

KW-SEK - 527
Coens - 1989


TU Delft

Katholieke Universiteit Leuven
Faculteit Toegepaste Wetenschappen
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Laboratorium voor Hydraulica

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Kustwaterbouwkunde

Erosiegedrag van zand-slibmengsels onder invloed van stroming.

Eindwerk
Academiejaar 1988-1989

JOACHIM COENS
HILDE TORFS




TU Delft

Katholieke Universiteit Leuven
Faculteit Toegepaste Wetenschappen
Departement Burgerlijke Bouwkunde
Laboratorium voor Hydraulica

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Sectie Kustwaterbouwkunde

Erosiegedrag van zand-slibmengsels onder invloed van stroming.

Eindwerk
Academiejaar 1988-1989

JOACHIM COENS
HILDE TORFS

And take upon's the mystery of things,
As if we were God's spies.

Shakespeare King Lear V,3

...een bibliotheek op te bouwen die geen andere grenzen kent
dan de wereld zelf.

Erasmus. Spreuken(1508)

VOORWOORD

Dit afstudeerwerk kwam tot stand dankzij het "Erasmus-programma" van de Europese gemeenschap.

Meer in het bijzonder dankzij de samenwerking van de Katholieke Universiteit Leuven met de Technische Universiteit Delft.

Wij wensen allen te danken die zowel deze samenwerking, als dit afstudeerwerk mogelijk maakten.

In het bijzonder

Professor dr. ir. J.Berlamont

Professor dr. ir. E.W.Bijker

ir. E.T.J.M. van der Velden

Wij hopen dat deze Europese samenwerking in de toekomst verder de horizon van de menselijke kennis zal verruimen.

Joachim Coens

Hilde Torfs

VOORWOORD

INHOUDSTAFEL

LIJST DER GEBRUIKTE SYMBOLEN

INLEIDING	6
Hoofdstuk I EIGENSCHAPPEN VAN ZAND EN SLIB	8
1.1 Inleiding	9
1.2 Eigenschappen van zand	10
1.2.1 Beweging van zand	10
1.2.2 De sleepspanning en het sleepvermogen	12
1.2.3 De verschillende beddingsvormen	14
1.2.4 Theoretische snelheids- en concentratieverdeling	15
1.2.5 Transportformule	16
1.3 Eigenschappen van slib	19
1.3.1 Definitie van slib	19
1.3.2 Fysisch chemische eigenschappen	19
1.3.3 Rheologie	21
1.3.4 Erosiegedrag	22
Hoofdstuk II DE MEETOPSTELLING	24
2.1 Inleiding	25
2.2 Stroomgoot	26
2.3 Materialen	29
2.3.1 Zand	29
2.3.2 Kaoliniet	29
2.3.3 Haaftense klei	31
2.3.4 Mengsels	33
2.4 Concentratiemetingen	35
2.4.1 Afzuigapparaat	35
2.4.2 Onderwaterweegschaal	35
2.4.3 Filterapparatuur	36

2.5	Snelheidsmetingen	38
2.5.1	Laboratoriummolen	38
2.5.2	EMS	39
2.5.3	Pitotbuis	41
2.6	Vervalmetingen	42
Hoofdstuk III	PROEVEN	43
3.1	Inleiding	44
3.2	Klassificatie van de proeven	46
3.3	Vragen en antwoorden in verband met de proeven	51
3.3.1	De snelheidsmeting	51
3.3.2	Het meten van de schuifspanning	54
3.3.3	De concentratiemetingen	62
3.3.4	Het mengen en consolideren van het mengsel	65
Hoofdstuk IV	RESULTATEN	67
4.1	Inleiding	68
4.2	Algemeen	69
4.3	Sedimenttransport	76
4.4	Schuifspanningen	81
4.5	Waarnemingen	84
Hoofdstuk V	BESLUITEN	87
	LITERATUUROVERZICHT	90
	APPENDIX	

LIJST DER GEBRUIKTE SYMBOLEN

- A oppervlakte van de dwarsdoorsnede van de meetsectie
 A_b : oppervlakte van de bodemdoorsnede
 A_w : oppervlakte van de wanddoorsnede
- b breedte van de dwarsdoorsnede
- C constante van Chézy
 C_{90} : Chézy constante berekend met d_{90} van het bodemmateriaal
- C sedimentconcentratie
 C_+ : zandconcentratie ($> 53 \mu\text{m}$)
 C_- : slibconcentratie ($< 53 \mu\text{m}$)
 $C(f)$ concentratie bekomen door filtratie
 $C(z)$: concentratie op een hoogte z
 C_0 : concentratie op 1,5 cm van het bed
 C_b : concentratie op 5,5 cm van het bed
- d korreldiameter
 d_{10} : 10% van de korrels hebben een kleinere diameter
 d_{35} : 35% van de korrels hebben een kleinere diameter
 d_{50} : gemiddelde korreldiameter
 d_{65} : 35% van de korrels hebben een grotere diameter
 d_{90} : 10% van de korrels hebben een grotere diameter
- E erosion rate
- F geregistreeerde spanning die het toerental van een laboratoriummolen weergeeft
- f wrijvingsfactor
 f_w : wrijvingsfactor van de wanden
 f_b : wrijvingsfactor van de bodem
- G gewicht
- g valversnelling, $9,81 \text{ m/s}^2$
- h hoogte van de meetsectie
waterhoogte
drukhoogte, energiehoogte
- i bodemhelling
- I inhoud

k	Von Karman coëfficiënt, meestal 0,4
K	modelparameter in rheologische modellen
l	lengte van de meetsectie ribbellengte
m	massa
M	massa
n	modelparameter in rheologische modellen ribbelhoogte
P	natte omtrek van de meetsectie P_b : natte omtrek van de bodem P_w : natte omtrek van de wanden
r	bodemruwheid
R	hydraulische straal R_b : hydraulische straal van de bodemdoorsnede R_w : hydraulische straal van de wanddoorsnede
Re	Reynoldsgetal Re: Reynoldsgetal betrokken op de wanddoorsnede Re*: Reynoldsgetal berekend met de schuifspannings- snelheid u_*
S	sedimenttransport S_+ : zandtransport ($>53 \mu\text{m}$) S_- : slibtransport ($<53 \mu\text{m}$) S_b : bed load, bodemtransport S_s : suspended load, zwevend transport
t	tijd
u	gemiddelde snelheid u_b : gemiddelde snelheid in de bodemdoorsnede u_w : gemiddelde snelheid in de wanddoorsnede
u_*	schuifspanningssnelheid
v	stroomsnelheid v_i : snelheid op hoogte i v_{gem} : gemiddelde stroomsnelheid v_* : schuifspanningssnelheid
w	valsnelheid
X	geregistreeerde spanning bij ems-toestel
Y	geregistreeerde spanning bij ems-toestel

z	hoogte gemeten vanaf het bed
z_0	hoogte waar $v = 0$
z_*	parameter uit de transportformule van Bijker
ϵ_f	diffusiecoëfficiënt
ϵ_s	diffusiecoëfficiënt van het sediment
ρ	massadichtheid
σ	standaardafwijking
τ	schuifspanning
	τ_b : bodemschuifspanning
	τ_{cr} : kritische bodemschuifspanning
	τ_0 : yieldspanning
ν	kinematische viscositeit van water
ΔF	verval
Δ	$\frac{\rho_s - \rho}{\rho}$, relatieve sedimentdichtheid

INLEIDING

Dit eindwerk is een verslag van proeven uitgevoerd aan de T.U. Delft in september-oktober-november 1988.

Er wordt waargenomen dat pijpleidingen op de zeebodem zichzelf ingraven(self-burial). Indien pijpleidingen dit overal op gelijke wijze doen is er geen probleem. Men stelt echter vast dat het ingraven een plaatsafhankelijk fenomeen is, met gevaar voor breuk als gevolg. Een onderzoek naar het erosiegedrag van de zeebodem is dan ook noodzakelijk. Het erosiegedrag van zandbodems onder de verschillende krachtswerkingen van het water is voldoende bekend. Daar slibafzettingen de zeebodem kenmerken, werd besloten tot een onderzoek van zand-slibbodems. Dit gebied is tamelijk nieuw, men dient dus tastenderwijze te werk te gaan.

Het doel van dit afstudeerwerk is dubbel. Enerzijds het voorbereiden van het eigenlijke onderzoekswerk op dit gebied, anderzijds een eerste stap zetten naar een beter inzicht in het erosiegedrag van zand-slibmengsels. Om dit doel te verwezelijken wordt als volgt te werk gegaan.

Met de gegeven proefopstelling worden een aantal voorbereidende proeven uitgevoerd, hoofdzakelijk om de opstelling en de meettoestellen te leren kennen en om een eerste indruk van het gedrag te hebben.

Daarna worden proeven uitgevoerd met zand-kaoliniet en zand-Haafkens slib mengsels. Hierbij wordt gelet op verschillende invloedsparameters, zoals: het percentage slib; de wijze van mengen ; het verdichten...

Als voorbereiding op het eigenlijke onderzoekswerk zijn een aantal zaken belangrijk om te onthouden.

I.v.m. de snelheidsmeting worden de voordelen van een molentje t.o.v. de E.M.S. meting benadrukt.

De concentraties worden uiteindelijk bepaald door vacuümfiltratie van de dwarsafgezogen monsters.

De schuifspanningen worden bepaald door vervalmetingen over het bed en daarna toepassing van de side-wall correction methode.

Het is verder belangrijk een standaardisatie door te voeren van de belangrijkste invloedsfactoren zoals consolidatietijd en -druk en het vochtgehalte van het bed. Een standaardisatie is nodig om de invloed van elke factor afzonderlijk te kunnen nagaan.

Als eerste inzicht kan men zeggen dat het erosiegedrag van de mengsels grotendeels dit van zand volgt. Bij de lage percentages slib krijgt men wel een verhoging van het transport door de aanwezigheid van fijner materiaal. Bij de hogere percentages wordt het erosiegedrag eerder vertraagt, zowel het transport als de ribbelforming.

Er dient opgemerkt dat deze fenomenen vooral bij de mengsels met Haaftens slib worden waargenomen eerder dan bij die van kaoliniet. In de proeven worden relatief lage percentages slib genomen daar dit op de zeebodem ook zo is.

Als conclusie kan men meer experimenten met verschillende soorten slib en verschillende percentages suggereren. Deze dienen uitgevoerd in gestandaardiseerde omstandigheden en met een opstelling die zo weinig mogelijk invloed heeft op de fenomenen.

Vanuit het voorgaande kan de opbouw van de tekst begrepen worden. In een eerste hoofdstuk worden kort enkele algemene eigenschappen van zand en slib toegelicht.

In het tweede hoofdstuk wordt de proefopstelling uitvoerig besproken. Daarna wordt de gebruikte werkwijze bij elk onderdeel van een proef uitvoerig toegelicht.

Op het einde van dit verslag worden dan de inzichten verkregen uit de proeven behandeld.

HOOFDSTUK I EIGENSCHAPPEN VAN ZAND EN SLIB

1.1 Inleiding

1.2 Eigenschappen van zand

1.2.1 Beweging van zand

1.2.2 De sleepspanning en het sleepvermogen

1.2.3 De verschillende beddingsvormen

1.2.4 Theoretische snelheids- en concentratieverdeling

1.2.5 Transportformule

1.3 Eigenschappen van slib

1.3.1 Definitie van slib

1.3.2 Fysisch-chemische eigenschappen

1.3.3 Rheologie

1.3.4 Erosiegedrag

1.1 Inleiding

In het eerste hoofdstuk worden enkele elementaire begrippen over zand en slib uitgewerkt.

Het is de bedoeling algemene informatie over zand en slib te geven en tevens die begrippen die van belang zijn in de verdere bespreking kort toe te lichten en te situeren.

Zo wordt voor zand gesproken over de korrelbeweging (diagramma van Schields) , sleepspanning en sleepvermogen en de beddingsvormen. Tenslotte wordt de transportformule gegeven die in het verdere verloop van deze tekst nog zal gebruikt worden.

Paragraaf 1.3 behandelt de eigenschappen van slib. In een eerste deel wordt die definitie van slib gegeven, die in de rest van de tekst gehanteerd wordt. Verder wordt een kort overzicht van de belangrijkste fysisch-chemische eigenschappen van slib beschreven. Een derde deel gaat over de rheologie van slib en slib-watermengsels. En in een laatste deel wordt het erosiegedrag van slib besproken.

De theoretische grondslagen zijn gebaseerd op:

- voor deel 1.2 :
- Berlamont, J., Waterwegen, Wouters-Leuven,
 - van der Velden ,E.T.J.M., Coastal Engineering, T.U. Delft
- voor deel 1.3 :
- Van Damme,P.M., Slibgedrag in een natuurlijk milieu (literatuuronderzoek) , T.U.Delft
 - Berlamont, J., en Verreet, G., Rheology and non-Newtonian behaviour of sea and estuarine mud.

1.2 Eigenschappen van zand

1.2.1. BEWEGING VAN ZAND

1.2.1.1 Algemeen

Belangrijk in de bespreking van de eigenschappen van zand is de invloed van stromend water op een zandbed. Water heeft zowel een chemische als een mechanische actie op een zandbodem.

De chemische actie bestaat uit het oplossen van sommige stoffen die dan worden meegevoerd. Door de mechanische actie wordt de bodem uitgeschuurd, waarna het materiaal getransporteerd wordt. Dit transport bestaat uit bodemtransport en zwevend transport.

De mechanische actie wordt gekarakteriseerd door een aantal krachten.

Krachten op een korrel in rust:

- 1 eigengewicht en kracht van Archimedes
- 2 sleepkracht en hefkracht (drag en lift t.g.v. de stromingssnelheid)
- 3 de reacties van de andere korrels

Krachten op een korrel in beweging:

- 1+2
- 4 wrijvingskrachten

Als resultaat van de krachtswerking kan een korrel glijden en rollen. Botst een korrel tegen een oneffenheid, dan kan de korrel loskomen en een heel eind ver springen.

Men kan aannemen dat de beweging van een korrel begint als de verhouding van de kracht die de beweging veroorzaakt (sleepkracht) t.o.v. de kracht die de beweging van een korrel remt (de wrijving) een kritische waarde aanneemt.

Deze aanname leidt tot het diagram van Schields voor het begin van beweging onder een konstante stroom (zie fig 1.1).

Hierin staat Re_* in functie van de dimensieloze Schieldsparameter.

Dit diagramma duidt dus aan vanaf welke τ een gegeven bodemmateriaal zal geërodeerd worden. τ is de bodem-of sleepspanning.

1.2.1.2 Factoren die de beweging beïnvloeden.

Er zijn heel wat factoren die de beweging van het zand beïnvloeden.

De belangrijkste hiervan zijn :

i.v.m. de korrel

- d de diameter van de korrel (bv. de sleepkracht is daar een functie van)
- ρ_s de volumieke massa van het zand
- de vorm van de korrels
- de aard van het mengsel : de korrelverdeling ,de gemiddelde korreldiameter.
- de cohesie van het materiaal

i.v.m. de stroming

- het debiet, de snelheid
- de turbulentieintensiteit

i.v.m. de bedding

- de bodemhelling
- vorm en ruwheid van de bedding die de vorm van het snelheidsprofiel bepalen.

1.2.2 SLEEPSpanNING EN SLEEPVERMOGEN

1.2.2.1 Sleepspanning

Voor een uniforme stroom over een zandbed kan men een krachterevenwicht schrijven. Bij een uniforme stroom is de tangentiële komponente van het gewicht van een volume water gelijk aan de inwendige schuifspanning (zie figuur 1.2).

$$G \sin i = \tau(z)$$

met G = gewicht

i = bodemhelling

$\tau(z)$ = schuifspanning op een hoogte z boven de bodem

$$\rho g \Delta x (h-z) \sin i = \tau(z) \Delta x$$

met ρ = massadichtheid van water

g = zwaartekrachtsversnelling

h = waterdiepte

Daar de helling meestal klein is kan men $\sin(i) = i$ stellen. Zodat men bekomt :

$$\tau(z) = \rho g(h-z)i$$

Voor de bodemschuifspanning vinden we:

$$\tau_b = \tau(0) = \rho g h i$$

τ_b is de sleepspanning, het is een maat voor de weerstand door het bed uitgeoefend op het water en dus ook een maat voor de actie van het water op het zandbed.

τ_b is dus een maat voor het eroderend vermogen van het water.

De helling i kan herschreven worden met de Chezy-formule

$$V = C \sqrt{hi}$$

$$i = V^2/C^2h$$

met V = de gemiddelde snelheid over de diepte

C = Chezy coëfficiënt

zo bekomt men voor de bodemschuifspanning

$$\tau_b = \rho g V^2/C^2$$

Men kan dus met deze formule de schuifspanning berekenen uit de snelheid indien C gekend is.

Indien men $C = 18 \log (12 h/r)$ stelt moet men enkel r kennen.

Er bestaan heel wat formules voor r , zie hoofdstuk 3 3 2 4.

Men kan dus in plaats van een kritische schuifspanning voor het begin van beweging ook spreken van een kritische snelheid of een kritisch debiet, indien men r , dus de ruwheid van de bodem kent. Deze ruwheid zit namelijk in de τ vervat.

Uit de vorige vergelijkingen kan men ook afleiden dat

$$\tau(z) = \tau_b(1-z/h)$$

1.2.2.2 Sleepvermogen

Een belangrijk begrip voor de erosie- en transport- capaciteit van de stroom is het sleepvermogen.

De energie die door de stroming gedissipeerd wordt tussen twee secties in de stroming is gelijk aan de vermindering van de potentiële energie. Men kan afleiden dat het gedissipeerd vermogen per eenheidslengte van de rivier en per eenheidsbreedte gelijk is aan $\tau_b V$.

$\tau_b V = \rho g h i$ is het sleepvermogen van de stroom op de beschouwde plaats en op het beschouwde ogenblik.

Het sleepvermogen kan opgedeeld worden in een deel dat gebruikt wordt om de wrijving te overwinnen (inwendige en wand) en een deel dat het transport veroorzaakt.

