

De invloed van slib in zand op erosie

Een literatuuronderzoek

Lobke Haaring
student 9907742
Faculteit Geowetenschappen
Universiteit Utrecht
Utrecht

juni 2004

	Inhoudsopgave	pagina
Figuren		3
Tabellen en Appendices		4
1.	Inleiding	5
2.	Procesbeschrijving van bodemerosie	5
3.	Ruwheidslengte	8
4.	Kritieke schuifspanning	9
4.1	De korrelgrootte van zand	9
4.2	De hoeveelheid en samenstelling van slib	11
4.3	Dichtheid van de vaste massa	13
4.4	Historie van de bedding	15
5.	Discussie	17
5.1	De kritieke schuifspanning als functie van de korrelgrootte van zand	17
5.2	De kritieke schuifspanning als functie van de dichtheid van de vaste massa	17
5.3	De kritieke schuifspanning als functie van het slibgehalte	20
5.4	De kritieke schuifspanning als functie van de slibsamenstelling	21
5.5	Nauwkeurigheid	23
5.6	De overgang van niet-cohesief naar cohesief	24
5.7	Natuurlijke sedimenten	24
6.	Conclusie	25
7.	Aanbevelingen	26
	Literatuur	27

	Figuren	bron
1	Conceptueel model dat het mechanisme toont voor het begin van beweging voor (a): puur zand; (b): mengsels van zand en slib met minder dan 30% slib en (c): mengsels van zand en slib met meer dan 30% slib.	(Panagiotopoulos et al., 1997)
2	Zand-slib-klei driehoek voor cohesie en netwerk structuur. I- niet-cohesief zandgedomineerde, II - cohesief zandgedomineerde, III- niet-cohesief gemengde, IV- cohesief kleigedomineerde, V- niet-cohesief slibgedomineerde, VI- cohesief slibgedomineerde netwerk structuur.	(Van Ledden et al., 2003)
3	Variatie in de kritieke gemiddelde kritieke stroomsnelheid (a) op 0,4 cm boven de bodem en de kritieke gemiddelde schuifspanning (b) met slibgehalte, voor gemengde sedimenten, onder unidirectionele stroming. De standaarddeviatie is ook weergegeven als een verticale balk.	(Panagiotopoulos et al., 1997)
4	Kritieke schuifspanning voor erosie tegen % fijn materiaal voor verschillende typen cohesief materiaal	(Mitchener en Torfs, 1996)
5	Kritieke schuifspanning voor erosie tegen dichtheid van de vaste massa voor kunstmatig gevormde sedimentbeddingen	(Mitchener en Torfs, 1996)
6	Variatie in de kritieke schuifspanning met slibgehalte, voor sedimentmengsels met zanddiameters van 152,5 en 215 μ , na blootstelling aan verschillende stromingssnelheden lager dan de kritieke stroomsnelheid alvorens de kritieke stroomcondities te bereiken (0,7; 0,8 en 0,9 van de oorspronkelijke kritieke waarde) en verschillende duur van de stroming (5, 10 en 20 min.)	(Panagiotopoulos et al., 1997)
7	Kritieke schuifspanning als functie van de dichtheid van de vaste massa	
8	τ_{cr} als functie van slibgehalte voor mengsels 1 t/m 6	
9	τ_{cr}/τ_{cr0} als functie van het slibgehalte voor de mengsels 1 t/m 6, met onderscheid tussen meer en minder dan 5 % slib voor mengsel 4 (kaolinit)	
10	τ_{cr}/τ_{cr0} als functie van het slibgehalte voor de mengsels 1 t/m 6, met onderscheid tussen meer en minder dan 5 % slib voor mengsel 4 (kaolinit)	

Tabellen

- | | | |
|---|---|--------------------------------|
| 1 | Experimentele gegevens met betrekking tot drempelwaarden, onder constante stroming. | (Panagiotopoulos et al., 1997) |
| 2 | Slibgehalte (% droog gewicht kleiner dan 62,5 μ) waarbij de manier van erosie verandert van niet-cohesief naar cohesief gedrag, voor verschillende soorten cohesief materiaal , gemengd met zand | (Mitchener en Torfs, 1996) |

Appendices

Appendix I	Datareeksen
Appendix II	Meetgegevens

De invloed van slib in zand op erosie

1. Inleiding

Zand is zelden schoon. In estuaria en ondiepe shelf systemen is vaak een gehalte van 2-10 % fijn materiaal in het zand bijgemengd, bestaande uit verschillende korrelgrootten kleiner dan 0,063 mm. De aanwezigheid van dit slib zorgt er voor dat het zand zich anders gaat gedragen. Na overschrijding van een bepaald gehalte aan slib gaat het zand cohesief verdrag vertonen, waardoor bodemprocessen als erosie en sedimentatie anders verlopen. De centrale vraag in dit literatuuronderzoek luidt: wat is de invloed van de aanwezigheid van een kleine hoeveelheid slib op het begin van erosie van een zandige bodem? Daartoe wordt bestaande kennis samengevoegd en vergeleken over de invloed van de aanwezigheid van 2-10 % slib in zand op de erosie van het bodemmateriaal. Eerst wordt een algemene beschrijving gegeven van het proces erosie, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen cohesief en niet-cohesief sediment. Vervolgens worden 2 belangrijke factoren met betrekking tot erosie behandeld: de ruwheidlengte en de kritieke schuifspanning. Er worden verschillende factoren onderzocht die van invloed zijn op de kritieke schuifspanning, met behulp van meetgegevens en stellingen uit de literatuur. In de discussie wordt het belang van de verschillende factoren gewogen, en wordt met behulp van de in de literatuur aanwezige meetgegevens, die in de appendices I en II worden beschreven, een eenvoudige empirische vergelijking gegeven voor de toename van de kritieke schuifspanning voor het begin van erosie als functie van het slibgehalte in een mengsel met gegeven eigenschappen van het zand en het slib.

2. Procesbeschrijving van bodemerosie

Om de invloed van de aanwezigheid van slib op erosie te kunnen bepalen, moet eerst inzicht verkregen worden in het proces van erosie. Daarvoor wordt onderscheid gemaakt in erosie van cohesief materiaal en erosie van niet-cohesief materiaal.

Niet-cohesief materiaal is granulair van structuur en de korrels trekken elkaar niet aan. De belangrijkste parameters die in beschouwing moeten worden genomen bij het bestuderen van niet-cohesief materiaal zijn korrelgrootte, dichtheid van de vaste massa vorm van de korrels. Zand is niet cohesief en wordt onder gemiddelde stromingsomstandigheden (1m/s) als bedload getransporteerd, waarbij vooral de korrelgrootteverdeling van het zand van invloed is op het gedrag. Alleen bij meer dynamische condities, zogenoemde sheetflow, is de pakking en de doorlaatbaarheid van het zand belangrijk (Bakker en Van Kesteren, 1998 in Van Ledden et al., 2003).

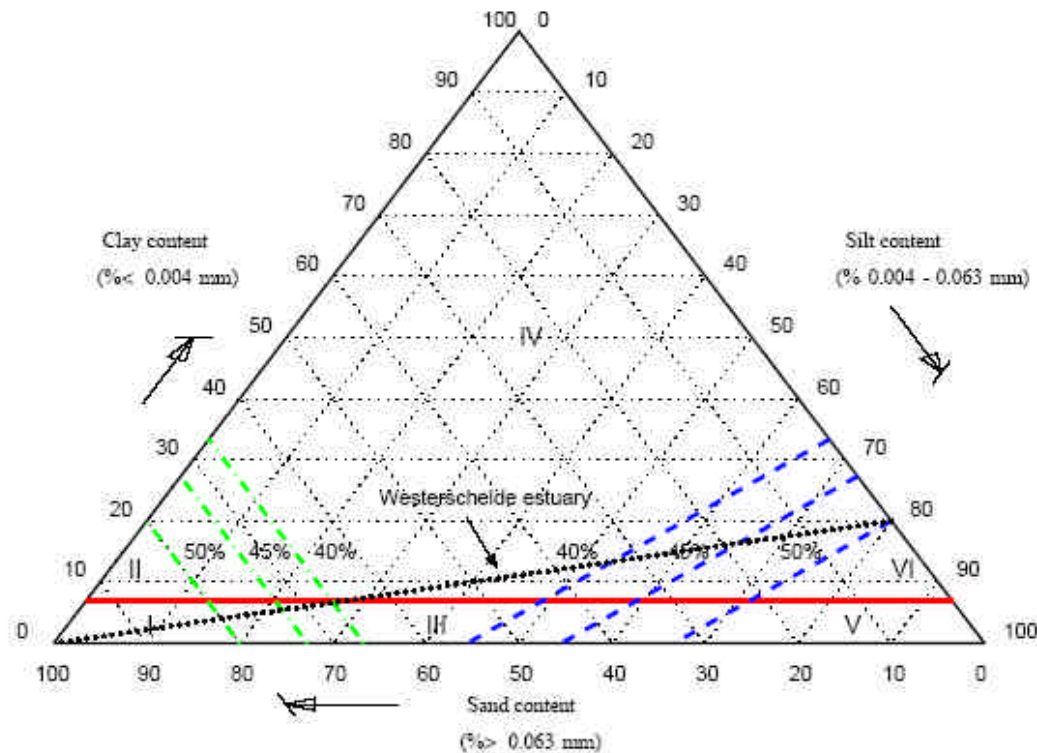
Bij cohesief materiaal speelt de aantrekkingskracht tussen de korrels als gevolg van elektrochemische bindingen een grote rol in het proces van erosie. De korrels oefenen een aantrekkingskracht uit op elkaar en vormen vlokken, die onder gemiddelde stromingscondities van 1 m/s in suspensie worden getransporteerd (Mitchener and Torfs, 1996). Slib gedraagt zich als een cohesief materiaal.

Bij de erosie van alleen slib zijn behalve de korrelgrootte ook andere fysische factoren van belang zoals watergehalte, de soort kleimineralen in de bedding, de doorlaatbaarheid en de samendrukbaarheid van de bedding. Daarnaast spelen ook biologische factoren een rol, zoals het gehalte aan organisch materiaal in de bedding en bioturbatie, en chemische factoren, zoals zoutgehalte en pH.

