

HET MECHANISCH GEDRAG VAN SLIB IN ESTUARIA

dr. ir. E.A. TOORMAN
Aangesteld Navorser, N.F.W.O.
Katholieke Universiteit Leuven
Laboratorium voor Hydraulica

The mechanical behaviour of estuarine mud

Estuarine mud is a concentrated suspension in water of mainly cohesive sediment, some organic matter and a smaller fraction of coarser, non-cohesive sediment (silt and sand). The mechanical behaviour of cohesive sediment suspensions is determined by its concentration and the resultant force of gravity, hydrodynamic, thermodynamic and interparticle forces on the particles. A review is given of the different transport processes for cohesive sediment. Even though many processes have been extensively studied,

computer simulations so far have been unsuccessful. In order to overcome limitations in experimental studies in the laboratory as well as in the field, a general numerical 2DV model is introduced as an engineering research tool. As an illustration of the possibilities of such a global model, results are presented of the settling and consolidation of a mixture of cohesive sediment and sand, as well as of the pumping of mud from a mud capture reservoir.

1. INLEIDING

1.1. Slib in estuaria

Slib uit een estuarium (het mondingsgebied van een rivier in zee) is een suspensie met een hoge concentratie aan overwegend cohesief sediment. Dit sediment, dat voornamelijk door de rivier wordt aangevoerd, bestaat uit klei- en andere mineralen en organisch materiaal, welke alle colloïdale deeltjes zijn (deeltjesgrootte $d < 2 \mu\text{m}$). Deze deeltjes zijn *cohesief* omdat ze onder bepaalde omstandigheden samenklonteren (zie § 2.2). Het sediment bevat vaak een kleine fractie zand ($d > 60 \mu\text{m}$) en silt ($2 < d < 60 \mu\text{m}$). De aanwezigheid van de grote hoeveelheid fijne sedimentdeeltjes in estuaria komt doordat enkel de kleinste deeltjes zover door een rivier kunnen worden meegevoerd vanwege hun geringe bezinkingsnelheid. Deze deeltjes kunnen uiteindelijk wel bezinken in een estuarium vanwege de snelle daling van de transportcapaciteit van het water ten gevolge van de verbreding van de riviermond en de getijdenwerking.

1.2. Onderzoek in cohesief-sedimenttransport

Het voorspellen van sedimenttransport is van groot belang voor tal van disciplines: sedimentologie, waterbouwkunde, oceanografie, ecologie, scheikunde, en andere. Het modelleren ervan is tot heden een van de grootste uitdagingen voor ingenieurs. Dit kan het best geïllustreerd worden door het feit dat men

van een "goed" model spreekt wanneer het sedimentconcentraties tot op een factor twee na kan voorspellen. De oorzaken van de grote fouten worden toegelicht in § 3.1.

Het colloïdaal karakter van cohesief sediment maakt dat het probleem voor dit sediment nog veel groter is, aangezien er nog meer en complexere processen een rol spelen dan bij niet-cohesief sediment (zoals zand). De studie van cohesief sediment begon pas goed op gang te komen in de jaren zestig. De pioniers waren *Krone* (1962), *Partheniades* (1962) en *Migniot* (1968). Vooral de laatste decade is dit onderzoeksterrein in een stroomversnelling geraakt. In 1982 begon het laboratorium voor Hydraulica van de K.U. Leuven met onderzoek naar het mechanisch gedrag van havenslib (o.a. *Berlamont & Van Goethem*, 1984). Voor transport kan worden gemodelleerd, moet men een goed inzicht hebben in de verschillende mechanismen, die nauw met elkaar interageren. Een van de redenen van de problemen van transportmodellen is het ontkoppelen van de verschillende zaken. Numerieke modellen, wanneer volledig, kunnen helpen bij de fundamentele studie van processen. Dit wordt geïllustreerd a.d.h.v. enkele voorbeelden (diffusie in het consolidatiemodel, kalibratie van het reologisch model).

2. SEDIMENTTRANSPORTPROCESSEN

De verplaatsing van sedimentdeeltjes in het suspenderende medium water is een ge-

volg van de resultante van verschillende krachten die erop worden uitgeoefend. De sedimentdeeltjes zijn onderhevig aan graviteit, hydrodynamische en thermodynamische krachten en krachten tussen de deeltjes.

2.1. Hydrodynamische actie

De hydrodynamische krachten zijn de liftkracht en de stromingsweerstand. Wanneer er geen externe krachten aangrijpen op de deeltjes worden ze door wrijving met het omringende water meegesleurd (*advectie*). Ten gevolge van externe krachten ontstaat er echter een relatief snelheidsverschil tussen water en sediment. De stromingsweerstand (Engels: *drag*) drukt het verschil uit tussen deze twee krachten.

De liftkracht is het gevolg van een drukverschil dat geïnduceerd wordt door een snelheidsgradiënt. Het is deze kracht die de deeltjes in suspensie kan houden wanneer ze de graviteit domineert. De snelheidsgradiënt aan de bodem is het grootst door de wrijving. Deeltjes in deze zone kunnen hierdoor terug in suspensie worden gebracht (*resuspensie*).

De meeste natuurlijke stromingen van water zijn turbulent. Ten gevolge van turbulentie zijn de deeltjes onderhevig aan stochastische fluctuaties van beide hydrodynamische krachten, waardoor ze verspreid worden over de hele waterkolom. Dit heet *turbulente diffusie*. Turbulentie levert dus een belangrijke bijdrage tot de resuspensie van sediment.

2.2. Aggregatie

Thermodynamische krachten en deeltjeskrachten hebben enkel een grote invloed op de beweging van de colloïdale deeltjes. Wanneer deze deeltjes botsen (of voldoende dicht bij elkaar komen), als een gevolg van Brownse beweging (een gevolg van de thermische beweging van de watermoleculen) of door hydrostatische krachten (snelheidsgradiënten in de stroming of differentieële bezinking), zullen ze samenklonteren ten gevolge van de onderlinge deeltjeskrachten. De deeltjeskrachten zijn de aantrekkende Van-der-Waalskracht en de afstotende of aantrekkende elektrostatische krachten die een gevolg zijn van de elektrische dubbellaagstructuur van de plaatvormige kleimineraaldeeltjes. Door dit coaguleren worden sterke, compacte aggregaten gevormd die op hun beurt zwakkere vlokken kunnen vormen. Vlokvorming wordt in estuaria, waar zoet rivier- en zout zeewater mengen, op natuurlijke wijze bevorderd door het zoutgehalte en de aanwezigheid van organisch materiaal en organismen (zoals bacteriën) in het water. De aanwezigheid van de zoutionen verhoogt de elektrostatische aantrekkingskracht. Zoutwater-vlokken zijn doorgaans compacter en sterker dan vlokken gevormd in zoet water. Hierdoor is slib in estuaria moeilijker erodeerbaar. Ook het organische materiaal zorgt voor sterkere bindingen tussen vlokdeeltjes.

2.3. Sedimentatie

Wanneer de zwaartekracht overheeft, zullen de deeltjes (zowel individuele deeltjes als vlokken) bezinken en uiteindelijk op de bodem terecht komen, waar ze opgestapeld worden. De bezinkingsnelheid van vlokken is doorgaans groter dan van individuele deeltjes vanwege hun groter gewicht. Ten gevolge van de niet-homogene korrelverdeling zullen deeltjes met verschillende snelheden, naar gelang van hun grootte en dichtheid, bezinken. Dit heet **differentieële bezinking**. Hun val wordt geremd door het opwaarts stromend water, dat verplaatst wordt door de bezinkende sedimentdeeltjes en door botsing met andere deeltjes. Door hun open structuur ondervinden vlokken wel een grotere stromingsweerstand. De bezinkingsnelheid neemt dus af wanneer de deeltjesconcentratie toeneemt. Door de botsingen zullen de zwakste vlokken weer opbreken in kleinere, maar sterkere vlokjes of aggregaten. Deze gehinderde bezinking begint reeds bij een concentratie van 10 g/l. Door afstotende deeltjeskrachten zullen de vlokken niet direct tegen elkaar komen. Eerst zal een zich vloeibaar gedragende sliblaag ontstaan. Zodra een kritische concentratie overschreden wordt, worden de deeltjes gedwongen tegen elkaar te komen. Door de open structuur van de vlokken zal een kaartenhuisachtig netwerk ontstaan, wat ook wel een **gel** wordt genoemd, dat langzaam onder zijn eigen gewicht inzakt. Dit proces heet **consolidatie**. Dit inzakken wordt vertraagd doordat het water in de samengedrukte poriën er steeds moeilijker uit kan stromen. Het slib gedraagt zich dan als

een consoliderende gesatureerde kleigrond. Door de stroming van poriënwater is de druk ervan hoger dan de hydrostatische druk. Deze overdruk draagt een deel van het gewicht van het grondskelet. Het deel dat de structuur zelf draagt is de **effectieve of korrelspanning**. Deze kan experimenteel bekomen worden door het verschil te nemen tussen het totale gewicht, berekend uit de integratie van een gemeten dichtheitsprofiel, en de gemeten poriëndruk. Aangezien slib zich kan gedragen als een vloeistof en als een gestructureerde bodem bij dezelfde dichtheid, kan vloeibaar slib niet worden gekenmerkt als een sterk geconcentreerde suspensie met een bepaalde boven- en ondergrens voor de concentratie. Nochtans wordt in deze tekst met vloeibaar slib bedoeld het slib met een concentratie boven het gelpunt, maar waarin de structuur gebroken is. De waarde van de volumeconcentratie waar een netwerkstructuur ontstaat varieert van 3 tot 8% voor natuurlijk slib. Aangezien de korrelspanning nul is wanneer slib nog een suspensie is en stijgt met toenemende structuurvorming, kan deze parameter gebruikt worden om te bepalen wanneer een sliblaag al dan niet vloeibaar is. Tot nog toe werd onvoldoende onderzoek verricht om de effectieve spanning uit te drukken in functie van andere parameters, behalve dichtheid. Een toename met dichtheid lijkt logisch en wordt experimenteel vastgesteld, maar dat blijkt niet voldoende te zijn. Het herstel van de structuur, nadat deze gebroken werd door liquefactie of fluïdizatie, gebeurt sneller dan de dichtheitsaanname en wel initieel aan een constante snelheid.