1.2.3. VERSCHILLENDE BEDDINGSVORMEN

Door de interactie van de stroming en de zandbodem ontstaan verschillende beddingsvormen : ribbels, duinen, antiduinen...

Het ontstaan van ribbels en duinen kan kwalitatief vergeleken worden met de gegolfde vorm van het scheidingsvlak tussen twee over elkaar stromende fluïda met verschillende dichtheid. Dit blijkt de evenwichtsvorm te zijn.

Bij toenemende snelheid en dus toenemend sleepvermogen is er een grotere krachtwisselwerking tussen het water en het bed. Het bed gaat van vlak bed naar ribbels en duinen.

Ribbels zijn kleine, lage driehoekige elementjes die kunnen beschouwd worden als ruwheidselementjes. Duinen zijn grotere driehoekige elementen waarvan de hoogte kan veranderen met de waterhoogte. Bij toenemende snelheid worden de duinen gestrekt en verdwijnen: de duinen worden "uitgespoeld". Men krijgt een vlak bed met sedimenttransport. De grootte van het sleepvermogen waarbij duinen overgaan in vlak bed hangt af van de korreldiameter : duinen uit fijn zand worden uitgespoeld bij lagere waarden van het sleepvermogen dan duinen van grover zand.

Het vormen en verdwijnen van ribbels en duinen kan begrepen worden vanuit energieoverwegingen.

Het water heeft een bepaald vermogen, door zijn snelheid en zijn verhang. Een deel daarvan gebruikt het om materiaal te transporteren, een deel om de wrijving te overwinnen. Wanneer een grotere hoeveelheid materiaal moet getransporteerd worden, past de rivier zich aan door een vermindering van de wrijving en dus van de ruwheid van het bed. Daardoor is een grotere hoeveelheid van de energie beschikbaar voor het transport.

1.2.4 THEORETISCHE SNELHEIDS- EN CONCENTRATIEVERDELING

1.2.4.1 Theoretische snelheidsverdeling

Er wordt hoger afgeleid dat

$$\tau(z) = \tau_b (1-z/h)$$

Om de theoretische snelheidsverdeling te vinden maakt men gebruik van het diffusiebegrip.

Dit diffusiebegrip drukt een verband uit tussen de schuifspanning en de snelheidsgradient.

$$\tau(z) = \rho \epsilon_f d(z)/dz$$

met

$$\epsilon_f = \text{diffusiecoëfficiënt}$$

Door deze twee vergelijkingen verder uit te werken met de menglengte theorie van Prandtl en Von Karman, komt men tot een differentiaalvergelijking die men kan oplossen.

Oplossen van deze vergelijking levert een logaritmisch snelheidsprofiel:

$$V(z) = V_* / k \ln(z/z_0)$$

met

$$k = \text{von Karman coëfficiënt (0.4)}$$

$$z_0 = \text{hoogte waar de snelheid 0 is}$$

$$V_* = \sqrt{\tau_b / \rho}$$

met

$$\tau_b = \text{bodemschuifspanning}$$

$$\rho = \text{massadichtheid van het water}$$

1.2.4.2 Theoretische concentratiedistributie

Materiaal wordt uit de bodem geërodeerd. Uiteindelijk krijgt men een verdeling van de concentratie over de hoogte. Waarom bepaalde zandkorrels hogere niveaus kunnen bereiken is nog niet helemaal duidelijk. Bij een constante stroom is er immers geen opwaartse snelheid. Wat ook het mechanisme zij tot nu wordt een diffusiemechanisme aangenomen. Dit leidt tot de volgende vergelijking :

$$w c(z) + \epsilon_s(z) dc(z)/dz = 0$$

Deze vergelijking is een sediment massabalans door een horizontaal vlak op een hoogte z boven het bed. Indien we aannemen dat alle condities stabiel zijn, is de concentratiedistributie stabiel en moet het neerwaartse transport gelijk zijn aan het opwaartse. Het neerwaartse is veroorzaakt door naar benedenvallende partikeltjes onder invloed van hun eigen gewicht en is dus $w c(z)$.

Het opwaartse transport is veroorzaakt door het diffusiemechanisme welke waterpakketjes van verschillende niveaus uitwisseld. Daar waterpakketjes van lager niveau meer sediment bevatten dan deze van hoger niveau krijgt men een resulterend opwaarts sedimenttransport.

Gelijkstellen van deze twee levert de differentiaal-vergelijking.

De meest algemene oplossing is

$$c(z) = c_a \exp\left(-w \int dz / \epsilon_s(z)\right)$$

met

- c_a = referentieconcentratie op $z=a$
- w = de valsnelheid van het sediment
- $\epsilon_s(z)$ = diffusiecoëfficiënt voor sediment

Na een aanname voor $\epsilon_s(z)$ kan deze vergelijking worden opgelost. Men bekomt een concentratieverdeling.

1.2.5 TRANSPORTFORMULE

Zowel de snelheids- als de concentratiedistributie werden hierboven uitgewerkt. Niet zonder reden.

De meest algemene uitdrukking voor het transport is immers

$S = c V$. Dit is het transport in een punt. Indien men deze vergelijking integreert over de hoogte, bekomt men het transport per breedteëenheid. Hiervoor heeft men dus de distributie over de hoogte nodig. Deze distributies zijn, zoals hoger vermeld, oplossingen van differentiaalvergelijkingen. Om tot eenvoudigere uitwerking van deze te komen moet men een aantal aannames doen. Dit leidt uiteraard tot verschillende transportformules.

Wij gebruiken verder in deze tekst de transportformule volgens Bijker (1971). Bijker gebruikte hetzelfde principe als Einstein (1950) op twee wijzigingen na. De dikte van de bodemlaag is en gelijk aan de bodemruwheid r , i.p.v. 2 maal de korreldiameter. Voor het bed-load gebruikte Bijker een licht gewijzigde Kalinske-Frijlink bed-load transport formule, waar Einstein zijn eigen formule had.

Bed-load formule:

$$S_b = 5 D_{50} \frac{V/C \sqrt{g} \exp(-0.27 \Delta D_{50} \rho g)}{\mu \tau_c}$$

transport	stirring up

met

$$\begin{aligned} C &= 18 \log(12h/r) \\ C_{90} &= 18 \log(12h/D_{90}) \\ \mu &= (C/C_{90})^{3/2} \\ \tau_c &= \rho g (V/C)^2 \\ \Delta &= (\varphi_s - \rho) / \rho \end{aligned}$$

Het suspended-load is functie van $A(=r/h)$ en z_*

met $z_* = w/(kV_*)$

w = de valsnelheid van de korrel

$$V_* = \sqrt{\tau_c / \rho}$$

met A en z_* kan men uit tabellen de verhouding tussen suspended en bed-load aflezen (S_s/S_b).

Uiteindelijk bepaalt men:

$$S = S_s + S_b$$

Een rekenvoorbeeld wordt gegeven Hoofdstuk 4.3.

1.3 Eigenschappen van slib

1.3.1 DEFINITIE VAN SLIB

Slib is een cohesief materiaal dat een agglomeraat is van kleimineralen, niet-kleimineralen en organisch materiaal, met een deeltjesgrootte kleiner dan 50 à 60 μm . In de beschreven experimenten wordt een grens van 53 μm aangehouden.

Qua korreldiameters kan men het slib nog onderverdelen in 2 fracties:

<2 μm : kleimineralen (oa. kaoliniet, illiet, chloriet, montmorilloniet, vermiculiet). Het is deze fractie die samen met het organisch materiaal kleiner dan 2 μm het cohesieve gedrag van een slib-watermengsel veroorzaakt.

>2 μm : siltfractie

1.3.2 FYSISCH-CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN

In het nu volgend deel worden beknopt enkele factoren, die de eigenschappen van slib beïnvloeden, besproken. Er zijn natuurlijk veel meer bepalende factoren en ook is over al deze factoren veel meer te vertellen. Voor verder informatie wordt de geïnteresseerde lezer verwezen naar de literatuur, oa. nummers 4,12,14,15 uit de literatuurlijst.

Zoals vermeld zijn kleimineralen en hun typische kenmerken zeker bepalend voor de slibeigenschappen. Vooral het grote specifieke oppervlak van de kleideeltjes speelt hierbij een belangrijke rol. Kleipartikels zijn plaatvormig met negatieve elektrische ladingen op de vlakke zijde. De smalle kant kan zowel positieve als negatieve ladingen bevatten. (figuur 1.4)

Maar het zijn vooral de interacties tussen de kleideeltjes enerzijds en water, met zijn eventuele onzuiverheden anderzijds, die de specifieke klei-eigenschappen beïnvloeden. Het negatief geladen kleioppervlak trekt kationen uit het water aan, zo ontstaat de zogenaamde "electrische dubbellaag". De geadsorbeerde ionen zijn uitwisselbaar. Het aantal ionen dat per gewichtseenheid kleimineralen kan worden vervangen door andere ionen met een grotere bindingsaffiniteit wordt gekarakteriseerd door de CEC-waarde (= cation exchange capacity) uitgedrukt in milliëquivalenten per 100 g droge stof. Voor de belangrijkste kleimineralen gelden de volgende waarden:

mineraal:	CEC-waarde in milli-equivalenten per 100 g droge stof:
vermiculiet	150-100
montmorilloniet	100-70
chloriet	47-4
illiet	40-10
kaoliniet	15-3

Een gevolg van de typische kleistructuur is vlokvorming. Kleideeltjes en ionen komen samen in allerhande configuraties: kop-staart formatie, parallel of een tussenliggende vorm(zie figuur 1.5). Vlokken ontstaan door botsen en samenkleven van deeltjes. Op hun beurt gaan deze vlokken met andere vlokken grote agglomeraten vormen. Deeltjes botsen in hun Brownse beweging, door onderlinge verschillen in valsnelheid of door turbulente rotatiebewegingen. Van der Waalskrachten en electrostatische oppervlaktekrachten zorgen voor de samenleving. In zout water overheersen de Van der Waalskrachten, in zoet water de minder sterke electrostatische krachten. De aard van de vlokken en hun grootte zijn oa. afhankelijk van type kleimineraal (CEC), type en aantal ionen maar ook van pH, organisch materiaal, saliniteit van het water...

Een hoge CEC-waarde, dus veel kationen die kunnen worden uitgewisseld, heeft tot gevolg dat er meer kationen met een hogere bindingsaffiniteit in de dubbellaag voorkomen, d.w.z. grotere

onderlinge deeltjeskrachten in de vlokken en dus cohesievere vlokken.

De invloed van de saliniteit komt tot uiting in de SAR-waarde (= sodium absorption ratio)

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{1/2 \sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}}$$

Een lage SAR-waarde betekent een hoge concentratie aan 2-waardige ionen, met als gevolg een dunnere dubbellaag: de deeltjes kunnen elkaar dichter naderen, de Van der Waalskrachten gaan overheersen, vlokken worden gevormd. Een hoge SAR-waarde geeft veel minder vlokvorming.

Over de invloed van het organisch materiaal zijn in de literatuur de meningen erg verdeeld. Afhankelijk van de aard van het organisch materiaal is de invloed op vlokvorming en cohesie al dan niet belangrijk. Ook het percentage organisch materiaal speelt zeker een rol.

Drastische pH-veranderingen hebben een effect op de vlokvorming: meer zure milieus maken vlokken hechter, terwijl basische milieus eerder tot deflocculatie leiden.

Er dient ten slotte nog worden opgemerkt dat door het samengaan van verschillende kleimineralen nieuwe eigenschappen ontstaan en eveneens eigenschappen van de afzonderlijke mineralen verloren gaan.

Ook de andere samenstellende delen hebben hun belang. Silt en zandkorels kunnen worden opgenomen in de vlokken. Het inerte kwarts speelt geen rol in de cohesie maar doet de vlokstructuur veranderen. Zo zal de weerstand tegen stroming afnemen met toenemend kwartsgehalte.

1.3.3 RHEOLOGIE

Het rheologisch gedrag van slib en slib-watermengsels is hoofdzakelijk afhankelijk van de snelheidsgradiënt in de stroming en de vlokstructuur, die op zijn beurt bepaald wordt door o.a. CEC-waarde, SAR-waarde, pH van

het water, ionenconcentratie in het water, sedimentconcentratie,...Ook krijgt men een voortdurend veranderend vlokkenpatroon: netwerken worden gevormd en weer verbroken, andere bindingen komen tot stand.

Aangezien elk van deze factoren op zich al zeer complex zijn, is het moeilijk om het slibgedrag met één rheologisch model te vangen. In de literatuur vindt men dan ook een grote verscheidenheid aan rheologische beschrijvingen. Naargelang het gebruikte slib en het doel van het model worden tijdsafhankelijke en tijdonafhankelijke modellen toegepast.

Algemeen kan men de rheologische vergelijking als volgt schrijven:

$$\tau - \tau_0 = K(du/dz)^n$$

met τ = schuifspanning

τ_0 = yieldspanning

K, n = modelparameters

Een overzicht van de meest voorkomende modellen is gegeven in figuur 1.6.

Vooraf bij lage schuifspanningen, begin van beweging e.d., is de keuze van het model belangrijk. Bij hogere snelheden is de modelkeuze minder kritisch.

1.3.4 Erosiegedrag

Het in beweging komen van een slibmassa onder een stroming kan best met behulp van een τ_{cr} beschreven worden, d.w.z. een kritische waarde die de grens tussen stilstand en beweging aangeeft.

Er dient wel een onderscheid gemaakt te worden tussen de kritische schuifspanning voor erosie of deze voor sedimentatie. Algemeen geldt: $\tau_{cr}(\text{sedimentatie}) < \tau_{cr}(\text{erosie})$.

De belangrijkste bepalende factor bij het in beweging komen van slib is de dichtheid. De zogenaamde yieldspanning, die in de meeste rheologische modellen het begin van beweging voorstelt, is er zeer sterk van afhankelijk. Deze τ_0 neemt toe als de dichtheid toeneemt, met andere

woorden als de vlokken in het slib een dichtere, hechtere structuur vormen. Hieruit resulteert dat de mate van consolidatie van het slib, en dus de factor tijd, belangrijk is.

De erosie zelf kan worden gekarakteriseerd door de erosion rate (E), dit is de massa die per tijdseenheid geërodeerd wordt. Enkele elementen die de erosion rate beïnvloeden zijn:

- de dichtheid van het te eroderen bed
- de bodemopbouw
- het watergehalte
- het poriëngehalte en de poriënvloeistof
- de aard van de eroderende vloeistof
- de temperatuur

....

Met de bodemopbouw wordt het al dan niet uniform zijn van het bodemmateriaal bedoeld. Voor een uniform slibbed zal E naar een constante waarde streven. Is het bed echter gelaagd, d.w.z. neemt de dichtheid toe met de diepte, dan zal E in de tijd naar nul gaan, niet omdat er zoals bij zand een evenwicht ontstaat tussen erosie en sedimentatie, maar omdat er bij een bepaalde stroomsnelheid (=schuifspanning) van de eroderende vloeistof de weerstand tegen erosie op een bepaalde diepte (=dichtheid) te groot wordt.

Experimenteel stelde Partheniades¹ het volgende verband tussen erosion rate en schuifspanning vast:

$$E = \frac{dm}{dt} = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right) \quad \tau_b > \tau_{cr}(\text{erosie})$$

$$E = 0 \quad \tau_b < \tau_{cr}(\text{erosie})$$

M = erosiefluxconstante

τ_b = bodemschuifspanning

τ_{cr} = kritische schuifspanning voor erosie

1 uit: METHA, A.J. en PARTHENIADES, E. 'Kaolinite resuspension properties'. Journal of the hydraulics division-ASCE, 105, HY4 p411-416

HOOFDSTUK II DE MEETOPSTELLING

2.1 Inleiding

2.2 Stroomgoot

2.3 Materialen

2.3.1 Zand

2.3.2 Kaoliniet

2.3.3 Haaftense klei

2.3.4 Mengsels

2.4 Concentratieingen

2.4.1 Afzuigapparaat

2.4.2 Onderwaterweegschaal

2.4.3 Filterapparatuur

2.5 Snelheidsmetingen

2.5.1 Laboratoriummolen

2.5.2 EMS

2.5.3 Pitotbuis

2.6 Vervalmetingen

2.1 Inleiding

Alle proeven werden uitgevoerd in het waterbouwkundig laboratorium van de T.U.Delft. De erosietests gebeurden in een speciaal ontworpen stroomgoot, die sinds enkele maanden in gebruik was. De concentratiemetingen en andere meer scheikundige analyses vonden plaats in de analysekamer.

Zoals gezegd is de stroomgoot een van de belangrijkste elementen van de opstelling, deze zal in een eerstvolgend deel uitvoerig besproken worden. In deel 3 komen dan de gebruikte materialen aan bod, zand, kaoliniet en Haaftense klei worden ieder afzonderlijk behandeld. Deel 4, 5 en 6 zijn gewijd aan respectievelijk concentratiemetingen, snelheidsmetingen en vervalmetingen. De nodige apparatuur en hun werkingsprincipe worden besproken. Het hoe en waarom van de gevolgde meetprocedures daarentegen zal verklaard worden in het volgende hoofdstuk.

2.2 Stroomgoot

Alle proefnemingen worden uitgevoerd in een kleine gesloten stroomgoot. De voorwaarden waaraan het gootje moet voldoen zijn: snel te konstrueren, eenvoudig en goedkoop, geschikt om de materialen, apparatuur en meetprocedures uit te testen, inzicht verschaffen in de fenomenen die zich voordoen bij de erosie van zandslibmengsels. Het doel is immers niet zozeer een schaalmodel te maken van een echte situatie maar eerder de voorbereiding daarop. Er wordt dan ook geen rekening gehouden met schaalwetten. De proeven zijn veeleer kwalitatief dan kwantitatief, zonder daarom te leiden tot kwantitatief echt abnormale waarden. Het gootje moet een ruw doch reëel beeld geven van het erosiegedrag van zand-slibmengsels, de verschillen tussen de soorten slib, de meetmogelijkheden. Dit leidt tot de konstruktie zoals getoond in figuur 2.1.

