KW-SEK- 523 Bornau- 1990

# **TU** Delft

## Katholieke Universiteit Leuven

"and"

Fakulteit Toegepaste Wetenschappen Departement Burgerlijke Bouwkunde Laboratorium voor Hydraulica

## Technische Universiteit Delft

Fakulteit Civiele Techniek Vakgroep Waterbouwkunde Sectie Kustwaterbouwkunde

## SEDIMENTTRANSPORT VAN ZAND-SLIBMENGSELS

met inbegrip van de ontgronding onder pijpleidingen gelegen op een zand-slibbodem

> Mieke Bornauw Tom De Mulder

E1989-90







## Katholieke Universiteit Leuven

Fakulteit Toegepaste Wetenschappen Departement Burgerlijke Bouwkunde Laboratorium voor Hydraulica

## Technische Universiteit Delft

Fakulteit Civièle Techniek Vakgroep Waterbouwkunde Sectie Kustwaterbouwkunde

## SEDIMENTTRANSPORT VAN ZAND-SLIBMENGSELS

met inbegrip van de ontgronding onder pijpleidingen gelegen op een zand-slibbodem

> Mieke Bornauw Tom De Mulder

E1989-90

"Hoewel geboren aan de oever van de Rotte, dicht bij de Noordzee, hield Erasmus niet van het water, althans niet van de zee. De enkele keren dat hij, tussen 1499 en 1517, het Kanaal overstak, was het steeds met een benepen hart. De storm die hij eens meemaakte, en waarvan zijn samenspraak 'Schipbreuk' een herinnering te boek stelt, bracht hem ten slotte aan land ergens in de buurt van Boulogne, in plaats van in de veilige haven van Calais. Ook dat overkomt een zeereiziger tegen wil en dank."

(M.A. Nauwelaerts et al., 'Erasmus, genie en wereld', Heideland-Orbis, Hasselt, 1977, p.131.)

Of Erasmus zich vereerd zou voelen met dit afstudeerwerk in het domein van de kustwaterbouwkunde is dus niet helemaal zeker. Voorliggend werk is namelijk het resultaat van een samenwerking van de Katholieke Universiteit Leuven met de Technische Universiteit Delft, in het kader van het ERASMUSprogramma van de Europese Gemeenschap.

Niettemin danken wij allen die geen moeite spaarden om deze samenwerking en dit afstudeerwerk mogelijk te maken. In het bijzonder

> prof.dr.ir. J. Berlamont prof.dr.ir. E.W. Bijker ir. E.T.J.M. van der Velden ir. H. Torfs E. Oude Essink

Aan het einde van onze studies wensen we ook onze ouders te danken voor hun logistieke, financiële, taalkundige, culinaire, mentale en liefdevolle steun.

Eens te meer dreigen we hiermee de illustere Erasmus voor het hoofd te stoten. Hoewel hem een innige liefde bezielde voor hen aan wie hij het levenslicht dankte, moest hij altijd zijn eigen afkomst verhullen. Moge deze onthulling geïnterpreteerd worden als een eerbetoon en niet als een sarcastische opmerking van de 'Zotheid'.

Ι

INHOUDSOPGAVE				
ABSTRACT	v			
LIJST DER SYMBOLEN	VII			
INLEIDING	1			
HOOFDSTUK I: Sedimenttransport van zand-slibmengsels				
1.1 Inleiding	5			
1.2 Zeefanalyse van net gebruikte	5			
1.3 Bezinkingsanaryse van de gebruikte	5			
1.4 Het gebruikte zand-slibmengsel	6			
1.5 Sedimenttransport bij een zandbodem	7			
1.6 Sedimenttransport bij een slibbodem	8			
1.7 Sedimenttransport bij een zand-slib- bodem	10			
HOOFDSTUK II: Transportproeven in de kleine goot				
	13			
2.1 Intelding	14			
A. Stroomgoot	14			
B. Snelheidsmeting	15			
C. Concentratiemeting	16			
D. Vervalmeting	17			
2.3 Meetprogramma en uitvoering van de proeven	18			
2.4 Visuele waarnemingen in verband met	22			
de bedvormen	23			
2.5 Verwerking van de resultaten	23			
A. Berekenen van de schuifspanningen	25			
-methode van het snelheidsprofiel	25			
-methode van het verval met				
side-wall-correction	27			
-vergelijking van de methoden				
en keuze	30			
C. Berekenen van transporten	31			
-studie van het concentratieverloop	1			
in de tijd	10			
-berekenen van het transport	35			
2.6 Vergelijking met de zandproeven	55			
de invloed van slib in een sedimentbodem	38			

II

HOOFDSTUK III: Transportproeven in de grote goot

3.1	Inleiding	41
3.2	Proefopstelling	42
	A. Stroomgoot	42
	B. Retourcircuit	42
	C. Pomp	43
	D. Meetkar	43
	E. Concentratiemeting	44
	F. Snelheidsmeting	45
	G. Bodemprofielmeting	46
	H. Vervalmeting	47
3.3	Meetprogramma en uitvoering van de proeven	48
3.4	Verwerking van de bodemprofielen en	
	visuele waarnemingen in verband met	
	de bedvormen	50
	A. Verwerking van de bodemprofielen	50
	B. Visuele waarnemingen in verband met	
	de bedvormen	51
3.5	Verwerking van de resultaten	52
	A. Berekenen van de gemiddelde snelheden	52
	B. Berekenen van de schuifspanningen	53
	-methode van het snelheidsprofiel	54
	-methode van het verval met	
	side-wall-correction	54
	-vergelijking van de methoden	
	en keuze	55
	C. Berekenen van transporten	56
3.6	Vergelijking met de zandproeven	60
3.7	Vragen en antwoorden in verband met	
	de invloed van slib in een sedimentbodem	63
HOOFDOMIN	K TV: Conclusion was do transportances of	
HOUF DSTU	A IV: CONCLUSIES VAN de transportproeven en	
	aanbeveringen voor verder onderzoek	
4.1	Vergelijking van de kleine en de grote goot	65

4.1	Vergelijking van de kleine en de grote goot	65
4.2	Vergelijking van de transportproeven in de	
	kleine en de grote goot	66
4.3	Aanbevelingen voor verder onderzoek	69

## HOOFDSTUK V: Ontgronding onder pijpleidingen gelegen op een zand-slibbodem

5.	1 Inleiding	70
5.	2 Theoretische aspecten van de stroming	
	rond pijpleidingen	71
	A. De ontgronding onder pijpleidingen	
	gelegen op een zandbodem	71
	B. Stromingspatroon rond een (hydraulisch	
	gladde) cilinder bij dwarsaanstroming	
	in een oneindige watermassa	73
	C. Het artikel van Sumer M. et al., "Effect	
	of lee-wake on scour below pipelines in	
	current" ([21])	76
	D. Samenvatting van de belangrijkste punten	
	voor de verdere ontgrondingsproeven	. 77
5.	3 Proefopstelling	79
5.	4 Meetprogramma en uitvoering van de proeven	80
5.	5 Verwerking van de resultaten	81
	A. Bodemschulfspanningen en	
•	gemiddelde snelheden	81
	B. Stromingspatroon rond de pijp	82
-	C. Ontgrondingskullen	84
5.	6 CONCLUSIES	87
	A. Situering van de ontgrondingskullen	07
	P Oerreken van de entgronding	87
	B. Oorzaken van de Untgronding	00
	D. Vergelijking met de zandproeven	09
	E Vergelijking met de proeven van	30
	Sumer M of al	92
	Sumer M. et ul.	52
HOOFDST	TUK VI: Conclusies van ontgrondingsproeven en	
	aanbevelingen voor verder onderzoek	
6.	1 Conclusies van de ontgrondingsproeven	94
6.	2 Aanbevelingen voor verder onderzoek	96
LITERAT	TUUROVERZICHT	97

IV

#### ABSTRACT

The erosion of a soil mixture composed of 80% fine sand  $(d_{50}=95\mu m)$  and 20% clayey silt (mainly kaolinite) by an unidirectional current, is investigated in a large and a small recirculating flume respectively. The results of the erosion tests in the small flume are compared to those from the large flume using the same sand-kaolinite bed. In order to get an idea of the cohesivity of the soil mixture, a comparison is also made with the results of tests on a sandy soil, performed in the same flumes by other investigators.

From those comparisons it can be concluded that the small flume could be used for a relative comparison between the cohesion of different mixtures, making use of the critical shear stresses and the bedforms (the length and the height of the ripples). If one needs an absolute critical shear stress, one better uses the large flume, which shows a more natural erosion process.

The scour below pipelines lying on the same sand-kaolinite bed is investigated too, by means of model pipes in the large flume. As the pipes are fixed at an initial distance above the bed, no burial process is studied.

The main scour appears to be under the downstream-half of the pipe. The secundary scour downstream of the pipe is governed by the action of an organized lee-wake flow (a von Karman vortex street).

As the gap between the pipe and the bed increases, the lee-wake scour decreases, but it is not suppressed for small values of the gap. The results of these experiments are compared to previous scour tests on a sandy soil. Very soon, the scour profiles in a sand bed are disturbed by ripples, which move downstream, even through the scour hole.

v

#### ABSTRACT

Het erosiegedrag onder invloed van een uniforme stroom van een bodemmengsel bestaande uit 80% fijn zand  $(d_{50}=95\mu m)$  en 20% slib (hoofdzakelijk kaoliniet), wordt bestudeerd in een grote en een kleine retournerende goot. De resultaten van de erosieproeven in de kleine goot worden vergeleken met deze in de grote goot, gebruik makend van hetzelfde zand-slibmengsel. Om een idee te krijgen van de cohesiviteit van het bodemmengsel, wordt ook een vergelijking gemaakt met de resultaten van proeven op een zandbodem, uitgevoerd in dezelfde opstellingen, door andere onderzoekers.

Uit deze vergelijkende studie kan men besluiten dat de kleine goot gebruikt kan worden voor een relatieve vergelijking tussen de mate van cohesie van verschillende mengsels, gebruik makend van de kritische schuifspanningen en de bedvormen (de afmetingen van de ribbels). Indien echter de absolute waarden voor de kritische schuifspanningen gezocht worden, maakt men beter gebruik van de grote goot, die een natuurlijker erosieproces te zien geeft.

Ook de uitschuring onder pijpleidingen liggend op hetzelfde zand-slibbed wordt onderzocht, met behulp van modelpijpjes in de grote goot. Vermits de pijpjes op een initiële hoogte boven het bed gehangen worden, kan men geen ingravingsproces bestuderen.

De grootse kuiltjes bevinden zich onder de stroomafwaartse helft van pijp. De secundaire kuiltjes afwaarts van de pijp zijn het gevolg van een georganiseerde zogstroming (een von Karman wervelstraat).

Als de opening tussen de pijp en het bed groter wordt, neemt de lijerosie af, maar ze wordt niet onderdrukt voor kleine waarden van de opening. De resultaten van deze experimenten worden vergeleken met reeds uitgevoerde ontgrondingsproeven op een zandbodem. Het beeld van de ontgrondingskuilen in een zandbodem wordt echter vrij vlug verstoord door ribbels, die stroomafwaarts bewegen en zelfs door de kuil trekken.

- A: oppervlakte van de dwarsdoorsnede
- a: helling van het theoretisch snelheidsprofiel van Prandtlvon Karman in een (v, ln z)-diagram
- b: constante afgesneden op de v-as van een (v, ln z)diagram, door het theoretisch snelheidsprofiel van Prandtl-von Karman

b: breedte van het bed

C: constante van Chézy

- Cd: sleepcoëfficiënt
- c: sedimentconcentratie
  - c<sub>z</sub>: zandconcentratie
  - cs: slibconcentratie
  - c<sub>o</sub>: concentratie gemeten in de kleine goot met de onderste afzuigmond
  - cb: concentratie gemeten in de kleine goot met de bovenste afzuigmond

c<sub>z,i</sub>: zandconcentratie op hoogte i boven de bodem C: gemiddelde concentratie (over de hoogte)

C<sub>s</sub>: gemiddelde slibconcentratie (bij meting aan 16 pompslagen)

 $C_{bodemzand}$ : zandconcentratie het bodemtransport (ribbels)  $C_{tot.zand}$ : totale gemiddelde zandconcentratie  $C_{z+s}$ : gemiddelde concentratie van zand en slib samen  $C_{z}^{T\&C}$ : gemiddelde concentratie van de zandproeven

uitgevoerd door Torfs H. en Coens J. ([9])  $C^{60}$ : gemiddelde concentratie na 60 minuten stromen

- C<sup>60</sup> zand, C<sup>60</sup> z: gemiddelde zandconcentratie na 60 minuten
  - stromen
- C<sup>60</sup>slib, C<sup>60</sup>s: gemiddelde slibconcentratie na 60 minuten stromen
- D: diameter van de pijp

d: korreldiameter

 $d_{10}$ : 10% van de korrels heeft een kleinere diameter  $d_{50}$ : 50% van de korrels heeft een kleinere diameter  $d_{90}$ : 90% van de korrels heeft een kleinere diameter E: erosiesnelheid

Ezand: erosiesnelheid van het zand

Eslip: erosiesnelheid van het slib

- e: opening tussen de onderkant van de pijp en het bed
- Fd: sleepkracht per eenheidslengte van een cilinder
- f: frequentie waarmee de wervels in het zog loslaten van de pijp
- f: wrijvingsfactor van Darcy
  - fb: wrijvingsfactor van Darcy met betrekking tot de
     bodemdoorsnede
  - f<sub>w</sub>: wrijvingsfactor van Darcy met betrekking tot de
     wanddoorsnede
- G: gewicht
- g: versnelling van de zwaartekracht
- h: waterhoogte in de dwarsdoorsnede
- i<sub>max</sub>: maximale hoogte boven de bodem waarop een snelheid wordt gemeten
- k: von Karman-coëfficiënt
- kd: ontgrondingskuildiepte tussen t=0 en t=6 uur
- ks: equivalente zandkorrelruwheid
- 1: lengte van het bed
- M: constante erosiesnelheid afhankelijk van het bodemmateriaal, dichtheid, temperatuur, pH, saliniteit,..
- n: poriëngehalte
- p: natte omtrek van de dwarsdoorsnede

 $p_b$ : natte omtrek met betrekking tot de bodemdoorsnede  $p_w$ : natte omtrek met betrekking tot de wanddoorsnede

ps: percentage van de fractie <53µm in het bodemmateriaal

q: debiet per breedte-eenheid van de dwarsdoorsnede

- q<sub>voor</sub>: debiet per breedte-eenheid van de dwarsdoorsnede juist voor de pijp
- q<sub>na</sub>: debiet per breedte-eenheid van de dwarsdoorsnede juist achter de pijp
- q<sub>boven</sub>: debiet per breedte-eenheid van de dwarsdoorsnede juist op de pijp
- R: hydraulische straal

Rb: hydraulische straal met betrekking tot de bodemdoorsnede

Re: Reynoldsgetal

Rew: Reynoldsgetal met betrekking tot de wanddoorsnede r: bodemruwheid

Sf: helling van de totale energielijn

S: sedimenttransport door een dwarsdoorsnede

Stot: transport van zand en slib samen

S<sub>s</sub>: slibtransport

S<sub>7</sub>: zandtransport

S<sub>v</sub>: verticaal transport door een elementaire horizontale oppervlakte

St: Strouhalgetal

s: relatieve massadichtheid van het korrelmateriaal ten opzichte van water:  $\rho_{\rm S}/\rho$ 

t: tijd

U: elektrische spanning

V: totaal volume water in de grote goot en in het retourcircuit

V: gemiddelde snelheid (over de hoogte)

V<sub>krit</sub><sup>z+s</sup>: kritische gemiddelde snelheid van het zand-slibmengsel

vkritzand, V<sub>krit</sub><sup>z</sup>: kritische gemiddelde snelheid van de zandbodem

V<sub>j</sub>: gemiddelde snelheid bij motorstand j

V<sub>\*</sub>: schuifspanningssnelheid

```
V*b: schuifspanningssnelheid met betrekking tot de
bodemdoorsnede
```

v: snelheid

vi: snelheid op hoogte i boven de bodem

vimax: snelheid op hoogte imax

v<sub>gem</sub>: snelheid gemiddeld over een bepaalde tijd

w: valsnelheid van het sediment

X: stroomtijd

- x: (stroomafwaartse) afstand van de beschouwde meetsectie tot het begin van het bed
- x: horizontale (stroomafwaartse) afstand vanaf het middelpunt van de pijp tot de beschouwde kuil

- y: ontgrondingskuildiepte
- y: vertikale afstand tussen de onderkant van de pijp en het diepste punt in het bodemprofiel rond de beschouwde kuil y(0): y op tijdstip t=0 (start) y(6u): y op tijdstip t=6 uur
- z: hoogte boven de bodem
- z<sub>o</sub>: hoogte boven de bodem waar het theoretische snelheidsprofiel van Prandtl-von Karman gelijk aan 0 wordt
- S: soortelijk gewicht van water
- $\mathcal{Y}_{s}$ : soortelijk gewicht van het bodemmateriaal
- $\delta$ : gemiddelde bodemdaling
- E: turbulente diffusiecoëfficiënt
- 0, 00: Shieldsparameter
- v: kinematische viscositeit van water
- p: massadichtheid van water
- $\rho_{\rm s}$ : massadichtheid van het bodemmateriaal

 $\tau$ : schuifspanning

- $\tau$ ,  $\tau_{\rm b}$ ,  $\tau_{\rm o}$ : bodemschuifspanning
- Tkrit: kritische bodemschuifspanning
- \*krit<sup>Z+S</sup>: kritische bodemschuifspanning van het zand-slibmengsel
- <sup>7</sup>krit<sup>zand</sup>: kritische bodemschuifspanning van de zandbodem
- rkrit<sup>k.g.</sup>: kritische bodemschuifspanning van het zand-slibmengsel berekend uit de resultaten van de kleine goot
- rkrit<sup>g.g.g.</sup>: kritische bodemschuifspanning van het zand-slibmengsel berekend uit de resultaten van de grote goot
- $\tau_i$ : bodemschuifspanning bij motorstand j
- <sup>7</sup>hand: bodemschuifspanning met de hand berekend volgens
  de methode van het snelheidsprofiel
- r<sub>comp</sub>: bodemschuifspanning met behulp van een computer berekend volgens de methode van het snelheidsprofiel
- <sup>7</sup>s.w.c.: bodemschuifspanning berekend met de side-wallcorrection methode
- <sup>7</sup>graf: bodemschuifspanning zoals ze in de grafieken gebruikt wordt

φ: pijpdiameter

**ω**: rotatiesnelheid

 $\Delta F/\Delta l$ : ladingsverlies  $\Delta F$  over een afstand  $\Delta l$ 

 $\Delta$ h: hoogteverschil van het wateroppervlak over een afstand  $\Delta$ l

- $\Delta h_i$ : hoogte van het stuk snelheidsprofiel horende bij de snelheid v<sub>i</sub>
- ∆Sz: verschil in zandtransport gemeten op een afstand x van het begin en aan het begin van het bed
- $\Delta S_s$ : verschil in slibtransport gemeten op een afstand x van het begin en aan het begin van het bed

∆z: variatie in bodemligging

INLEIDING

Reeds lange tijd bestudeert men het sedimenttransport van zand (dit is niet-cohesief materiaal) onder invloed van een uniforme stroming.

Het theoretisch onderzoek leidde onder andere tot de ontwikkeling de begrippen bodemtransport, van zwevend transport, (kritische) bodemschuifspanning, snelheidsprofiel Prandtl-von Karman en concentratieprofiel van van Rouse-Einstein.

Daarnaast werden vele (semi-)empirische diagramma's en transportformules ontwikkeld. Alle kwamen tot stand door kalibratie van een theoretisch model met behulp van meetgegevens. Dit impliceert hun beperkte geldigheid. Bepaalde theoretische aannamen, het specifieke ijkmateriaal, samen met het stochastisch karakter van sedimenttransport, verklaren dat de toepassing van verschillende transportformules resultaten kan geven die een factor 10 of meer verschillen.

Ook van het transportmechanisme van slib (dit is materiaal met een deeltjesdiameter kleiner dan 50  $\mu$ m) heeft men zich al een beeld kunnen vormen via theoretisch en experimenteel onderzoek. Dit gaf onder andere aanleiding tot het begrip "erosion rate".

Slib bestaat voor een deel uit fijn zand (silt:  $2\mu$ m<d<50 $\mu$ m) en uit klei (d<2 $\mu$ m). Er bestaan echter verschillende kleisoorten, die in variërende verhoudingen in slib aanwezig kunnen zijn. Meer nog dan bij zand spelen de dichtheid van de bodem, de wijze van afzetting, de temperatuur, de pH, de saliniteit, de chemische samenstelling van de poriënvloeistof en de aanwezigheid van organisch materiaal een grote rol. Deze factoren verhogen in grote mate de complexiteit van het onderzoek naar de eigenschappen van slib. De samenstelling van het zand-slibmengsel waarvan in dit werk het gedrag bestudeerd wordt, bevindt zich ergens tussen deze 2 extremen (puur zand en puur slib). Het bevat 80% zand gemengd met 20% China Clay (kaoliniet). In de Noordzeebodem komen op bepaalde plaatsen mengsels voor die tot 30% slib bevatten. Hier wordt dus gebruik gemaakt van een relatief hoog slibpercentage.

Of het erosiegedrag van een zand-slibmengsel zich ook ergens bevindt tussen dat van zand (constant transport bij constante hydraulische omstandigheden) en dat van slib (constante toename van het transport in de tijd bij constante hydraulische omstandigheden), kan. onderzocht worden in 2 aparte opstellingen van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de T.U.Delft :

> -een kleine goot (tafelmodel) -een grote goot

In een deel van dit werk wordt een onderzoek gedaan naar de mate waarin de kleine (handiger) opstelling een goed beeld geeft van de werkelijkheid, die men via proeven in de grote opstelling beter wenst te benaderen. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de kleine en de grote goot.

Als eerste vergelijkingscriterium gebruikt men de kritische bodemschuifspanning van het beschouwde mengsel. Dit is een maat voor de weerstand van het bodemmateriaal tegen de eroderende werking van stromend water.

Een tweede vergelijkingscriterium is de mate waarin beide goten geschikt zijn om een antwoord te vinden op enkele vragen in verband met de cohesieve werking van slib in sedimentbodems.

Om deze vergelijkingen te kunnen maken, moeten in beide goten transportproeven uitgevoerd worden. Men laat het water aan verschillende snelheden over een sedimentbed stromen en men verricht metingen (snelheids-, concentratie- en vervalmetingen). Daaruit kan men dan voor elke stroomsnelheid de transporten en de bodemschuifspanningen bepalen. In hoofdstuk II worden de transportproeven in de kleine goot besproken. Hoofdstuk III behandelt de transportproeven in de grote goot. De bespreking van de vergelijking tussen de twee goten kan men vinden in hoofdstuk IV, alsook aanbevelingen voor verder onderzoek.

In hoofdstuk V volgt een toepassing van sedimenttransport onder invloed van een uniforme stroom: een reeks modelproeven wordt uitgevoerd in de grote goot, om de ontgronding onder en achter pijpleidingen gelegen op een zand-slibbodem, te bestuderen.

De aanleiding voor deze proeven is een probleem dat zich op de Noordzee stelt. Daar vindt men voor bodems met een hoog percentage slib een geheel verschillend ingravingsproces dan voor zandbodems. In de gebieden met een zand-slibbodem treedt er slechts een gedeeltelijke ingraving van de pijpleidingen op. Het deel van de pijpleiding gelegen in een gebied met een zandbodem daarentegen, is op enkele maanden tijd onder de grond verdwenen. Daarenboven merkt men dat de taludhellingen van de kuilen steiler zijn in het geval van een slibrijke zandbodem.

Het spreekt vanzelf dat deze verschilpunten heel wat problemen met zich meebrengen :

- -de toegenomen statische belasting op de pijpleiding: balk op meerdere steunpunten
- -de toegenomen dynamische belasting op de pijpleiding: het stroompatroon rond de pijp geeft (zeker bij grote Regetallen) aanleiding tot fluctuerende hef- en sleepkrachten.

-de grotere noodzaak van bestortingen

In hoofdstuk V wordt met behulp van modelpijpjes onderzoek gedaan naar de plaats en de vorm van de ontgrondingskuilen in een zand-slibbodem, eerder dan naar de ermee gepaard gaande transporten.

Het gaat echter om gefixeerde pijpjes (op een instelbare hoogte boven het bed): ze kunnen zich dus niet zetten. Met andere woorden, het eigenlijke ingravingsproces wordt nog niet bestudeerd. Men tracht een antwoord te vinden op volgende vragen. Waar situeren zich de kuilen ten opzichte van de pijp (bij verschillende sroomsnelheden en openingen tussen de pijp en het bed)? Welke mechanismen veroorzaken de ontgronding? Hoe snel groeien de kuilen in de tijd? Evolueren ze naar een evenwichtsvorm? Waarin verschilt de ontgronding in een zandslibbodem van die in een zandbodem?

In hoofdstuk VI worden de voornaamste conclusies van de ontgrondingsproeven samengevat; men kan er ook aanbevelingen voor verder onderzoek in terugvinden.

4







fig.1.3/1: Bezinkingsanalyse van slib

## HOOFDSTUK I: Sedimenttransport van zand-slibmengsels

## 1.1 Inleiding

In dit inleidende hoofdstuk worden enkele elementaire begrippen over zand en slib uitgewerkt.

Er wordt aangevangen met de korrelverdeling van het gebruikte zand (deel 2) en slib (deel 3). Daarop volgt de samenstelling van het in dit werk gebruikte mengsel (deel 4). Deel vijf en zes behandelen in het kort het erosiegedrag van respectievelijk zand- en slibbodems. Er wordt afgesloten met een bedenking over het begrip kritische schuifspanning.

## 1.2 Zeefanalyse van het gebruikte zand

Drie zeefanalyses worden uitgevoerd, echter zonder voorafhet eventueel aanwezige organisch materiaal te verwijderen. Met behulp van 11 zeven en de schudmachine, worden de verschillende gewichtsfracties van een vooraf gewogen zandmonster bepaald.

Uit fig.1.2/1 leidt men af:

 $d_{10} = 61 \ \mu m$  $d_{50} = 94 \ \mu m$  $d_{90} = 130 \ \mu m$ 

#### 1.3 Bezinkingsanalyse van de gebruikte klei

Deze proef wordt uitgevoerd met behulp van een glazen kolom waaraan een Andreas-Eisenweinpipet bevestigd is (zie fig.1.3/1). Het is een heel delicate proef, die een grote nauwkeurigheid vereist.