2.4. Fluïdizatie, liquefactie, erosie en graviteitsstroming

Door het ontstaan van een structuur krijgt het slib een zekere weerstand tegen verplaatsing. Deze moet overwonnen worden om het slib te doen vloeien of in resuspensie te brengen. Hiervoor zijn twee mechanismen bekend. Dit kan gebeuren ten eerste door de toename van de poriëndruk ten gevolge van poriënwaterstroming. Dit heet **fluïdizatie** en kan een gevolg zijn van een oscillerend drukveld, veroorzaakt door golven aan het wateroppervlak (Ross & Metha, 1991).

Bij **liquefactie** wordt de structuur gebroken doordat de schuifspanning (het produkt van viscositeit en snelheidsgradiënt) de rigiditeit (of bezwijkspanning) van het slib, een kritische spanning die een maat is van de sterkte van de structuur, overschrijdt. Liquefactie kan optreden aan het oppervlak ten gevolge van de sterke snelheidsgradiënt in de grenslaag van het overstromend water. De liftkracht is dus het grootst waar het water over een sliblaag schuurt. De grenslaag is tevens de bron voor de produktie van turbulentie. In het geval van liquefactie of fluïdizatie kunnen daardoor zekere hoeveelheden sediment gelijktijdig terug in suspensie worden gebracht (**bulkerosie**) (Maa, 1986). Wanneer de structuur sterk genoeg is kan de schuifspanning in het water toch nog groot genoeg zijn om deeltjes van het sliboppervlak los te rukken (**oppervlakteërosie**).

Door een toename aan concentratie gesuspendeerd sediment neemt de viscositeit van de suspensie toe en wordt de turbulentie gedempt vanwege de dominantie van de deeltjeskrachten. Hierdoor ontstaan zogenaamde **turbiditeitslagen**, waarin een evenwicht bestaat tussen sedimentatie en turbulente resuspensie (Wolanski et al., 1988).

Wanneer er een horizontale dichtheitsgradiënt aanwezig is in een vloeibare sliblaag is er een horizontale drukgradiënt ten gevolge van een verschil in hydrostatische druk. Hierdoor zal het slib gaan stromen. Zo zijn **graviteitsstromingen** het gevolg van een niet horizontale interface tussen water en slib. Graviteitsstromingen treden op onder verschillende omstandigheden. Sedimentatie op een schuine helling geeft er aanleiding toe (Ali et al., 1991). Ze ontstaan vaak na bulkerosie doordat plaatselijk een geconcentreerde sedimentwolk bezinkt (Foto 1), zelfs op een horizontale bodem (Migniot, 1968). Een geconsolideerde sliblaag waarvan de structuur breekt bijvoorbeeld door een aardbeving (Kuenen, 1952) zal ook beginnen stromen. Wanneer een navigatiekanaal wordt uitgebaggerd kunnen de slibwanden ervan bezwijken en het kanaal zal gedeeltelijk terug met slib worden gevuld. Door de visceuze schuifspanningen die ontstaan door stroming zal de structuur van het materiaal nog verder worden afgebroken, waardoor de viscositeit afneemt.

Deze fenomenen zijn van groot belang in estuaria want het is de enig mogelijke verklaring van de geconstateerde snelle verplaatsing van slib. Met name na een storm treden grote verschuivingen van sliblagen op. Men vermoedt dat een sliblaag gefluïdiseerd wordt door een oscillerende poriëndruk ten gevolge van de golven aan het wateroppervlak. Gewone sedimenttransportmodellen houden met slibstroming geen rekening.

3. INTEGRALE MODELLERING VAN SEDIMENTTRANSPORT

3.1. Een integrale benadering

Hoewel de verschillende processen voor het cohesief-sedimenttransport redelijk goed gekend en begrepen zijn, slaagt men er nog steeds niet in om de verplaatsing van sediment voldoende nauwkeurig te kunnen voorspellen. Hiervoor zijn er twee belangrijke redenen. Ten eerste vergt een gedetailleerde modellering een enorm grote reken capaciteit, ver buiten de limieten van de huidige computers. Om die reden beperken traditionele modellen voor de voorspelling van sedimenttransport in gebieden zoals estuaria, zich noodgedwongen tot 2-dimensionale horizontale simulatie, waarbij alle grootheden over de diepte worden uitgemiddeld. Hierdoor kan men geen rekening houden met de verschillende processen die zich verticaal afspelen. In deze modellen bevindt het sedimentbed zich buiten het rekendomein. Erosie, depositie en consolidatie moeten dan door middel van randvoorwaarden worden beschreven. Het is echter niet evident te kunnen beslissen waar de bodem begint, want de interface tussen water en slib kan heel onduidelijk zijn.

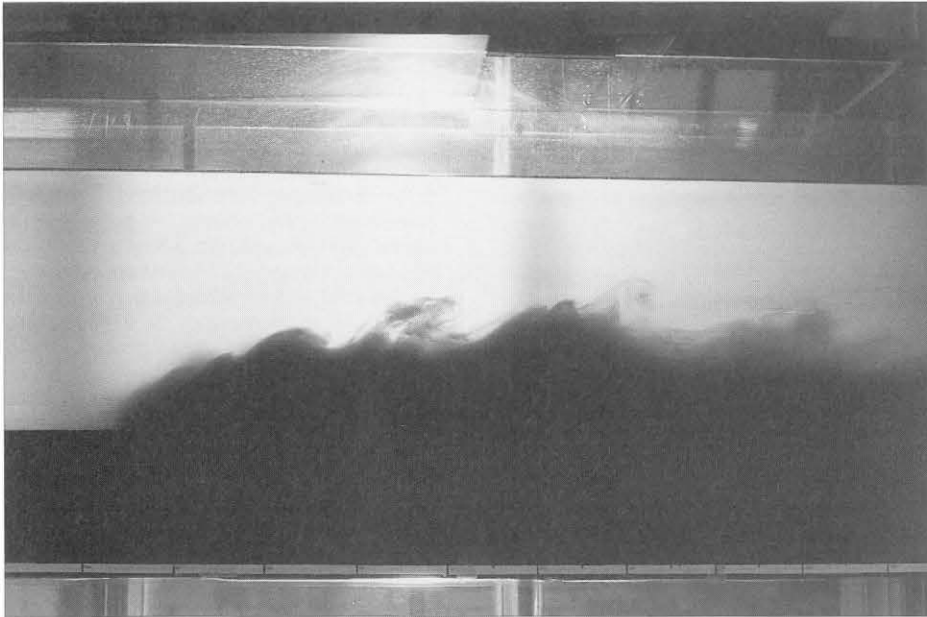


Foto 1: Graviteitsstroming over een weinig hellende slijbbodem veroorzaakt door het bezinken van een wolk cohesief sediment.

Daarenboven is er nog een tweede probleem dat, zelfs al werkte men in 3D, er echter zoveel verscheidenheid en interactie is dat het modelleren van de processen nog maar heel beperkt resultaat heeft opgeleverd. Veel processen werden experimenteel bestudeerd, maar leverden vaak andere resultaten op dan in het veld. Dit is een gevolg van het effect van schaalfactoren, verstoring of het niet kunnen reproduceren van de originele bedstructuur of het gebruik van zuiver klei in plaats van natuurslib.

Om die reden kan een algemeen 2D verticaal model een heel bruikbaar onderzoekswerktuig zijn voor de fundamentele studie van transportprocessen in een verticaal vlak, waarbij de bezonken slijblaag binnen het reken domein wordt behouden. Hiertoe is een interdisciplinaire aanpak vereist. Het grote voordeel hiervan is dat de samenhang tussen de verschillende sedimenttransportprocessen en consolidatie duidelijker wordt. Zo'n model werd ontwikkeld in het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U. Leuven in het kader van onderzoek naar het consolidatie en stromingsgedrag van slib (Toorman, 1992).

