

EROSIE VAN SLIB/ZAND MENGSELS

H. TORFS

Wetenschappelijk medewerker
Laboratorium voor Hydraulica
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Katholieke Universiteit Leuven

EROSION OF MUD/SAND MIXTURES

Mud and sand are usually treated separately in sediment transport problems, because of their completely different behaviour. However, the sediments found in tidal rivers, estuaries and coastal zones are often a mixture of sand and mud. Movements and accumulation of these sediments can seriously hinder shipping so that large dredging operations are needed. The sediment bed in a combined sewer system can also be described as a mixture of cohesive and cohesionless sediments with a large content of organic material. The accumulation of sediments reduces the sewer capacity and the erosion of the (polluted) sediment bed can cause environmental problems. Therefore, the erosion of mud/sand mixtures in uniform flow has been studied in the framework of a PhD thesis.

The results of laboratory experiments on the erosion of mud/sand mixtures in uniform flow show a clear transition from cohesionless to cohesive behaviour, with respect to erosion resistance and mode of erosion. A critical mud content is found above which the mixture can be described as a cohesive sediment; below this limit the mixture acts like sand only. The existence of a critical mixture composition has been explained through the different structures formed inside the sediment bed. Furthermore, the influence of bed density, consolidation time, type of cohesive sediment and bed structure on the erosion process has been shown. Finally, based on the results of the experimental study, some guidelines to model the erosion resistance and erosion rates of mud/sand mixtures have been formulated. A good knowledge of the flow characteristics and the sediment properties is needed to obtain accurate model predictions.

SAMENVATTING

In het kader van een doctoraal proefschrift is het erosiegedrag van slib/zand mengsels in uniforme stroming onderzocht door middel van laboratoriumexperimenten. Omwille van hun totaal verschillende fysische eigenschappen worden zand en slib meestal afzonderlijk behandeld in sedimenttransportproblemen. Maar de sedimenten in tijrivers, estuaria en langs de kust zijn vaak mengsels van zand en slib en ook in gemengde rioleringsstelsels treft men sedimenten aan die te omschrijven zijn als slib/zand mengsels, weliswaar met een zeer hoog gehalte aan organisch materiaal.

Afhankelijk van de samenstelling, d.w.z. het gehalte aan cohesief materiaal of de zandfractie, kunnen de mengsels opgedeeld worden in cohesief of niet-cohesief, zowel qua erosieweerstand als qua erosiemechanismen. De densiteit van het bed, het type cohesief materiaal, de consolidatietijd, de opbouw van de bodem en de aanwezigheid van organisch materiaal, zijn eveneens factoren die de erosie sterk beïnvloeden. Steunend op de resultaten van het experimenteel onderzoek zijn een aantal richtlijnen geformuleerd met betrekking tot het modelleren van de erosie van een slib/zand bodem. Een goede kennis van de stromingskarakteristieken en de sedimenteigenschappen is daarbij onontbeerlijk.

INLEIDING

Zand is een niet-cohesief materiaal bestaande uit korrels die in grootte kunnen variëren tussen 63 μm en 2 mm. De korrels gedragen zich als individuele entiteiten; er bestaan geen onderlinge aantrekkingskrachten. De krachten die door de stroming worden uitgeoefend op een zandbed zijn de sleep- en de hefkracht. Het eigengewicht van de korrels en onderlinge wrijving proberen deze krachten tegen te werken. De erosieweerstand van niet-cohesieve sedimenten wordt dus hoofdzakelijk bepaald door de korrelverdeling en de vorm van het materiaal. Het welbekende Shieldsdiagramma (Shields 1936) is een schematische voorstelling van de relatie tussen de erosieweerstand (uitgedrukt als een kritische schuifspanning) en de korrelgrootte van een niet-cohesief sediment.

Eens een sedimentdeeltje geërodeerd is, kan het zich voortbewegen in suspensie of al rollend en springend over de bodem als bodemtransport, afhankelijk van de intensiteit van de stroming. Voor niet-cohesief materiaal werden in de loop der jaren verscheidene empirische formules opgesteld om het sedimenttransport in bepaalde omstandigheden te voorspellen. Vergelijkende studies tonen aan dat de meeste van deze transportformules in staat zijn om gemeten

waarden op voldoende wijze te benaderen, d.w.z. dat de verhouding tussen de berekende en de gemeten waarden varieert tussen 50 en 200 % (Van Rijn 1984, White et al. 1973 en Yang 1976).

Slib is een mengsel van water, fijne sedimentdeeltjes (kleiner dan 63 μm) en organisch materiaal (Van Damme 1982). Van de fijne fractie zijn het vooral de kleimineralen (kleiner dan 2 μm) die verantwoordelijk zijn voor de cohesieve eigenschappen van het slib. Cohesie is het resultaat van een combinatie van elektrostatische aantrekkingskrachten (omwille van de ladingen op de kleiplaatjes) en Van der Waalskrachten. Het organisch materiaal zorgt voor bijkomende complexe bindingen tussen de verschillende deeltjes. In tegenstelling tot niet-cohesieve sedimenten, die volledig gekenmerkt kunnen worden door hun korrelverdeling, is de karakterisatie van cohesieve sedimenten veel ingewikkelder. De cohesiekrachten zorgen ervoor dat deze deeltjes de neiging vertonen vlokken en aggregaten te vormen in een suspensie. Deze neiging tot vlokvorming neemt toe met de concentratie aan zwevend materiaal wat tot gevolg heeft dat de bezinkingssnelheid afhankelijk is van de suspensieconcentratie. Zodra de deeltjes bezonken zijn, ondergaat het gevormde bed consolidatie. De aggre-

gaten beschikken zich zodat de densiteit van het materiaal toeneemt in de tijd. De structuur van het cohesieve sedimentbed wordt verder nog beïnvloed door de aanwezigheid van organisch materiaal. Biologische activiteit kan zowel een stabilisatie van de bodem met zich meebrengen als de bodem losser maken.