De proef steunt op het principe van bezinking. In een cilinder met water voegt men een hoeveelheid van het te onderzoeken slib en een hoeveelheid peptisator toe. De peptisator dient om het uitvlokken van deeltjes tijdens de bezinking te voorkomen. Men schudt de cilinder goed om een



tabel 1.3/1: China clay C

typical	chemica	l ana	lysis
---------	---------	-------	-------

rational analysis

SiO <sub>2</sub>	46.70 %
AloÕa	39.00 %
FeoO	0.77 %
Tiố	0.10 %
CaO	0.10 %
Mao	0.10 %
KoO	1.68 %
Não	0.07 %
1.0.i.	12.45 %

clay	88.4	8
feldspar	10.5	8
quartz	0.0	%
ferric oxide	0.8	8
lime	0.1	8
mag.	0.1	%

## <u>sieve analysis</u>

## properties

15 8	below 2um		specific gravity		2.6
15 9	above 10 um		brightness : violet	violet	83.5
1 0 3	2 residue			yellowness	4.8
0.05	on 300 b.s.s.	mesh	pH	-	5/5.55

homogene suspensie te verkrijgen, zodat er zich op elke plaats in het mengsel zowel grote als kleine deeltjes bevinden. Dan kan men aanvangen met de bezinkingsproef. Op regelmatige tijdstippen tapt men onderaan de cilinder monsters af. Met elk tijdstip komt een minimale korreldiameter, van deeltjes die reeds bezonken zijn, overeen. Hoe langer men het slib laat bezinken, hoe kleiner de deeltjes zijn die zich in het afgetapte monster bevinden. Als men dan van elk monster de concentratie aan slib bepaalt, kan men een korrelverdeling voor het slib opstellen.

Deze proef wordt meerdere keren herhaald en dit levert heel uiteenlopende, onbruikbare resultaten op. Slechts de laatste twee proeven laten toe er een korrelverdeling uit af te leiden, als de resultaten ervan worden uitgemiddeld (fig.1.3/2).

Ter aanvulling is ook de door de fabrikant verstrekte analyse van de China Clay bijgevoegd (tabel.1.3/1).

De keuze van deze klei is vooral gebaseerd op het gemakkelijk mengen met zand en op de afwezigheid van organisch materiaal en zware metalen (wegens de voorbehandeling in de porselein-fabriek). Een beperking is wellicht de reeds toegevoegde peptisator, die een verminderde cohesiviteit kan meebrengen.

#### 1.4 Het gebruikte zand-slibmengsel

De hierboven beschreven materialen worden bijeengevoegd in een verhouding 4 kg zand/1 kg klei. Een zeving op dit (droge) mengsel geeft een gewichtsfractie van 30% voor het materiaal < 53  $\mu$ m. Hieruit blijkt meteen de definitie van

"zand" (=alles > 53  $\mu$ m) en van "slib" (=alles < 53  $\mu$ m); van deze definities wordt in dit werk gebruik gemaakt.

Eerst wordt in een emmer een zekere hoeveelheid kaoliniet en water tot een pap geroerd.

Na enkele dagen wordt deze pap met de nodige hoeveelheid zand gemengd in een mortelmolen, zodat een homogeen zandslibmengsel met 30% slib (beter fractie < 53µm), wordt bekomen.

6



<u>fig.1.5/1</u>: Shields-diagram : de dimensieloze kritische schuifspanning in functie van het dimensieloze korrel-Re-getal.



fig.1.5/2: Massabalans voor sediment

## 1.5 Sedimenttransport bij een zandbodem

Hierna volgt een beknopte herhaling van de sedimentmechanica.

Om een deeltje los te krijgen uit de sedimentbodem en om het in beweging te brengen zijn er krachten nodig. Volgende krachten werken op een deeltje dat zich (aan het oppervlak) in een niet-cohesieve bodem onder stromend water bevindt: een sleepkracht (in de richting van de stroming), een liftkracht (tracht het deeltje op te heffen) en de zwaartekracht. Het deeltje zal nu, afhankelijk van de verhouding van deze krachten, al of niet gaan bewegen. De verhouding van deze krachten wordt de Shields-parameter  $\theta$  genoemd:

$$\Theta = \frac{\tau_{\rm b}}{(\rho_{\rm s} - \rho) * g * d}$$

met  $\tau_b$ : de bodemschuifspanning

 $\rho_{s}$ : dichtheid van zand

 $\rho$ : dichtheid van water

d: korreldiameter

Voor welke waarde van de bodemschuifspanning  $\tau_{\rm b}$  een deeltje met diameter d in beweging komt, kan men bepalen uit het Shields-diagram (fig.1.5/1).

Als het deeltje in beweging komt, kan het op de bodem rollen, glijden of springen, en draagt dan bij tot het "bodemtransport". Afhankelijk van de verhouding van de bodemschuifspanningen en de zwaartekracht kan het ook (tijdelijk) in suspensie gaan, en draagt dan bij tot het "zwevend transport". Er is echter een grens aan de hoeveelheid deeltjes die zich als zwevend transport kunnen verplaatsen. grens wordt bepaald Deze door de verhouding van de zwaartekracht en de turbulente diffusie.

In de evenwichtstoestand geldt volgende massabalans door een elementair horizontaal vlakje:



fig.1.5/3: Zandtransport in functie van de tijd. Snelheids- en concentratieprofiel van het evenwichtstransport.



Negatief geladen kleiplaatje met een wolk van kationen errond.

fig.1.6/1: Klei

- Vlokstructuren :
  - (a) kop-staart-formatie(b) parallel-formatie





(b)

(zie fig.1.5/2)

## $w*c + \epsilon * \frac{dc}{dz} = 0$

## met w: valsnelheid van het sediment

c: concentratie

turbulente diffusiecoëfficiënt

Uit deze differentiaalvergelijking kan men een vergelijking voor het evenwichtsconcentratieprofiel halen. Als men een constant verloop van de turbulente diffusiecoëfficiënt over de hoogte aanneemt, verkrijgt men een exponentiëel verloop voor dat profiel.

Indien het stromingsregime plotseling verandert, zal het concentratieprofiel zich niet dadelijk kunnen aanpassen. Men treft een overgangsverschijnsel aan.

Het bodemtransport wordt verondersteld zich dadelijk te kunnen aanpassen, het zwevend transport echter heeft daar enige tijd voor nodig. Bovenstaande vergelijking wordt nu:

w\*c +  $\epsilon$ \*(dc/dz)=S<sub>v</sub>, met S<sub>v</sub> het verticaal transport. Het verticaal transport stelt hier geen constante voor maar daalt in de tijd tot er weer een evenwicht (w\*c +  $\epsilon$ \*(dc/dz) = 0) bereikt wordt.

Samenvattend vindt men in figuur 1.5/3 het transport in de tijd (onder invloed van een uniforme stroom), en het bij het evenwichtstransport horende theoretische concentratieprofiel (van Rouse-Einstein) en de theoretische snelheidsverdeling over de hoogte (van Prandtl-von Karman).

## 1.6 Sedimenttransport bij een slibbodem

Slib is een materiaal dat bestaat uit deeltjes kleiner dan 50 à 60  $\mu$ m. In dit werk wordt de grens gelegd op 53  $\mu$ m.

Slib kan men onderverdelen in twee fracties: deeltjes groter dan 2  $\mu$ m, de siltfractie, en deeltjes kleiner dan 2  $\mu$ m, de kleifractie. De kleifractie nu is bepalend voor de cohesiviteit van het slib.

De kleideeltjes zijn plaatvormig en hebben een elektrisch geladen karakter (fig.1.6/1). De oppervlakken zijn negatief geladen. Op de randen bevinden zich zowel positieve als negatieve ladingen. Ofwel zorgen deze ladingen ervoor dat de









slibdeeltjes tot elkaar aangetrokken worden: de slibsuspensie zal dan uitvlokken. Ofwel stoten de ladingen, als ze hetzelfde teken hebben, elkaar af: het slibmengsel dispergeert dan.

Op elk slibdeeltje (aan het oppervlak) in de bodem werken de volgende krachten: een sleepkracht, een liftkracht, de zwaartekracht en de cohesieve krachten vanwege de andere slibdeeltjes. De zwaartekracht is voor een slibdeeltje nauwelijks van belang, omdat het zo klein is dat het gewicht verwaarloosbaar wordt ten opzichte van de cohesieve krachten.

Het slibdeeltje zal pas loskomen als de verhouding van de sleepkracht en de liftkracht tot de cohesieve krachten een bepaalde waarde overschrijdt. Als het slibdeeltje eenmaal losgerukt is uit de bodem, gaat het vanwege zijn verwaarloosbaar klein gewicht dadelijk in suspensie.

Vermits het slibdeeltje in het stromend water ook een verwaarloosbare valsnelheid heeft, is het concentratieprofiel niet exponentiëel van vorm (zoals bij zand het geval is), maar beweegt het slib zich homogeen verdeeld over de hoogte voort. Er ontstaat ook geen constant evenwichtstransport zoals bij zand, maar men vindt veeleer een constante toename van het transport: de erosiesnelheid (fig.1.6/2).

De erosiesnelheid is afhankelijk van de cohesiviteit van het slib. Experimenteel stelde Partheniades het volgende verband tussen de erosiesnelheid en de schuifspanning vast (zie ook fig.1.6/3):

 $E = \frac{dS}{dt} = M * \frac{(\tau_b - \tau_{krit})}{\tau_{krit}}$  $\tau_{\rm b} > \tau_{\rm krit}$ E = 0

 $\tau_{\rm b} < \tau_{\rm krit}$ 

met E: erosion rate

M: constante afhankelijk van het bodemmateriaal, dichtheid, temperatuur, pH, saliniteit,...

 $\tau_{\rm b}$ : bodemschuifspanning

rkrit: kritische bodemschuifspanning

9

In deze, op dit ogenblik veel gebruikte formule, zijn de constanten M en  $\tau_{\rm krit}$  afhankelijk van de cohesiviteit van het slibmengsel.

Het soort kleimineraal, de dichtheid van de bodem, de belastingsgeschiedenis, de temperatuur, de pH, de saliniteit, de chemische samenstelling van de vloeistof die zich in de poriën bevindt, zijn enkele factoren die de cohesiviteit van het mengsel bepalen.

Vermits in dit werk enkel proeven met één zand-slibmengsel en één soort water gedaan worden, is het niet zinvol hier alle beïnvloedende factoren in extenso te behandelen. Meer informatie hierover vindt men in de literatuur (voor een handige samenvatting zie Coens, J., en Torfs, H., [9]).

Wel wordt hier nog aangestipt dat M en  $\tau_{\rm krit}$  nauwelijks correleren met macroscopische grond(mechanische)-parameters, zoals de Atterbergse grenzen, omdat deze geen goede maat zijn voor de bindingssterkte tussen de kleideeltjes (Partheniades,E.,[19]). Dit impliceert dat een experimentele bepaling van M en  $\tau_{\rm krit}$  voor een bepaald bodemmateriaal steeds een opstelling vergt waar het water zijn eroderende werking op het materiaal kan uitoefenen.

Niettemin wordt getracht om met zo weinig mogelijk bodemmateriaal de nodige karakteristieken ervan (in verband met sedimenttransport) te kunnen bepalen. Vandaar dat wordt onderzocht in hoeverre de kleine goot een goed beeld geeft van de werkelijkheid. Voor de kleine goot volstaat namelijk 1 emmer bodemmateriaal, terwijl er voor de grote goot een vijftigtal nodig zijn.

### 1.7 Sedimenttransport bij een zand-slibbodem

Dit wordt in dit werk bestudeerd. In hoofdstuk II worden de transportproeven in de kleine goot besproken, in hoofdstuk III de transportproeven in de grote goot. In hoofdstuk IV volgt en vergelijking van de twee opstellingen en hun resultaten. In hoofdstuk V wordt een toepassing behandeld, namelijk de ontgronding onder en achter pijpleidingen gelegen op een slibrijke zandbodem. Het past hier wellicht even te wijzen op het ideëel karakter van het model dat wordt weergegeven in fig.1.6/3 en in de bovenstaande formules voor zand en slib. De betekenis van  $\tau_{\rm krit}$  als een drempelspanning of een transitiepunt is aan (veel) kritiek onderhevig. Men kan niet zomaar stellen dat er geen erosie is als de bodemschuifspanning kleiner is dan  $\tau_{\rm krit}$ , en dat er wel erosie is als  $\tau > \tau_{\rm krit}$ .

In het interessante artikel van Lavell, J. et al. (Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist ?,[13]) worden vier verschillende aspecten van het al dan niet bestaan van een drempelspanning belicht :

- De onnauwkeurigheid van de definitie : elke  $\tau_{krit}$  hoort in feite bij een (arbitrair) bepaald klein transport, dat door de onderzoeker (onbewust) wordt gekozen. Er bestaan dus talrijke (impliciete) definities van de drempelspanning.
- Laboratoriumexperimenten die geen drempelspanning te zien geven.
- Een model zonder drempelspanning dat gegevens , voorheen beschreven als wijzende op het bestaan van een drempelspanning, kan reproduceren.
- Het effect van een verdeling van de kritische schuifspanning voor individuele deeltjes en van de spanningsfluctuaties in een turbulente grenslaag op het sedimenttransport. Met andere woorden het stochastisch karakter van sedimenttransport.

Deze punten spreken het bestaan van een van nul verschillende tijdsgemiddelde turbulente bodemschuifspanning waar beneden geen erosie optreedt, tegen.

Het bestaan van een  $\tau_{krit}$  voor individuele deeltjes trekt men niet in twijfel, want de ogenblikkelijke beweging van een deeltje wordt nog steeds verondersteld door gekende fysische wetten bepaald te zijn.

Dit artikel wil waarschuwen tegen het voor waar aannemen van (fysische) modellen. Men is natuurlijk vrij om het gedrag van de natuur vereenvoudigd voor te stellen, en bijvoorbeeld vloeiende (hogeregraads)curven te vervangen door geknikte curven (cfr. systeemanalytische modellen in de elektriciteit: ideale weerstand, ideale condensator, ideale inductantie, enz.). Maar men moet de beperkte geldigheid wel voor ogen blijven houden.

In dit werk wordt wel met het model van de kritische schuifspanning gewerkt omdat het een waarde oplevert, waarmee men dan de resultaten van de kleine goot met de resultaten van de grote goot voor eenzelfde zand-slibmengsel kan vergelijken.



verluchtingsgat

fig.2.1/2

- retourleiding



### HOOFDSTUK II: Transportproeven in de kleine goot

### 2.1 Inleiding

De kleine goot (fig.2.1/1 en fig.2.1/2) is geconstrueerd om op een snelle manier inzicht te krijgen in het transportproces van sedimentbodems. Zij dient ter voorbereiding van het schaalmodel. In dit hoofdstuk worden de proefresultaten van de kleine goot verwerkt en wordt nagegaan in hoeverre enkele verband met de cohesieve werking van slib vragen in in sedimentbodems kunnen beantwoord worden. In hoofdstuk drie wordt hetzelfde schema gevolgd voor de grote goot om dan in hoofdstuk IV een vergelijking te kunnen maken tussen de twee goten.

In het tweede deel van dit hoofdstuk vindt men een beschrijving van de opstelling en de gebruikte apparatuur.

Het gevolgde meetprogramma en de uitvoeringswijze van de proeven staan beschreven in deel drie.

Dan volgen de visuele waarnemingen in deel vier. Daarin vindt men gegevens over het bodemtransport en gegevens over de bedvormen terug.

Deel vijf is gewijd aan de verwerking van de meetresultaten. Voor verschillende motorstanden worden de gemiddelde stroomsnelheid, de bodemschuifspanning en het transport in functie van de tijd berekend.

Het verloop van het transport in functie van de gemiddelde snelheid wordt gebruikt om het erosiegedrag van zand-slibbodems te vergelijken met dat van zandbodems. Ook de bodemschuifspanningen zijn daar nuttig voor. Deze vergelijking kan men vinden in deel zes.

In deel zeven worden vragen in verband met de invloed van slib in sedimentbodems beantwoord met behulp van de resultaten van de kleine goot.



fig.2.2/1: schema van de kleine goot (maten in cm)

### 2.2 Proefopstelling

De apparatuur wordt hier in 't kort beschreven. Voor meer informatie daaromtrent en voor de verantwoording van de keuze ervan, verwijzen wij naar de thesis van Torfs H. en Coens J., "Erosiegedrag van zand-slibmengsels onder invloed van stroming", [9].

#### A.Stroomgoot:

(zie fig.2.2/1)

De stroomgoot bestaat uit een circulerend systeem. De totale inhoud bedraagt 120 liter. Het bed, dat zich in de meetsectie bevindt, is 1 m lang en 0,145 m breed. De hoogte van de meetsectie is eveneens 0,145 m.

De retourleidingen zijn cilindervormig en hebben een kleiner doorstroomoppervlak  $(0,011 \text{ m}^2)$  dan de testsectie  $(0,021 \text{ m}^2)$ . Daardoor wordt sedimentatie in de retourleiding voorkomen. Door het feit dat het bed kort is en het reeds geërodeerde sediment telkens weer aan het begin van het bed terechtkomt, is men voor de kleine goot aangewezen om concentratiemetingen te verrichten in de tijd.

De overgang van de kleinere retoursectie naar de grotere meetsectie gebeurt heel geleidelijk.

De opstelling is volledig gesloten, op de meetopening en het verluchtingsgat na. De meetopening bestaat uit een sleuf van 1 cm breed en 1,5 m lang, die zich uiteraard boven het bed bevindt. Het verluchtingsgat bestaat uit een smalle gleuf net achter de meetsectie. Tijdens het meten wordt de meetopening gevuld met T-vormige blokjes. Zo ontstaat een stroming boven het bed, die zich tussen "stroming met vrij oppervlak" en "stroming onder druk" bevindt. Daardoor kan men in de kleine geen natuurlijke stroming en dus geen natuurlijk goot erosieproces waarnemen.

Het water wordt in beweging gebracht door een schroef, die zelf wordt aangedreven door een elektromotor. Deze kan door een regelknop op verschillend toerental gebracht worden.


Hoewel een continue variatie binnen het bereik mogelijk is, heeft men zich in dit werk gehouden aan een reeks vooraf aangeduide discrete toerentallen (motorstanden 1/ 1,5/ 2/ 2,5 enz.). Zodoende kan men bij verschillende waarden van de stroomsnelheid het erosieproces waarnemen.

In de retourbuis bevinden zich ook een hele reeks pijpjes. Deze hebben tot doel de gedraaide stroomlijnen, die door de schroef worden voortgebracht, weer recht te trekken alvorens ze het bed bereiken.

#### **B.Snelheidsmeting:**

(zie fig. 2.2/2)

Om de snelheid te meten wordt er gebruik gemaakt van een micropropeller (MP). De MP is een laboratoriummolentje met diameter 3 cm. Men kan dus de snelheid meten tot op 1,5 cm van de bodem.

Het principe is eenvoudig. Het stromende water drijft het molentje aan. De rotatiesnelheid is een maat voor de stroomsnelheid. De rotatie wordt omgezet in een elektrisch signaal dat, na aflezing, op zijn beurt omgezet wordt in een waarde voor de snelheid. De ijkingsformule luidt:

 $v=U*0,759*10^{-3} + 0,043$ 

met v: de snelheid in m/s U: de spanning in Volt

Het signaal is ook verbonden met een integrator, waarmee de fluctuerende spanning gedurende een ingestelde tijd wordt gesommeerd. Daardoor kan men de snelheid over een bepaalde tijd uitmiddelen.

Merk op dat wegens het volume dat de MP zelf inneemt, in feite een gemiddelde waarde, dit betekent een integratie over 3 cm hoogte wordt bekomen. Met dit toestel kan men dus niet "de snelheid in een punt" meten.





#### C.Concentratiemeting:

(zie fig.2.2/3)

De concentratie wordt gemeten door het afzuigen van monsters. Daarvoor gebruikt men afzuigbuisjes van 3,8 mm diameter.

Voor het afzuigen van de monsters wordt gebruik gemaakt van dwarsafzuigen. Dit moet echter snel genoeg kunnen gebeuren om proportioneel voldoende zand, met zijn grotere inertie, te kunnen vangen. Onderzoek in het Waterloopkundig Laboratorium de Voorst (Bosman et al., [8]) heeft aangetoond dat de afzuigsnelheid drie maal groter moet zijn dan de lokale stroomsnelheid, om representatieve samples te verkrijgen. De samples op deze wijze verkregen, vertonen dan nog wel een concentratie die een constante factor kleiner is dan de werkelijke concentratie. Deze factor hangt af van de deeltjesdiameter. Zo kan men voor slib (dit is de fractie kleiner dan 53 µm) een factor 1 en voor zand (dit is de fractie groter dan 53 µm) een factor 1,28 , overeenkomend met een gemiddelde deeltjesdiameter van 100 µm, aannemen.

Van de monsters ( $\pm$ 80 ml) wordt met behulp van een zeef het gedeelte <53 µm (vanaf nu slib genoemd) gescheiden van het gedeelte >53 µm (vanaf nu zand genoemd). Beide gedeelten worden dan (apart) door een filterpapiertje gegoten (vacuümfiltratie). Het filtertje, met daarop het sediment, wordt in de oven gedroogd en daarna gewogen. Het verschil van dit gewicht met het gewicht van de lege filter deelt men dan door het volume van het afgetapte monster. Zo bekomt men zowel de slibals de zandconcentratie.

> c<sub>z</sub>=1,28\*ρ\*<u>G(sedim.+filter)-G(filter)</u> G(recipiënt+sedim.+water)-G(recipiënt) c<sub>s</sub>= 1\*ρ\*<u>G(sedim.+filter)-G(filter)</u> G(recipiënt+sedim.+water)-G(recipiënt)

met cz: de zandconcentratie in g/l

c<sub>s</sub>: de slibconcentratie in g/l

G: gewicht in g

 $\rho$ : dichtheid van water in g/l



fig.2.2/4: werkingsprincipe van de vervalmeter van van Essen

#### D.Vervalmeting:

Uit de waarde van het verval kan men een waarde voor de bodemschuifspanning berekenen.

Om het verval te meten maakt men gebruik van de vervalmeter van van Essen (zie fig. 2.2/4). Deze is geschikt voor het meten van zeer kleine verschillen in waterdruk. Twee pitotbuizen met enkel gaatjes aan de zijkant worden respectievelijk vooraan en achteraan in de meetsectie gehangen. Zij geven elk de statische drukhoogte (in hun dwarssectie) door naar een met water gevuld reservoir van de vervalmeter. Daarin bevindt zich een dobber waaraan een meetschaal bevestigd is. Deze twee meetschalen worden via een optisch systeem vergroot en geprojecteerd op een scherm, waarop dan het verschil in statische drukhoogte kan afgelezen worden.

Uit de vergelijking van Bernoulli blijkt dat dit verschil ook het ladingsverlies is, als men een zelfde (gemiddelde) snelheid veronderstelt. Voor dit toestel rekent men op een nauwkeurigheid van 0,03 mm.

#### 2.3 Meetprogramma en uitvoering van de proeven

Twee keer wordt een vers bodemmengsel in de goot gelegd. Dit mengsel laat men steeds een dag consolideren onder zijn eigengewicht. Daarna laat men het nog een dag rusten onder het gewicht van het watervolume in de goot.

#### <u>le run</u>

Gedurende een zevental dagen laat men het water in de goot stromen aan verschillende motorstanden. Dit doet men om het erosiegedrag in functie van de stroomsnelheid te kunnen onderzoeken. Volgend schema wordt gevolgd:

motorstand	<u>stroomtijd</u>	datum
	[min]	
2	60	9.11.89
3	300	9-10.11.89
4	420	10-13.11.89
5	570	13-14-15.11.89
6	360	15.11.89
7	420	16.11.89
8	360	17.11.89

Zoals reeds vermeld is men voor de kleine goot, vanwege het steeds terugkerende sediment en vanwege het korte bed, aangewezen metingen te verrichten in de tijd.

De metingen bij motorstand 2 echter worden reeds na 1 uur stopgezet omdat uit de concentratiemetingen (zowel van zand als van slib) blijkt dat er nog geen erosie is opgetreden.

Vanaf motorstand 3 wordt voor elke daaropvolgende motorstand een vast meetschema gevolgd. Op vaste tijdstipppen, na 2, 5, 10, 20, 40, 60 minuten en van dan af om het uur, wordt een concentratiemeting een snelheidsmeting en gedaan. Deze tijdstippen liggen in het begin dicht bijeen om de overgangsverschijnselen van het stromings- en erosieproces goed te kunnen volgen. Men denke hierbij vooral aan het zwevend transport, dat zich niet onmiddellijk aan het nieuwe regime aanpast (zie 1.4)



De concentratiemeting verloopt als volgt: op 2 hoogten boven het bed (zie fig. 2.3/1) wordt een monster van ongeveer 80 ml afgetapt. Van deze monsters worden dan zowel de slib- als de zandconcentratie bepaald met behulp van vacuümfiltratie. Merk op dat men hierbij slechts het zwevend transport meet. Vermits het geërodeerde slib enkel in het zwevend transport zit, stelt dit voor het bepalen van het slibtransport geen probleem. Het zand echter verplaatst zich ook in ribbels over het bed: voor zand is er dus zowel zwevend als bodemtransport.

De snelheidsmeting gebeurt op het stroomafwaartse einde van het bed, boven het plastic-gedeelte (zie fig. 2.3/1).

Bij elke motorstand worden ook snelheidsprofielen opgemeten. Daaruit kan men dan een waarde voor de bodemschuifspanning berekenen. Vertrekkende van 1,5 cm boven de bodem wordt om de cm een snelheidsmeting gedaan. Daarbij middelt men tot en met motorstand 5 uit over 60 seconden en vanaf motorstand 6 over 30 seconden. Deze snelheidsprofielmetingen worden uitgevoerd op de in fig.2.3/1 aangegeven plaatsen.

Regelmatig worden ook waarnemingen genoteerd in verband met de ribbelvorming, namelijk een waarde voor de lengte, de hoogte, de snelheid van verplaatsing en de plaats van de ribbels over het bed. Dit om een idee te krijgen over het bodemtransport en over de ruwheid van het bed.

