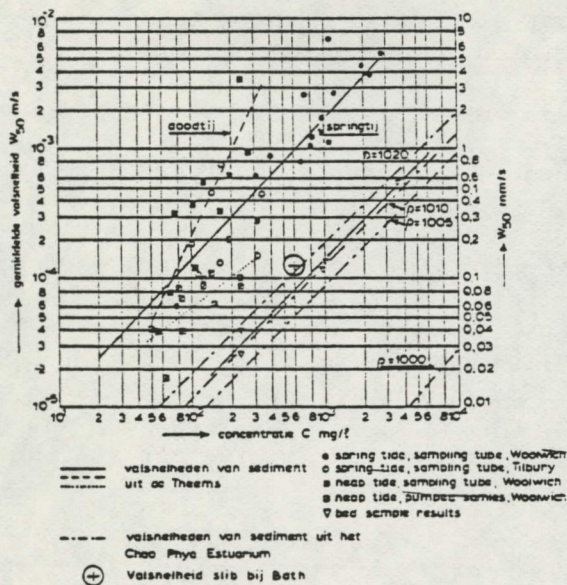


Fig.21 In de natuur gemeten valsnelheden.
(uit [10]).

DE AANSLIBBING VAN HAVENS

Nu wordt overgegaan naar het tweede probleem: slib in havens. Wat dit betreft worden slechts een aantal eerste gedachten ontvouwd.

Bij het voorspellen van het aanslibbingsgedrag van een nieuw aan te leggen of uit te breiden haven zal men geneigd zijn de aanslibbing af te leiden uit het gedrag van omliggende havens of uit het gedrag van dezelfde haven in het verleden.

De vraag hierbij rijst, onder welke omstandigheden havens in dit opzicht met elkaar vergeleken mogen worden, in zoverre, dat de uitwisselingsmechanismen gelijkwaardig zijn. Bij de uitwisseling tussen opgeloste of gesuspendeerde stoffen tussen een haven, grenzend aan een getijrivier en de betreffende getijrivier kunnen 3 componenten worden onderscheiden:

- uitwisseling ten gevolge van komvulling en lediging;
- uitwisseling ten gevolge van dichtheidsstromen;
- uitwisseling ten gevolge van horizontale neervorming in de havenmond.

De aanslibbing in de haven wordt verder in belangrijke mate bepaald door de hoeveelheid scheepvaart. Zo slibt bijvoorbeeld de buitenhaven in Hansweert met 24 cm/jaar aan, terwijl de veel minder bevaren vluchthaven 50 cm/jaar aanslibbing vertoont. Hieruit blijkt, dat studie omtrent deze invloed eigenlijk noodzakelijk is, teneinde aanslibbing enigszins betrouwbaar te kunnen schatten.

Hier zal niet worden ingegaan op de uitwisseling ten gevolge van horizontale neervorming. Deze kan worden geminimaliseerd met behulp van modelonderzoek; verder bestaat de indruk, dat de horizontale neer in veel gevallen de minst belangrijke van de 3 uitwisselingscomponenten zal zijn.

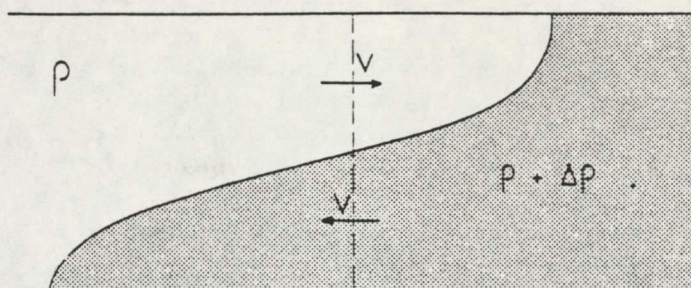
De vraag is nu:

- Bij welke dimensies van de haven overheerst de komvulling/lediging en wanneer de dichtheidsstroming?
- Welke grootheden spelen in het aanslibbingsproces een rol en hoe kunnen zij worden gegroepeerd?