De erosieweerstand van slib wordt in hoofdzaak bepaald door de elektrochemische krachten en niet door het verwaarloosbare gewicht van de partikels. De cohesie- en, wanneer ook andere effecten zoals organische bindingen worden beschouwd, de adhesiekrachten zijn op hun beurt van vele factoren afhankelijk. Het is daarom vrijwel onmogelijk een eenvoudig erosiecriteria voor cohesieve materialen op te stellen. Desalniettemin bestaat er een aantal veel gebruikte empirische formules die de erosieweerstand uitdrukken in functie van enkele belangrijke parameters zoals densiteit en volumefractie.

De erosie van slib kan op verschillende wijzen gebeuren. Wanneer individuele deeltjes of aggregaten uit het bovenste laagje van het bed worden meegenomen, spreekt men van oppervlakte-erosie. Wanneer het materiaal op een dieper gelegen vlak bezwijkt en grote delen ineens worden meegesleurd, heeft men te maken met massa-erosie. Wanneer vloeibaar slib (d.i. slib met een lage densiteit, zonder inwendige structuur) in beweging komt door de instabiliteit van het scheidingsoppervlak slib-water, spreekt men van resuspensie van vloeibaar slib. De erosiesnelheid van een cohesieve bodem is steeds een functie van het verschil tussen de aangelegde bodemschuifspanning en de kritische schuifspanning van het materiaal en van de materiaalkarakteristieken. Zowel voor massa-erosie als voor oppervlakte-erosie van homogene cohesieve sedimenten is de meest gebruikte erosievergelijking van de volgende vorm:

$$E = E_m \left(\frac{\tau_b - \tau_{ct}}{\tau_{ct}} \right)$$

met E de erosiesnelheid uitgedrukt in kg/sm^2 , τ_b de bodemschuifspanning, τ_{ct} de erosieweerstand en E_m een erosieconstante die voor oppervlakte-erosie in grootte varieert tussen 10^{-5} en $10^{-3} \text{ kg}/\text{s}/\text{m}^2$; hogere waarden van E_m zijn een indicatie dat men te maken heeft met massa-erosie.

De sedimenten die men aantreft langs de kust, in tijriviervien of in estuaria zijn vaak een mengsel van zand en slib. De opgemeten densiteiten en mengselsamenstellingen variëren hierbij zeer sterk. Op vele plaatsen is het sedimentbed gelaagd ten gevolge van een opeenvolging van erosie- en bezinkingsperiodes tijdens een storm of door de getijdewerking. De bewegingen en het aanslibben van deze sedimenten bemoeilijken de scheepvaart, zodat aanzienlijke baggeroperaties noodzakelijk zijn. In de haven van Antwerpen, bijvoorbeeld, wordt jaarlijks 400.000 ton droge stof slib gebaggerd (CEDA & PIANC 1994). De slibafvoer in onze rivieren is de laatste jaren sterk ge-

stegen ondermeer door de kanalisering van rivieren, de toename van de verharde oppervlaktes en het aanleggen van rioleringen. Tegelijkertijd is ook de vervuiling toegenomen o.a. door restfrakties van meststoffen en onkruidverdelgers die meege-sleept worden en door het lozen van afvalwater. Van de specie die in de Antwerpse haven gebaggerd wordt, wordt het merendeel aan land opgeslagen. De opslagcapaciteit is echter zeer beperkt zodat er naar alternatieven dient te worden gezocht. Het is dan ook van groot belang het gedrag van slib/zand mengsels te kunnen voorspellen.

De sedimenten in gemengde rioleringsstelsels kunnen eveneens beschreven worden als mengsels van cohesieve en niet-cohesieve sedimenten. De cohesie wordt in dit geval niet alleen veroorzaakt door elektrochemische aantrekkingskrachten maar ook door het aan elkaar kleven van de deeltjes met teer en vetten, door chemische cementatie en door biologische processen. Reologisch onderzoek van deze rioolsedimenten heeft echter aangetoond dat men het gedrag van deze materialen kan beschrijven met de modellen die gewoonlijk voor cohesieve materialen gebruikt worden.

Afwisselende periodes van sterke neerslag en droogte resulteren in opeenvolgende erosie- en sedimentatiefases die het sedimentbed een gelaagde structuur bezorgen. Het zogenaamde permanente bed bestaat uit hoofdzakelijk grof materiaal van hoge densiteit. Daarboven bevindt zich meestal een meer vloeibare sedimentlaag bestaande uit fijne deeltjes en organisch materiaal. Sedimentophopingen in rioleringen reduceren de doorvoercapaciteit van het stelsel zodat aanzienlijke onderhoudswerken moeten uitgevoerd worden. Daarenboven stroomt bij een fikse regenbui een deel van het debiet rechtstreeks naar de oppervlaktewateren via de overstorten. Door erosie van het sedimentbed komen ook sedimenten, die vervuild kunnen zijn, in het oppervlaktewater terecht en vormen zo een zware belasting voor het milieu. Eens te meer blijkt er nood aan modellen die het erosiegedrag van slib/zand mengsels kunnen voorspellen.

Dit artikel geeft de resultaten weer van een uitgebreide studie naar het erosiegedrag van slib/zand mengsels. Een volledig verslag van het onderzoek is te vinden in de doctoraatsthesis van Torfs (1995).

EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

Om het erosiegedrag van slib/zand mengsels in detail te kunnen bestuderen, werd er beslist laboratoriumexperimenten uit te voeren. Op die manier is het immers mogelijk de invloed van één parameter te evalueren terwijl alle andere constant gehouden worden.

De erosieproeven zijn uitgevoerd in een 9 m lange, rechte stroomgoot met een rechthoekige dwarsdoorsnede van 40 bij 40 cm^2 , die opgesteld staat in het Laboratorium voor Hydraulica van de K.U.Leuven. Het opwaarts reservoir sluit aan op een 4 m

lang instroomgebied met niet-erodeerbare bodem. Hierop volgt de meetsectie, waarin een 8 cm dik sedimentbed, lengte 3 m, kan geplaatst worden met behulp van losse sedimentbakken. Over de hele lengte van de meetsectie is een glazen wand voorzien zodat de erosieprocessen van nabij kunnen gevolgd worden. Afwaarts van de meetsectie bevindt zich een sedimentvang gevolgd door een uitstroomzone met vaste bodem van 1.5 m lang.