Als het water te troebel wordt, moet men het slib (een nacht) laten bezinken om daarna waarnemingen in verband met bedvormen te noteren en de diepte van het bed te bepalen voor de snelheidsprofielmetingen van de volgende motorstand. Dit brengt met zich mee dat de snelheidsprofielen niet exact op 1,5 cm boven de bodem beginnen, maar waarschijnlijk hoger daar de bodem vanwege het erosieproces ondertussen nog verder gezakt is.

Bij motorstand 8 worden de concentratieprofielen van zowel zand als van slib opgemeten. De hoogten boven het bed en de verschillende posities langs het bed zijn aangegeven in fig.2.3/1.

19

Bij een bepaalde motorstand wordt ook een steekproef van de snelheid genomen: dit om de onzekerheid op de snelheidsmeting te bepalen.

#### <u>2e run</u>

Deze run (met een vers bodemmengsel) wordt uitgevoerd om op manier dan uit de snelheidsprofielen andere de een bodemschuifspanningen, horende bij de verschillende motorstanden (dus verschillende stroomsnelheden), te bepalen. Men kan namelijk de bodemschuifspanning berekenen uit een vervalmeting.

Een bepaling van het verval met behulp van het van Essentoestel gelijktijdig met de snelheids- en concentratiemetingen is niet aangewezen: in de 1 m-"lange"-meetsectie zouden pitotbuis/ concentratiehark/ pitotbuis/ MP elkaar teveel beïnvloeden.

Er wordt getracht de schuifspanningen op te meten in een nog niet totaal door de erosie getekend bed (dit wil zeggen zonder een kuil vooraan en ook zonder zandribbels in de achterste helft van het bed, omdat die achteraan een soort zandberm opbouwen). Dit moet een meer realistische vergelijking met de transportproeven in de grote goot mogelijk maken. Daar treedt immers quasi geen ribbelvorming op.

Daarom wordt er dus gebruik gemaakt van een vers bed. Het water mag niet te lang stromen bij elke motorstand en er worden enkel vervalmetingen uitgevoerd.

Men laat het water bij elke motorstand 5 à 10 minuten stromen en in deze tijd noteert men het (gemiddeld) verschil in statische drukhoogte.

De gaatjes in de pitotbuizen van de vervalmeter bevinden zich op 13,5 cm en 66,5 cm vanaf het begin van het bed. De tussenafstand twee bedraagt dus 53 cm. De eerste bevindt zich pas op 13,5 cm afstand van het begin van het bed omdat de overgangsverschijnselen door verandering van plastic-bed naar sediment-bed daar reeds verdwenen zijn en geen invloed meer witoefenen op het gemeten energieverlies. De tweede bevindt zich reeds op 66,5 cm afstand van het begin van het bed om het energieverlies vanwege ribbelvorming, dat vooral op het einde van het bed plaatsheeft, te vermijden.

Zo wordt het energieverlies in de eerste helft van het bed, namelijk daar waar erosie plaatsvindt, gemeten. Ook krijgt het bed weinig tijd om ribbels te vormen omdat men slechts 5 à 10 minuten per motorstand stroomt. Daaruit kan men dan een waarde voor de schuifspanning berekenen die specifiek bij het erosieverschijnsel hoort, niet bij de ruwheid van het bed.

Indien meer informatie over de meetgegevens gewenst is, vindt men die in het deel "Bijlagen" (Bijlage 7: "Meetgegevens van de transportproeven in de kleine goot").

## tabel 2.4/1: Visuele waarnemingen

motorstand 2:

Er gebeurt niets, het water wordt zelfs niet troebel.

Kleine plekjes zand zijn te zien.

motorstand 3: motorstand 4: Ribbels hebben zich gevormd langs de rand over



4 cm breedte achteraan het bed en 1 cm breedte vooraan het bed. Ze zijn 4 mm hoog en 4 cm lang. zijn hartvormig en ontmengd. Hun ver-Ze plaatsingssnelheid bedraagt 2,3 cm/min.



motorstand 5: De ribbels hebben zich achteraan over de hele breedte uitgestrekt en over 3 cm vooraan. Ze zijn 4 mm hoog en 4 cm lang. Op de linkeroever vooraan zijn de langsribbels 2 mm hoog en 2 cm





lang. Ribbelsnelheid: 3 cm/min. motorstand 6: De ribbels vooraan in het bed worden uit-

gespoeld, deze achteraan worden tot 7 mm hoog en 4 cm lang aan de linkeroever. Ze vormen een V over de breedte. Ribbelsnelheid is 3,2 cm/min. is een

motorstand 7: Vooraan is het bed uitgeschuurd, er lichte kuil ontstaan. Achteraan is een bedverhoging (ontmengde laag die niet beweegt) waar te \_ nemen. De ribbels zijn 8 mm hoog, 6,6 cm lang. zich gevormd

nog diepere kuil heeft Een vooraan, achteraan zijn de ribbels 3 mm hoog, 4 cm lang. De ribbelsnelheid is 9 cm/min.



### 2.4 Visuele waarnemingen in verband met de bedvormen

In tabel 2.4/1 vindt men het schema van de visuele waarnemingen die we regelmatig, tijdens het stromen, genoteerd hebben.

De ribbelafmetingen worden met de lat opgemeten (dus enkel aan de zijkanten). De ribbels zijn ontmengde zandribbels die zich onafhankelijk over het gemengde zand-slibbed bewegen.

Er wordt waargenomen dat het bed langzaam zijn ribbelvormen aanpast (doet groeien of doet afnemen). Bij motorstand 7 valt een blijvende variatie van ribbelgrootte in de tijd op, de ribbels zijn nu eens groeiend dan weer afnemend. De tijdschaal waarover dit gebeurt (bijvoorbeeld 7 uur stromen), sluit het overgangsverschijnsel (bij overgang naar een nieuwe motorstand) als mogelijke reden uit.

Men kan zien (zie tabel 2.4/1) dat de grootste en de eerste ribbels zich aan de linkeroever op het stroomafwaartse einde bevinden en zich uitbreiden naar de rechteroever en naar voren het bed. Bij stijgende motorstand worden de ribbels. in afgezien van de fluctuaties, gemiddeld hoger en langer. Bij hoge motorstanden wordt het bed vooraan uitgespoeld omdat het snelheidsprofiel van de binnenstromende vloeistof niet homogeen verdeeld is. Meer bepaald, de hoge snelheden bevinden zich onderaan, net boven het bed (zie fig.2.5/2). Bij motorstand 7 is er reeds kuilvorming vooraan, maar de ribbels achteraan groeien nog. Bij motorstand 8 worden de ribbels achteraan ook een beetje uitgespoeld, de ribbelhoogte daalt immers vanaf dan. Met behulp van de waarden voor de bodemhoogte, die op het einde van elke motorstand met de micropropeller worden opgemeten, kan men het verloop van het bedprofiel in grote lijnen bepalen. Zie fig.2.4/1. Uit deze tekening blijkt duidelijk de kuilvorming stroomopwaarts en de stijging van het bed stroomafwaarts.



fig	.2.5	5/2
-		



snelheidsprofiel over het bed

hoogte boven het bed [cm]

#### 2.5 Verwerking van de resultaten

In dit deel worden voor elke motorstand de gemiddelde snelheden, de bodemschuifspanningen en de transporten berekend.

### A. Berekenen van de gemiddelde snelheden

De studie van het snelheidsverloop in de tijd (zie fig.2.5/1) kan men vinden in Bijlage 1.

Uit deze studie mag men concluderen dat na 60 à 120 minuten de snelheid een evenwichtswaarde bereikt heeft voor de hogere motorstanden en licht oscilleert voor motorstand 3 en 4. Dit wil zeggen dat als men de snelheidsprofielen na meer dan 120 minuten stromen opmeet, het evenwichtssnelheidsprofielen zijn, waaruit men dus gerust een evenwichts-gemiddelde-snelheid en een evenwichts-bodemschuifspanning (berekend uit het snelheidsprofiel) kan berekenen. Voor de lagere motorstanden blijft de snelheid met een iets grotere waarde van amplitude als de onzekerheid vanwege de toevallige fout en het turbulent karakter oscilleren.

Bekijkt men nu deze snelheidsprofielen (bij motorstand 4) op verschillende plaatsen over het bed (zie fig.2.5/2), dan blijkt dat het snelheidsprofiel van het binnenstromende water sterk bol is. De grootste snelheden bevinden zich tegen de bodem. Het snelheidsprofiel van het water dat de meetsectie verlaat, blijkt homogeen te zijn.

Het gemakkelijkste is dus de gemiddelde snelheid uit het meer homogene snelheidsprofiel stroomafwaarts boven de plastic-bodem te halen.

Verder wordt er verondersteld:

- -een parabolisch verloop over de onderste cm van het snelheidsprofiel
- -een opgemeten verloop van het snelheidsprofiel tot 11,5 cm hoogte

-de snelheid op 12,5 cm hoogte gelijk aan deze op 11,5 cm  $(v_{12,5}=v_{11,5})$ 

-een parabolisch verloop over de bovenste cm





De formule voor de gemiddelde snelheid wordt dan (zie fig.2.5/3):

$$V = [v_{1,5}(1*2/3 + 1) + v_{2,5}*1 \dots + v_{11,5} + v_{12,5}(1,5 + 1*2/3)]/14,5$$

Dit levert de volgende waarden voor de gemiddelde snelheden op:

motorstand	2:	$v_2 = 0, 16$	m/s
	3:	$V_3 = 0, 20$	m/s
	4:	$V_4 = 0,25$	m/s
	5:	$V_5 = 0,29$	m/s
	6:	$V_6 = 0,32$	m/s
	7:	$V_7 = 0,37$	m/s
	8:	$V_8 = 0,40$	m/s

### B. Berekenen van de schuifspanningen

Hiervoor worden twee methoden gebruikt: de methode waarbij men de schuifspanning berekent uit het snelheidsprofiel en deze waarbij men ze berekent uit het ladingsverlies over een bepaalde afstand.

Vanaf nu wordt de bodemschuifspanning  $\tau_{\rm b}$ , voor de eenvoud genoteerd als  $\tau$ .

#### -methode van het snelheidsprofiel:

Voor deze methode wordt gebruik gemaakt van de opgemeten snelheidsprofielen. Zoals reeds vermeld werd, worden deze snelheidsprofielen opgemeten als het water reeds enige uren gestroomd heeft en zijn het dus evenwichts-snelheidsprofielen waaruit men dus evenwichts-bodemschuifspanningen kan berekenen.

Deze berekeningsmethode steunt op het theoretisch snelheidsprofiel van Prandtl-von Karman. Dit is logaritmisch van vorm.

#### $v=(ln(z/z_0))*V*\sqrt{g}/(k*C)$

met k: von Karman-coëfficiënt (0,4)

V: gemiddelde snelheid

C: constante van Chézy

z: hoogte boven de bodem

 $z_0$ : hoogte waar v=0

ofwel

v=a\*lnz - b

met  $a=\sqrt{g}*V/(k*C)$ en b=a\*lnz<sub>0</sub>

Zet men nu het opgemeten snelheidsprofiel uit op logaritmisch papier dan wordt de vergelijking:

#### met x=lnz

Als we a en b opmeten dan volgt hieruit:



fig.2.5/4: theoretisch snelheidsprofiel van von Karman



x=93 Δ

motorstand 8: x=62 X

snelheid [m/s]

 $C=\sqrt{g}*V/(k*a)$  en daaruit  $\tau=\rho*g*V^2/C^2$  $z_0=\exp(b/a)$ 

 $z_0$  is de hoogte boven de bodem waar de snelheden volgens Prandtl-Von Karman negatief dreigen te worden (zie fig.2.5/4). Praktisch veronderstelt men in die zone een lineair verloop van de snelheden, gegeven door een raaklijnconstructie (cfr. van der Velden E., "Coastal Engineering", [22])

Cruciaal bij deze methode is de bodemligging. Zeker bij proeven met slib is het water na zekere tijd zo troebel dat men visueel niet meer kan waarnemen of de MP juist op de bodem rust. Zoals reeds vermeld werd, wordt in de kleine goot de bodem benaderd door vóór het starten aan een nieuwe motorstand de bodemligging op te meten met behulp van de onderkant van de MP.

Zet men nu de snelheidsprofielen uit op semi-logaritmisch papier (zie fig.2.5/5). De snelheidsprofielen zijn moeilijk logaritmisch verlopend te noemen. Wanneer men toch deze methode toepast en het stijgende gedeelte van de semi-logaritmische curve door een rechte benadert, bekomt men volgende resultaten:

stand	τ <sup>1</sup> x=9cm [N/m <sup>2</sup> ]	$\tau^2$ x=28cm [N/m <sup>2</sup> ]	$r^3$ x=62cm [N/m <sup>2</sup> ]	$\tau^4$ x=93cm [N/m <sup>2</sup> ]	τ 2-3gem. [N/m <sup>2</sup> ]
2					
3				0,000	0,000
4	0,091/3	0,050/3	0,038/2	0,103/2	0,044
5	0,047/3	0,031/3	0,041/4	0,144/5	0,036
6	0,213/3	0,103/3	0,172/3	0,285/3	0,138
7	0,088/3	0,312/3	0,031/3	0,226/6	0,172
8	0,388/3	0,106/3	0,047/5	0,504/4	0,076

Het aantal bruikbare punten voor de benadering van de semilogaritmische rechte is telkens onderaan in subscript genoteerd.

Men kan zien dat voor elke motorstand, uitgezonderd motorstand 7, de schuifspanningen het grootst zijn op het einde van het bed. Het bed heeft daar immers de grootste ruwheid (in

26

tabel 2.5/1: experimentele vervalgegevens

motorstand	vervalmeter van van Essen (∆l=53 cm)			
	∆h [mm]	$s_{f}$ [*10 <sup>-3</sup> ]		
1	0,02	0,037		
2	0,04	0,074		
3	0,13	0,245		
4	0,08	0,148		
5	0,21	0,396		
6	0,51	0,962		
7	0,72	1,360		
8	0,90	1,700		

de vorm van ribbels) en oefent dus grotere krachten uit op het water dat erover stroomt.

Op het einde van het bed vindt men voor drie van de vijf motorstanden een groter aantal punten die voldoen aan een logaritmische rechte. Dit wil zeggen dat de stroming tijd of beter afstand nodig heeft om zich aan het bed aan te passen, om het theoretisch snelheidsprofiel op te bouwen.

De schuifspanningen fluctueren bij stijgende snelheden. Opvallend is hier: een stijging bij motorstand 6, een daling bij motorstand 7 en weer een stijging bij motorstand 8, dit wat betreft de schuifspanningen in de eerste en de derde sectie. In de tweede sectie vinden we een stijging bij motorstand 6, een stijging bij motorstand 7 en een daling bij motorstand 8.

In bovenstaande tabel wordt ook het gemiddelde over de tweede (x=28 cm) en de derde (x=62 cm) schuifspanning berekend, om een vergelijking te kunnen maken met de schuifspanningen berekend uit de vervalmethode. Deze laatste levert de schuifspanningen als resultaat van vervalmetingen van 13,5 tot 66,5 cm na het begin van het bed (zie fig.2.3/1).

# -methode van het verval (met side-wall-correction):

Voor deze methode maken we gebruik van de vervalmetingen. Er wordt vijf à tien minuten gestroomd aan elke motorstand. Gedurende deze tijd wordt het verval opgemeten. De bodemschuifspanningen die hieruit berekend worden zijn bodemschuifspanningen die enkel in verband staan met de eroderende kracht die het water op het bed uitoefent, niet met de ruwheid.

De resultaten van de vervalmetingen vindt men in tabel 2.5/1. De vervalmeter levert een praktisch monotoon stijgend verloop van 0,02 tot 0,90 mm op.

Uit de waarden voor het verval kan men nu de bodemschuifspanning voor elke motorstand berekenen. De formule luidt:

 $\tau = \rho * g * R * S_{f}$  (cfr. Berlamont, J., "Waterwegen", [4])

met  $\tau$ = de bodemschuifspanning  $\rho$ = de dichtheid van water R= de hydraulische straal  $S_{f}$ = de helling van de totale energielijn

met de helling van de totale energielijn  $S_f$  gelijk aan het ladingsverlies per lengteëenheid  $\Delta F/\Delta l$ . De formule wordt dan:

 $\tau = \rho * g * R * \Delta F / \Delta 1$ 

Het in te vullen energieverlies  $\Delta F$  slaat echter op het energieverlies ten gevolge van de bodemruwheid. Het gemeten verval daarentegen wordt zowel door de wanden als de bodem veroorzaakt. Daarom past men beter de side-wall correction (methode van Vanoni-Brooks) toe. Hierbij wordt gebruik gemaakt van volgende aannamen:

-De dwarsdoorsnede kan onderverdeeld worden in twee delen: het ene wordt beïnvloed door de schuifspanning over de bodem, het andere door deze over de wanden. Men heeft dus twee natte omtrekken:  $p_b$  voor de bodem en  $p_w$ voor de wanden.

-De snelheid in de 'wanddoorsnede'  $v_w$  is gelijk aan deze in de 'bodemdoorsnede'  $v_b$ .

-De formules voor Re,  $V_*$ , f en R kunnen toegepast worden zowel op elke sectie afzonderlijk als op het geheel.

-De ruwheid van zowel de wanden als de bodem is homogeen maar verschillend.

De uitwerking van deze veronderstellingen leidt tot volgende formules:

1. R=A/p	met R: de hydraulische straal p: de natte omtrek
2. V* <sup>2</sup> =g*R*S <sub>f</sub>	met V <sub>*</sub> : de schuifspanningssnelheid
3. $f = 8V_*^2/V^2$	met f: de wrijvingsfactor van Darcy



4. Re=4\*V\*R/>

5.  $\operatorname{Re}_w/f_w=\operatorname{Re}/f$ 

6.  $1/f_w = 2*\log(\text{Re}/(f*f_w)) - 0.8$ : deze iteratieve formule kan vertaald worden in een grafiek  $f_w$  in functie van Re/f

7.  $f_b = 4 * f - 3 * f_w$ 

8.  $R_b = R * f_b / f$ 

9.  $V_{*b}^{2}=g*R_{b}*S_{f}$ 

 $10.\tau = \rho * V_{*b}^2$ 

(De grootheden met subscript w en b hebben betrekking op respectievelijk de wanddoorsnede en de bodemdoorsnede.)

Deze methode houdt meteen rekening met het stijgend aandeel van de bodemruwheid in het totale ladingsverlies bij toenemende snelheid, waardoor de bodemruwheid ook een groter deel van de sectie beïnvloedt.

Past men deze methode toe op de resultaten van het toestel van van Essen, dan merkt men voor motorstanden 2, 4 en 5 dat de Darcy-wrijvingscoëfficiënt die bij de bodem hoort,  $f_b$ , negatieve resultaten oplevert. Dit komt doordat het opgemeten verval  $\Delta F$  te klein blijkt te zijn voor de overeenkomstige gemiddelde snelheid V.

Daardoor is f te klein (formules 2 en 3) en dus Re/f te groot (met Re uit V, formule 4). Hoewel dit een kleinere  $f_w$  oplevert (formule 6), kan dit toch met zich meebrengen dat resulterend een negatieve  $f_b$  (formule 7) wordt gevonden.

Zet men nu in een grafiek  $\Delta F$  in functie van V uit, dan kan men door de punten van motorstand 3, 6, 7 en 8 een vloeiende stijgende curve trekken (zie fig.2.5/6). Inderdaad, de punten van motorstanden 2, 4 en 5 liggen onder de curve. Kiest men nu voor deze motorstanden als nieuwe  $\Delta F$ -resultaten de waarden



+ resultaten uit dit werk Dresultaten uit werk [9]

overeenkomend met de curve 2.5/6 en berekent men de schuifspanningen opnieuw, dan bekomt men de volgende resultaten:

motorstand 2:  $\tau_2 = (0,00 \text{ N/m}^2)$ 3:  $\tau_3 = 0,03 \text{ N/m}^2$ 4:  $\tau_4 = (0,17 \text{ N/m}^2)$ 5:  $\tau_5 = (0,34 \text{ N/m}^2)$ 6:  $\tau_6 = 0,53 \text{ N/m}^2$ 7:  $\tau_7 = 0,82 \text{ N/m}^2$ 8:  $\tau_8 = 1,11 \text{ N/m}^2$ 

Als men deze resultaten vergelijkt met de resultaten van Torfs H. en Coens J.([9]) bij 20% kaoliniet (zie fig 2.5/7), dan blijken die vrij goed overeen te komen. In hun werk worden de vervalmetingen ook met de vervalmeter van van Essen uitgevoerd. Het enige verschil ligt in het feit dat de vervalmetingen over een grotere tijdspanne en een grotere afstand worden uitgemiddeld.

## -Vergelijking van de methoden en keuze.

Zowel de methode van het snelheidsprofiel als die van het verval mogen eigenlijk slechts toegepast worden bij volledig ontwikkelde theoretische snelheidsprofielen.

Toch gaat de voorkeur naar de vervalmethode en dit om volgende redenen:

-De bodemschuifspanningen berekend uit de snelheidsprofielen fluctueren erg met stijgende snelheid. De fout op deze methode ligt vermoedelijk hoger dan de fout op de methode van het verval.

-Als men gebruik maakt van dezelfde methode als in het werk van Torfs H. en Coens J., kan men met grotere betrouwbaarheid de resultaten van de zandproeven uit hun werk met de in dit werk verkregen resultaten van de mengselproeven vergelijken (zie 2.6).



zandconcentratie [g/l]

slibconcentratie [g/l]

# <u>C. Verwerking van de resultaten van de concentratiemetingen</u> <u>en berekenen van transporten</u>

In dit deel wordt eerst het concentratieverloop in de tijd van zowel het zand als het slib bestudeerd. Zo krijgt men een beeld van het erosiegedrag van beide sedimenten afzonderlijk. Daarna worden de resultaten van de concentratieprofielmeting nagegaan om tenslotte de transporten te berekenen.

Voor de concentratie C wordt telkens het gemiddelde van de concentratie op 1,9 cm hoogte,  $c_0$ , en deze op 6,2 cm hoogte,  $c_b$ , gemaakt:  $C=(c_0+c_b)/2$ . Met die gemiddelde concentratie wordt er verder gewerkt.

1. Studie van het concentratieverloop in de tijd

Men kan, zowel voor het zand als voor het slib, voor elke motorstap de concentraties gedurende 360 minuten uitzetten evenals de maximale concentratie voor deze motorstanden die langer dan 360 minuten aangehouden worden (zie fig.2.5/8).

Hieruit kan men de volgende conclusies trekken:

-Voor beide soort curves geldt dezelfde vorm: gekromd, stijgend verloop tot ±60 min., vanaf dan een licht stijgende rechte. De curve evolueert niet naar een evenwichtswaarde maar blijft vanaf ±60 min licht stijgen.

Dit 60-min. punt wordt het "knikpunt" genoemd (zie fig.2.5/9). Met behulp van lineaire regressie van al de punten vanaf 60 min. kan men nu de concentratie na 60 min.,  $C^{60}$ , en de helling, E uitrekenen. Dit wordt voor elke motorstand gedaan (zie tabel 2.5/2).

-Uit deze tabel haalt men dat de zandconcentratie pas vanaf motorstand 4 meetbaar wordt, terwijl dit voor slib reeds vanaf motorstand 3 geldt. Als men naar de concentratieverhouding  $C_{and}^{60}/C_{slib}^{60}$  kijkt ziet men dat deze bij motorstand 4 heel klein is, maar dat ze stijgt bij stijgende motorstand en bij motorstand 7 zelfs groter dan 1 wordt. Doch, men kan zien dat bij motorstand 8 deze verhouding nog steeds niet de initiële mengverhouding 7/3 bereikt heeft. Mag men daaruit besluiten dat de slibdeeltjes van tussen de zandporiën uit eroderen?



fig.2.5/9: het concentratieverloop van het zand-slibmengsel in functie van de tijd (experimenteel bepaald)

tabel 2.5/2: C<sup>60</sup>, C<sub>zand</sub>/C<sub>slib</sub>, E, E<sub>zand</sub>/E<sub>slib</sub>

stand	C <sup>60</sup> s	C <sup>60</sup> z	C <sup>60</sup> z	Eslib	Ezand	$\frac{E_{zand}}{E_{slib}}$
	[g/l]	[g/l]		<u>1*min</u>	1*min	
2						
3	0,004	0,0000	0,00	0,0044	0,00	0,00
4	0,020	0,0106	0,53	0,140	0,00	0,00
5	0,111	0,0538	0,48	0,50	0,17	0,34
6	0,525	0,5137	0,98	0,82	0,54	0,66
7	0,960	1,3615	1,42	1,00	0,72	0,72
8	1,993	3,1970	1,62	1,81	2,04	1,13

Neen, want men heeft hier enkel rekening gehouden met het zwevend transport. Men mag niet vergeten dat er zich ook nog zandribbels op het bed bevinden. Als men ruwweg met de gegevens uit deel 2.4 voor motorstand 6 de hoeveelheid zand dat in de ribbels zit uitrekent en daaruit een equivalente bodem-zandconcentratie afleidt, vindt men (zie Bijlage 2):

> <sup>C</sup>bodemzand<sup>=1,68</sup> g/l <sup>C</sup>tot.zand<sup>= Cz<sup>60</sup>+Cbodemzand<sup>= 2,18</sup> g/l <sup>C</sup>tot.z/C<sup>60</sup>s<sup>=4,1</sup></sup>

Rekening houdende met de grove manier van benadering kan men concluderen dat dit de initiële mengverhouding 7/3 benadert.

-Als men de hellingen (tabel 2.5/2) nagaat, ziet men dat die voor zand tot motorstand 4 gelijk aan nul zijn, maar vanaf dan van dezelfde grootte-orde worden als die van slib. Het zand neemt na verloop van tijd geen evenwichtsconcentratie aan. Dit komt door het feit dat het zand geen kans krijgt om over dit kort bed en in de smallere retourbuizen (met propeller) te bezinken. Het sediment zal dus blijven eroderen.

-Opvallend voor het verloop van de slibconcentratie in functie van de tijd (zie fig.2.5/8) is de oscillatie gedurende de eerste tiental minuten. Het zwevend transport kan zich immers niet dadelijk aan het nieuwe stromingsregime aanpassen (zie 1.4). Voor het verloop van de zandconcentratie geldt dit in sterke mate voor motorstand 8, in mindere mate voor motorstand 6 en voor motorstand 7 helemaal niet.

