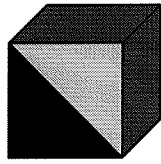


Het gedrag van zakkingsfilters onder invloed van golfbelasting



Afstudeerrapport

februari 1999

Werner Halter

Afstudeercommissie:

prof. ir. K. d'Angremond
ir. G.J. Schiereck
dr. ir. H.L. Fontijn
ir. B. Steijn

Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van mijn afstudeerproject aan de Subfaculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd in nauwe samenwerking met de Koninklijke Boskalis Westminster N.V. Daar is ook het idee ontstaan om uit te zoeken hoe zakkingsfilters zich gedragen als ze bloot worden gesteld aan golfbelasting. Vorig jaar is reeds een afstudeeronderzoek gewijd aan dit onderwerp. Dit rapport zal verder bouwen op de resultaten van dit onderzoek

Als onderdeel van dit afstudeerproject zijn experimenten uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de korte speurwerkgoet in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica.

Mijn dank gaat uit naar de leden van de afstudeercommissie, de medewerkers van het laboratorium en naar de Koninklijke Boskalis Westminster NV.

Werner Halter

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Inhoudsopgave.....	iii
Samenvatting	v
Notaties	vii
1. Inleiding	1
1.1 Achtergrond.....	1
1.2 Probleemstelling.....	2
1.3 Doelstelling.....	2
1.4 Opbouw van dit rapport.....	2
2. Filterconstructies	3
2.1 Inleiding.....	3
2.2. Geometrisch-dichte filters	5
2.3 Geometrisch-open filters	5
2.4 Zakkingsfilters	6
3. Huidige kennis over zakkingsfilters onder invloed van een golfbelasting.....	9
3.1 Inleiding.....	9
3.2 Beschrijving van de geschematiseerde situatie	9
3.3 De hydraulische belasting op en in het zakkingsfilter.....	10
3.3.1 Het verloop van de golfbelasting.....	10
3.3.2 Doordringing van de golfbeweging in de filterlaag	11
3.4 Het gedrag van het zakkingsfilter onder invloed van een golfbelasting	13
3.4.1 Het gedrag van loskorrelig materiaal zonder filter	13
3.4.2 Het gedrag van basismateriaal met een filter.....	16
3.4.3 De zakking van filterstenen in het basismateriaal	16
3.5 Tijdsafhankelijke veranderingen in het zakkingsfilter.....	17
3.6 Conclusie	19
4. Beschrijving van de experimenten	21
4.1 Inleiding.....	21
4.2 De proefopstelling.....	21
4.2.1 De inrichting van de stroomgoot.....	21
4.2.2 De filterconstructie in de stroomgoot.....	22
4.2.3 De meetinstrumenten.....	24
4.3 Resultaten van de voorbereidende proeven.....	24
4.3.1 De golfbeweging in de goot.....	24

4.3.2 De opbouw van de proeven	25
4.4 De werkwijze tijdens de erosieproeven.....	26
5. Resultaten van de experimenten	27
5.1 Inleiding.....	27
5.2 Resultaten van de erosieproeven	27
5.2.1 Waarnemingen tijdens de proeven met een filter	27
5.2.2 Waarnemingen tijdens de proeven zonder een filter	28
5.2.3 Bepaling van een maat voor de erosie	30
5.3 Bepaling van het begin van bewegen van basismateriaal.....	30
6. Analyse van de experimentele resultaten	33
6.1 Inleiding.....	33
6.2 Het begin van bewegen van basismateriaal.....	33
6.3 Het transport van basismateriaal.....	36
6.4 Verklaringen voor de ribbelvorming	37
6.5 Doordringing van de orbitaalbeweging in de filterlaag	39
6.5.1 Het verloop van het verhang bij het begin van bewegen	39
6.5.2 Het verloop van de snelheid bij het begin van bewegen	39
6.6 Vergelijkingen van de resultaten met eerder onderzoek	40
6.6.1 Vergelijking met de resultaten van Sleath.....	40
6.6.2 Vergelijking met de resultaten van De Graauw et al.	42
6.6.3 Vergelijking met de resultaten van Caus.....	43
6.6.4 Vergelijking met de resultaten van Van Os.....	43
7. Conclusies en aanbevelingen	45
7.1 Conclusies	45
7.1.1 Het begin van bewegen van basismateriaal in een zakkingsfilter.....	45
7.1.2 Het transport van basismateriaal in een zakkingsfilter.....	46
7.2 Aanbevelingen	45
7.2.1 Aanbevelingen ter verbetering van dit onderzoek	46
7.2.2 Aanbevelingen ter uitbreiding van dit onderzoek	47

Literatuur

Bijlagen

- A. Berging in de filterlaag
- B. Toetsing aan het verwekingscriterium
- C. Materiaalgegevens
- D. Eigenschappen van de opgewekte golven
- E. Waarnemingen erosieproeven
- F. Het begin van bewegen van basismateriaal zonder filter
- G. Berekening van de kritieke snelheden en verhangen
- H. Bepaling van het begin van bewegen van het basismateriaal
- I. De filterformule van De Graauw et al.

Samenvatting

Filterconstructies hebben als doel erosie te voorkomen in bepaalde delen van waterbouwkundige kunstwerken. Ze zijn opgebouwd uit een basislaag en één of meer filterlagen. Er zijn verschillende soorten filterconstructies. Ze worden over het algemeen zo gemaakt dat er geen erosie zal optreden van basismateriaal. Het is echter efficiënter om een filter te ontwerpen op de erosie, die tijdens de levensduur ervan toelaatbaar wordt geacht; deze is uiteraard altijd groter dan nul. Een filter dat een begrensde hoeveelheid erosie toelaat, heet een zakkingsfilter.

Ondanks dat er veel winst te behalen valt met de toepassing van zakkingsfilters, worden ze nog maar zelden toegepast. Dit komt omdat er nog maar weinig bekend is over het complexe gedrag ervan. Vooral over de situatie bij golfbelasting bestaat veel tekort aan kennis. Dit onderzoek heeft als doel de kennis over zakkingsfilters onder invloed van golfbelasting te vergroten.

Om vast te stellen bij welke golfbelasting er voor het eerst erosie ontstaat, is experimenteel onderzoek verricht in een stroomgoot. In de goot is een zakkingsfilter aangelegd. Hierover zijn gedurende een bepaalde tijd golven gestuurd om vervolgens de mate van erosie van het basismateriaal te bepalen. Elke golfhoogte veroorzaakt een bepaald erosievolume. Iteratief is gezocht naar de golfhoogte met een erosievolume van nul. De kritieke golfhoogte kan uiteindelijk worden bepaald door extrapolatie van een aantal erosievolumes naar nul.

De kritieke golfbelasting lijkt voornamelijk afhankelijk te zijn van de mate waarin de orbitaalsnelheden gedempt worden door de filterlaag. De golfbelasting bij het begin van bewegen is hoger bij een kleinere nominale diameter van het filtermateriaal. Een dikke filterlaag betekent een hogere kritieke golfbelasting dan een dunne filterlaag. Verder is er een duidelijke periode-afhankelijkheid waar te nemen: hoe groter de golfperiode, hoe kleiner de kritieke golfhoogte. Uit vergelijkbare experimenten zonder filter blijkt dat het basismateriaal zonder filter minder snel gaat bewegen dan onder een uit te grote stenen opgebouwd filter. In het laatste geval is het nadeel van de extra opgewekte turbulenties rond de stenen groter dan het voordeel van de snelheidsdemping.

Als er transport van basismateriaal plaatsvindt bij golven hoger dan de kritieke golven, is het altijd gunstig om een zakkingsfilter te gebruiken. Tijdens het transport zijn er botsingen van het basismateriaal met de filterstenen. Dit veroorzaakt energieverlies waardoor het transport wordt afgeremd. Hoe dikker de filterlaag is, hoe groter dit remmende effect zal zijn. Fijne filterstenen zorgen voor een betere remming dan grove filterstenen.

Uit theoretische berekeningen van de snelheden in filterlagen komt naar voren, dat er geen duidelijk verband is tussen deze snelheden en het begin van beweging. Dit zou kunnen duiden op een belangrijke rol van turbulente snelheidsfluctuaties. In soortgelijke proeven bij een stationaire stroming werd de rol van deze turbulente snelheidsfluctuaties aangetoond. In andere proeven zonder een vrij wateroppervlak werd een hogere kritieke golfhoogte gevonden. Ook dit zou verklaard kunnen worden door het verschil in turbulentie. Nauwkeurige snelheidsmetingen in de poriën van filterlagen kunnen in een volgend onderzoek enige duidelijkheid scheppen over de invloed van turbulentie.

Notaties

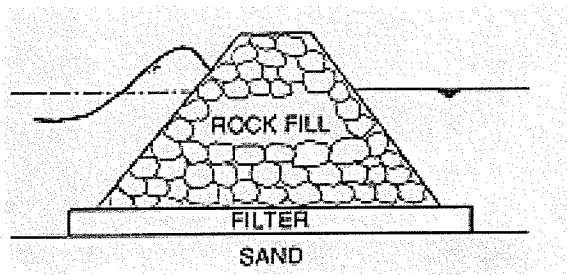
Symbool	Betekenis	Eenheid
a	coëfficiënt van de lineaire term in de verbeterde Forchheimer-vergelijking	[s/m]
a_0	orbitaalverplaatsing aan de bodem	[m]
Ac	versnellingsgetal	[-]
A_f	oppervlakte van de totale doorsnede van de filterlaag	[m ²]
A_p	oppervlakte van de doorsnede van de poriën in de filterlaag	[m ²]
B	laagdikte	[m]
b	coëfficiënt van de kwadratische term in de verbeterde Forchheimer-vergelijking	[s ² /m ²]
c	coëfficiënt van de tijdsafhankelijke term in de verbeterde Forchheimer-vergelijking	[s/m]
c_v	consolidatiecoëfficiënt	[m ² /s]
d_b	nominale diameter basiskorrel	[m]
d_f	nominale diameter filtersteen	[m]
d_{50f}	nominale diameter filtersteen ten opzichte waarvan 50% van het totale filtergewicht een kleinere nominale diameter heeft	[m]
d^*	dimensieloze diameter	[-]
D	dikte filterlaag	[m]
D_r	relatieve dichtheid	[-]
f	frequentie	[Hz]
f_w	bodemwrijving	[-]
g	valversnelling	[m/s ²]
G	afschuivingsmodulus	[N/m ²]
h	waterdiepte	[m]
H	golfhoogte	[m]
H_{cr}	kritieke golfhoogte	[m]
i	verhang	[-]
i_{cr}	kritiek verhang	[-]
k	1. golfgetal ($k = 2\pi/L$) 2. permeabiliteit	[-] [m/s]
K_o	laterale aardspanningscoëfficiënt	[-]
KC	getal van Keulegan-Carpenter	[-]
l	grootste diameter filtermateriaal	[m]
l/t	vormfactor filtermateriaal	[-]
L	golflengte	[m]
L_0	golflengte in diep water	[m]
L_{es}	karakteristieke lengte voor de elastische berging	[m]
L_{ps}	karakteristieke lengte voor de plastische berging	[m]
m_v	volume compressibiliteitscoëfficiënt	[m ² /N]
n	porositeit	[-]
N	hoeveelheid golven	[-]
p	druk	[Pa]
R	regressiecoëfficiënt	[-]
S	erosie	[m ³ /s]

S_t	toelaatbare erosie	$[m^3/s]$
t	1. tijd	$[s]$
	2. kleinste diameter filtermateriaal, loodrecht gemeten op de as van de grootste diameter	$[m]$
T	golfperiode	$[s]$
T_{es}	karakteristieke periode voor de elastische berging	$[s]$
T_{ps}	karakteristieke periode voor de plastische berging	$[s]$
u	snelheid in de x-richting	$[m/s]$
$\hat{u}$	maximale snelheidsamplitude	$[m/s]$
u_*	schuifspanningssnelheid	$[m/s]$
u_{cr}	kritieke snelheid	$[m/s]$
u_f	filtersnelheid	$[m/s]$
v	snelheid in de z-richting	$[m/s]$
w	wijdte van de filtergradering ($w = d_{85}/d_{15}$)	$[-]$
x	plaatscoördinaat in de lengterichting van de goot	$[m]$
y	plaatscoördinaat in de breedterichting van de goot	$[m]$
z	plaatscoördinaat in de hoogterichting van de goot	$[m]$
α	coëfficiënt in de uitdrukking voor "a"	$[-]$
β	compressibiliteit van het poriënwater	$[m^2/N]$
β_0	coëfficiënt in de uitdrukking voor "b"	$[-]$
β_c	coëfficiënt in de uitdrukking voor "b"	$[-]$
Δ	relatieve dichtheid	$[-]$
η	oppervlakte-uitwijking	$[m]$
ν	kinematische viscositeit	$[m^2/s]$
ρ	soortelijke massa	$[kg/m^3]$
ω	hoekperiode ($\omega = 2\pi/T$)	$[-]$
ψ	1. hoek tussen stroming en langste as stenen	$[^\circ]$
	2. mobiliteitsparameter	$[-]$

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

In tal van waterbouwkundige constructies worden filters toegepast. Ze hebben als doel om constructies te beschermen tegen uitspoeling van grond en beschadiging door wateroverdrukken. Dit is noodzakelijk bij bijvoorbeeld sluizen, dammen, dijken, oeverbeschermingen en golfbrekers. Al deze constructies hebben te kampen met een interne waterbeweging, die tot erosie zou leiden, als het erodeerbare materiaal niet werd tegengehouden door een filter.



Figuur 1.1: Schematisch voorbeeld van een filter in een golfbreker

Het principe van een filter is een laag van materiaal (bv. stenen of textiel), dat het onderliggende, loskorrelige materiaal tegenhoudt, maar het water doorlaat. Bij het ontwerp van filters wordt vaak gebruik gemaakt van de klassieke regels waarin geen erosie van onderliggend materiaal wordt toegestaan. Dit kan enerzijds door ervoor te zorgen dat de poriën van het filtermateriaal klein genoeg zijn om de onderliggende korrels te beletten uit de laag te treden. Er kan ook gebruik worden gemaakt van filtermateriaal met iets grotere poriën. In dit geval moet de waterbeweging zodanig begrensd zijn, dat er niet genoeg kracht op de basiskorrels wordt uitgeoefend om uit het filter te treden.