De hele goot is gesloten op enkele meetopeningen na. Bij een kleine open goot zullen de wanden te veel verlies veroorzaken waardoor een enorm verhang zal ontstaan en er dus een voor deze kleine opstelling relatief zeer grote, dure pomp zal nodig zijn. Alleen de retourleidingen gesloten en de meetsektie open zal aanleiding geven tot ongewenste overgangsverschijnselen, insnoeringseffekten,.. die weerom gezien de kleine afmetingen te belangrijk zijn. Daarom wordt geopteerd voor een volledig gesloten opstelling op de meetopeningen na; dit is een smalle gleuf, breedte 1 cm, over de ganse lengte van de meetsektie, die om extra weerstanden in te dijken kan worden afgesloten door speciaal ontworpen T-blokjes (zie figuren 2.2 en 2.3).

Zo ontstaat de volgende ongewone situatie: een gesloten stroomgoot en een stroming die het meest lijkt op een stroming onder druk. Maar omwille van een verluchtigingsgat, net na de meetsektie, en omdat het water ook in de smalle meetgleuf in kontakt is met de lucht, zijn er eveneens aspecten van stroming met vrij oppervlak aanwezig.

Nochtans zal omwille van het deksel het verwachte logaritmische snelheidsprofiel zich niet voordoen, bovenaan zal de snelheid immers naar nul gaan. Slechts bij zeer hoge gemiddelde stroomsnelheden zal het water boven de T-blokjes lichtjes meebewegen. Ruwweg kan men stellen

dat vanaf 1 à 2 cm van de bodem de snelheid vrij uniform over de hoogte verloopt tot in de buurt van het deksel (zie volgend hoofdstuk)

De retourleidingen zijn plexibuizen, diameter 10 cm, waarin zich ook de motor bevindt. (zie figuren 2.2 en 2.4) Deze motor met kontinu regelbaar toerental drijft een schroef aan die op haar beurt het water in beweging brengt. De regeling van de motor gebeurt door het instellen van motorstanden van 1 tot en met 15. Een motor met propeller heeft als ernstig nadeel dat door de schroefbeweging ook het water een draaiende en dus abnormale beweging zal maken. Net voor de eerste bocht na de motor (zie figuur 2.2) zijn een hele reeks horizontale pijpjes, diameter 2 cm, gelegd om het water weer in normale banen te leiden. In de meetsektie is dan ook geen enkele draaibeweging meer merkbaar, ook niet vanwege de voorafgaande bocht en dit omwille van het voldoende lange rechte stuk voor de meetsektie.

Dit neemt niet weg dat door de schroefbeweging het materiaal, dat in suspensie is, en het bodemtransportmateriaal steeds weer worden omgewoeld. Bijgevolg zal een sedimentconcentratieevenwichtsprofiel boven het bed nooit worden bereikt. De verdeling zal steeds min of meer uniform zijn, zeker vlak voor de meetsektie en de afstand die de korrels afleggen boven het bed is te kort om ze voldoende te laten uitzakken. Ook is het onmogelijk om bed- en suspensietransport van elkaar te scheiden. De gemeten transporten zijn dus totale transporten.

De meetsektie (figuur 2.5) is een glazen bak, 14,5 x 14,5 cm, 1 m lang, bovenaan afgesloten door een verwijderbaar, door bouten vastgeschroefd, plastieken deksel, waarin de meetgleuf is aangebracht. De overgang van buis naar meetsektie gebeurt zeer geleidelijk. Wel blijft er een drempel van een tweetal centimeter omwille van de verschillende afmeting van buis en meetsektie. (figuur 2.3) Achteraan de meetsektie wordt deze drempel afgeschuind om te voorkomen dat daar door overmatige erosie een kuil ontstaat. Vooraan blijkt dit gevaar niet te bestaan¹.

1 Vooraan en achteraan worden gezien ten opzichte van de stromingszin, deze is aangeduid in figuur 2.2.

Tussen deze twee drempels aan begin en eind van de meetsektie wordt dan het te onderzoeken mengsel aangebracht. Daartoe moet telkens het deksel worden losgeschroefd en verwijderd. De water afvoer gebeurt via een kraan onderin de meetsektie. De toevoerleiding zit in de retourleiding. (figuur 2.2) Om het nieuwe bed te effenen wordt een bodemplaat gebruikt die precies tussen de twee drempels past, deze is immers ontworpen om als bodem te dienen, o.a. met opgekleefde ruwheidselementjes, om de goot te testen.

2.3 Materialen

2.3.1 ZAND

Om het aantal variabelen in de proevenreeks te beperken, wordt slechts een soort zand gebruikt. Dit zand heeft de volgende kenmerkende diameters: $d_{10} = 0,070$ mm, $d_{50} = 0,105$ mm, $d_{90} = 0,150$ mm. Voor meer details zie de zeefkromme in figuur 2.6. Bij de voorbereidende proeven wordt ook nog een wat grover zand gebruikt, maar zoals gezegd wordt in de eigenlijke proeven dit zand niet meer toegepast.

2.3.2 KAOLINIET

In de eerste reeks proeven wordt als slibfractie kaoliniet gebruikt. Het gaat om China Clay, een chemisch behandeld kaoliniet met als mineralogische samenstelling (fabrikant):

88,4 %	klei
10,5 %	veldspaat
0,0 %	kwarts
0,8 %	ijzeroxide
0,1 %	kalk
0,1 %	magnesium

Verdere gegevens van de fabrikant zijn opgenomen in figuur 2.7.

Voor een gelijkaardig kaoliniet geeft de firma Blythe (Maastricht) de volgende samenstelling:

80 %	kaoliniet
15 %	illiet
4 %	kwarts
1 %	smectiet

Figuur 2.8 bevat drie zeefkrommen van dit China Clay, de eerste opgesteld aan de hand van gegevens van de fabrikant, een tweede bepaald door laser-diffractie en de derde kurve is het resultaat van een bezinkingsanalyse. De d_{50} is dus ongeveer 5 micrometer.

In datzelfde rapport van het W.L. uit '85² staat ook een chemische analyse van het kaoliniet:

49,5 %	SiO ₂
35,4 %	Al ₂ O ₃
11,4 %	H ₂ O
1,6 %	K ₂ O
1,1 %	Na ₂ O
1,0 %	Fe ₂ O ₃

De bedoeling van de eerste reeks proeven met China Clay is na te gaan in hoeverre het gedrag van kaoliniet overeenstemt met dit van een natuurlijk slib. Het voordeel van het kaoliniet is dat het eenvoudig te verkrijgen is. Het wordt geleverd in droge poedervorm en is dus eenvoudig te mengen. Een eerste nadeel is dat deze chemisch behandelde China Clay niet uitvlokt in zout water. Kaoliniet bezit de laagste CEC-waarde van alle kleimineralen, nl. ongeveer 4,9 meq/100g en is in dit opzicht al niet typerend als slib. Ook bevat het omwille van de chemische behandeling geen organisch materiaal meer, hetgeen in een natuurlijk slib wel aanwezig is.

2 uit: The effect of waves on kaolinite- sand beds.

W.L. aug. '85

2.3.3 HAAFTENSE KLEI

In de tweede reeks proeven wordt een natuurlijke klei uit Haaften, de Betuwe, gebruikt. Ruwweg bevat deze klei:

40 %	illiet
25 %	kaoliniet
10 %	chloriet
5 %	smectiet
15 %	kwarts

Een analyse uitgevoerd door de afdeling Fysico-chemische geologie van de K.U.Leuven geeft een samenstelling zoals weergegeven in figuur 2.23.

Bepaling van de granulaire samenstelling

Aangezien bij alle proeven de slibfractie gedefiniëerd is als de fractie kleiner dan 53 μm , bepaald door nat zeven, moet ook van deze klei vooraf de fractie kleiner dan 53 μm afgescheiden worden om het aandeel ervan te bepalen. Er blijkt gemiddeld ongeveer 7 % in de zandfractie te zitten en dus is 93 % slib.

De zeefkromme van deze zandfractie is gegeven in figuur 2.9. Er zit zowel zeer fijn zand als zeer grof materiaal in, schelpjes, steentjes; de $d_{50} = 280 \mu\text{m}$.

Om de korrelverdeling van de slibfractie te bepalen, moet eerst (volgens de standaardprocedures bij grondmechanisch onderzoek) het organisch materiaal verwijderd worden. Dit gebeurt door oxyderen met waterstofperoxyde en ondertussen licht verwarmen, dit gedurende een aantal uren. Eventueel kan men daarna door HCl toe te voegen kalk en lichte ijzerverontreinigingen verwijderen. Daarna moet het ontstane zuur uitgewassen worden door de slibfractie te filteren en te spoelen met gedestilleerd water tot het filtraat schoon is. Zoals verder uit de resultaten blijkt gaat bij dit filteren een deel van het fijnste materiaal verloren. Bij het gefilterde slib wordt Calgon, een peptisator, gevoegd en gedestilleerd water. De peptisator moet een nacht inwerken om klontervorming te voorkomen.

De bezinkingsanalyse kan beginnen. Het opgeloste slib wordt in de bezinkingspipet gedaan en goed omgeschud. De chronometer wordt gestart. Op vastgestelde tijdstippen, afhankelijk van de temperatuur wordt een vast volume afgetapt. De verhouding van dit volume tot het totale volume van de pipet is een konstante, de pipetfaktor genaamd. Het droge gewicht van het materiaal in de afgetapte fractie vermenigvuldigd met de pipetfaktor geeft het totale gewicht van dat materiaal in het totale volume slib+water dat geanalyseerd wordt.

Op tijdstip t bevat het afgetapte monster de korrelfractie waarvan de valsnelheden w kleiner of gelijk zijn aan s/t , met s de hoogte van de pipet.

$$\text{Uit } w = (\rho * g * d^2) / (18 * \nu)$$

kan per tijdstip de maximale korreldiameter bepaald worden.

De gewichten van de frakties worden na drogen bepaald:

stel $m_1 =$ gewicht van de fractie afgetapt op t_1 met maximale diameter d_1

$m_2 =$ gewicht van de fractie afgetapt op t_2 met maximale diameter d_2

als $t_1 < t_2$ dan $d_1 > d_2$ en dus is $m_1 - m_2$ de fractie met korreldiameter tussen d_1 en d_2 .

Driemaal wordt de analyse herhaald:

- 1 zonder verwijderen van organisch materiaal
- 2 met verwijderen van organisch materiaal en filteren
- 3 met verwijderen van organisch materiaal maar zonder filteren

De drie zeefkrommes zijn te vinden in figuur 2.10. 1 en 3 sluiten nauw bij elkaar aan en geven een $d_{50} = 2 \mu\text{m}$. Zeefkromme 2, bepaald na filtratie, geeft veel minder fijn materiaal, een deel ervan wordt immers niet tegengehouden door de filters, zie 2.4.3.

Er dient nog worden opgemerkt dat men zou verwachten dat deze natuurlijke klei zou uitvlokken in zout water. Bij testen in een proefbuis wordt dit niet waargenomen. Wel merkt men een lichte vlokvorming wanneer de organische bestanddelen, na reageren met peroxyde, grotendeels zijn verdwenen. Een mogelijke verklaring voor het niet uitvlokken zou dus kunnen zijn dat deze Haaftense klei te veel organisch materiaal bevat en daardoor minder snel uitvlokt. In een van de verdere experimenten wordt een mengsel van zand en Haaftense klei onder een stroom van zout water getest. Uitvlokking van het slib is dan gewenst, zodat vooraf het organisch materiaal met peroxyde verwijderd zal worden. Om vergelijking mogelijk te maken wordt ook bij een proef met zoet water en een zand-Haauftense klei mengsel de organische bestanddelen uit de klei verwijderd.

2.3.4 MENGSELS

Qua materiaalgebruik kan men de proefnemingen opdelen in 3 grote groepen:

- 1° zand alleen. Het doel van deze proeven is dubbel. Enerzijds kan zo het gootje uitgetest worden. Van zandtransport is immers voldoende bekend. Door vergelijking van de bekomen resultaten (concentraties, snelheden, bedvormen,...) met deze uit de literatuur krijgt men inzicht in de particulariteiten van het gootje (o.a. te grote transporten, zie verder). Anderzijds zijn de proeven een soort van referentie voor de volgende experimenten.
- 2° zand+kaoliniet. Volgende mengsels worden aangewend: 6, 12, 16 en 20 % kaoliniet.
- 3° zand+Haauftense klei. Daarmee worden de volgende mengsels samengesteld: 9, 12, 13 % slib, d.i. het percentage kleiner dan 53 μ m in het geheel van zand en klei.

Om het kaoliniet of de klei met water te mengen tot een visceuze gelachtige brij, wordt een roermotor met regelbaar toerental gebruikt. (RE 16 IKA 17 Watt) Het vermengen van deze brij met zand gebeurt met de hand. De gebruikte methoden worden meer in detail besproken in hoofdstuk III.

2.4 Concentratiemetingen

2.4.1 AFZUIGAPPARAAT

Het afzuigapparaat bestaat uit twee metalen buisjes aan de uiteinden in een bocht van 90° omgebogen. De inwendige diameter van de buisjes bedraagt 3 mm. De omgebogen uiteinden liggen 4 cm boven elkaar (figuren 2.11 en 2.12). De buisjes worden vertikaal in het water gehangen zodat de zuigopeningen loodrecht op de stromingsrichting staan. Er is dus sprake van dwars afzuigen. Aan de bovenzijde van de twee buisjes zijn twee slangen bevestigd. De monstername gebeurt door hevelen via deze twee slangen in twee genummerde maatbekers van 200 ml. (figuur 2.13)

De afzuigsnelheid bedraagt ongeveer 120 cm/s, groot genoeg dus om een konstante voorspelbare vangstquote te hebben. Vanaf afzuigsnelheden groter dan driemaal de gemiddelde stroomsnelheid geldt immers dat de echte concentratie gelijk is aan β -keer de gemeten concentratie van het afgezogen monster, met β een correctiefactor die functie is van de diameter. Voor het zand met gemiddelde korreldiameter 105 μm is β 1,28; voor slib met korreldiameters beneden de 53 μm is deze correctiefactor gelijk aan 1^3 . Alle gemeten zandconcentraties moeten dus met 1,28 vermenigvuldigd worden om de reële waarden te bekomen.

2.4.2 ONDERWATERWEEGSCHAAL

Bij de proeven met een zuiver zandbed worden de afgezogen concentraties bepaald door een onderwaterweegschaal. Dit is een toestel waarmee onder water het gewicht van een hoeveelheid zand wordt bepaald. (principeschets figuur 2.14)

3 Uit: BOSMAN J.J., VAN DE VELDEN E.T.J.M. en HULSBERGEN C.H.
Sediment concentration measurement by transverse suction, Coastal
Engeneering 11, Elsevier Science Publishers BV, Amsterdam.

Eerst wordt van het afgezogen monster het overtollige water afgegoten, waarna het zand via een trechter op de weegschaal wordt gebracht. Het waterpeil in de bak waarin de weegschaal zich bevindt, wordt op een konstante hoogte gehouden door een overlaat. Het nat gewicht wordt met een nauwkeurigheid van 0,001 g gemeten.

$$\text{gemeten nat gewicht} = (\rho_s - \rho_w) V \text{ g}$$

$$\text{te bepalen droog gewicht} = \rho_s V \text{ g}$$

Dus de gemeten waarde moet met $\rho_s / (\rho_s - \rho_w)$, d.i. 1,61, vermenigvuldigd worden om tot het te bepalen getal te komen.

Het voordeel van de onderwaterweegschaal is dat de zandconcentraties onmiddellijk af te lezen zijn, het zand moet niet eerst gedroogd worden.

2.4.3 FILTERAPPARATUUR

Zand- en slibconcentraties bij de proeven met gemengd bed worden bepaald door vacuümfiltratie. Redenen en gevolgde procedure staan beschreven in hoofdstuk 3. De volledige opstelling: zeef van 53 μm , doseertrechter, Bühnetrechter, kolf, spuitfles met spoelwater en filters staat afgebeeld in figuur 2.15.

Twee soorten filters met diameter 11 cm worden gebruikt:

- Schleicher & Schüll 589/2 retentie 8 μm
kwantitatief, asvrij, middelsnel
- Whatman nr1 retentie 11 μm
kwalitatief, middelsnel, geringe natsterkte

(er moeten telkens twee filters per keer gebruikt worden)

Bij het gebruikte slib is de fractie beneden 8 of 11 μm aanzienlijk. Een deel hiervan zal bij filtratie verloren gaan. Maar naarmate de filtratie vordert zullen, zeker bij hoge concentraties, de filtergaatjes stilaan verstopten en zal dus de retentie toenemen. Men kan dus niet zomaar zeggen, dat wanneer het percentage beneden de 8 μm gekend is, het datzelfde gedeelte zal zijn dat bij de S&S-filters zal verloren gaan.

Om een idee te krijgen van dit complex fenomeen worden een aantal concentraties, bepaald met een pycnometer, vergeleken met de waarden die door de twee soorten filters bekomen worden. De resultaten zijn opgenomen in figuur 2.16. Uit de grafieken blijkt dat er een min of meer lineair verband bestaat tussen de gemeten en de echte concentraties, nl:

voor de S&S-filters $C = 1,201 C(f) + 0,133$

voor de Whatmanfilters $C = 1,157 C(f) + 0,069$

met C de "ware" concentraties en C(f) de door filtratie bekomen waarde. Alle gemeten slibconcentraties worden door deze formules omgezet in meer betrouwbare waarden. Voor zandkorrels is deze correctie niet nodig, per definitie hebben ze allen een diameter boven de 53 μm en dus blijven ze ook allemaal op de filter liggen.