-Opvallend ook is het feit dat de slibconcentratie bij het begin van de volgende motorstand dicht aanleunt tegen de laatste van de vorige motorstand. De zandconcentratie echter heeft na 2 min. reeds een grote sprong (0,2 g/l) gemaakt. Het zand blijkt dus gevoeliger te zijn voor de motorstandsverhoging dan het slib. Dit zijn waarschijnlijk de zandribbels die opwoelen.



hoogte boven het bed [cm]

-Tot besluit kan men uit tabel 2.5/2 vier zones halen (geïnspireerd op: van der Velden E., "Uitschuring rond pijpleidingen in slibhoudend zand", [23]):

<u>zone 1, motorstand 2</u>: Hier is V blijkbaar kleiner dan  $V_{krit}$ . In deze zone vindt geen enkel transport plaats, noch van zand, noch van slib.

<u>zone 2, motorstand 3</u>: Hier is de helling van slibcurve praktisch 0. Het slibtransport is in deze zone onafhankelijk van de tijd. Op de bodem zijn kleine plekjes zand te zien. Dit materiaal is waarschijnlijk niet gebonden geweest in de hechte struktuur van de grond. Het komt gemakkelijk los wanneer de snelheid boven de kritische snelheid komt.

<u>zone 3, motorstand 4</u>: Het verloop van het slibtransport in functie van de tijd heeft al een zekere helling. Voor het zand echter geldt: C=0, E=0. Het zand bevindt zich nog steeds niet in suspensie, maar beweegt zich in ribbelvorm voort over de bodem.

<u>zone 4, vanaf motorstand 5</u>: Zowel het slib- als het zandtransport vertonen nu een in de tijd stijgend verloop. In de suspensie bevinden er zich nu ook zanddeeltjes.

# 2.Berekenen van het transport

Om het transport te berekenen moet men eerst een idee hebben over de verdeling van de concentratie over de hoogte. Daarvoor werden zowel slib- als zandconcentratieprofielen opgemeten. De resultaten vindt men in fig.2.5/10. De slibconcentraties vertonen een heel homogeen verdeeld profiel. De zandzijn niet zo mooi homogeen over de concentraties hoogte verdeeld. Men kan er echter ook het theoretisch exponentiële verloop niet in herkennen. Het verloop van de zandconcentratie over de hoogte is vrij grillig. Dit kan men ook concluderen als men de resultaten van de concentraties op 1,9 cm hoogte, c<sub>o</sub>, en op 6,2 hoogte, cb, bekijkt. Nu eens is co het grootst, dan weer Ch (zie bijlage 7).

33

tabel 2.5/3: Knikconcentratie, in functie van de gemiddelde snelheid

motorstand	V [m/s]	C <sup>60</sup> [g/l]
3	0,196	0,0044
4	0,253	0,0198
5	0,288	0,227
6	0,317	1,13
7	0,370	2,56
8	0,404	5,31

Daarom worden de transportberekeningen op volgende manier uitgevoerd:

$$S=\int c(h)*v(h)*dA=\int C*v(h)*dA=C*V*h*b$$

Met het oog op de vergelijking van de zand-slibproeven met de zandproeven en de vergelijking tussen de kleine en de grote goot, vult men voor C de concentratie in het knikpunt,  $c^{60}$ , in. Het enige bruikbare vergelijkingspunt voor de zand-slibcurve en de zandcurve is immers dit knikpunt. Als het zand en het slib niet zouden terugkomen aan het begin van het bed, zou vanaf dit knikpunt de concentratie-tijd-curve immers constant in de tijd verlopen (zie fig.2.5/9).

Deze  $C^{60}$ -waarden worden met behulp van lineaire regressie uit de totale-concentratiewaarden gehaald (zie tabel 2.5/3)

Dit levert de volgende resultaten op voor de transporten:

motorstand	2:	$S_2 = 0,020$	g/s	
	3:	S <sub>3</sub> =0,018	g/s	
	4:	$S_4 = 0,105$	g/s	
	5:	S <sub>5</sub> =1,370	g/s	
	6:	s <sub>6</sub> =7,530	g/s	
	7:	S <sub>7</sub> =19,90	g/s	
	8:	S <sub>8</sub> =45,10	g/s	

Tot slot volgt nog een samenvattende tabel met de belangrijkste cijferwaarden van de kleine goot:

stand	V [m/s]	Stot. [g/s]	$\begin{bmatrix} n \\ N/m^2 \end{bmatrix}$
2	0,160	0,020	(0,000)
3	0,196	0,018	0,030
4	0,253	0,105	(0,172)
5	0,288	1,370	(0,336)
6	0,317	7,530	0,534
7	0,370	19,90	0,823
8	0,404	45,10	1,107

# 2.6 Vergelijking met de zandproeven

Als resultaten van de zandproeven wordt hier gebruik gemaakt van de resultaten die door Torfs H. en Coens J., ([9]) in dezelfde kleine goot en met hetzelfde soort zand gemeten werden.

Zoals reeds vermeld in deel 2.5 worden de transporten in de knikpunten vergeleken, omdat  $C_{z+s}$  stijgend blijft in de tijd en de zandconcentratie van Torfs en Coens  $C_z^{T\&C}$  niet.

De resultaten vindt men in onderstaande tabel:

zand-slibproeven zandproeven (Torfs en Coens) V S V τ S τ [m/s][g/s] $[N/m^2]$ [m/s][g/s] $[N/m^2]$ 0,16 0,020 0,000 0,14 0,00 0,062 0,20 0,018 0,030 0,19 0,00 0,287 0,25 0,105 0,127 0,22 0,686 0,00 0,29 1,370 0,336 0,24 0,05 0,670 0,32 7,530 0,534 0,28 1,42 0,876 0,37 19,90 0,823 0,30 3,90 1,032 0,40 45,10 1,107 0,33 5,60 1,045 0,33 10,0 1,524 0,35 15,0 1,175 0,39 24,0 0,840

Vermits er voor beide experimenten gebruik gemaakt wordt van dezelfde proefopstelling, namelijk dezelfde kleine goot, is het zinvoller het transport uit te zetten in functie van de gemiddelde snelheid en een kritische snelheid te bepalen, dan een kritische schuifspanning te bepalen uit de transportschuifspanning-curve. De fout op de gemiddelde snelheid wordt immers kleiner geschat dan de fout op de bodemschuifspanning. Nadien kan men dan gaan kijken naar de bijhorende bodemschuifspanningen en de kritische schuifspanning. De bodemschuifspanning kan gemakkelijker variëren, zij is veel gevoeliger voor de variatie van de bedvormen dan de snelheid.

fig.2.6/1


In fig.2.6/1 vindt men het transport uitgezet in functie van de snelheid voor beide experimenten. Op deze figuur lijkt het dat het zand bij een lagere snelheid loskomt dan het zandslibmengsel. Als men echter de cijfers in bovenstaande tabel bekijkt, vindt men voor gemiddelde snelheid 0,16 m/s als transport (S=0,02 g/s) voor de zand-slibproeven. Anderzijds worden voor de zandproeven slechts transporten vanaf 0,24 m/s genoteerd (S=0,05 g/s).

De bepaling van de kritische schuifspanning gebeurt als volgt: er wordt een drempeltransport van 0,5 g/s vastgelegd. De transport-snelheid-curve wordt getrokken door alle punten waarvan het transport boven het drempeltransport ligt. Waar deze curve nu de abscis snijdt, ligt het kritische punt, met transport gelijk aan nul en gemiddelde snelheid gelijk aan de kritische snelheid.

Dan vindt men als kritische snelheden voor het mengsel en voor het zand respectievelijk:

V<sub>krit</sub><sup>z+s</sup>=0,28 m/s V<sub>krit</sub><sup>zand</sup>=0,26 m/s

Het zand komt dus bij een iets lagere snelheid los dan het mengsel.

Zorgt het slib dus inderdaad voor een cohesieve werking?

Na een tijdje echter wordt het transport van het mengsel groter dan dat van het zandbed. Men zou als reden kunnen aangeven, dat het slib bij de mengselproeven in suspensie blijft. Doch als men naar de zand-transport-curve van de mengselproeven (zie fig.2.6/1) gaat kijken, ziet men dat deze aanvankelijk onder de transportcurve van de zandproeven ligt, maar dat ze deze overstijgt bij motorstand 8 en daar ook een grotere helling heeft.

Als men nu door lineaire interpolatie de bij de kritische snelheden horende kritische schuifspanningen berekent, bekomt men de volgende waarden:

> $\tau_{\text{krit}}^{z+s=0,31 \text{ N/m}^2}$  $\tau_{\text{krit}}^{zand=0,77 \text{ N/m}^2}$

tabel 2.6/1: vergelijking tussen de bedvormen van een zandbodem en een zand-slibbodem

zandpr	oeven		zand-slibproeven				
V [m/s]	ribbel lengto [cm]	-	V [m/s] [cm]	ribbel lengt	- e		
0,14	0		0 16	0			
0,19	6-7		0,10	0			
0,22	6-7		0,20	0			
0,24	6-10	Z	0.25	0-1			
0,28	6-10	vkrit <sup>-</sup>	0,25	0-4			
0,30	5-10		0,29	2-4	Vkrit <sup>z+s</sup>		
0,33	6-10		0,32	0-4			
0,33	4-12						
0,35	6-7						
0,39	6-7		0,37	0-6,6			
			0,40	0-4			

De kritische schuifspanning van zand blijkt nu groter te zijn dan deze van het mengsel, terwijl het voor de kritische snelheden net andersom is!

De verklaring daarvan ligt in het feit dat de zandbodem grotere ribbels vertoont dan de zand-slibbodem. De waarden van de ribbellengten worden getabelleerd in tabel 2.6/1. Voor de zandproeven wordt er gebruik gemaakt van de gegevens van Torfs H. en Coens J., [9], de gegevens van de zand-slibproeven vindt men terug in deel 2.4. Men ziet dat de ribbels van de zandproeven reeds bij lage snelheden en rond de kritische snelheid veel groter zijn dan deze van de zand-slibproeven. Dit ruwer oppervlak brengt grotere schuifspanningen met zich mee, zodat de transport-schuifspanningcurve opschuift naar grotere schuifspanningen. Het is dus logisch dat we hier een grotere  $^{\tau}$ krit vinden.

# 2.7 Vragen en antwoorden in verband met de invloed van slib in een sedimentbodem

Voor de formulering van de vragen wordt verwezen naar van der Velden E., "Uitschuring rond pijpleidingen in slibhoudend zand, [23]). Deze vragen werden in de loop van de tekst gedeeltelijk behandeld, ze worden hier nog eens samengevat.

-Is het uiteindelijke transport bepaald door de zandconcentratie waarbij het slib gesuperponeerd moet worden als percentage van wat er in de bodem aanwezig is en hoe verhouden zich de percentages zand en slib in het verloop van de tijd?

Deze vraag kan als volgt vertaald worden: is de vorm van het verloop van het slib in functie van de tijd gelijk aan dat van het zandverloop? Is de verhouding van het slibtransport over het zandtransport gelijk aan de initiële mengverhouding? Zo beide vragen positief beantwoord worden, is het erosiegedrag van de gemengde bodem vooral bepaald door het erosiegedrag van het zand. Het slib erodeert met transportwaarden die in vaste verhouding met de waarden van het zandtransport staan, namelijk de initiële mengverhouding.

Over de concentratieverhoudingen kan weinig gezegd worden, vermits enkel het zwevend transport opgemeten wordt. De hoeveelheid zand in de zandribbels valt heel moeilijk te begroten. Een ruwe benadering voor motorstand 6 toonde ons een verhouding die het dubbele van de initiële verhouding 7/3 was.

Vermoedelijk verloopt het erosieproces als volgt: het slib kan, vanwege zijn kleiner gewicht, gemakkelijker los komen dan het zand. Het wordt echter gedwongen hetzelfde erosieproces als dat van het zand te volgen, maar qua hoeveelheid in de verhouding 3/7. Het slib kan immers niet van onder het zand uit blijven eroderen. Het zand vormt een ondoordringbare hindernis voor het slib.

De concentratie van het zwevend zand in functie van de tijd verloopt als volgt: aanvankelijk stijgt de curve snel tot ze een soort van knikpunt bereikt heeft, een evenwichtsconcentratie. Daar de opstelling, namelijk de smalle retourbuizen en de schroef, de bezinking van het zwevend zand verhindert, zal de curve na het knikpunt met een kleine, constante helling verder stijgen. De zandconcentratie zal dus niet constant blijven. Het slib nu krijgt dus ook de kans om zo'n curve te beschrijven, alleen zal de helling groter zijn omdat het slib uitsluitend uit zwevend transport bestaat terwijl voor zand een deel in het bodemtransport kruipt.

-Is er een vertragende werking van het slib en zo ja hoe groot is deze vertraging?

Dit anwoord kan men vinden door de resultaten van het mengsel te vergelijken met die van een zandbodem en meer bepaald zijn transport-snelheid-curve. Daaruit is gebleken dat het zand bij een lagere gemiddelde snelheid begint te eroderen. Het verschil is echter klein: 0,28-0,26=0,02 m/s.

Men kan dus nauwelijks spreken van een vertragende werking van het slib. Voor de bevestiging van het feit dat het slib voor samenhang zou zorgen zijn deze resultaten (de waarde van de kritische snelheden) niet overtuigend genoeg. Wel zijn er duidelijk minder uitgesproken bedvormen (ribbels) aanwezig in het zand-slibbed in vergelijking met het zandbed. Het slib zal wel degelijk door zijn cohesieve werking het vormen van ribbels bij lage gemiddelde snelheden verhinderen.

-In hoeverre wordt de kritische schuifspanning,  $\tau_{krit}$ , beïnvloed door de aanwezigheid van slib?

De vergelijking tussen de kritische schuifspanning van een zandbodem met deze van een zand-slibbodem leverde het volgende op:  $\tau_{\rm krit}$  voor zand is 0,77 N/m<sup>2</sup>,  $\tau_{\rm krit}$  voor het zand-slibmengsel is 0,31 N/m<sup>2</sup>. De verklaring voor dit grote verschil is dat de zandbodem grotere ribbels heeft. Deze ruwheid is de oorzaak van grotere bodemschuifspanningen.

-Is het transport afhankelijk van de absolute schuifspanning of van het verschil van de aanwezige schuifspanning en de kritische schuifspanning?

Deze vraag kan als volgt vertaald worden: welke curve in fig.1.6/3 bekomt men? Zoals in 1.6 reeds aangegeven is, heeft het enkel zin een  $\tau_{\rm krit}$  in de betekenis van een transitiepunt te definiëren als we het bijhorende model willen gebruiken. In realiteit is er natuurlijk altijd transport, ook als  $\tau$  kleiner dan  $\tau_{\rm krit}$  is. Niettegenstaande het arbitrair karakter van  $\tau_{\rm krit}$ kan men hier toch een waarde afleiden. Daarvoor wordt er verwezen naar de transport-snelheid-curve (zie fig.2.6/1).

Men kan zien dat pas vanaf motorstand 4 (V=0,253 m/s) het transport aanschouwelijk wordt. Meer technisch gesproken, het transport overstijgt tussen motorstand 3 en 4 een vooropgestelde drempelwaarde (0,5 g/l). Als men nu ook de schuifspanning-snelheid-curve (zie fig.2.5/7) bekijkt, merkt men dat ook de schuifspanning maar vanaf een bepaalde snelheid aanschouwelijk wordt, namelijk heel klein,  $\pm$  0 bij motorstand 2 (0,160 m/s) en daarna stijgend met de gemiddelde snelheid.

Er bestaat dus een snelheid tussen motorstand 3 en 4 waarbij de beweging begint en dus ook een bijhorende schuifspanning, die groter dan nul is, namelijk  $\tau_{\rm krit}=0,31~{\rm N/m^2}$ . Het transport kan men dus afhankelijk denken van het verschil van de aanwezige schuifspanning en de kritische schuifspanning (zie ook fig.4.2/1).

# HOOFDSTUK III: Transportproeven in de grote goot

## 3.1 Inleiding

De grote goot zou een realistischer erosieproces moeten te zien geven dan de kleine goot. De waterhoogte is groter, we hebben een stroming met vrij oppervlak, het bed is langer en het zware sediment (zand) zou bezinken in de grote retourbak, zodat we telkens "vers" water (homogene slibsuspensie) krijgen aan het begin van het bed.

Dit hoofdstuk is op dezelfde manier ingedeeld als hoofdstuk II. Achtereenvolgens worden besproken:

- de proefopstelling en de gebruikte apparatuur (3.2)
- het meetprogramma en de uitvoering van de proeven (3.3)
- de verwerking van de bodemprofielen en visuele waarnemingen in verband met de bedvormen (3.4)
- de verwerking van de overige resultaten (3.5, berekenen van gemiddelde snelheden, schuifspanningen en transporten)
- vergelijking met de zandproeven (3.6)
- conclusies (3.7)



fig.3.2/2

motor

overlaat.

#### 3.2 Proefopstelling

Een algemeen beeld van de opstelling vindt men op fig. 3.2/1. Opvallende verschillen met de kleine goot zijn de stroming met vrij oppervlak, een pomp in plaats van een propeller en een veel grotere opstelling.

Op fig. 3.2/1 zijn meteen de voornaamste onderdelen aangeduid. Deze worden in het volgende stuk apart besproken.

De termen achteraan en vooraan, links en rechts worden steeds gezien ten opzichte van de stroomzin.

#### A.Stroomgoot:

(zie fig. 3.2/1)

De goot zelf is 23 m lang, 50 cm breed en ongeveer 60 cm hoog. De wanden zijn van glas en de bodem van beton. Centraal is een stuk van 7 m lang en 50 cm breed uitgespaard in de bodem, waarin het bed (ongeveer 10 cm dik) kan komen liggen. Achteraan de goot is een overlaat voorzien (zie fig.3.2/2), waarmee de waterhoogte, en dus de gemiddelde snelheid, kunnen worden beïnvloed bij een bepaald pompdebiet.

# **B.Retourcircuit:**

Het retourcircuit bestaat uit een gemetselde retourbak van 20,5 m lang en 1 m breed (fig.3.2/3).

Het water dat overstort achteraan de goot wordt via een korte, metalen leiding naar de retourbak geleid. Er is wel een afsluitklep voorzien aan het einde van de leiding. Dit geeft de mogelijkheid om boven het bed steeds een waterlaag te behouden, ook bij stilstaand water ('s middags, 's nachts).

In de retourbak zijn twee schotten aanwezig. Daardoor stroomt het water rustiger. Maar hun functie als zandvanger vervullen ze maar voor een beperkt deel. Op dit probleem wordt later nog terug gekomen.

Alles samen is er ongeveer 14000 l water in de opstelling aanwezig.



## C.Pomp:

(zie fig. 3.2/3)

De stroming wordt hier onderhouden door een elektrisch aangedreven pomp. Via een verticale ondergedompelde inlaat wordt water uit de retourbak opgepompt en vooraan in de goot geloosd via een analoge verticale ondergedompelde uitlaat.

Het debiet kan ingesteld worden door het pompwiel verder of minder ver open te draaien (uitgedrukt door het aantal pompslagen, zie fig. 3.2/4 ter verduidelijking).

### D.Meetkar:

(zie fig. 3.2/5)

De bovenranden van de goot worden gebruikt als rails voor de meetkar, waarop een groot deel van de meetinstrumenten zijn aangebracht. Deze meetkar wordt aangedreven door een elektromotor met riemoverbrenging.

Aan de voorkant bevinden zich de elektromagnetische snelheidsmeter (verder aangeduid met EMS) en de micropropeller (verder aangeduid met MP). Centraal staan twee naast elkaar opgestelde profielvolgers (aangeduid met provo's). Achteraan zit een aftaphark voor de concentratiemetingen en een peilnaald.

Aan de zijkant van de meetkar zijn een aantal schakelaars aangebracht (fig.3.2/6). Het schakelen gebeurt doordat het wieltje onderaan over een (hogere) plastic drempel heen moet. Zo keren de buitenste twee schakelaars de bewegingszin van de meetkar om als ze zich te ver vooraan of achteraan de goot begeeft. Het middenste wieltje is geen schakelaar in de enge zin van het woord. Het maakt het mogelijk een meetsectie voor de bodemprofielmeting af te bakenen met behulp van twee (lagere) plastic drempeltjes. Ter hoogte van deze drempeltjes wordt de tagospanning, die de snelheid van de meetkar weergeeft, door de schakelaars op nul gebracht.



1 liter potten 50 ml flesjes

fig.3.2/8



aftaphark vooraan

# E.Concentratiemeting:

(zie fig. 3.2/7)

Ook hier wordt gebruik gemaakt van dwars afzuigen (cfr. kleine goot), en dient opgemerkt dat de vermenigvuldigingsfactoren 1,28 en 1 (respectievelijk voor de zand- en de slibfractie) toegepast worden, niettegenstaande de aftapsnelheid vrijwel van bij de eerste meting kleiner is dan drie maal de lokale stroomsnelheid. Ongeveer 500 ml aftappen in 85 seconden door een afzuigmond met diameter 3,8 mm geeft een aftapsnelheid van 51 cm/s.

De inhoud van elke beker (ongeveer 1 l) wordt tot op 10 ml na geschat. Van elke afgetapte hoeveelheid mengsel wordt de fractie groter dan 53  $\mu$ m afgescheiden door nat zeven. Na voldoende naspoelen om resterend slib te verwijderen, kan men de zeef omkeren en de "zandfractie" in een kleiner flesje wegspoelen. De rest van het mengsel, waarin een roervlooi wordt gestopt, zet men op een magnetische roerder. Na een tijdje wordt uit de homogene suspensie een hoeveelheid van 50 ml met behulp van een pipet afgezogen en in een flesje geloosd, samen met het water om de pipet na te spoelen.

De flesjes met de fractie kleiner en groter dan 53  $\mu$ m worden dan op dezelfde wijze als bij de kleine goot geanalyseerd door middel van vacuümfiltratie. Het gevonden nettogewicht van de zandfilter wordt vermenigvuldigd met 1,28 en gedeeld door het geschatte volume van het afgetapte mengsel. Het nettogewicht van de slibfilter wordt vermenigvuldigd met 20 (50 ml\*20=1 l).

Er zijn twee aftapharken aangebracht, respectievelijk aan het begin van het bed en achteraan op de meetkar, allebei in het midden van de sectie (zie fig. 3.2/8). Bij elke aftaphark wordt de onderste afzuigmond op ongeveer 1 cm boven het bed gehangen. Dit vergt koppeling aan de bodemligging. Gezien de steeds verminderende zichtbaarheid wordt deze bodemligging met behulp van de peilnaald en/of de MP bepaald vóór het starten van de pomp.





EMS

#### F.Snelheidsmeting:

Op de voorkant van de meetkar bevinden zich twee snelheidsmeters. De elektromagnetische snelheidsmeter (EMS) staat in het midden van de dwarsdoorsnede. De micropropeller (MP) staat ernaast, op ongeveer 10 cm afstand van de EMS (zie fig.3.2/9).

Voor de MP verwijzen we naar de kleine goot. Vermelden we echter hier de ijkformule voor de MP van de grote goot:

 $v=0,032 + 0,858*10^{-3}*U$ 

met v : snelheid [m/s]
U : spanning [V]

De EMS is een schoteltje met diameter 3 cm, dat onderaan een stang bevestigd is.

De werking van de EMS berust op de wet van Faraday: wanneer een geleider in een magnetisch veld beweegt, ontstaat er een elektrisch potentiaalverschil over die geleider. Aan de onderkant van de schotel bevinden zich twee paren elektroden in een omhulsel. Door stroming van het water, de geleider, in het magnetisch veld wordt tussen de twee paren elektroden een spanning opgewekt die een lineaire functie is van de stroomsnelheid. Het signaal wordt niet beïnvloed door de geleidbaarheid van het water.

Omwille van de platte vorm kan men in principe dicht bij de bodem meten. Maar door contractie meet men ten eerste een grotere snelheid en ten tweede is er gevaar voor lokale erosie.

Omdat de verstoring van het magnetisch veld door wandeffecten veel groter blijkt te zijn dan de verstoring geïnduceerd door de stroming, moet men minimaal op een afstand van driemaal de schoteldiameter van de wand blijven. Dit is in de grote goot geen probleem.

Dankzij de twee paren elektroden kan men ook snelheden loodrecht op de stroomrichting meten, doch enkel in horizontale zin. De ijkformule van de EMS luidt:

45

met v : snelheid [m/s]
U : spanning [V]

Zowel het EMS- als het MP-signaal kunnen met behulp van een integrator uitgemiddeld worden over een zekere tijd (bijvoorbeeld 30 of 60 seconden).

# G.Bodemprofielmeting:

Op de meetkar zijn naast elkaar twee profielvolgers gemonteerd: provo 1 en provo 2.

Een profielvolger bevat essentieel een stang die verticaal kan bewegen. De stang is eigenlijk een meetelektrode, die de afstand (elektrische weerstand) van zijn onderkant tot de bodem constant houdt. Men kan nu de meetkar, met daarop de meetelektrode, laten bewegen over de goot. Door de vertikale beweging van de meetelektrode te volgen, krijgt men een idee van de vorm van het bodemprofiel: de via een sample-programma geregistreerde provosignalen kunnen in bodemhoogten worden omgezet met behulp van ijkformules.

De meetsectie voor de bodemprofielmeting wordt met plastic drempeltjes afgebakend.

De provo's kennen een aantal grove fouten. Soms blijft de elektrode hangen en trekt een spoor op de bodem. Dit vertekent het gemiddeld bodemniveau dat men uit een bodemprofielmeting kan afleiden. Bovendien verspringt het provosignaal vaak tussen twee metingen. Vandaar dat men beter de provo's zoveel mogelijk aan laat staan. Nog beter ware het de provo's bij elke meting te ijken op een vast meetniveau (bijvoorbeeld een metalen platform dat in de goot wordt gehangen).