De erosie van mengsels van zand en slib is een ingewikkelder proces, waarbij alle bovenstaande factoren een rol spelen, maar een aantal is kwalitatief niet goed begrepen (Van Ledden et al., 2003). In dit rapport worden alleen de fysische factoren in beschouwing genomen.

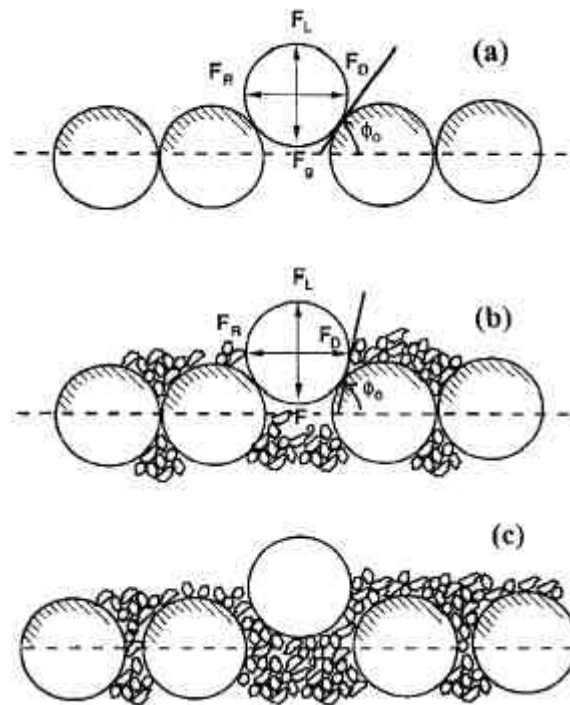
De weerstand tegen erosie van een zandig sediment wordt groter als er slib wordt toegevoegd. Wanneer weinig slib aanwezig is, vullen de fijne korrels slechts deels de poriën tussen de zandkorrels en wordt de verhoogde weerstand vooral veroorzaakt door een hogere interne

wrijvingshoek van het zand (figuur 1b), dat na uitspoeling van het slib gewoon als bedload getransporteerd wordt. Bij voldoende slib (meer dan 30 % (Panagiotopoulos et al., 1997)) kan het sediment cohesief gedrag gaan vertonen, doordat cohesieve deeltjes een matrix vormen die de zandkorrels vasthouden (figuur 1a.). Erosie vindt dan plaats in de vorm van aan elkaar gekleefde brokken sediment die als bedload worden getransporteerd.



Figuur 1: conceptueel model dat het mechanisme toont voor het begin van beweging voor (a): puur zand; (b): mengsels van zand en slib met minder dan 30% slib en (c): mengsels van zand en slib met meer dan 30% slib. (F_0 = hoek van interne wrijving; F_g = gewicht van de korrel; F_L = liftkracht; F_D = sleepkracht; F_R = weerstand; naar Wiberg en Smith, 1987) (Panagiotopoulos et al., 1997)

Door Van Ledden et al. (2003) is classificatiediagram voor het sediment opgesteld met als uitgangspunt de sedimentsamenstelling (figuur 2). Het focus van dit rapport ligt in de linker beneden hoek van het diagram, met zandgehalten van minimaal ongeveer 85%. De sedimenten bevinden zich volgens deze classificatie dus in de zone van niet-cohesief (?) of cohesief (?) zandgedomineerde materiaal.



Figuur 2: Zand-slib-klei driehoek voor cohesie en netwerk structuur. I- niet-cohesief zandgedomineerde, ? - cohesief zandgedomineerde, III- niet-cohesief gemengde, IV- cohesief kleigedomineerde, V- niet-cohesief slibgedomineerde, VI- cohesief slibgedomineerde netwerk structuur (van Ledden et al., 2003).

3. Ruwheidslengte

Om de mate van erosie van een bedding bij bepaalde stromingscondities te voorspellen zijn 2 variabelen belangrijk: de kritieke schuifspanning τ_{cr} en de ruwheidslengte, z_0 .

De ruwheidslengte is een maat voor de ruwheid van het oppervlak en heeft direct invloed op de schuifspanning: hoe gladder het oppervlak, des te kleiner is de schuifspanning die op het oppervlak wordt uitgeoefend onder constante stromingsomstandigheden. Daardoor zal een glad oppervlak minder snel onderhevig zijn aan erosie dan een ruw oppervlak. In het algemeen kan worden gesteld dat de aanwezigheid van slib in een zandige bedding zorgt voor een gladder oppervlak, doordat de fijne deeltjes de poriën tussen de zandkorrels deels opvullen. De kleinschalige ruwheidslengte van een zand-slib mengsel zal daardoor afnemen.

Als eenmaal erosie optreedt, kan echter de ruwheid van het bodemoppervlak met 75 % toenemen doordat relatief grote stukken aan elkaar geplakt sediment aan het oppervlak ontnomen zijn (Soulsby, 1994 in Mitchener en Torfs, 1996). Er bestaat dus een drempelwaarde voor de

schuifspanning voor het begin van erosie, τ_{cr} . Als deze eenmaal is overschreden, kan erosie voortzetten onder een kleinere schuifspanning. Ook kan bij een lagere schuifspanning dan τ_{cr} sedimentatie van het materiaal plaatsvinden. De drempelwaarde voor het begin van erosie is hoger dan die voor depositie. Dat kan gevolgen hebben voor het ontstaan van beddingvormen. Deze worden hier buiten beschouwing gelaten.

Behalve de resultaten van Soulsby (1994) zijn er weinig gegevens van de toename van de ruwheidslengte als functie van de hoeveelheid slib (Mitchener en Torfs, 1996). Wel is er een aantal experimenten gedaan waarbij de kritieke schuifspanning als functie van de hoeveelheid slib is onderzocht (Torfs, 1997; Mitchener en Torfs, 1996; Panagiotopoulos et al., 1997). Daarom wordt in dit rapport verder alleen nog ingegaan op de kritieke schuifspanning.

4. Factoren die van invloed zijn op de kritieke schuifspanning

De kritieke schuifspanning van een sediment is afhankelijk van meerdere factoren. Bij zandige sedimenten is de korrelgrootte van het zand van invloed op de kritieke schuifspanning. Hoe groter de korrels, hoe hoger de kritieke schuifspanning. De toevoeging van slib aan zand zorgt voor een grotere kritieke schuifspanning, afhankelijk van de hoeveelheid en de soort kleimineralen aanwezig.

4.1 De korrelgrootte van zand

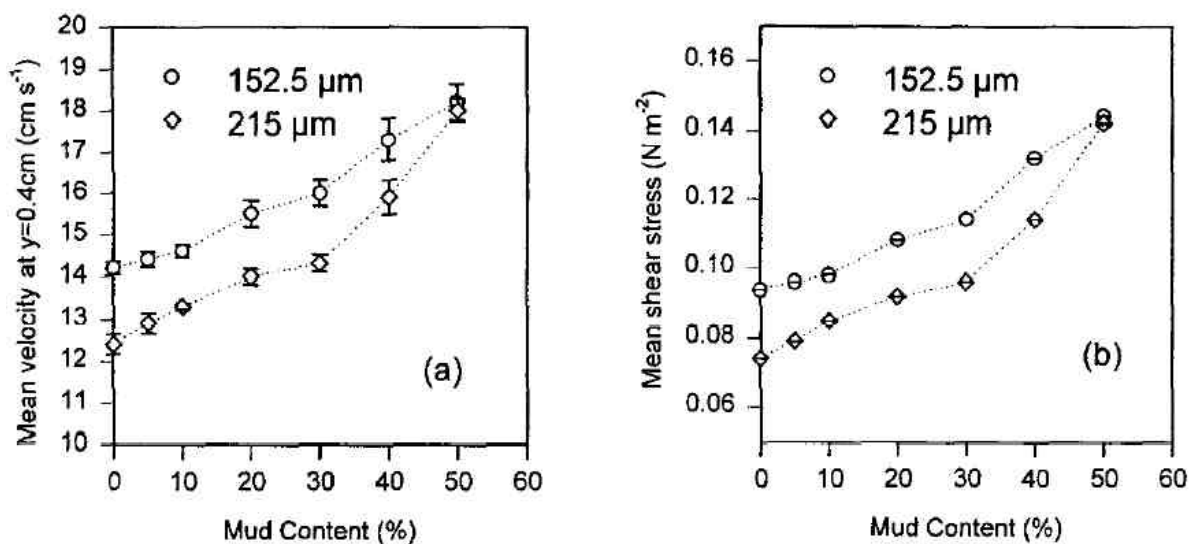
In een puur zandige bedding vindt erosie plaats in de vorm van bodemtransport. Omdat zand niet cohesief is, zijn de krachten die op de korrels werken de zwaartekracht, een liftkracht, een sleepkracht en een weerstand (figuur 1a). Naarmate de korreldiameter groter wordt, neemt de zwaartekracht die op de korrels werkt toe. Daardoor is een grotere sleepkracht nodig om de korrel in beweging te krijgen. In het algemeen kan dus gezegd worden dat de weerstand tegen erosie toeneemt met de korreldiameter.

Panagiotopoulos et al. (1997) onderzochten een aantal mengsels. Deze bestonden uit 2 verschillende homogene zandfracties van 152,2 en 215 μm , en verschillende hoeveelheden van een natuurlijk slib uit het Severn estuarium in Groot Britannië. Ongeveer 36 % van het slib bestond uit klei. Dat bestond uit 56% illiet, 26% ongedefinieerde expansieve kleimineralen, 11%

kaolinite en 7% chloriet. De resultaten zijn weergegeven in tabel 1 en figuur 3. Opvallend is dat het fijnere zand meer weerstand biedt tegen erosie dan het grovere. Dat kan worden verklaard doordat het fijne zand hoekiger was en daardoor de hoek van interne wrijving groter was.