2.5 Snelheidsmetingen

2.5.1 LABORATORIUMMOLEN

De molen bestaat uit een schroef, diameter 3 cm, bevestigd op een horizontale as, die vrij kan draaien. Wordt het molentje in de stroming geplaatst dan is het aantal omwentelingen per tijdseenheid een maat voor de stromingssnelheid. het toerental wordt omgezet in een spanning en op een schrijver kontinu geregistreerd. (figuur 2.17)

Het molentje is voorafgaandelijk geijkt, daaruit volgt de volgende formule die het verband geeft tussen het toerental en de stroomsnelheid:

$$7,68 \cdot 10^{-4} F + 0,037 \quad F < 1035$$

$$6,91 \cdot 10^{-4} F + 0,118 \quad F > 1035$$

F haalt men, op een schaalfactor na, uit de geregistreerde spanning. Deze schaalfactor is afhankelijk van het ingestelde meetbereik.

Met dit molentje kunnen tot op 1,5 cm van de bodem snelheden gemeten worden. De aflezing is steeds een gemiddelde over de schroefhoogte d.w.z. over 3 cm, m.a.w. de bekomen snelheid is het resultaat van een integratie over de schroefhoogte.

De molen wordt bevestigd op een statief met een vertikaal verstelbare stang zodat over de ganse hoogte van de meetsectie kan gemeten worden. De hoogteinstelling kan tot op 1 mm afgelezen worden. Achteraan de meetopening is een cirkelvormige uitsparing gemaakt, net groot genoeg om het molentje door te laten. De stang waaraan het toestelletje bevestigd is, is echter dun genoeg om ook over de hele lengte van de meetgleuf metingen te kunnen doen.

2.5.2 EMS

Het molentje heeft enkele nadelen:

- inbotsende grove deeltjes zorgen voor pieken in de aflezing.
- bij hoge slibconcentraties loopt de schroef van het molentje vast en moet het toestelletje regelmatig gereinigd worden.
- de snelheid wordt geïntegreerd over de schroefhoogte.

Daarom wordt een elektromagnetische snelheidsmeter, kortweg ems uitgetest.

De werking van dit toestel berust op de wet van Faraday: wanneer een geleider beweegt in een magnetisch veld ontstaat er een elektrisch potentiaalverschil over die geleider. De schotelvormige sonde, diameter 3 cm, bestaat uit een elektromagneet en twee paren elektrodes in een omhulsel; geen bewegende delen die kunnen vastlopen, geen verstoring mogelijk door botsende deeltjes. Door stroming van het water, de geleider, in het magnetisch veld wordt tussen de twee paren elektrodes een spanning opgewekt die een lineaire functie is van de stroomsnelheid. Het signaal wordt niet beïnvloed door de geleidbaarheid van het water, het toestel werkt zowel in zout als in zoet water. Het signaal wordt doorgestuurd naar de schrijver en daar continu geregistreerd.

Omwille van de platte vorm kan men erg dicht bij de bodem komen, ideaal dus om een gedetailleerd snelheidsprofiel op te meten. Maar bij het uittesten van deze mogelijkheid blijkt het toestel de metingen sterk te beïnvloeden: wanneer de ems-meter het bed nadert gaat de stroomsnelheid onder de probe snel toenemen. Met als gevolg dat ook de erosie van het bed versnelt, zodat ter plaatse een kuil ontstaat. Deze vergroting van de afstand tussen ems en bodem doet de stroomsnelheden weer afnemen. Dit alles leidt tot onstabiele en weinig relevante snelheidsmetingen in de buurt van de bodem.

Ook dit toestel moet vooraf geijkt worden, bij het gebruikte exemplaar leidde dit tot volgende omzettingsformules:

$$X = -0,106 + 0,101 V(x)$$

$$Y = -0,112 + 0,101 V(y)$$

Hierin zijn $V(x)$ en $V(y)$ de snelheden in x- en y-richting; met een ems kunnen snelheden in twee richtingen gemeten worden. En X en Y zijn de geregistreerde spanningen.

Net als de laboratoriummolen wordt de ems op een beweegbaar statief bevestigd om over de gehele hoogte en lengte van de meetsektie te kunnen meten.

Een proef, zand + 16 % kaoliniet, wordt met dit toestel uitgevoerd. De snelheden die voorheen per motorstand ongeveer hetzelfde waren ongeacht het bodemmateriaal, liggen nu plots veel lager. (figuur 2.18) Na een eerste controle lijkt er met het toestel als dusdanig niets aan de hand te zijn. De ems wordt dan in een andere stroomgoot, waarin ook een lasersnelheidsmeter staat opgesteld, grondig uitgetest. De verstoring van het magnetisch veld door wandeffekten blijkt veel groter te zijn dan de gewenste verstoring, nl. deze geïnduceerd door de stroming. Het schoteltje mag nooit op minder dan driemaal de diameter (=9 cm) van een wand gebruikt worden. Aangezien de meetsektie slechts een doorsnede van 14,5 bij 14,5 cm heeft, is een ems niet te gebruiken. De invloed van de wanden is op alle plaatsen te groot.

Er is niet vastgesteld of er een verband bestaat tussen de gemeten en de werkelijke snelheden. Om de resultaten van het genoemde experiment toch te kunnen gebruiken worden per motorstand de stroomsnelheden bij die stand uit de vorige proefnemingen gemiddeld. Deze berekende waarden worden dan aangenomen als gemiddelde stroomsnelheden bij de proef met 16 % kaoliniet.

In alle experimenten op deze ene na worden de snelheden gemeten met een laboratoriummolen. Deze metingen blijken veel betrouwbaarder, te meer daar men aan het molentje kan zien wanneer er iets misgaat.

2.5.3 PITOTBUIS

Een andere manier om snelheden te meten is het gebruik van een pitotbuis. (figuur 2.19) Wanneer men de statische en dynamische opening van de pitotbuis verbindt met de benen van een differentieelmanometer (zie 2.6) leest men op de vervalmeter een energiehoogteverschil h af. Dit hoogteverschil is, op een verwaarloosbaar geacht energieverlies in de pitotbuis zelf na, evenredig met het kwadraat van de snelheid:

$$h = v^2 / 2g$$

Omwille van de kleine afmetingen van de pitotbuis zou men zo over gans de hoogte van de meetsectie snelheden kunnen meten. De redenen waarom deze techniek niet wordt toegepast in de verder beschreven proeven zijn van praktische aard:

Men beschikt maar over één vervalmeter die al nodig is om energieverliezen over de gehele lengte van de meetsectie te bepalen en daaruit schuifspanningen af te leiden. Eventueel zou men er kunnen aan denken om de snelheids- en schuifspanningsmetingen afwisselend uit te voeren. Aangezien snelheid en schuifspanning interafhankelijk zijn, zou zo veel informatie verloren gaan, al was het maar omdat het toch telkens even duurt vooraleer de aflezing van de manometer stabiel is.

2.6 Vervalmetingen

Om schuifspanningen te bepalen (zie volgend hoofdstuk) wordt door middel van twee pitotbuizen en een differentieelmanometer het verhang gemeten. (figuur 2.20 is een principeschets van de vervalmeter) De gebruikte vervalmeter van van Essen (figuur 2.21) is een omgekeerde U-buis manometer, speciaal geschikt om kleine waterdrukken te meten. Het verschil in hoogte tussen de vloeistofoppervlakken in de beide benen van de U-buis wordt met behulp van vlotters, de daaraan bevestigde glazen schaalverdeling en een optisch systeem direkt afgelezen. De rechterschaalverdeling is over een lengte van 100 mm in 1/1 mm verdeeld, de linker over een lengte van 20 mm in 1/10 mm. De schaalverdelingen worden samen 40x vergroot op 1 scherm afgebeeld. (figuur 2.22) Door deze konstruktie is een aflezing tot op 1/10 mm waterkolom mogelijk. Het instrument is ontworpen voor het meten van kleine hoogteverschillen in modellen. De beide benen van de manometer worden door middel van slangen verbonden met de statische opening van twee pitotbuizen, één voor- en één achteraan de meetsektie. Zo wordt het energieverlies over het bed bepaald.

Kleine luchtbelletjes in de slangen of in het toestel geven aanleiding tot een foutieve aflezing. Het duurt een week of twee vooraleer al deze belletjes verdwenen zijn en het toestel prima werkt. De vervalmetingen bij de eerste twee experimenten, zand +6 en +12 % kaoliniet zijn dan ook niet betrouwbaar.

Wanneer een verhang in zout water gemeten wordt, moet ook in de manometer het water vervangen worden door zout water, verder verlopen de metingen hetzelfde.

HOOFDSTUK III DE PROEVEN

3.1 Inleiding

3.2 De proeven

3.3 Vragen en antwoorden i.v.m. de proeven

3.3.1 de snelheidsmeting

3.3.2 het meten van de schuifspanning

3.3.3 de concentratiemetingen

3.3.4 het mengen en consolideren van het mengsel

3.1. Inleiding

Het is de bedoeling, zoals reeds in de inleiding op dit afstudeerwerk wordt vermeld, na te gaan wat de invloed is van de aanwezigheid van een zekere hoeveelheid slib in zand, op het erosiegedrag van het aldus ontstane mengsel onder een stroom.

Bij deze stelling rijzen al onmiddellijk een aantal vragen. Het gaat om verschillen in erosiegedrag .

- Men moet dus duidelijk weten welke factoren er allemaal een verschil in gedrag kunnen veroorzaken . Men kan vermoeden dat er een heleboel factoren belangrijk zijn: het soort zand en slib, het percentage slib, het zoutgehalte, de bedvorm, de wijze van mengen, de consolidatietijd en druk, de temperatuur enz....
- Men moet ook weten hoe men die verschillen in gedrag op een wetenschappelijke manier moet vaststellen en weergeven opdat men besluiten zouden kunnen trekken. Het is duidelijk dat het visuele 'er beweegt een korrel ' of 'die vorige keer was het water troebeler' tot weinig tastbare conclusies kan leiden. Het is aangewezen een literatuurstudie te verrichten om te zien hoe men in andere analoge problemen te werk gaat.

Na raadpleging van enkele algemene naslagwerken en verslagen van analoge proeven (zie literatuurlijst) zijn er reeds enkele vragen opgehelderd.

De verschillen in gedrag kan men best uitdrukken door én snelheidsmetingen én meting van schuifspanningen. Deze snelheidsmetingen kunnen via de verkregen profielen leiden tot schuifspanningen.

Uit concentratiemetingen kan men zien wat en hoeveel er in suspensie komt.

De consolidatietijd en druk verschillen in vele proeven uit de literatuur nogal en de invloed van tijd en druk veroorzaakt heel wat discussie in de verslagen van de proeven.

Daardoor weet men dat de consolidatietijd en druk gevoelige factoren zijn.

Toch zijn er nog een heleboel vragen specifiek naar de gegeven opdracht en de gegeven proefopstelling toe.

- Hoe zou men concentraties meten, waar boven het bed en op welke hoogte, wanneer in de tijd, dwars of langs afzuigen ?
- Hoe kan men de schuifspanningen meten in een opstelling zonder helling, kan men die uit het snelheidsprofiel halen of laat de gegeven opstelling dit niet toe ?
- Hoe zal men de mengsels maken zodat ze homogeen zijn, hoe brengt men ze aan, onder welke druk plaatst men ze ,hoelang ?
- Hoe kan men best de snelheid meten, waar en wanneer...?.

Het antwoord op al deze eerder praktische vragen is duidelijk heel sterk afhankelijk van de gegeven proefopstelling.

Het is dan ook aangewezen om een aantal voorbereidende proeven te doen om een beter inzicht te krijgen in de verschillende invloedsfactoren en de wijze waarop men verschillen in gedrag beter interpreteerbaar maakt. Door deze voorbereidende proeven verkrijgt men ook een beter inzicht in de gegeven proefopstelling en de werking van de toestellen.

In 3.2 wordt op een rijtje gezet welke proeven allemaal worden uitgevoerd zowel de 'voorbereidende' als de eigenlijke, hierbij worden alle parameters gegeven die deze proeven bepalen.

In 3.3 worden de belangrijkste vragen behandeld die, voorafgaand aan de 'eigenlijke' proeven en gedurende deze proeven, worden gesteld. Daarbij worden antwoorden gegeven op die vragen die door de experimenten zijn opgelost.

De resultaten van alle proeven zijn in grafieken en tabellen weergegeven in appendix en gebundeld in een apart deeltje.

De bespreking van de resultaten is onderwerp van hoofdstukIV.

3.2. De proeven

Hier worden alle proeven op een rijtje gezet. Alle zaken die een bepaalde proef karakteriseren worden daarbij aangegeven .

Voor de opstelling van de proeven en de gebruikte toestellen wordt verwezen naar hoofdstuk II.

De resultaten zijn weergegeven in appendix.

A. Snelheidsmeting met pitotbuis

A1. Meting :-snelheid

B. Voorbereidende proeven

B1. Gegevens :-zand met een $D_{50} = 105\mu\text{m}$;

-één nacht laten staan zonder gewicht;

B1a :-start van de meting = vlak bed

-motorstanden 2-5;30min tot luur per stand,
stilzetten na 3u40

B1b :-start van de meting met bedvorm einde B1a

-motorstanden 2-6

B2. Gegevens :-zand met een $D_{50} = 250\mu\text{m}$;

-één nacht laten staan zonder gewicht;

B2a -start=vlak bed

-motorstanden 2-5.5 stilzetten na 5u50

B2b -start met bedvorm einde B2A

-motorstanden 3-5.5

B3. Gegevens :-zand met een $D_{50} = 250\mu\text{m}$: 9.5 bekers;

0.5 beker kaoliniet;

-niet gekonsolideerd; droog mengen

-start=vlak bed

B1-2-3

Meting :-snelheidsmeting op 7 hoogtes

op 15cm van het einde van het bed.

B4. Gegevens :-zand met een $D_{50} = 250\mu\text{m}$: 9 bekers;
1 beker kaoliniet
-vochtig zand mengen met droog kaoliniet
-één nacht verdichten met 1kPa
-motorstand 2-5

Meting :-snelheidsmeting op 7 hoogtes op 15cm van het einde
van het bed.
-enkele concentratiemetingen dwars op de stroom op
2cm boven de bodem;
-snelheid

B1-2-3-4: Observatie

C. Concentratiemetingen

Gegevens :-zand met een $D_{50} = 105\mu\text{m}$
C1a.: -motorstand 3.5-5
C1b.: -motorstand 3.5-7

Meting :- concentraties
-op 10cm van begin van bed en op 15cm van het einde
-op 3 hoogtes boven het bed: 1.5cm; 3.5cm; 5.5cm
-in functie van de tijd bij elke snelheid

D. Vlakke plaatmeting

Gegevens :-op de bodem wordt het zand vervangen door
 een vlakke harde gladde plaat.
 Zo krijgt men 4 wanden van ongeveer
 gelijk ruwheid

D1a.:-motorstand 3-9.5

D1b.:-motorstand 3.5-8

Meting :-ladingsverlies tussen begin en einde van het bed

E. Proeven met kaoliniet

Gegevens :-zand met een $D_{50} = 105\mu\text{m}$

E1a.-E1b.:-één nacht verdichten met 1kPa

-vochtig kaoliniet mengen bij droog zand

E1c.-E1d.:-één nacht verdichten met 1kPa

-droog zand mengen in vochtig kaoliniet

E1a. 6% :-kaoliniet; motorstand 3-6.5

E1b. 12% :-kaoliniet; motorstand 3-10

E1c. 20% :-kaoliniet; motorstand 4-11

E1d. 16% :-kaoliniet; motorstand 3.5-11

Meting :-ladingsverlies tussen begin en einde van het bed

-snelheid: a-b-c met molentje

d met EMS-probe

-concentratie: op 10cm van begin van

bed, op 1.5 en 5.5cm hoogte

(C_0 en C_b)

fraktie $> 53\mu\text{m} = C_+$

$< 53\mu\text{m} = C_-$

Opmerking :-proef E1b tijdelijk stopgezet omwille van
 motorproblemen , vermoedelijk negatieve
 invloed op de proefresultaten.

Observatie

F. Proeven met zand

F1. Gegevens :-zand met een $D_{50} = 105\mu\text{m}$
één nacht verdichten met 1kPa
-motorstand 3-8

Meting :-snelheid op 7 hoogtes in het begin en op het einde
van het bed
-ladingsverlies tussen begin en einde van het bed
-concentraties op 2 hoogte

Observatie

G. Proeven met Haaftense klei

Gegevens: zand met een $D_{50} = 105\mu\text{m}$
één nacht verdichten met 1kPa droog zand mengen in
vochtige Haaftense klei

G1a. 9% Haaftense klei

G1b. 13% Haaftense klei

klei reactie op zachte temperatuur
met waterstofperoxide

Meting :-snelheid op 7 hoogtes in het begin en op het einde
van het bed
-ladingsverlies tussen begin en einde van het bed
-concentraties op 2 hoogtes

Observatie

H. Proef met zout water

Gegevens :-zand met een $D_{50} = 105\mu\text{m}$

-één nacht verdichten met 1kPa

-droog zand mengen in vochtige Haaftense klei

-zout water 33% NaCl

H1. :-12% Haaftense klei

-klei reactie met waterstofperoxide op zachte
temperatuur

Meting :-snelheid op 7 hoogtes in het begin en op het einde
van het bed

-ladingsverlies tussen begin en einde van het bed

-temperatuur

-concentraties op 2 hoogtes

Observatie

3.3 Vragen en antwoorden i.v.m. de proeven

Hierin worden de vragen, die gesteld worden tijdens de proeven , behandeld.

Men kan ze als volgt indelen:

Vragen i.v.m. 3.3.1 -de snelheidsmeting

3.3.2 -het meten van de schuifspanning

3.3.3 -de concentratiemetingen

3.3.4 -het mengen en consolideren van het mengsel

3.3.1 DE SNELHEIDSMETING

Het is de beweging van het water die de krachten levert die de erosie van de bodem mogelijk maken. De belangrijkste factor in deze beweging is de snelheid. Het is dan ook logisch dat we deze snelheid willen meten. Daarmee wordt een maat voor de krachtswerking van het water gemeten.

De snelheid van het water in de proefopstelling wordt bepaald door de rotatie van een motor met een propeller in het begin van het circuit. Die propeller maakt dat daar het water een sterk roterende beweging krijgt. Het is de bedoeling dat het water niet roterend, bij een bepaalde motorstand met constante snelheid, over het bed komt. Daartoe worden in de sectie op het einde van het eerste rechte stuk kleine buisjes mee met de stroom geplaatst. Deze moeten de draaiende stroomlijnen rechte trekken. Men kan constateren dat in het begin van het bed de roterende beweging nagenoeg verdwenen is.