Hiertoe zijn de volgende aannamen gemaakt:

- de waterstand in de haven volgt zonder vertraging de waterstand in de rivier;
- in de haven zelf wordt een perfecte menging aangenomen tussen het instromende en het reeds in de haven aanwezig zijnde water. Intern in de haven bestaan volgens deze aanname dus noch in horizontale, noch in verticale zin concentratieverschillen. Deze aanname is een vrij grove schematisatie van de werkelijkheid en vraagt een nadere toekomstige verfijning.
- de bodem van de haven wordt horizontaal aangenomen, op dezelfde diepte gelegen als de drempel van de haveningang;
- de waterdiepte in de haven wordt groot verondersteld ten opzichte van het getijverschil;
- de dichtheidsstroom in de havenmond wordt geschematiseerd op de volgende wijze:

Het water aan het oppervlak tot de halve waterdiepte beweegt zich met een snelheid v in de richting van de zwaarste vloeistof (dus hetzij rivier- hetzij havenwaarts) en het water aan de bodem met



$$v = \frac{1}{2} \sqrt{gh \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}}$$

dezelfde snelheid in de richting van de lichtste vloeistof, waarbij de grootte van v is:

$$v = \frac{1}{2} \sqrt{gh \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho}} \quad (1)$$

waarin:

- g = de versnelling van de zwaartekracht
- h = de getijgemiddelde waterdiepte
- $\Delta \rho$ = dichtheidsverschil tussen rivier- en havenwater
- ρ = gemiddelde dichtheid van rivier- en havenwater.

f. per eenheid van de tijd en oppervlak wordt door sedimentatie een hoeveelheid slib aan de haven onttrokken, gelijk aan de concentratie van slib in de haven maal de valsnelheid van het slib. Deze aanname betekent waarschijnlijk een onderschatting ten opzichte van de werkelijkheid ten gevolge van aanname b.: in feite zou "de" slibconcentratie in de haven door de bodemconcentratie van het slib moeten worden vervangen. Anderszijds wordt ook het circulatie-element in de dichtheidsstroming verwaarloosd: er zullen verticale, vaak opwaarts gerichte snelheden in de haven noodzakelijk zijn teneinde de dichtheidsstroming in de havenmond te voeden en deze kunnen van dezelfde orde van grootte als de valsnelheid van het slib zijn.

Gegeven deze aanname, kan er gerekend gaan worden. Een rekenmethode wordt dit uiteraard pas tegen de tijd, dat één en ander goed met behulp van metingen is gecontroleerd, en zover is het nog niet.

De differentiaalvergelijking die het gehalte c_i van opgelost diffusaat (b.v.

zout) in de haven lijkt te regeren is:

$$\frac{dc_i}{dt} = a^* \Delta c^* \sin t^* + p^* \Delta c^* \sqrt{|\Delta c^*|} \quad (2)$$

De sterretjes geven aan dat de variabelen dimensieloos zijn: de tijd t is met de hoekfrequentie $2\pi/T$ van het getij vermenigvuldigd en de concentraties c zijn gedeeld door de getijgemiddelde concentratie $\bar{c}$ in de rivier. De grootheid a^* is de amplitude a van het vertikaal getij, gedeeld door de waterdiepte $\bar{h}$; Δc is het (momentane) concentratieverschil van het diffusaat binnen en buiten de haven.

De eerste term aan de rechterzijde van deze formule geeft de invloed van de komberging op de toename van de concentratie c_i in de haven aan, de tweede de invloed van de dichtheidsstroom.

Daar $\Delta c^* \sin t^*$ en $\Delta c^* \sqrt{|\Delta c^*|}$ van dezelfde orde van grootte zijn, wordt het feit of de concentratie in de haven voornamelijk van de komberging dan wel van de dichtheidsstroom afhankelijk is, bepaald door de verhouding tussen a^* (= a/h) enerzijds en p^* anderzijds; hierin is de dimensieloze grootheid p^* in belangrijke mate bepaald door de verhouding tussen de doorsnee A van de havenmond en het oppervlak van de haven O :

$$p^* = \frac{\sqrt{\alpha} \cdot A}{4 \cdot O} \sqrt{\frac{gT^2}{4h}} \quad (3)$$

Hierin is:

- g = de versnelling van de gravitatie
- α = een evenredigheid coëfficiënt tussen het relatieve dichtheidsverschil en het relatieve concentratieverschil.