D_{50} zand (μm)	% Slib	h (m)	U_{cr} (m/s)	τ_{cr} (N/m ²)
152,2	0	0,17	14,2	0,094
152,2	5	0,17	14,4	0,096
152,2	10	0,17	14,6	0,098
152,2	20	0,18	15,5	0,108
152,2	30	0,18	16	0,114
152,2	40	0,19	17,3	0,132
152,2	50	0,2	18,2	0,144
215	0	0,16	12,4	0,074
215	5	0,16	12,9	0,079
215	10	0,16	13,3	0,085
215	20	0,17	14	0,092
215	30	0,17	14,3	0,096
215	40	0,18	15,9	0,114
215	50	0,2	18	0,142

Tabel 1: experimentele gegevens met betrekking tot drempelwaarden voor begin van beweging, onder constante stroming. Gemiddelde waterdiepte(h), gemiddelde stroomsnelheid (U) gemeten op 0,4 cm boven de bodem en de berekende gemiddelde schuifspanning op de grens zijn weergegeven. (Panagiotopoulos et al., 1997)



Figuur 3: variatie in de kritieke gemiddelde kritieke stroomsnelheid (a) op 0,4 cm boven de bodem en de kritieke gemiddelde schuifspanning (b) met slibgehalte, voor gemengde sedimenten, onder unidirectionele stroming. De standaarddeviatie is ook weergegeven als een verticale balk. (Panagiotopoulos et al., 1997)

4.2 De hoeveelheid en samenstelling van slib

Sediment vertoont cohesief karakter als het een grenswaarde voor de 'schuifweerstand van omgewerkt sediment' overschrijdt. Dat wil zeggen: als het sediment is gehomogeniseerd en een bepaald watergehalte heeft, moet het sediment ten minste een bepaalde weerstand bieden tegen erosie.

Voor de meeste sedimenten bestaat er een relatie tussen de schuifweerstand van omgewerkt sediment en de vloeibaarheidsindex (LI) (Van Kesteren et al., 1997 in Van Ledden et al., 2003).

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} \quad (1)$$

Of

$$PI = A(p_{cl} - n) \quad (2)$$

waarbij

LI = liquidity index of de vloeibaarheidsindex [fractie],

w = actueel watergehalte [fractie],

PL = plastic limit of plastische grens: de overgang van plastisch naar vast gedrag van een sediment [fractie],

LL = vloeibare grens of liquid limit: de overgang van vloeibaar naar plastisch gedrag van sediment [fractie],

A = de activiteit van de betrokken kleimineralen. Deze is afhankelijk van de CEC (cation exchange capacity) en het relatieve oppervlak van de kleimineralen [-].

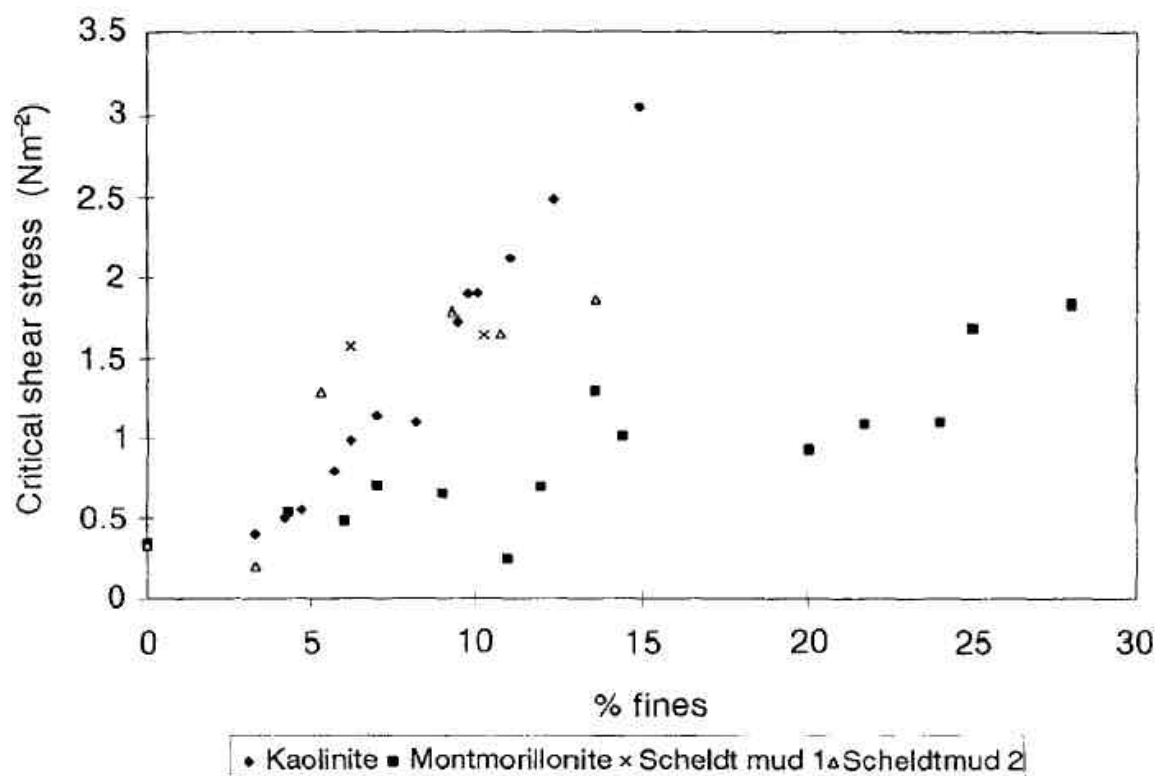
p_{cl} = de hoeveelheid klei aanwezig in het sediment als gehalte van de vaste stof,

n = de 'offset' in kleigehalte: het minimale kleigehalte waarbij sediment plastisch gedrag vertoont [%]. Bij zand-slib mengsels blijkt het meestal te gaan om een kleigehalte van tussen 5 en 10 %.

(Van Ledden et al., 2003)

Uit deze formule blijkt, dat de vloeibaarheidsindex LI en daarmee de schuifweerstand van omgewerkt sediment afhangt van zowel het kleigehalte en activiteit van de kleimineralen, als van de hoeveelheid water in het sediment.

Mitchener en Torfs (1996) onderzochten een aantal mengsels van zand en slib met verschillende percentages en verschillende soorten fijn materiaal. Gegevens van de sedimenteigenschappen van de monsters zijn gegeven in appendix 1. Een deel van de monsters bestond uit zand en kaoliniet en een deel uit zand en montmorilloniet. Ook waren er monsters met 2 soorten natuurlijk slib, afkomstig uit de Schelde, toegevoegd aan homogeen zand. De hoeveelheden slib in de monsters varieerde, terwijl de dichtheid van de vaste massa constant werd gehouden. Uit proeven met deze monsters bleek dat de kritieke schuifspanning van een homogene bedding toeneemt met een toenemend gehalte aan fijn materiaal, en dat deze relatie afhangt van de soort van het cohesieve materiaal (figuur 4). De vorm van de relatie is echter niet goed duidelijk, zeker voor de gehalten fijn materiaal van 2 tot 10 % (Mitchener en Torfs, 1996).



Figuur 4: kritieke schuifspanning voor erosie tegen % fijn materiaal voor verschillende typen cohesief materiaal (Mitchener & Torfs, 1996)

In deze figuur is ook te zien, dat kaoliniet en slib uit de Schelde bij dezelfde gehalten aan fijn materiaal een grotere kritieke schuifspanning veroorzaken dan montmorilloniet. Dat komt doordat

kaolinit een grotere activiteit (A) heeft dan montmorilloniet en doordat het slib uit de Schelde 10 tot 13 % organisch materiaal bevatte . In tabel 2 is dan ook te zien, dat bij een mengsel dat kaolinit bevat reeds bij een lager slibgehalte een overgang plaatsvindt van niet-cohesief naar cohesief gedrag dan een mengsel met montmorilloniet.

Cohesief materiaal	Korrelgrootte (D50) van het gebruikte zand (µm)	Gewichtspercentage slib bij verandering in wijze van erosie (%)	Referentie
Kaolinit	230	3	Torfs, 1995
Montmorilloniet	230	7 - 13	Torfs, 1995
Laponiet klei	120 - 4100	5 - 15	Alvarez-Hernandez, 1990

Tabel 2: slibgehalte (% droog gewicht kleiner dan 62,5 µm) waarbij de manier van erosie verandert van niet-cohesief naar cohesief gedrag, voor verschillende soorten cohesief materiaal, gemengd met zand (Mitchener en Torfs, 1996).

Ook Panagiotopoulos et al. (1997) deden een aantal proeven met mengsels van zand en verschillende hoeveelheden slib. De kenmerken van het zand en het slib zijn beschreven in appendix 1. De slibgehalten in de proeven variëren van 5 tot 50 %. Over de hele meetreeks blijkt zowel de kritieke stroomsnelheid als de kritieke schuifweerstand toe te nemen met een toenemend slibgehalte. Bij een slibgehalte van meer dan 30% lijkt deze toename sterker dan bij een slibgehalte van minder dan 30%. De gevonden waarden voor de kritieke stroomsnelheid en de kritieke schuifspanning als functie van het slibgehalte zijn uitgezet in tabel 1 en figuur 3.

Van Rijn stelde een vergelijking op, waarbij de kritieke schuifspanning lineair afhankelijk is van de wortel van het slibgehalte (persoonlijke referentie Kleinhans):

$$t_{cr} = t_{cr,0} * \sqrt{\%slib} \quad (3)$$

Uit deze vergelijking blijken de cohesieve eigenschappen van het fijne materiaal geen rol van betekenis te spelen.

4.3 Dichtheid van de vaste massa

De dichtheid van de vaste massa van een sediment hangt samen met de pakking of het watergehalte van het sediment. Als sediment kort geleden is afgezet heeft het weinig tijd gehad om te consolideren en zal het relatief veel water bevatten. De afstand tussen de korrels bij een losse pakking is groter dan bij een dichte pakking. Daardoor is de dichtheid van de vaste massa

kleiner en de gevoeligheid voor erosie groter. Als het watergehalte in een zandig sediment een kritieke waarde overschrijdt, raken de zandkorrels elkaar niet meer en gedraagt het sediment zich zelfs als een vloeistof.