Toch dient opgemerkt dat bij hoge en heel hoge snelheden men in het begin van het bed kuilvorming aan de binnenkant krijgt en sedimentatie op het einde van het bed aan de buitenzijde. Dit wijst erop dat de rotatiebeweging bij grotere snelheden opnieuw een invloed heeft.

Als men het snelheidsprofiel over de hoogte meet in het begin en op het einde van het bed ; op 7 plaatsen vanaf 1.7 cm boven het bed om de 1.5cm; dan ziet men dat in het begin zeker maar ook op het einde van het bed de snelheid praktisch homogeen verdeeld is over de hoogte. Het water stroomt met een uniforme snelheid over het begin van het bed.

Men verwacht eigenlijk een logaritmisch verloop. (zie 1.2.4) Door de actie van het water op het bed of, via de wet van actie en reactie, de actie van het bed op het water, beïnvloedt het bed de snelheid en omgekeerd. Het theoretische snelheidsprofiel stelt zich juist in doordat de ruwheid van de bodem de snelheid van het water tegen de bodem vermindert. Die verminderde bodemsnelheid wordt naar hoger overgedragen door diffusie tot op een hoogte waar het bed de snelheid niet meer beïnvloedt. Zo krijgt men dus het logaritmisch snelheidsverloop met als vergelijking

$$v(z) = (v_*/k) \ln(z/z_0)$$

waarin z = hoogte boven het bed

k = von karman coefficient (0.4)

z_0 = hoogte z waar $v=0$

$$v_*^2 = \tau/\rho$$

met τ = bodemschuifspanning

ρ = massadichtheid van het fluidum

Hier is het dus zo dat de bodem door het korte circuit niet voldoende de tijd krijgt om het snelheidsprofiel volledig te beïnvloeden. Om dit te verhelpen wordt een gaas aangebracht in de sectie net voor het bed.

Dit gaas is fijner verdeeld onderaan dan bovenaan zodat het verlies aan snelheid onderaan wordt vergroot .

Dit gaas vermindert de snelheid te veel zodat geen voldoende hoge snelheden in het circuit worden bekomen.

Tevens is het zo verkregen profiel natuurlijk ook niet bepaald door het bed maar door het gaas. Daarom wordt het gaas opnieuw verwijderd.

Deze uniforme snelheid maakt dat het eigenlijk voldoende is om slechts de snelheid op één hoogte te bepalen.

Uit 30 willekeurige grafieken leidt men af dat de afwijking die men zou hebben door in plaats van de gemiddelde snelheid, de snelheid te nemen op een hoogte van 6.2 cm boven het bed, dat die afwijking gemiddeld gelijk is aan 0.0077 m/s

Indien men de snelheid zou nemen op 4.7 cm als gemiddelde, zou die een afwijking op het echte gemiddelde vertonen van 0.0061 m/s .

De snelheid wordt toch op 7 hoogtes gemeten omdat er op het einde van het bed, zeker bij hoge snelheden, nog een zeker profiel in de snelheidsverdeling zit. De gemiddelde snelheid wordt gewoon als het algebraïsch gemiddelde van de 7 snelheden gedefinieerd. Dit blijkt slechts een zeer geringe afwijking te leveren van het theoretische gemiddelde waarbij men de snelheden integreert over de hoogte en deelt door de totale hoogte. De reden daarvoor is andermaal de uniforme snelheidsverdeling.

De toestellen waarmee men de snelheid meet worden in 2.5 besproken. Hier dient nog vermeld dat de snelheden in proef Eld, gemeten met een E.M.S probe, niet zinvol zijn. (zie 2.5.2)

Tenslotte dient nog vermeld dat de snelheid op 10 cm van het einde van het bed wordt gemeten. Het is immers niet nodig de snelheid op 2 plaatsen te meten daar men veronderstelt dat de gemiddelde snelheid dezelfde is in het begin en op het einde van het bed. De meting gebeurt op het einde vooral om de praktische reden dat men het molentje door de opening op het einde van het bed moet inbrengen. Een bijkomende reden is dat daar het theoretisch snelheidsprofiel meer wordt benaderd dan in het begin.

Dit is interessant voor het afleiden van de schuifspanningen (zie 3.3.2). De meting gebeurt op 10cm om de mogelijke invloed van de overgang van het zandbed naar de gladde leiding (zie 2.2) te vermijden. In dit opzicht is er ook een driehoekig element aangebracht dat de overgang van zand naar leiding geleidelijker maakt (zie opstelling).

3.3.2. METEN VAN DE SCHUIFSPANNINGEN

Om de krachtswerking tussen water en bodem te karakteriseren heeft men de bodemschuifspanningen nodig. Zoals in Hfs 1.2.2 wordt afgeleid is de bodemschuifspanning voor een stroming over een zandbodem onder invloed van een bodemverhang i gelijk aan

$$\tau = \rho g R i$$

waarin R de hydraulische straal van de dwarsdoorsnede (=natte oppervlakte/natte omtrek) en i het bodemverhang.

In de opstelling krijgt het water echter zijn snelheid door de propeller en niet door een bodemverhang.

1

De meest aangewezen methode ter bepaling van de schuifspanningen lijkt dan de afleiding uit de snelheidsprofielen.

Het theoretisch snelheidsprofiel is immers (zie hoger)

$$v(z) = (v_*/k) \ln(z/z_0)$$

waaruit volgt $v = v_*/k \cdot (\ln(z) - \ln(z_0))$

dit is van de vorm $y = a \cdot x + b$

Uit de profielen, snelheid in functie van logaritme van de hoogte boven het bed, kan men de helling a halen. Men kan dit bv. door lineaire regressie .

Uit $a = v_*/k$ halen we τ via

$$\tau = \rho \cdot k^2 \cdot a^2$$

en uit

$$\tau = \rho g \cdot v^2 / C^2$$

kan men de Chézy-coëfficiënt (C) halen.

De helling a is functie van de bodemligging daar men een logaritmische omzetting heeft. De bodemligging is echter niet zo eenvoudig te bepalen. Men start van een vlak bed waar de bodemligging duidelijk is maar eens er ribbels worden gevormd is die ligging niet meer zo duidelijk en bovendien zijn de waarden van de schuifspanningen die afgeleid zijn uit de snelheidsprofielen erg gevoelig voor een wijziging van die bodemligging. Men kan dit echter oplossen door de bodem zo te bepalen dat de meetwaarden het beste de rechte $y=a.x+b$ benaderen, de bodem dus zo te bepalen dat ons snelheidsprofiel het best het theoretisch benadert.

Dit alles leidt ertoe te stellen dat de schuifspanningen eventueel kunnen afgeleid worden uit het snelheidsprofiel maar dan alleen maar voor zover dit het theoretische benadert. Daar in de praktijk en zoals, hierboven wordt besproken, zeker in deze proefopstelling dit niet zo is, dient te worden besloten dat op deze wijze hier geen schuifspanningen afgeleid kunnen worden. Er moet dus naar andere oplossingen worden gezocht.

2

Nu kan men met 2 pitotbuisjes op gelijke hoogte één in het begin en één op het einde van het bed, het verschil in statische drukhoogte tussen begin en einde van het bed meten. Aangenomen dat de snelheidshoogte in het begin en op het einde dezelfde is meet men daarmee het verschil in totale energiehogte. Dit is het totale ladingsverlies over het bed, ΔF . Het is dit verschil in energiehogte dat de stroom bepaald.

Het ladingsverlies per lengteeenheid $\Delta F/l$ is de helling van de totale energielijn(= i). Die helling is voor éénparige stromingen in open kanalen gelijk aan de bodemhelling. We beschouwen de opstelling als een open kanaal (zie 2.2).

Daaruit volgt dat $\tau = \rho g.R.i$ kan geschreven worden als

$$\tau = \rho g.R.\Delta F/l$$

In de proeven E F G H wordt dan ook het ladingsverlies tussen begin en einde van het bed gemeten. In proeven Ea en Eb zijn er echter nog luchtbellens in de differentieel-manometer aanwezig zodat pas vanaf de volgende proeven de metingen van het verhang betrouwbaar zijn.

Met dit ladingsverlies meet men niet alleen het verlies over het bed maar ook over de 3 andere wanden. Daar men geïnteresseerd is in de schuifspanning over de bodem dient men op een of andere manier dit verlies over de 3 wanden in rekening te brengen.

In eerste instantie wordt er gewoon een referentiemeting(D) uitgevoerd met een gladde vlakke plaat als bodem. Dit maakt dat de ruwheid van de bodem overeenkomt met die van de wanden. Door hier het verlies te meten is het verlies over de 3 vlakke wanden ($=3/4$ van het totale verlies) gekend bij een bepaalde snelheid.

Het ladingsverlies veroorzaakt door de bodemruwheid is dan het verschil tussen het totale ladingsverlies en dit veroorzaakt door de 3 gladde wanden bij een bepaalde snelheid.

Deze redenering is natuurlijk niet helemaal correct.

Ze zou immers inhouden dat het aandeel van de bodemruwheid in het totale ladingsverlies constant zou blijven bij toenemende snelheid. Daardoor zou de sectie opgesplitst kunnen worden in 4 gelijke delen die elk door de schuifspanning op een wand beïnvloed worden. Het is echter zo dat bij toenemende snelheid en dus bij toenemende bodemruwheid de invloed van de bodemschuifspanning groter wordt en de bodem dus een groter deel van de sectie beïnvloedt. Een derde methode om de schuifspanningen te berekenen is dan ook de procedure genaamd 'side-wall correction' waarbij men dus juist dit wijzigend aandeel van de bodem in rekening zal proberen te brengen.

3

Side-wall correction ¹

(methode van Johnson gebaseerd op de Darcy-Weisbach formule)

¹ VANONI, V.A. en BROOKS, N.H., Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, California Institute of Technology

Formules : 1) $R = A/P =$ hydraulische straal

$$2) U_*^2 = g.R.i$$

$$3) f = 8.U_*^2/U^2 = \text{Darcy-Weisbach wrijvingsfactor}$$

$$4) Re = 4.U.R/\nu = \text{Reynolds getal}$$

met

U_* = wrijvings- of schuifspanningssnelheid

i = helling van de energielijn

ν = kinematische viscositeit

g = valversnelling

U = de gemiddelde snelheid

- Aannames: -de dwarsdoorsnede kan onderverdeeld worden in 2 delen, het ene wordt beïnvloed door de schuifspanning over de bodem, het andere door deze over de wanden. We krijgen zo 2 natte omtrekken de ene voor de bodem de andere voor de wanden (p_b en p_w).
- de snelheid in de 'wanddoorsnede' U_w is gelijk aan deze in de 'bodemoorsnede' U_b .
- de formules voor Re , U_* , f en R kunnen toegepast worden zowel op elke sectie als op het geheel.
- de ruwheid van zowel de wanden als de bodem zijn homogeen maar verschillend.

De volgende grootheden worden als gekende variabelen genomen: U , $i(=\Delta F/L)$, p_w , ρ , p_b en A . De grootheden R , U_* , f en Re kunnen voor de ganse sectie direct bepaald worden uit de vergelijkingen a tot d. De belangrijkste onbekenden zijn U_{*b} , de wrijvingsnelheid over het bed, R_b , de bodem hydraulische straal en f_b de bodem wrijvingsfactor (uit deze 3 kunnen we de gezochte τ_b afleiden). Om het probleem op te lossen moet men ook f_w kennen. De wrijvingsfactor over de wanden kan, indien de equivalenten zandruwheid van de wanden gekend is, gehaald worden uit gestandaardiseerde leidingsweerdstand diagrammen. Voor gladde wanden is f_w echter alleen maar een functie van het Reynoldsgetal

$$Re_w = 4 \cdot U_w \cdot R_w / v = 4 \cdot U \cdot R / v$$

Daar R_w een onbekende is kunnen we dit ook schrijven als

$$5) \quad Re_w = Re \cdot R_w / R$$

uit vergelijking 2 en 3 halen we

$$6) \quad g \cdot R_w \cdot i = f_w \cdot U^2 / 8$$

$$7) \quad g \cdot R \cdot i = f \cdot U^2 / 8$$

uit 6 en 7 volgt

$$8) \quad R_w / R = f_w / f$$

zodat 5 kan geschreven worden als

$$9) \quad Re_w / f_w = Re / f$$

analoog aan 8 kunnen we schrijven

$$8') \quad R_b = f_b / f$$

Men kan dus de verhouding Re_w / f_w onmiddellijk bepalen, maar niet Re_w en f_w afzonderlijk. Men heeft een curve nodig die f levert in functie van R/f . Deze kan afgeleid worden uit de grafiek f in functie van R gegeven door Rouse en gebaseerd op de Karman-Prandtl weerstandsvergelijking voor turbulente stroom in gladde leidingen. (Zie figuur 3.1.)

Vergelijking: $1/ f_w = 2 \cdot \log(Re_w / f_w \cdot f_w) - 0.8$

$$1/ f_w = 2 \cdot \log(Re / f \cdot f_w) - 0.8$$

Daaruit volgt dat indien men f en Re kent, men behulp van vergelijking 9 en de grafiek f_w kan bepalen.

Uit geometrische beschouwingen volgt dat

$$10) A = A_b + A_w$$

en door $R=A/P$ te vervangen in vergelijking 7 weet men

$$A = p \cdot f \cdot U^2 / 8 \cdot g \cdot i$$

$$\text{of} \quad A_b = p_b \cdot f_b \cdot U^2 / 8 \cdot g \cdot i$$

$$\text{en} \quad A_w = p_w \cdot f_w \cdot U^2 / 8 \cdot g \cdot i$$

Als men deze vergelijkingen in vergelijking 10 stopt en de gemeenschappelijke factor $U^2/2 \cdot g \cdot S$ wegdelen krijgt men

$$11) p \cdot f = p_b \cdot f_b + p_w \cdot f_w$$

daarin is f_b de enige onbekende.

$$12) f_b = p \cdot f / p_b - p_w \cdot f_w / p_b$$

Daar men hier een vierkante sectie heeft en het water de volledige omtrek nat maakt is:

$$p = 4b$$

$$p_b = b$$

$$p_w = 3b$$

zodat vergelijking 12 vereenvoudigd kan worden tot

$$13) f_b = f + (1+2)(f-f_w) = 4f - 3f_w$$

uit vergelijking 8' weet men dat:

$$14) R_b = R \cdot f_b / f$$

wat men kan invullen in vergelijking 2 :

$$2') U_{*b}^2 = g \cdot R_b \cdot i = g \cdot R_b \cdot \Delta F / L$$

zodat uiteindelijk

$$15) \tau_b = \rho \cdot U_{*b}^2$$

Zo heeft men dus de schuifspanning uit het ladingsverlies bepaalt, op een manier die nauwer aansluit met de fysische werkelijkheid. Om de methode te verduidelijken wordt een rekenvoorbeeld gegeven.

Proef: zand $D_{50} = 105 \mu\text{m}$

Gegeven: $U = 0.22 \text{ m/s}$

$$\Delta F = 0.79 \text{ mm} = 0.79 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 0.96 \text{ m (afstand tussen de 2 pitotbuizen)}$$

$$\Delta F / L = 0.823 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Vgl 1} \quad R = h/4 = 0.145/4 = 0.03625 \text{ m}$$

$$\text{Vgl 2} \quad U_* = \sqrt{9.81 \cdot 0.03625} = 0.0171 \text{ m/s}$$

$$\text{Vgl 3} \quad f = 8 \cdot 0.0171^2 / 0.22^2 = 0.04837$$

$$\text{Vgl 4} \quad \text{Re} = 4 \cdot 0.22 \cdot 0.03625 / 1.10^{-6} = 31900$$

$$\text{Vgl 9} \quad \text{Re}/f = \text{Re}_w / f_w = 659499.7$$

$$\text{Grafiek 3.1} \quad f_w = 0,0264$$

$$\text{Vgl 13-14} \quad R_b = 0,03625 \cdot (4 - 3 \cdot 0,0264 / 0,04837) = 0.0856$$

$$\text{Vgl 2'} \quad U_{*b}^2 = 9.81 \cdot 0.0856 \cdot 0.823 \cdot 10^{-3} = 0.00069$$

$$\text{Vgl 15} \quad \tau = 1000 \cdot 0.00069 = 0.69 \text{ N/m}^2$$

4

Een laatste manier om schuifspanningen te bepalen is ze af te leiden uit de bodemruwheid.

De Chezy formule $V = C \sqrt{R \cdot i}$ leert dat $i = V^2 / C^2 \cdot R$

zodat $\tau_b = \rho g V^2 / C^2$

Indien men dus C kan bepalen kent men de bodemschuifspanning. Nu is C gedefinieerd als

$$C = 18 \log(12h/r)$$

met h de waterhoogte en r de bodemruwheid.

Het komt er dus op aan de bodemruwheid te kennen. Voor deze zijn er vele uiteenlopende formules.

Voor een vlak horizontaal zandbed wordt de ruwheid afgeleid uit de korreldiameter.

Enkele suggesties :

Ackers en White	(1973)	$r = 1.25 d_{35}$
Einstein	(1950)	$r = d_{65}$
Engelund en Hansen	(1967)	$r = 2 d_{65}$
Kamphuis	(1975)	$r = 2.5 d_{90}$
van Rijn	(1984)	$r = 3 d_{90}$

In werkelijkheid is het bed meestal niet vlak. De bedruwheid wordt dan bepaald door de ribbelgeometrie

Swart	(1976)	$r/n = 25 n/l$
van Rijn	(1982)	$r/n = 1.1(1 - e^{-25n/l})$

waarin n = ribbelhoogte
 l = ribbellengte

In de observatie worden de afmetingen van de ribbels gemeten. Daar de ribbels over het ganse bed niet even hoog en even lang zijn dient een gemiddelde lengte en hoogte te worden genomen. Deze bepaald de gemiddelde bodemruwheid en zo de gemiddelde bodemschuifspanning over gans het bed.