3.2. Basisvergelijkingen

Een suspensie van sediment in water is een twee-fasen systeem. Het volledige gedrag van dit systeem wordt beschreven door de behoudsvergelijkingen (behoud van massa en momentum) voor iedere fase. Een eerste mogelijke aanpak is de rechtstreekse oplossing van deze vergelijkingen (Teisson *et al.*, 1992). Dit vereist een goede beschrijving van de interactie (momentumtransfer) tussen de fasen onderling, die echter zeer moeilijk te modelleren is.

De tweede optie is een macroscopische benadering waarbij de suspensie als een eenfasig fluïdum met variabele materiaaleigenschappen (densiteit en viscositeit) wordt beschouwd. Aangezien elke fase, water en sediment, onsamendrukbaar is, kan het be-
wezen worden (Toorman, 1992) dat de

massabalansvergelijkingen voor elke fase dan kunnen vervangen worden door de sedimenttransportvergelijking (Vgl. 3) en de continuïteitsvergelijking voor de gemiddelde stromingssnelheid van het mengsel (Vgl. 1). De continuïteit is geldig omdat de suspensie onsamendrukbaar is, hoewel de gemiddelde densiteit kan variëren. De sedimenttransportvergelijking drukt uit dat de verandering van de densiteit in een punt het resultaat is van een netto sedimentflux.

Deze eenfasige benadering heeft het voordeel dat de processen macroscopisch eenvoudiger experimenteel te bestuderen zijn dan microscopisch. De snelheden en de drukverdeling worden bekomen door de hydrodynamische vergelijkingen (continuïteit en Navier-Stokes, Vgl. 2). De momentumvergelijkingen voor de suspensie zijn eigenlijk de som van de bewegingsvergelijkingen van de twee fasen. De hier geformuleerde momentumvergelijkingen (Vgl. 2) zijn *veralgemeende Navier-Stokesvergelijkingen*, omdat de viscositeit en de densiteit geen constanten zijn, waardoor er extra termen voorkomen. Ze zijn sterk niet-lineair vanwege de convectieterm en in het bijzonder de visceuze termen, aangezien voor een niet-Newtoniaanse vloeistof de viscositeit een functie is van de vervormingssnelheidsgraad $\dot{\gamma}$ (de tweede invariant van de vervormingssnelheidstensor; Crochet *et al.*, 1984).

Ten gevolge van een niet-constante densiteit verschijnt er een extra term in de Navier-Stokes vergelijking (laatste term in het linker lid). Deze term beschrijft de momentumuitwisseling, geassocieerd met de verandering van de densiteit in een punt ten gevolge van een sedimentflux, die vaak niet verwaarloosbaar is. Bijvoorbeeld de resuspensie ten gevolge van bulkerosie brengt sediment van de bodem terug in de stroming. De densiteitsverandering van de waterlaag heeft in dit geval een remmende werking en een demping van de turbulentie ten gevolg.

Deze benadering is de veralgemeende aanpak van sedimenttransportmodellering. De

Algemene basisvergelijkingen (Toorman, 1992)

Continuïteit:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

Veralgemeende Navier-Stokes vergelijking (behoud van momentum):

$$\frac{d(\rho u_i)}{dt} = \rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \frac{d\rho}{dt} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \mu}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

Sedimenttransportvergelijking (behoud van massa):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} - \frac{\partial S_j}{\partial x_j} = \frac{\partial v_j C}{\partial x_j} \quad (3)$$

waarin:

u	= gemiddelde snelheid van de suspensie
v	= relatieve snelheid van de sedimentdeeltjes t.o.v. u
p	= druk
ρ	= densiteit van de suspensie
C	= sedimentconcentratie (evenredig met $\rho - \rho_{\text{water}}$)
S	= (relatieve) sedimentflux = vC
μ	= dynamische viscositeit van de suspensie + eddy-viscositeit
t	= tijd
x	= plaatscoördinaat
j	= sommatie-index over de ruimtelijke dimensies

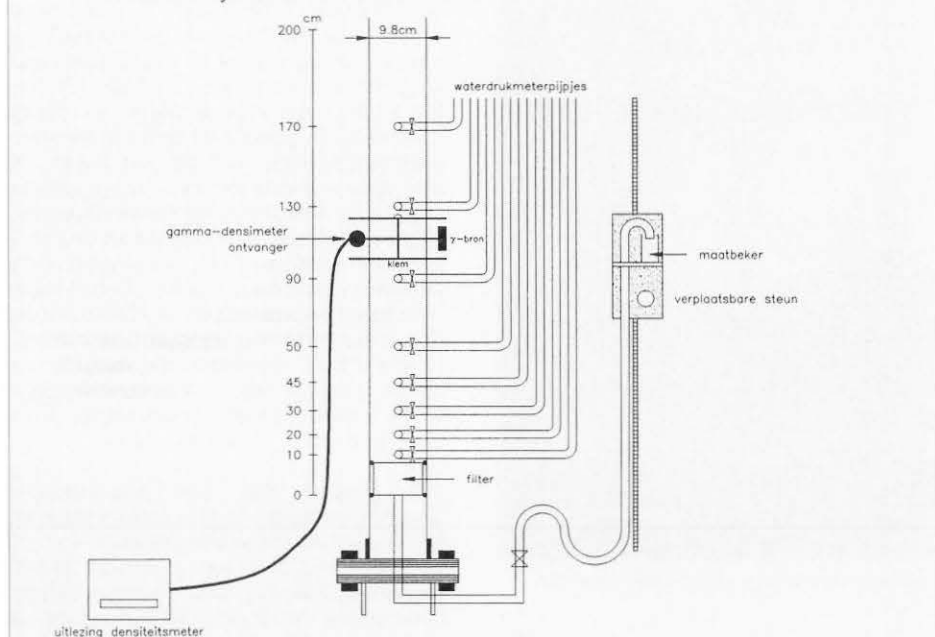
Kinematische voorwaarde voor een vrij oppervlak (§ 5.2):

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u_x \frac{\partial n}{\partial x} + u_y \frac{\partial n}{\partial y} = U_z \quad (4)$$

waarin:

x, y	= horizontale coördinaten
z	= verticale coördinaat
n	= verticale verplaatsing van het vrij oppervlak in (x, y)

Fig. 1: Schematische voorstelling van de experimentele opstelling voor consolidatieproeven in het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven.



klassieke methodes blijken bijzondere (vereenvoudigde) gevallen hiervan te zijn. Wanneer sedimenttransportprocessen in een verticaal vlak worden bestudeerd, dan is deze veralgemeende benadering wel het interessantste. Ze laat toe de sliblaag in het oplossingsdomein op te nemen, waardoor gecombineerde processen kunnen worden bestudeerd. Om de niet-lineaire partiële differentiaalvergelijkingen (1-3) op te lossen werd een eindige-elementenprogramma ontwikkeld (Toorman, 1992). Het EE-programma "FENS" kan gecombineerde problemen van niet-Newtoniaanse stromingen en sedimenttransport oplossen en werd modulair opgebouwd zodanig dat een grote waaier aan stromingsproblemen kunnen worden opgelost. Enkele resultaten worden verderop besproken.

3.3. Bepaling van de sedimentflux

De dichtheitsvariatie wordt bekomen als de oplossing van de sedimenttransportvergelijking. Zoals de momentumvergelijkingen voor de suspensie dienen om de stromingssnelheid (u) te bekomen, kunnen de momentumvergelijkingen voor de sedimentdeeltjes, die eigenlijk een krachtenevenwicht uitdrukken, gebruikt worden om de sedimentsnelheid (v) te berekenen. In de praktijk lost men een vereenvoudigde vorm op, waarin inertie wordt verwaarloosd en al de andere bijdragen empirisch worden benaderd. Op deze manier is de informatie, gebruikt in een tweefasen benadering, dan toch volledig gebruikt.

De graviteit op een deeltje wordt tegengewerkt door stromingsweerstand, opwaartse stuwkracht, deeltjeskrachten en diffusieve krachten. De effectieve bezinkingssnelheid v is de resulterende snelheid. De verschillende krachten leveren dus elk hun bijdrage aan een sedimentflux. Ze kunnen samengevat worden door drie soorten termen (Toorman, 1992):

- (1) Bezinkingsflux: $-wC$, met w de bezinkingssnelheid wanneer er geen korrelspanningen optreden;
 - (2) Opwaartse flux door de liftkracht, proportioneel met C en de verticale snelheidsgradiënt;
 - (3) Diffusieve flux, proportioneel met de concentratiegradiënt.
- Meerdere processen kunnen beschreven worden met behulp van een diffusie-term:

- (a) Turbulente diffusie;
- (b) Uit de grondmechanische consolidatietheorie kan men aantonen dat de bijdrage van de korrelspanning in de sedimentmassabalansvergelijking een

diffusief karakter heeft, onder voorwaarde dat ze enkel functie is van de concentratie (Tiller, 1981).