Om voldoende bescherming te bieden zal een filter vaak uit meerdere, in grofheid oplopende, lagen bestaan. De aanleg van een filter vereist een nauwkeurige uitvoering. Het kan dan ook een relatief groot deel zijn van de kosten die een waterbouwkundig werk met zich meebrengt. Het lijkt daarom gunstig om het aantal afzonderlijke lagen, waaruit een filter is opgebouwd, te minimaliseren. Omdat de grofheden van de basislaag en de bovenste filterlaag onveranderd blijven, moeten de overgangen tussen de korrelgroottes van de verschillende lagen groter worden. Als deze overgang een zekere grootte bereikt, krijgt men te maken met een filter dat niet meer voldoet aan de klassieke filterregels: een zakkingsfilter.

Een zakkingsfilter heeft een zodanige korrelgrootteverhouding tussen het filtermateriaal en het onderliggende basismateriaal, dat het basismateriaal door de filterlaag kan bewegen. De hydraulische belasting is bovendien zodanig, dat er ook daadwerkelijk beweging optreedt. Het gevolg hiervan is een zakking van de filterlaag. Als deze zakking een bepaalde toelaatbare grens niet overschrijdt, zal de constructie haar functie kunnen blijven uitoefenen. Zakkingsfilters zijn nog maar weinig toegepast, omdat over het gedrag ervan nog redelijk wat vragen bestaan. Zo is vaak niet precies bekend hoe hoog de hydraulische belasting moet zijn

om de eerste zakking te veroorzaken. Verder is niet goed bekend hoe deze zakking zich ontwikkelt in de tijd.

Een mogelijke toepassing van een zakkingsfilter is bij een rubble-mound golfbreker. Omdat de overgang tussen het fijnkorrelige materiaal in de zeebodem en de grote armour-stenen aan de bovenkant aanzienlijke filtervoorzieningen vereist, valt er ook veel te besparen door soepelere filterregels. Er moet dan wel enige zekerheid zijn over het verband tussen de waterbeweging en het transport van basismateriaal. De waterbeweging in een golfbreker wordt echter gedomineerd door golven en is bovendien erg turbulent. Het is daarom extra moeilijk om te voorspellen hoe het zakkingsfilter zich in zo'n geval zal gaan gedragen.

1.2 Probleemstelling

Er is te weinig inzicht in het gedrag van zakkingsfilters. Dit geldt in het bijzonder voor gevallen waarin de golfbelasting maatgevend is. Met de toepassing van zakkingsfilters in de praktijk moet daarom erg voorzichtig worden omgesprongen.

1.3 Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om meer duidelijkheid te krijgen over het gedrag van zakkingsfilters onder invloed van golfbelasting.

Er zal alleen worden gekeken naar zakkingsfilters die bestaan uit een basislaag en een filterlaag. De zakkingsfilters zijn verder granulair en horizontaal. De golfbelasting bestaat uit lopende, regelmatige, niet-brekende oppervlaktegolven.

De uitbreiding van de bestaande kennis zal vooral worden verwezenlijkt door middel van experimenteel onderzoek. Dit experimentele onderzoek zal worden gedaan in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Subfaculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft.

1.4 Opbouw van dit rapport

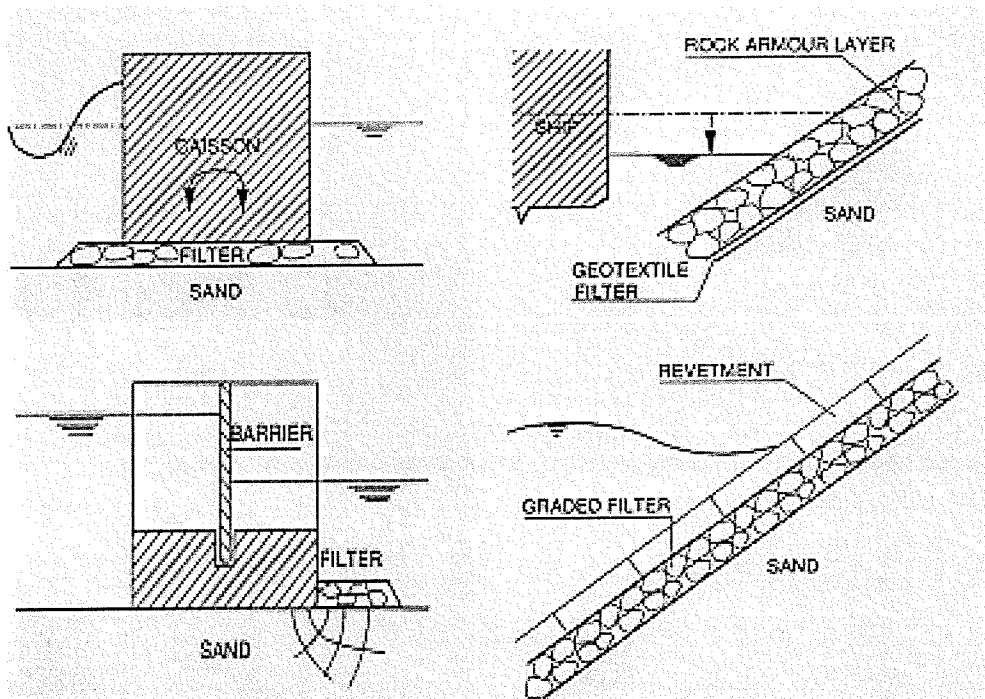
In het volgende hoofdstuk zal worden beschreven wat voor filters er zijn, aan wat voor eisen ze moeten voldoen en in welke omstandigheden ze kunnen worden toegepast. In het daarop volgende hoofdstuk zal een geschematiseerde situatie worden beschouwd, waarin een zakkingsfilter onder invloed staat van een golfbelasting. De bestaande theoretische kennis over de processen die zich in de beschouwde situatie afspelen zal opgesomd worden. Aan het einde van dit hoofdstuk zal een conclusie worden getrokken, waarin wordt beschreven hoe deze bestaande kennis kan worden uitgebreid. In hoofdstuk 4 zal verklaard worden hoe het experimentele onderzoek wordt aangepakt. De resultaten hiervan zullen in hoofdstuk 5 worden beschreven. In hoofdstuk 6 zal geprobeerd worden om deze resultaten te verklaren en te analyseren. In het laatste hoofdstuk volgen de conclusies en aanbevelingen, die uit dit onderzoek naar voren gekomen zijn.

2. Filterconstructies

2.1 Inleiding

Een filter is een constructie die veel wordt toegepast in de waterbouw. Het heeft als hoofdfuncties: bescherming tegen erosie en het voorkomen van drukopbouw.

Een filter heeft altijd een gelaagde structuur. Er zijn één of meer filterlagen en een basislaag. De filterlagen moeten voorkomen dat het materiaal uit de basislaag wegspoelt. Dit wordt bewerkstelligd door de filterlagen een zodanige structuur te geven, dat ze tegelijkertijd de basiskorrels tegenhouden en het water doorlaten. Een filterlaag kan bestaan uit stenen (een granulair filter) of uit geotextiel. In dit onderzoek worden alleen granulaire filters beschouwd, bestaande uit een basislaag en één filterlaag. In figuur 2.1 worden enkele voorbeelden gegeven van filterconstructies.



Figuur 2.1: Voorbeelden van filterconstructies

Bij granulaire filters is de verhouding tussen de grootte van de filterkorrels en de grootte van de basiskorrels van essentieel belang. Als maat voor de grootte van een korrel wordt de nominale diameter genomen. Dit is de lengte van de ribbe van een denkbeeldige kubusvormige korrel met dezelfde soortelijke massa als de korrel. Bij een zekere verzameling korrels zal over het algemeen de nominale diameter voor elke korrel verschillend zijn. De mediane diameter d_{50} is een gebruikelijke maat om een korrelverzameling te beschrijven. Ten opzichte van deze diameter is 50% van het totaalgewicht aan korrels fijner. Op dezelfde manier geldt dat ten opzichte van de diameters d_{85} en d_{15} respectievelijk 85% en 15% van het

totaalgewicht fijner zijn. Als maat voor de verhouding tussen de grootte van de filter- en de basiskorrels wordt vaak de 15 %-filterkorreldiameter gedeeld door de 85 %-basiskorreldiameter (d_{15f}/d_{85b}).

Filters zijn onder te verdelen in drie klassen (CUR 1993):

1. *Geometrisch-dichte filters*

Dit zijn filters die bij alle hydraulische belastingen stabiel zijn. Dit betekent dat het basismateriaal altijd volledig wordt tegenhouden.

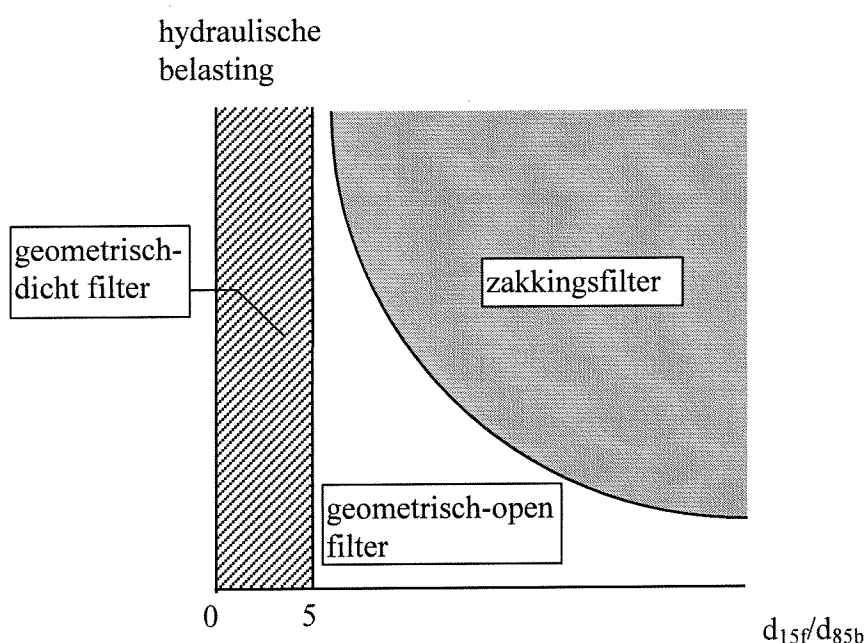
2. *Geometrisch-open filters*

Dit zijn stabiele filters. De hydraulische belasting mag echter niet hoger zijn dan een bepaalde kritieke grens.

3. *Zakkingsfilters*

Dit zijn instabiele filters. De hydraulische belasting is hoger dan de kritieke grens.

Deze onderverdeling is nog eens schematisch weergegeven in figuur 2.2. In de volgende drie paragrafen worden deze filtertypes elk afzonderlijk behandeld.



Figuur 2.2: onderverdeling van de drie filtertypes

2.2 Geometrisch-dichte filters

Geometrisch-dichte filters zijn gebaseerd op het principe dat de ruimte in de poriën van korrels veel kleiner is dan ruimte die de korrels zelf innemen. Er zal nooit erosie kunnen optreden van basismateriaal, als de poriën van het filtermateriaal kleiner zijn dan de diameters van de basiskorrels. Voor de verhouding tussen de korreldiameters van basis- en filtermateriaal bestaat de volgende klassieke vuistregel:

$$\frac{d_{15f}}{d_{85b}} < 5$$

Als de basiskorrels de poriën van de filterkorrels verstopen, kan er een te hoge druk in het filter ontstaan. Om de drukafvoer te garanderen, moet gelden:

$$\frac{d_{15f}}{d_{15b}} > 5$$

Los van de onderlinge stabiliteit tussen de filter en de basis, moet de filterlaag ook intern stabiel zijn. Een filterlaag moet namelijk een niet te wijde steengradering hebben om te voorkomen dat de kleinere stenen tussen de grotere exemplaren kunnen wegeroderen. Om deze interne stabiliteit te waarborgen moet gelden:

$$\frac{d_{60f}}{d_{10f}} < 10$$

2.3 Geometrisch-open filters

In geometrisch-open filters, ook wel hydraulische filters genoemd, gaat de regel dat de basiskorrels niet door de filterlaag heen kunnen bewegen niet meer op. Zij ontleen hun stabiliteit echter aan het feit dat de hydraulische belasting die er op werkt kleiner is dan die waarbij erosie van basismateriaal door het filter optreedt. Bij niet al te grote diameterverhoudingen tussen het filtermateriaal en het basismateriaal zal de hydraulische belasting die tot instabiliteit leidt nog hoog zijn door boogwerking tussen de korrels, maar hoe groter deze diameterverhouding wordt, hoe minder belasting nodig is om erosie tot stand te brengen.

De vuistregel in § 2.2 geeft een veilige grens voor de toepassing van geometrisch-dichte filters. Het overgangsgebied tussen geometrisch-dichte en -open filters ligt boven deze grens. Dit overgangsgebied kan als volgt worden beschreven (Okita en Nishigaki 1993).

$d_{15f}/d_{85b} \leq 7$	Er treedt geen indringing van basismateriaal op in de filterlaag.
$7 < d_{15f}/d_{85b} \leq 10$	Er treedt indringing op van basismateriaal in de filterlaag over een beperkte zone tot er een evenwicht ontstaat.
$10 < d_{15f}/d_{85b}$	Er treedt indringing op van basismateriaal in de filterlaag. Er zal geen evenwichtssituatie ontstaan

De Graauw et al. deden in 1983 onderzoek naar de kritieke snelheden in een geometrisch-open filter onder invloed van zowel stationaire als cyclische belasting. De hydraulische belasting werd opgesplitst in loodrechte en parallelle belasting. Ondanks het feit dat er vaak een combinatie optreedt van deze twee vormen is het zinvol om een splitsing aan te brengen, omdat het twee duidelijk andere processen zijn.

Bij belasting loodrecht op het grensvlak tussen basislaag en filterlaag is vooral de boogwerking tussen de korrels van belang. Er bestaat een verband tussen diameterverhouding en verhang. Bij loodrechte cyclische belasting is eenzelfde soort verband gevonden als bij stationaire belasting. Alleen ligt de kritieke grens lager. Dit komt, omdat cyclische belasting het effect van boogwerking tussen de korrels teniet doet

In het geval van parallelle belasting kan het criterium voor begin van bewegen volgens Shields worden toegepast. Bovendien moet de theorie van Forchheimer over stroming door poreuze media in beschouwing worden genomen. Dit is gedaan en leidde tot een formule voor het kritieke verhang op de grenslaag tussen filter- en basislaag:

$$i_{cr} = \left(\frac{0,06}{n_f^3 d_f^{4/3}} + \frac{n_f^{5/3} d_f^{1/3}}{1000 d_b^{5/3}} \right) u_{*cr}^2$$

waarin:

- d_b diameter basiskorrels
- d_f diameter filterstenen
- n_f porositeit filter
- u_{*cr} kritieke schuifspanningssnelheid van basismateriaal

Voor parallelle cyclische belasting is geconcludeerd, dat er bij golfperiodes langer dan 2 seconden kan worden gerekend alsof de toestand stationair is. De formule van De Graauw is echter afgeleid in een stroming zonder vrij wateroppervlak. Zij kan daarom niet zomaar worden toegepast in de situatie waarin een filterlaag onder invloed staat van een waterbeweging met een vrij oppervlak.