De gemiddelde hoogte wordt proportioneel met ribbellengte berekend.

D.w.z dat b.v. gegeven :- 1 ribbel 6cm lang en 2cm hoog en

1 ribbel 1cm lang en 1cm hoog

de gemiddelde lengte $(6 + 1/2) = 3.5\text{cm}$ is en de gemiddelde hoogte $1 \cdot 1/7 + 2 \cdot 6/7 = 13/7 = 1.86\text{cm}$.

De aldus berekende schuifspanningen blijken heel goed overeen te komen met deze berekent volgens de side-wall correction methode.

We hernemen het voorbeeld van hierboven:

Proef: zand $D_{50} = 105 \mu\text{m}$

Gegeven: $U = 0.22 \text{ m/s}$

Ribbels : van 0-10.5cm vlak(0cm hoog)

: 1 ribbel 6cm lang 1cm hoog

1 ribbel 7cm lang 1.5cm hoog

1 ribbel 6.5cm lang 2cm hoog

Berekening: gemiddelde lengte $l = 6.5$ cm lang

gemiddelde hoogte:

$$n = (0 + 6*1 + 7*1,5 + 2*6,5)/30 = 0,98 \text{ cm}$$

$$r = 0.98*25*0.98/6.5 = 3.717 \text{ cm (Swart)}$$

$$C = 18 \log(12*14.5 / 3.717) = 30$$

$$\tau = 1000*9.81*0.22^2 / 30^2 = 0.53 \text{ N/m}^2$$

3.3.3 CONCENTRATIEMETINGEN

Het doel van de concentratiemetingen is een maat te hebben voor de erosie. Men wenst te weten wat er erodeert, zand of slib of beiden, wanneer in de tijd, op welke plaats en bij welke snelheid of schuifspanning. Hoe het geërodeerde verdeeld is over de hoogte.

Men verwacht een theoretische concentratieverdeling zoals gegeven in Hoofdstuk 1.2.4.

Om dit profiel op te meten worden de concentratieproeven Cla en Clb uitgevoerd met afzuigpijpjes op 3 hoogtes boven het bed. De concentraties worden afgezogen op 10cm van het begin van het bed om de invloed van de overgangsturbulentie te vermijden, om dezelfde reden ook op 15cm van het einde van het bed.

Er wordt gemeten in het begin en op het einde om deze 2 profielen te vergelijken.

Er wordt waargenomen dat in het begin van het bed de concentratie uniform is over de hoogte. Dit is een gevolg van het doorenmengen van het water door de propeller. Het doorengemengde mengsel heeft in de leidingen een hoge snelheid en krijgt dus geen kans om een concentratieverdeling op te bouwen. Bij de intrede over het bed daalt de snelheid, het bed wordt geërodeerd en kan men zien dat op het einde van het bed er reeds een zekere concentratieverdeling over de hoogte is. Indien men geïnteresseerd is in het sedimenttransport dan betekent de vaststelling van een uniforme verdeling in het begin van het bed dat het volstaat om de concentratie af te zuigen op één hoogte in het begin. Hier worden in het vervolg van de proeven de concentraties afgezogen in het begin van het bed en op 2 hoogtes, 1.5 en 5.5 cm boven het bed. Dit

laatste om eventuele fouten op te sporen en uit te middelen, beiden moeten in elk geval in elkaars grootteorde liggen.

De concentraties worden in de proeven Cla en Clb op regelmatige tijdstippen in de tijd genomen. Zie figuur 3.2, 3.3, 3.4, 3.5.

Hieruit kan men afleiden dat de concentraties vanaf een gegeven moment schommelen in de tijd omheen een zelfde waarde.

Daaruit wordt besloten dat het zeker 1.30 u vraagt vooraleer de concentratiemetingen constant zijn. Enkele metingen na elkaar leveren een gemiddelde concentratie die de echte goed moet benaderen.

Uit de metingen bij $v=30$ m/s, waar een concentratie na 18minuten afgezogen wordt, ziet men dat de concentratie van een hoge waarde vertrekt om dan te schommelen rond een gemiddelde waarde.

Dit betekent dat onmiddellijk na een snelheidsverhoging we een verhoogde erosiewerking krijgen die daarna terug wat vermindert. Dit wordt door observatie bevestigd. Er wordt immers altijd onmiddellijk na een snelheidsverhoging een verhoogde beweging in het begin van het bed vastgesteld.

Bij een snelheid van 34 cm/s ziet men dit niet zo goed, doch daar was de eerste meting pas na 40 minuten dus reeds ruimschoots na de snelheidsverhoging.

De concentratiemetingen worden uitgevoerd met afzuigpijpjes zoals in hoofdstuk II besproken. Dit afzuigen kan langs of dwars op de stroomrichting gebeuren.

Indien het volgens de stroomrichting gebeurt moet men ervoor zorgen dat dit isokinetisch gebeurt. Indien de afzuigsnelheid immers groter is dan de stroomsnelheid worden stroomlijnen in de afzuigpijp 'gezogen' wat een verkeerde concentratiemeting oplevert, analoog ontwijken de stroomlijnen de pijp indien de snelheid er te laag is. De snelheid kan men regelen door het verval tussen de afzuigsectie en de uitstroomsectie van de afzuigpijpjes te vergroten of te verkleinen totdat men de juiste snelheid bekomt.

Daar men deze snelheid bij elke motorstand wijzigt zou dit betekenen dat men er voortdurend zou moeten op letten de juiste afzuigsnelheid te hebben.

Om deze problemen te vermijden kan men dwarsafzuigen. Bij deze methode, ontwikkeld door Delft Hydraulics en onderzocht door Bosman (1987) (zie literatuurlijst), staan de afzuig- pijpjes loodrecht op de stroomrichting. Omdat het water nu niet in de buis stroomt is wel degelijk een afzuiging nodig. Er werd uit proeven bewezen dat indien de afzuigsnelheid groter is dan drie keer de stroomsnelheid men representatieve monsters krijgt.

Er wordt ook aangetoond dat de afzuigdiameter best 3mm is. Deze monsterafnames verschillen op een factor van de echte concentraties. Deze factor wordt vooral bepaald door de korreldiameter en is meestal rond de 1.25. Voor deze concentratieproeven voor zand is de factor 1.28. Uit deze concentraties kan men het totale transport afleiden.

In het nu volgend stukje wordt besproken hoe men de waarde van de concentratie haalt uit de afgezogen monsters. De opstelling en de apparatuur worden kort beschreven in hoofdstuk 2.4.3.

Aangezien geen enkele van de gebruikte slib/klei soorten snel uitvlokt in zout water, is concentratiebepaling d.m.v. het onderwaterweegtoestel (zie 2.4.2) onmogelijk. Meer aangewezen lijken : filtratie en het gebruik van een pycnometer. In ieder geval moet vooraf de zand en slibfractie van elkaar gescheiden worden. Dit gebeurt door nat zeven op 53 μm . Uit de zeefkromme van het gebruikte zand blijkt immers dat de fractie $< 53 \mu\text{m}$ verwaarloosbaar is, zodat we per definitie kunnen stellen dat de fraktie $> 53 \mu\text{m}$ de zandfractie is en de fraktie $< 53 \mu\text{m}$ de slibfractie. Om de scheiding voldoende nauwkeurig door te voeren dient de zeef grondig met water gespoeld te worden. Het gevolg is dat hieruit i.p.v. de afgezogen 200 ml een ander onbekend volume slibhoudend water resulteert. Bij het gebruik van een pycnometer is het totale volume wel enorm belangrijk. Met een pycnometer bepaalt men uitgaande van een gekend volume en een gemeten gewicht, dichtheden. Die dichtheden rekent men om tot het absolute gewicht van het sediment in dat volume. Daar we dus een ander dan het belangrijke totale volume hebben is deze methode minder geschikt. Daarom wordt geopteerd voor filtratie, zowel om het slibgehalte als het gewicht van het zand te bepalen.

Eerst wordt de afgezogen fractie op 53 micrometer gescheiden, waarna achtereenvolgens het slib en het zand gefilterd wordt. De filters worden vooraf gewogen.

De filters met sediment worden gedroogd in een oven samen met enkele lege referentiefilters. Het verschil tussen het gewicht voor en het gewicht na filtratie is een maat voor de gezochte concentratie. De referentiefilters dienen om rekening te kunnen houden met verschillen in relatieve vochtigheid van de lucht. De filterpapieren slorpen immers de vochtigheid op, een kleine correctie is dan nodig.

3.3.4. MENGEN EN CONSOLIDEREN.

Het is belangrijk te stellen dat wat men doet representatief moet zijn voor de werkelijkheid. In de proeven moet men echter ook sterk rekening houden met de uitvoerbaarheid en de reproduceerbaarheid van zowel mengen als consolidatie. Men wil immers de proeven onderling vergelijken en daarbij verschillen veroorzaakt door de wijze van mengen en consolideren uitsluiten.

Waarschijnlijk bevindt het slib zich gelaagd op de zeebodem daar het ook in lagen wordt afgezet. Een zekere mate van mengen is echter ook niet uit te sluiten. Het gelaagd aanbrengen van slib in de proefopstelling is echter praktisch moeilijk uitvoerbaar.

Men zou voor de verschillende proeven en dus voor de verschillende hoeveelheden slib een uitvoering moeten vinden die de onderlinge resultaten niet beïnvloedt. Het is dan ook aangewezen om echte mengsels te maken. Het is duidelijk dat de menging zo homogeen mogelijk moet zijn om vergelijkbare resultaten te krijgen. Men wenst ook dat het mengsel een zekere cohesie heeft.

In de voorbereidende proef B3 wordt er droog zand en droog kaoliniet gemengd. Bij het vullen met water van de proefopstelling komt het kaoliniet onmiddellijk in suspensie.

Er is onvoldoende cohesie, droog slib en droog zand hebben onvoldoende binding. Het is ook nodig het mengsel een tijdje onder een zekere druk te laten staan, het te laten consolideren.

In de voorbereidende proef B4 wordt vochtig zand met droog kaoliniet gemengd en het bed wordt één nacht verdicht met 1kPa. Het mengsel op die manier verkregen blijkt niet voldoende homogeen te zijn.

In de proeven Ela en Elb wordt kaoliniet opgelost in water tot een brij en dit wordt in droog zand gemengd. Dit geeft een tamelijk homogeen mengsel. Het mengsel wordt van dan af altijd één nacht verdicht onder een druk van 1kPa, een soort standaard voor onze proeven.

De mengwijze die de grootste homogeniteit oplevert is deze van Elc en Eld. Daar wordt het kaoliniet in water gemixed tot een brij. In deze brij, en niet omgekeerd, wordt het droge zand beetje per beetje ondergemengd. Het brengen van een droge massa in een vochtige geeft een homogener geheel dan omgekeerd. Het is dan ook deze methode die wordt aangehouden, ook in de proeven met de Haaftense klei.

De verhouding zand-slib wordt voor het mengen afgewogen en na het mengen door middel van monsternamen gecontroleerd. Volumeverhoudingen worden niet gebruikt daar de aanwezigheid van holle ruimtes de exacte bepaling van de verhouding zand-slib moeilijk maakt.

De standaardverdichting van 1kPa gedurende 1 nacht is weliswaar een standaard maar laat toch nogal wat twijfels toe. Ze zegt immers niets over de invloed van het percentage holle ruimtes in het bed, die daarmee helemaal niet gestandaardiseerd zijn.

Het samenpersen in blokken is wellicht een betere standaard maar is dan weer praktisch moeilijker uitvoerbaar.

Die één nacht is slechts een standaardisatie voor het begin van een proef. Men kan zich de vraag stellen in welke mate het mengsel een verandering heeft ondergaan wanneer men het een weekend laat staan. Men mag verwachten dat daardoor de cohesie van het mengsel vergroot.

De invloed van het vochtgehalte van de mengsels bij de aanvang van de proeven op de weerstand tegen erosie dient nader onderzocht. Hiervoor moet men het vochtgehalte op zijn minst relatief kunnen bepalen. Om de invloed van het vochtgehalte uit te schakelen moet men een standaardisatie vinden.

HOOFDSTUK IV RESULTATEN

4.1 Inleiding

4.2 Algemeen

4.3 Sedimenttransport

4.4 Schuifspanningen

4.5 Waarnemingen

4.1 Inleiding

Hoofdstuk 4 bevat de bespreking van de resultaten van alle experimenten. In een eerstvolgend deel worden kwalitatief de optredende fenomenen besproken. Verder wordt beschreven welke de meetresultaten zijn, hoe deze waarden worden omgezet in de gewenste afgeleide grootheden en welke de foutenmarges zijn waarbinnen het resultaat ligt.

De volgende paragrafen behandelen enkele aspecten in detail.

Sedimenttransport is het onderwerp van 4.3. De bekomen waarden uit de verschillende proeven worden besproken en onderling vergeleken. Daarnaast wordt een vergelijking gemaakt met een reeds bestaande transportformule voor zand.

In het volgende deel, 4.4, komen de bodemschuifspanningen aan bod: hoe de schuifspanningen verlopen in functie van de gemiddelde snelheid, mengsamenstelling, tijd... wordt nagegaan.

Paragraaf 4.5 bevat alle waarnemingen. Aan de hand van grafieken die de ribbelafmetingen in functie van de gemiddelde snelheid geven voor de verschillende experimenten, wordt het verloop van de erosieproeven besproken.

Tot slot dient nog te worden vermeld dat alle meetresultaten zijn opgenomen in tabellen. Deze tabellen zijn gebundeld in de appendix, waarin ook alle grafieken en figuren, waar in de tekst wordt naar verwezen, zijn opgenomen.

4.2 Algemeen

Vooraleer de resultaten in detail te bespreken is het misschien nuttig even kwalitatief alle verschijnselen, die zich tijdens de experimenten voordoen, op een rijtje te zetten.

Doel van de proeven is het erosiegedrag van zandslibmengsels te bestuderen en in het bijzonder de invloed van de aard en de hoeveelheid slib na te gaan.

Het erosieproces van een mengsel verloopt algemeen als volgt:

Bij lage snelheden gebeurt er zo goed als niets. Eventueel vertroebelt het water lichtjes door het in beweging komen van restmateriaal uit een vorige proef dat, ondanks grondig spoelen, toch nog in de retourleidingen is achtergebleven.

Wordt de snelheid wat opgevoerd dan ziet men wat beweging in de buurt van het bed (licht bodemtransport) en uit het bovenste laagje wordt wat slib weggespoeld. Na het mengsel een nacht geconsolideerd te hebben, wordt het bovenste laagje immers onvermijdelijk licht 'beschadigd' bij het wegnemen van de bodemplaat en consolidatiegewichten.

Verder verhogen van de snelheid doet echte erosie ontstaan: het water wordt meer troebel door het meegevoerde suspensietransport, in het bed ontstaan ribbels. Omdat de snelheid niet continu varieert maar telkens met een bepaalde motorstand verhoogd wordt, doen er zich vlak na de bruske snelheidsverandering overgangsverschijnselen voor. In eerste instantie lijkt het alsof er net na de verandering van motorstand een heel laagje weggespoeld wordt. Stilaan stelt zich een evenwicht in waarbij het lichte slib in suspensie blijft en het zand geheel of gedeeltelijk weer neervalt. Het resultaat is een gelaagd bed: het onderste deel is het oorspronkelijke mengsel, het bovenste laagje, meestal de ribbels, zijn geheel of gedeeltelijk ontmengd.

Bij nog hogere snelheden zal ook het zand in suspensie blijven. De ribbelhoogten zullen uiteindelijk weer afnemen en het bed wordt opnieuw vlak.

Wanneer men de evolutie van het transport voor zand en slib afzonderlijk bekijkt, blijkt inderdaad (zie 4.3) de slibfractie bij lagere snelheden te bewegen. Bij hogere snelheden zal het zandtransport snel toenemen en eventueel zelfs groter worden dan het slibtransport.

De opeenvolgende bedvormen kunnen afgeleid worden uit het verloop van de schuifspanning in functie van de snelheid (4.4) en de evolutie van de ribbelhoogten (4.5).

Alles bij elkaar lijkt het erosiegedrag van mengsels sterk op dat van zand: bij lagere snelheden verdwijnen de kleinste korrels uit de bovenste laag. De toplaag vormt dan een pantserlaag die verdere uitspoeling van het slib bij die stroomsnelheid tegengaat. Een constante erosion rate, zoals bij uniforme slibbedden, treedt niet op, ook niet bij hogere snelheden. Integendeel, bij elke gemiddelde stromingssnelheid zal de erosion rate naar 0 gaan: het slib zit vast onder de pantserlaag, ook bij hogere stromingssnelheden vormt er zich na verloop van tijd steeds een ontmengd bovenlaagje in zand, dat evenwel vlak na elke snelheidsverhoging weggeërodeerd wordt en zo aanleiding geeft tot verhoogde transportwaarden. Bij zand treedt er een evenwicht op tussen erosie en sedimentatie. Dit laatste komt tot uiting in het veranderende ribbelpatroon: een opschuiven van de ribbels naar afwaarts, ondanks een constant transport en een constante gemiddelde snelheid.

De juiste snelheden die de overgang vormen tussen de zopas beschreven fazen in het erosieproces worden bepaald door de aard en het percentage slib. De manier waarop de mengsels zijn samengesteld speelt eveneens een rol. De eerste kaolinietmengsels, waarbij het kaolinietwatermengsel bij het droge zand wordt gevoegd, zijn veel minder homogeen en bevatten vele klonters kaoliniet. De vochtigheid van het mengsel tijdens de konsolidatie is eveneens van belang.

Uit het voorafgaande blijkt dat enige kwantitatieve informatie zeker op zijn plaats is. In paragrafen 4.3 t.e.m. 4.5 zullen de eerder vermelde fenomenen uitgediept en met cijferwaarden en grafieken verduidelijkt worden. Hoe men tot die cijferwaarden komt en welke hun nauwkeurigheid is, zal in het vervolg van deze paragraaf behandeld worden.