Het opmeten van het bodemprofiel maakt het mogelijk de evolutie van eventuele bedvormen na te gaan en geeft een indicatie van de erosie, via de evolutie van het gemiddeld bodemniveau.



fig.3.2/10

## H.Vervalmeting:

(zie fig. 3.2/10)

Ter aanvulling van het bepalen van de bodemschuifspanning uit het snelheidsprofiel, worden drie pitotbuizen in de goot gehangen op respectievelijk 0,53 m; 3,97 m en 5,97 m vanaf het begin van het bed. Elke pitotbuis heeft langszij twee fijne gaatjes en is met behulp van een plastic slangetje met een afleesstandaard verbonden. Deze bestaat uit drie naast elkaar staande stukken plastic buis. Elk van deze buizen heeft een veel grotere sectie dan het plastic slangetje dat er in uitmondt, om een grotere nauwkeurigheid te bereiken. De variatie van de waterspiegel kan worden afgelezen met behulp van peilnaalden.

Als nadelen kunnen worden aangestipt dat de slanke pitotbuisjes tegen de wand van de goot hangen en bovendien staan te trillen vanaf middelmatig hoge snelheden. Verder is het moeilijk het verschil in demping wegens de verschillende lengten van de plastic slangetjes te regelen met extra metalen klemmetjes. Daarom moet het meeste belang gehecht worden aan het verval AF, gemeten met behulp van de pitotbuizen 2 en 3. Deze hebben immers veel langere plastic buisjes dan pitotbuis 1, die zich het dichtste bij de afleesstandaard bevindt en waarbij kleine variaties in de waterhoogte in de goot blijkbaar niet worden uitgedempt. Met behulp van pitotbuizen 2 en 3 kan men dus een nauwkeuriger (stabieler) verval afleiden. Men moet wel beseffen dat ze slechts op 2m afstand van elkaar hangen, wat een vrij klein verval impliceert en dus toch nog een grote relatieve fout oplevert.

Een pluspunt is dat ze min of meer de zone bestrijken waar de meeste bodemprofielen, snelheidsmetingen en concentratiemetingen gebeuren.

Zelfs met behulp van pitotbuizen 2 en 3, wordt de meting van het verval bemoeilijkt door het gerimpeld wateroppervlak vanaf middelmatig hoge snelheden. Daarom wordt enkel belang gehecht aan de bekomen waarden bij geringe gemiddelde snelheden.

Verder dient aangestipt dat met dergelijke pitotbuizen het eventuele verschil van de snelheidshoogten niet wordt meegerekend in het verval.



### 3.3 Meetprogramma en uitvoering van de proeven

Zoals bij de kleine goot wordt ook hier telkens de snelheid opgedreven en meet men bij elke pompstand snelheidsprofielen, concentratieprofielen en bodemprofielen op, volgens volgend schema:

-Vóór het starten van de pomp, bij stilstaand water, noteert men de nulstand van de pitotbuizen: dit zijn de met behulp van de peilnaald afgelezen waterhoogten in de plastic buizen van de afleesstandaard.

De stand van de provo's, de MP, de EMS, de peilnaald op de bodem wordt ook opgeschreven (en dit voor elke pompstand op dezelfde plaats). Dit doet men om, tijdens het stromen bij troebel water, zo nauwkeurig mogelijk de bodem te kunnen benaderen. Ook voert men een bodemprofielmeting uit tussen 4,4 en 5,8 m (zie fig.3.3/1).

-De pomp wordt in werking gesteld en dadelijk wordt de hoogte van de overstortklep geregeld, zo dat de waterhoogte in de meetsectie ongeveer 20 cm bedraagt.

-Na één uur stromen legt men de pomp stil en voert men een tweede bodemprofielmeting uit.

-Opnieuw wordt de pomp gestart en de snelheidsprofielen worden na enige tijd opgemeten. Ze worden als volgt uitgevoerd: om de cm vanaf 1,5 cm hoogte (zie fig.3.3/1).

-Vervolgens doet men een concentratieprofielmeting (zie fig.3.3/1). De zand- en slibconcentratie worden bepaald op 4,20 m tegelijkertijd met de gemiddelde slibconcentratie aan het begin van het bed (omdat het slib verondersteld wordt homogeen over de hoogte verdeeld binnen te komen) . De zandconcentratie wordt niet gemeten aan het begin van het bed, omdat deze verondersteld wordt nul te zijn: het zand zou in de retourbak achterblijven.

Er wordt opgemerkt dat dit (voor hogere snelheden) niet het geval is; daarom bepaalt men vanaf pompstand 15 ook de

													ti
- opmerkingen		kennismaking met de meet-	apparatuur variatie van het snelheids- profiel in de tijd		snelheidsverdeling over de dwarsdoorsnede				steekproef naar de snelheid			gedeeltelijk verversen van water in de retourbak	poging tot meting van varia
bod.prof- meting	•	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
conc meting		+	ī	+	i.	+	+	+	+	+	+	ī	+
dsmeting EMS		ı	ı	+	· J	+	1	+	+	+	+	ı	+
snelhei MP		ī	+	+	+	+	+	+	+ .	+	+	I.	+
stroom- tijd	[ nnr ]	e	5	£	e	e	വ	2,5	4	5,5	5	1	7
ч	[ cm ]	23,7	20,3	20,4	20,3	19,5	21,0	20,8	21,7	21,3	20,5	٢	20,7
Λ	[cm/s]	25,0	22,5	28,5	28,0	34,0	40,5	44,0	49,5	54,6	63,0	I	61,0
pomp- stand		10	۵	6	6	10	12	13	14	15	16	T	16
datum		02/10	03/10	04/10	05/10	06/10	01/60	10/10	11/10	12/10	16/10	17/10	18/10
						•							

tabel 3.3/1: meetprogramma van de grote goot

gemiddelde zandconcentratie aan het begin van het bed en bij pompstand 16 zelfs het hele profiel.

-De waterhoogte in de goot wordt afgelezen met behulp van de peilnaald op de meetkar. Ook de waterhoogten in de afleesstandaard van de pitotbuizen leest men af via peilnaalden (zie fig.3.3/1).

-Tenslotte legt men de pomp weer stil en wordt een laatste bodemprofielmeting verricht.

Een vast schema in verband met de duur van stromen werd niet toegepast. Een overzicht wordt gegeven in tabel 3.3/1. In deze tabel kan men nog enkele bijkomende proeven terugvinden:

-Bij pompstand 8 wordt de variatie van het snelheidsprofiel in de tijd gemeten (zie fig.3.3/1).

-Tevens bepaalt men bij pompstand 9 de snelheidsverdeling over de dwarsdoorsnede (zie fig.3.3/2).

-Na pompstand 16 wordt het water in de retourbak ververst. Dit heeft tot doel de slibconcentratie te verminderen en zo de zichtbaarheid (bij de ontgrondingsproeven) te verbeteren. Daarna wordt nog een poging gedaan tot het bepalen van de variatie van de concentraties (en de transporten) over het bed. Om de meter meet men het zanden het slibconcentratieprofiel, telkens tegelijkertijd met dat in het begin van het bed (zie fig.3.3/1).

-Bij pompstand 14 wordt een dertigtal keer de snelheid in een punt bepaald met een middelingstijd van één seconde. In bijlage 3 gebruikt men de spreiding op deze resultaten bij het afschatten van de onzekerheid op een snelheidsmeting.

Indien meer informatie over de meetgegevens gewenst is, vindt men die in het deel "Bijlagen" (Bijlage 8 : "Meet-gegevens van de transportproeven in de grote goot").

1: gemiddelde	bodem aan de	hand van	provo's
profiel- meting	Pr	covo 1 [cm]	Provo 2 [cm]
B02/10/0	C	,221	0,146
B03/10/0	C	,230	0,105
B04/10/0	C	,153	0,021
B04/10/A	C	,159	0,052
B04/10/B	C	,098	-0,005
B04/10/C	C	,108	-0.009
B06/10/0	C	,590	0,426
B06/10/A	C	,527	0.444
B06/10/B	C	,523	0,406
B09/10/0	C	,538	0,270
B09/10/A	C	.398	0.337
B09/10/B	0	,402	. 0,330
B10/10/A	0	,413	0,306
B10/10/B	0	.387	0,260
B11/10/A	C	,408	0.390
B11/10/B	0	,323	0.217
B12/10/A	0	.267	0.133
B16/10/0	0	.416	0.017
B16/10/A	0	.223	-0.042
B16/10/B	0	,193	-0.046
B18/10/0	0	,190	-0,254
	1: gemiddelde profiel- meting B02/10/0 B03/10/0 B04/10/0 B04/10/A B04/10/B B04/10/C B06/10/A B06/10/A B09/10/A B09/10/A B10/10/B B11/10/B B11/10/B B12/10/A B16/10/B B18/10/0	1: gemiddelde bodem aan de profiel- Pr meting B02/10/0 0 B03/10/0 0 B04/10/0 0 B04/10/A 0 B04/10/A 0 B04/10/C 0 B06/10/A 0 B06/10/A 0 B09/10/A 0 B09/10/A 0 B10/10/A 0 B10/10/B 0 B11/10/A 0 B11/10/A 0 B12/10/A 0 B16/10/A 0 B16/10/B 0 B16/10/B 0 B18/10/0 0	<pre>1: gemiddelde bodem aan de hand van profiel- meting     [Cm] B02/10/0     0,221 B03/10/0     0,230 B04/10/0     0,153 B04/10/A     0,159 B04/10/B     0,098 B04/10/C     0,108 B06/10/A     0,527 B06/10/A     0,523 B09/10/A     0,523 B09/10/A     0,398 B09/10/A     0,398 B09/10/A     0,402 B10/10/B     0,387 B11/10/B     0,323 B12/10/A     0,267 B16/10/A     0,223 B16/10/B     0,193 B18/10/O     0,190</pre>

tabel 3.4/2: gemiddelde bodem aan de hand van peilnaald

	en	de MP			
pompsla	g	peilnaald [cm]			MP [cm]
8		0,00			(-0,27)
9		( 0,05			0,00
10	Γ +0,03	\$ 0,03	r-0,05	<	-0,08
12		0,01	60 -		-0,02
13		-0,09	Ч		-0,07
14		(-0,59)			-0,13
15		(0,06)	L		-0,15
16		-0,12			(-0,25)
	L->	-0,15 cm		-0	,10 cm

an de MD

# <u>3.4 Verwerking van de bodemprofielen en visuele waarnemingen in</u> verband met de bedvormen.

## A. Verwerking van de bodemprofielen

Over een lengte van 1,40 m wordt bij elke pompstand twee of drie keer het bodemprofiel door de provo's opgemeten. Met behulp van een computer worden de resultaten verwerkt tot onder andere de gemiddelde diepte van het bed (zie tabel 3.4/1). Uit deze tabel haalt men direct de sprongen die provo I en provo II maken. Het teken en de grootte van de verschillen in gemiddelde bodemligging geven een te grillig beeld om er een overeenkomstige toename van de concentraties uit af te leiden. De oorzaak hiervan ligt bij de profielvolgers. Deze vertonen immers een verloop in de tijd. Om meer betrouwbare provowaarden te verkrijgen, kan men de profielvolgers beter ijken op een vast platformpje.

Ook kan men nulstanden van de peilnaald en de MP-nulstanden, die telkens vóór het starten van de pomp op dezelfde plaats gemeten werden, uitzetten in tabel (zie tabel 3.4/2). Men bekomt een bodemdaling (tussen het begin van de transportproeven en de meting aan 16 pompslagen, dit is na ongeveer 35 uur stromen aan verschillende snelheden) met een orde van grootte van 1 mm. Uit de toename van de slibconcentratie over dezelfde periode, kan men een oppervlakte-gemiddelde bodemdaling afleiden:

$$\delta = \frac{c_{s} * V}{b * 1 * (1-n) * (p_{s}/100) * \rho_{s}}$$

met c<sub>s</sub> : gemiddelde slibconcentratie bij meting aan 16 pompslagen

V : totaal volume water (in de grote goot en in het retourcircuit)

b : breedte van het bed

1 : lengte van het bed

- n : poriëngehalte
- $p_s$ : percentage aan slib (beter: fractie < 53 µm) in het (vast) bodemmateriaal

$$\rho_{\rm S}$$
: massadichtheid van slib

 $\delta = \frac{0,0760 \text{ g/l} * 14000 \text{ l}}{7\text{m} * 0,5\text{m} * (1-0,40) * 0,30 * 2600 \text{ kg/m3}} = 0,7 \text{ mm}$ 

Dit is een aannemelijke waarde als men ze vergelijkt met de evolutie van de nulstanden van MP of peilnaald op het bed.

# B. Visuele waarnemingen in verband met de bedvormen

Van verschillende bedvormen is hier geen sprake. Er treedt bijna geen ribbelvorming op. Op sommige plaatsen ziet men wel fijne geultjes in de langsrichting. Verder vindt men, vooral in het centrale deel van de dwarssecties, kleine driehoekige zandribbeltjes, zoals in de kleine goot.

Naar het einde toe van deze reeks transportproeven in de grote goot wordt het bed wel hol in de dwarsrichting.



met h: de waterhoogte [cm] imax: de maximale hoogte boven de bodem waarop een snelheid gemeten wordt [cm] v: de snelheid [cm/s]

### 3.5 Verwerking van de resultaten

In dit deel worden voor elke pompstand de gemiddelde snelheid, de bodemschuifspanning en het transport op een vaste plaats berekend.

### A.Berekenen van de gemiddelde snelheden

Uit een opgemeten snelheidsprofiel kan men een gemiddelde snelheid afleiden. Daarbij wordt:

$$V = \frac{1}{A} \star \int v \star dA$$

benaderd door:

$$V = \frac{\Sigma v_i \star \Delta h_i}{h}$$

met v : snelheid in een punt

- A : oppervlakte van de dwarssectie
- i : hoogte boven bodem (van 1,5 cm tot i<sub>max</sub> met stappen
   van 1 cm)
- v<sub>i</sub> : snelheid in het midden van de dwarssectie op hoogte i boven de bodem
- $\Delta h_i$ : hoogte van het stuk snelheidsprofiel horende bij de snelheid v<sub>i</sub>
- h : waterhoogte

In fig. 3.5/1 wordt deze benaderingsformule concreet uitgewerkt. Uiteindelijk vindt men:

$$V = \frac{1}{h} * [1.625 * v_{1,5} + v_{2,5} + v_{3,5} + \dots + (h - i_{max} + 0, 5) * v_{i max}]$$



fig. 3.5/2

afstand tot de wand [cm]

Understaande tabel bevat de resultaten van deze b	)nd	erst	aand	le ta	abel	bevat	de	resultaten	van	deze	berekeningen:
---	-----	------	------	-------	------	-------	----	------------	-----	------	---------------

pompstand	v
	[m/s]
8	0,25
9	0,29
10	0,34
12	0,41
13	0,44
14	0,50
15	0,55
16	0,63

In Bijlage 4 wordt een fout van 1 % op een snelheidsmeting en een bovengrens van 5 % voor de fout op de gemiddelde snelheid afgeleid. Deze laatste fout bevat onder andere een integratiefout. Daarvoor is gebruik gemaakt van de snelheidsverdeling over de dwarsdoorsnede (zie fig. 3.5/2). Uit de doorsneden ervan op bepaalde hoogten boven de bodem blijkt dat het snelheidsprofiel opgemeten in het midden van de sectie (EMS), maatgevend is voor ongeveer 35 cm van de dwarssectie. Meteen ziet men ook dat een snelheidsprofiel opgemeten met de iets excentrisch geplaatste MP, voldoende representatief is, op voorwaarde dat de stroming rond de stang van de EMS het stroombeeld rond de MP niet teveel wijzigt. Dit laatste wordt nagegaan door de EMS respectievelijk in en uit het water te halen, terwijl de snelheid met behulp van de MP wordt gemeten. Het levert een afwijking van slechts 0,7 % .

#### B. Berekenen van de schuifspanningen

In dit deel worden de bodemschuifspanningen berekend, respectievelijk met:

- de methode van het snelheidsprofiel
- de methode van het verval met side-wall-correction (methode van Vanoni-Brooks)

#### -methode van het snelheidsprofiel

In 2.5, deel B werd deze methode uiteengezet: men bepaalt de bodemschuifspanningen  $\tau_{hand}$  grafisch uit een op semi-logaritmisch papier uitgezet snelheidsprofiel.

Zoals bij de kleine goot is ook hier de bodemligging onzeker. Deze onzekerheid is een constante fout op de daaruit afgeleide hoogten boven de bodem waarop de snelheden worden gemeten. Daarom voert men de opgemeten snelheidsprofielen, dit wil zeggen de onderste 9,5 of 5,5 cm, in in een programma geschreven door ir. E.T.J.M. van der Velden. Met behulp van dit programma rekent men uit voor welke alternatieve bodemligging (hoogten boven bodem z vermeerderen met  $\Delta z$  variërend van -10, -9 tot +9, +10 mm) de som van de kwadraten van de afwijkingen ten opzichte van de rechte "v=a\*lnz - b" minimaal is. Als output geeft het de overeenkomstige  $\Delta z$  waarde met bijhorende  $\tau$ , C,  $z_0$ ,  $V_*$ .

Er wordt slechts rekening gehouden met de zo bekomen gecorrigeerde bodemschuifspanningen  $\tau_{\rm comp}$  bij redelijke waarden van  $\Delta z$  (bijvoorbeeld  $\Delta z \leq 6$  mm).

pompstand	$\frac{\pi}{[N/m^2]}$		$r_{comp}$ [N/m <sup>2</sup> ]
8	0,23		
9	0,14	•	0,18
10	0,35		
12	0,54		
13	0,54		
14	0,68		0,52
15	0,76		
16	0,85		0,70

-methode van het verval met side-wall-correction:

(methode van Vanoni-Brooks)

Hierover wordt in 2.5, deel B voldoende uitgeweid. Er moet wel nog een en ander aangepast worden.

In de grote goot is er een stroming met vrij oppervlak. Dit wil zeggen dat uitdrukking 7 (uit 2.5, deel B) verandert:

$$f_b = P*f/P_b - P_w*f_w/P_b = (b+2*h)*f/b - 2*h*f_w/b$$

met  $f, f_b, f_w$ : Darcy-wrijvingscoëfficiënt resp. van de totale sectie, de bodemsectie en de wandsectie

 $P, P_b, P_w$ : natte omtrek resp. van de totale sectie, de bodemsectie en de wandsectie

b : breedte van de dwarssectie

h : waterhoogte

Ook de uitdrukking voor de hydraulische straal R wordt anders:

R=b\*h/(b+2\*h)

Het verval  $\Delta F$  wordt gemeten met behulp van de pitotbuizen 2 en 3, en bepaald ten opzichte van de nulstanden (in de afleesstandaard). Deze nulstanden worden bepaald bij volledige stilstand van het water, namelijk als het water in de goot een hele tijd (bijvoorbeeld een weekend) niet gestroomd heeft.

Hieronder volgen de resultaten:

pompstand	h	R	ΔF	7 S.W.C
	[cm]	[cm]	[cm]	$[N/m^2]$
8	20,3	11,2	0,06	0,47
9	20,4	11,2	0,07	0,57
10	19,5	11,0	0,13	1,03
12	21,0	11,4	0,11	0,82
13	20,8	11,4	0,12	0,88
14	21,7	11,6	0,22	1,86
15	21,3	11,5	0,62	5,83
16	20,5	11,3	0,31	2,44

-vergelijking van de methoden en keuze:

Bij de transportproeven in de grote goot wordt voor de methode van de snelheidsprofielen gekozen, in tegenstelling tot de vervalmethode bij de kleine goot.



- +10 pompslagen
- **D**12 pompslagen

- ◊ 13 pompslagen
- ∆14 pompslagen
- x 15 pompslagen
- ▼16 pompslagen

fig.3.5/4



- +10 pompslagen
- **G**12 pompslagen
- ♦ 13 pompslagen
- ∆14 pompslagen
- x 15 pompslagen
- ▼16 pompslagen

- De gemeten vervallen zijn onbetrouwbaar bij grotere snelheden en geven onrealistisch grote schuifspanningen (tot  $5,83 \text{ N/m}^2$ ). De oorzaak daarvan ligt in het trillen van de pitotbuizen, het gerimpeld wateroppervlak en de niet even lange plastic buisjes tussen pitotbuizen en afleesstandaard.
- Het bed is lang genoeg opdat het deel van het snelheidsprofiel tegen de bodem het theoretisch snelheidsprofiel van Prandtl-von Karman - waarop deze methode van schuifspanningsberekening gebaseerd is - zou benaderen. Uit een vergelijking van de met de hand en de met behulp van de computer berekende schuifspanningen, worden de  $\tau_{\rm graf}$ waarden weerhouden voor gebruik in de grafieken.

pompstand	v	$\tau_{hand}$	TCOMP	TSWC	Taraf
	[m/s]	$[N/m^2]$	$[N/m^2]$	$[N/m^2]$	$[N/m^2]$
8	0,25	0,23		0,47	
9	0,29	0,14	0,18	0,57	0,15
10	0,34	0,35		1,03	0,35
12	0,41	0,54		0,82	0,45
13	0,44	0,54		0,88	0,50
14	0,50	0,68	0,52	1,86	0,60
15	0,55	0,76		5,83	0,75
16	0,63	0,85	0,70	2,44	0,85

# C. Berekenen van transporten

In de kleine goot meet men de variatie van de concentratie in de tijd op. Als representatief transport voor een bepaalde motorstand wordt het transport in het knikpunt (na 60 minuten) genomen. In de grote goot echter kan men concentratie-metingen over de afstand (het bed) uitvoeren. Daarom moet men voor de grote goot voor elke pompstand een vaste plaats afspreken om daar het representatief transport te bepalen: bijvoorbeeld op 4,2 m van het begin van het bed (x=4,2 m).

56



- met b: de breedte van de goot [cm]
   h: de waterhoogte [cm]
  - v: de snelheid [cm/s]
  - c: de zandconcentratie [g/1]

Het transport S door een dwarssectie A van de goot wordt gegeven door:

$$S = \int c * v * dA$$

Om dit te bepalen heeft men een concentratie- en een snelheidsprofiel nodig.

Uit fig. 3.5/3 blijkt dat het slib zich vrij homogeen over de hoogte verdeelt. Het slibtransport wordt dus best benaderd door:

$$S_s = c_s * \int v * dA = c_s * v * A = c_s * v * b * h$$

met S<sub>s</sub> : slibtransport

- c<sub>s</sub> : gemiddelde slibconcentratie over de hoogte
- V : gemiddelde snelheid
- b : breedte van de dwarssectie
- h : waterhoogte in de goot

Voor het zand vindt men echter bij grotere snelheden een duidelijk concentratieprofiel (zie fig. 3.5/4): grotere concentraties beneden, dalende concentraties naar boven toe. Het zandtransport wordt dus best benaderd door:

$$S_z = b * \Sigma C_{z,i} * v_i * \Delta h_i$$

met S<sub>z</sub> : zandtransport b : breedte van de dwarssectie c<sub>z,i</sub> : zandconcentratie op hoogte i boven de bodem v<sub>i</sub> : snelheid op hoogte i boven de bodem Δh<sub>i</sub> : hoogte van de zone uit het concentratie- en het snelheidsprofiel horende bij c<sub>z,i</sub> en v<sub>i</sub>

Een praktische benaderingsformule voor het zandtransport, wordt afgeleid in fig. 3.5/5. Hierbij houdt men rekening met de specifieke configuratie van de aftaphark op de meetkar. Analoog kan men een integratieformule afleiden voor de aftaphark aan het begin van het bed. Beide aftapharken worden zodanig



fig.3.5/6: Hjulstrom-diagram

Kritische snelheid voor erosie en sedimentatie van een bodemmateriaal met  $d_{50} = 94 \ \mu m$
gepositioneerd, dat de onderste afzuigmond op 1 cm boven de bodem hangt.

De resultaten van de transportberekeningen (op x=4,20m van het begin van het bed) vindt men in onderstaande tabel:

pompstand		and	v	τ	Sz	Ss	Stot
			[m/s]	$[N/m^2]$	[g/s]	[g/s]	[g/s]
	9	4	0,29	0,15	0,03	0,26	0,29
	10		0,34	0,35	0,03	0,05	0,08
	12		0,41	0,45	0,01	0,02	0,03
	13		0,44	0,50	0,10	0,76	0,86
	14		0,50	0,60	0,37	0,95	1,32
	15		0,55	0,75	0,09	4,16	4,25
	16		0,63	0,85	0,42	4,91	5,33

Aanvankelijk is er een blind vertrouwen in de zandvangende werking van de schotten in de retourbak. Doch later worden er, steeds gedetailleerder, ook concentratieprofielen opgemeten aan het begin van het bed. Want niettegenstaande de gemiddelde snelheid vijf maal kleiner is in de retourbak, blijkt uit het Hjulstrom-diagram (zie fig. 3.5/6) dat zulke snelheden nog voldoende zijn om het (fijne) zand in beweging te houden. Dit brengt mee dat er een groot onderscheid dient gemaakt te worden bij het beoordelen van de respectieve concentraties (en transporten) <53 µm en >53 µm.

De fractie <53 µm blijft heel lang in suspensie en stroomt dus steeds weer over het bed. Zelfs al is het na een weekend bezonken, een kleine snelheid is voldoende om het op te woelen. Van de fractie >53 µm bezinkt een deel net voor de overlaat en in de retourbak. Hoeveel er bezinkt kan men niet begroten. Daarenboven weet men niet hoeveel er bij hogere gemiddelde snelheden weer wordt meegenomen.

In het zandtransport als functie van de gemiddelde snelheid zit desondanks een stijgende lijn, hoewel deze veel kleiner is dan die van het slibtransport.

Theoretisch is er een uitweg door enkel het verschil in transport tussen het begin van het bed en bijvoorbeeld op x=4,20 m (tegelijkertijd gemeten) in te rekenen. De resultaten vindt men in onderstaande tabel:

datum	x	v	ΔS <sub>7</sub>		AS.	
	[m]	[m/s]	[g/s]	2 %	[g/s]	5 %
12.10.89	4,20	0,55	+0,04	+62	+0,18	+4
16.10.89	5,20	0,63	+0,23	+124	-0,19	-4
	3,00	0,63	+0,06	+52	-0,74	-15
	6,50	0,63	+0,14	+97	-1,20	-19
18.10.89	1,20	0,61	-0,13	-45	-1,26	-34
	2,20	0,61	+0,03	+16	+1,10	+51
	3,20	0,61	+0,02	+13	-0,02	-1
	4,20	0,61	0	-3	+0,15	+7
	5,20	0,61	+0,05	+36	-0,08	-3
	6,20	0,61	+0,16	+183	-0,09	-1

met x : afstand tot het begin van het bed  $S_z$  : zandtransport [g/s]  $S_s$  : slibtransport [g/s]  $\Delta S_z$  [g/s] =  $S_z(op x) - S_z(op x=0)$   $\Delta S_z$  [%] = 100\* $\Delta S_z$  [g/s] /  $S_z(op x=0)$   $\Delta S_s$  [g/s] =  $S_s(op x) - S_s(op x=0)$  $\Delta S_s$  [%] = 100\* $\Delta S_s$  [g/s] /  $S_s(op x=0)$ 

Bovenstaande tabel bevat tevens de voornaamste resultaten van de poging om de variatie van het transport over het bed te meten (18.10.89). Dit met het oog op een vergelijking met de variatie in de tijd bekomen uit de kleine goot. Uit de extrapolatie van de gegevens zou men theoretisch kunnen afleiden waar het erosiegedrag van het zand-slibmengsel zich ergens situeert tussen het erosiegedrag van zand en dat van slib (zie 1.4 en 1.5). Bij zand treft men namelijk een evenwichtstransport (S) aan en bij slib een constante erosiesnelheid (dS/dt).