Er bestaat een relatie tussen de kritieke schuifspanning en de dichtheid van de vaste massa. Voor zoet water heeft deze de vorm:

$$\tau_{cr} = E_1 (\rho_b - \rho_w)^{E_2} \quad (4)$$

waarin

ρ_b = dichtheid van de vaste massa (kg/m^3);

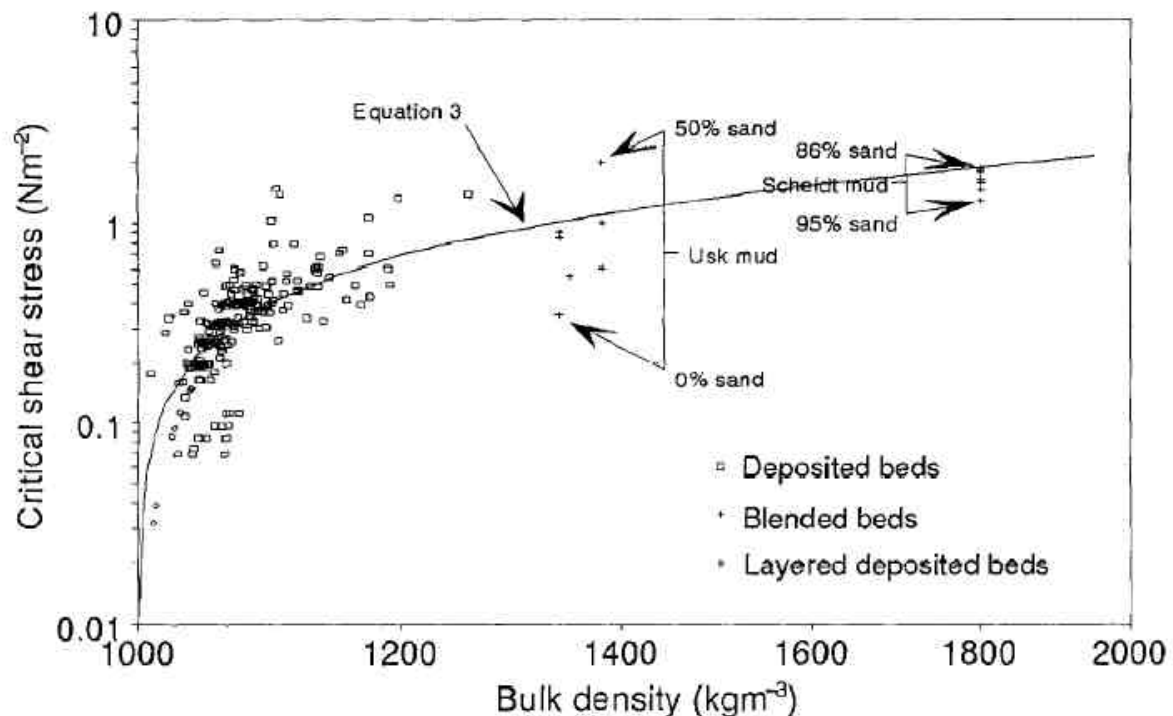
ρ_w = dichtheid van het water;

$E_1 = 0,015$;

$E_2 = 0,73$;

τ_{cr} = kritieke schuifspanning.

(Mitchener en Torfs, 1996)



Figuur 5: kritieke schuifspanning voor erosie tegen dichtheid van de vaste massa voor kunstmatig gevormde sedimentbeddingen (Mitchener en Torfs, 1996)

In figuur 5 is voor kunstmatig gevormde beddingen de relatie tussen de dichtheid van de vaste massa en de kritieke schuifspanning uitgezet. Hoewel de vorm van de relatie verschilt met het slibgehalte en de eigenschappen van het slib, is daar in de figuur geen rekening mee gehouden. Toch is er een relatie af te leiden tussen dichtheid van de vaste massa en kritieke schuifspanning. Bij hoge waarden voor de dichtheid van de vaste massa nadert de kritieke schuifspanning een asymptoot. Dit heeft 2 oorzaken. Ten eerste is het sediment bij hoge dichtheden al sterk geconsolideerd en gecompacteerd, waardoor het cohesieve materiaal een maximale aantrekkingskracht bereikt. Ten tweede hangt bij hoge dichtheden de dichtheid af van het zand gehalte en van de eigenschappen van het zand, zoals mediane korrelgrootte, korrelgrootteverdeling en hoekigheid van de korrels.

De mate waarin het sediment is geconsolideerd is van grote invloed op de dichtheid van de vaste massa. Daarom zijn bij natuurlijke sedimenten, behalve het gehalte en de soort fijn materiaal, de historie van de bedding en de mate van bioturbatie belangrijke factoren bij het bepalen van de kritieke schuifspanning.

Ook de verhouding tussen zand en slib in het sediment is van invloed op de dichtheid van de vaste massa, volgens:

$$\rho_b = 480a_c + (1300 - 200a_c) p_{sa}^{0,8} \quad (5)$$

waarbij

p_{sa} = het gewichtspercentage zand in het sediment en

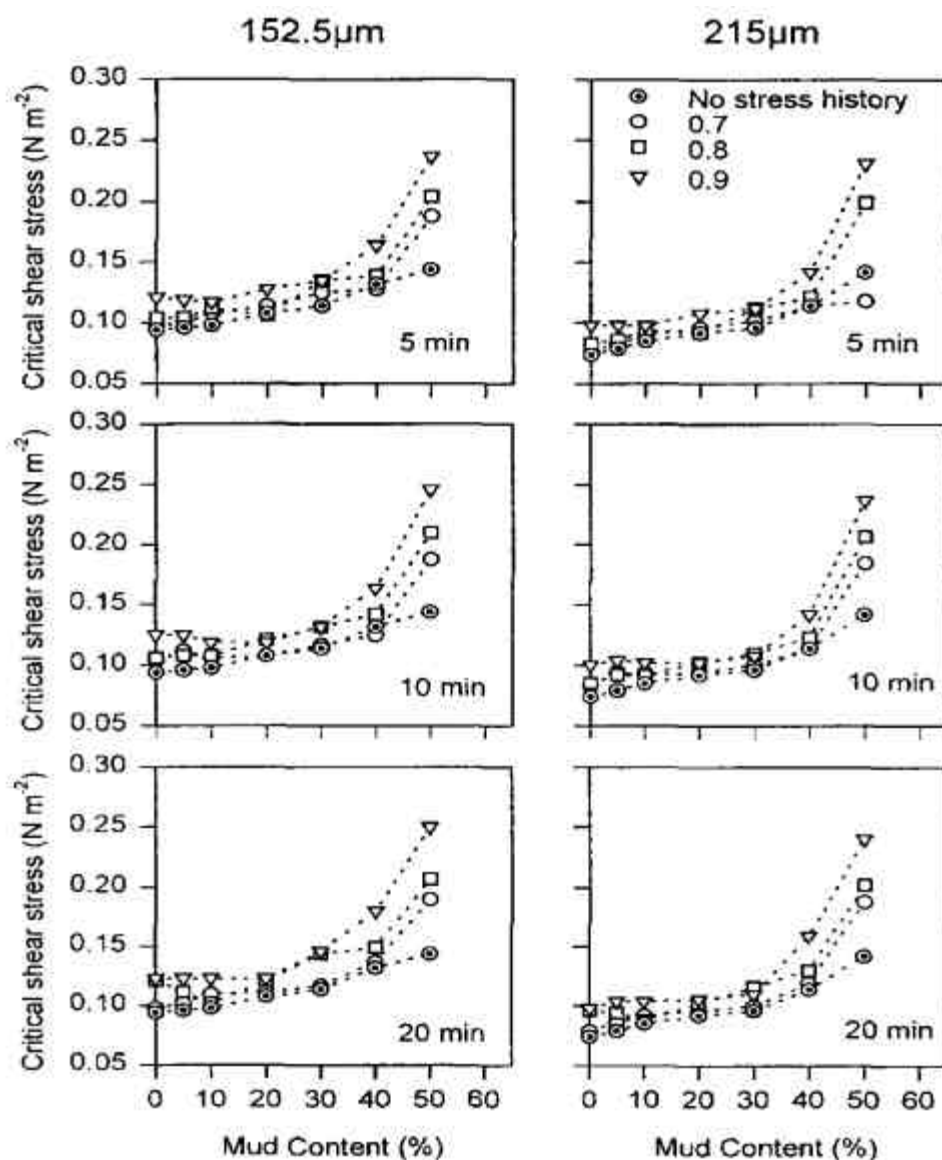
a_c = een consolidatie coëfficiënt. Deze varieert van 0 voor een ongeconsolideerde verse tot 2,4 voor een sterk geconsolideerde bodem (Van Ledden et al., 2003).

4.4 Historie van de bedding

Panagiotopoulos et al. (1997) hebben experimenten uitgevoerd waarbij verschillende mengsels van zand en slib eerst voor een bepaalde tijd werden blootgesteld aan een schuifspanning die lager was dan de (vooraf bepaalde) kritieke schuifspanning voor erosie. Daarna werd de kritieke schuifspanning opnieuw bepaald. Het bleek dat voor ieder mengsel de kritieke schuifspanning toenam naarmate de stroming van tevoren sterker was. Dat komt doordat de fijne deeltjes in de poriën van het zand zijn gaan zitten en zo het bodemoppervlak gladder is geworden. Bovendien

kan de hoek van interne wrijving van het zand op die manier zijn vergroot. De duur van blootstelling aan deze stroming bleek niet van significant belang (figuur 6).

Mitchener en Torfs (1996) constateerden bij experimenten met natuurlijke ongestoorde beddingmonsters echter lagere waarden voor de kritieke schuifspanning dan bij kunstmatig gevormde sedimenten, bij dezelfde dichtheid van de vaste massa. De oorzaak van dit verschil is niet goed bekend. Het is in strijd met de verwachting, omdat natuurlijk sediment meer tijd heeft gehad om te consolideren, door biologische effecten en eventueel door natte en droge perioden.