De meetinstrumenten die voorzien werden, zijn: een elektromagnetische debietmeter die het debiet doorheen het kanaal opmeet; twee drukopnemers die de waterhoogte opwaarts en afwaarts van het sedimentbed registreren; een pitotbuis verbonden met een differentieel drukopnemer om snelheidsprofielen op te meten; een krachtopnemer die het gecumuleerde bodemtransport weegt, d.i. het gewicht van de sedimenten die in de sedimentvang terecht komen; en twee aftappunten, opwaarts van het sedimentbed en afwaarts van de sedimentvang, om stalen van het suspensiemateriaal te nemen. Deze monsters worden achteraf gefiltreerd om de concentratie aan zwevend materiaal te bepalen. Verder worden de samenstelling en de densiteit van het bed bepaald aan de hand van een analyse van bodemstalen die na afloop van een experiment genomen worden.

De sedimenten die gebruikt werden voor deze experimenten zijn: zand van Mol, een uniform, fijn wit zand met een gemiddelde diameter van 0.23 mm; twee types klei, een bruine pottenbakkersklei die hoofdzakelijk bestaat uit montmorilloniet en een witte klei die hoofdzakelijk bestaat uit kaoliniet; en drie verschillende soorten natuurlijk slib, gebaggerd in de Schelde nabij de haven van Antwerpen. De kleisoorten werden gebruikt om de invloed van het organisch materiaal uit te schakelen.

Het hoofddoel van het experimenteel onderzoek is het erosiegedrag van slib/zand mengsels in uniforme stroming beter te begrijpen en de fysische processen die aan de grondslag liggen van de verschillende erosie-mechanismen te doorgronden. Concreet betekent dit dat een antwoord wordt gezocht op de volgende vragen:

1. Hoe verandert de erosieweerstand van homogene slib/zand mengsels wanneer geleidelijk het gehalte aan cohesieve sedimenten toeneemt en welk is de invloed van het type cohesief materiaal?
2. Op welke wijze erodeert een slib/zand bodem en wat is het effect van de mengselsamenstelling? Welke relatie bestaat er tussen de erosiesnelheid, de stromingsparameters, zoals de bodemschuifspanning, en de mengselkarakteristieken?
3. Hoe wordt een gelaagd slib/zand bed gevormd door sedimentatie uit een homogene slib/zand suspensie en welk is de invloed van de samenstelling, c.q. het zandgehalte?
4. Wat is de erosieweerstand en de erosiesnelheid van een dergelijke gelaagde bodem?

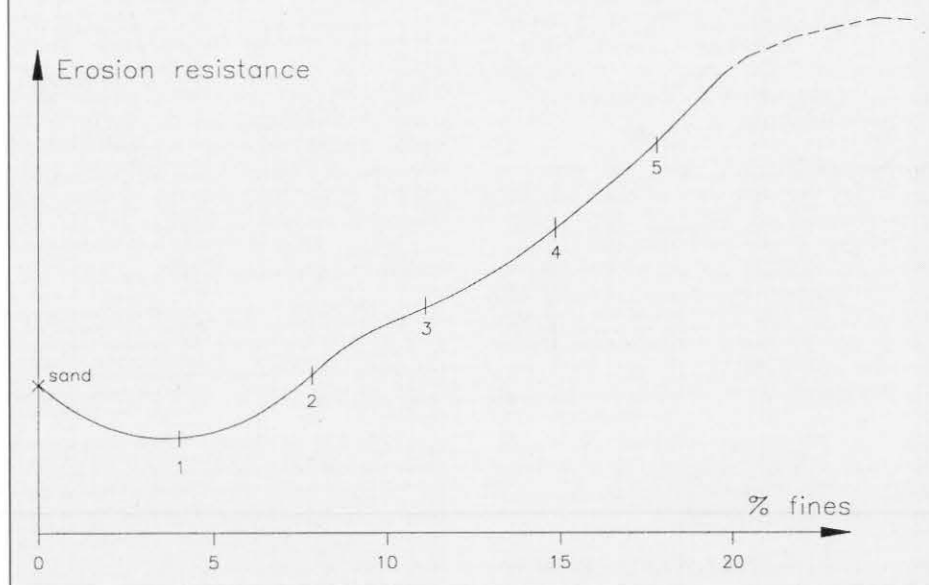
5. Wat is de fysische verklaring voor het erosiegedrag van slib/zand mengsels? Welke mechanismen bepalen de interne structuur van het sedimentbed?
6. Op welke manier kan het erosiegedrag van slib/zand mengsels gemodelleerd worden? Welke informatie is er nodig om zinvolle voorspellingen nopens erosie en sedimenttransport te doen en hoe kunnen deze gegevens verkregen worden?

Om een antwoord te vinden op al deze vragen, worden twee types experimenten uitgevoerd: erosieproeven op homogene mengsels en erosieproeven op gelaagde mengsels. De homogene mengsels zijn aangemaakt door de gewenste hoeveelheden zand, cohesief materiaal en water grondig te mengen. Nadien is het mengsel in de meetsectie geschept en vlakgestreken. Er volgt dan een consolidatie onder water gedurende één nacht. De dichtheid van deze mengsels schommelt rond 1850 kg/m³. Om de invloed van de dichtheid na te gaan, worden enkele proeven gedaan met mengsels van een lagere dichtheid van om en bij de 1650 kg/m³. Het percentage cohesief materiaal varieert tussen 0 tot 30 %.

Voor de vorming van een gelaagde bodem is een bezinkingstank geconstrueerd. Deze tank (1 m hoog) kan op de meetsectie worden bevestigd. Op geregelde tijdstippen (tweemaal per dag, als simulatie van getijdewerking) wordt een vloeibaar mengsel van zand en slib in de tank gepompt. Het slibgehalte van de mengsels varieert tussen 40 en 80 %. De procedure wordt herhaald tot de totale dikte van het sedimentbed 8 cm bedraagt. Een proportionele hoeveelheid wordt ook in een doorzichtige consolidatiekolom van dezelfde hoogte gegoten. Op die manier kan de opbouw van de bodem gevolgd worden. Met behulp van een gamma-densimeter kan een dichtheitsprofiel van het bed in de kolom worden opgemeten.