Praktisch geven de resultaten een te diffuus beeld. Dit komt omdat er hier met te kleine concentraties, die minder nauwkeurig te meten zijn, gewerkt wordt. Een herhaling van deze proef (zonder een tussentijdse snelheidsprofielmeting en met meer aftapmonden) dringt zich op.



fig.3.6/1

tabel 3.6/1: Concentraties op x=4m van het begin van het zandbed

datum	h		concentraties	[g/1]
	[cm]	profiel 1	profiel 2	gemiddeld
11.08.89	9	0.0305	0.0245	0.028
11.00.05	5	0.0540	0.0563	0.055
x	3	0.0763	0.0775	0.077
	1	0.1501	0.3052	0.228
14.08.89	9	0.0432	0.0255	0.034
1	5	0.1079	0.0636	0.086
	3	0.1881	0.1157	0.152
	1	0.2817	0.1957	0.239
16.08.89	9	0.0915	0.060	0.076
10.00.00	5	0.2278	0.153	0.190
	3	0.3315	0.219	0.275
1.12	1	0.4691	0.303	0.386

### 3.6 Vergelijking met de zandproeven

In dezelfde goot zijn reeds proeven verricht op een zandbodem (door ir. E.T.J.M. van der Velden).

Bij 3 pompstanden worden telkens één snelheidsprofiel en verschillende concentratieprofielen opgemeten.

Uit het snelheidsprofiel haalt men een gemiddelde snelheid en een bodemschuifspanning (op basis van het theoretisch snelheidsprofiel van Prandtl-von Karman). Zie fig.3.6/1.

Het transport wordt berekend uit het snelheidsprofiel en uit het gemiddelde van de 2 concentratieprofielen op x=4m van het begin van het bed (zie tabel 3.6/1). Er wordt verondersteld dat de onderste afzuigmond van de aftaphark aan de meetkar op 1 cm boven de bodem hangt, en men neemt een driehoekig concentratieverloop van de concentratie c<sub>9</sub> (ter hoogte van de bovenste afzuigmond) tot het wateroppervlak aan. Daarom wordt dezelfde benaderingsformule gebruikt als in 3.5, deel C (zie fig. 3.5/5).

Samenvattend geeft dit:

datum	pompstand	v	h	τ	S
		[m/s]	[m]	$[N/m^2]$	[g/s]
11.08.89	10	0.28	0.20	0.67 à 0.85	0.82
14.08.89	11	0.325	0.21	0.50 à 0.85	1.38
16.08.89	13	0.34	0.24	0.23 à 0.55	3.71

Bij de zandproeven valt het op dat, terwijl V en S stijgen,  $\tau$ gevoelig daalt. Wellicht betekent dit dat de ontstane ribbels al aan het afvlakken zijn. Maar of dit inderdaad zo een sterke daling in  $\tau$  kan veroorzaken is twijfelachtig. Als V stijgt en de ruwheid r daalt, dan kan de Chézy-coëfficiënt C zodanig toenemen dat  $\tau$  minder snel stijgt of eventueel constant wordt. We beschikken echter niet over gegevens in verband met de bedvormen.

Vermits er voor beide proeven (zand-slibproeven en zandproeven) gebruik gemaakt wordt van dezelfde opstelling, is het zinvol om het transport uit te zetten in functie van de

fig.3.6/2





gemiddelde snelheid en daaruit dan een kritische snelheid te bepalen (zie fig.3.6/2). Om verschillende opstellingen te vergelijken heeft men kritische schuifspanningen nodig (zie hoofdstuk IV).

Men ziet hier duidelijker, in vergelijking met de proeven in de kleine goot, dat het zand sneller loskomt dan het zandslibmengsel. Indien men dezelfde definitie van kritische snelheid aanneemt als in de kleine goot, vindt men volgende kritische snelheden:

> $V_{krit}^{z+s}=0,43 m/s$  $V_{krit}^{z}=0,21 m/s$

Er dient opgemerkt te worden dat men, voor het vinden van  $V_{krit}^{Z+S}$ , eigenlijk enkel het zandtransport mag uitzetten. Het slib bezinkt immers helemaal niet in de retourbak en de hoeveelheid slib in het water is afhankelijk van de tijd dat er in de grote goot gestroomd wordt.

Indien men dus enkel het zandtransport van de mengselproeven uitzet (zie fig.3.6/2), ziet men dat elke waarde onder de drempelwaarde van 0,5 g/s ligt. Het is normaal dat deze drempelwaarde te hoog ligt, ze geldt immers voor de kleine goot, waar er geen bezinking optreedt en men dus te maken krijgt met veel grotere transporten. Daarom kiest men een kleinere drempelwaarde voor de grote goot, namelijk 0,05 g/s. Dan vindt men voor de kritische snelheid,  $V_{\rm krit}^{\rm z+s}=0,42$  g/s, hetgeen ongeveer gelijk is aan de kritische snelheid bepaald aan de hand van het totaal transport en de drempelwaarde 0,5 g/s.

In ieder geval is het duidelijk dat het slib een vertragende werking van het erosieproces veroorzaakt.

De transporten bij de zandproeven liggen ook bij dezelfde gemiddelde snelheden veel hoger dan de transporten bij het zand-slibmengsel.

Naar de bijhorende schuifspanningen kijken heeft geen zin voor de zandproeven van de grote goot, vermits de schuifspanning daalt met stijgend transport. Als men door lineaire

interpolatie de bijhorende kritische schuifspanning van de mengselproeven berekent, vindt men:

 $\tau_{\rm krit}^{\rm z+s}=0,48 \ {\rm N/m^2}$ 

## <u>3.7 Vragen en antwoorden in verband met de invloed van slib in</u> <u>een sedimentbodem</u>

Men tracht hier een antwoord te geven op dezelfde vragen als in 2.7.

-Hoe verhouden zich de percentages zand en slib in het verloop van de tijd?

Theoretisch zou het zandtransport over het bed constant blijven in de tijd en is het hier dus aangewezen om een variatie over het bed te onderzoeken (afgelegde weg= gemiddelde snelheid\*tijd). Deze proef biedt, gezien de onzekerheden op de transporten (zeker Szand), geen bewijs voor het al of niet licht stijgen van de transporten over het bed, en zeker niet voor het naar een evenwichtswaarde neigen van het zandtransport. Dit is deels te wijten aan de concentratiemeting door dwarsafzuigen (te kleine aftapsnelheden en concentraties die te klein zijn om nauwkeurig opgemeten te kunnen worden), deels aan de proef-opstelling. Het bodemtransport wordt niet in rekening gebracht, en van het zwevend zand keert slechts een (kwantitatief onbekend) deel terug, terwijl het slib steeds in suspensie blijft. Daarenboven moeten we beseffen dat het zand dat de bredere retourbak met schotten "overleeft", zo fijn is dat het dan ook niet bezinkt in de smallere goot. Of het na een periode van stilstaand water terugkeert, is zeer de vraag. Vandaar dat het zandtransport vrij grillig doet, niettegenstaande er ook een stijgende lijn in zit. Deze is echter kleiner dan voor het slib.

-Is er een vertragende werking van het slib en zo ja hoe groot is deze vertraging?

Uit de informatie over de zandproeven in de grote goot blijkt dat het zandtransport veel groter is dan bij de zand-slibproeven. Het zand heeft een kleinere kritische snelheid (0,21 m/s) dan het zand-slibmengsel (0,43 m/s). Het slib brengt dus zeker een vertraging van het transport met zich mee. Er is ongetwijfeld ook een verhindering van de ribbelvorming, op de ontmengde zandribbels na. -In hoeverre wordt de kritische schuifspanning,  $\tau_{\rm krit}$ , beïnvloed door de aanwezigheid van het slib?

Men kan geen waarde voor de kritische schuifspanning van de zandbodem afleiden. De schuifspanning daalt immers bij stijgend transport: de transport-schuifspanning-curve heeft dus helemaal niet de vorm van het erosiemodel dat gebruikt maakt van een kritische schuifspanning (zie 1.5). Het is dus onmogelijk om wat betreft de kritische schuifspaning, een vergelijking te maken tussen zand- en zand-slibproeven.

-Is het transport afhankelijk van de absolute schuifspanningen of van het verschil van de aanwezige schuifspanning en de kritische schuifspanning?

Men kan zien dat pas vanaf pompstand 13 het totaal transport aanschouwelijk wordt, zand-slibproeven met andere de van woorden de drempelwaarde (0,5 g/s) overstijgt (of dat het zandtransport van de mengselproeven > 0,05 g/s). Een kritische snelheid (0,42 m/s) wordt bepaald. Bij deze kritische snelheid hoort een kritische schuifspanning die groter dan nul is (0,48  $N/m^2$ ). Het transport is dus volgens het model van de kritische schuifspanning afhankelijk van het verschil van de aanwezige schuifspanning de kritische schuifspanning (zie en ook fig.4.2/1).

HOOFDSTUK IV: Conclusies van de transportproeven en aanbevelingen voor verder onderzoek

#### 4.1 Vergelijking van de kleine en de grote goot

De kleine goot is een proefopstelling die dient om op een snelle manier inzicht te krijgen in het transportproces van een sedimentmengsel. Zij dient als voorbereiding op het schaalmodel voor de ontgronding onder pijpleidingen (de grote goot),en geeft veeleer een kwalitatief beeld.

Daarom hoeft men zich aan de volgende nadelen niet te storen:

-Men maakt gebruik van een circulerend systeem zonder sedimentatie en van een stroming zonder vrij oppervlak, dit om de proefopstelling zo goedkoop mogelijk te houden. Bij een kleine open goot zouden de wanden te veel verlies veroorzaken en zou men dus een grote, dure pomp nodig hebben.

-De aanstroomsectie voor het bed is slechts 65 cm lang, wat als gevolg heeft dat er zich in het begin van het bed geen logaritmisch snelheidsprofiel ontwikkeld heeft.

Het snelheidsprofiel heeft zich zelfs over het 1 m lange bed nog niet aan de bodemruwheid kunnen aanpassen. Het zand krijgt de kans niet om over dit kort bed een evenwichtstransport aan te nemen.

Dit alles levert een niet natuurlijk erosieproces op, maar laat toch toe kwalitatieve vergelijkingen uit te voeren.

Voor het verkrijgen van kwantitatieve gegevens (bv. Hoe groot is de erosie bij een bepaalde snelheid?) zou de grote goot zorgen. De grotere retourbak en de schotten daarin zouden ervoor moeten zorgen dat het water zonder aanwezigheid van zandkorrels binnenstroomt. De 7 m lange open goot zou aan het zand de mogelijkheid moeten bieden om een evenwichtstransport te bereiken en zou lang genoeg moeten zijn om een logaritmisch snelheidsprofiel op te bouwen.

Wat betreft de retourbak en zijn schotten: deze bleken niet te voldoen aan de eisen. Een aanbeveling voor verder onderzoek is gedetailleerde concentratiemetingen uit te voeren aan het begin van het bed. Een grotere retourbak is in de praktijk niet direct haalbaar.

Of het bed lang genoeg is om een evenwichtstransport voor het zand te bereiken is weinig waarschijnlijk. De proef naar het concentratieverloop kan best eens herhaald worden.

Wat de concentratiemetingen zelf betreft: deze zijn te onnauwkeurig (onder andere een te kleine aftapsnelheid). Ofwel moet een nauwkeuriger manier gezocht worden om metingen te doen, ofwel moet een groter aantal monsters genomen worden die dan statistisch verwerkt kunnen worden. Dit laatste is slechts tot op zekere hoogte praktisch haalbaar.

# <u>4.2 Vergelijking van de transportproeven in de kleine en de</u> grote goot

Voor de transportproeven in de grote goot zou een beter tijdschema moeten gevolgd worden om ook de tijdsinvloed op de gemiddelde snelheid en op de concentraties te kunnen bestuderen.

Nochtans zou men bij de grote goot veeleer de variatie van concentraties en transporten over het bed moeten bestuderen. Bij de kleine goot is het bed daarvoor te kort. Daarenboven dient rekening te worden gehouden met het niet kunnen sedimenteren van het zand: de concentratie blijft stijgen in de tijd. Dat het zand slechts gedeeltelijk terugkeert is voor de grote goot de moeilijkheid bij het bestuderen van de variatie van concentraties over het bed.

Vergelijkt men dan de resultaten van beide goten. Een vergelijkingscriterium is de transport-schuifspanning-curve en meer bepaald de daaruit volgende kritische schuifspanning van het beschouwde zand-slibmengsel. Wat is namelijk de kracht die nodig is om de sedimentdeeltjes los te krijgen uit het bed, voor elk van de goten?

In de kleine goot worden de schuifspanningen bepaald uit het verval, de transporten uit de zogenaamde "knik"-concentraties (na 60 min.). Voor de grote goot echter bepaalt men de schuifspanningen uit de snelheidsprofielen (met alternatieve bodemligging), en de transporten uit de concentraties op x=4.20 m, zonder rekening te houden met de tijdsinvloed.

Het bepalen van de kritische schuifspanning gebeurt als volgt: men zet het totaal transport uit in functie van de gemiddelde snelheid. Voor het transport wordt een drempelwaarde van 0,5 g/s vastgelegd. De transport-snelheid-curve wordt benaderd door een rechte die (ongeveer) gaat door de punten waarvan het transport boven de drempelwaarde ligt. Waar deze rechte nu de snelheidsas snijdt, ligt het kritische punt met transport gelijk aan nul en gemiddelde snelheid gelijk aan de kritische snelheid. Voor deze kritische snelheid kan men door interpolatie uit de  $\tau$ -V-tabel een bijhorende schuifspanning berekenen: de kritische schuifspanning.

Dit levert voor de kleine en de grote goot respectievelijk volgende waarden op:

rkrit<sup>k.g.=0,31 N/m<sup>2</sup>
rkrit<sup>g.g.=0,48 N/m<sup>2</sup>
</sup></sup>

Men kan ook rechtstreeks een transport-schuifspanning-grafiek opstellen (fig.4.2/1), waardoor meteen een visuele vergelijking van de transporten bij zand en bij zand-slib mogelijk is. De omweg via de transport-gemiddelde snelheid-grafiek wordt gemaakt terwille van het grotere vertrouwen in de (gemiddelde) snelheden bij de vergelijking van de zandproeven met de mengselproeven in eenzelfde goot. De S- $\tau$ -curve levert uiteraard dezelfde kritische schuifspanning op als deze afgeleid uit de kritische snelheid. Dit komt omdat men als schuifspanningen die waarden weerhouden heeft die aanleiding geven tot een vloeiende curve in functie van de gemiddelde snelheid.

Merk op dat het transport in de kleine goot voor eenzelfde schuifspanning veel groter is dan in de grote goot. In de kleine goot bezinkt het sediment immers niet en het transport neemt dus al snel een grote waarde aan. Een bijkomende reden is dat er zich in de grote goot veel meer water bevindt. De grootte van het transport is op zichzelf minder belangrijk, maar wel de vorm van de S-7-curve, en dan vooral het knikpunt.



Dit is het punt waar het transport fel gaat stijgen: de kritische schuifspanning,  $\tau_{\rm krit}$ .

Eens te meer dient hier gewezen te worden op het arbitrair karakter van het begrip kritische schuifspanning (zie 1.5).

Wat het antwoord op de vragen over de invloed van het slib betreft, kan men stellen dat de kleine goot erin geslaagd is deze invloed kwalitatief te bepalen.

Het erosiemodel met behulp van een kritische schuifspanning, waarbij het transport afhankelijk van het verschil van aanwezige schuifspanning en kritische schuifspanning wordt verondersteld, komt mooi tot uiting (cfr. fig.4.2/1).

Een groot verschil in kritische snelheid van de zandproeven en de mengselproeven treedt niet op in de kleine goot, maar wel in de grote goot. De kleine goot maakt wel duidelijk dat de ribbelvorming verhinderd wordt door de aanwezigheid van slib in de sedimentbodem (op enkele ontmengde zandribbels na).

Als conclusie van de vergelijking zou men kunnen stellen dat de kleine goot voor een vergelijking tussen verschillende soorten zand-slibmengsels geschikt is. Deze vergelijking zou vooral op kwalitatief gebied goed opgaan: uit de ribbelvorming kan de mate van cohesie afgeleid worden. De kritische snelheden kunnen relatief ten opzichte van elkaar vergeleken worden.

Voor absolute kritische schuifspanningen kan men in de kleine goot rekenen op een absoluut verschil van  $0,2 \text{ N/m}^2$  ten opzichte van de grote goot; dit is een relatief verschil van 40 %. Wil men nauwkeurig de kritische schuifspanning bepalen, dan is de grote goot nuttig mits een aantal aanpassingen door te voeren (zie deel 4.1 en 4.3).

De grote goot is tevens de enige mogelijkheid om ontgronding onder en achter (model)pijpjes te bestuderen. Dit gebeurt in hoofdstuk V.

#### 4.3 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Men kan onderzoeken waarin nu vooral de invloed van het slib schuilt: in de verhoogde cohesie en/of in de verminderde doorlatendheid van het bodemmateriaal. Als suggestie kan men het volgende beschouwen: een proefneming in de kleine goot met een zelfde mengsel als in dit werk gebruikt werd, maar waarbij het kaoliniet vooraf aan een soort bezinkingsproef op grote schaal onderworpen wordt. Als men in een grote, waterdichte container de gepaste hoeveelheden (zie Bijlage 6) kaoliniet en Calgon-peptisator goed mengt met voldoende water, kan men het mengsel de gepaste tijd ongeroerd laten, totdat alle deeltjes met (equivalente) diameter >2µm bezonken zijn. Daarna kan men de suspensie zo snel mogelijk, maar toch rustig, overhevelen. In het bezonken materiaal zal de fractie <2µm, waarvan wordt verondersteld dat ze voor de cohesie zorgt, dan bijna niet meer aanwezig zijn. Eventueel kan men dit proces herhalen op het bezonken materiaal.

De vraag kan natuurlijk worden gesteld of het wegnemen van de fijnste fractie ook niet de doorlatendheid beïnvloedt, en vooral of de peptisator niet a fortiori de cohesie beperkt.

In dit verband past ook een bedenking bij de keuze van de China-clay. Deze klei bestaat hoofdzakelijk uit kaoliniet, dat bij voorbaat al een kleine cohesie heeft (lage CEC-waarde). Daarenboven is het voorbehandeld (met een peptisator) voor gebruik in een porseleinfabriek. De keuze van dit slib omwille van de gemakkelijke menging met zand en omwille van het ontbreken van organisch materiaal en zware metalen, moet wel eens geconfronteerd worden met zijn afwijkingen ten opzichte van natuurlijk slib.

Bij de proeven die moeten herhaald worden, hoort zeker het onderzoek naar de variatie van de transporten over het bed. Zeker hiervoor moeten meer aftappen genomen worden, uit meer afzuigmonden (ook aan het begin van het bed), en in een kortere tijdspanne. Daarnaast moet in het algemeen een strikter tijdschema gevolgd worden.

# HOOFDSTUK V: Ontgronding onder pijpleidingen gelegen op een zand-slibbodem

### 5.1 Inleiding

Deze reeks proeven vormt een aanzet tot de studie van de ontgronding onder pijpleidingen gelegen op een zand-slibbodem. Men beschouwt hier enkel de invloed van een uniforme stroom.

Een modelpijpje wordt in dwarszin in de grote groot aangebracht. Vermits het pijpje aan de bovenkant van de goot hangt (op een instelbare hoogte boven de bodem), kan het zich niet zetten. Een ingravingsproces wordt dus nog niet bestudeerd.

In tegenstelling tot de vorige proeven hebben de bodemprofielmetingen het grootste belang. Men is meer geïnteresseerd in de plaats en de vorm van de ontgrondingskuilen, dan in de ermee gepaard gaande concentraties en transporten.

Ter verduidelijking van (de verwerking van) bepaalde resultaten, is een theoretisch deel (5.2) ingelast. Verder wordt dezelfde indeling gevolgd als bij de transportproeven in de kleine goot en in de grote goot. Achtereenvolgens komen aan bod:

- de proefopstelling (5.3)
- het meetprogramma en de uitvoering van de proeven (5.4)
- de verwerking van de resultaten (5.5) :
  - berekenen van bodemschuifspanningen en gemiddelde snelheden
  - het stromingspatroon rond de pijp
  - de ontgrondingskuilen (bodemprofielen)
- de conclusies (5.6)

LOEFEROSIE



fig.5.2/1: Ontgronding t.g.v. een uniforme stroom

## 5.2 Theoretische aspecten van de stroming rond

## <u>pijpleidingen</u>

Hoewel men hier de studie van de ontgronding onder pijpleidingen beperkt tot de invloed van een uniforme stroom, bestaat er een complex stromingspatroon rond de pijp, dat die ontgronding beheerst.

Om dit stroombeeld te doorgronden, worden achtereenvolgens situaties behandeld waarbij de pijp (A) op de bodem, (B) oneindig ver van de bodem, (C) op eindige afstand van de bodem ligt:

- A.De ontgronding onder pijpleidingen gelegen op een zandbodem en op een slibrijke zandbodem
- B.Het stromingspatroon rond een (hydraulisch gladde) cilinder bij dwarsaanstroming in een oneindige watermassa
- C.Het artikel van Sumer M. et al., "Effect of lee-wake on scour below pipelines in current" ([21])

In deel D worden de punten die van belang zijn voor de verder beschreven proeven samengevat.

## A.De ontgronding onder pijpleidingen gelegen op een zandbodem

- De ontgronding wordt geïnitieerd door loeferosie: een wervel aan de stroomopwaartse zijde van de pijp haalt het zand van onder de pijp (zie fig. 5.2/1).

- In de zo ontstane opening onder de pijp (of in een reeds aanwezige opening wegens onregelmatigheden in het bed) ontstaat een verhoogde snelheid ingevolge contractie van de stroomlijnen (tunneleffect). Dit gaat gepaard met een verhoogde transportcapaciteit . Loef- en tunnelerosie samen zorgen voor een smalle ontgrondingskuil (enkele pijpdiameters breed) met relatief steile wanden (1:2). - De lijerosie veroorzaakt een verbreding van de ontgrondingskuil. Ze is enerzijds te wijten aan de ongestoorde stroom die stroomafwaarts van de pijp het bed weer raakt en anderzijds aan wervels die in het zog van de pijp ontstaan, loslaten en langs het bed schuren. Dit resulteert in een asymmetrische ontgrondingskuil met een diepte van 1 tot 3 maal de pijpdiameter en een relatief flauwe wand (ongeveer 1:16) aan de lijzijde van de pijp.

- Kjeldsen (1974) ontwikkelde een empirische formule voor de uiteindelijke diepte van de ontgrondingskuil in een zandbodem, onder een gefixeerde pijp:

$$y/\phi = 0.972 * \{v^2/2 * q * \phi\}^{0.20}$$

- met y : ontgrondingskuildiepte
  - φ: pijpdiameter
  - v : stroomsnelheid

Deze formule is geldig voor een zandbodem, en dit in een gebied waar de Shieldsparameter ( $\Theta$ ), berekend voor een ongestoorde situatie (zonder pijp) tussen 0.15 en 0.50, ligt.

$$\Theta = \frac{\tau_{\rm b}}{\rho * g * (s-1) * d_{50}}$$

met 0 : Shieldsparameter

- $\tau_{\rm b}$  : bodemschuifspanning
- $\rho$  : dichtheid van water
- $\rho_{\rm S}$  : dichtheid van het korrelmateriaal
- s : relatieve dichtheid van het korrelmateriaal t.o.v. water =  $\rho_s / \rho$
- g : versnelling van de zwaartekracht
- d<sub>50</sub> : karakteristieke korreldiameter

Bijker en Leeuwestein (1984) pasten de formule van Kjeldsen aan door de invloed van de korreldiameter in acht te nemen :

$$y/\varphi = 0.972 * \{ (v^2/2g\varphi)^{0.26} \} * \{ (\varphi/d_{50})^{0.04} \}$$







fig.5.2/3: Drag curve for a cylinder. Data is from Delany and Sorenson (1953). Finn (1953), Roshko (1961), Tritton (1959), and Wieselsberger (1921).

- In werkelijkheid treedt er verder een ingravingsproces op bij niet-gefixeerde pijpleidingen gelegen op een niet-cohesieve zeebodem: na enkele maanden tijd is de pijp onder het zand verdwenen. Bij een slibrijke zandbodem treft men slechts een gedeeltelijke ingraving aan, met relatief steile kuilwanden.

## <u>B.Stromingspatroon rond een (hydraulisch gladde) cilinder</u> <u>bij dwarsaanstroming in een oneindige watermassa</u>

- Bij verwaarlozing van de schuifspanningen is de stroming rond de cilinder een potentiaalstroming (fig.5.2/2). De punten voor en achter de cilinder zijn stuwpunten, waarin de druk hoger is dan elders in de stroming. Daarmee samenhangend treedt aan de voorkant van de cilinder versnelling van de buitenstroming op en aan de achterkant vertraging van de buitenstroming. De grenslaag groeit dus langzaam aan de voorkant maar snel aan de achterkant, waar al gauw loslating optreedt. Achter de cilinder ontstaat een zogstroming. Deze zogvorming is een instabiel verschijnsel. Er ontstaat een wervelstraat van von Karman achter de cilinder, met als gevolg in de tijd variërende drukverdeling achter en dus een sleepkracht (Fd per lopende meter) op de cilinder.