Snelheid

De gemiddelde stroomsnelheid van het water, v_{gem} , is wel een van de belangrijkste meetresultaten. Zoals vroeger reeds vermeld worden snelheden gemeten met behulp van een laboratorium molentje. Wanneer het molentje in de stroming wordt geplaatst registreert de schrijver een spanningssignaal (zie figuur 4.1). Rekening houdend met de gevoeligheidsinstelling van de schrijver (1 schaaldeel = X Volt) kan men een gemiddelde spanning aflezen. Door toepassing van de ijkingsformule van het gebruikte molentje (zie 2.5.1) kan die gemiddelde spanning omgezet worden in de gemiddelde snelheid op die bepaalde hoogte.

Bij deze v_i (snelheid op hoogte i) hoort natuurlijk ook een fout, die door σ_i (de standaardafwijking) kan worden beschreven. Het opgenomen spanningssignaal bevat vele pieken. Redelijkerwijze kan worden aangenomen dat

$$v_{max,i} - v_{min,i} = 3\sigma_i.$$

Deze $v_{max,i}$ en $v_{min,i}$ bekomt men door de maximale en de minimale spanning van de meting op hoogte i met de ijkingsformule om te zetten in snelheden (zie eveneens figuur 4.1). Voor alle gedane snelheidsmetingen kan men zo de σ_i bepalen. Bij hogere snelheden ontstaan er grotere pieken omdat meegesleurde zand- en slibdeeltjes tegen de schoepen van het molentje botsen. Relatief gezien blijft de fout wel min of meer constant aangezien samen met de σ_i ook de v_i toenemen.

Snelheden worden steeds op zeven verschillende hoogtes gemeten (zie 3.3.1). Deze zeven waarden worden gesommeerd en gedeeld door zeven om de gemiddelde stromingssnelheid te bekomen; dus

$$v_{gem} = (\sum v_i) / 7 .$$

Uit de statistiek weet men dat

$$\sigma_{gem} = 1/7 \sqrt{\sum(\sigma_i)^2}$$

Deze berekeningen herhaald voor alle v_{gem} resulteert in een relatieve fout van 1 à 1,5% op v_{gem} .

De juiste definitie voor v_{gem} is

$$v_{gem} = 1/A * \int \int v * db * dh$$

Aangezien de snelheidsprofielen vrijwel een uniform verloop over de hoogte aangeven, maakt men door het gebruik van de formule $v_{\text{gem}} = (\sum v_i) / 7$ weinig extra fouten (zie figuur 4.2). Het aannemen van een constante snelheid over de gehele breedte is ook slechts in de buurt van de gladde glazen wanden fout. Zodat algemeen kan worden gesteld dat de fout op de gemiddelde snelheid beneden de 3% ligt. Concreet betekent dit voor snelheden tussen 0,15 en 0,45 m/s dat de nauwkeurigheid van de grootteorde van 1 cm/s is.

Transport

Een tweede belangrijk resultaat zijn de concentratiemetingen, die kunnen worden omgerekend in transporten. Concentraties worden bepaald door een massa droge stof te delen door het totaal volume vloeistof dat deze stof omvat.

Dit volume afgetapte vloeistof bedraagt gemiddeld 200 ml met een fout van ongeveer 10 ml.

De massa droge stof, na filtratie, wordt gewogen met een nauwkeurigheid van 0,001 g. Daar de filters ook een hoeveelheid luchtvochtigheid opslorpen dient telkens een correctie van om en bij de 0,005 g toegepast te worden. Het lijkt dan ook redelijk te stellen dat de gewichten met een nauwkeurigheid van 0,005 g bepaald worden.

Samengevat geeft dit als fout op de concentratie:

$$C = \text{massa/volume} = M/I$$

$$(\sigma_C/C)^2 = (\sigma_M/M)^2 + (\sigma_I/I)^2$$

De relatieve fout op de gewichten, σ_M/M , neemt blijkbaar fel af met toenemende massa droge stof. Dit effect wordt nog versterkt door de fout die gemaakt wordt als een resultaat van de doorlatendheid van de gebruikte filters. Uit figuur 2.16 blijkt dat deze fout voor kleine concentraties relatief erg belangrijk is; bij grotere concentraties zal omwille van het verstopt geraken van de filter de gemaakte fout minder belangrijk worden. Deze problemen doen zich alleen voor bij het bepalen

van de slibfractie in mengsels Haaftense kleizand. De opgestelde omzettingsformules, zie 2.4.3, trachten de gemeten concentraties om te zetten in meer betrouwbare resultaten, maar het is duidelijk dat vooral bij lage concentraties er een resterende extra onzekerheid blijft.

Alles bij elkaar genomen kan men stellen dat voor concentraties beneden 0,2 g/l de gemaakte fouten erg hoog liggen en dus de meetresultaten vrij onnauwkeurig zijn. Voor de hogere concentraties dient men rekening te houden met fouten van maximaal 15%.

Per snelheidsstap worden minstens viermaal concentratiemetingen uitgevoerd, telkens op twee verschillende hoogtes (zie 3.3.3). Deze acht resultaten worden gemiddeld waardoor de foutenmarges van 15 tot 6% reduceren ($\sigma/\sqrt{8}$). Rekening houdend met het feit dat de sedimentconcentratie niet echt constant is over de hoogte en breedte van de dwarsdoorsnede, maar dat bij de berekening van het transport de bekomen waarden wel als dusdanig zullen gebruikt worden, lijkt het redelijk, een resulterende afwijking van 10% aan te houden.

In plaats van het produkt van concentratie en snelheid te integreren over de hele dwarsdoorsnede worden de transporten als volgt berekend:

$$S = C \cdot v_{\text{gem}} \cdot A$$

A is de oppervlakte van de dwarsdoorsnede, namelijk 14,5 bij 14,5 cm. De fout op de afmetingen is 1 mm, d.w.z. dat de fout op de sectie verwaarloosbaar is.

De relatieve fout op het transport kan dus als volgt geschreven worden:

$$(\sigma_S/S)^2 = (\sigma_C/C)^2 + (\sigma_{\text{gem}}/v_{\text{gem}})^2$$

Dit resulteert in een fout op het transport van ongeveer 11%, met de opmerking dat de laagste transporten onnauwkeuriger zijn.

Schuifspanningen

Een derde belangrijk gegeven in deze experimentenreeks zijn de schuifspanningen. Deze worden afgeleid uit de aflezingen van de vervalmeter. De afleesnauwkeurigheid is 0,1 mm. Telkens worden tussen de 5 à 10 aflezingen gedaan, wat resulteert in een fout op ΔF van 0,03 mm. Deze ΔF wordt via de procedure van side-wall correction omgezet in een bodemschuifspanning (zie 3.3.2).

Aangenomen dat de afmetingen van de dwarsdoorsnede voldoende nauwkeurig kunnen bepaald worden, zijn alleen de volgende fouten van belang voor de bepaling van sleepspanningen: de fout op v_{gem} , 0,01 m/s, de fout op ΔF , 0,03 mm, en de fout die ontstaat door het aflezen vande grafiek fRe/f , dus door het iteratief bepalen van f_w uit Re/f .

Rekent men door met absolute fouten dan verkrijgt men:

$$\sigma(u_*) = 1/2 * \sqrt{gR} / \Delta F * \sigma(\Delta F) \quad (2)$$

$$\sigma(f) = 2f [\sigma(u_*) / u_* - \sigma(u) / u] \quad (3)$$

$$\sigma(Re) = 4R / \nu * \sigma(u) \quad (4)$$

$$\sigma(Re/f) = Re/f [\sigma(Re) / Re - \sigma(f) / f]$$

$\sigma(f_w)$ = mogelijke nauwkeurigheid bij het aflezen van de grafiek, d.w.z. dat deze fout afhangt van de fout op Re/f .

$$\sigma(f_b) = 4\sigma(f) - 3\sigma(f_w) \quad (13)$$

$$\sigma(R_b) = R_b [\sigma(f_b) / f_b - \sigma(f) / f] \quad (14)$$

$$\sigma(\tau_b) = \tau_b [\sigma(R_b) / R_b + \sigma(\Delta F) / \Delta F] \quad (15)$$

Opmerkingen: $u = v_{\text{gem}}$

Voor de formules waaruit deze foutenberekeningen zijn afgeleid, wordt verwezen naar 3.3.2.

Uitgerekend voor $\Delta F = 0,17 \text{ mm}$, $v_{\text{gem}} = 0,14 \text{ m/s}$ (deze gegevens zijn afkomstig uit het experiment met het zandbed) en gekende afmetingen van de meetsectie, bekomt men een schuifspanning van $0,0608 \text{ N/m}^2$ met een afwijking van $0,0139 \text{ N/m}^2$. Relatief gezien betekent dit een fout van 22%. De grootste fouteninvloed blijkt evenwel de grote relatieve fout op ΔF te zijn, die bij de berekening van $\sigma(\tau_b)$ moet opgeteld worden bij de veel kleiner relatieve fout op r_b . De vooropgestelde afleesnauwkeurigheid van $0,1 \text{ mm}$ moet hierbij enigszins gerelativeerd worden: 1 schaaldeel van de aflezing van de vervalmeter is inderdaad $0,1 \text{ mm}$, maar de genoteerde aflezingen gebeurden, door interpolatie op zicht, op $0,01 \text{ mm}$. Een fout van $0,05 \text{ mm}$ en na middelen $0,015 \text{ mm}$ ligt dan ook dicht bij de waarheid. In het uitgerekende voorbeeld reduceert de fout hierdoor tot 14% . De berekeningen herhaald voor alle schuifspanningen geeft een foutenmarge van 10 à 15% .

Ribbelafmetingen

Het laatste kwantitatief aspect van de meetresultaten zijn de ribbelafmetingen. Per motorstand worden ribbellengtes en hoogtes gemeten. Deze afmetingen variëren over de lengte van het bed en in de tijd. Om deze ribbelgrootheden te kunnen gebruiken als aanduiding van de ruwheid van het bed worden de hoogtes en lengtes gemiddeld tot een 'gemiddelde ribbel' bij een bepaalde gemiddelde snelheid(zie 3.3.4). Aangezien de afmetingen rechtstreeks bepaald kunnen worden, is de nauwkeurigheid van de gebruikte lat, d.i. 1 mm , bepalend. Het maken van gemiddelden verkleint weliswaar de fout, maar zet eveneens de echte waarnemingen om in een fictieve gemiddelde ribbel. Een afwijking van 1 mm blijft dus een goede aanduiding voor de gemaakte fout.

4.3 Sedimenttransport

Het sedimenttransport wordt berekend uit de concentratie. Zoals in hoofdstuk 1.2.5 vermeld levert $c v dA$ het transport door een oppervlak A .

De concentraties worden afgezogen in het begin van het bed en op 1.5 en 5.5 cm boven het bed. Daar de concentratieverdeling vrij homogeen is (zie hoofdstuk 3.3.3), levert dit waarschijnlijk een goede aanduiding voor het totaal transport.

In appendix zijn de grafieken uitgezet van S_t (kg/s) in functie van v (cm/s) (zie figuren 4.3, 4.4, 4.5 en 4.6). Ook wordt ter vergelijking enkele voorbeelden van S_t in functie van τ gegeven (figuren 4.7 en 4.8)

Zand (zie figuur 4.9)

De gemeten transportwaarden worden vergeleken met de berekende volgens de transportformule van Bijker. (zie hoofdstuk 1.2.5) Eventuele andere formule is bv.:

$$\text{Colby } S_t = A(V-V_c)^n$$

We merken zowel in de formules als in de gemeten waarden een stijging van het transport met de snelheid. Dit is logisch daar het eroderend vermogen toeneemt bij toenemende snelheid.

In de formule van Bijker ziet men tevens dat het transport stijgt als C (Chézy coëfficient) daalt. C daalt met toenemende ruwheid. Het transport moet dus toenemen met stijgend ruwheid. Dit wordt ook waargenomen. Men merkt ook uit de grafieken (zie figuur 4.9) dat er een zekere kritische snelheid nodig is vooraleer er transport is. Dit is duidelijk uitgedrukt in de formule van Colby. Deze v_{cr} komt overeen met een zekere $\tau_{kritisich}$ nodig om materiaal in beweging te brengen, dit blijkt eveneens uit het diagramma van Shields (zie 1.2.1).

Uit de vergelijking van de gemeten waarden met de transportformule van Bijker volgt dat, bij hogere snelheid of transport, de formule een te lage waarde voor het transport geeft (zie figuur 4.9). De mogelijke verklaring ligt in de opstelling. Daar het een gesloten circuit betreft komt het materiaal in suspensie voortdurend terug over het bed.

Na verhoging van de motorstand, de snelheid, neemt de erosiecapaciteit van het water toe, meer materiaal komt in suspensie. Het water met de suspensie krijgt bovendien telkens, wanneer het langs de propeller passeert zijn oorspronkelijke energiehoeveelheid terug, de erosie kan worden verder gezet. Toch stelt er zich bij een bepaalde snelheid een evenwicht in, de erosion rate gaat immers naar nul. Dit is als volgt te verklaren: net na het opvoeren van de snelheid zal alleen in de buurt van de propeller de energie van het water toenemen. Later zal door het steeds opnieuw toevoegen van energie de energieïnhoud van het water in het gehele circuit dezelfde zijn. Ook de transportcapaciteit zal dan overal dezelfde zijn en blijven, er stelt zich een evenwicht in. De verder toegevoegde energie onderhoudt dit evenwicht. Voor het zand is de erosie gelijk aan de sedimentatie en door de sedimentatie van het zand ontstaat er een pantserlaagje dat het slib tegenhoudt. Dit evenwicht is dan niet een evenwicht waarvoor de formule van Bijker is opgesteld maar een evenwicht eigen aan de opstelling.

Rekenvoorbeeld transportformule van Bijker

$$\begin{aligned} \text{zand } d_{50} &= 105 \mu\text{m} & h &= 0.145 \text{ m} \\ d_{90} &= 150 \mu\text{m} & v &= 0.30 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\tau_{\text{swc}} = 1.032 \text{ N/m}^2$$

$$\tau = \rho g V^2 / C^2 \quad \longrightarrow \quad C = \sqrt{\rho g / \tau} * V = 29.25$$

$$\begin{aligned} C &= 18 \log 12 h/r \quad \longrightarrow \quad h/r = 3.5138 \\ & & r/h &= 0.2845 \end{aligned}$$

$$C_{90} = 18 \log (12 h / D_{90}) = 73.16$$

$$\mu = (C / C_{90})^{3/2} = 0.25$$

$$S_b = 5 * 105 \mu\text{m} * 0.30 * \sqrt{9.81} / 29.25 * X$$

$$X = \exp\left(\frac{-0.27 * 1000 * 9.81 * 105 \mu\text{m} * 1.65}{0.25 * 1.032} \right)$$

$$= 0.29 \cdot 10^{-6}$$

$$S_b * 384.25 = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$A = r/h = 0.2845$$

$$z_* = w / k \cdot V_*$$

$$\text{met } w = \text{de valsnelheid} = 0.105$$

$$V_* = \sqrt{\tau / \rho} = 0.032$$

$$z_* = 0.817$$

$$\text{uit tabel } S_s / S_b = 1.6$$

$$S_{\text{totaal}} = S_s + S_b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

zand-slibmengsels (zie figuren 4.3, 4.4, 4.5 en 4.6)

We zien in de grafieken dat bij lage snelheden het transport hoger ligt dan bij zand.

Als men de grafiek opsplitst in een deel transport $<53 \mu\text{m}$ en een deel $>53 \mu\text{m}$ ziet men dat dit begintransport geheel te wijten is aan het in suspensie komen van de fraktie in het bodemmateriaal $<53 \mu\text{m}$ (zie figuren 4.5 en 4.6), zowel bij het kaoliniet als de Haaftense klei.

Men kan de curve $<53 \mu\text{m}$ beschrijven als S vorm met een snelle stijging in het begin, dan terug afvlakken, waarna opnieuw een stijging volgt. De eerste stijging is te wijten aan de lagere kritische snelheid nodig om het fijne materiaal uit te schuren. De afvlakking volgt uit de vorming van een toplaag van zand na de eerste uitschuring, een soort armouring layer, pantserlaag. De stijging bij nog hogere snelheden is dan weer te wijten aan het eroderen van juist deze beschermende laag waardoor de onderliggende gemengde lagen vrijkomen.

De curve $>53 \mu\text{m}$ is een parabolachtige met een langzame stijging in het begin gevolgd door een felle stijging bij hogere snelheden. De vorm is deze zoals het transport voor zand alleen. Eerst dient er een kritische snelheid overschreden waarna het transport langzaam stijgt bij toenemende snelheid.

De aanwezigheid van het fijnere materiaal maakt dat de kurven van bv. kaoliniet 6% en 16% en Haaftense klei 9% voor die van zand liggen. Een hoger transport is dus te wijten aan het fijnere materiaal.

Nochtans merken we dat bij kaoliniet 20% en haaftense klei 12 en 13% (de hoogste percentages) dat dit daar niet zo is. Het transport ligt bij hogere snelheden lager dan dit voor zand alleen. Hieruit kan men konkluderen dat voor de hogere percentages de erosie van het bed, door de aanwezigheid van die hoge percentages aan fijn materiaal, tegengehouden wordt. Dit valt meer op bij Haaftense klei dan bij kaoliniet.

Deze waarneming sluit aan bij wat gezegd wordt in 4.5. Daar wordt besloten dat, bij Haaftense klei eerder dan bij kaoliniet, de hogere percentages de vorming van ribbels belemmeren. Door die belemmering

wordt ook de ruwheid beperkt en dus, zoals hier ook blijkt, ook het transport (het transport neemt toe met toenemende r).

Deze conclusies dienen gelet op het beperkte aantal resultaten en de foutenmarge (zie 4.2) met het nodig voorbehoud gesteld. Het is aangewezen nader onderzoek te verrichten.