Na de vorming van het sedimentbed wordt gestart met de erosieproeven die voor beide types experimenten identiek verlopen. Het debiet in de goot wordt stapsgewijze

Figuur 1: Schematische voorstelling van de erosieweerstand (erosion resistance) van een homogeen slib/zand mengsel in functie van het slibgehalte (% fines).



opgevoerd tot er erosie optreedt. Het begin van erosie kan zowel visueel worden vastgesteld doorheen de glazen wand van de meetsectie als door middel van de resultaten van de transportmetingen. Vrijwel continu worden de waterhoogtes, het debiet, de snelheid en het gecumuleerde bodemtransport geregistreerd. Er worden eveneens monsters van het zwevend transport genomen. Nadien wordt het debiet nog enkele malen verhoogd. Een experiment wordt gestopt wanneer de erosie de stroming zodanig beïnvloedt dat deze niet langer als uniform kan worden beschouwd.

RESULTATEN VAN HET EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

Erosie van homogene mengsels

Wanneer het slibgehalte van een homogeen mengsel (het gewichtspercentage

kleiner dan 63 μ m) toeneemt, zal ook het erosieproces geleidelijk wijzigen. Zolang het percentage fijn materiaal gering blijft (slechts enkele procenten), gedraagt het mengsel zich als een zuiver niet-cohesief materiaal. Bij een lage bodemschuifspanning worden de fijne deeltjes uit het oppervlak weggespoeld en gaan in suspensie. Bij hogere debieten begint ook de zandfractie in beweging te komen. Het bodemtransport zorgt voor het ontstaan van de typische bedvormen zoals ribbels en duinen. Deze blijken enkel uit zand te bestaan; de fijne ongebonden deeltjes gaan immers onmiddellijk in suspensie.

Het opgemeten sedimenttransport voor de niet-cohesieve mengsels komt zeer goed overeen met de waarden voor zand alleen; men kan eenzelfde relatie gebruiken om de meetresultaten voor te stellen. Dit betekent dat de fijne fractie het transport van het zand niet beïnvloedt. Bestaande sedimenttransportformules voor zand kunnen wor-

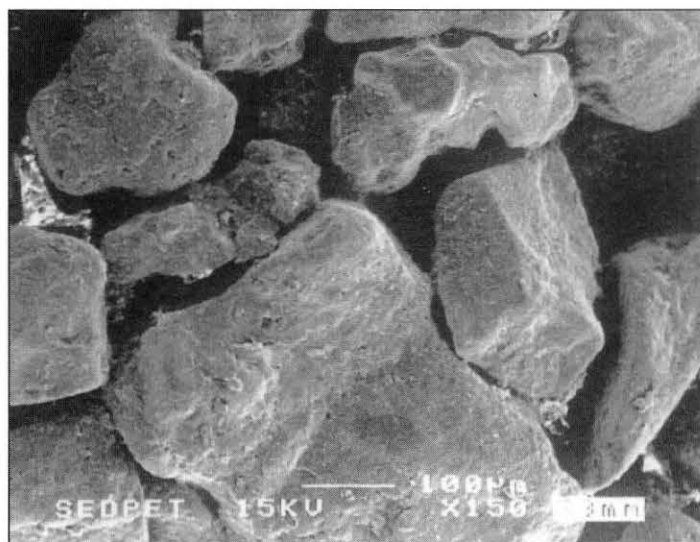


Foto 1: Kaolinetmengsel met een slibgehalte van 5% (gewichtsfractie).

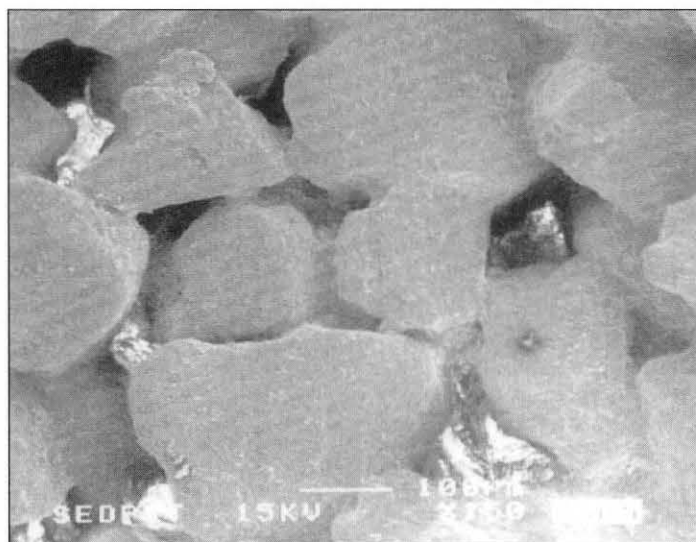


Foto 2: Kaolinetmengsel met een slibgehalte van 7,5%.

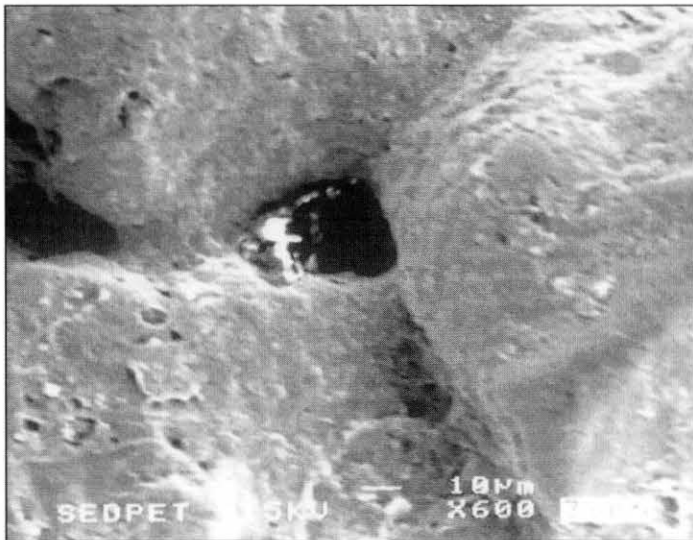


Foto 3: Uitvergroting van een detail uit foto 2, waarbij de kleibruggen duidelijk zichtbaar zijn.