De grootheid α is dus weer te geven met de formule:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \alpha \frac{\Delta c}{\bar{c}} \quad (4)$$

waarin $\Delta \rho/\rho$ het relatieve dichtheidsverschil tussen het water binnen en buiten de haven is. Voor zout als diffusaat is α gelijk aan $1,4 \cdot 10^{-6} \bar{c}$, waarbij $\bar{c}$ het gehalte Cl/l in mg/l in de rivier is [9].

Voor wat betreft het slibgehalte in de haven kan een analoge vergelijking aan (2) worden opgesteld:

$$\frac{dc_i^*}{dt} = a^* \Delta c^* \sin t^* + p^* c^* \sqrt{\Delta c_z^*} - \frac{c_i^*}{T_b^*} \quad (5)$$

In (5) stelt c dus de slibconcentratie voor in plaats van de zoutconcentratie; daarentegen is Δc_z^* in (5) het (momentane) relatieve verschil in zoutgehalte binnen en buiten de haven; dit moet dus eerst berekend worden uit vergelijking (2) alvorens vergelijking (5) kan worden toegepast.

Vergelijking (5) wijkt verder af van (2) door de laatste term, die is toegevoegd; hierin is T_b^* het aantal getijperioden, dat een slibdeeltje in stilstaand water nodig heeft om 2π maal de waterdiepte te vallen:

$$T_b^* = 2\pi \bar{h} / wT \quad (6)$$

Hierin is w de valsnelheid van het slib in stilstaand water.

In geval de komvulling/lediging gering is - dat wil zeggen $a^* \ll p^*$, zoals bij voorbeeld voor havens zoals Kruiningen en Perkpolder het geval is - kan men (5) middelen over de getijperiode, zodat:

$$\frac{\bar{O}hc}{\bar{S}} = \frac{\bar{h}}{w} + \frac{T}{2\pi^3 \sqrt{\beta^2 p^* \bar{c}_{iz}^*}} \quad (7)$$

Hierin is $\bar{S}$ de getijgemiddelde aanslibbing over het gehele havenbassin in gewichtshoeveelheden per eenheid van tijd. Deze vergelijking is wat doorzichtiger te maken, door aan te nemen, dat p^* oneindig groot is, m.a.w. dat de uitwisseling oneindig groot is (zie (3)). Dan wordt (7) eenvoudig:

$$\bar{S} = 0 \text{ w } \bar{c} \quad (8)$$

d.w.z. de getijgemiddelde aanslibbing is de valsnelheid maal de gemiddelde concentratie (die in dit geval "binnen" en "buiten" gelijk is) maal het oppervlak van het havenbassin.

De tweede term van (7) vermindert de aanslibbing, welke volgt uit (8); hoe kleiner p , d.w.z. de doorsnede van de haveningang, hoe kleiner $\bar{S}$. In deze tweede term komen nog de grootheden β en $\bar{c}_{iz}^*$. Hierin is:

$$\beta^2 = 0,58196 \quad (9)$$

Verder is $\bar{c}_{iz}^*$ te vinden uit de verhouding tussen $\bar{c}_{iz}^* / \bar{c}_{ez}^*$, d.w.z. de amplitudeverhouding van de zoutgehaltevariatie over het getij binnen, respectievelijk buiten de haven. Deze laatste verhouding is een functie van $p^* \bar{c}_{ez}^*$ (waarin $\bar{c}_{ez}^*$ de relatieve amplitude van de zoutgehaltevariatie in de rivier is).

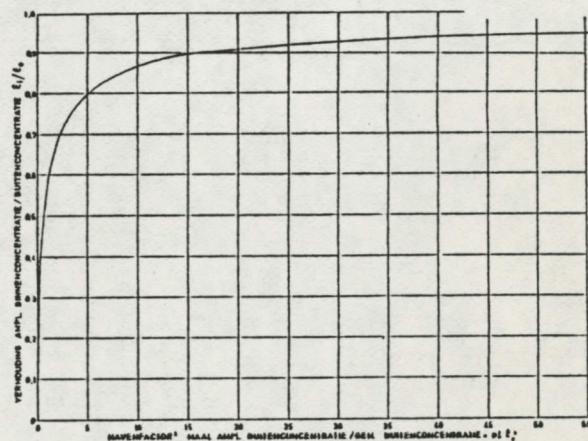


Fig. 22. Relatie relatieve zoutgehalte in de haven met die in de rivier.