Gelet op de afwijking voor zand alleen is het weinig zinvol transportformules te controleren voor de mengsels. De transportformules worden overigens opgesteld voor zuivere zandbedden. Een mogelijke aanpassing van de formule ligt in het wijzigen van de d_{50} . Indien men een nieuwe d_{50} berekent voor de mengsel komt men in een range van 99 tot 104 μm i.p.v. 105 μm . Dit invullen in de transportformule leidt tot weinig verschillen daar de gemiddelde diameters uiteindelijk heel dicht bij elkaar liggen.

De wijziging in gedrag dient eerder dan in een gewijzigde d_{50} , gezocht te worden in een gewijzigde cohesie of in een gewijzigde korrelverdeling. Het is eigenlijk de aanwezigheid van een deel kleine deeltjes tussen grotere die van belang is. Dit komt gezien het geringe percentage niet zozeer tot uiting in de d_{50} .

4.4 Schuifspanningen

De bodemschuifspanning is een maat voor de weerstand die het bed uitoefent op het stromende water maar ook een maat voor de aktie van het water op het bed. In 3.3.2 werd reeds beschreven hoe de schuifspanningen gemeten werden.

Van zes experimenten bestaan schuifspanningsgegevens, bepaald door de methode van side-wall correction uit ΔF . Het verloop van deze bodemschuifspanningen in functie van de gemiddelde snelheid is weergegeven in figuren 4.10, 4.11 en 4.12.

Bij lage snelheden zijn de sleepspanningen vrijwel constant en zeer klein, de bodem is glad en biedt bijna geen weerstand aan de stroming. Vanaf een bepaalde v_{gem} begint τ toe te nemen. In de bodem ontstaat reliëf, ribbels, die naarmate ze groter worden meer en meer weerstand bieden aan de stroming. Omgekeerd betekent een toenemende schuifspanning dat het eroderend vermogen van het water toeneemt waardoor de ribbels ontstaan en groeien. Bij nog hogere stromingssnelheden vlakt de τ - v_{gem} af. Hetzelfde gebeurt met het bed dat geleidelijk weer vlak wordt.

Voor eenparige beweging geldt:

$$\tau = \rho g / C^2 * (v_{gem})^2$$

met C de constante van Chézy die de bodemruwheid karakteriseert (C neemt toe als de ruwheid afneemt). Hoe deze ruwheid precies evolueert bij veranderende stromingssnelheid zal worden nagegaan in 4.5.

In het stijgende gedeelte van de τ - v_{gem} curves neemt met toenemende snelheid ook de ruwheid toe, dus τ zal meer dan kwadratisch stijgen met de snelheid. Dit blijkt ook uit de figuur 4.11. Wanneer bij zeer hoge snelheden het bed weer vlakker wordt, neemt bij toenemende v_{gem} de constante van Chézy ook toe zodat τ inderdaad minder fel zal stijgen en eventueel naar een constante waarde gaan.

Wat de onderlinge ligging van de zes curven betreft, vallen de volgende aspecten op:

- Snelheden groter dan 0,35 à 0,40 m/s geven in de stroomgoot aanleiding tot ongewenste fenomenen, de onderstaande besprekingen beperken zich dan ook tot lagere snelheden.

- Bij snelheden beneden 28 cm/s zijn de sleepspanningen uit experiment met het zandbed, bij dezelfde gemiddelde stroomsnelheid, duidelijk hoger dan deze bij de mengsels. Dit betekent dat toevoegen van 16% of meer kaoliniet of 9% en meer Haaftens slib aan zand het resulterende mengsel cohesiever en gladder maakt dan zand alleen. Bij snelheden boven die 28 cm/s gaat het vorige niet meer op. De schuifspanningen in zand bereiken stilaan hun maximale waarden en beginnen af te vlakken. Bij de mengsels worden op dat ogenblik de ruwheden nog steeds groter.
- De kurven van de twee kaolinietmengsels zijn van dezelfde vorm (figuur 4.11). Toevoegen van meer kaoliniet geeft meer weerstandbiedende mengsels. De τ -waarden bij dezelfde gemiddelde snelheid zijn veel hoger bij het 16% mengsel. Het 20% mengsel komt pas bij hogere snelheden in beweging.
- De kurven van de mengsels met Haaftense klei zijn veel minder steil (figuur 4.12). De toename van τ met v_{gem} is kleiner dan bij de kaolinietmengsels, er is een grotere snelheidstoename nodig om het eroderend vermogen van de stroming met een bepaald bedrag te doen toenemen. Kortom deze mengsels reageren cohesiever. De onderlinge ligging van de drie τ - v_{gem} curves is minder eenduidig. Maar het verschil in percentage slib is te klein om van drie totaal verschillende mengsels te kunnen spreken. Het was evenwel de bedoeling meer uiteenlopende mengsels samen te stellen maar, daar de Haaftense klei, in tegenstelling tot het kaoliniet, zelf ook zand bevat en dit zand niet homogeen over de klei verspreid zit, is het veel moeilijker een vooraf bepaalde mengselssamenstelling te bekomen. Ook dient men rekening te houden met de eerder afgeleide foutenmarge van 10 à 15%.

- Uit de figuur 4.12 blijkt ook dat qua schuifspanningen er weinig verschil is tussen proeven met zout en met zoet water.
Enkele mogelijke redenen hiervoor zijn: het mengsel zelf is samengesteld, gemengd en verdicht met zoet water zodat het contact tussen de klei en het zoute water weinig intens is; uit voorafgaande proeven bleek dat de Haaftense klei niet uitvlokke in zout water tenzij alle organisch materiaal was verwijderd, ook voor het bedoelde experiment met zout water werd deze verwijdering uitgevoerd maar op zo'n grote schaal is het weinig waarschijnlijk dat alle organische stof verdwenen is.
- Eveneens kan men afleiden dat het (gedeeltelijk) verwijderen van het organisch materiaal (proef met 13% Haaftens slib) weinig invloed heeft op de cohesiviteit.
- De Haaftens slibkurves liggen onder de kaolinetkurves, dit wil zeggen dat, ondanks de lagere slibpercentages, het Haaftens slib blijkbaar meer cohesiviteit veroorzaakt (zie figuur 4.10). Aangezien het organisch materiaal blijkbaar geen invloed heeft, kan, naast betere menging, alleen de korrelverdeling, kleinere d_{50} , en slibsamenstelling hiervoor verantwoordelijk zijn. Uit 1.3.2 blijkt oa. dat kaolinet de laagste CEC-waarde van alle kleimineralen bezit, dit betekent de minst cohesieve vlokken vormt.

Wat de evolutie van de sleepspanningen en dus de ΔF -waarden in de tijd betreft, kan men stellen dat bij lage en gemiddelde snelheden (tot ongeveer 35 cm/s) de ΔF -aflezingen vrij constant in de tijd verlopen (zie figuur 4.13). Bij hogere snelheden schommelen de ΔF -waarden wat sterker (zie figuur 4.14) omdat dan in het gootje allerlei randeffecten belangrijk beginnen te worden. Vooraan de meetsectie ontstaat een grote ontgrondingskuil, het ribbelpatroon verplaatst zich erg fel en de ribbels zijn vrij groot zodat het al een verschil maakt of de pitotbuizen boven een ribbeltop of -dal opgesteld zijn. Bovendien gebeuren de veranderingen, vooral net na de snelheidsverandering, zo snel dat de vervalmeter niet de nodige tijd krijgt om een evenwicht te bereiken.

4.5 Waarnemingen

Zoals in hoofdstuk 1.1.3. wordt vermeld ,verwacht men dat bij toenemende snelheid en dus bij toenemend sleepvermogen, het zandbed overgaat van vlak naar ribbels en duinen , die dan verder opnieuw afvlakken.

Dit beeld wordt inderdaad door waarnemingen bevestigd.

Men dient op te merken dat hier geen onderscheid gemaakt wordt tussen ribbels en duinen. Het gaat hier duidelijk om een laboratoriumgoot en niet om een rivier. De schaaffecten moeten in rekening gebracht worden indien men het onderscheid tussen ribbels en duinen wenst te behouden.

Men kan uit de verschillende proeven afleiden dat de snelheden in de goot tot 40 cm/s dienen te worden beperkt. Bij grotere snelheden doen er zich immers allerlei storingen voor eigen aan de kleine opstelling.

In grafieken 4.15 en 4.16 worden de waarnemingen van de ribbelhoogte in functie van de snelheid voor de verschillende proeven weergegeven.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van ribbelklassen:

bedvorm	ribbelklasse
bodemtekening 0-2 mm	0
bodemtekening 2-3 mm	1
ribbels 2-3 mm	2
ribbels 3-5 mm	3
ribbels 5-10 mm	4
ribbels 10-15 mm	5,5
ribbels >15 mm	7

Met ribbels worden driehoekige elementen bedoeld, bodemtekening slaat op een fijner reliëf in het bedmateriaal.

Zand

Bij de proeven met een zuiver zandbed ($d_{50} = 105 \mu\text{m}$) gaat het vlak bed eerst over naar een bed met bodemtekeningen.

Reeds vrij vlug ontstaan er ribbels. Bij deze stijgende erosie komt er zand in suspensie. Het water wordt troebeler door de suspensie. Bij verdere stijging van de snelheid vlakt het begin van het bed opnieuw begint af.

Bij nog hogere snelheden varieert de ruwheid in de tijd. Waarschijnlijk wordt deze veroorzaakt door de bij deze grotere snelheden opnieuw roterende stroomlijnen en het evenwicht dat zich instelt tussen sedimentatie en erosie van het zand.

Zand en kaoliniet

Men vertrekt van een homogeen gemengde bodem met verschillende percentages kaoliniet.

Men krijgt dan lichte bodemtekeningen. Bij de eerste beweging van het bed komt het kaoliniet in suspensie, hierdoor wordt het water vrij vlug troebel (wit).

Verder krijgt men ribbeltjes : duidelijk ontmengd. Uit het materiaal dat beweegt en dus de ribbeltjes vormt is immers het kaoliniet verdwenen daar het in suspensie is. Men heeft dus een donkere kleur voor het ontmengde materiaal en een lichtere voor de bodem die nog niet geërodeerd is.

Voor de rest gebeurt de ribbelforming zoals voor zand alleen.

De vermoede belemmerende invloed van het kaoliniet op het vormen van ribbels is niet met zekerheid uit de grafieken af te leiden (figuur 4.15).

Men zou een verschuiving van de vorming van ribbels naar hogere snelheden kunnen opmerken bij het zien van grafiek 4.15). Dit is eventueel ook te wijten aan het grotere vochtgehalte in de mengsels t.o.v. het vochtgehalte bij de proef voor zand alleen. Door dit vochtgehalte is de samenhang allicht groter.

De waarnemingen worden beperkt tot 40 cm/s.

Zand en Haaftense klei

De ribbelvorming gebeurt opnieuw analoog.

Men merkt opnieuw op dat de Haaftense klei eerst verdwijnt zodat de ribbels een lichtere kleur vertonen dan het niet aangetaste bed (figuur 4.16).

Uit de grafieken van de ribbelvorming kan men hier voorzichtig de conclusie trekken dat Haaftense klei de ribbelvorming vertraagt. Blijkbaar stijgt de weerstand van het bed tegen de erosie van het water met toenemend slibgehalte. Het invullen van kleinere deeltjes tussen de grotere korrels geeft waarschijnlijk een grotere cohesie.

De vertraging van de ribbelvorming kan opnieuw (evenals bij kaoliniet) ten dele te wijten zijn aan de grotere vochtigheid van het mengsel.

Een andere verklaring is dat eerst energie wordt gebruikt om het kleiner materiaal uit te schuren en te transporteren (de eerste suspensie is inderdaad het kleinere materiaal). Daarvoor is slechts een weinig energie nodig. Daarna vergroot de ruwheid bij een volgende energieverhoging (dus hogere snelheid) en wordt het grovere zand geërodeerd.

Over de invloed van het zout water kan uit deze grafiek moeilijk een conclusie getrokken worden.

HOOFDSTUK V BESLUIT

HOOFDSTUK V BESLUIT

Gezien de dubbele doelstelling van dit werk, lijkt het logisch de besluiten ook in twee delen op te splitsen.

Wat het eigenlijke onderzoek naar het erosiegedrag van zand-slibmengsels onder een constante stroom betreft, kunnen de volgende voorzichtige conclusies geopperd worden.

Het erosiegedrag van de onderzochte zand-slibmengsels is het best te vergelijken met dat van zand, dit wil zeggen dat weinig van de eigenschappen van zuivere slibbodems worden waargenomen. Toevoegen van een weinig slib (bv. 6% kaoliniet) verhoogt alleen maar de totale transporten omdat het fijne slib zeer snel uit het bovenste laagje wordt uitgespoeld. Meer slib toevoegen maakt de mengsels meer weerstandbiedend aan de stroming dan zand alleen, het ontstaan van erosie en de daarbijbehorende reliëfvormen wordt vertraagd. Steeds ontstaat er bij een bepaalde snelheid een ontmengd bovenlaagje waaruit alle slib verdwenen is en dat met toenemende snelheid omlaag verplaatst.

Aangezien er maar twee slibsoorten gebruikt zijn, kunnen er omtrent de invloed van de aard van het slib weinig algemene conclusies getrokken worden. Duidelijk is wel dat het Haaftens slib bij een zelfde percentage meer cohesiviteit aan het mengsel verschaft dan het kaoliniet. De invloed van een betere menging mag hierbij niet onderschat worden. Het gedrag van kaoliniet blijkt in ieder geval niet als typerend voor een natuurlijk slib te kunnen doorgaan.

Enkele factoren die zeker het erosiegedrag van zand-slibmengsels beïnvloeden komen uit dit onderzoek minder duidelijk naar voren: het vochtgehalte van het mengsel is belangrijk voor de cohesiviteit. Zo ook spelen poriënvolume en consolidatietijd een grote rol bij het bepalen van de eigenschappen van het mengsel.

De invloed van de factor tijd, het stilzetten van proeven tijdens de weekeindes..., mag evenmin verwaarloosd worden. Er is een verregaande standaardisatie nodig om al deze parameters aan te kunnen.

De tweede doelstelling van deze thesis is het voorbereiden van meer gedetailleerd onderzoek naar de erosie rond pijpleidingen op de zeebodem en de invloed van de aanwezigheid van slib op deze erosie. Uit de proeven op beperkte schaal kunnen volgende besluiten in verband met meetmethoden en -mogelijkheden gehaald worden.

Er zijn drie belangrijke parameters die het erosieproces karakteriseren: stroomsnelheid, transport en schuifspanning. Snelheden kunnen best met een laboratoriummolentje gemeten worden, in grotere opstellingen is het gebruik van een ems-toestel niet uitgesloten. Na het afzuigen van monsters zijn concentraties, en daaruit transporten, het makkelijkst door vacuümfiltratie te bepalen. Schuifspanningen kunnen op eenvoudige wijze uit vervalmetingen worden afgeleid door de procedure van side-wall correction. Het samenstellen van homogene mengsels gebeurt door het droge zand in een homogeen geroerd slib(klei)-watermengsel aan te brengen. Standaardisatie van o.a. vochtgehalte, poriënvolume, consolidatietijd en -druk zijn bij het voorbereiden van een experiment noodzakelijk om tot eenduidige, vergelijkbare resultaten te komen. De gebruikte stroomgoot is echter niet echt geschikt om kwantitatieve resultaten te verwerven. Vooral bij hoge stroomsnelheden (>35 à 40 cm/s) wordt het stroomgedrag zeer instabiel. Verder zorgt het steeds weerkeren van het reeds geërodeerde materiaal over het bed voor onjuiste transportfenomenen.

Alles bij elkaar volgen uit de proeven volgende suggesties voor het verdere verloop van het onderzoek. Om tot kwantitatieve informatie over het erosiegedrag van zand-slibmengsels te komen zijn meer experimenten met meer verschillende slibsoorten en slibpercentages nodig in meer gestandaardiseerde omstandigheden. Verder blijkt een grotere opstelling, waar men schaaffecten kan inrekenen, geen overbodige luxe.

LITERATUUROVERZICHT

1. ARIATHURAI, R. en ARULANANDAN, K., Erosion rates of cohesive soils, Journal of the hydraulics division ASCE, HY2, feb. 78, blz.279-283
2. BERLAMONT, J., Hydraulica, Wouters - Leuven, (1980)
3. BERLAMONT, J., Theorie van de verhanglijnen, Wouters-Leuven, (1980)
4. BERLAMONT, J., Waterwegen, Wouters - Leuven, (1981)
5. BERLAMONT, J. en VERREET, G., Rheology and non-Newtonian behaviour of sea and estuarine mud.
6. GRAF, W.H., Hydraulics of sediment transport, Mc Graw Hill (1971)
7. GULARTE, R.C., KELLY, W.E. en NACCI, V.A., Rheological methods for predicting cohesive erosion, 1974
8. KAMPHUIS, J.W. en HALL, K.R., Cohesive material erosion by unidirectional current, Journal of the hydraulics division ASCE, jan. 83, blz.49-61
9. METHA, A.J. en PARTHENIADES, E., Kaolinite resuspension properties, Journal of the hydraulics division ASCE, 105, HY4, blz. 411-416.
10. MURRAY, W.A., Erodibility of coarse sand-clayey silt mixtures, Journal of the hydraulics division ASCE, HY10, okt. 78, blz.1222-1227
11. PARCHURE, T.M. en METHA, A.J., Erosion of soft sediment deposits, Journal of the hydraulics division ASCE, okt. 85, blz.1308-1327

12. SCHOONHEYDT, R.A., Klei en kleimineralen: eigenschappen en gebruik, HET INGENIEURSBLAD, jaargang 58, (1989), 1, blz. 23-31.
13. SLEATH, J.F.A., Sea Bed Mechanics, John Willey & Sons, inc. (1984)
14. TERZAGHI, K. en RECK, R.B., Soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons inc.-New York, London, Sidney.
15. VAN DAMME, P.M., Slibgedrag in een natuurlijk milieu (literatuuronderzoek), thesis TH Delft (juni 1982).
16. VAN DER VELDEN, E.T.J.M., Coastal engineering, volume II, TU Delft, Department of Civil Engeneering, Delft, (1988).
17. VANONI, V.A., en BROOKS, N.H., Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams, California Institute of Tecnology (december 1957)