Figuur 6: Variatie in de kritieke schuifspanning met slibgehalte, voor sedimentmengsels met zanddiameters van 152,5 en 215 μm, na blootstelling aan verschillende stromingssnelheden lager dan de kritieke stroomsnelheid alvorens de kritieke stroomcondities te bereiken (0,7; 0,8 en 0,9 van de oorspronkelijke kritieke waarde) en verschillende duur van de stroming (5, 10 en 20 min.) (Panagiotopoulos et al., 1997).

5 Discussie

De kritieke schuifspanning voor het begin van beweging is afhankelijk van verschillende factoren. Om een kwantitatieve relatie te kunnen ontdekken tussen het slibgehalte en de kritieke schuifspanning moeten de overige factoren zoveel mogelijk worden geëlimineerd. Daarom wordt er gekeken welke factoren van groot belang zijn en welke minder. Een deel van de meetgegevens is afgelezen uit grafieken in de gebruikte literatuur, omdat er geen tabellen voorhanden waren. Dat brengt een onnauwkeurigheid met zich mee.

5.1 De kritieke schuifspanning als functie van de korrelgrootte van zand

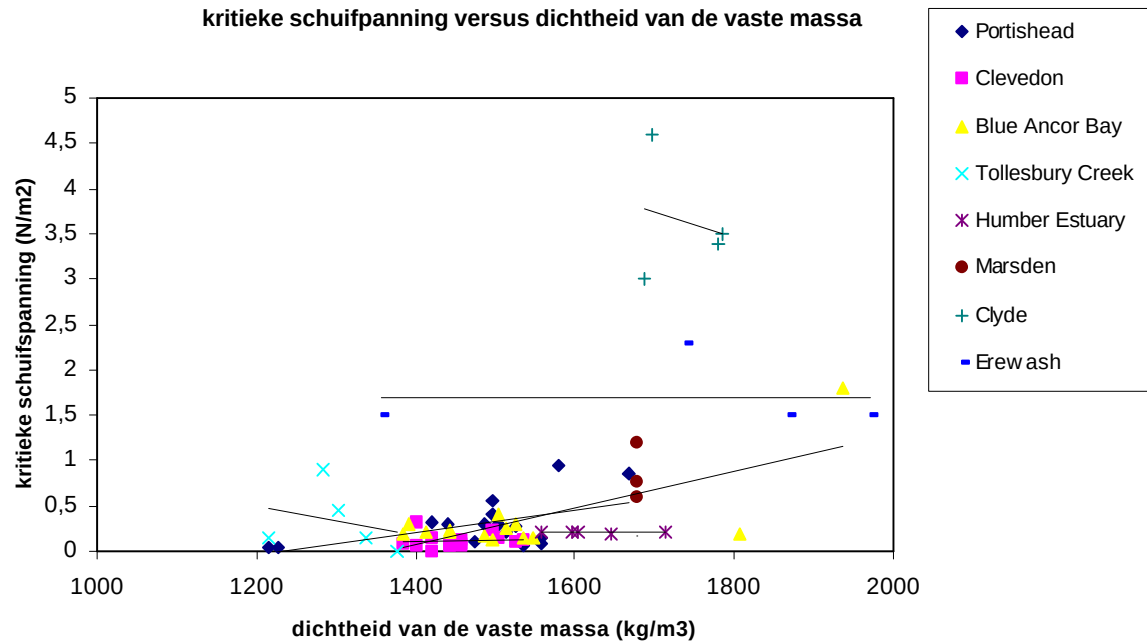
De korrelgrootte van het zand blijkt uit de gegevens geen duidelijke invloed uit te oefenen op de kritieke schuifspanning, omdat er slechts 1 proef is gedaan met 2 verschillende diameters zand, waarvan ook nog de hoekigheid verschilde. Bovendien bleek tegen de verwachting in dat het fijne zand een hogere kritieke schuifspanning tot gevolg had dan het grovere zand.

Door de kritieke schuifspanning uit te zetten in een grafiek en zonodig de trendlijn te extrapoleren tot een slibgehalte van 0 % is voor iedere dataset een kritieke schuifspanningswaarde verkregen indien er 0% slib in het sediment aanwezig zou zijn. Door de kritieke schuifspanning te delen door deze τ_0 -waarde, ontstaat er een dimensieloze parameter, die de invloed van andere parameters, zoals de eigenschappen van het aanwezige zand of het water, uitsluit.

5.2 De kritieke schuifspanning als functie van de dichtheid van de vaste massa

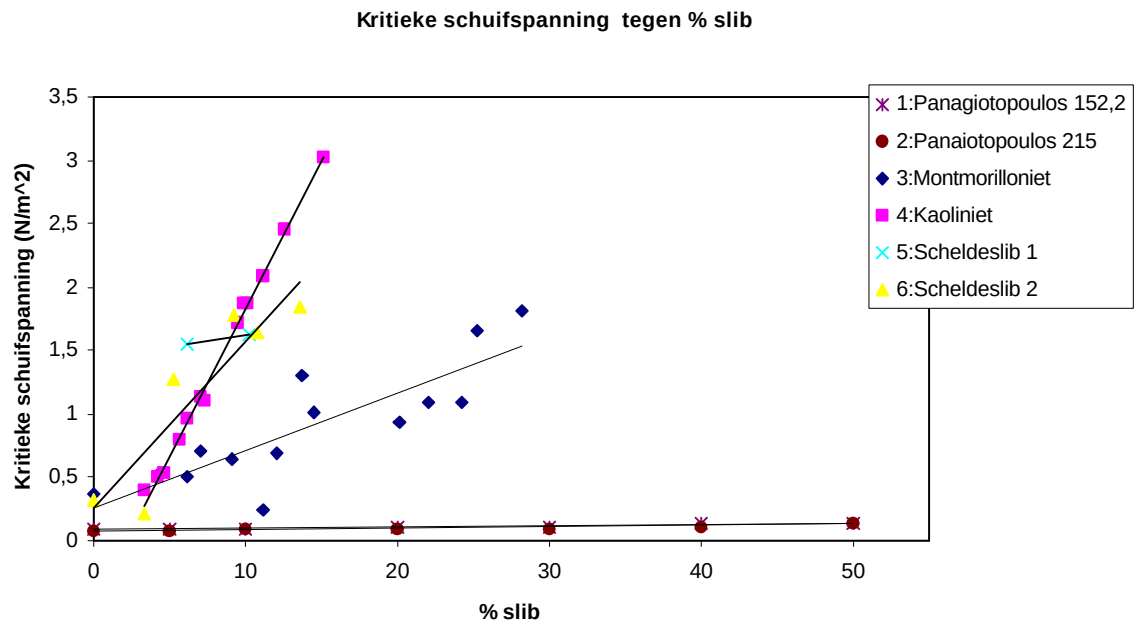
In vergelijking (3) is een relatie gegeven tussen de dichtheid van de vaste massa en de kritieke schuifspanning. Toch is er uit de meetgegevens van datareeksen 7 t/m 14, waarvan dichtheden en kritieke schuifspanningen zijn gemeten, geen duidelijke trend te ontdekken (zie figuur 7). De relatie is voor sommige datareeksen zelfs negatief. Omdat van de meetgegevens de slibgehalten en de consolidatiecoëfficiënt niet bekend zijn, is het helaas niet mogelijk te bepalen welke van deze factoren de belangrijkste is voor de grootte van de dichtheid van de vaste massa. Daardoor kan niet worden bepaald of de trend die kritieke schuifspanning vertoont met de dichtheid van de vaste massa direct bepaald wordt door de dichtheid van de vaste massa, of indirect door het slibgehalte. Ook de relatie tussen de dichtheid en het slibgehalte is niet duidelijk te herleiden uit

de meetreeksen, want bij de reeksen 1 t/m 6 zijn bij verschillende slibgehalten de dichtheden van de mengsels constant.

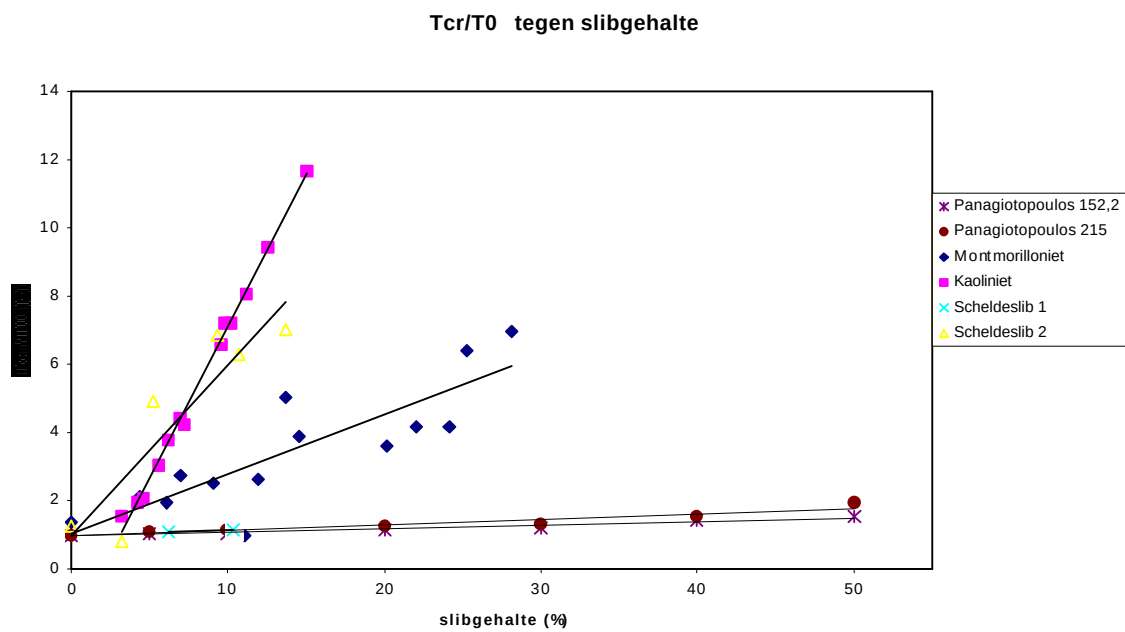


Figuur 7: kritieke schuifspanning als functie van de dichtheid van de vaste massa

In de appendices I en II zijn de eigenschappen van de verschillende datasets uiteengezet. De figuren 7 en 9 laten zien hoe de dimensieloze parameter voor schuifspanning τ_{cr}/τ_{cr0} afhangt van het slibgehalte respectievelijk de dichtheid van de vaste massa.