In figuur 22 is de betreffende relatie weergegeven.

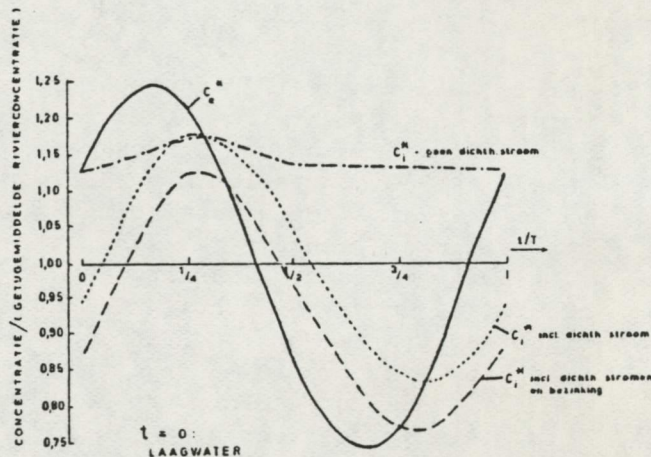


Fig. 23 Concentratieverloop in haven en rivier als gevolg van verschillende mechanismen.

In figuur 23 is een voorbeeld van berekende concentratievariaties over het getij te zien. Aangenomen is dat het tijdstip $t = 0$ het tijdstip van LW is.

Het relatieve concentratieverloop in de rivier is volgens de lijn c_e aangenomen. De volgende lijnen zijn berekend met behulp van simpele numerieke programma's (berekend op een calculator HP 29c).

De lijn (a) toont de concentratie c_i^* in

de haven, als er geen dichtheidsstroom zou zijn. Ook is geen rekening met valsnelheden gehouden: men moet voor "c" dus aan de concentratie van een diffusaat denken. De vergelijking, die het geheel regeert is vergelijking (2) met $p^* = 0$, d.w.z., zolang de kom zich vult (vloed). Bij eb blijft de concentratie konstant. Het havenbassin leegt zich en uitwisseling is, zoals gezegd, niet aangenomen. In dit geval kan de gemiddelde concentratie in de haven aanmerkelijk hoger zijn dan daarbuiten.

De lijn (b) toont de oplossing van vergelijking (2) voor het geval wel dichtheidsstroom aanwezig is; ook hierbij is "c" als concentratie van diffusaat (zout) gedacht.

Ziet men " c_e^* " als het verloop in de tijd van de slibconcentratie in de rivier dan geeft de lijn (c) het verloop van de slibconcentratie in de haven, met inachtneming van dichtheidsstroming en bezinking. Dit verloop van c_i^* vormt dus een oplossing van vergelijking (5).

Verkennde berekeningen [13] aangaande Zeeuwse havens lijken erop te wijzen, dat ook vergelijking (8) nog tot een aanzienlijke onderschatting van de aanslibbing aanleiding geeft. Waarschijnlijk is de oorzaak hiervan, dat de slibconcentratie in de onderlaag veel groter is dan $\bar{c}$; dit kan tevens gevolgen hebben voor de valsnelheid w van het slib, die toeneemt bij toenemende concentratie.

APPENDIX A

Het ééndimensionale model van Schaart voor de berekening van zand- en slibconcentraties in getijstroom.

Door Schaart [3] werd onder begeleiding van Bakker een mathematisch model ontwikkeld voor de berekening van zand- en slibconcentraties en -transporten in getijstroom. Het onderstaande geeft een introductie tot dit model; voor verdere detaillering wordt verwezen naar [3] en [4].

Het ééndimensionale model heeft als afhankelijke variabelen de horizontale snelheid u en de (zand- of slib) concentratie c en als afhankelijke variabelen de verticale coördinaat z en de tijd t . Beschouwd wordt een coördinatenstelsel volgens een Lagrange-systeem, d.w.z. dat dit zich mee-beweegt met de over de vertikaal gemiddelde watersnelheid.