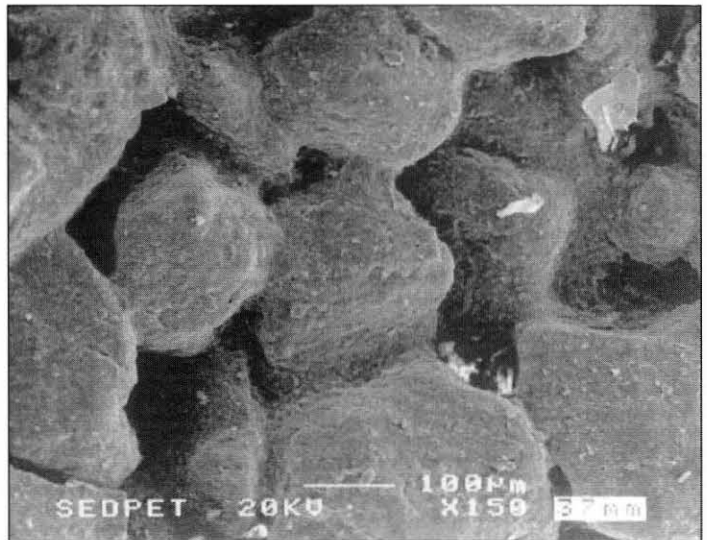


Foto 4: Een cohesief kaolinetmengsel met een slibgehalte van 15%.

den gebruikt om de transporthoeveelheden van deze mengsels te voorspellen.

Voegt men echter nog meer fijn materiaal toe dan zal het slib/zand mengsel zich gedragen als een louter cohesief materiaal. Afhankelijk van het type cohesief materiaal en de densiteit van het bed is de erosie te beschrijven als oppervlakte-erosie of massa-erosie. Bij de mengsels met een densiteit van 1850 kg/m^3 worden meestal grote stukken van het bedmateriaal losgerukt. De geërodeerde plakken hebben afmetingen die variëren van enkele millimeters tot een centimeter. Dit fenomeen is dan ook als massa-erosie bestempeld. Een ander kenmerk van de erosie van deze mengsels is dat de erosie preferentieel voortschrijdt in reeds geërodeerde zones, terwijl het begin van erosie op het ongeschonden bed heel

wat moeilijker verloopt. Dit heeft te maken met de verhoogde turbulentie in en rond een erosieplek en het hydraulisch glad zijn van het oorspronkelijke bed. De opgemeten erosiesnelheden voor de verschillende cohesieve mengsels zijn duidelijk een functie van het verschil tussen de bodemschuifspanning en de kritische schuifspanning. Daarenboven stemmen de gebruikte erosieconstanten (zie vergelijking (1)) goed overeen met de waarden die voor massa-erosie gebruikelijk zijn. Enkel voor de kaolinet mengsels van lage densiteit kan de erosie beschreven worden als oppervlakte-erosie.

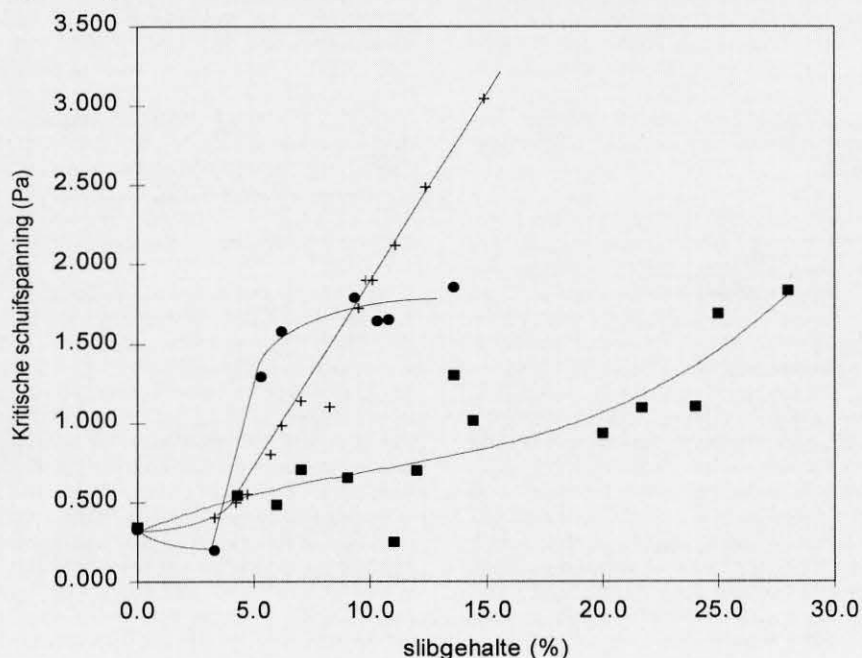
Wanneer men de evolutie van de erosieweerstand van een homogeen mengsel in detail gaat bekijken, vindt men voor ieder type mengsel een verloop zoals schema-

tisch voorgesteld in figuur 1. Deze variatie in kritische schuifspanning kan verklaard worden aan de hand van de veranderingen in de inwendige structuur van het mengsel. Om deze wijzigingen visueel voor te stellen, werden van een aantal kaolinetmengsels met een percentage fijn materiaal variërend tussen 5 % en 20 % opnames gemaakt met een scanning elektronenmicroscop (foto's 1 t.e.m. 4).