- Ook voor de suspensiefase moet er een diffusie-term worden toegevoegd, al ware het alleen maar om de nodige numerieke stabiliteit te bekomen, vooral in de omgeving van grote dichtheitsgradiënten (zoals de interface tussen water en slib). Er zijn echter fysieke gronden voor de aanwezigheid van diffusieve mechanismen in een suspensie:
- (c) De thermodynamische krachten zijn belangrijk voor colloïdale deeltjes en resulteren in een osmotische druk die op dezelfde wijze als de effectieve spanning in rekening kan worden gebracht (Buscall, 1990);
 - (d) De verplaatsing van water door vallende sedimentdeeltjes remt de bezinking van andere deeltjes of lichtere deeltjes kunnen zelfs opwaarts worden meegeleurd. Uit de stochastische sedimentatietheorie van Torey & Pickard (1985) volgt dat dit mechanisme ook door een diffusie-term kan worden beschreven;
 - (e) Differentiële bezinking doordat verschillende deeltjes ongelijke bezinkingssnelheden hebben.

4. BEZINKING EN CONSOLIDATIE

De studie van sedimentatie van cohesief sediment in water is van groot praktisch belang voor depositie van sediment en consolidatie van sliblagen (navigatiediepte, capaciteit van slibstort). Het voorspellen van de structuur van de sliblaag en de dichtheitsverdeling is van groot belang om de initiële toestand van de sliblaag te kennen voor ze begint te stromen.

De simulatie van sedimentatie in stilstaand water laat toe een formulatie voor de bezinkingsflux te formuleren. De hydrodynamische

Fig. 2: Bezinkingscurve en karakteristieke lijnen (streeplijnen). Het compressiepunt C bevindt zich aan de overgang van (1) naar (2).

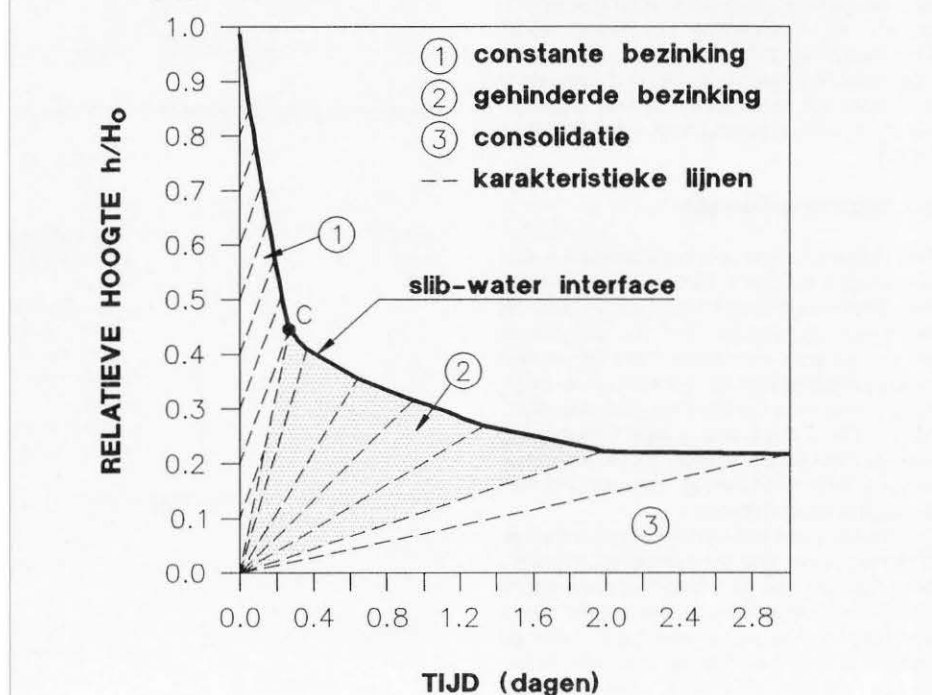
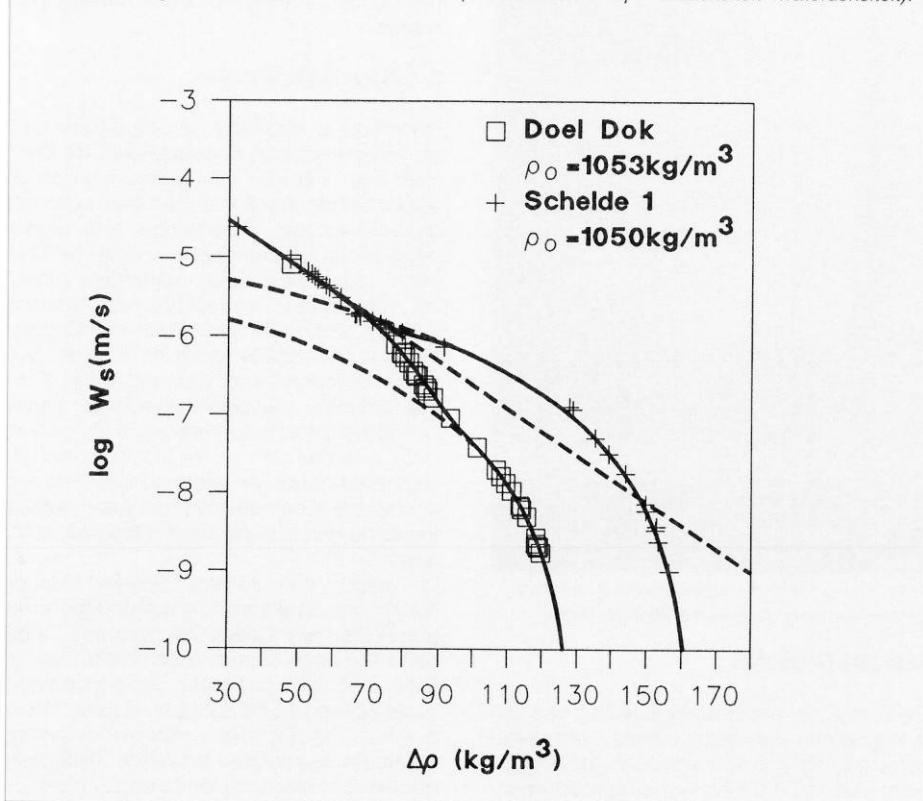


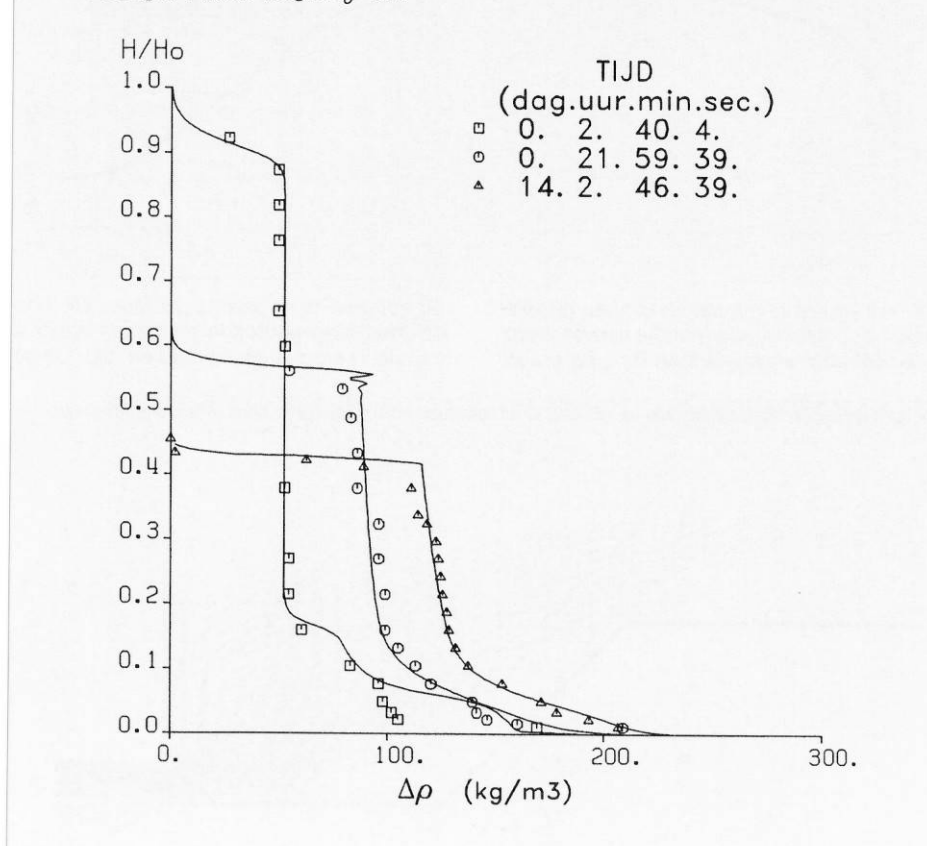
Fig. 3: Bezinkingsnelheid in functie van densiteit (excesdensiteit = $\Delta\rho$ = slibdensiteit - waterdensiteit).



sche vergelijkingen moeten niet worden opgelost omdat de gemiddelde snelheid nul is. Een model dat zowel bezinking als consoli-

datie simuleert, kan bekomen worden door combinatie van de grondmechanische en de colloïd-chemische benadering, waarmee

Fig. 4: Vergelijking tussen gemeten (symbolen) en berekende (lijnen) densiteitsprofielen voor een ongedraineerde consolidatieproef (gesloten bodem) op Scheldeslib met een initiële densiteit van 1053 kg/m^3 . Initiële hoogte $H_0 = 2\text{m}$.



alle diffusieve mechanismen in rekening worden gebracht. Om de theorieën van bezinking en consolidatie te verenigen wordt voorgesteld de permeabiliteit, traditioneel gebruikt in de geotechnische consolidatietheorie, te vervangen door de bezinkingsnelheid omdat ze makkelijker te meten is en ze steeds een eindige waarde heeft.