Verder wordt aangenomen dat het water in horizontale zin (x -richting) een zoutgradiënt vertoont; de hieruit voortvloeiende dichtheidsgradiënt $\rho/\partial x$ wordt invariant in de tijd aangenomen. Eerst worden de snelheidsvertikalen berekend uitgaande van de bewegingsvergelijking:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho g (h-z) \} + \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (A1)$$

waarin:

- ρ = soortgelijke massa
- g = versnelling van de zwaartekracht
- h = waterdiepte (konstant in de tijd genomen; er bestaat echter wel een in de tijd variabel verhang ($\partial h/\partial x$))
- z = verticale coördinaat, positief in opwaartse richting, de waarden ervan is nul ter hoogte van het hypothetische bodemniveau.

Voor de turbulente schuifspanning τ in (A1) wordt, overeenkomstig Prandtl de volgende relatie aangenomen:

$$\tau = \rho \ell^2 \frac{\partial u}{\partial z} \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \quad (A2)$$

Hierin wordt voor de mengweg ℓ aangenomen:

$$\ell = \kappa z \sqrt{1 - \frac{z}{h}} \quad (A3)$$

Hierbij is κ de konstante van Von Karman.

De schuifspanning aan het oppervlak wordt steeds nul gesteld. Als randvoor-

waarde aan de bodem wordt de schuifspanningssnelheid $\sqrt{\tau_b/\rho}$ opgelegd, bestaande uit een getijgemiddelde schuifspanningssnelheid en een eerste harmonische.

Het verloop van deze schuifspanningssnelheid in de tijd kan worden afgeleid uit het (gewenste) verloop van het getijverhang en de dichtheidsgradiënt; voor de wijze waarop dit gebeurt wordt verwezen naar [3] en [4].

Uit de hierboven genoemde randvoorwaarden en de vergelijkingen (A1), (A2) en (A3) vindt men het verloop van de watersnelheid u als functie van z en t (zie b.v. figuren 9 en 10).

Vervolgens wordt de slibconcentratie c als functie van z en t berekend met behulp van de vergelijking:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon \frac{\partial c}{\partial z} + wc) \quad (A4)$$

hierin is:

w = de valsnelheid van het sediment, positief in negatieve z -richting (als konstante aangenomen).

Vergelijking (A4) is de continuïteitsvergelijking voor het sediment. Het gedeelte aan de rechterzijde tussen haakjes stelt het sedimenttransport in neerwaartse richting voor. De eerste term tussen haakjes geeft de turbulente uitwisseling aan, de tweede de vallende beweging van het materiaal. De turbulente uitwisselingscoëfficiënt ϵ is gelijk gekozen aan:

$$\epsilon = \ell \cdot \sqrt{|\tau/\rho|} \quad (A5)$$

waarbij de mengweg ℓ gegeven is in vergelijking (A3). Deze coëfficiënt is dus een functie van z en t .

Als randvoorwaarden worden gekozen:

1. geen transport van sediment door het oppervlak:

$$\epsilon \frac{\partial c}{\partial z} + wc \equiv 0 \text{ voor } z = h \quad (A6)$$

2. geen turbulente opwerveling aan de bodem:

$$\epsilon \frac{\partial c}{\partial z} \equiv 0 \text{ voor } z = 0 \quad (A7)$$

Als beginvoorwaarde wordt de aanvangsconcentratie aangenomen, gegeven in figuur 14.

APPENDIX B

Het mathematisch model van Landman.

Door Landman [5] werd onder begeleiding van Bakker het mathematisch model van Schaart ([3], [4]) uitgebreid.

Aandacht werd besteed aan de verticale komponent van de circulatiestroming; tevens werd de bodemrandvoorwaarde subtieler gekozen, zodanig dat afhankelijk van de omstandigheden, zowel opwerveling als sedimentatie mogelijk is (zie [5], blz. 55 t/m 58).