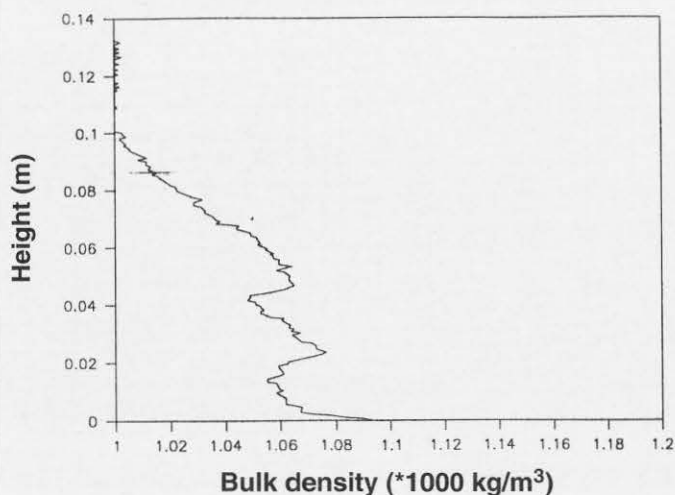
De evolutie van de erosieweerstand kan nu als volgt verklaard worden. Wanneer slechts een kleine hoeveelheid fijne deeltjes in het mengsel aanwezig (foto 1) is, zullen deze ongebonden partikels bij een laag debiet uit de oppervlaktelaag worden uitgespoeld. De kritische schuifspanning zal dus lager zijn dan voor zand alleen, maar hoger dan verwacht voor een uniforme bodem van fijne deeltjes zonder cohesie. De kleine deeltjes zitten immers verstopt achter de zandkorrels en zijn daarvoor moeilijker bereikbaar door de stroming. Eventueel kan aan het oppervlak zelfs enige binding tussen de kleiplaatjes ontstaan. Ook de zandkorrels zullen bij een iets lagere bodemschuifspanning dan normaal in beweging komen, door het uitspoelen van de slibdeeltjes verliezen de zandkorrels immers gedeeltelijk hun stabiliteit. Verhoogt men het percentage fijne deeltjes (foto 2) dan zullen deze stilaan de poriën tussen de zandkorrels opvullen. De bodem wordt hydraulisch gladder en aldus moeilijker erodeerbaar. Bovendien ontstaat tussen sommige zandkorrels een soort van kleibruggen die de korrels verbinden (foto 3). Kleine slibdeeltjes zetten zich vast op oneffenheden aan het oppervlak van de grote zandkorrels. Omwille van elektrostatische aantrekkingskrachten worden zo aggregaten gevormd die uiteindelijk groeien tot aan een tweede zandkorrel. In eerste instantie zijn deze bruggen dunne draden, die geen weerstand bieden. De belangrijkste factor in de erosieweerstand van deze mengsels blijft de korrelwrijving.

Met toenemend slibgehalte worden geleidelijk heuse netwerken gevormd die het se-

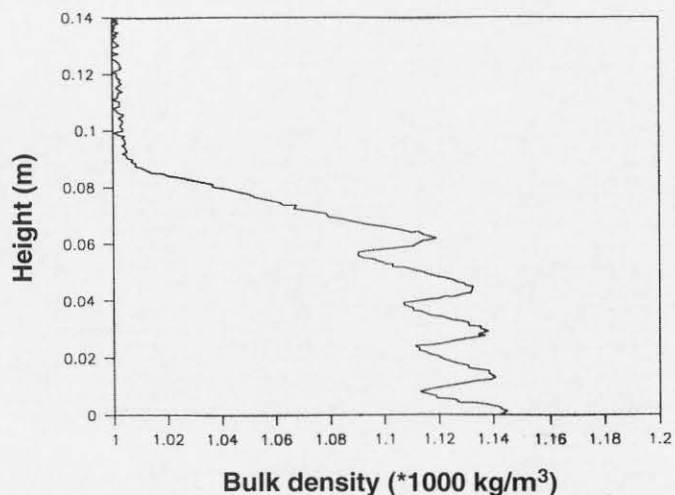
Figuur 2: Erosieweerstand in functie van het slibgehalte (d.i. het materiaal fijner dan $63 \mu\text{m}$) voor homogene mengsels van zand van Mol met kaolinet +, montmorilloniet ■ en Scheldeslib ■.



Figuur 3: Densiteitsprofiel van een mengsel met Scheldeslib 2 en 29% zand.



Figuur 4: Densiteitsprofiel van een mengsel met Scheldeslib 3 en 41% zand.



dimentmengsel extra erosieweerstand verschaffen. Vanaf een bepaald percentage cohesief materiaal in het mengsel zijn de zandkorrels volledig omgeven door cohesieve deeltjes die een structuur vormen (foto 4). De zandkorrels raken elkaar niet meer en de erosieweerstand wordt nu volledig bepaald door de cohesieve fractie. Het experimenteel bepaalde kritisch slijbgehalte bevindt zich voor alle mengsels tussen 5 % en 15 % (gewicht fractie). Bij een hoger slijbgehalte gedraagt het mengsel zich als een cohesief materiaal, niet alleen wat betreft de erosieweerstand maar ook wat betreft het erosiemechanisme, de opgemeten erosiesnelheden en de resulterende bedvormen.

Het is echter zinvoller om met volumefracties te rekenen i.p.v. met gewicht fracties aangezien het kritische slijbgehalte te maken heeft met het volume slijb dat nodig is om tussen de zandkorrels een netwerkstructuur te vormen. Als men aanneemt dat het zand een porositeit heeft van 40 tot 45 % en het watergehalte in de mengsels met densiteit 1850 kg/m³ steeds ongeveer 35 % is, vindt men een volumefractie van ongeveer 5 % nodig om de poriën van het zand volledig te vullen. Dit stemt voor de gebruikte mengsels overeen met een gewicht fractie van om en bij de 10 %. Deze kritische volumefractie van fijne deeltjes in het totaal volume van sediment en water is in feite het gelpunt van zuiver cohesief materiaal, d.i. de densiteit waarbij zich in het vloeibaar slijb een structuur vormt.

In figuur 2 zijn de experimenteel bepaalde kritische schuifspanningen voor de verscheidene homogene mengsels weergegeven. De volle lijnen tonen aan dat de opgemeten waarden wel degelijk de trend uit figuur 1 volgen. Uit figuur 2 blijkt eveneens dat de mengsels met kaolinite de hoogste kritische schuifspanningen vertonen, gevolgd door de mengsels met Scheldeslib en deze met montmorilloniet. Kaolinite is het fijnste van de gebruikte cohesieve sedimenten en bevat dus relatief meer kleideeltjes die kunnen bijdragen tot de vorming

van cohesieve bindingen. Het Scheldeslib bevat minder kleideeltjes dan montmorilloniet, men zou dus ook een lagere erosieweerstand verwachten. Het Scheldeslib bevat echter een hoeveelheid organisch materiaal dat verantwoordelijk is voor bijkomende complexe bindingen in het materiaal.

Naast de kleifractie en de aanwezigheid van organisch materiaal spelen ook de densiteit en de consolidatietijd een rol bij het bepalen van de erosieweerstand. Wanneer de densiteit van het mengsel verlaagd wordt of de consolidatietijd afneemt, neemt ook de erosieweerstand af.