Bezinking en consolidatie werden experimenteel bestudeerd in bezinkingskolommen (Fig. 1). Op regelmatige tijdstippen werd de densiteit gemeten op meerdere hoogtes van de kolom met een gamma-densiteitsmeter (radioactieve sonde). De data van het niveau van de slib-water interface in functie van de tijd levert de bezinkingscurve (Fig. 2). De bezinkingsnelheid van de interface is de helling van deze curve. Wanneer men veronderstelt dat de bezinkingsflux enkel afhankelijk is van de concentratie, kan een golfkarakter toegeschreven worden aan de sedimentbalansvergelijking (Kynch, 1952). Van deze eigenschap kan men gebruik maken om de densiteit van het slib aan de interface te berekenen. Voor een homogeen materiaal kan men dan de methode van de karakteristieken toepassen, waaruit experimentele data van bezinkingsnelheden in functie van concentratie kunnen worden bekomen uit de experimentele data van een bezinkingscurve. Deze analytische methode werd toegepast op de data van enkele kolomproeven. Het valt op dat in de ligging van de punten in een grafiek van bezinkingsnelheid in functie van concentratie, duidelijk twee curves te onderscheiden (Fig. 3). De eerste komt overeen met gehinderde bezinking in een geconcentreerde suspensie. Dit bezinkingsbedrag kan goed worden voorspeld met een negatief exponentiële functie, wat ook kan bewezen worden met de stochastische sedimentatietheorie van *Torey & Pickard* (1985). Het tweede gedrag verschilt vanwege het overschrijden van het gelpunt en dus is er nu een structuur die het verdere bezinken sterk belemmert. Dit stuk van de data kan beschreven worden door een derde-machts-wet. Meting van de poriëndruk bevestigt dat de overgang overeenkomt met een korrelspanning die verschillend van nul is. Data in de literatuur tonen dat de twee gedragingen tot nog toe nooit werden gescheiden. Hierdoor kunnen echter grote voorspellingsfouten worden gemaakt.

Wanneer de initiële concentratie beneden het gelpunt is, is het noodzakelijk het sediment onder te verdelen in minstens twee fracties, namelijk fijn en grof materiaal. Men kan bijvoorbeeld de scheiding nemen bij een deeltjesgrootte van $60\mu\text{m}$, wat overeenkomt met de grens tussen zand en silt. Bijgevolg is de fijne fractie overwegend cohesief. De grotere, en dus zwaardere deeltjes bezinken sneller dan de fijne. Zolang de concentratie laag genoeg is zullen ze al snel op de bodem liggen. Zodra het cohesief sediment een netwerk structuur opgebouwd heeft, kunnen de grove deeltjes er maar moeilijk tussendoor en blijven ze dus steken tussen het cohesief materiaal. In estuaria vindt men vaak een gelaagde structuur in de sliblaag waarbij een zandlaag door een kleilaag wordt afgewisseld. Men neemt aan dat dit een gevolg is van getijdenwerking. Tot

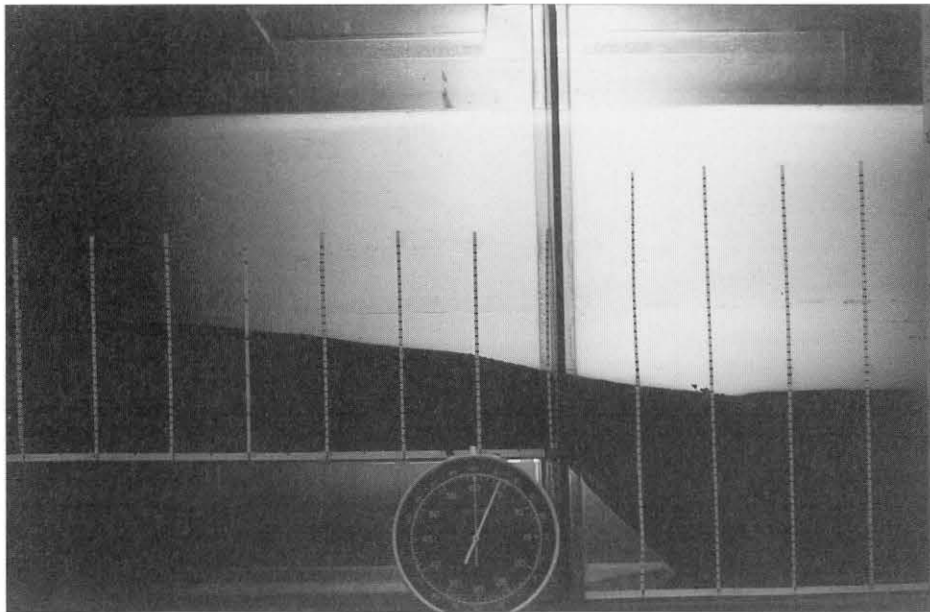


Foto 2: Vervormde sliblaag ($\rho = 1.189 \text{ kg/m}^3$, $\tau_0 = 17 \text{ Pa}$) na 4 minuten pompen (de zuigmond bevindt zich rechtsonder in de verticale wand, cfr. Fig. 6). Schaal: 10 cm tussen verticale markeringsstrepen.

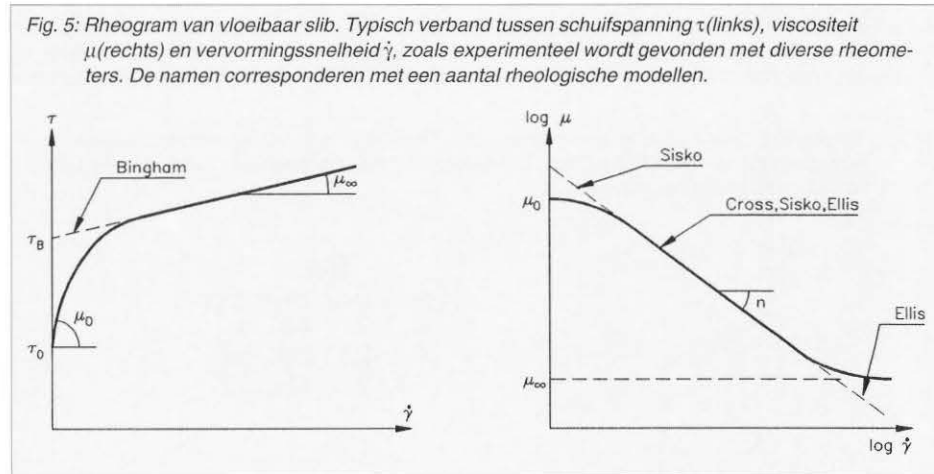
nog toe werd er onvoldoende aandacht besteed aan het effect van zand, en in het bijzonder de kwantitatieve invloed op de bezinkingssnelheid. Uit consolidatieproeven blijkt dat zand de bezinkingssnelheid van ongesegregeerde suspensies verhoogt evenals het gelpunt. Uit densiteitsmetingen blijkt dat de polydispersiteit van het sediment de rechtheid van de karakteristieke lijnen verstoort. Toch blijkt de methode van Kynch bruikbare gegevens te verschaffen.

Figuur 4 toont de berekende evolutie van een densiteitsprofiel in een consolidatie-experiment, vergeleken met gemeten densiteiten. De hoge waarden op de bodem zijn een gevolg van de segregatie van zand.

De voordelen van dit model zijn meervoudig. Klassieke consolidatiemodellen lossen de poriënwaterstroming op met een grondwaterstromingsmodel. Deze grondmechanische modellen voor de consolidatie van gesatueerde bodems beschrijven alleen de tweede fase. Het overslaan van de bezinkingsfase levert het probleem van de vaak onbekende begintoestand. Het nieuwe model kan de sedimentatie van mengsels van zand en klei simuleren.

5. SLIBSTROMING

De studie van het stromingsgedrag van slib is niet alleen van groot belang voor graviteitsstroming (§ 2.4), maar ook voor het ontwerp van de uitrusting van baggerschepen.



Om de stroming van slib te kunnen berekenen, heeft men een formulatie van de viscositeit (of stromingsweerstand) nodig om de

momentumvergelijking op te lossen. De studie van de viscositeit is onderwerp van rheologie.