Uitgegaan wordt van een getijgemiddeld zoutgehalte dat in het estuarium volgens een error-functie verloopt (fig. 8). Dit leidt tot een horizontale zoutgradiënt $\partial\rho/\partial x$, gelijk aan:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\Delta\rho}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad (B1)$$

en een getijgemiddeld waterspiegelverhang dh/dx volgens:

$$\frac{dh}{dx} = -\beta \frac{d\rho}{dx} \quad (B2)$$

hierin is:

ρ = soortelijke massa water

x = horizontale coördinaat (positief in zeewaartse richting)

$\Delta\rho$ = het dichtheidsverschil tussen het zeewater en het rivierwater (d.w. z. het dichtheidsverschil tussen de beide uiteinden van de brakwaterzone)

σ = een konstante (met de dimensie van een lengte) welke de lengte van de brakwaterzone bepaalt

h = waterdiepte

β = een konstante waar nog nader op wordt teruggekomen. De dimensie van deze konstante is (m^4/kg).

Vergelijking (A1) van appendix A is nu gemiddeld over het getij, waarbij de eerste term verdwijnt. Uitgaande van getijgemiddelden wordt dan uit (A1) gevonden, na integratie over z (N.B.: de oppervlakteschuifspanning is nul):

$$\tau = -\frac{1}{2}g(h-z)^2 \frac{d\rho}{dx} - \rho g(h-z) \frac{dh}{dx} \quad (B3)$$

Substitutie van (B1) en (B2) leidt tot:

$$\tau = -g(h-z) \frac{\Delta\rho}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{1}{2}(h-z) - \rho\beta \right\} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad (B4)$$

Nu is τ te splitsen in een funktie van x en van z :

$$|\tau| = \rho \cdot f_1^2(z) \cdot f_2^2(x) \quad (B5)$$

waarin

$$f_1^2(z) = |-g(h-z)\{\frac{1}{2}(h-z) - \rho\beta\}| \quad (B6)$$

en

$$f_2^2(x) = \frac{\Delta\rho/\rho}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}(x/\sigma)^2} \quad (B7)$$

Uit (A2) volgt:

$$u = \int_{z=0}^{z=z} \frac{1}{\ell} \cdot \sqrt{\tau/\rho} \, dz \quad (B8)$$

Hierbij volgt ℓ uit (A3).

Substitutie van (B5) in (B8) levert:

$$u = \left\{ \int_{z=0}^{z=z} \frac{1}{\ell} f_1(z) dz \right\} \cdot f_2(x) \quad (B9)$$

Hierbij volgen $f_1(z)$ en $f_2(z)$ uit (B6) en (B7). Men vindt dus overall langs de rivier dezelfde vorm voor het getijgemiddelde snelheidsvertikaal, alleen de "schaal" ervan varieert in x -richting. Dit, ervan uitgaande, dat een oplossing van de soort, bepaald door (B1) en (B2) mogelijk is. Middelt men (B9) over de vertikaal, dan ziet men, dat dit uit continuïteitsoverwegingen alleen het geval is, als de resulterende stroom te verwaarlozen is ten opzichte van de circulatiestroom. Immers, de over de vertikaal en de over het getij gemiddelde stroom moeten konstant zijn en niet een konstante maal $f_2(x)$ zoals in (B9).

De faktor β in (B6) is nu zodanig bepaald, dat de over de vertikaal gemiddelde waarde van u nul was. Het resultaat van een dergelijke (numerieke) berekening staat aangegeven in figuur 8. De grootte van β hangt onder andere af van de Nikuradse ruwheid

APPENDIX C

Een globale analytische berekeningsmethode van het aanslibbingsmechanisme.

Globaal kan het valmechanisme op de volgende wijze worden geschematiseerd. Het met slib beladen water, dat over de overlaat stroomt verdeelt zich in een eerste periode vrij regelmatig over de vertikaal.

Stel, dat op een zeker moment ($t = 0$) het sediment zich gelijkmatig over de vertikaal heeft verdeeld, zonder dat verlies aan de bodem is opgetreden, dan wordt daarna aan de bodem het over de vertikaal gemiddelde sedimentgehalte $\bar{c}$ aangetroffen, waarbij de totale hoeveelheid materiaal per eenheid van bodemoppervlak gelijk is aan $\bar{c}h$. Per tijdseenheid wordt aan de rivier onttrokken een hoeveelheid $w\bar{c}$. De continuïteitsvergelijking levert dus:

$$h \frac{d\bar{c}}{dt} + w\bar{c} = 0 \quad (C1)$$

met als randvoorwaarde:

$$\bar{c} = \bar{c}_0 \text{ voor } t = 0 \quad (C2)$$

Dit levert als oplossing:

$$\bar{c} = \bar{c}_0 e^{-t/(h/w)}$$

Hierin is de tijd h/w (d.w.z. de tijd die een korrel nodig heeft om in stil water een afstand, gelijk aan de waterdiepte te vallen) een "nepereringstijd" d.w.z. de tijd, nodig om de gemiddelde concentratie $\bar{c}$ een faktor e te doen dalen.