2.4 Zakkingsfilters

Zakkingsfilters zijn filters met de volgende twee eigenschappen:

- De verhouding tussen de korreldiameters van de filterlaag en de basislaag is groot genoeg om de korrels uit de basislaag in staat te stellen door de poriën van de filterlaag te bewegen.
- De hydraulische belasting die op het filter werkt, is zo groot dat er (tot een toelaatbare grens) transport optreedt van basismateriaal door de filterlaag. Deze belasting mag echter nooit leiden tot het in beweging komen van de filterlaag.

Het moge duidelijk zijn dat het zakkingsfilter het aantrekkelijkste type filter is om toe te passen. In dit geval is er immers de minst strenge norm voor de verhouding tussen het basis-

en het filtermateriaal. Het zakkingsfilter biedt precies zoveel bescherming als nodig is voor een constructie. Maar daarin zit ook meteen de moeilijkheid, want wat is de toelaatbare bescherming? En hoe moet de toelaatbare hoeveelheid transport van basismateriaal en de toelaatbare grens van zakking worden gedefinieerd?

In een zakkingsfilter zal basismateriaal in beweging komen en er zal een zakking optreden. Het is niet precies bekend hoe dit zich ontwikkelt in de tijd. Ook is niet bekend of er op een zeker moment een evenwicht optreedt, waarna het filter niet meer verder zakt. Er moet dus voorlopig van worden uitgegaan dat het transport van basismateriaal door kan blijven gaan, zolang er een hydraulische belasting is die groter is dan de kritieke waarbij het begin van transport optreedt. Er zal dan dus altijd een moment komen, dat een zakkingsfilter zijn functie niet meer kan vervullen. Daarom is het beter om zakkingsfilters alleen te gebruiken in situaties waarin het volgende geldt:

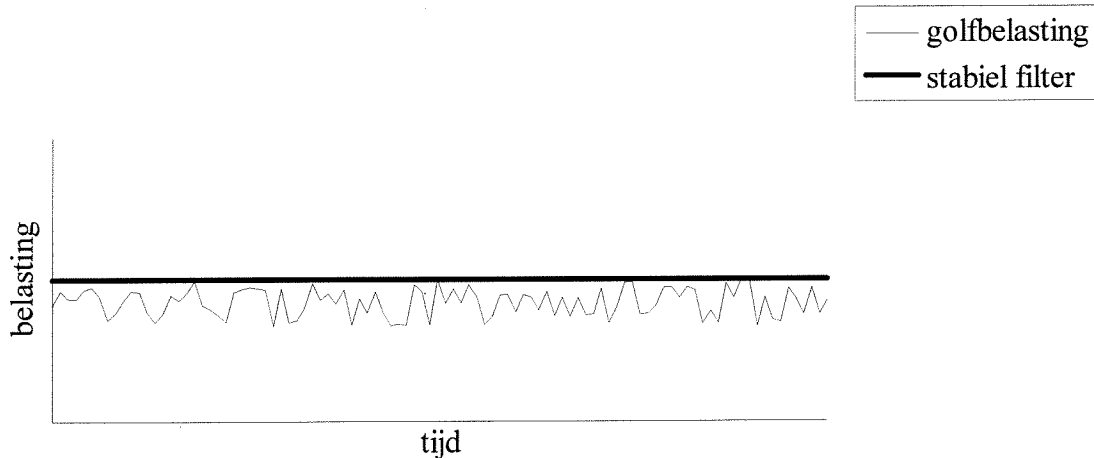
1. De tijdsduur waarover het filter zijn functie moet vervullen is begrensd.
2. De hydraulische belasting is niet continu groter dan de kritieke, maar alleen bij piekbelastingen.

Kortom:

$$f \times t \times S < S_t$$

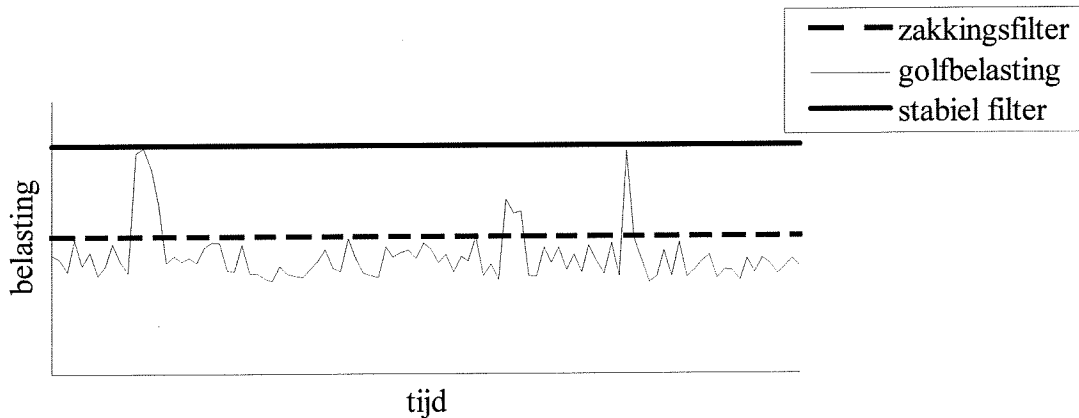
f	frequentie van piekbelastingen
t	tijdsduur waarover het filter zijn functie moet vervullen
S	gemiddelde erosie per piekbelasting
S_t	toelaatbare erosie

In de onderstaande twee figuren is het principe van een zakkingsfilter gevisualiseerd. De golfbelasting is uitgezet tegen de tijd. Hierbij moet worden gedacht aan een tijdschaal in jaren. Figuur 2.3 stelt een golfklimaat zonder extreme pieken voor. Een stabiel filter zou zo moeten worden gedimensioneerd, dat het juist boven de maximale golfbelasting uitsteekt. Een zakkingsfilter heeft in deze situatie weinig nut, want bij een kleine reductie van de filterbescherming treedt al erg frequent een overschrijding van de stabiele toestand op. Een kleine besparing heeft dan dus ook een te grote erosie tot gevolg. Omdat het zakkingsfilter geen reëel alternatief is in deze situatie, is het ook niet in de figuur weergegeven.



Figuur 2.3: Golfklimaat zonder pieken

In de situatie in figuur 2.4 is het wel nuttig om een zakkingsfilter toe te passen in plaats van een in alle gevallen stabiel filter. Een stabiel filter moet worden gedimensioneerd op belastingpieken die maar af en toe voorkomen. Een zakkingsfilter staat erosie toe in dit soort gevallen maar blijft stabiel gedurende het resterende, veel grotere deel van de tijd. Dit levert een aanzienlijke besparing op in de constructiekosten.



Figuur 2.4: Golfklimaat met pieken

Omdat er nog niet zoveel met zekerheid bekend is over het gedrag van zakkingsfilters, zijn ze nog niet zoveel toegepast. Het toepassingsgebied beperkt zich voornamelijk tot de zogenaamde falling apron. Deze treft men aan in tenen van taludbekledingen en op randen van bodembeschermingen. Ook zijn er filterconstructies aanwezig in sommige golfbrekers, die (vaak zonder opzet en met wisselend succes) tot de klasse zakkingsfilter behoren.

Het zakkingsfilter komt ook voor onder een andere naam. Zo wordt het wel eens een transportfilter (Den Adel 1989) of een imperfect filter (Caus 1998) genoemd.

3. Huidige kennis over zakkingsfilters onder invloed van een golfbelasting

3.1 Inleiding

Een golfbeweging veroorzaakt een heen-en-weer gaande waterbeweging boven het zakkingsfilter. Deze dringt door in de filterlaag en brengt het basismateriaal in beweging. Door deze beweging zakken de onderste stenen van de filterlaag in het basismateriaal. Vervolgens verschuiven de overige filterstenen en zakt de bovenkant van de filterlaag. Door dit alles verandert weer de golfbeweging. Kortom, de veranderingen in het filter zijn afhankelijk van de waterbeweging en de waterbeweging is weer afhankelijk van de filterstructuur.

Het gedrag van zakkingsfilters onder invloed van een golfbelasting is dus een complex proces. Dit hoofdstuk geeft een opsomming van de theorieën die gebruikt kunnen worden om dit proces inzichtelijker te maken. Allereerst zal worden beschreven welke schematisaties worden aangebracht om van dit probleem een overzichtelijk geheel te maken. Dan zal de hydraulische belasting op en in het filter worden beschouwd. Daarna zal worden gekeken naar het gedrag van de stenen en het basismateriaal in een zakkingsfilter als gevolg van deze hydraulische belasting. Vervolgens zal worden beschreven hoe het proces verandert naarmate de tijd voortschrijdt. Er zal worden afgesloten met een conclusie, waarin de vraag wordt beantwoord op welke manier in dit onderzoek wordt geprobeerd om de beschreven kennis over de optredende mechanismen uit te breiden.

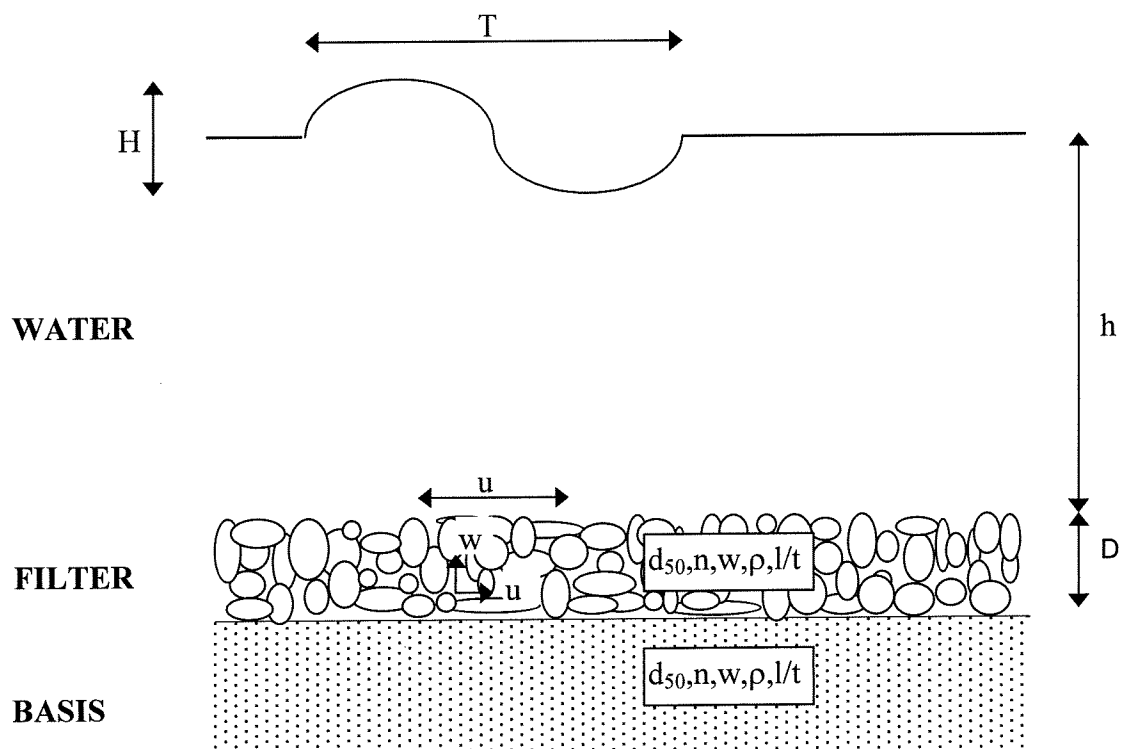
3.2 Beschrijving van de geschematiseerde situatie

De situatie, die in deze studie wordt beschouwd, is weergegeven in figuur 3.1. Het is een horizontaal zakkingsfilter, dat is belast met oppervlaktegolven. Het zakkingsfilter bestaat uit een basislaag en een filterlaag.

De basislaag is een half-oneindige ruimte, die wordt begrensd door het horizontale grensvlak met de filterlaag. De basislaag bestaat uit loskorrelig, niet-cohesief materiaal. De kenmerkende eigenschappen zijn de mediane steendiameter d_{50} , de spreiding van de diameters w , de porositeit n , de dichtheid ρ en de vormfactor l/t (l is de grootste diameter van een korrel, t is de kleinste diameter van een korrel, loodrecht gemeten op de as van de grootste diameter).

De filterlaag bedekt de gehele basislaag en heeft een constante dikte D . Net als de basislaag bestaat deze laag uit loskorrelig, niet-cohesief materiaal. Ook heeft het dezelfde serie kenmerkende eigenschappen als de basislaag. De diameterverhouding tussen de filterstenen en de basiskorrels is zodanig dat de basiskorrels tussen de filterstenen kunnen bewegen. In de poriën stroomt water met een bepaalde snelheid. Deze snelheid is te ontbinden in een horizontale component u en een verticale component w .

Het zakkingsfilter bevindt zich in een watermassa met een vrij wateroppervlak en een constant stilwaterniveau. De afstand tussen het stilwaterniveau en de bovenkant van het filter is de waterdiepte h . Het water is in beweging door een sinusvormige, lopende golf met een constante golfhoogte H en een golfperiode T .



Figuur 3.1: de geschematiseerde situatie

3.3 De hydraulische belasting op en in het zakkingsfilter

3.3.1 Het verloop van de golfbelasting

Het zakkingsfilter in deze situatie wordt belast door golven. Golven zijn in werkelijkheid altijd onregelmatig. Zij zijn echter te schematiseren door een grote verzameling van sinusvormige golven, allemaal met een eigen periode en hoogte. Zo'n golf wordt een regelmatige golf genoemd. Sinusvormige golven zijn te beschrijven met de lineaire golftheorie. Hierin wordt de oppervlakte-uitwijking als volgt beschreven:

$$\eta(x,t) = \frac{1}{2} H \sin(\omega t - kx)$$

Hierin is:

- ω de hoekperiode, $\omega = 2\pi/T$
- t de tijd
- k het golfgetal, $k = 2\pi/L$
- x de afstand

De golf veroorzaakt een beweging in het water, die de orbitaalbeweging wordt genoemd. De orbitaalbeweging is afhankelijk van de verhouding tussen de waterdiepte en de golflengte L . Voor diep water ($h/L > 1/2$) betekent dit dat elk waterdeeltje gedurende een golfperiode een cirkelvormige beweging maakt. Naarmate een waterdeeltje zich dichterbij de bodem bevindt neemt de straal ervan af. Op de bodem is de waterbeweging nul.