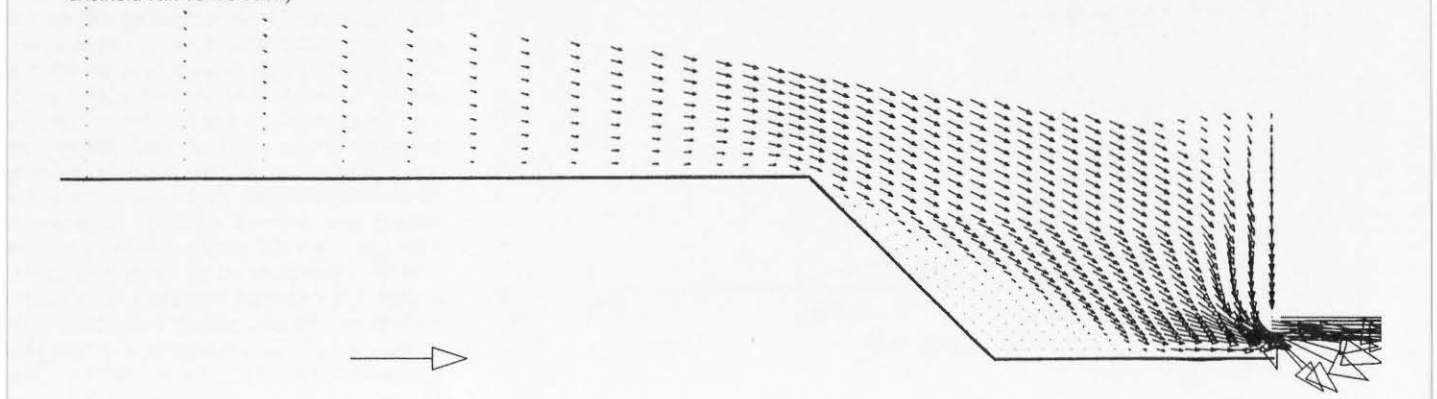
5.1. Rheologie van slib

Rheologie is de studie van de stroming en de vervorming van een materiaal. De rheologie van slib kan bestudeerd worden op verschillende manieren. Een conventionele studie van een eenvoudige afschuifstroming in een concentrische cilinder- (of Couette-) viscositeitsmeter (stroming tussen een roterende en een stilstaande concentrische cilinder) toont aan dat slib een thixotrope, viscoplastische vloeistof is. Een typische vloeicurve wordt getoond in Fig. 5. Bij toenemende vervormingssnelheid neemt de viscositeit van de suspensie af; met andere woorden slib wordt vloeibaarder. De viscositeit neemt toe met een toename aan concentratie en neemt af met een relatieve toename aan niet-cohesief materiaal, zoals zand.

Dit gedrag kan worden uitgelegd aan de hand van structurele veranderingen die plaats hebben tijdens de stroming. Vaak heeft het bestudeerde slibmonster een zekere structuur (wanneer de concentratie hoog genoeg is, dit is bij een volume fractie $\phi > \text{ca. } 5\%$). Er is een minimum spanning nodig om de structuur te breken. Tijdens de gedwongen stroming wordt deze geleidelijk

afgebroken door interne wrijving. De hoeveelheid aan gebroken bindingen hangt af van de vervormingssnelheid en -tijd. Dit ge-

Fig. 6: Berekende snelheidsvectoren en vorm van de sliblaag, overeenkomstig de situatie van Foto 2. (Het apart staande pijltje dient als referentie en stelt een snelheid van 1 cm/s voor.)



drag heet *thixotropie*. Wanneer de rotatiesnelheid constant wordt gehouden neemt de schuifspanning (gemeten aan de cilinderwand) geleidelijk af volgens een exponentieel verloop. Dit toont aan dat de structuur verder verbroken wordt. Het duurt lang vooraleer evenwicht wordt bereikt (meer dan 2 uur voor een slib met densiteit $\rho = 1189 \text{ kg/m}^3$). Door de waarnemingen wordt gesuggereerd dat bepaalde vlokagregaten lange tijd in stand blijven, met name voor de bestudeerde vervormingssnelheden die tot maximaal 20 s^{-1} gingen.

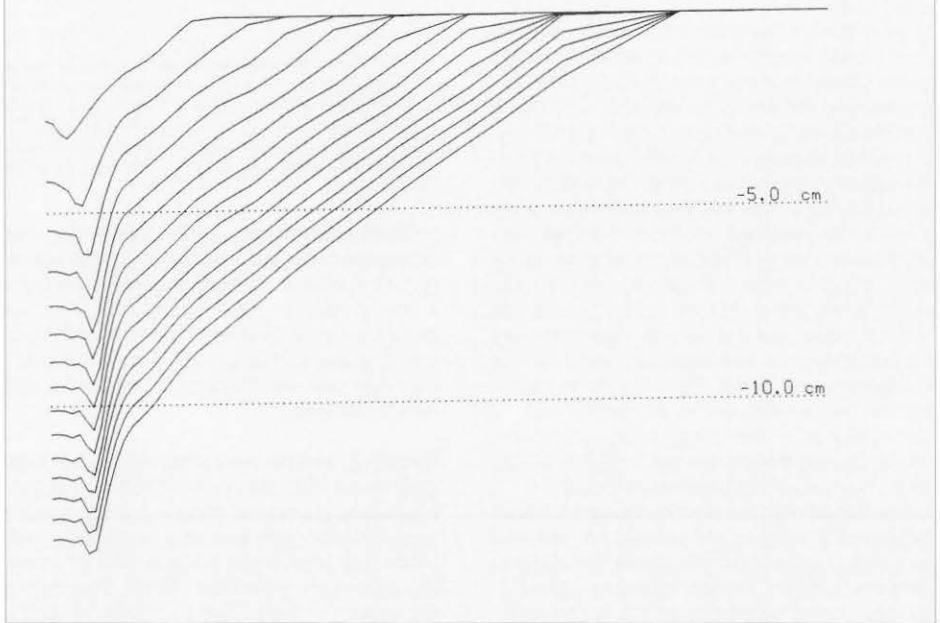
Het herstel van de structuur duurt vaak heel lang, vooral voor natuurlijke cohesieve suspensies. Men hoeft hier dan geen rekening mee te houden in het rheologisch model wanneer het slib onderhevig is aan stroming. Wanneer de schuifspanning beneden de zwichtspanning blijft moet slib beschreven worden als een soort viscoelastisch materiaal.

Voor cohesief sediment heeft men vaak genoeg genomen met een beschrijving van slib als een Bingham-vloeistof. Dit volstond voor de simulatie van eenvoudige een-dimensionale stromingsproblemen. Door andere onderzoekers werd veel aandacht besteed aan het bepalen van de rigiditeit omdat ze als karakteristieke parameter wordt beschouwd voor de bepaling van de kritische schuifspanning voor erosie. De zwichtspanning kan op verschillende manieren worden bepaald. Het blijkt dat weinig rekening wordt gehouden met de structurele geschiedenis van het onderzochte slibmonster. De verschillende methoden kunnen enkel worden vergeleken voor een materiaal in evenwicht. Voor de praktijk is dat echter een groot probleem want men wil de zwichtspanning kennen van het materiaal met zijn initiële structuur. In de meeste methoden wordt een deel ervan reeds verbroken voordat de meting kan worden uitgevoerd.

Verschiede semi-empirische rheologische modellen zijn in de loop der tijd voorgesteld geweest voor slib. Voor grote vervormingssnelheden is het eenvoudige Binghammodel bruikbaar. Voor sedimentologische toepassingen lijkt de range beneden ca. 50 s^{-1} het belangrijkste. Het Binghammodel kan dan gecorrigeerd (d.i. uitgebreid) worden op verschillende wijzen. De invloed van de concentratie wordt doorgaans met een eenvoudige machtswet in rekening gebracht. Er is echter nog altijd geen duidelijkheid over het al dan niet bestaan van een reële bezwijkspanning. Daarboven wordt bij de omrekening van rheometrische meetgegevens onvoldoende rekening gehouden met correcties die zouden moeten worden doorgevoerd ten gevolge van het werkelijk niet-Newtoniaans karakter.