Figuur 8: τ_{cr} als functie van slibgehalte voor mengsels 1 t/m 6



Figuur 9: τ_{cr}/τ_{cr0} als functie van het slibgehalte voor de mengsels 1 t/m 6

5.3 De kritieke schuifspanning als functie van het slibgehalte

In het algemeen kan uit figuur 9 worden afgeleid dat τ_{cr}/τ_{cr0} mogelijk lineair afhankelijk is van het slibgehalte in het sediment. De sterkte van deze relatie is afhankelijk van de eigenschappen van het gebruikte slib. Van de datareeksen van Mitchener en Torfs (1996) vertoont het mengsel met kaoliniet het sterkste verband van de kritieke schuifspanning met het slibgehalte. Omdat voor dit mengsel geen meting is verricht met 0 % slib, moet τ_{cr0} worden afgeleid uit de trendlijn van figuur 8. In dit geval betekent dat, dat τ_{cr0} negatief zou zijn. Omdat dat niet mogelijk is en ten onrechte een negatief verband zou geven voor τ_{cr}/τ_{cr0} met het slibgehalte, is het aannemelijk dat τ_{cr} anders afhangt van het slibgehalte bij minder dan 5 % slib, zoals getoond in tabel 2.

Wanneer het kaoliniet mengsel met minder dan 5 % en met meer dan 5 % slib afzonderlijk worden geplot (figuur 10), is duidelijk te zien dat het mengsel met weinig slib een positief intercept heeft met de τ_{cr} -as, namelijk 0,0469. Als deze waarde wordt aangenomen als T_{cr0} , verandert de relatie van het slibgehalte en τ_{cr}/τ_{cr0} in een positieve.

Omdat voor de datareeksen 3 tot en met 6 hetzelfde zand is gebruikt, is het aannemelijk dat de τ_0 -waarden van deze reeksen weinig van elkaar verschillen. Om de τ_{cr}/τ_{cr0} -waarden te berekenen is voor de datareeksen 4 en 5 een τ_0 -waarde gekozen die ligt tussen het intercept van reeks 3 en dat van reeks 6: $\tau_0 = 0,26$.

Met behulp van de meetgegevens uit appendix II is het mogelijk een eenvoudige empirische vergelijking op te stellen voor de kritieke schuifspanning als functie van het slibgehalte in het sediment. Deze heeft de vorm:

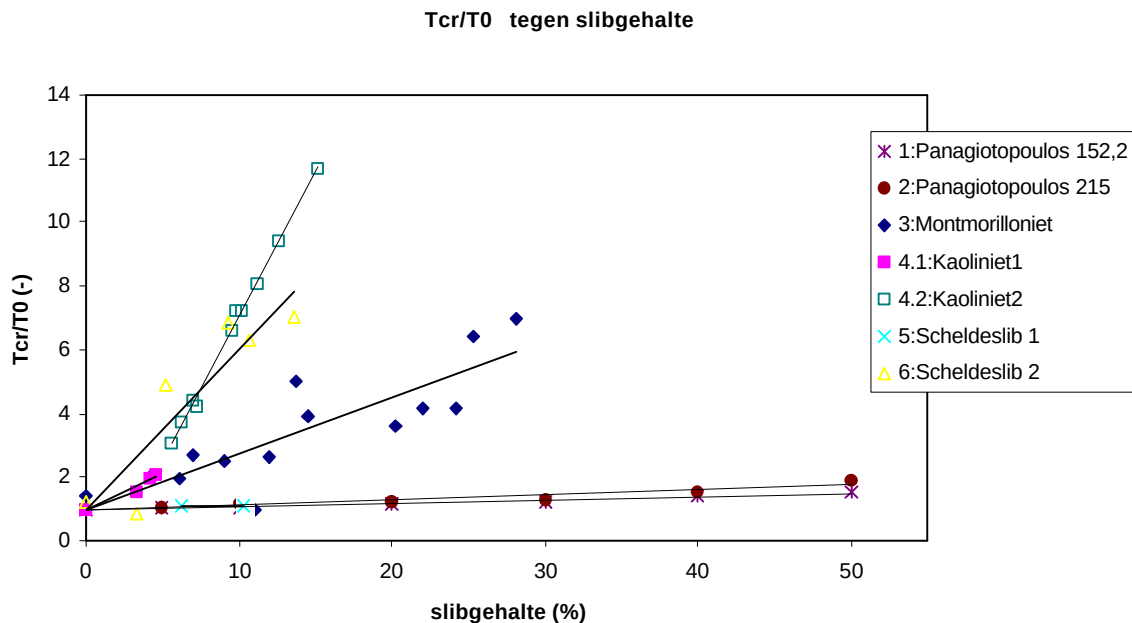
$$\tau_{cr}/\tau_0 = n * p_{si} + 1 \quad (6)$$

waarbij p_{si} = het slibgehalte [%] en

n = een waarde voor de eigenschappen van het slib in het mengsel.

De waarden voor n zijn af te lezen uit de regressielijnen van de functies, en uitgezet in tabel 3. Bij het mengsel met kaoliniet is de vergelijking (6) alleen toe te passen tot een slibgehalte van ongeveer 5 %, zoals te zien is in figuur 10. Er is daarbij voor 0 % slib een τ_{cr} -waarde van 0,26 ingevuld, hoewel dat niet gemeten is.

Bij hogere slibgehalten voor mengsel 4 geldt dit verband niet.



Figuur 10: τ_{cr}/τ_{cr0} als functie van het slibgehalte voor de mengsels 1 t/m 6, met onderscheid tussen meer en minder dan 5 % slib voor mengsel 4 (kaolinet)

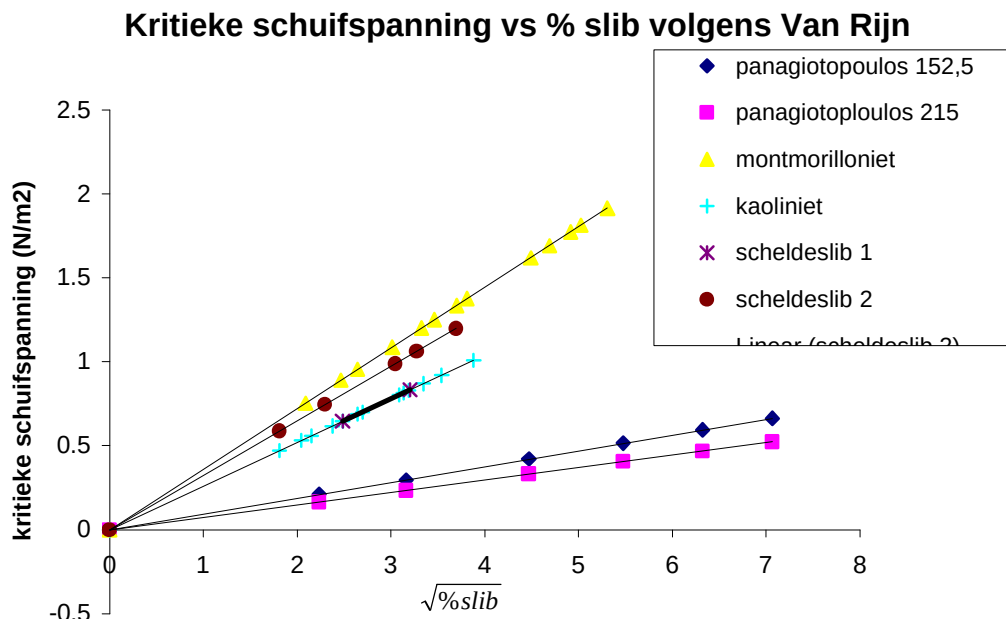
serie	n
1	0,0108
2	0,0163
3	0,1745
4a	0,2259
5	0,0122
6	0,5008

Tabel 3: waarden voor n voor de mengsels 1 t/m 6.

5.4 De kritieke schuifspanning als functie van de slibsamenvoeging

De vorm van de vergelijking voor de dimensieloze kritieke schuifspanning is voor ieder mengsel gelijk. De grootte van de toename van τ_{cr}/τ_0 is echter afhankelijk per mengsel verschillend en afhankelijk van de eigenschappen van het slib. Opvallend is de sterke trend voor het kaolinet-mengsel (4) en mengsel 6 met slib uit de Schelde, zoals reeds besproken in paragraaf 4.2.

De mengsels van Panagiotopoulos et al (1997) vertonen onderling weinig verschil wanneer de invloed van de kenmerken van het zand zijn weg gefilterd. De verschillen tussen de mengsels in figuur 2 werden dus inderdaad veroorzaakt door verschillende eigenschappen van de gebruikte zandmengsels.



Figuur 11: Voorspelde waarden voor τ_{cr} als functie van het slibgehalte.

Hetzelfde kan worden geconcludeerd uit het model van Van Rijn (vergelijking 3). Volgens deze methode zijn de voorspelde waarden voor de kritieke schuifspanning in figuur 11 uitgezet tegen de wortel van het slibgehalte in %. De sterkte van de toename is per mengsel verschillend, afhankelijk van $t_{cr,0}$. Voor datareeks 4 en 5: het mengsel met kaoliniet en het mengsel met scheldeslib 1, is deze waarde op 0,26 geschat, zoals reeds is uitgelegd. Daardoor vertonen beide reeksen in de methode van Van Rijn hetzelfde verband tussen de kritieke schuifspanning en het slibgehalte.