Voor ondiep water ($h/L < 1/20$) geldt dat de beweging ellipsvormig is. Deze ellipsen worden platter naarmate ze de bodem naderen. Op de bodem geldt dat de verticale snelheid nul is en dat er alleen een horizontale periodieke beweging is, evenwijdig aan de golfvoortplantingsrichting.

De snelheden van het water kunnen als volgt worden beschreven:

$$\text{horizontale snelheid: } u = \frac{1}{2} \omega H \frac{\cosh kz}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx)$$

$$\text{verticale snelheid: } w = \frac{1}{2} \omega H \frac{\sinh kz}{\sinh kh} \cos(\omega t - kx)$$

Hierin is h de waterdiepte en z de verticale afstand vanaf de bodem.
Op de bodem geldt: $z = 0$

$$\text{De maximale horizontale snelheid op de bodem is dus: } \hat{u} = \frac{\omega H}{2 \sinh kh}$$

De golfbeweging zorgt voor een drukverloop in het water:

$$p = \rho g(h - z) + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh kz}{\cosh kh} \sin(\omega t - kx)$$

Door het drukverloop te differentiëren naar x en te delen door ρg vindt men het verhang in het water:

$$i = \frac{1}{2} k H \frac{\cosh kz}{\cosh kh} \cos(\omega t - kx)$$

3.3.2 Doordringing van de golfbeweging in de filterlaag

- **Snelheden in de filterlaag**

De waterbeweging, veroorzaakt door de golven, dringt door in de filterlaag. Om de watersnelheden tussen de filterstenen te weten te komen, moeten de posities en omvang van alle stenen worden meegenomen. Omdat dit ondoenlijk is, is het begrip filtersnelheid ingevoerd. De filtersnelheid is de hoeveelheid water die per tijdseenheid door de doorsnede van de filterlaag stroomt. Dit is gelijk aan de porositeit van de filterlaag vermenigvuldigd met de gemiddelde snelheid in de poriën. Kortom:

$$u_f = \frac{1}{A_f} \iint_{A_p} u dA_p = n * u$$

met

u de snelheid
 u_f de filtersnelheid
 A_f de oppervlakte van de totale doorsnede van de filterlaag
 A_p de oppervlakte van de doorsnede van de poriën in de filterlaag
 n de porositeit

De Forchheimer-vergelijking geeft het verband weer tussen het verhang over een filterconstructie en de filtersnelheid voor oneindige poreuze media:

$$\frac{1}{g\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} = i = au_f + bu_f |u_f| + c \frac{\partial u_f}{\partial t}$$

waarin:

ρ_w de dichtheid van het water
 g de valversnelling
 p de druk
 a een modelconstante voor de laminaire term [s/m]
 b een modelconstante voor de turbulente term [s²/m²]
 c een modelconstante voor de tijdsafhankelijke term [s²/m]

Forchheimer vond ook formules voor de modelconstanten in deze vergelijking. Deze geven echter afwijkingen bij een oscillerende stroming. Bij een oscillerende stroming is de weerstand namelijk groter door het continu van richting wisselen van de waterbeweging. Daarom zijn de formules voor de modelconstanten uit de 'Verbeterde Forchheimer-vergelijking', die Van Gent in 1993 vond, beter bruikbaar. Voor deze modelconstanten geldt:

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gd_{50f}^2}$$

$$b = \beta_c \left(1 + \frac{7,5}{KC}\right) \frac{(1-n)}{n^3} \frac{1}{gd_{50f}}, \text{ met } KC = \frac{\hat{u}T}{nd_{50f}} \text{ en } \beta_c = \beta_0 (1/t)^{0,5 \tan(\psi - 45^\circ)}$$

$$c = \frac{1 + \frac{1-n}{n} (0,85 - \frac{0,015}{Ac})}{ng}, \text{ met } Ac = \frac{\hat{u}}{ngT} > \frac{0,015}{\frac{n}{1-n} + 0,85}$$

Hierin zijn α , β_c en β_0 dimensieloze coëfficiënten. ν is de kinematische viscositeit. ψ is de hoek tussen de stroming en de langste as van de stenen. KC is het getal van Keulegan-Carpenter en Ac is het versnellingsgetal.

Voor betere benaderingen van de doordringing van een golfbeweging in een steenlaag zijn numerieke modellen beschikbaar. Een voorbeeld daarvan is MBREAK/ODIFLOCS (De Groot et al. 1994). Met dit model kunnen de poriënsnelheden bepaald worden in een grofkorrelige constructie. Dit wordt gerealiseerd door de waterbeweging binnen en buiten de constructie apart numeriek te simuleren. Het verband tussen de interne en de externe waterbeweging wordt daarbij verkregen door numerieke simulatie van de overgangsvoorwaarden.

De winst die behaald kan worden met numerieke modellen ten opzichte van de Forchheimer-formule komt vooral door het meenemen van de geometrie van de steenmassa en de demping van snelheden. Met sommige processen, zoals de invloed van turbulente wervels, wordt ook in numerieke modellen geen rekening gehouden.

- **Demping van de snelheden**

Bij de doordringing van de snelheden in het filter zal demping optreden. Deze demping is vooral het gevolg van energieverlies door interactie van de waterbeweging met de stenen. Demping kan ook het gevolg zijn van interne berging. Twee soorten interne berging kunnen een rol spelen. Dit zijn elastische berging en plastische berging. Elastische berging treedt op door compressie van het water in de poriën. Plastische berging wordt veroorzaakt door verplaatsingen in de korrelstructuur.

In bijlage A zijn enkele bergingsberekeningen uitgevoerd voor een 12 cm dikke filterlaag met $d_{50} = 2$ cm. Daaruit blijkt dat interne berging in zo'n situatie verwaarloosbaar is.

- **Turbulenties in de filterlaag**

Turbulenties zijn te omschrijven als de onregelmatige fluctuaties van de watersnelheid. Uit modelonderzoek naar de doordringing van stationaire stroming in geometrisch-open filterlagen, blijkt dat turbulentie een belangrijke factor is in het snelheidspatroon in de filterlaag (Van Os 1998). Het blijkt, dat zowel de standaarddeviatie als het gemiddelde van de watersnelheid afneemt tot een diepte van $1,5 \cdot d_{50}$ van de filterlaag. Bij een grotere diepte blijven zij ongeveer constant en gaan turbulente snelheidsfluctuaties een belangrijke rol spelen. Er werden hoog- en laagfrequente snelheidsfluctuaties aangetoond. De hoogfrequente snelheidsfluctuaties ontstaan uit kleinschalige wervels door de wisselwerking van de waterbeweging met de filterstenen. De laagfrequente snelheidsfluctuaties komen voort uit grootschalige wervels uit het vrije wateroppervlak boven de filterlaag.

3.4 Het gedrag van het zakkingsfilter onder invloed van een golfbelasting

3.4.1 Het gedrag van loskorrelige materiaal zonder filter

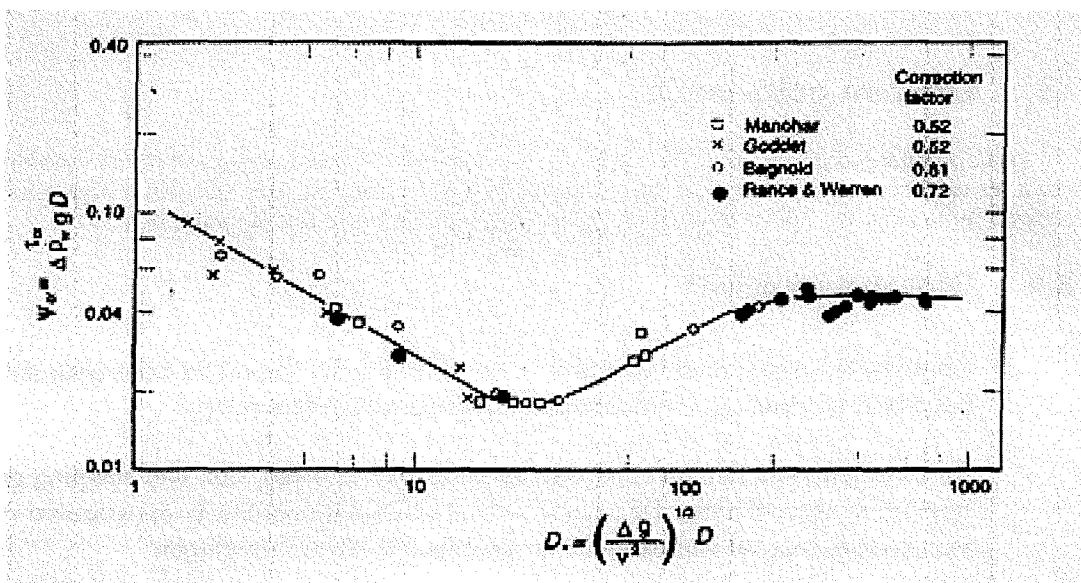
Om een goed inzicht te krijgen in het gedrag van een zakkingsfilter onder invloed van een golfbeweging, moet eerst bekend zijn hoe het loskorrelige basismateriaal zich zonder filter

gedraagt. Er zijn twee mechanismen bekend, die loskorrelig materiaal onder invloed van golven in beweging brengen. Ten eerste is dit de uitschuring, veroorzaakt door de sleepkracht van stromend water. Ten tweede is dit grondverweking, die optreedt als de waterspanningen in het korreelpakket te groot worden.

• Uitschuring van loskorrelig materiaal

Uitschuring van bodemmateriaal treedt op als de watersnelheid groter is dan de kritieke snelheid waarbij de korrels in beweging komen. Uitschuring is een proces dat voor alle korrels onafhankelijk van elkaar optreedt.

Shields heeft een verband afgeleid tussen begin van bewegen van korrels en de waterbeweging. Sleath (1978) onderzocht vervolgens hoe dit kon worden uitgebreid voor een golfbeweging. Dit is te zien in figuur 3.2.



Figuur 3.2: Sleath-diagram

Met behulp van dit diagram kan de kritieke schuifspanning worden gevonden voor een bepaalde korrelgrootte. De kritieke schuifspanning is de schuifspanning waarbij korrels precies op de grens zitten tussen stilstand en beweging. De afleiding hiervan gebeurt als volgt.

De korreldiameter wordt dimensieloos gemaakt:

$$d_* = d(\Delta g / v^2)^{1/3}, \text{ met } \Delta \text{ is de relatieve dichtheid.}$$

Vervolgens wordt uit de grafiek de mobiliteitsparameter ψ afgelezen. Die kan vervolgens worden omgezet in de kritieke schuifspanning:

$$\tau_c = \psi(\rho_s - \rho_w)gd$$

De kritieke snelheid wordt gevonden door de kritieke schuifspanning uit de volgende vergelijking te elimineren:

$$\tau_{c; \max} = \frac{1}{2} \rho_w f_w \hat{u}_{0;c}^2 \quad (\text{Jonsson 1966})$$

Hierin is f_w de bodemwrijvingscoëfficiënt.

Neem aan dat $f_w = 0,30$. Dan geldt, dat een korrel met een diameter van 100 μm al in beweging komt bij een orbitaalsnelheid van 0,04 m/s (zie bijlage H).

De grens voor het begin van bewegen is niet zo exact als de scherpe lijn in de grafiek doet vermoeden. De positie van de lijn is namelijk afhankelijk van hoe het begin van bewegen wordt gedefinieerd. Is dit bij een verplaatsende korrel of moeten alle korrels op het oppervlak voortdurend in beweging zijn? De definitie voor het begin van bewegen is dus een subjectieve keuze, die voor elk onderzoek weer anders kan zijn. Dit is ook te zien in figuur 3.2. Hierin zijn de resultaten van vier andere onderzoeken naar het begin van bewegen van basismateriaal getoond. Deze komen redelijk overeen met de Sleath-lijn. Om dit te bereiken zijn ze echter eerst met een correctiefactor vermenigvuldigd. Zodoende konden de verschillen in de bewegingscriteria worden weggewerkt.

• Verweking van loskorrelig materiaal

Onder invloed van een cyclische belasting kan een compactie van het basismateriaal ontstaan. Het gevolg is dat er minder water in de poriën past. Dit water zal uit de poriën stromen. Als het wegstromen van water langzamer gaat dan het compactieproces neemt de waterdruk in de poriën toe. Aangezien de totale grondspanning gelijk blijft, zal de korrelspanning afnemen. In sommige situaties kan dit net zo lang doorgaan tot de korrelspanning nul is. Als dit gebeurt, dan altijd onder een golfdal. Op dat moment treedt er momentane grondverweking op. Dit herhaalt zich bij elk golfdal tot de wateroverdruk is verdwenen. Tijdens verweking verandert de bovenste laag van het basismateriaal in een suspensie (Sakai et al. 1983) De volgende omstandigheden werken het tot stand komen van verweking in de hand (CUR 1992).

- Het basismateriaal is fijn, rond en losgepakt.
- Het basismateriaal is geologisch gezien erg jong, waardoor er nog geen verkitting tussen korrels is ontstaan.
- De amplitude, tijdsduur en frequentie van de belasting zijn groot.
- Er is nog maar weinig consolidatie opgetreden in het basismateriaal als gevolg van eerdere belastingen.
- De natuurlijke damping van het basismateriaal is laag.

Er zijn verschillende criteria opgesteld, die een grove indicatie geven of er verweking zal optreden in een bodemlaag (Ishihari en Yamazaki 1983, Sakai et al. 1992). In bijlage B zijn twee situaties getoetst aan deze criteria:

- een situatie die zich in de praktijk zou kunnen voordoen, met $H = 4 \text{ m}$, $T = 8 \text{ s}$ en $h = 10 \text{ m}$.
- een situatie in een golfgoet tijdens een experiment, met $H = 0,20 \text{ m}$, $T = 2 \text{ s}$ en $h = 0,5 \text{ m}$.

Er is aangetoond dat verweking onder normale omstandigheden kan voorkomen in een zandbodem. Verder wordt duidelijk dat er in de praktijk eerder verweking ontstaat dan in de

experimentele situatie in de golfgoot. Door de zandlaag in de experimenten een goede pakking te geven, kunnen de verwekingseffecten worden geminimaliseerd. De kans op verweking in de experimenten zal toch al klein zijn, omdat de overdrukken relatief snel uit de dunne laag kunnen wegvloeien (De Groot en Lindenberg 1994).