Op het eerste gezicht lijkt het erop dat het rheologisch model kan worden gekalibreerd aan de hand van metingen met rotationele viscositeitsmeters. Er zijn echter serieuze problemen met de interpretatie van de resultaten, met name voor lage vervormingssnelheden. Deze zijn echter wel van groot

Fig. 7: Evolutie van de vorm van het sliboppervlak gedurende 15 minuten pompen uit het centrum van een 12 m lang kanaal. ($\rho = 1.140 \text{ kg/m}^3, \tau_0 = 9 \text{ Pa}$) (Vervormde schaal: lengte = 5 m)

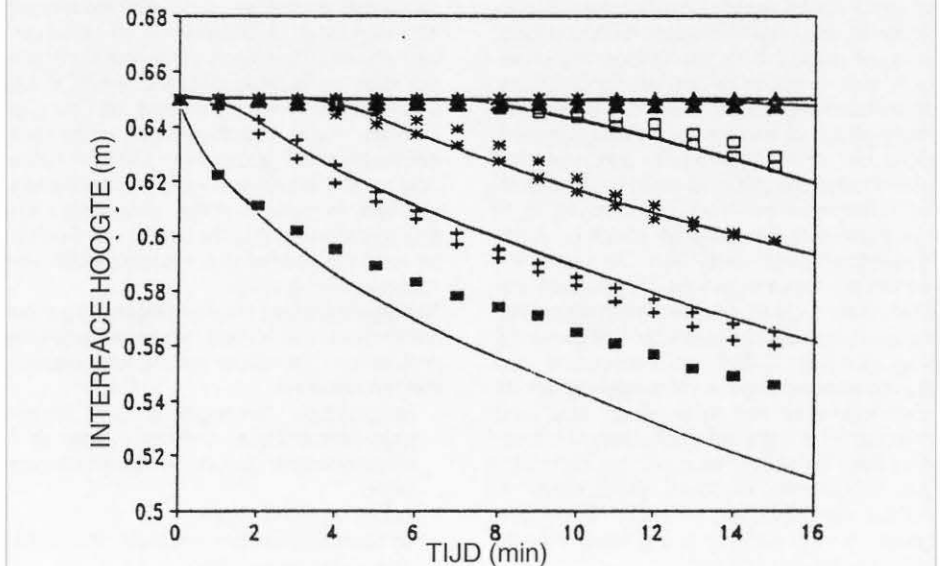


belang voor de voorspelling van traag stromende of kruipende sliblagen. De fout op de aflezing voor conventionele toestellen voor de laagste vervormingssnelheden is 100%. Bij gebruik van gladde metalen cilinders als rotor treedt er slijp op. Dit probleem kan opgelost worden door een kruisvormige spindel te gebruiken. Door de zwichtspanning zal slechts een beperkte hoeveelheid slib meedraaien. Hiermee moet worden rekening gehouden bij het omrekenen van de aflezing. Bij deze omrekening gaat men echter wel steeds uit van een zeker snelheidsprofiel, wat niet zomaar gekend is. Omwille van de problemen met interpretatie van de data, kunnen computersimulaties van stromingsproblemen een belangrijke bijdrage leveren tot de kalibratie van het rheologisch model en zelfs tot het bepalen van de vorm ervan.

5.2. Numerieke simulatie van slibstroming

Slibverpompingsproeven. Bij bepaalde baggertechnieken wordt slib aangezogen via een pijpleiding. Door de zuigkracht treedt liquefactie van het bodemmateriaal op. Door de structuur van consoliderend slib wordt echter enkel maar een krater gevormd in de sliblaag rond de zuigmond, waarvan de straal afhankelijk is van de sterkte van de zuigkracht en de zwichtspanning van het slib. In het kader van het onderzoek in het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U. Leuven werden een aantal slibverpompingsproeven uitgevoerd in een laboratoriumkanaal met het oog op een parameterstudie en optimalisatie van een vaste installatie voor plaatselijke onderhoudsbaggerwerken. Experimenteel werk is moeilijk op schaal uit te voeren, want slib

Fig. 8: Vergelijking tussen de experimenteel waargenomen tijdsevolutie van oppervlakpunten op afstanden $x = 0$ (■), 1 (+), 2 (*), 3(□), 4(x) m van de zuigmond, vergeleken met berekende zakkingslijnen overeenkomstig Fig. 7.



kan niet op schaal worden nagebootst. Een computermodel is daarom het aangewezen alternatief.

Experimenten werden uitgevoerd om het numerieke model te testen en het rheologisch model te kalibreren. Foto 2 toont een momentopname van de sliblaag, ter hoogte van de slibvang, tijdens het verpompen. Fig. 6 geeft de berekende snelheidsvectoren in de sliblaag voor dit moment. Het belangrijkste verschil is dat de waargenomen dode zone in de rechterbovenhoek van de sliblaag op de foto veel groter is dan in de simulatie. Dit is echter het gevolg van drie-dimensionale effecten rond de zuigmond: de foto toont de sliblaag aan de zijwand terwijl de simulatie met een langsdorsnede in het midden overeenkomt. Fig. 7 toont de evolutie van het sloboppervlak in functie van de tijd voor een ander slobverpompingsexperiment. De resultaten worden in Fig. 8 vergeleken met enkele experimentele data.

Uit de experimenten werden nog een aantal belangrijke conclusies getrokken die het mogelijk maakten de numerieke simulatie te vereenvoudigen. Uit de relatieve verplaatsing ten opzichte van de wand, kon worden afgeleid dat wrijving met de gladde, verticale wanden kon worden verwaarloosd. Het slob werd niet geërodeerd want er was praktisch geen wrijving aan de interface tussen water en slob op te merken en de stromingsnelheid aan het sloboppervlak was erg klein (enkele mm/s). Bijgevolg kon in plaats van een twee-lagenmodel zelfs de waterlaag buiten beschouwing worden gelaten. De graviteitsconstante moet dan wel worden gereduceerd. Ook numeriek kan worden aangetoond dat het water enkel stroomt om continuïteitsredenen, maar niet door wrijving aan de interface. De dichtheid van de sliblaag in beide proefreeksen was boven de kritische waarde overeenkomstig het gelpunt. De dichtheitsveranderingen in de sliblaag konden dan in een eerste benadering verwaarloosd worden omdat, op basis van consolidatieproeven, aangenomen werd dat de consolidatie erg traag verliep en omdat dichtheitsprofielen van zo'n dik slob erg homogeen bleven (geen segregatie van zand). Door de afwijkingen ten gevolge van 3-dimensionale effecten was het moeilijk het rheologisch model volledig te kalibreren. Om dezelfde helling van het sloboppervlak te krijgen, was het nodig om de zwichspanning ongeveer even groot te nemen als de Bingham-schuifspanning. Dit betekent dat de sliblaag meer structuur had dan werd aangenomen. Dit is niet verbazingwekkend aangezien het slobmonster dat gebruikt werd in de Brookfield viscometer eerst werd geroerd om het te homogeniseren waarbij de structuur reeds gedeeltelijk wordt verbroken. De snelheidsprofielen in de kanaalsectie zijn praktisch uniform. Een 1-dimensionale benadering voor deze zone, zoals die reeds door *Berlamont & Van Goethem* (1984) werd toegepast, lijkt dus gerechtvaardigd. In de omgeving van de zuigmond is ze niet meer geldig. Nochtans blijkt dat in de numerieke oplossing het materiaal later en plotser bezwijkt dan de metingen suggereren. Dit heeft waarschijnlijk te maken met thixotrope effecten. De convergentie van het schema is erg traag door de enorm hoge viscositeiten.

Fig. 9: Initiële toestand en berekende vervorming van een bezwijkende 30 cm dikke sliblaag ($\rho = 1.140 \text{ kg/m}^3, \tau_0 = 9 \text{ Pa}$) door het plotse wegvallen van een wand na 0.3 seconden.



Graviteitstroming wordt doorgaans met diepte-gemiddelde modellen gesimuleerd (bv. *McArthur & Schambers*, 1986; *Wright & Krone*, 1987). In Fig. 9 wordt een resultaat getoond van het instorten van een sliblaagwand, zoals kan gebeuren met de wanden van een pas uitgebaggerde sleuf van een navigatiekanaal.

Bepaling van de vervorming van het sloboppervlak. Om de vervorming van het sloboppervlak te bepalen moest gebruik worden gemaakt van een speciale numerieke methode, die toelaat het eindige-elementennet te vervormen (*Toorman*, 1992; *Toorman & Berlamont*, 1992). De methode is gebaseerd op de ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) methode (*Huerta & Liu*, 1988). Hierin wordt uitsluitend de verplaatsing van de punten op bewegende randen opgelost uit de kinematische voorwaarde (Vgl. 4). Voor punten, binnen zones waar het EE-net dient aangepast te worden, wordt de verplaatsing opgelegd als een zekere fractie van de verplaatsing van het bewegende oppervlak. Dit levert het beoogde algoritme dat grote vervorming van het domein toelaat zonder ontoelaatbare distorsie van het EE-net. Vgl. (4) moet opgelost worden met een andere EE-methode (Streamline-Upwind-Petrov-Galerkin) om numerieke problemen (oscillaties) inherent aan het type vergelijking (hyperbolisch) te vermijden (*Toorman & Berlamont*, 1992).

6. CONCLUSIES

De studie van de verschillende mechanismen voor cohesief-sedimenttransport vereist een interdisciplinaire aanpak. Door de complexiteit en de interactie van de verschillende processen is het niet evident om ze individueel te bestuderen of resultaten van laboratoriumexperimenten te extrapoleren naar de realiteit. Daarom wordt in het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U. Leuven, naast experimenteel onderzoek, het mechanisch gedrag van slob ook onderzocht met behulp van een 2-dimensionaal verticaal numeriek model. Resultaten van de simulatie van slobstroming en sedimentatie tonen de potentiële mogelijkheden van zo'n numerieke studie.