Wanneer bij bekende slibgehalten de gemeten kritieke schuifspanning wordt vergeleken met de voorspelde waarden volgens de methode van Van Rijn, zijn de volgende conclusies te trekken:

- Alle trendlijnen in figuur 11 gaan door de oorsprong, op een enkele kleine afwijking na. Dat wil zeggen dat volgens de methode van Van Rijn alle mengsels een kritieke schuifspanning van 0 N/m^2 hebben bij een slibgehalte van 0 %. Dit is al af te leiden uit vergelijking (3). Echter, in dezelfde vergelijking staat dat het verband tussen de kritieke

schuifspanning en het slibgehalte afhangt van $t_{cr,0}$. Als deze per definitie 0 zou zijn, zou er geen verband kunnen bestaan.

- De door de Van Rijn methode voorspelde waarden voor t_{cr} zijn het hoogst voor het mengsel met montmorilloniet. Dit klopt niet met de gemeten t_{cr} waarden. Deze blijken bij de mengsels met kaolinit en scheldeslib 2 hoger bij een gegeven slibgehalte dan bij het mengsel met montmorilloniet. Dat komt, doordat gemeten waarden voor $t_{cr,0}$ zijn gebruikt. Deze waarde is voor het montmorilloniet mengsel toevallig hoog uitgevallen. Daardoor stijgt de kritieke schuifspanning volgens Van Rijn sterker met het slibgehalte dan bij de andere mengsels. Wanneer geen gemeten $t_{cr,0}$ waarden worden gebruikt, maar waarden zoals afgeleid uit de trendlijnen van figuur 8, blijken de mengsels 3 t/m 6 (van Mitchener & Torfs, 1996) volgens vergelijking (3) allemaal dezelfde waarde voor t_{cr} te voorspellen bij een gegeven slibgehalte. De waarden voor mengsel 1 en mengsel 2 verschillen wel. Dit is in overeenstemming met het feit dat voor de mengsels 3 t/m 6 hetzelfde zand is gebruikt en voor de mengsels 1 en 2 niet.

Geconcludeerd kan worden dat vergelijking 6 alleen rekening houdt met de eigenschappen van het zand en het slibgehalte. De eigenschappen van het slib, zoals de mate van cohesie, worden niet in de vergelijking meegenomen. Uit figuur 8 blijkt dat deze eigenschappen wel degelijk van belang zijn voor het beschrijven van de relatie tussen de kritieke schuifspanning en het slibgehalte.

5.5 Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de functies varieert van $R^2 = 0,72$ voor mengsel 3 tot $R^2 = 0,996$ voor mengsel 4 met meer dan 5 % slib. De nauwkeurigheid van mengsel 4 bij minder dan 5 % is gemiddeld, met R^2 is bijna 95 %. Wanneer echter de niet gemeten waarde voor 0 % slib wordt weggelaten, vertoont dit mengsel ook bij een laag percentage slib een nauwkeurigheid van meer dan 99 %. De waarde voor τ_{cr}/τ_{cr0} valt dan veel lager uit, namelijk 0,18 in plaats van 1.

Theoretisch gezien is 1 het juiste intercept voor de vergelijking, omdat de τ_{cr} -waarde voor 0% slib per definitie gelijk is aan de τ_{cr0} -waarde. Indien gekeken wordt naar de nauwkeurigheid van de functie is er reden om aan te nemen dat de lineaire vergelijking 5 niet opgaat voor mengsel 4, en dat er ofwel een niet-lineaire functie geldt, of een knikpunt bij ongeveer 3 % slib (zie tabel 2). Dit bevestigt de stelling van Mitchener en Torfs (1996) dat er bij 3 % kaolinit een overgang

plaatsvindt van niet cohesief naar cohesief gedrag. Om de exacte vorm van de vergelijking te onderzoeken zijn meer meetgegevens nodig met tussen 0 en ongeveer 6 % slib.

5.6 De overgang van niet-cohesief naar cohesief

Voor mengsel 4 is uit figuur 10 een overgang af te leiden bij 3 % slib, zoals verwacht wordt uitgaande van tabel 2. Voor de overige mengsels is, uitgaande van figuur 10, geen reden om aan te nemen dat er een overgang van niet-cohesief naar cohesief gedrag plaatsvindt bij overschrijding van een bepaald gehalte aan slib, zoals Mitchener en Torfs (1996) in tabel 2 beweren. Ook is in deze figuur niet een duidelijke overgang in gedrag te zien bij een slibgehalte van 30 % (5-10% klei), zoals Panagiotopoulos et al. (1997) noemden: een lineaire trendlijn door alle meetpunten geeft een nauwkeurigheid van meer dan 90 %. Indien er onderscheid gemaakt wordt tussen meer en minder dan 30 % slib, stijgt de nauwkeurigheid wel tot meer dan $R^2 = 96\%$ voor minder dan 30 % slib en meer dan $R^2 = 98\%$ voor meer dan 30 %. De meetreeksen bestaan echter slechts uit 3 tot 5 meetgegevens, en R^2 wordt altijd groter bij afnemend aantal metingen. De bewering dat het gedrag van de mengsels bij 30 % slib verandert is met behulp van deze gegevens dus niet te verdedigen. Om bij kleine meetreeksen zoals deze toch zinnige uitspraken te doen over de nauwkeurigheid zou statistiek kunnen worden gebruikt, bijvoorbeeld een F-test.

5.7 Natuurlijke sedimenten

Bij experimenten met ongestoorde natuurlijke sedimenten valt op dat de kritieke schuifspanning lager is bij dezelfde dichtheid van de vaste massa, terwijl de bodem meer tijd gehad heeft om te consolideren dan bij de kunstmatig gevormde bodems. (Mitchener en Torfs, 1996). Wanneer natuurlijke sedimenten in beschouwing worden genomen spelen veel meer factoren dan de ruwheidslengte en de kritieke schuifspanning een rol. Dat kunnen chemische en biologische factoren zijn, in combinatie met de historie van de bedding. Er kunnen lokale factoren een rol spelen, door bijvoorbeeld compactie van de bedding als gevolg van biologische of chemische concreties en bindingen. De rol van deze factoren is per bedding verschillend en is in dit rapport niet verder beschreven.

6 Conclusies

De meeste onderzochte mengsels gedragen zich over de hele meetreeks niet cohesief. De toenemende weerstand die het mengsel tegen erosie biedt als gevolg toevoeging van slib wordt veroorzaakt door een toename in de interne hoek van wrijving. Hoe veel de weerstand toeneemt met een bepaalde hoeveelheid slib is afhankelijk van de hoeveelheid en de soort kleimineralen die het slib bevat. Alleen bij mengsel 4, waarbij het slib kaoliniet bevatte, is een verandering in gedrag op te merken bij een slibgehalte van 3%.

Voor het bepalen van de mate van erosie zijn 2 factoren van belang: de ruwheidslengte en de kritieke schuifspanning. De ruwheidslengte wordt meestal niet gemeten bij experimenten voor erosie.

Factoren die van invloed zijn op de waarde voor de kritieke schuifspanning zijn:

- het slibgehalte. Dit blijkt de belangrijkste factor. Voor toename van de kritieke schuifspanning met slibgehalte is een lineaire functie opgesteld: $\tau_{cr}/\tau_0 = n * p_{si} + 1$. Daarbij zijn de overige factoren geëlimineerd of constant verondersteld. Deze functie lijkt voor de meeste mengsels te gelden vanaf 0 % tot maximaal 50 % slib. Met overgangen van niet-cohesief naar cohesief gedrag is daarbij geen rekening gehouden.. De waarden van n zijn voor de mengsels 1 t/m 6 weergegeven in tabel 3.
- de korrelgrootte van zand. In het algemeen neemt de weerstand tegen erosie en daarmee de kritieke schuifspanning toe met een grotere korreldiameter, als gevolg van een groter gewicht van de korrels. Uit de gegevens blijkt deze relatie niet duidelijk naar voren te komen.
- de dichtheid van de vaste massa. In het algemeen neemt de kritieke schuifspanning toe met de dichtheid van de vaste massa volgens.

$$T_{cr} = E_1 (\gamma_b - \gamma_w)^{E_2}.$$

De dichtheid van de vaste massa is afhankelijk is van het slibgehalte en de mate van consolidatie van het sediment. Daardoor is het niet de belangrijkste factor.

- de historie van de bedding: als de bedding gedurende enige tijd wordt blootgesteld aan stromingscondities lager dan de drempelwaarde voor erosie, wordt de kritieke schuifspanning hoger.

Natuurlijke beddingen vertonen andere waarden voor de kritieke schuifspanning bij dezelfde stromingscondities dan kunstmatig gevormde beddingen. Dat komt, doordat bij natuurlijke beddingen ook andere, niet onderzochte factoren een rol spelen.

7 Aanbevelingen

In de natuur komen slibgehalten van 2 tot 10 % regelmatig voor in estuaria en ondiepe shelfsystemen. De bestudeerde literatuur bevat echter slechts een paar meetgegevens met slibgehalten tussen 2 en 5 % en geen meetresultaten met een slibgehalte tussen 0 en 2 %. Om te zien of er bij 2 % slib een verandering in gedrag optreedt, zouden monsters met 0 tot 5 % slib onderzocht kunnen worden.

Omdat voor het proces van erosie behalve de kritieke schuifspanning ook de ruwheidslengte van belang is, verdient het aanbeveling om ook deze in volgend onderzoek te betrekken. De drempelwaarde die de ruwheidslengte veroorzaakt, kan interessante gevolgen hebben voor de morfologie van de bedding en daardoor voor de mate van erosie.