De hier gegeven berekeningsmethode kan worden verfijnd. Zo kan men aannemen, dat de bodemconcentratie steeds een faktor α groter is dan de gemiddelde concentratie. Duidelijk is (uit (C1)), dat dan de nepereringstijd door α moet worden gedeeld.

Verder kan worden nagegaan, aan welke eisen een concentratievertikaal moet voldoen om "vormvast" te zijn, m.a.w. zodanig, dat de concentraties in de tijd over de gehele hoogte met dezelfde (tijdsafhankelijke) faktor afnemen. Een studie hiernaar werd verricht in [14].

APPENDIX D

De stabiele slibconcentratievertikaal.

Uit metingen van het Waterloopkundig Laboratorium, verricht in het Chao Phya estuarium zou een evenredigheid tussen de valsnelheid w van slib en de concentraties kunnen worden afgeleid:

$$w = A \cdot c \quad (c < 10^{-2}) \quad (D1)$$

Kiest men als eenheid voor c de slibfraktie in het water (d.w.z. 10^6 p.p.m.) en drukt men de valsnelheid uit in m/s, dan is - bij een soortgelijke dichtheid van (brak)water van 1010 à 1020 kg/m³ en bij de in het betreffende estuarium heersende temperatuur - de grootte A van de orde van grootte:

$$A \approx 0,13 \text{ à } 0,18 \text{ m/s} \quad (D2)$$

Bij een stabiele concentratievertikaal en een in horizontale zin uniforme, eenparige horizontaal gerichte stroming met een logaritmische snelheidsvertikaal bestaat evenwicht tussen de verticale diffusie en de valsnelheid w :

$$w \cdot c + \varepsilon \frac{dc}{dz} = 0 \quad (D3)$$

Uitgaande van de analogie van de uitwisseling van impuls en van slib vindt men voor ε (zie (A3) en (A5)):

$$\varepsilon = \kappa z \sqrt{1 - \frac{z}{h}} \cdot \sqrt{|\tau/\rho|} \quad (D4)$$

Hierbij is de lengte l volgens de Prandtl-hypothese gelijk gekozen aan:

$$l = \kappa z \sqrt{1 - \frac{z}{h}} \quad (D5)$$

waarbij κ de konstante van Von Karman en h de waterdiepte is.

Hierbij is τ te schrijven als:

$$\tau = (1 - \frac{z}{h}) \tau_b$$

ofwel

$$\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \frac{u_b^*}{\sqrt{1 - (z/h)}} \quad (D6)$$

Hierin is u_b^* de schuifspanningssnelheid aan de bodem. Substitutie van (D1), (D4) en (D6) in (D3) levert:

$$\begin{aligned} A c^2 + \kappa z u_b^* \frac{dc}{dz} &= 0 \\ - \frac{dc}{c^2} &= \frac{A}{\kappa u_b^*} \frac{dz}{z} \\ \frac{1}{c} &= \frac{A}{\kappa u_b^*} \ln z + \text{constante} \end{aligned} \quad (D7)$$

ofwel (na invullen van de adequate integratie constante):

$$\frac{c}{c_b} = \frac{1}{1 + \frac{A c_b}{\kappa u_b^*} \ln \frac{z}{z_b}} \quad (D8)$$

(voor $c_b < 10^{-2}$; $c < c_b$)

Hierin is c_b de (bodem-)concentratie op de hoogte z_b en $A c_b$ de valsnelheid w_b ter plaatse, volgens (D1).