Niettegenstaande de vooruitgang op theoretisch vlak, zijn er nog tal van onopgeloste problemen, die verder onderzoek vereisen. Hiertoe behoren:

- betrouwbare rheologische data (betere viscositeitsmeters, methoden voor snelheidsmeting in geconcentreerde suspensies);
- invloed van thixotropie;
- de correlatie tussen rheologie, consolidatie en erosieweerstand;

- invloed van polydispersiteit (gedrag van mengsels met zand);
- sedimentatie op een hellende bodem;
- constitutieve vergelijkingen voor de bezinkingsnelheid, permeabiliteit en effectieve spanning;
- kwantificering van de verschillende diffusiecoëfficiënten.

Door de groeiende belangstelling naar het onderzoek in cohesief sediment en de toenemende internationale samenwerking, waaronder het MAST Coastal Morphology Onderzoeksprogramma (MAST, 1992), is betekenisvolle vooruitgang in de nabije toekomst te verwachten.

dr. ir. E.A. TOORMAN
Katholieke Universiteit Leuven
Laboratorium voor Hydraulica
Departement Burgerlijke Bouwkunde
De Croylaan 2
3001 Heverlee

LITERATUUR

- ALI, K.H.M. & GEORGIADIS, K. (1991). Laminar motion of fluid mud. Proc. Instn. Civil Engineers, 91, Part 2, pp. 795-821.
- BERLAMONT, J. & VAN GOETHEM, J. (1984). Slobvrij houden van havens en hun toegangen. Tussentijds rapport. Laboratorium voor Hydraulica, K.U. Leuven.
- BUSCALL, R. (1990). The sedimentation of concentrated colloidal suspensions. Colloids and Surfaces, Vol. 43:33-53.
- CORCHET, M.J., DAVIES, A.R. & WALTERS, K. (1984). Numerical simulation of non-Newtonian flow. Rheology Series, Vol. 1, Elsevier, Amsterdam.
- HUERTA, A. & LIU, W.K. (1988). Viscous flow with large free surface motion. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 69:277-324.
- KRONE, R.B. (1962). Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Final report. Hydraulic Eng. Laboratory & Sanitary Eng. Research Laboratory, University of California, Berkeley.
- KUENEN, Ph. H. (1952). Estimated size of the Grand Banks turbidity current. American J. of Science, Vol. 250 (Dec.):874-884.
- KYNCH, G.J. (1952). A theory of sedimentation. Transactions Faraday Society, 48:166-176.
- MAA, P.-Y. (1986). Erosion of soft muds by waves. PhD thesis, Coastal & Oceanographic Engineering Department, University of Florida, Gainesville.
- MACARTHUR, R.C. & SCHAMBERS, D.R. (1986). Numerical methods for simulating mud flows. Proc. 3rd Int. Symposium on River Sedimentation, pp. 1615-1623, University of Mississippi, Jackson.
- MAST-I G6-M Project 4 Group on Cohesive Sediment (1992). On the methodology and accuracy of measuring physico-chemical properties to characterize cohesive sediment. (Winterwerp, J.C., red.) Rapport (in voorbereiding), onderdeel van het MAST-I G6-M (Coastal Morphology) Onderzoeksprogramma van de E.G.

MIGNIOT, C. (1968). Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et leur comportement sous des actions hydrodynamiques. La Houille Blanche, No.7-1968:591-620.

PARTHENIADES, E. (1962). A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water. PhD Thesis, University of California, Berkeley.

ROSS, M.A. & MEHTA, A.J. (1991). Fluidization of soft estuarine mud by waves. Hoofdstuk 19 in: Microstructure of fine-grained sediments: from mud to shale (R.H. Bennett, W.R. Bryant & M.H. Hulbert, red.), *Frontiers in Sedimentary Geology*, pp. 185-191, Springer-Verlag, New York.

TEISSON, Ch., SIMONIN, O., GALLAND, J. Ch. & LAURENCE, D. (1992). Simulating turbulent verti-

cal exchange of mud concentration and associated processes. MAST G6M Coastal Morphodynamics. Final Workshop Abstracts-in-depth, pp. 4.12-4.15, Commission of the EC Directorate General XII.

TILLER, F.M. (1981). Revision of Kynch sedimentation theory. *AIChE Journal*, Vol. 27 (No. 5): 823-829.

TOORMAN, E.A. (1992). Modelling of fluid mud flow and consolidation. Doctoraats thesis, Departement Burgerlijke Bouwkunde, K.U. Leuven.

TOORMAN, E.A. & BERLAMONT, J.E. (1992). Free surface flow of a dense, natural cohesive sediment suspension. Proc. 1st. European Computational Fluid Dynamics Conference, 7-11 sept. 1992, Brussel, pp 1005-1011, Elsevier.

TOREY, E.M. & PICKARD, D.K. (1985). Experimental evidence for a stochastic approach to sedimentation. In: Flocculation, sedimentation and consolidation. Proc. Engineering Foundation Conference (Moudgil & Somasundaran, red.), Sea Island, Georgia, pp. 297-306.

WOLANSKI, E., CHAPPELL, J., RIDD, P. & VERTESSY, R. (1988). Fluidization of mud in estuaries. *J. Geophysical Research*, Vol. 93 (C3): 2351-2361.

WRIGHT, V.G. & KRONE, R.B. (1986). Laboratory and numerical study of mud and debris flows. Proc. XXII IAHR Congress, Lausanne.

BOEKBESPREKING

Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maastricht (resultaten 1985/1990)

rapport n° 26 Commissie Hydrologisch onderzoek TNO

In januari 1991 werd in Luik een studiebijeenkomst gehouden in verband met het hydrologisch onderzoek in het grensgebied Luik-Maastricht. Het rapport 26 is een verslag van deze bijeenkomst

De waterstroming zowel in het Kempisch Plateau als de Oostelijke dalwand worden in detail besproken aan de hand van talrijke waarnemingen en algemene gegevens op geologisch en hydrologisch gebied.

Ook worden beschouwingen opgenomen over de evaluatie van een waterbalans en de voorspellingen van de waterdebieten in de Maas.

Een hoofdstuk is gewijd aan de hoogwatervoorspelling voor de Nederlandse Maas.

Het rapport (190 p.) bevat een schat van belangrijke gegevens en kan in vele gevallen zeer nuttig zijn.

H.R.

Kwaliteit zwevende stof 1988-1990

publicatie nr 91.040 van de RIZA-Nederlandse Rijkswaterstaat

In 7 hoofdmeetpunten op Rijn, Maas, Schelde, IJsselmeer, Haringvliet, Nieuwe Waterweg en het Noordzeekanaal werden in de

periode 1988-90 regelmatig metingen uitgevoerd over de kwaliteit van de zwevende stof. Al de meetresultaten worden in de nota opgenomen met een vergelijking naar de algemene milieukwaliteitsdoelstelling 2000.

Een indeling in verontreinigingsklassen volgt uit de verkregen resultaten. Op geen der punten wordt in de beschouwde periode voldaan aan de algemene milieukwaliteit.

H.R.

Wolderwijd-Nuldernauw

publicatie nr 91.010 van de RIZA-Nederlandse Rijkswaterstaat

In 1989 werd in de wateren van de Wolderwijd/Nuldernauw een grondig onderzoek uitgevoerd naar de toestand van fauna en flora.

Dit onderzoek had als eerste doel de invloed van een geplande uitdunning van de visstand door hengelsport en beroepsvissers in de jaren 1990-1991 te kunnen nagaan. Al de verkregen gegevens worden in de nota opgenomen.

Het uitgevoerde experiment heeft niet volledig de verwachtingen ingelost doch door de grondige kennis van de oorspronkelijke toestand te vergelijken met de huidige waarnemingen zijn zeer belangrijke conclusies te trekken.

Het onderzoek moet echter nog met meerdere punten worden uitgebreid.

H.R.

Onderzoek grondwaterreiniging top Leeuwarden

Bij het saneren van bevuilde gronden wordt het grondwater uitgedompt doch moet achteraf zelf worden gezuiverd.

Door de Dienst Binnenwateren van de Nederlandse Rijkswaterstaat werd een praktijkstudie uitgevoerd in verband met de zuiveringstechnische resultaten bij de diverse zuiveringstrappen van de fysisch-chemische grondwaterbehandelingsinstallatie.

Als zuiveringsstappen wordt onderscheid gemaakt tussen:

- opslag en drainage van het aangevoerde water in egalisatie- en opslagbasins
- zandfiltratie
- luchtstrippen en behandeling van de strip-lucht in een compostfilter.
- flocculatie en sedimentatie
- koelfiltratie.

De verkregen resultaten met inbegrip van de bedrijfskosten worden besproken. Het gehele onderzoek resulteerde in een wijziging van de volgorde van de zuiveringsstappen en de aandacht voor de afzettingen van ijzer- en kalkverbindingen in de leidingen en luchtstrippen.

Het eindresultaat bewijst de mogelijkheid tot zuiveren met de toegepaste stappen.

Door de grondigheid van het onderzoek zijn de verkregen gegevens belangrijk voor verdere toepassingen.

H.R.