3.4.2 Het gedrag van basismateriaal met een filter

Het gedrag van basismateriaal met een filter onder een open wateroppervlak verschilt in twee belangrijke aspecten van de situatie zonder filter. Ten eerste moet de waterbeweging in de filterlaag doordringen, voordat zij invloed kan hebben op het basismateriaal. Bovendien moet het in beweging gebrachte basismateriaal naar de bovenkant van de filterlaag worden getransporteerd voor het definitief kan verdwijnen. De snelheid van dit transport is afhankelijk van het aantal botsingen tussen basis- en filterkorrels. Hoe fijner en dikker het filter, hoe meer dit transport wordt afgeremd (Wörman 1989).

In het geval van een stationaire stroming is de situatie op het grensvlak tussen basis- en filtermateriaal vooral afhankelijk van hoog- en laagfrequente turbulente snelheidsfluctuaties. Hoe dikker en fijner de filterlaag, hoe meer deze worden gedempt. De beide frequenties hebben een verschillende soort invloed op het bewegen van het basismateriaal. De hoogfrequente fluctuaties zorgen ervoor dat de toplaag van het basismateriaal wordt losgewoeld. De wervels zijn echter te klein om de korrels te transporteren. De laagfrequente fluctuaties daarentegen zijn in staat om het losgewoelde materiaal te transporteren naar de bovenkant van de laag (Van Os 1998). Het kan worden verwacht dat deze turbulente snelheidsfluctuaties ook van belang zijn in een filterlaag onder invloed van oscillerende stroming.

3.4.3 De zakking van filterstenen in het basismateriaal

De beweging van basismateriaal in een zakkingsfilter heeft als gevolg dat de filterstenen hun ondersteuning verliezen en gaan zakken. De beweging van basismateriaal kan zoals eerder gesteld op twee manieren plaatsvinden, door uitschuring en door verweking.

In het geval van uitschuring ontstaan er tussen de stenen kleine ontgrondingskuiltjes. Het ondersteuningsoppervlak van een steen wordt dus steeds kleiner. Op een gegeven moment is de ondersteuning zo klein, dat het basismateriaal het gewicht van de steen niet meer kan dragen en afschuift. Het gevolg is dat de steen zakt.

Bij verweking verandert de bovenste laag van het basismateriaal in een suspensie. Gezien het feit dat een steen zwaarder is dan zo'n suspensie zal hij daarin wegzinken.

Er is meerdere malen onderzoek gedaan naar de invloedsfactoren op de zakking van één enkele steen in basismateriaal onder invloed van een cyclische belasting (Van Niekerk 1993). Uit experimenten, waarbij een steen in een goot met golven werd belast, bleek:

- De zakking verloopt sneller bij een hogere orbitaalsnelheid aan de bodem.
- Een grotere dichtheid van de steen zorgt voor een sneller zakkingsverloop.
- Kleine stenen zakken sneller dan grote stenen.
- Hoe ruwer de steen, hoe langzamer hij zakt.

Eerder waren er al experimenten met een betonnen blok uitgevoerd, dat alleen was belast met een cyclisch variërende waterdruk (Maeno en Nago 1988). Dit werd gedaan om de invloed van verweking op de zakking geïsoleerd te kunnen onderzoeken. Verweking van de zandbodem trad alleen op naast de steen. Onder de steen was dit niet het geval, omdat de grond daar onder invloed stond van de bovenbelasting van de steen. De verweking van de zandbodem naast de steen veroorzaakte wel zijdelingse bewegingen van de basiskorrels onder de steen. Zodoende zakte het blok toch. De invloedsfactoren op de zakking waren:

- Hoe groter het bodemoppervlak van het blok is, des te kleiner zal de zakking zijn.
- Hoe groter het gewicht van de steen is, des te groter zal de zakking zijn.
- Een grotere drukamplitude geeft een grotere zakking.
- Er is een onduidelijke invloed van de belastingsfrequentie.
- Een kleine toename in de porositeit van het zandbed geeft een grote toename in de zakking.
- Het zakkingsstempo neemt af naarmate de steen dieper in het bodemmateriaal is ingegraven.

De resultaten van het modelonderzoek naar een laag filterstenen geeft resultaten die gedeeltelijk verklaard kunnen worden met de resultaten van bovengenoemde twee onderzoeken en gedeeltelijk met de theorie over golfdoordringing in een filterlaag. In dit onderzoek zijn de zakkings van de bovenkant van de steenlaag gemeten ten gevolge van erosie door golfbelasting. Er is aangetoond, dat een grotere zakking optreedt bij een dunnere filterlaag, een grotere d_{50} van de filterlaag en een hogere golf (Caus 1998).

3.5 Tijdsafhankelijke veranderingen in het zakkingsfilter

Uit experimenteel lange-duur onderzoek (Caus 1998) blijkt dat de zakkingsnelheid van een zakkingsfilter afneemt in de tijd. Ook in de onderzoeken naar de zakking van één enkele steen wordt dit aangetoond. Er treden verschillende tijdsafhankelijke veranderingen op in het zakkingsfilter. Sommige daarvan hebben een waarneembare invloed op de zakkingsnelheid. Ondanks het feit dat de meeste van deze invloeden een remmend effect hebben op de zakking, is een evenwicht, waarbij de zakking niet meer toeneemt, nooit aangetoond. In dit hoofdstuk zullen de belangrijkste tijdsafhankelijke veranderingen worden behandeld. Kwalitatief is een onderscheid gemaakt tussen de verschillende termijnen waarop ze een rol spelen.

Zeer korte termijn veranderingen:

- Uitspoeling van het fijnste basismateriaal

Als er een waterbeweging is, die in de buurt ligt van de kritische waterbeweging, zullen eerst de fijnste deeltjes van het basismateriaal wegspoelen. Er blijft een bovenlaag achter van iets grovere korrels. Deze grove korrels houden onderliggende fijnere korrels weer tegen. Dit verschijnsel wordt ook wel pantsring genoemd. Pantsring is van belang voor een begin-gradering die voldoet aan $d_{84}/d_{50} > 2,5$. De erosiediepte tijdens de vorming van een pantserlaag is vrij gering en bedraagt 2 à 4 d_{50} . Zij is dus van een verwaarloosbare invloed op de totale zakking van de filterlaag (Gessler 1970).

- Verhoging van de zandconcentratie in de filterlaag.

Er kan een onderscheid worden gemaakt tussen bewegende en niet-bewegende basiskorrels in het zakkingsfilter. De bewegende basiskorrels in de filterlaag geven een verhoogde weerstand aan de waterbeweging. Een verhoging van de zandconcentratie heeft dus een remmende invloed op de watersnelheden en dus ook op het in beweging komen van nieuw basismateriaal (Den Adel 1989).

Korte termijn veranderingen:

- Ribbelvorming op het oppervlak van de basislaag

Een vlakke, horizontale basislaag houdt niet lang stand onder invloed van golven. Door de heen en weer gaande waterbeweging ontstaan er ribbels. Het gevolg is een hogere bodemweerstand. De waterbeweging op het grensvlak tussen basis- en filterlaag zal hierdoor enigszins veranderen en zo ook het transport van basismateriaal (Van Rijn 1990).

Lange termijn veranderingen:

- De zakking van de bovenkant van de filterlaag.

De bovenkant van de filterlaag zakt onder invloed van de penetratie van de onderste filterstenen in de basislaag. Bovendien zal er een zetting optreden van de basislaag onder invloed van bovenbelasting. Deze zetting zorgt ervoor dat het niveau van de bovenkant van de filterlaag nog dieper komt te liggen in vergelijking tot de waterspiegel. De waterdiepte zal dus langzaam toenemen in de tijd. Uit de lineaire golftheorie kan worden afgeleid, dat de orbitaalsnelheden, die als gevolg van de golven op het filter werken, minder groot worden. Vooral in ondiep water is dit remmende effect op de zakkingsnelheid relevant.

- Penetratie van de onderste filterstenen in de basislaag.

De zakking van de filterlaag wordt voor een groot deel veroorzaakt door penetratie van de onderste filterstenen in de basislaag. In een pas aangelegd zakkingsfilter zijn deze stenen nog niet zo ver in de basislaag doorgedrongen. Er is dan maar weinig transport van basismateriaal nodig om deze penetratie te laten toenemen. Naarmate de penetratie van de stenen in de basislaag echter vordert, zal er echter een steeds groter volume aan basismateriaal moeten worden verplaatst om tot een gelijke zakkingsstoeiname te komen. Bovendien neemt het oppervlak waarover de filterstenen en het basismateriaal elkaar raken toe, zodat er minder basismateriaal aan de invloed van een erosieve waterbeweging kan worden blootgesteld. De zakkingsnelheid zal hierdoor dus afnemen.

Anderzijds neemt de afstand tussen de basislaag en de bovenkant van de filterlaag ook af. Dit betekent dat de dikte van de beschermende filterlaag afneemt. Deze dikte-afname heeft een klein positief effect op de zakkingsnelheid.

- Ontmenging van de filterlaag.

Tijdens proeven met een zakkingsfilter is een ontmenging van de stenen in de filterlaag waargenomen (Caus 1998). Ontmenging is het proces dat een scheiding veroorzaakt tussen fijne en grove stenen in een filterlaag. Door zakking van de laag en de interne waterbeweging

treden er kleine verschuivingen op tussen de stenen. Daarbij krijgen de fijnere stenen soms de ruimte om tussen de grovere stenen te zakken. Deze ontmenging kan leiden tot een verandering in filtereigenschappen, zoals de dikte en de porositeit. Het is helaas nog niet duidelijk in welke mate deze filtereigenschappen kunnen veranderen.

Zeer lange termijn veranderingen:

- De geologische geschiedenis van het basismateriaal

Naarmate de tijd vordert, verandert de opbouw van het basismateriaal. Er kan een zekere verkitting ontstaan, waardoor het moeilijker wordt voor een korrel om in beweging te komen. Bovendien wordt de pakking van de basiskorrels steeds dichter, zodat verweking minder vaak zal optreden. Dit heeft in beide gevallen een negatief effect op de zakkingsnelheid van de bovenkant van het filter (CUR 1992).

3.6 Conclusie

Uit § 3.3 blijkt dat de snelheden en verhangen boven het filter ten gevolge van een golfbelasting goed kunnen worden voorspeld. Wat er in de filterlaag gebeurt met de golfbelasting is minder duidelijk, omdat de effecten van turbulentie en demping niet goed kunnen worden ingeschat. In § 3.4 is getoond dat er over het in beweging komen van basismateriaal zonder filter duidelijke theorieën bestaan. Het is echter moeilijk te voorspellen wat de invloed ervan is in aanwezigheid van een filterlaag. § 3.5 laat zien dat veel tijdsafhankelijke factoren een rol gaan spelen bij transport van basismateriaal.

De onduidelijkheden in het gedrag van een zakkingsfilter onder invloed van golfbelasting zijn te splitsen in twee deelproblemen. Deze zijn:

1. Bij welke golfbelasting treedt er voor het eerst beweging van het basismateriaal op in een bepaald soort zakkingsfilter?
2. Hoe groot is het transport van basismateriaal bij een grotere golfbelasting en hoe ontwikkelt dit zich in de tijd?

Dit onderzoek zal zich vooral richten op de eerste vraag. Door middel van experimenteel onderzoek kan voor diverse soorten zakkingsfilters worden gemeten bij welke kritieke golfbelasting het begin van erosie ligt. Omdat tijdsafhankelijke processen bij het begin van bewegen nauwelijks een rol spelen, kan het zakkingsfilter daarbij steeds als een niet veranderende “black box” worden benaderd.

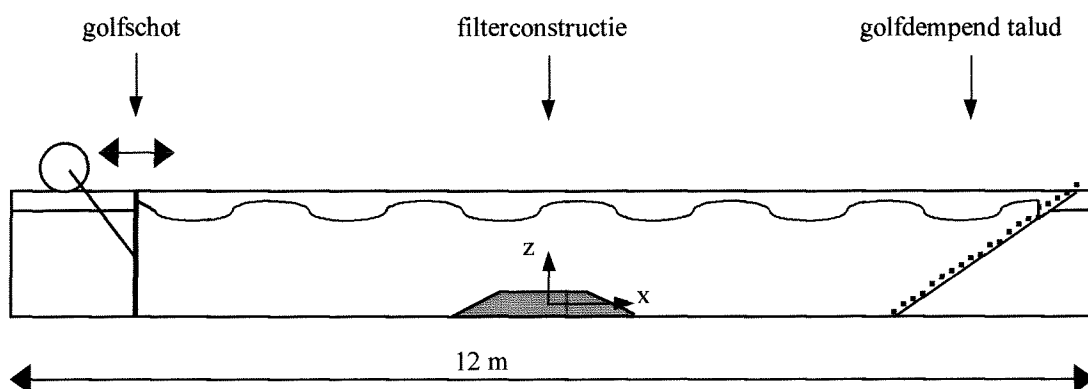
Om iets te kunnen zeggen over het gedrag van een zakkingsfilter, waarin een zekere mate van transport van basismateriaal optreedt, moet eerst voldoende inzicht worden verkregen in twee andere problemen. Ten eerste is dit de bovengestelde vraag 1: “Bij welke belasting begint de erosie?”. Ten tweede moet de invloed van de in § 3.5 beschreven tijdsafhankelijke processen beter worden begrepen. Omdat dit tweede vraagstuk erg complex is, zal deze studie slechts een kleine bijdrage kunnen leveren aan de oplossing hiervan.

4. Beschrijving van de experimenten

4.1 Inleiding

Om antwoord te geven op de in § 3.6 gestelde vragen is experimenteel onderzoek verricht in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Subfaculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Door middel van proeven in de korte speurwerkgoet is geprobeerd om meer inzicht te krijgen in het begin van bewegen van basismateriaal onder invloed van golven. Daartoe is voor verschillende situaties geprobeerd om vast te stellen hoe groot de kritieke golfhoogte is.

In dit hoofdstuk zal worden uiteengezet hoe deze experimenten zijn uitgevoerd. Eerst zal worden beschreven hoe de meetopstelling in de goet is opgebouwd, uit welke materialen deze bestaat en welke meetinstrumenten er zijn gebruikt. Dan worden enkele voorbereidende proeven beschreven. Om de erosie van basismateriaal uit het zakkingsfilter te kunnen meten is een erosieproef bedacht, die constant kan worden herhaald voor steeds wijzigende situaties. In § 4.4 zal de werkwijze tijdens een erosieproef stapsgewijs worden uitgelegd.