In figuur D1 is $(z/z_b) w_b / \kappa u_b^*$ op de logaritmische schaal uitgezet tegen c/c_b . Bij de aangegeven waarden ($c_b < 10^{-2}$) is w_b volgens (D1) en (D2) maximaal 1,8 mm/s en $w/\kappa u_b^*$ dientengevolge van de orde van grootte 0,1. Aan de rechterzijde van de verticale as is de verhouding z/z_b weergegeven voor het geval $w/\kappa u_b^* = 0,1$ is.

Uit figuur D1 blijkt dus, dat ook als men de valsnelheid afhankelijk van de concentratie kiest een vrij "vlakke" concentratievertikaal ontstaat, zolang men zich op de "opgaande tak" van de kromme van figuur 20 bevindt.

De hierboven genoemde redenering zou kunnen worden uitgebreid, door in plaats van (D1) uit te gaan van de vergelijking

$$w = A' \cdot c e^{-Bc} \quad (D1')$$

Dit geeft een benadering voor de gehele kromme, gegeven in figuur 20. De tijd heeft echter tot nu toe ontbroken, de snelheidsvertikaal te berekenen, die daarmee ontstaat.

LITERATUUROPGAVE

- [1] ir. W.T. Bakker
Het huidige slibgehalte en slibtransport in het oostelijk deel van de Westerschelde.
Tweede bericht.
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Studiedienst Vlissingen, Memo 75.10.
- [2] ir. E.P. Kooiker
Het slibgehalte in het oostelijk deel der Westerschelde. Eerste bericht.
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Studiedienst Vlissingen, Memo 75.8.
- [3] J. Schaart
Instationaire zand- en slibtransportberekening in het Noordelijk Bekken van de Westerschelde.
Technische Hogeschool, Vakgroep Kustwaterbouwkunde, Afstudeeronderzoek (juni 1976).
- [4] ir. W.T. Bakker en J. Schaart
Berekening van zand- en slibconcentraties in getijstroom.
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Studiedienst Vlissingen. Memo Vl.76.2 (februari 1976).
- [5] A. Landman
Omleiding rivier de Eems in het Eems/Dollard estuarium en veranderingen in het stationaire slibtransport.
Technische Hogeschool, Vakgroep Kustwaterbouwkunde, Afstudeeronderzoek (oktober 1979).
- [6] P.R. Beijl
Bepaling van de nauwkeurigheid van zandtransportberekeningen met de methode Bijker-Einstein in de Westerschelde.
Technische Hogeschool, Vakgroep Kustwaterbouwkunde, Afstudeeronderzoek.
- [7] S. Boer
Numeriek model voor de berekening van snelheidsvertikalen in gebag-gerde sleuven.
Technische Hogeschool, Vakgroep Kustwaterbouwkunde, Afstudeeronderzoek (augustus 1979).
- [8] J.T.M. van de Sande
Een berekeningsmodel voor de bepaling van het suspensietransport en de sedimentatie in een gebaggerde sleuf.
Technische Hogeschool, Vakgroep Kustwaterbouwkunde, Afstudeeronderzoek (nog niet gepubliceerd; een vooronderzoek van de betreffende studie werd vastgelegd in notitie TH-KW-81.1).
- [9] C. Migniot
Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques.
La Houille Blanche, 23, no. 7 (1968).
- [10] ir. P.G.J. Davis, dr. W. Salomons, ir. W.D. Eijsink en ir. J.H. de Reus
Vooronderzoek betreffende flocculatie, sedimentatie, consolidatie en erosie.
Verslag literatuuronderzoek.
Waterloopkundig Laboratorium, R988 (november 1976).
- [11] M.W. Owen
The effect of turbulence on the settling velocities of silt flocs.
Proceedings 14th Congress of IAHR, Paris, 1971.
- [12] ir. W.T. Bakker
Uitwisseling van opgeloste of gesuspendeerde stof tussen een haven en een getijrivier.
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Adviesdienst Vlissingen (in voorbereiding).
- [13] ing. D.C. van Maldegem
Aanslibbing bouwdok Westerschelde Oever Verbinding.
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Adviesdienst Vlissingen, Nota WWKZ-82V.004.
- [14] ir. W.T. Bakker
Analytische berekeningen omtrent de aanzanding van tunnelsleuven.
Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Adviesdienst Vlissingen (in voorbereiding).