Literatuur

Mitchener, H. en Torfs, H., 1996. Erosion of mud/sand mixtures. Coastal Engineering 29: 1-25

Panagiotopoulos, I., Voulgaris, G. en Collins, M.B., 1997. The influence of clay on the threshold of movement of fine sandy beds. Coastal Engineering 32: 19-43

Torfs, H., Mitchener, H., Huysentruyt, H. en Toorman, E., 1996. Settling and consolidation of mud/sand mixtures. Coastal Engineering 29: 27-45

Torfs, H., 1997. Erosion of mixed cohesive/non-cohesive sediments in uniform flow. Katholieke Universiteit Leuven, Leuven

Van Ledden, M., Van Kesteren, W.G.M. en Winterwerp, J.C., 2003. A conceptual framework for the erosion behavior of sand-mud mixtures. Continental Shelf Research 24: 1-11

Van Ledden, M., Wang, Z.B., Winterwerp, H. en De Vriend, H., 2003. Sand-mud morphodynamics in a short tidal basin. Ocean Dynamics (2003): 1-7

Appendix 1: seriegegevens

serie	auteur	D50 zand (µm)	eigenschappen van het slib	Trendlijn T_{cr}/T_0 vs %slib (Psi)	n-waarde voor vergelijking (5)	R^2 bij T_{cr}/T_0 vs %slib	Trendlijn t_{cr} vs τ_b
1	Panagiotopoulos et al., 1997	152,2	natuurlijk estuarium-slib, 36%klei, waarvan 56% illiet, 26% ongedefinieerde expansieve kleien, 11% kaoliniet en 7%chloriet	$t_c = 0,0108 \text{ Psi} + 0,9564$	0,0108	0,9637	
2	Panagiotopoulos et al., 1997	215	idem	$t_c = 0,0163 \text{ Psi} + 0,9558$	0,0163	0,9122	
3	Mitchener en Torfs, 1996	230	montmorilloniet, kunstmatig gemengd	$t_c = 0,1745 \text{ Psi} + 1,0001$	0,1745	0,7162	
4	Mitchener en Torfs, 1996	230	kaoliniet, kunstmatig gemengd	$t_c = -1,354 \text{ Psi} + 2,7712$		0,9953	
4a	Mitchener en Torfs, 1996	230	kaoliniet, kunstmatig gemengd, t/m 5 %slib, inclusief (0; 0,26)	$t_c = 0,2259 \text{ Psi} + 0,9549$	0,2259	0,946	
4b	Mitchener en Torfs, 1996	230	kaoliniet, kunstmatig gemengd, vanaf 5 % slib	$t_c = 0,9125 \text{ Psi} - 2,062$		0,9961	
5	Mitchener en Torfs, 1996	230	scheldeslib 1, kunstmatig gemengd, natuurlijk slib uit intergetijdezone	$t_c = 0,0122 \text{ Psi} + 1$	0,0122	1	
6	Mitchener en Torfs, 1997	230	scheldeslib 2, kunstmatig gemengd, natuurlijk slib uit subgetijdezone	$t_c = 0,5008 \text{ Psi} + 0,9999$	0,5008	0,8227	
7	Portishead		natuurlijk ongestoord sediment, uit estuariene intergetijdezone				$t_c = 0,0013 * \tau_b - 1,5803$
8	Clevedon		natuurlijk ongestoord sediment, uit estuariene intergetijdezone				$t_c = 8E-5 * \tau_b + 0,018$
9	Blue Anchor Bay		natuurlijk ongestoord sediment, uit estuariene intergetijdezone				$t_c = 0,02 * \tau_b - 2,7135$
10	Tollesbury		natuurlijk ongestoord sediment, uit estuariene intergetijdezone				$t_c = -0,0017 * \tau_b + 2,5207$
11	Humber Est.		natuurlijk ongestoord sediment, uit estuariene intergetijdezone				$t_c = -2E-5 * \tau_b + 0,2365$
12	Marsden		natuurlijk ongestoord sediment, uit estuariene intergetijdezone				$t_c = 0,0919 * \tau_b - 153,25$
13	Clyde		natuurlijk ongestoord sediment, uit estuariene subgetijdezone				$t_c = -0,0028 * \tau_b + 8,534$
14	Erewash		natuurlijk ongestoord sediment, uit rivier				$t_c = 2E-5 * \tau_b + 1,6716$

Appendix II: meetgegevens per serie

serie	% slib	t_{cr} (N/m ²)	h (m)	γ_b (kg/m ³)	γ_o (N/m ²)	t_{cr} / t_o
1	0	0,094	0,17		0,094	1,00
	5	0,096	0,17		0,094	1,02
	10	0,098	0,17		0,094	1,04
	20	0,108	0,18		0,094	1,15
	30	0,114	0,18		0,094	1,21
	40	0,132	0,19		0,094	1,40
	50	0,144	0,2		0,094	1,53
2	0	0,074	0,16		0,074	1,00
	5	0,079	0,16		0,074	1,07
	10	0,085	0,16		0,074	1,15
	20	0,092	0,17		0,074	1,24
	30	0,096	0,17		0,074	1,30
	40	0,114	0,18		0,074	1,54
	50	0,142	0,2		0,074	1,92
3	0	0,361	0,4	1850	0,2592	3,86
	4,364	0,541	0,4	1850	0,2592	5,79
	6,091	0,505	0,4	1850	0,2592	5,40
	7	0,704	0,4	1850	0,2592	7,52
	9,091	0,649	0,4	1850	0,2592	6,94
	11,09	0,253	0,4	1850	0,2592	2,70
	12	0,686	0,4	1850	0,2592	7,33
	13,73	1,299	0,4	1850	0,2592	13,89
	14,55	1,010	0,4	1850	0,2592	10,80
	20,18	0,938	0,4	1850	0,2592	10,03
	22	1,082	0,4	1850	0,2592	11,57
	24,18	1,082	0,4	1850	0,2592	11,57
	25,27	1,660	0,4	1850	0,2592	17,75
	28,18	1,804	0,4	1850	0,2592	19,29
4	3,273	0,397	0,4	1850	-0,4735	-2,32
	4,182	0,505	0,4	1850	-0,4735	-2,96
	4,636	0,541	0,4	1850	-0,4735	-3,17
	5,636	0,794	0,4	1850	-0,4735	-4,65
	6,182	0,974	0,4	1850	-0,4735	-5,70
	7	1,137	0,4	1850	-0,4735	-6,65
	7,273	1,101	0,4	1850	-0,4735	-6,44
	9,545	1,714	0,4	1850	-0,4735	-10,03
	9,818	1,876	0,4	1850	-0,4735	-10,98
	10,18	1,876	0,4	1850	-0,4735	-10,98
	11,18	2,093	0,4	1850	-0,4735	-12,25
	12,55	2,454	0,4	1850	-0,4735	-14,36
	15,09	3,031	0,4	1850	-0,4735	-17,74
5	6,182	1,552	0,4	1850	1,4425	2,98
	10,27	1,624	0,4	1850	1,4425	3,12
6	0	0,325	0,4	1850	0,2614	3,44
	3,273	0,216	0,4	1850	0,2614	2,30
	5,273	1,281	0,4	1850	0,2614	13,58
	9,273	1,786	0,4	1850	0,2614	18,94
	10,73	1,642	0,4	1850	0,2614	17,41

	13,64	1,840	0,4	1850	0,2614	19,51
serie	% slib	t_{cr} (N/m ²)	h (m)	γ_b (kg/m ³)	γ_o (N/m ²)	t_{cr} / t_o
7		0,050		1215	-1,5803	-0,25
		0,041		1215	-1,5803	-0,44
		0,320		1422	-1,5803	-0,32
		0,300		1439	-1,5803	-0,57
		0,110		1474	-1,5803	-1,08
		0,300		1487	-1,5803	-1,27
		0,560		1496	-1,5803	-1,39
		0,400		1496	-1,5803	-1,39
		0,300		1504	-1,5803	-1,52
		0,300		1504	-1,5803	-1,52
		0,220		1513	-1,5803	-1,65
		0,270		1526	-1,5803	-1,84
		0,070		1535	-1,5803	-1,96
		0,160		1557	-1,5803	-2,28
		0,080		1557	-1,5803	-2,28
		0,950		1578	-1,5803	-2,59
		0,850		1667	-1,5803	-0,82
8		0,090		1385	0,018	266,67
		0,070		1400	0,018	0,00
		0,320		1400	0,018	0,00
		0,005		1422	0,018	27,78
		0,150		1422	0,018	27,78
		0,058		1443	0,018	55,56
		0,075		1443	0,018	55,56
		0,075		1457	0,018	72,22
		0,090		1457	0,018	72,22
		0,130		1457	0,018	72,22
		0,230		1496	0,018	122,22
		0,150		1504	0,018	133,33
		0,100		1526	0,018	161,11
		0,120		1535	0,018	172,22
9		0,190		1385	-2,7135	-1,77
		0,300		1392	-2,7135	-1,84
		0,210		1413	-2,7135	-0,11
		0,220		1443	-2,7135	-0,37
		0,230		1443	-2,7135	-0,37
		0,180		1487	-2,7135	-0,74
		0,130		1496	-2,7135	-0,81
		0,410		1504	-2,7135	-0,88
		0,260		1513	-2,7135	-0,96
		0,310		1526	-2,7135	-1,07
		0,140		1535	-2,7135	-1,14
		0,150		1548	-2,7135	-1,25
		0,200		1806	-2,7135	-0,04
		1,800		1937	-2,7135	-0,88
10		0,150		1215	2,5207	0,16

De invloed van slib in zand op erosie , Lobke Haaring

0,900	1285	2,5207	0,87
0,440	1304	2,5207	1,07
0,160	1338	2,5207	1,43
0,004	1377	2,5207	1,82

serie	% slib	t_{cr} (N/m ²)	h (m)	γ_b (kg/m ³)	γ_o (N/m ²)	t_{cr} / t_o
11		0,220		1557	0,2365	15,22
		0,210		1596	0,2365	19,03
		0,210		1605	0,2365	0,42
		0,190		1646	0,2365	3,81
		0,220		1713	0,2365	9,30
12		0,600		1677	-153,25	-0,01
		0,780		1677	-153,25	-0,01
		1,200		1677	-153,25	-0,01
		14,000		1842	-153,25	0,00
		18,000		1842	-153,25	0,00
13		3,000		1742	8,534	0,20
		4,600		1758	8,534	0,22
		3,400		1892	8,534	0,41
		3,500		1900	8,534	0,42
14		1,500		1358	1,6716	2,45
		2,300		1738	1,6716	1,62
		1,500		1869	1,6716	0,72
		1,500		1971	1,6716	1,79