Figuur 4.1: Schematische weergave van de stroomgoot

4.2 De proefopstelling

4.2.1 De inrichting van de stroomgoot

Alle experimenten zijn uitgevoerd in een 12 meter lange stroomgoot met een breedte van 50 cm en een hoogte van 70 cm. (zie figuur 4.1) Door middel van een golfschot kunnen golven worden opgewekt. Op zo'n 5 meter afstand van het golfschot is een kleine filterconstructie gebouwd. Aan het einde van de goet is een flauw, ruw talud aangebracht, dat de reflectie van golven tot een minimum beperkt.

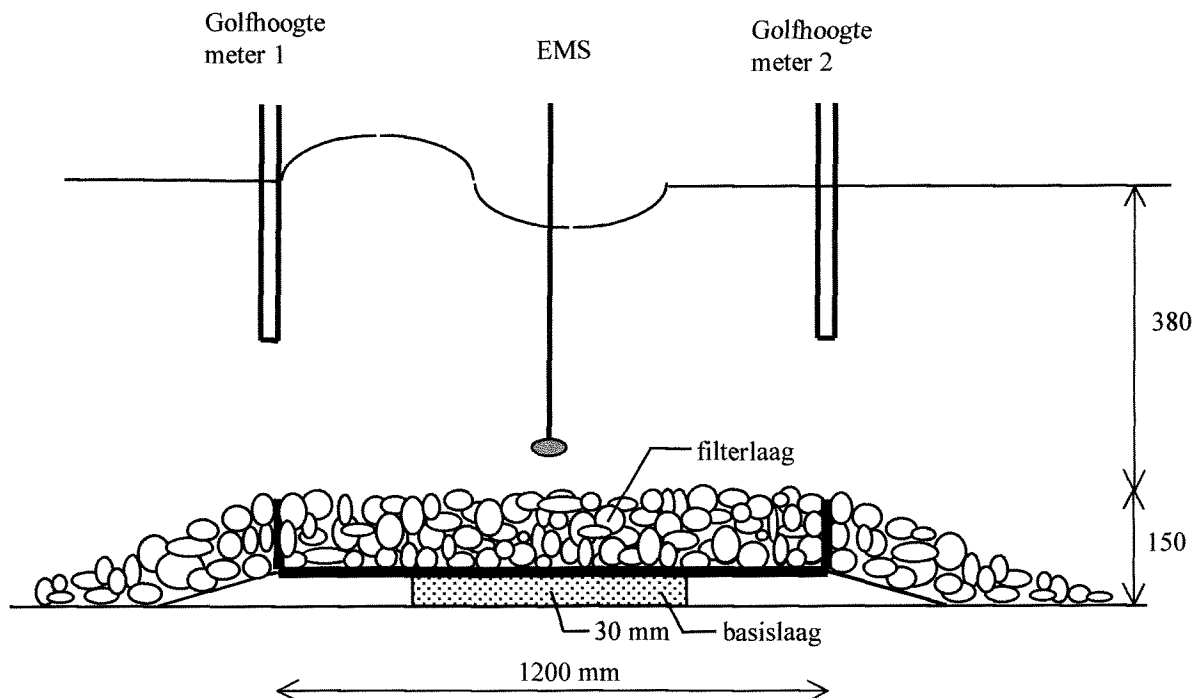
Er is een assenstelsel gedefinieerd met als oorsprong het midden van de bovenkant van de zandlaag. De x-as loopt in de golfvoortplantingsrichting. De y-as staat hier loodrecht op in het horizontale vlak. De z-as loopt verticaal omhoog.

4.2.2 De filterconstructie in de stroomgoot

De filterconstructie ziet er in eerste instantie als volgt uit (zie figuur 4.2). Als basis is er een verhoogde bodem van 3 cm dik en 120 cm lang. Om geen abrupte overgang te krijgen met de bodem van de goot is aan weerszijden van de verhoogde bodem een klein talud gemaakt met een lengte van 20 cm. In het midden van deze cementen bodem bevindt zich een uitsparing van 80 bij 25 cm, die net als de verhoogde bodem 3 cm diep is. In deze uitsparing wordt zand aangebracht.

Hierboven bevindt zich de filterlaag. Dit is een 12 cm dikke laag stenen die de gehele verhoogde bodem bedekt. Ook de dikte van deze filterlaag mag niet abrupt verlopen. Om de golfbeweging zo min mogelijk te verstoren is daarom aan beide kanten de filterdikte over een afstand van 50 cm geleidelijk verminderd tot nul.

Boven de filterconstructie staan drie meetinstrumenten opgesteld. Precies boven het midden van het filter staat een electro-magnetische snelheidsmeter opgesteld. De probe hiervan bevindt zich op twee cm boven de bodem. Zowel 60 cm voor als 60 cm achter dit meetinstrument staan twee golfhoogtemeters opgesteld.



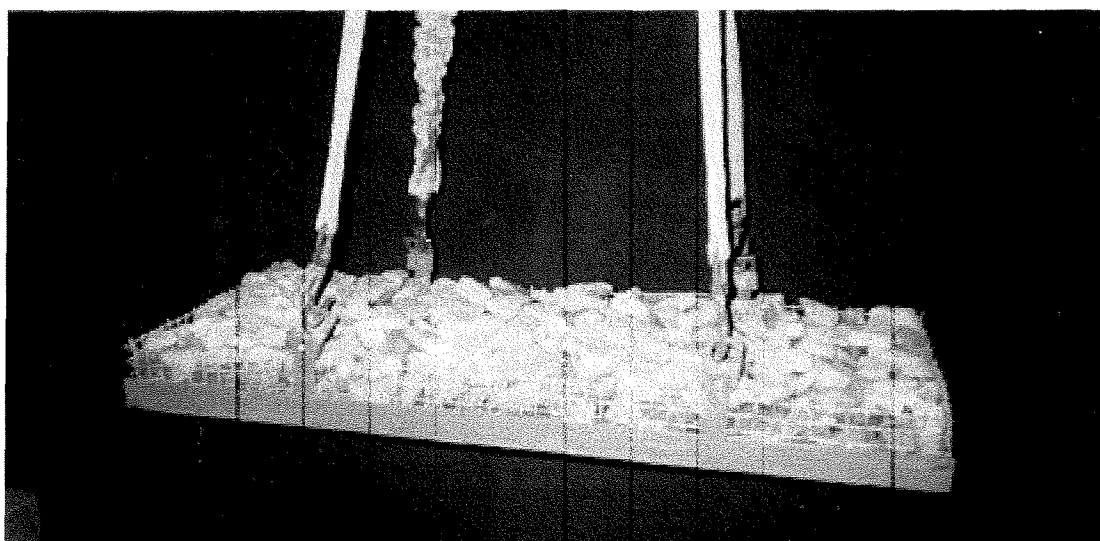
Figuur 4.2: Schematische tekening van de filterconstructie in de stroomgoot (lengteschaal is vertrokken)

Tijdens de proeven worden twee soorten filtermateriaal en één soort basismateriaal gebruikt. De eigenschappen van dit filter- en het basismateriaal zijn uit monsters bepaald en zijn te vinden in tabel 4.1. In bijlage C is te zien hoe de graderingen van deze materialen eruit zien.

Tabel 4.1: eigenschappen filter- en basismateriaal

	Basismateriaal	filtermateriaal A	Filtermateriaal B
soort materiaal	zand	stenen	stenen
nominale diameter	100 μm	3,75 cm	1,99 cm
wijdte (d_{85}/d_{15})	1,54	1,25	1,28
dichtheid	2650 kg/m ³	2550 kg/m ³	2540 kg/m ³
porositeit	$\pm 0,4$	0,42	0,39
vormfactor (l/t)	n.v.t.	2,5	2,5

Tijdens de erosieproeven zijn de stenen boven de verhoogde bodem verpakt in een kooiconstructie (zie figuur 4.3). Dit is een met hoekstalen versterkte gazen bak. De mazen van het gaas zijn iets kleiner dan de nominale steendiameter. De afmetingen zijn 20 * 20 mm en 15 * 15 mm, respectievelijk voor filtermateriaal A en B. De kooi weegt gevuld met stenen zo'n 100 kilo en kan met een kraan in en uit de goot worden gehesen.



Figuur 4.3: de filterkooi, gevuld met filtermateriaal A

Deze filterkooi heeft vier voordelen boven los aangebrachte stenen.

1. De stenen kunnen in een keer uit de goot worden verwijderd. Dit levert een tijdsbesparing op ten opzichte van het met de hand weghalen van de stenen.
2. De basislaag wordt minder beschadigd tijdens het weghalen van het filter. Bij de erosiemetingen in de zandlaag is het namelijk van belang, dat het uitschuringsprofiel nauwkeurig kan worden waargenomen.
3. De filterlaag zakt niet mee met de basislaag. Het totale stromingsbeeld rond het filter zal daardoor dan niet veranderen tijdens een erosieproef.
4. De steenstapeling van de filterlaag blijft constant. Los aangebrachte steenlagen kunnen nooit precies worden gereproduceerd. Dit heeft een nadelige invloed op de nauwkeurigheid van de meetresultaten.

Het nadeel van de filterkooi is uiteraard dat deze een stapje verder staat van de situatie in werkelijkheid. Er wordt echter aangenomen dat de randeffecten verwaarloosbaar zijn. Deze aanname is gebaseerd op twee feiten. Ten eerste zijn de openingen in het gaas relatief groot ten opzichte van de poriën in het steenpakket. Verder zijn de hoekprofielen kleiner dan de d_{50} van de filterstenen.

4.2.3 De meetinstrumenten

Bij de experimenten worden twee golfhoogtemeters en een electro-magnetische snelheidsmeter gebruikt. De werking van deze instrumenten zal nu worden uitgelegd.

- **de golfhoogtemeter**

De uitwijkingen van de waterstand kunnen worden gemeten met een golfhoogtemeter. Het werkingsprincipe is gebaseerd op de geleidendheid van water. Met behulp van een dataverwerkingsprogramma kunnen de golfperiode en de golfhoogte uit het meetsignaal worden herleid.

- **de elektro-magnetische snelheidsmeter**

De golfbeweging veroorzaakt orbitaalsnelheden in het water. Deze kunnen worden gemeten met een elektro-magnetische snelheidsmeter (EMS). Een EMS meet spanningsvariaties, die kunnen worden omgerekend naar watersnelheden.

4.3 Resultaten van de voorbereidende proeven

Voordat er aan de erosieproeven is begonnen zijn er eerst een paar voorbereidende proeven uitgevoerd. Deze hadden twee doelen. Ten eerste geven ze aan in hoeverre bepaalde theoretische veronderstellingen experimenteel worden bevestigd. Ten tweede wordt duidelijk of bepaalde handelingen tijdens de experimenten invloed hebben op de mate van erosie.

4.3.1 De golfbeweging in de goot

De golfbeweging in de goot kan worden opgewekt met behulp van een door een elektromotor aangedreven golfschot. Het golfschot kan op drie manieren worden versteld. De verstelbare grootheden zijn de stand van het schot, het toerental en de slaglengte. Ze bepalen respectievelijk de vorm, de periode en de hoogte van de golf.

De eerste voorbereidende proef is het testen van de golfopwekking in de goot. Voor alle situaties is het verloop van de golf gemeten voor verschillende instellingen van het golfschot. Het zand in de meetopstelling is daartoe vervangen door een opvulplaat of afgedekt met doeken. De resultaten van de golfopwekkingstesten zijn te zien in bijlage D.

In § 4.2.2 is reeds vermeld dat de golfhoogte op twee plekken wordt gemeten. Uit proeven blijkt dat het gemiddelde van de twee gemeten golfhoogtes goed overeenkomt

met de golfhoogte er precies tussenin. In het vervolg zal steeds alleen naar deze gemiddelde golfhoogte gekeken worden.

De golfhoogte is altijd recht evenredig met de slaglengte van het golfschot. Het verband tussen de slaglengte en de golfhoogte is sterk periode-afhankelijk. De filterdimensies hebben ook een kleine invloed op de hoogte van de golf bij een bepaalde instelling.

Verder wordt een geringe verandering van de golfhoogte waargenomen over de lengte van het filter. Hiervoor zijn verschillende oorzaken aan te wijzen. Ten eerste heeft het steenpakket een dempende werking op de golfhoogte. Dit komt enerzijds door de porositeit en anderzijds door de ruwheid van het steenpakket. Verder zorgt de plaatselijke verlaging van de waterdiepte voor hogere golven boven het filter. Tenslotte heeft de reflectie van het eindtalud effect op de golfhoogte.

De maximale orbitaalsnelheid aan de bodem is recht evenredig met de golfhoogte. Tussen de gemeten snelheden en de volgens de lineaire golftheorie berekende snelheden blijkt echter een verschil te bestaan. Dit verschil varieert tussen nul en twintig procent. Dit komt voornamelijk door de verschillen tussen de golf in de goot en de geschematiseerde golf in de theorie. In de lineaire golftheorie wordt bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de poreuze bodem. Een andere oorzaak voor het verschil is dat de snelheid twee centimeter boven de bodem wordt gemeten en dus niet precies op de bodem.

Zowel de stenen van filtermateriaal A als van filtermateriaal B bewegen af en toe op hun plaats door een instabiele ligging. De golfbeweging heeft echter nooit een verplaatsing van een of meerdere stenen tot gevolg. Er treedt ook geen ontmenging op in de filterstenen.

4.3.2 De opbouw van de proeven

Na de experimenten met de golfopwekking is de opvulplaat vervangen door een zo dicht mogelijk gepakt vlak zandbed. Met dit zandbed zijn twee voorbereidende experimenten uitgevoerd. Eerst is in een droge goot de filterkooi op het zandbed geplaatst.

Na het vervolgens weer verwijderen van de filterkooi blijkt een afdruk van het gaas zichtbaar te zijn in het zand. Dit betekent, dat de filterkooi in contact staat met het zand en dat de eerste erosie in een proef daar dus invloed van zal ondervinden.

Het tweede deel van dit experiment is bijna identiek aan het eerste. Nu wordt de goot echter langzaam gevuld tot het waterniveau van 53 cm om haar vervolgens weer in hetzelfde tempo te ledigen. Zowel het vullen als het ledigen duurt zo'n 20 minuten. De watersnelheid boven het filter komt hierbij geen enkele keer boven de 0,02 m/s. Ook nu is de gaasafdruk de enige zichtbare verandering in het zandbed. Er kan geconcludeerd worden, dat zowel het plaatsen van de filterkooi als het langzaam vullen en ledigen van de goot geen invloed hebben op de erosie.