Gelaagde sedimentbodem

Wanneer een sedimentbed ontstaat door bezinking van een slijb/zand suspensie zal, afhankelijk van de beginvoorwaarden, het gevormde sedimentbed een sterke variatie in densiteit en samenstelling over de diepte vertonen. De zwaardere zandkorrels zullen immers sneller bezinken dan de slijbdeeltjes. Als dit vormingsproces zich enkele malen herhaalt, ontstaat een gelaagde bodem. Door het gebruik van een transparante consolidatiekolom kan de opbouw van een gelaagde bodem in detail worden gevolgd.

Wanneer men de densiteitsprofielen bekijkt, die geregistreerd zijn met de gamma-densimeter, kan de gelaagde structuur duidelijk worden waargenomen (figuren 3 en 4). De densiteitspieken geven het scheidingsoppervlak tussen de verschillende lagen aan. Wanneer de concentratie aan cohesief materiaal in de initiële suspensie kleiner is dan het gelpunt (de concentratie waarbij een continue structuur gevormd wordt), kan de zwaardere zandfractie ongehinderd sneller bezinken en een zandlaagje op de bodem vormen. Als de oorspronkelijke suspensie reeds een structuur vormt, dan zal deze structuur verhinderen dat de zandkorrels sneller door de slijbmassa vallen. In onze experimenten is de suspensieconcentratie steeds zeer laag, zodat in iedere proef een zandlaagje gevormd werd.

De segregatie van zand blijkt echter beperkt tot een bepaald zandgehalte in het mengsel. Meer zand heeft geen bijkomend effect meer. De toename van de zandfractie zorgt voor een snellere consolidatie, kleinere laagdiktes en hogere densiteiten. Ook deze effecten zijn beperkt tot een zekere maximale zandfractie.

Er is een duidelijk verschil te merken tussen de twee gebruikte types Scheldeslib. De laagjes met slijb 2 zijn gemiddeld 2 à 3 cm dik, de laagjes met slijb 3 slechts ongeveer 1.5 cm, alhoewel de initiële zand/slijb massa in suspensie gelijk is. Slijb 3 heeft een hoger natuurlijk zandgehalte dan slijb 2. Voor slijb 3 verloopt de densiteit in ieder laagje zeer geleidelijk. Vermoedelijk wijst dit erop dat ook het zandgehalte min of meer lineair varieert over een laagje. Bij slijb 2 daarentegen is een duidelijke piek met daarboven een meer uniforme zone merkbaar. De segregatie is hier veel duidelijker aanwezig. De gemiddelde densiteit in de mengsels met slijb 3, met het hoogste zandgehalte, is merkkelijk hoger (1100 - 1140 kg/m³) dan deze van de slijb 2 mengsels (1050 - 1090 kg/m³). Voor verschillende mengsels met één en dezelfde slijbsoort maar met een variërende zand/slijbverhouding is de relatie tussen densiteit en zandgehalte minder eenduidig. Het aantal uitgevoerde experimenten (slechts 5 experimenten met slijb 2 en 3 met slijb 3) is echter te beperkt om algemene besluiten te trekken.

De erosie van een gelaagd bed verschilt totaal van het hoger beschreven erosiegedrag van de homogene mengsels. Deze verschillen zijn niet alleen het gevolg van de opbouw van de bodem maar ook van de lagere densiteit. Het erosieproces start met het in suspensie gaan van het slijblaagje. De erosie neemt bij constant debiet en dus constante bodemschuifspanning geleidelijk af wegens de toenemende densiteit van het bed; de toenemende densiteit resulteert immers in een toenemende erosieweerstand. Verhoogt men het debiet dan zal de erosie weer starten. Een andere reden voor de geleidelijke afname van het zwevend transport is dat een zandlaagje bereikt wordt.

Het zand zal immers, mits een voldoende bodemschuifspanning, in eerste instantie als bodemtransport bewegen. Men merkt dan ook dat wanneer het opgemeten bodemtransport toeneemt, het zwevend transport afneemt en omgekeerd. De erosie van een gelaagde bodem is dus een continue afwisseling van zwevend en bodemtransport. De relatieve belangrijkheid van beide fasen is afhankelijk van de samenstelling van de bodem. In tegenstelling tot de homogene mengsels waar de erosiesnelheid een constante is, enkel afhankelijk van de bodemschuifspanning, varieert de erosiesnelheid van een gelaagd slib/zand bed voortdurend.

MODELLEREN VAN HET EROSIE- GEDRAG VAN SLIB/ZAND MENGSELS

Uit de resultaten van het experimenteel onderzoek blijkt dat, afhankelijk van de mengselsamenstelling, een slib/zand mengsel kan beschouwd worden als een niet-cohesief of als een cohesief materiaal. Het lijkt dan ook niet nodig een specifieke transportformule voor mengsels te ontwikkelen. De bestaande erosie- en transportformules voor zowel zand als voor cohesieve sedimenten blijken immers in staat de opgemeten erosiesnelheden, zwevend en bodemtransport te voorspellen. Enkel bij de bepaling van de erosieweerstand dient rekening te worden gehouden met het specifieke mengselkarakter van het bed.

Een erosie- en transportmodel kan dan worden opgebouwd met behulp van bestaande modules mits een aantal stappen wordt toegevoegd. Vooraleer de berekeningen aan te vatten, moet de samenstelling en de densiteit van de erodeerbare laag geanalyseerd worden. Praktisch gezien betekent dit het nemen van een monster van het sedimentbed en de bepaling van ondermeer het slibgehalte, de korrelgrootte en porositeit van de zandfractie, het gehalte aan organisch materiaal, de mineralogische samenstelling van de kleifracie. Om de variatie van de mengselsamenstelling over de diepte en het densiteitsprofiel te kennen, is een meer nauwkeurige monsternamen vereist. Eventueel kan men gebruik maken van een sedimentatie-consolidatie model. Afhankelijk van de densiteit, het gehalte aan klei en fijne deeltjes en de korrelgrootte en porositeit van het zand, kan men dan uitmaken of het gaat om een niet-cohesief dan wel een cohesief mengsel.