Fig.5.2/3 geeft een beeld van de sleepcoëfficiënt  $C_d=F_d/(0.5*\rho*V^2*D)$  in functie van Re =  $V*D/\vartheta$ .

- Zonder al te ver in dit complex vakgebied te willen dringen, kan de rol van het Re-getal worden aangestipt. Voor de eenvoud beperkt men zich tot (hydraulisch) gladde oppervlakken (zoals de plastic modelpijpjes waarmee in de verdere proeven gewerkt wordt).

Ter illustratie volgt een overzicht van de verschillende stroompatronen rond een gladde cilinder bij verschillende Regetallen (vrij naar Panton, R., "Incompressible flow", [17]).

Het dient gezegd dat de waarde van het Re-getal bij de overgangen niet absoluut is : het zijn empirische waarden en ze zijn beslist niet overdraagbaar naar de stroming rond een cilinder in de buurt van een wand (bijvoorbeeld de bodem). Zeker niet als er een snelheidsprofiel aanwezig is, in plaats van een constante, ongestoorde snelheid V.



**fig.5.2/4**: Flow regimes for a cylinder: (a) Re = 0, symmetrical: (b) 0 < Re < 4: (c) 4 < Re < 40. attached vortices: (d) 40 < Re < 60-100. Kármán vortex street: (e) 60-100 < Re < 200. alternate shedding: (f) 200 < Re < 400, vortices unstable to spanwise bending:



fig.5.2/5: Development of the Kármán vortex street at Re = 105. Photograph courtesy of S. Taneda, Kyushu University, Japan.

Zie fig.5.2/4 :

(b) 0<Re<4 : Bij lage Re-getallen splitst de stroom zich gewoon rond de cilinder en verenigt zich weer aan de lijzijde. Het stroompatroon is des te symmetrischer naarmate Re dichter bij 0 ligt.

(c) 4<Re<40 : De stroom laat los aan de lijzijde en vormt 2 stabiele neren die niet loskomen van de cilinder.

(d) 40<Re<60-100 : Het zog wordt instabiel. Oscillaties in het zog groeien in amplitude en rollen uiteindelijk op in discrete wervels met een zeer regelmatige tussenafstand : een zogenaamde von Karman-wervelstraat. De wervels bewegen naar afwaarts met een snelheid die iets kleiner is dan V. Ze ziin niet turbulent, de stroming rond de cilinder en blijft permanent met 2 aangehechte neren. Als een snelheidsmeter in het zog wordt geplaatst, zou men een regelmatig oscillerend signaal moeten registreren met een cyclus corresponderend aan de afstand tussen 2 wervels van hetzelfde teken. De frequentie f kan men dimensieloos uitdrukken via het zogenaamde Strouhalgetal : St = f\*D/V

Het Strouhal-getal ligt in de buurt van 0,2 voor een groot gebied van Re-getallen. Fig.5.2/5 geeft een beeld van de ontwikkeling van een wervelstraat. De ronddraaiende beweging van de wervels wordt afwaarts gestopt door visceuze krachten.

(e) 60-100<Re<200 : Als het Re-getal toeneemt, komt de wervelstraat dichter bij de cilinder, tot uiteindelijk de aangehechte neren zelf beginnen te oscilleren. Ze geven aanleiding tot het achtereenvolgens vormen en loslaten van wervels. Er heerst nu een niet-permanente stroming rond de cilinder, en de sleepkracht varieert met de vorming van elke wervel ; daarenboven ontstaat er een oscillerende hefkracht wegens de asymmetrie t.o.v. het horizontaal vlak door de as van de cilinder).

(f) 200<Re<400 : De wervels worden onstabiel door krommingen in de axiale richting (over de lengteas van de cilinder). Deze bochten groeien naar afwaarts, en het zog wordt uiteindelijk turbulent. In deze zone van Re-getallen verliest het St-getal zijn regelmatig, goedgedefinieerd karakter.









Vervolg fig.5.2/4: Flow regimes for a cylinder: (continued) (g) 400 < Re, vortices turbulent at birth: (h) Re  $< 3 \times 10^5$ , laminar boundary layer separates at  $80^\circ$ ; (i)  $3 \times 10^5 < \text{Re} < 3 \times 10^6$ , separated region becomes turbulent, reattaches, and separates again at  $120^\circ$ ; (j)  $3 \times 10^6 < \text{Re}$ , turbulent boundary layer begins on front and separates on back. (g) 400<Re : De wervels zelf worden turbulent. Dit geeft hun een ander snelheidsprofiel en herstelt de coherentie in de axiale richting. Daardoor wordt het St-getal weer ca. 0,2.

Voor de grote Re-getallen (behalve voor  $3*10^5 < \text{Re} < 3*10^6$ ) wordt de vorming en het loslaten van de wervels een beetje onregelmatig. Niettemin heeft de tijdsevolutie van de snelheid in een bepaald punt een grote spectrale component in de buurt van St = 0,2. De tijdsgemiddelde C<sub>d</sub>-coëfficiënt daalt naar een waarde 1 bij Re = 100 à 200 en blijft dan relatief constant bij toenemend Re-getal. Dit betekent dat de drukkrachten overheersen, en dat visceuze krachten verwaarloosbaar zijn. Vanaf hier zijn we in de zone van hoge Re-getallen. Visceuze krachten en vorticiteit zijn beperkt tot een grenslaag dichtbij het cilinderoppervlak.

(h)  $\text{Re}<3*10^{5}$ : De laminaire grenslaag laat los aan de voorkant van de cilinder (80°) onder een kleine hoek. De drukken in het zog zijn ongeveer constant, maar veel lager dan de druk in de vrije stroming. Dit veroorzaakt de grote sleepkracht.

(i)  $3*10^{5} < \text{Re} < 3*10^{6}$ : De laminaire grenslaag wordt zelf onstabiel onmiddellijk na het loslaten. Over een zeer kleine afstand wordt ze turbulent en hecht dan weer aan de cilinder. De turbulente grenslaag zelf laat los onder een hoek van 120°. Het netto resultaat is dat de loslaatzone sterk verkleind is, en dat de druk in deze zone bijna weer zo groot is als de druk in de vrije stroming. Bijgevolg treedt er een grote daling van de  $C_d$ -coëfficiënt op.

(j)  $3*10^{6} < \text{Re}$ : De  $C_{d}$ -coëfficiënt neemt weer toe. De grenslaag wordt turbulent aan de voorkant van de cilinder, terwijl ze nog steeds aangehecht is. Loslaten ontstaat een beetje vroeger dan hiervoor en de druk is iets lager. Bijgevolg neemt  $C_{d}$  iets toe.

Loslaten van een grenslaag en overgang naar turbulente stroming zijn zeer gevoelig voor verscheidene factoren: de ruwheid van het oppervlak, de eventueel aanwezige turbulentie in de vrije stroming en het al of niet aanwezig zijn van geluid. Dit impliceert de relativiteit van de Re-waarden bij de overgangen.



fig. 5. 2/6: Organized Lee-Wake Flow with Aggregate of Shed Vortices





# <u>C.Het artikel van Sumer M. et al., "Effect of lee-wake on</u> scour below pipelines in current" ([21])

Het zeer interessante artikel van Sumer M. et al., "Effect of lee-wake on scour below pipelines in current" ([21]) combineert een van de hierboven aangehaalde stromingspatronen (een von Karman-wervelstraat) en de lijzijde-erosie achter een pijpleiding, gelegen op een niet-cohesieve bodem. Het beschrijft experimenteel en numeriek onderzoek in verband met ontgronding onder en achter gefixeerde (model)pijpjes gelegen op een eindige afstand boven een niet-cohesieve bodem. Hun voornaamste resultaten zijn:

1) Het afschuiven van wervels in het zog van een pijpleiding is al in een vroeg stadium van het erosieproces aanwezig. Er ontstaan afwisselend wervels aan de boven- en de onderzijde van de pijp. Ze laten los en verplaatsen zich naar afwaarts.

2) De erosie aan de lijzijde van de pijpleiding wordt duidelijk beheerst door deze wervelstraat. Via visualisering van het stroombeeld (fig.5.2/6) merkt men dat de erosie vooral optreedt wanneer een wervel die aan de onderzijde van de pijp loslaat, langs het bed schuurt, terwijl hij zich naar afwaarts verplaatst. Snelheidsmetingen tonen aan dat de Shieldsparameter op zulke tijdstippen 3 à 4 maal groter kan zijn dan de ongestoorde waarde, dit is de Shieldsparameter bij afwezigheid van de pijp.

3) Een spectrale ontleding van de snelheid in een punt dichtbij het bed geeft een grote component in de buurt van de frequentie overeenkomende met een Strouhal-getal St = f\*D/V =0,2.

4) Zowel voor grote als voor kleine openingen tussen de pijp en het bed is er minder erosie dan bij tussenliggende waarden van de opening (fig.5.2/7). Men beweert dat het een bekend feit is dat het afschuiven van de wervels grotendeels wordt onderdrukt als  $e/D \le 0,2$ .



fig.5.2/8: Moody-diagram

Verder worden in het artikel ook enkele opmerkingen over de invloed van het Re-getal gegeven.

Sumer M. et al. werkten met (subkritische) Re-getallen van 10000 tot 25000. Deze waarden zijn vergelijkbaar met die van de verder beschreven proeven: 12400 tot 31200 (zie 5.5, deel A).

Er wordt op gewezen dat het loslaten van de wervels behouden blijft in en boven het superkritisch gebied. Vandaar dat de invloed ervan op de lijerosie ook waargenomen wordt bij hoge Re-getallen. Het Strouhal-getal verandert wel een beetje bij de overgang naar superkritische regimes, maar dit betekent alleen maar dat het bed afwaarts van de pijp minder (of meer) frequent wordt blootgesteld aan de werking van de zogstroming.

In de praktijk echter is het pijpoppervlak vaak in zo 'n grote mate bedekt met algen en dergelijke, dat het kan beschouwd worden als een volledig ruwe wand  $(k_s/D > 0.003)$ , zodat de invloed van het Re-getal niet alleen kwalitatief, maar ook kwantitatief verwaarloosbaar is (zie Moody-diagram, fig.5.2/8).

## D.Samenvatting van de belangrijkste punten voor de verdere ontgrondingsproeven

- Kjeldsen en Bijker/Leeuwenstein ontwikkelden experimentele formules voor "uiteindelijke" kuildiepten onder pijpleidingen gelegen op een zandbodem. Door het nagaan van de kuilgroei kan men controleren of er bij een zand-slibbodem ook over "uiteindelijke" kuildiepten kan gesproken worden.

- Het dient gezegd dat de waarden van het Re-getal bij de overgangen naar andere stroompatronen rond een gladde cilinder in een "oneindige" watermassa, niet absoluut zijn. Het zijn empirische waarden, die beslist niet overdraagbaar zijn naar de stroming rond een cilinder in de buurt van een wand (de bodem). Zeker niet als er een snelheidsprofiel aanwezig is, in plaats van een constante, ongestoorde snelheid V. - Naast de ontgronding vlak onder en achter een gefixeerd pijpje moet ook aandacht worden geschonken aan kuiltjes meer stroomafwaarts (de werking van de von Karman-wervelstraat). Dus moet men over een voldoend grote zone rond en achter de pijp bodemprofielen opmeten.

- Het is interessant een zo groot mogelijk gebied aan Reynoldsgetallen (Re =  $V*D/\nu$ ) te bestrijken. Dit kan via een variatie van de pijpdiameter en/of van de gemiddelde stroomsnelheid.

De pijpdiameter mag echter niet te groot zijn in vergelijking met de bereikbare waterhoogte in de goot. Hij mag ook niet te klein zijn, opdat de profielvolgers nog merkbare bodemvariaties zouden kunnen registreren.

Om dezelfde reden wordt de gemiddelde stroomsnelheid naar onder begrensd (het zand-slibmengsel erodeert moeilijker dan een zandbed). De gemiddelde snelheid wordt naar boven begrensd door het maximale pompdebiet.

Men doet best ontgrondingsproeven bij verschillende (relatieve) openingen tussen de onderkant van de pijp en de Dit wordt in de verder beschreven proeven in de grote bodem. goot automatisch bereikt. Door de voorgaande transportproeven is het bed namelijk hol in dwarszin. Men hoeft slechts de ontgronding na te gaan op verschillende plaatsen over de dwarsdoorsnede van de goot. Bij de relatief grote en de relatief kleine openingen kan men dan verifiëren of er inderdaad minder erosie te zien is dan voor tussenliggende waarden.

- Het zou interessant zijn met een kleine micropropeller de snelheid in punten, dichtbij de bodem en stroomafwaarts van de pijp, na te gaan in de tijd. Daaruit zou men dan een frequentiespectrum kunnen afleiden, in de hoop een piek aan te treffen overeenkomend met een Strouhal-getal St = f\*D/V = 0,2.



fig.5.3/1: Ophanging van een pijpje



fig.5.3/3: Schakelaar die een betere bepaling van de breedteligging van de pijp mogelijk maakt

## 5.3 Proefopstelling

De opstelling is grotendeels dezelfde als bij de transportproeven in de grote goot. Om de ontgrondingskuilen te kunnen bestuderen, dienen vooral bodemprofielen opgemeten te worden. Dit gebeurt met behulp van profielvolgers (provo's), die centraal op de meetkar opgesteld staan (cfr. 3.2, deel G).

Voor de modelpijpjes zelf (fig.5.3/1) beschikt men over 2 plastic buisjes met respectievelijke diameters: D = 3,1 cm en D = 6 cm. Een buisje kan via 2 schroeven op de zijkant aan 2 "wangen" worden bevestigd. Deze wangen hangen op hun beurt aan 2 klemmen bovenaan de goot. Elk van hen is voorzien van een schroef waarmee men de hoogte van de pijp boven de bodem kan instellen. Dit wordt telkens gedaan bij het begin van een proef, in een nieuwe dwarssectie.

De pijp hangt ongeveer horizontaal. Vermits het bed hol is in dwarszin (tengevolge van de voorafgaande transportproeven), is de opening tussen de onderkant van de pijp en het bed niet constant. Om ook deze parameter in het onderzoek te betrekken, worden (vrij willekeurig) 3 meetraaien vastgelegd, zodat men per tijdstap van het ontgrondingsproces over 3 raaien \* 2 provo's = 6 bodemprofielen beschikt (fig. 5.3/2).



# <u>fig.5.3/2</u>: Positie van de 6 bodemprofielen over de dwarsdoorsnede van de goot

Er dient wel opgemerkt te worden dat provo 1 zich in raai 2 op slechts 4,3 cm van de rand van de goot bevindt. Deze positie valt dus buiten het centrale deel van 35 cm in de dwarsdoorsnede. Bijgevolg zijn de snelheidsprofielen opgemeten met EMS of MP, niet meer maatgevend voor de in deze raai en met deze provo opgetekende bodemprofielen (zie 3.5, deel A).

Om de ligging van de pijp op de bodemprofieltekeningen nauwkeuriger te kunnen bepalen, wordt (later) ook een extra schakelaar op de meetkar aangebracht (fig. 5.3/3).

## 5.4 Meetprogramma en uitvoering van de proeven

De proeven gebeuren bij verschillende pompstanden: 12, 13, 14 en 15 pompslagen. Bij elke pompstand wordt zowel het kleine pijpje (D = 3,1 cm) als het grote pijpje (D = 6 cm) gebruikt, telkens in een nieuwe dwarssectie. Er wordt éénmaal een snelheidsprofiel opgemeten (zonder pijpje in de goot), om een indicatie te hebben van de bodemschuifspanning bij elke pompstand.

Daarna volgt een bodemprofielmeting van de begintoestand : de zogenaamde nulmeting. De echte ontgrondingsproef bestaat erin de pijp aan te brengen, het water gedurende vastgestelde tijden te laten stromen en dan telkens bodemprofielen op te meten (na wegnemen van het pijpje). Meestal wordt volgend tijdschema gebruikt om het stromen te stoppen : na 5, 15, 30 en 60 minuten en vanaf dan om het uur. Soms hangt men na een zestal uur stromen het pijpje dichter bij de bodem en wordt de proef verder gezet.

Na de ontgrondingsproeven wordt ook nog getracht een beeld te krijgen van het stromingspatroon rond het pijpje met D = 3,1cm, met behulp van de MP.

Indien meer informatie over de meetgegevens gewenst is, vindt men die in het deel "Bijlagen" (Bijlage 9: "Meetgegevens van de ontgrondingsproeven in de grote goot").

#### 5.5 Verwerking van de resultaten

## A.Bodemschuifspanningen en gemiddelde snelheden

EMS en de MP opgemeten De met behulp van de snelheidsprofielen worden ingevoerd in een computerprogramma van ir. E.T.J.M. van der Velden (cfr. transportproeven in de kleine goot). Dit programma tracht via alternatieve bodemliggingen Az (-10...0...+10mm) de beste logaritmische rechte aan het onderste deel van het snelheidsprofiel te passen. Daaruit kan men bodemschuifspanningen halen. In onderstaande tabel worden deze weergegeven, samen met de overeenkomstige &z (de beste alternatieve bodemligging) en de gemiddelde snelheid.

pompslagen	V-meter	v	$\tau (\Delta z=0)$	Δz	$\tau (\Delta z)$
		[m/s]	$[N/m^2]$	[ mm ]	$[N/m^2]$
12	EMS	0,40	0,49	-2	0,55
	MP	0,41	0,33	+10	0,15
13	EMS	0,43	0,45	+2	0,40
	MP	0,44	0,47	+3	0,38
14	EMS	0,48	0,44	-18	0,96
	MP	0,45	0,37	+10	0,17
15	EMS	0,52	0,58	-1	0,60
	MP	0,48	0,56	+6	0,37

Door onder andere meest belang te hechten aan de waarden behorende bij een kleine  $\Delta z$ , kan men uit de bovenstaande tabel aannemelijke bodemschuifspanningen en gemiddelde snelheden afleiden.

Deze kunnen worden vergeleken met de bekomen waarden uit de transportproeven in de grote goot. De hier bekomen schuifspanningen zijn iets kleiner dan bij de transportproeven, maar ze zijn eveneens aanvaardbaar.

Met behulp van deze gegevens kan men bepalen welke range van Reynoldsgetallen en van Shieldsparameters wordt bestreken:



fig.5.5/1: Stroombeeld rond de pijp met D = 3,1 cm, bij pompstand 13 (component van de snelheden in de stroomrichting)

V

Re =  $V \star D / \gamma$ 

met

Re : Reynoldsgetal

D: pijpdiameter = 0,031 of 0,06 m V: gemiddelde snelheid = 0,40 à 0,52 m/s  $\gamma$ : 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s

dus

Re = 12400 à 31200

en 
$$\Theta = \frac{\tau_{\rm b}}{\rho * g * (s-1) * d_{50}}$$

met

0 : Shieldsparameter

 $\tau_{\rm b}$  : bodemschuifspanning

 $\rho$ : dichtheid van water = 1000 kg/m<sup>3</sup>

 $\rho_{\rm S}$  : dichtheid van het korrelmateriaal

s : relatieve dichtheid van het korrelmateriaal t.o.v. water =  $\rho_s/\rho$  = 2,65

g : versnelling van de zwaartekracht = 9,81 m/s<sup>2</sup> d<sub>50</sub> : karakteristieke korreldiameter = 94  $\mu$ m

dus  $\theta = 0,10 \ a \ 0,65$ 

Wat de Shieldsparameter betreft komt deze range praktisch overeen met het gebied waarin de Kjeldsen-fomule voor de "uiteindelijke" kuildiepte (in een zandbodem!) geldig is.

### B.Stromingspatroon rond de pijp

De x-componenten van de snelheid (dit is in de stromingszin) in de buurt van de pijp met D = 3,1 cm worden opgemeten met behulp van de MP (met diameter 3 cm). (Het ware natuurlijk beter deze proef uit te voeren op de pijp met D = 6 cm.) De resultaten zijn te zien op fig.5.5/1.


Merk op dat in het zog van de pijp negatieve x-componenten worden opgemeten. Voor de snelheden in die punten moet men wel voorbehoud maken : de opgemeten (negatieve) pulsaties vallen buiten het geldigheidsgebied van de ijkformules. Desondanks worden deze pulsaties in de "terug"-ijkformule (v=0,0196 + 0,00907\*pulsatie, met pulsatie>116 Hz) ingevoerd. De bekomen snelheden staan vermeld tussen haakjes.

Spijtig genoeg is er geen MP met een kleinere diameter ter beschikking. Men kan dus niet de snelheid in een punt dicht bij de bodem in de tijd registreren. Het is dus ook niet mogelijk na te gaan of er inderdaad een grote spectrale component met frequentie f = St\*V/D = 0,2\*V/0,031 aanwezig is.

Daarnaast worden ook volledige snelheidsprofielen opgemeten 50 cm vóór de pijp, bovenop de pijp en 60 cm achter de pijp (fig.5.5/2).

De contractie van de stroomlijnen bovenop de pijp is duidelijk te zien. Als men de debieten per breedte-eenheid uitrekent, levert dit :

Hieruit blijkt dat slechts 1% van het debiet onder de pijp door gaat. Aan de absolute waarde van dit getal hoeft men, rekening houdend met de integratiefouten (cfr.  $q_{na} < q_{voor}!$ ), geen belang te hechten.

De tekening leert ook dat het oorspronkelijk snelheidsprofiel zich niet heeft kunnen herstellen van het ladingsverlies ten gevolge van de aanwezige pijp. Er dient wel opgemerkt dat beter aan een grotere hoogte wordt gestroomd, zeker bij de pijp met D = 6 cm, om het ladingsverlies relatief kleiner te maken.





fig.5.5/4: Vervolg bodemprofielen van raai 1/provo 2 in het zand-slibbed, bij pompstand 15 en D = 3.1 cm

# C.Ontgrondingskuilen

Dit deel beschrijft hoe de bodemprofielmetingen worden vertaald in grafieken, hoe de pijpligging op de grafieken wordt bepaald en hoe men uit deze tekeningen de ligging en de groei van de kuiltjes afleidt en in een tabel samenvat.

- Men beschikt over 6 bodemprofielen (verspreid over de dwarssectie) per tijdstap. De verwerking van de met behulp van het sample-programma opgenomen provo-signalen is echter vrij omslachtig (vertalen in binaire code, in ASCII-code, verwerken met Symphony).

Het opmeten van een ongeveer 1m-lange meetsectie rond de kuil vlak onder de pijp gebeurt veeleer om een indicatie te krijgen de gemiddelde bodemdaling. Een gedetailleerd beeld van verkrijgt men door er met het Symphony-pakket een beperkte zone rond de pijp uit te lichten (fig.5.5/3 en 5.5/4). Per raai en per provo kan men deze grafieken dan voor de verschillende tijdstappen op een figuur samenbrengen. Wegens het verspringen van de provo-signalen is men vaak genoodzaakt een signaal van een bepaalde tijdstap integraal naar boven of naar onder te De waarde van deze verschuiving haalt men uit het verschuiven. gemiddelde bodemligging van het verschil van de nietgecorrigeerde signaal met de gemiddelde bodemligging van een vroegere tijdstap (vóór het verspringen). De invloed van de kuilgroei op de gemiddelde bodemligging wordt verwaarloosd.

tabel 5.5/1: Relatieve openingen e/D tussen de pijp en het bed

12  slagen/D = 3.1	cm:
raai 1/provo	1: $e/D =$
raai 1/provo	2: $e/D =$
12  slagen/D = 6  c	m :
raai 1/provo	1: $e/D = 0.05$
raai 1/provo	2: $e/D =$
13 slagen/D = 3.1	cm:
raai 1/provo	1: $e/D = 0.09$
raai 1/provo	2: $e/D =$
13 slagen/D = 6 c	m :
raai 1/provo	1: $e/D = 0.12$
raai 1/provo	2: $e/D = 0.15$
14 slagen/D = $3.1$	cm:
raai 1/provo	1: $e/D = 0.15$
raai 1/provo	2: $e/D = 0.10$
raai 2/provo	1: $e/D = 0.08$
raai 2/provo	2: $e/D = 0.19$
raai 3/provo	1: $e/D = 0.14$
raai 3/provo	2: $e/D = 0.05$
14 slagen/D = 6 cm:	
raai 1/provo	1: $e/D = 0.07$
raai 1/provo	2: $e/D = 0.09$
raai 2/provo	1: $e/D = 0.07$
raai 2/provo	2: $e/D = 0.16$
raai 3/provo	1: $e/D = 0.08$
raai 3/provo	2: $e/D = 0.09$
15  slagen/D = 3.1	cm:
raai 1/provo	1: $e/D = 0.25$
raai 1/provo	2: $e/D = 0.33$
raai 2/provo	1: $e/D = 0.22$
raai 2/provo	2: $e/D = 0.48$
raai 3/provo	1: $e/D = 0.23$
raai 3/provo	2: $e/D = 0.32$
15  slagen/D = 6  cm:	
raai 1/provo	1: $e/D = 0.07$
raai 1/provo	2: $e/D = 0.13$
raai 2/provo	1: $e/D = 0.07$
raai 2/provo	2: $e/D = 0.21$
raai 3/provo	1: $e/D = 0.07$
raai 3/provo	2: $e/D = 0.12$

- Een ander probleem is de ligging van de pijp op de bodemprofieltekeningen, zowel in de hoogte als in de breedte.

De hoogteligging wordt meestal als volgt bepaald. Door de provo's op de pijp te zetten kan men een provosignaal aflezen, dat dan met behulp van de ijkformules (zie 3.2, deel G) wordt omgezet in een hoogte. Door van deze hoogte 3,1 of 6 cm af te trekken, heeft men een waarde voor de onderkant van de pijp. Daaruit verkrijgt men een waarde, e, voor de hoogte boven de bodem van de onderkant van de pijp: men maakt daarvoor het verschil met de gemiddelde bodemligging van de nulmeting (bodemprofiel in het begin). Dus heeft men voor een pijpje bij elke pompstand 6 e-waarden: één per combinatie van een raai (1, 2 of 3) en een provo (1 of 2). Zie tabel 5.5/1.

- Een groter probleem is de breedteligging van de pijp op de grafieken.

De meetsectie wordt afgebakend met 2 plastic drempeltjes op 1 m afstand van elkaar. Hoewel de pijp in realiteit in het midden tussen de twee plastic drempeltjes hangt, ligt ze op de tekening niet zomaar op "horizontale afstand" = 50 cm. Dit is te wijten aan de vorm van de drempeltjes in combinatie met het type schakelaar.