4.4 De werkwijze tijdens de erosieproeven

De erosieproeven hebben als doel om te onderzoeken bij welke golfbelasting de grens ligt van het begin van bewegen van basismateriaal. Dit zal iteratief worden uitgezocht voor een aantal verschillende situaties.

De procedure tijdens een erosieproef is als volgt:

1. Er wordt begonnen met een droge goot. In de uitsparing in de verhoogde bodem wordt echter water gezet om deze in natte toestand te kunnen vullen met zand. Om de invloed van verweking op de erosieproef te minimaliseren, wordt de zandlaag zo dicht mogelijk gepakt (zie bijlage B). Bij alle proeven wordt gepoogd om de pakking ongeveer constant te houden. Pas als de zandlaag de goede pakking heeft en is gladgestreken, kan de opbouw van de proef worden vervolgd.
2. De filterkooi wordt op de verhoogde bodem geplaatst. Tegen de beide uiteinden wordt een talud gemaakt van losse filterstenen. Tussen de filterkooi en de glazen gootwand worden tempex plaatjes aangebracht om lekkage van basismateriaal langs de gootwanden te voorkomen.
3. De goot wordt gevuld met water tot een constant niveau van 53 cm. Dit mag niet te snel gebeuren, omdat er tijdens het vullen nog geen erosie mag optreden in de zandlaag. (zie § 4.3.2)
4. Het golfschot wordt ingesteld op een bepaalde golfperiode en golfhoogte. De EMS en de golfhoogtemeters worden geplaatst en geijkt in stilstaand water.
5. De ingestelde golf wordt drie uur lang opgewekt.
6. Hierna wordt de goot weer langzaam geleegd. Ook nu mag de stroming het basismateriaal niet meer in beweging brengen.
7. Als de goot leeg is, wordt de filterkooi voorzichtig verwijderd.
8. De zandlaag is nu weer zichtbaar. Op 12 vaste posities wordt de erosiediepte gemeten met een peilnaald. Verder wordt er een schatting gemaakt van het totale erosievolume door het zand glad te strijken en de gemiddelde diepte te meten.

Deze procedure neemt in totaal zo'n 5 uur in beslag en wordt bij een gelijk blijvende periode steeds herhaald. Hierbij wordt de golfhoogte net zolang gevarieerd totdat duidelijk is bij welke golfhoogte er net geen erosie meer optreedt van de basislaag. Daarna wordt dit nog een paar keer herhaald voor drie andere golfperiodes. Het geheel wordt gedaan voor vier verschillende situaties:

- een 12 cm dikke filterlaag opgebouwd uit filtermateriaal A
- een 12 cm dikke filterlaag opgebouwd uit filtermateriaal B
- een 6 cm dikke filterlaag opgebouwd uit filtermateriaal B
- geen filterlaag

In het geval van de 6 cm dikke filterlaag zal de verhoogde bodem 6 cm worden opgehoogd. De uitwendige filtergeometrie blijft op deze manier gelijk. De golfbeweging verandert nu zo min mogelijk ten opzichte van de situatie met een 12 cm dikke filterlaag.

5. Resultaten van de experimenten

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de in hoofdstuk 4 beschreven erosieproeven behandeld. Er zijn uiteindelijk 75 van dit soort proeven uitgevoerd. In § 5.2 worden de waarnemingen van de erosieproeven behandeld. In § 5.3 zal worden beschreven hoe hieruit het begin van bewegen van basismateriaal is bepaald.

5.2 Resultaten van de erosieproeven

5.2.1 Waarnemingen tijdens de proeven met een filter

Tijdens de drie uur durende golfbelasting is er weinig zichtbaar in de goot. De enige dingen, die kunnen worden waargenomen, zijn zandribbels die ontstaan aan weerszijden van de filterconstructie. Dit zand, dat uit het meetgebied is weggespoeld, maakt kleine heen-en-weer gaande bewegingen in dezelfde frequentie als de golfbeweging.

Na verwijdering van de filterkooi kan worden bekeken wat er met de zandlaag is gebeurd (zie figuur 5.1). In de zandlaag is een zekere mate van erosie opgetreden. De hoeveelheid erosie hangt af van de golfhoogte. Er zijn kwalitatief drie toestanden onderscheiden waarvoor de waarnemingen aan het zandbed worden beschreven:

- **Toestand 1: begin van beweging van basismateriaal**

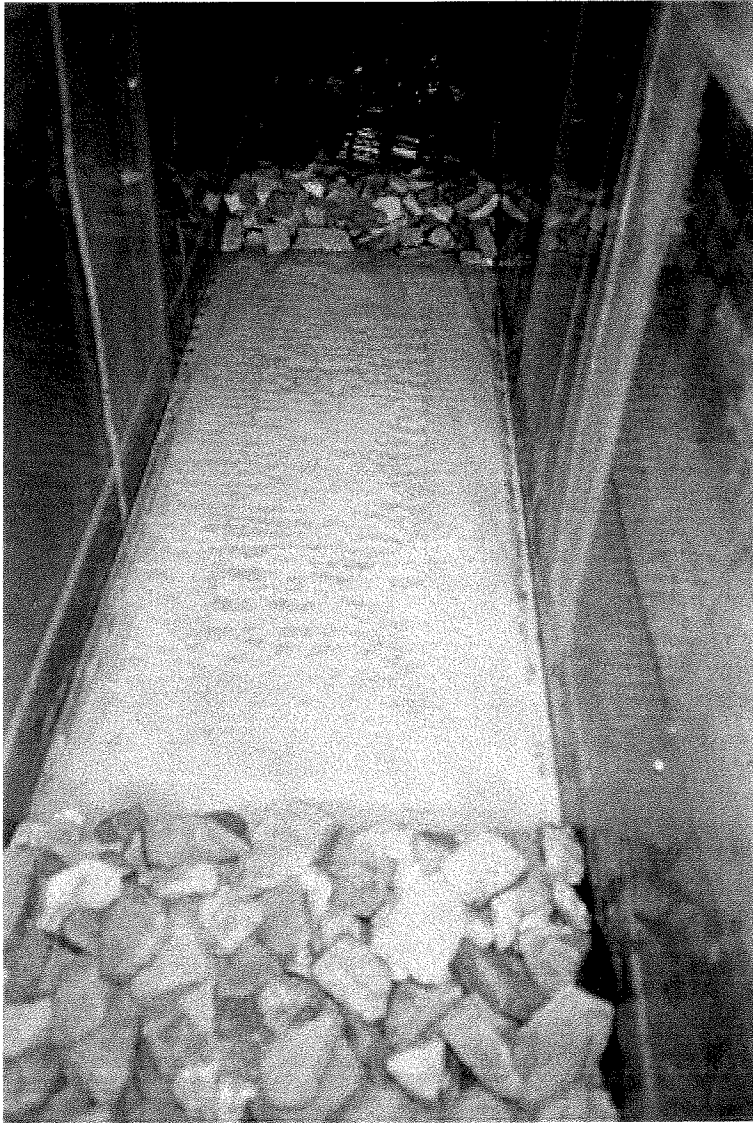
De gaasafdruk is over bijna het gehele bed zichtbaar. Verder zijn overal kleine hobbels waarneembaar, die waarschijnlijk worden veroorzaakt door snelheidsverschillen onder de stenen. Er zijn kleine ribbels gevormd. Deze zijn echter moeilijk te onderscheiden van de hobbels.

- **Toestand 2: enige beweging van basismateriaal**

In het midden van het bed is de gaasafdruk zichtbaar. Daar is de doorbuiging van de filterkooi immers het grootst en de invloed van randeffecten het kleinst. De ribbels zijn langer en dieper dan voor de toestand van begin van beweging. De toppen van de ribbels bevinden zich op dezelfde hoogte als de rand of iets daarboven. Ze zijn vooral aan de grenzen van de zandbak duidelijk te onderscheiden van de eerder genoemde hobbels.

- **Toestand 3: veel beweging van basismateriaal**

De gaasafdruk is niet meer zichtbaar. De ribbels zijn lang en diep. Als er een sterk verloop is van de golfhoogte over de filterlaag is dit ook waar te nemen in de dieptes van de ribbels. De toppen van de ribbels liggen enkele millimeters onder de rand.



Figuur 5.1: Het zandbed aan het einde van een experiment

5.2.2 Waarnemingen tijdens de proeven zonder een filter

De waarnemingen die bij de proeven zonder een filter zijn gedaan, komen redelijk overeen met de bovenstaande waarnemingen, maar er zijn ook een paar belangrijke verschillen. Een gaasafdruk is uiteraard niet zichtbaar. En in de situatie zonder een filter zijn de ribbels die ontstaan een stuk regelmatiger dan in de situatie waarbij wel een filter is toegepast. Het grote voordeel van de proeven zonder filterlaag is dat het zandbed gedurende de drie uur durende golfbelasting zichtbaar is. Dit betekent dat het verloop van de erosie in de tijd te volgen is. De waarnemingen zullen nu worden beschreven voor dezelfde drie toestanden als in § 5.2.1.

- **Toestand 1: begin van beweging van basismateriaal**

Aan het oppervlak van het zandbed maken zandkorrels kleine heen-en-weer gaande bewegingen. Deze kunnen aan de grenzen van het zandbed resulteren in kleine ribbels.

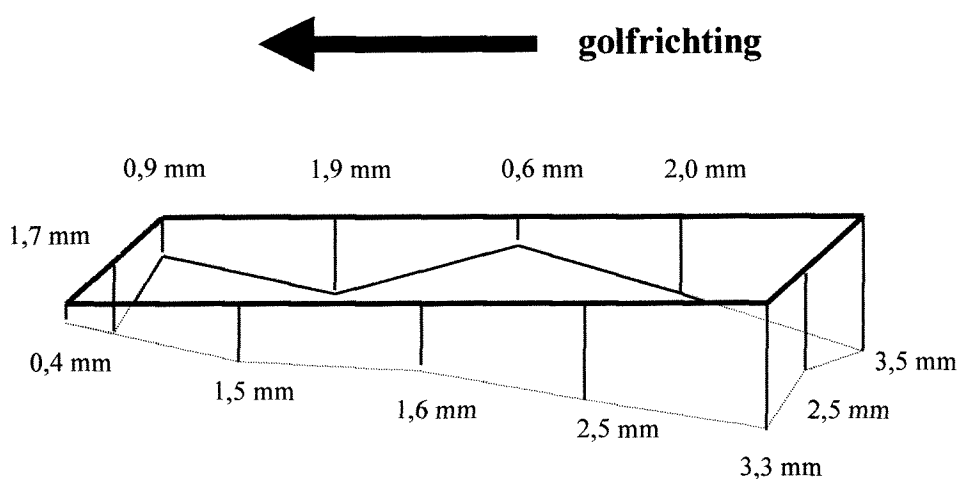
- **Toestand 2: enige beweging van basismateriaal**

Aan de grenzen van het zandbed ontstaan kleine ribbels. Deze ribbels breiden zich langzaam uit naar het midden van het zandbed. Dit kan gepaard gaan met een dunne zandsuspensiewolk. Als de proef na drie uur wordt beëindigd, is het midden van het zandbed nog steeds vlak.

- **Toestand 3: veel beweging van basismateriaal**

Er worden al snel ribbels zichtbaar aan de voor- of aan de achtergrens van het zandbed. Na enkele minuten is een zandsuspensiewolk zichtbaar van enkele centimeters boven het bed. De ribbels breiden zich nu langzaam uit naar het nog vlakke zandbed. Bestaande ribbels worden langzaam dieper. Langs de randen zijn turbulente neren zichtbaar die het erosieproces lijken te versnellen. Het is duidelijk zichtbaar dat de snelheid waarmee het erosieproces verloopt afneemt in de tijd. Als na drie uur de golfbelasting wordt stilgezet, is deze snelheid aanzienlijk gedaald, maar is de erosie nog niet gestopt.

Het geërodeerde zand verspreidt zich zowel met de golfrichting mee, als tegen de golfrichting in. Er komt echter meer zand achter de filterconstructie terecht, dan ervoor. In het algemeen is het zandtransport in de richting van de golven dus het grootst. Dit is ook goed te zien in figuur 5.2. Hierin zijn de gemiddelde erosiedieptes op 12 posities weergegeven. Neem aan dat de eroderende werking van de golven overal hetzelfde is. Als het netto-zandtransport zich in de golfrichting voordoet, zal de aanvoer van zand groter zijn, naarmate men zich in de richting van de golf over het zandbed verplaatst. De door deze erosie op een bepaalde positie ontwikkelde kuil zal dieper zijn naarmate de aanvoer van zand minder is. De erosiedieptes zullen dus kleiner worden in de richting van de golven. Dat laatste is duidelijk zichtbaar in de figuur.



Figuur 5.2: gemiddelde dieptes van de erosiekuilen op 12 posities in het zandbed

5.2.3 Bepaling van een maat voor de erosie

Uit de waarnemingen moet een kwantitatieve maat worden gevonden voor de hoeveelheid erosie van basismateriaal. Bij elk experiment wordt dit op twee manieren bepaald:

1. Meting van de gemiddelde erosiediepte over 12 vaste punten.

Op de vier hoekpunten van de zandbak en acht andere vaste punten langs de rand worden de dieptes gemeten van het erosieprofiel. Hier wordt vervolgens het gemiddelde van berekend. De meetpunten zijn overigens uit puur praktische overwegingen aan de randen gekozen. Visueel is vastgesteld, dat dit een representatieve maat is voor de gemiddelde erosiediepte over het gehele zandbed.

2. Meting van het zandvolume dat verdwenen is uit de meetsectie.

Het erosieprofiel wordt zo vlak mogelijk gemaakt. Vermenigvuldiging van de gemiddelde diepte met het oppervlak van de zandbak geeft het volume aan zand dat is verdwenen oftewel het erosievolume.

In bijlage E worden de kwantitatieve resultaten van alle erosieproeven getoond.