Op basis van de gegevens over het bodemmateriaal kan men de erosieweerstand van de oppervlaktelaag bepalen. Vervolgens kan men met behulp van een hydrodynamisch model de bodemschuifspanning berekenen. Dit veronderstelt een goede kennis van de stromingskarakteristieken zoals de snelheidsverdeling en de geometrie. De nauwkeurigheid van de transportberekeningen is immers zeer sterk afhankelijk van de nauwkeurigheid waarmee de bodemschuifspanningen worden berekend. Wanneer de bodemschuifspanning groter is dan de kritische waarde, zal er erosie optreden en kunnen sedimenttransport en/of erosiesnelheid berekend worden met be-

staande transportformules. Voor de cohesieve mengsels kan men aan de hand van de aard van het bodemmateriaal en de densiteit nagaan of er vermoedelijk massa-erosie of oppervlakte-erosie zal optreden. Verder moet een schatting gemaakt worden van de constanten die in de verschillende erosie- en transportformules voorkomen. Indien er meetgegevens beschikbaar zijn, wordt de keuze van deze constanten een stuk eenvoudiger.

Wanneer de eigenschappen van de bodem variëren over de diepte, moet bij iedere tijdstap de dikte van de geërodeerde laag worden bijgehouden. Deze kan berekend worden uit de erosiesnelheid en het densiteitsprofiel. Vervolgens kan men de nieuwe eigenschappen van de oppervlaktelaag evalueren en de berekeningen hervatten.

BESLUITEN

In het kader van een doctoraal proefschrift werd het erosiegedrag van slib/zand mengsels in uniforme stroming onderzocht aan de hand van een uitgebreide reeks laboratoriumexperimenten. Op basis van dit experimenteel onderzoek kunnen de volgende conclusies geformuleerd worden.

Afhankelijk van hun samenstelling, d.w.z. het slibgehalte of de zandfractie, kunnen de mengsels opgedeeld worden in cohesieve en niet-cohesieve mengsels, zowel qua erosieweerstand als qua erosiemechanismen. Wanneer de volumefracie van de fijne deeltjes groter wordt dan 5 %, wordt er in het mengsel een cohesieve netwerkstructuur gevormd die zandkorrels volledig omgeeft. De zandkorrels verliezen het contact met elkaar en het mengsel gedraagt zich als een zuiver cohesief materiaal. De erosieweerstand neemt geleidelijk toe met toenemende kleifracie. De densiteit van het bed, het type cohesief materiaal, de consolidatieduur en de aanwezigheid van organisch materiaal zijn eveneens factoren die het erosieproces sterk beïnvloeden. De erosiesnelheden kunnen voorspeld worden met behulp van de bestaande formules voor cohesieve sedimenten. Is de slibfractie kleiner dan de kritische waarde van 5 %, dan gedraagt het mengsel zich als zuiver zand. De erosieweerstand wordt hoofdzakelijk bepaald door de zandfractie en bestaande sedimenttransportformules voor zand kunnen worden aangewend om het transport te berekenen.

Wanneer de bodem gevormd wordt door bezinking van een slib/zand suspensie met een densiteit lager dan het gelpunt, ontstaat een gelaagd sedimentbed bestaande uit zand en slib laminaten, waarvan de dikte afneemt met toenemend zandgehalte van de oorspronkelijke suspensie. De consolidatiesnelheid van de bodem neemt toe met toenemend zandgehalte. De erosie van zulke gelaagde bodems is een opeenvolging van zwevend transport- en bodemtransportfasen die beide belangrijk kunnen zijn.

Tenslotte kan een aantal richtlijnen geformuleerd worden met betrekking tot het modelleren van de erosie van een slib/zand bodem. Het voorspellen van sedimenttrans-

port en erosiesnelheden kan gebeuren door toepassing van bestaande transportformules voor cohesief of niet-cohesief materiaal indien de samenstelling van het mengsel gekend is. Een goede kennis van de stromingskarakteristieken en de sedimenteigenschappen is daarbij onontbeerlijk. Indien de bodemopbouw niet homogeen is, moeten ook het densiteitsprofiel en de variatie van de mengselsamenstelling gekend zijn of berekend worden.

DANKWOORD

Het experimenteel onderzoek dat aan de basis ligt van dit proefschrift is uitgevoerd in het kader van twee projecten. In 1990 startte een Belgisch interuniversitair onderzoeksproject gefinancierd door het Fonds voor Kollektief Fundamenteel Onderzoek (F.K.F.O.-project nr. 2.9012.90), dat tot doel had de "Erosie, sedimentatie en resuspensie van gedeeltelijk cohesieve, gedeeltelijk niet-cohesieve sedimenten in het bijzonder in het geval van niet-permanente stroming" te bestuderen. Vijf universiteiten (Katholieke Universiteit Leuven, Universiteit Gent, Université Catholique de Louvain, Université de Liège en Vrije Universiteit Brussel), het Waterbouwkundig Laboratorium van Borgerhout en het Laboratoire Hydraulique van Châtelet werkten samen aan deze studie die bestond uit een reeks laboratoriumexperimenten en in situ meetcampagnes.

Verder liep een deel van het experimentele werk in het kader van het MAST G8M Coastal Morphodynamics programma van de Europese Commissie. Het onderzoek naar de erosie van slib/zand mengsels paste in Topic 4: Cohesive Sediments.

H. TORFS

KULeuven, Laboratorium voor Hydraulica,
De Croylaan 2
3001 Heverlee

REFERENTIES

- CEDA & PIANC (1994) Baggerspecie ... een nuttige grondstof.
- SHIELDS A. (1936) Application of similitude mechanics and turbulence research to bed load movement. Mitt. der Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, No. 26, Berlin.
- TORFS H. (1995) Erosion of mud/sand mixtures. Doctoraats thesis Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Toegepaste Wetenschappen.
- VAN DAMME P.M. (1982) Slibgedrag in een natuurlijk milieu: Literatuurstudie. Thesis, Departement Civiele Techniek, T.H. Delft.
- VAN RIJN L.C. (1984) Sediment transport, part I: Bed load transport. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11, pp. 1613-1641.
- WHITE W.R., MILLI H. AND CRABBE A.D. (1973) Sediment transport: an appraisal of available methods, Vol. 2: Performance of theoretical methods when applied to flume and field data, INT 109, Hydraulics Research Station Wallingford.
- YANG C.T. (1976) Discussion: Sediment transport theories: a review by White, Milli and Crabbe, Proc. Inst. of Civil Engineers, Vol. 62, Part 2.