Uit een beschouwing van de eigenheden van de opstelling kan men als breedteligging van de pijp afleiden: "horizontale afstand" = 51 à 52 cm.

Naar het einde toe van deze reeks proeven wordt een extra schakelaar op de meetkar aangebracht, om de breedteligging van de pijp nauwkeuriger te kunnen bepalen. Op basis hiervan vindt men veeleer: "horizontale afstand" = 50 à 51 cm.

Voor de eenvoud van de onderlinge vergelijking veronderstelt men op elke tekening dat de as van de pijp zich op "horizontale afstand" = 51 cm bevindt.

- Aan de hand van deze breedteligging kan men nu de vele kuiltjes die zich onder en achter de pijp ontwikkelen, karakteriseren door een nieuwe x-coordinaat, met als nulpunt de pijpas en wijzend in de stroomrichting (fig.5.5/5).



<u>gemiddeld bed nulmeting</u> bed op t = 0 <u>bed op t = 6 uur</u>

fig.5.5/5: Ligging en grootte van de kuiltjes t.o.v. de pijp

Om de kuilgroei aan te geven, beschikt men over bodemprofieltekeningen bij verschillende tijdstappen. Hieruit worden per kuil 3 karakteristieke waarden afgeleid (zie fig. 5.5/5):

Uit het bodemprofiel bij het begin (de "nulmeting") haalt men de verticale afstand tussen de onderkant van de pijp en het diepste punt - men begint namelijk niet te stromen met een vlak bed - in het bed ter hoogte van de beschouwde kuil: y(0).

Hetzelfde kan men doen voor het bodemprofiel na t = 6 uur: y(6u).

Het verschil tussen deze 2 karakteristieke waarden wordt de ontgrondingskuildiepte genoemd:  $k_d = y(6u) - y(0)$ .

Om een onderlinge vergelijking tussen de pijpjes met D = 3,1en D = 6 cm te vergemakkelijken, worden de ligging van de kuiltjes (ten opzichte van de pijp), x, en de opening tussen de pijp en het gemiddelde bodemniveau bij het begin, e, uitgedrukt in verhouding tot de diameter van de beschouwde pijp : x/D en e/D.

In Bijlage 5 ("Samenvattende tabel met plaats en grootte van de ontgrondingskuilen") vindt men de kuilkarakteristieken als functie van het aantal pompslagen (gemiddelde snelheid) en van e/D (dit wil zeggen een raai met bijhorende provo, zie tabel 5.5/1). Voor elk kuiltje worden x/D, y(0), y(6u) en  $k_d$ weergegeven.

Het belang van deze tabellen voor het hiernavolgend deel "5.6 Conclusies" moet onderstreept worden.

86



BODEMHOOGLE (CM)

#### 5.6 Conclusies

Aan de hand van de verwerkte resultaten kunnen nu o.a. volgende vragen worden beantwoord:

- Waar ten opzichte van de pijp situeert zich de ontgronding? (deel A)
- Waaraan is de ontgronding te wijten? (deel B)
- Stopt de ontgronding na verloop van tijd? (deel C)
- Wat zijn de verschillen met de resultaten van dezelfde proeven uitgevoerd op een zandbodem? (deel D)
- In hoeverre is de lijerosie onder invloed van een wervelstraat in overeenstemming met de resultaten van Sumer M. et al. ([21])? (deel E)

A.Situering van de ontgrondingskuilen ten opzichte van de pijp

Uit de tabellen in bijlage 5, blijkt dat men onderscheid moet maken tussen enerzijds ontgronding onder en vlak achter de pijp, en anderzijds secundaire kuiltjes stroomafwaarts van de pijp.

De grootste ontgronding situeert zich in een zone met -0,50< x/D < 0,90. Onder de stroomopwaartse helft van de pijp is er relatief minder erosie, behalve bij lagere snelheden (12 en 13 pompslagen). Onder de stroomafwaartse helft van de pijp treedt meestal de grootste erosie ( $k_d$ ) op, evenals de grootste diepten (uitgedrukt door middel van de afstand tot de onderkant van de pijp, y(6u)).

Vaak ontstaan er 2 kuiltjes aan "kiemkuiltjes" aanwezig in het niet-vlakke bodemprofiel bij het begin. De diepste punten van de kuiltjes verplaatsen zich meestal een beetje (naar afwaarts), maar gaan uiteindelijk toch één ontgrondingskuil vormen (dikwijls met 2 minima). Zie fig.5.6/1.

Naast deze grotere kuil treft men ook nog meerdere secundaire kuiltjes aan, zelfs tot 4 pijpdiameters stroomafwaarts van de pijp. Als men de 2 pijpjes, bij éénzelfde gemiddelde snelheid V (en gemiddelde bodemschuifspanning  $\tau$ ) vergelijkt, valt onmiddellijk op dat de afstand (uitgedrukt door middel van x/D) tussen de kuiltjes bij het pijpje met D = 3,1 cm groter is dan bij dat met D = 6 cm.

De reële tussenafstand (uitgedrukt door middel van x) is ongeveer gelijk.

Daarnaast zijn de kuilen gemiddeld iets breder en dieper bij het pijpje met D = 6 cm, zowel bij een gelijke e/D, als bij een gelijke e.

Blijkbaar ontstaan er bij de grootste pijpdiameter relatief grotere en/of sterkere wervels, hoewel ze minder frequent langs het bed schuren. Want een verdubbeling van de pijpdiameter (bij gelijke V) levert een verdubbeling van het Re-getal (Re=V\*D/ $\nu$ ) en een halvering van de frequentie waarmee de wervels de pijp loslaten (f = St\*V/D = 0,2\*V/D) op.

## B.Oorzaken van de ontgronding

- Als we loeferosie definiëren als kuilvorming met x/D < -0,50, blijkt uit de tabellen in bijlage 5, dat deze verwaarloosbaar is.

De initiërende werking van een stroomopwaartse wervel (zie 5.2, deel A) is hier afwezig. Dit is trouwens overbodig omdat er al van bij het begin van een ontgrondingsproef een opening tussen de gefixeerde pijp en de bodem aanwezig is.

- De grootste ontgronding onder en vlak achter de pijp is gedeeltelijk te wijten aan het tunneleffect (contractie van de stroomlijnen), maar ook aan het vormen en loslaten van wervels aan de onderkant van de pijp.



afstand diepste punt-onderkant pijp(cm)

- Lijerosie, waar de ongestoorde stroom het bed raakt, is vermoedelijk niet erg belangrijk, omdat de gefixeerde pijp op een zekere hoogte boven de bodem hangt. Uit het opgemeten stroombeeld rond het pijpje met D = 3,1 cm (fig.5.5/1) blijkt dat pas na x/D = 2 de snelheid ter hoogte van de pijpas weer positief wordt. Dus zal het raken van het bed door de ongestoorde stroom zeker verder dan x/D = 2 plaatsvinden: bijvoorbeeld op x/D = 3. Omdat er echter meerdere kuiltjes worden aangetroffen, dit wil zeggen niet alleen rond x/D = 3, wijst dit op de aanwezigheid van wervels in de zogstroming (een von Karman-wervelstraat), die regelmatig langs het bed schuren.

# C.Het probleem van de "evenwichtskuil"

Uit de verschillende bodemprofielen in bijlage 9 blijkt dat er geen universele kuilvorm bestaat (niettegenstaande de kuil onder de pijp vaak 2 minima heeft). De vraag moeten we echter anders opvatten : blijft een bepaalde kuil steeds groeien, of kan men, zoals bij ontgrondingsproeven op een zandbodem, spreken van "uiteindelijke kuildiepten" (cfr. formules van Kjeldsen en van Bijker/Leeuwestein, zie 5.2, deel A) ?

Beschouwt men bijvoorbeeld de proef bij 14 pompslagen en D = 6 cm met e/D = 0,07 (dit is raai 1/ provo 1), waarbij 8 uur lang wordt gestroomd. In het begin ziet men een grote toename van de kuildiepte (fig.5.6/2), hoewel die geleidelijk aan trager groeit. Maar zelfs na 8 uur is er nog erosie.

Na deze reeks proeven is men in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica aan een herhaling van de ontgrondingsproeven begonnen. Zo heeft ir. E.T.J.M. van der Velden bij 12 pompslagen en D = 6 cm gedurende 16 uur laten stromen. Zelfs na 16 uur neemt de kuildiepte nog toe.

Dit is gedeeltelijk te begrijpen uit het stochastisch karakter van erosie (zie 1.5). Als door een turbulente fluctuatie de snelheid ergens groter wordt dan de kritische snelheid (als die dan al scherp afgelijnd bestaat), kan bodemmateriaal worden losgerukt. Vandaar dat we het bestaan van een "evenwichtskuil" in twijfel trekken. In essentie treft men hier hetzelfde probleem aan als bij de transportproeven: "Bestaat er een kritische bodemschuifspanning voor een (niet-homogeen) bodemmateriaal?". Want men kan het probleem van de evenwichtskuil als volgt vertalen: "Evolueren ontgrondingskuilen naar vormen waarbij op elk punt van het kuiloppervlak geldt dat  $\tau < \tau_{\rm krit}$ ?".

Theoretisch kan men geen  $\tau_{krit}$  definiëren (zeker niet voor een niet-homogeen bodemmateriaal) en kunnen dus ook geen "uiteindelijke" kuildiepten worden vastgelegd.

Praktisch zijn ingenieurs genoodzaakt richtwaarden af te leiden, zowel voor  $\tau_{\rm krit}$  als voor de kuildiepten. Hierbij worden dan impliciete en arbitraire criteria gehanteerd, respectievelijk voor het begin van sedimenttransport en voor het stoppen van de kuilgroei.

Vaak wordt deze willekeur verstopt achter een wiskundige techniek (bijvoorbeeld een asymptotisch concept) om waarden voor  $\tau_{krit}$  of voor uiteindelijke kuilafmetingen af te leiden uit experimentele gegevens.

In dit verband dient in de discussie rond "Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist?" ([6]) een bijdrage van Blaidell F. te worden vermeld. Hij belicht het belang van het probleem voor de lokale erosie (aan de uitlaat van een cantilever-pijp) in een zandbodem. Blaidell beweert een procedure ontwikkeld te hebben om ondubbelzinnig de asymptotische, maximale kuilafmetingen te bepalen. Ons inziens heeft hij de willekeur gewoon verschoven naar de keuze van de wiskundige procedure.

# D. Vergelijking met de zandproeven

In dit deel wordt een veeleer kwalitatieve vergelijking gemaakt met de resultaten van ontgrondingsproeven in dezelfde opstelling, maar met een zandbodem (proeven uitgevoerd door ir. E.T.J.M. van der Velden).



HORIZONTALE AFSTAND (CM)

<u>fig.5.6/3</u>: Bodemprofielen in een zandbed na 10 en na 390 min., bij pompstand 13 en D=3,1 cm (proeven uitgevoerd door ir.E.T.J.M. van der Velden)



fig.5.6/4: Bodemprofielen van raai 1/provo 1 (e/D = 0.07)
in het zand-slibbed na 0, 5, 15, 30, 60, 120, 180,
240, 300, 360, 420 en 480 min., bij pompstand 14 en
D = 6 cm

In fig.5.6/3 vindt men 2 bodemprofielen van de zandproeven: één na 10 minuten stromen en één na 390 minuten. De diameter van het gebruikte pijpje is D=3,1 cm. De gemiddelde stroomsnelheid bedraagt 0,24 m/s en de (ongestoorde) bodemschuifspanning  $\tau$  is 0,17 N/m<sup>2</sup>. De ligging van de pijp op de grafiek is niet bekend.

In een aparte figuur 5.6/4 zijn bodemprofielen weergegeven van de zand-slibproeven. Bij deze ontgrondingsproeven is de ligging van de pijp op de grafiek wel bekend. Vermits er bij de zand-slibproeven gestroomd is aan andere (gemiddelde snelheden en) bodemschuifspanningen, en omdat eerder een kwalitatieve vergelijking beoogd wordt, zijn de bodemprofielen van de zand-slibproeven niet getekend op dezelfde grafiek en op dezelfde schaal als de bodemprofielen van de zandproeven.

Fig.5.6/4 geeft de bodemprofielen weer voor het pijpje met diameter D=6 cm, bij pompstand 14. Dit komt overeen met een gemiddelde snelheid V=0,46 m/s en een bodemschuifspanning  $\tau$ =0,40 N/m<sup>2</sup>. De bodemprofielen zijn opgemeten respectievelijk na 0, 5, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 360, 420 en 480 minuten stromen.

Uit een vergelijking van fig. 5.6/3 en fig. 5.6/4, rekening houdend met de verschillende schalen, kan men volgende besluiten trekken.

De kuilen in de zandbodem groeien vlugger dan in de zandslibbodem. Vergelijk bijvoorbeeld de ontgronding onder de pijp na respectievelijk 10 en 15 minuten stromen.

Ook bij de zandproeven neemt de kuilgroei af in de tijd, zonder dat de ontgronding echt stopt. Het stochastisch karakter van sedimenttransport is er evenzeer op van toepassing.

De "uiteindelijke" kuilafmetingen (diepte en breedte) zijn groter in de zandbodem.

91







HORIZONTALE AFSTAND (CM)

<u>fig.5.6/6</u>: Vergelijking van de ontgronding in het zand-slibbed bij verschillende e/D-waarden, na 4 uur stromen aan 15 pompslagen en D = 3.1 cm

Typisch voor de zandproeven is de berm die vlak achter de pijp wordt opgebouwd. Het beeld van de ontgronding wordt echter na korte tijd verstoord door ribbels, die zelfs door de kuil trekken. Zo zijn reeds na 10 minuten ribbels merkbaar op de zandbodem. Dit verklaart ook gedeeltelijk waarom de invloed van de wervelstraat op de lijerosie niet opvalt bij de zandproeven.

# E.Vergelijking met de proeven van Sumer M. et al.

(cfr. [21] en 5.2, deel C)

- De lijerosie aan de lijzijde van de pijp wordt ook hier grotendeels beheerst door de von Karman-wervelstraat.

- In het artikel van Sumer M. et al. ([21]) wordt beweerd dat men een verminderde erosie kan waarnemen voor grote en kleine waarden van de relatieve opening tussen pijp en bodem e/D, bij een constante gemiddelde snelheid (of Shields-parameter). Tevens zou het een bekend feit zijn dat de erosie onder invloed van een wervelstraat onderdrukt wordt voor e/D-waarden kleiner dan 0,2.

Aan de hand van de tabellen in bijlage 5 wordt achtereenvolgens nagegaan of er ook voor de lijerosie bij de de zandslibproeven een bovengrens en een ondergrens bestaan voor de opening tussen de pijp en het bed, uitgedrukt in termen van e/D.



# HORIZONTALE AFSTAND

<u>fig.5.6/7</u>: Vergelijking van de ontgronding in het zand-slibbed bij verschillende e/D-waarden, na 6 uur stromen aan 14 pompslagen en D = 3.1 cm

Bij 15 pompslagen en D = 3,1 cm hebben we de volgende waarden voor e/D: 0,22 , 0,23 , 0,25 , 0,32 , 0,33 en 0,48 (namelijk één e/D-waarde per combinatie van een raai en een provo, zie tabel 5.5/1). De relatieve opening tussen pijp en bed van 0,48 (dit is raai 2/provo 2) is tevens de grootste e/D-waarde die voorkomt bij deze ontgrondingsproeven. Hoewel men alleen over bodemprofielen beschikt horende bij de tijdstappen 2, 3 en 4 uur (zie fig. 5.6/5), is duidelijk veel minder erosie te zien dan bij de kleinere e/D-waarden (zie fig.5.6/6). Ook nadat men de pijp laat zakken tot e/D = 0,36 (overeenkomend met de tijdstappen 5, 6 en 7 uur, zie fig. 5.6/5), neemt de erosie nauwelijks toe. Hieruit blijkt dat bij deze V = 0,51 m/s en  $\tau = 0,53 \text{ N/m}^2$ , e/D = 0,36 een soort bovengrens is voor erosie. De kleinste waarde voor e/D bij deze pompstand en dit pijpje, e/D = 0.22, blijkt nog boven de ondergrens te zitten (zie fig. 5.6/6).

Als mogelijke illustratie van een ondergrens kan men de reeks proeven bij 14 pompslagen en D = 3,1 cm beschouwen. Deze reeks heeft e/D-waarden van 0,05 tot 0,19 (zie tabel 5.5/1). De waarde 0,05 is tevens de kleinste die voorkomt bij deze ontgrondingsproeven. Men vindt bij e/D=0,05 inderdaad minder diepe kuilen dan bij e/D = 0,10 en 0,08 (zie fig. 5.6/7), maar de echte ondergrens moet nog lager zitten. Wat Sumer M. et al. een bekend feit noemen, namelijk de onderdrukking van de lijerosie onder invloed van de wervelstraat voor e/D-waarden kleiner dan 0.2, wordt dus niet bevestigd. Anderzijds wordt hier wel weer het verschijnsel van de bovengrens waargenomen. De erosie neemt af als e/D varieert van 0,10 tot 0,19. De bovengrens ligt bij deze V = 0,47 m/s en  $\tau$  = 0,43 N/m<sup>2</sup> iets boven e/D = 0,19.

# HOOFDSTUK VI: Conclusies van de ontgrondingsproeven en aanbevelingen voor verder onderzoek

# 6.1 Conclusies van de ontgrondingsproeven

- Bij de ontgrondingsproeven in hoofdstuk V wordt gewerkt met gefixeerde pijpjes op een instelbare hoogte boven het bed: ze kunnen zich dus niet zetten. Met andere woorden, het echte ingravingsproces wordt nog niet bestudeerd.

- Men moet onderscheid maken tussen enerzijds ontgronding onder en vlak achter de pijp, en anderzijds secundaire kuiltjes stroomafwaarts van de pijp.

### Ontgronding onder en vlak achter de pijp:

De grootste ontgrondingskuil bevindt zich onder de stroomafwaartse helft van de pijp. Ze is niet alleen te wijten aan het tunneleffect (contractie van de stroomlijnen), maar ook aan het vormen en loslaten van wervels aan de onderkant van de pijp.

Deze kuil bestaat vaak uit 2 deelkuiltjes met een berm er tussenin.

In het begin ziet men een grote toename van de kuildiepte, hoewel de kuil geleidelijk aan trager groeit. Omwille van stochastisch karakter van sedimenttransport zal de het ontgronding theoretisch nooit echt stoppen: een turbulente snelheid kan voldoende zijn de OM fluctuatie van bodemmateriaal in beweging te brengen. Praktisch is een ingenieur genoodzaakt richtwaarden voor de kuilafmetingen vast te leggen. Hierbij stuit hij op hetzelfde probleem als bij het bepalen van een kritische bodemschuifspanning voor iedere onderzoeker hanteert eigen bodemmateriaal; een (impliciete) arbitraire criteria respectievelijk om het stoppen van de kuilgroei of het begin van beweging van sedimenttransport te bepalen. Vaak wordt deze willekeur verstopt achter een wiskundige procedure.

## Secundaire kuiltjes stroomafwaarts van de pijp

Zelfs tot 4 pijpdiameters stroomafwaarts van de kuil worden secundaire kuiltjes aangetroffen.

Ze zijn een gevolg van een instabiliteitsverschijnsel in de zogstroming van de pijp: een von Karman-wervelstraat. Deze wervels schuren regelmatig langs het bed en diepen de kuiltjes uit.

Sumer M. et al. beschrijven analoge proeven met gefixeerde pijpjes boven een zandbodem ([21]).

Zij nemen een verminderde lijerosie onder invloed van de wervelstraat waar, zowel voor relatief grote als voor relatief kleine openingen tussen de onderkant van de pijp en de bodem. In de in hoofdstuk V beschreven ontgrondingsproeven wordt inderdaad een verminderde erosie waargenomen voor relatief grote openingen tussen de pijp en de bodem, maar echter niet voor relatief kleine openingen.

Sumer M. et al. beweren ook dat het een bekend feit is dat de lijerosie onder invloed van een wervelstraat onderdrukt wordt voor openingen tussen de pijp en de bodem die kleiner zijn dan 20 % van de pijpdiameter. Deze stelling wordt evenmin bevestigd door de ontgrondingsproeven uit hoofdstuk V.

- Een veeleer kwalitatieve vergelijking met analoge proeven op een zandbodem leert dat de kuilen in een zandbodem veel Ook bij de zandproeven neemt de kuilgroei af vlugger groeien. de tijd, zonder dat de ontgronding echt stopt. in De "uiteindelijke" kuilafmetingen zijn groter dan in een zand-Typisch is ook de berm die vlak achter de pijp slibbodem. wordt opgebouwd. Het beeld van de ontgronding wordt echter na korte tijd verstoord door het voorbijtrekken van ribbels (zelfs Dit verklaart ook gedeeltelijk waarom de door de kuil). invloed van de wervelstraat op de lijerosie niet opvalt bij de zandproeven.

zonder platform

met platform



<u>fig.6.2/1</u>: Hoogteligging van de pijp bepaald m.b.v. een provo : met en zonder een platformpje om de top van de pijp te materialiseren

1.0

## 6.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek

-Om het verspringen van de provo's te minimaliseren, kan men ze zoveel mogelijk laten aanstaan. Daarnaast is het zinvol om ergens een vast ijkplatformpje aan te brengen.

-Ook de pijpligging zou met meer zekerheid moeten gekend zijn, wat nog eens een kritische doorlichting vergt van de opstelling van de extra schakelaar ten opzichte van de provo's en van de verwerking van zijn signaal met behulp van het sample-programma en de andere verwerkingsprogramma's. Ook de plaats en de vorm van de plastic drempeltjes moet nog eens in vraag worden gesteld. Tevens kan men de top van de pijp materialiseren met behulp van een platformpje (fig. 6.2/1).

-Daarnaast is het interessant met een kleinere MP de snelheid tegen het bed te registreren in de tijd op verschillende plaatsen stroomafwaarts van de pijp. Daaruit zou men dan een frequentiespectrum kunnen afleiden, in de hoop een piek te vinden overeenkomend met een Strouhal-getal St=0,2.

- [1] Ariathurai, R., en Arulanandan, K., Erosion rates of cohesive soils, Journal of the hydraulic division, ASCE, Vol. 104, No. HY2, (febr. 1978), blz. 279-283.
- [ 2] Berlamont, J., Hydraulica, Wouters-Leuven.
- [ 3] Berlamont, J., Theorie van de verhanglijnen, Wouters-Leuven.
- [ 4] Berlamont, J., Waterwegen, Wouters-Leuven, (1981).
- [ 5] Berlamont, J., Rioleringen, ACCO-Leuven, (1987).
- [6] Blaisdell,F.W., Discussion on "Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist ?" (maart 1987), Journal of hydraulic engineering,(aug.1988),blz.960-961.

Lavelle,J.W., en Mofjeld,H.O., Closure of the discussion on "Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist ?", Journal of hydraulic engineering,(aug.1988), blz.962-963.

- [7] Booij,R., Turbulentie in de waterloopkunde, T.U. Delft, Faculteit der civiele techniek, Delft, (apr.1989).
- [8] Bosman, J.J., van der Velden, E.T.J.M., en Hulsbergen, C.H., Sediment concentration measurement by transverse suction, Coastal engineering, 11, Elsevier science publishers B.V., Amsterdam, (1987), blz.353-370.
- [ 9] Coens, J., en Torfs, H., Erosiegedrag van zand-slibmengsels onder invloed van stroming, Eindwerk K.U.Leuven, Departement burgerlijke bouwkunde, (1989).
- [10] Hjemfelt, A.T., en Lenau, C.W., Nonequilibrium transport of suspended sediment, Journal of the hydraulics division, ASCE, No. HY7, (juli 1970), blz.1567-1586.
- [11] Kamphuis, J.W., en Hall, K.R., Cohesive material erosion by unidirectional current, Journal of hydraulic engineering, Vol.109, No.1, (jan.1983), blz.49-61.
- [12] Kusuda, T., en Umita, T., Erosional process of fine cohesive sediments, Memoirs of the faculty of engineering, Kyushu university, Vol.42, No.4, (dec.1982).

- [13] Lavelle, J.W., en Mofjeld, H.O., Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist ?, Journal of hydraulic engineering, Vol.113, No.3, (maart 1987), blz.370-385.
- [14] Mehta, A.J., en Partheniades, E., Kaolinite resuspension properties, Journal of the hydraulics division, ASCE, Vol. 105, HY4, (apr. 1979), blz. 411-416.
- [15] Mehta, A.J., Hayter, E.J., Parker, W.R., Krone, R.B., en Teeter, A.M., Cohesive sediment transport, I:process description, Journal of hydraulic engineering, Vol.115, No.8, (aug.1989), blz.1076-1093.
- [16] Murray, W.A., Erodibility of coarse sand-clayey silt mixtures, Journal of the hydraulics division, ASCE, HY10, (okt.1977), blz.1222-1227.
- [17] Panton,R.L., Incompressible flow, John Wiley & Sons - New York, (1984).
- [18] Parchure, T.M., en Mehta, A.J., Erosion of soft cohesive sediment deposits, Journal of hydraulic engineering, Vol.111, No.10, (okt.1985), blz.1308-1326.
- [19] Partheniades, E., Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of the hydraulics division, ASCE,91(1), blz.105-139.
- [20] Stansby, P.K., en Dixon, A.G., Simulation of flows around cylinders by a Lagrangian vortex scheme, Applied ocean research, 5(3), (1983), blz.167-178.
- [21] Sumer, M.B., Jensen, R.H., Mao, Y., en Fredsoe, J., Effect of lee-wake on scour below pipelines in current, Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, ASCE, Vol.114, No.5, (sept.1988), blz.599-614.
- [22] van der Velden, E.T.J.M., Coastal engineering, volume II, T.U. Delft, Department of civil engineering, Delft, (febr. 1989).

98

- [23] van der Velden, E.T.J.M., Interne publicaties T.U.Delft, Faculteit der civiele techniek, Kustwaterbouwkunde ,(1989):
  - -De invloed van organisch materiaal op de eigenschappen van slib.
  - -De invloed van de pH en het electroliet op het uitvlokken van slib.
  - -Kritische snelheden/schuifspanningen van zandslibmengsels.
  - -Uitschuring rond pijpleidingen in slibhoudend zand.
- [24] Vrijling, J.K., en Vrouwenvelder, A.C.W.M., Probabilistisch ontwerpen, T.U.Delft, (1988).