5.3 Bepaling van het begin van bewegen van basismateriaal

Er kan geen scherpe grens worden getrokken tussen het wel- en niet-bewegen van basismateriaal onder een filterlaag. Om te bepalen welke golfhoogte bij het begin van bewegen hoort, moet eerst een definitie worden gegeven van het begin van bewegen. In dit geval wordt het begin van bewegen gedefinieerd als de golfhoogte waarbij er geen waarneembaar erosievolume is in het zandbed. Dit komt ongeveer overeen met toestand 1 uit § 5.2. Uit de metingen wordt dit als volgt herleid:

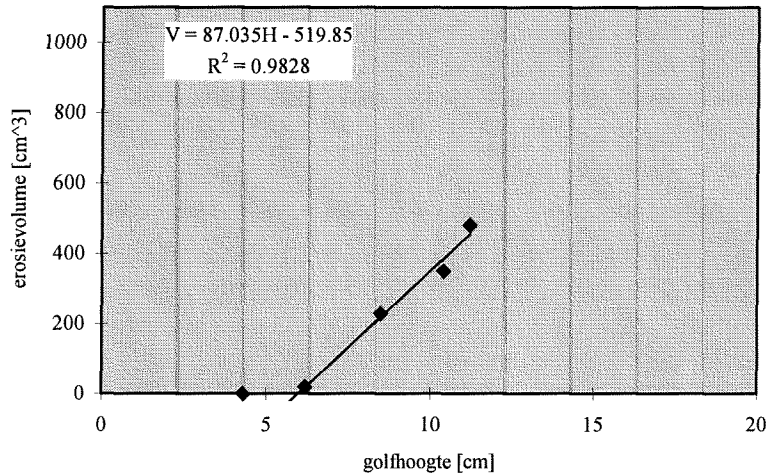
- De kritieke golfhoogte is minimaal de grootste golfhoogte waarbij het erosievolume gelijk is aan nul.
- De kritieke golfhoogte is maximaal de eerstvolgende golfhoogte.
- In dit domein wordt de kritieke golfhoogte bepaald. Dit gebeurt door alle erosievolumes tot 1000 cm^3 lineair te extrapoleren naar nul.

Het erosievolume van 1000 cm^3 is een geschatte grens tot welke er geen significante veranderingen optreden in erosiemechanismen. Dit betekent dat de gemiddelde erosiediepte 5 mm is. Bij een grotere erosie mag een meetpunt niet meer worden gebruikt om het begin van bewegen te bepalen, omdat andere erosiemechanismen een belangrijke rol gaan spelen. De mechanismen die dan een rol gaan spelen zijn wervels langs de opstaande randen van het zandbed, onderspoeling door de ruimte tussen het zand en de filterkooi en in extreme gevallen een vermindering van de erosie door het bereiken van de bodem.

In figuur 5.1 is weergegeven hoe voor $T = 1,90 \text{ s}$ en een 12 cm dikke filterlaag met

$d_{50}=3,75$ cm wordt afgeleid, dat het begin van bewegen optreedt bij een golfhoogte van 6,0 cm.

erosie bij $T = 1,90$ s



Figuur 5.3: afleiding van het begin van bewegen voor $T = 1,90$ s

In bijlage F zijn de grafieken voor alle onderzochte situaties weergegeven. In tabel 5.1 is een overzicht gegeven van de kritieke golfhoogtes en kritieke maximale orbitaalsnelheden voor alle onderzochte situaties.

Tabel 5.1: het begin van bewegen van basismateriaal voor de onderzochte situaties

Dikte filterlaag	Nom. Diameter filtersteen	Golfperiode	Golfhoogte	Maximale orbitaalsnelheid
12 cm	3,75 cm	1,03 s	8,2 cm	0,08 m/s
12 cm	3,75 cm	1,33 s	6,7 cm	0,09 m/s
12 cm	3,75 cm	1,90 s	6,0 cm	0,11 m/s
12 cm	3,75 cm	2,41 s	5,6 cm	0,14 m/s
12 cm	1,99 cm	1,03 s	16,7 cm	0,16 m/s
12 cm	1,99 cm	1,33 s	8,9 cm	0,14 m/s
12 cm	1,99 cm	1,90 s	8,8 cm	0,17 m/s
12 cm	1,99 cm	2,41 s	7,9 cm	0,19 m/s
6 cm	1,99 cm	1,03 s	12,0 cm	0,12 m/s
6 cm	1,99 cm	1,33 s	9,0 cm	0,13 m/s
6 cm	1,99 cm	1,90 s	7,3 cm	0,13 m/s
6 cm	1,99 cm	2,41 s	6,7 cm	0,17 m/s
0 cm	-	1,03 s	11,7 cm	0,09 m/s
0 cm	-	1,33 s	7,0 cm	0,09 m/s
0 cm	-	1,90 s	6,3 cm	0,10 m/s
0 cm	-	2,41 s	5,1 cm	0,12 m/s

6. Analyse van de experimentele resultaten

6.1 Inleiding

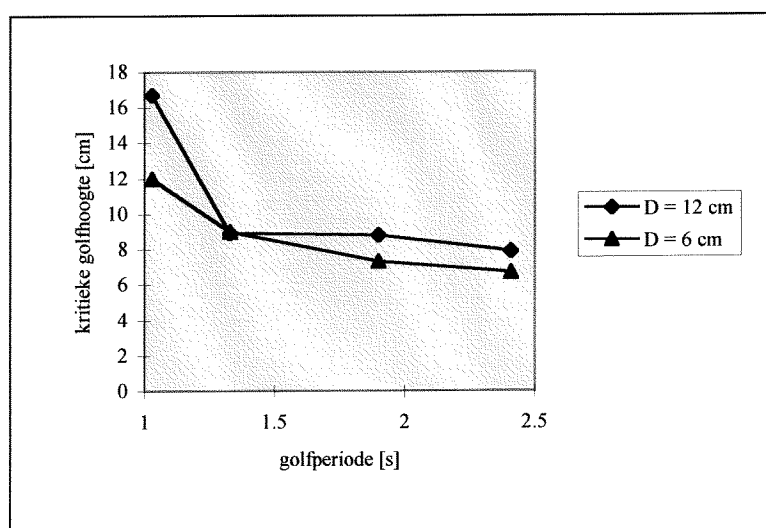
In het vorige hoofdstuk zijn de resultaten van de erosieproeven beschreven. In dit hoofdstuk zullen deze resultaten worden geanalyseerd. In de volgende twee paragrafen worden respectievelijk het begin van bewegen van basismateriaal en het transport van basismateriaal bij hogere dan de kritieke golven behandeld. In §6.4 zullen enige verklaringen gegeven worden voor de waargenomen ribbelvorming. Vervolgens worden de verhangen en watersnelheden in en boven het filter beschouwd. Uiteindelijk wordt alles vergeleken met eerder relevant onderzoek.

6.2 Het begin van bewegen van basismateriaal

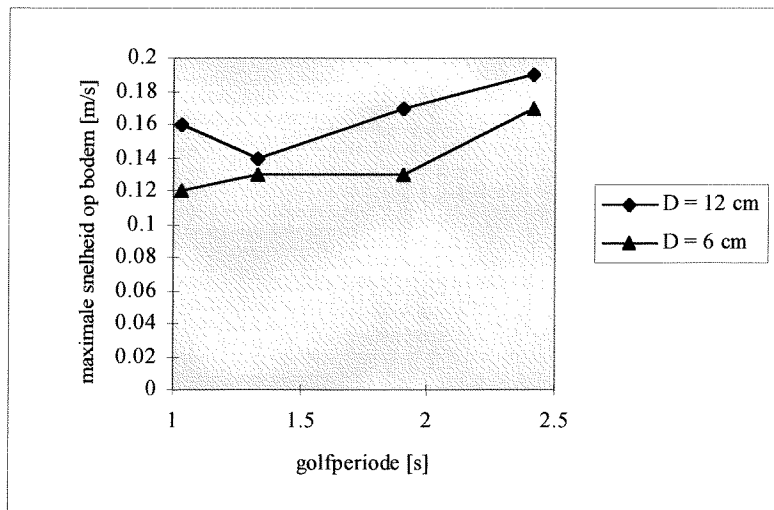
In de experimenten is voor 16 situaties het begin van bewegen vastgesteld. Er zijn steeds twee grootheden gemeten voor elke kritieke golf: de golfhoogte en de maximale orbitaalsnelheid op de bodem. De invloed van enkele variabelen op deze grootheden zal nu worden besproken.

- De golfperiode

Bij een toename van de golfperiode neemt de kritieke golfhoogte af. De snelheid van deze afname daalt bij een toenemende golfperiode. De kritieke orbitaalsnelheid neemt toe bij een toenemende periode. De snelheid van deze toename neemt toe bij een toenemende golfperiode. Alleen de snelheid bij een 12 cm dikke laag van filtermateriaal B voor $T = 1,03$ s geldt hierbij als uitzondering. Verder gelden bovenstaande beweringen voor alle onderzochte situaties. Meer inzicht in deze verschijnselen kan worden verkregen met behulp van de lineaire golftheorie. In § 6.5 wordt hier verder op ingegaan.



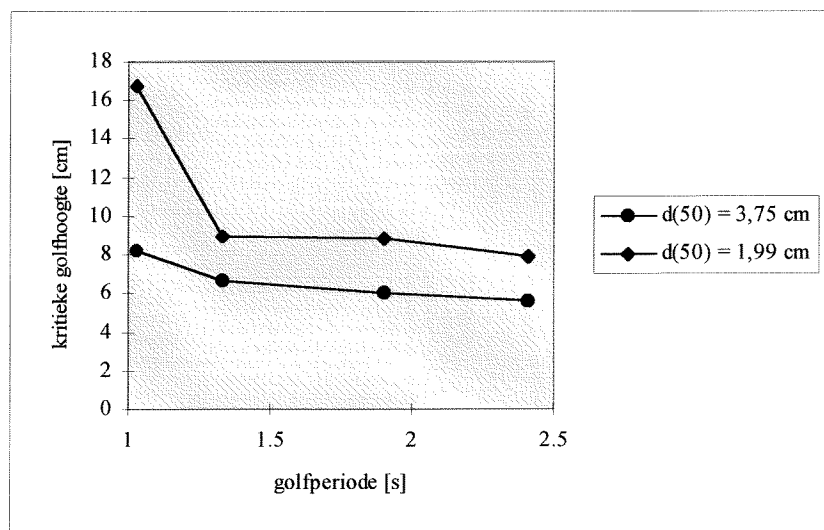
Figuur 6.1a: Invloed laagdikte op begin van bewegen; $d_{50} = 1,99$ cm (kritieke golfhoogtes)



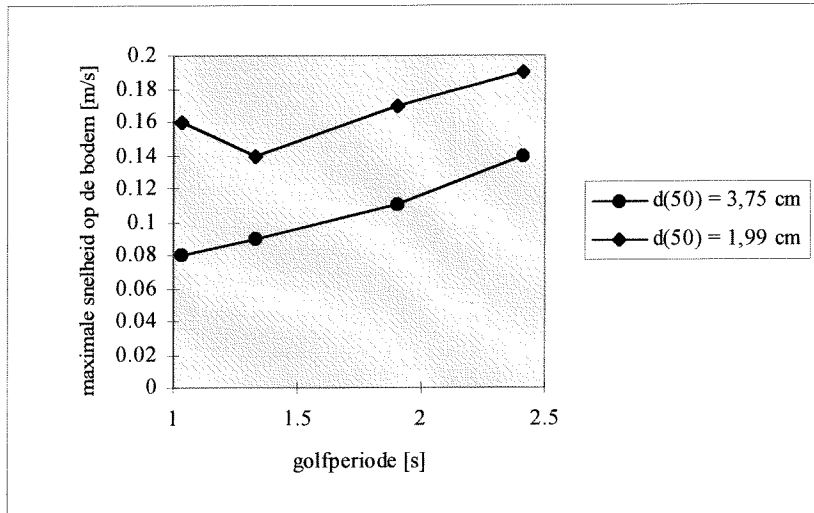
Figuur 6.1b: invloed laagdikte op begin van bewegen; $d_{50} = 1,99$ cm (kritieke orbitaalsnelheden)

• De dikte van de filterlaag

Er zijn experimenten gedaan met twee verschillende filterlaagdiktes. Het blijkt dat het begin van bewegen bij een laagdikte van 6 cm bijna altijd lager ligt dan bij een laagdikte van 12 cm (zie figuur 6.1). De reden hiervoor is dat de waterbeweging bij een dikkere filterlaag iets beter wordt gedempt dan bij een dunne filterlaag.



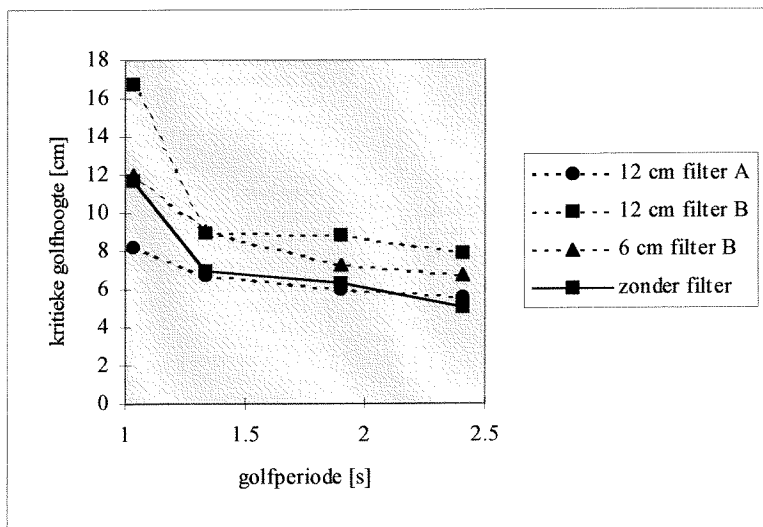
Figuur 6.2a: de invloed van de filtersteengrootte op het begin van bewegen; laagdikte is 12 cm (kritieke golfhoogtes)



6.2b: de invloed van de filtersteengrootte op het begin van bewegen; laagdikte is 12 cm (kritieke orbitaalsnelheden)

- De grootte van de filterstenen

Bij een laagdikte van 12 cm is de grootte van de filterstenen gevarieerd. Er zijn twee verschillende graderingen gebruikt. Gradering A met $d_{50} = 3,75$ cm en gradering B met $d_{50} = 1,99$ cm. Het blijkt dat het begin van bewegen bij kleine stenen hoger ligt dan bij grote stenen (zie figuur 6.2). Dit valt te verklaren door het feit dat kleine stenen de waterbeweging beter dempen. Dit hangt samen met het raakoppervlak. Het raakoppervlak is het totale oppervlak van de stenen in de filterlaag, dat direct in aanraking is met het water. Kleine stenen hebben een groter raakoppervlak met het water dan grote stenen en zorgen daardoor voor een hogere wrijvingsweerstand.



Figuur 6.3: het begin van bewegen zonder een filter ten opzichte van de situaties met een filter

Wel of geen filter

Om het nut van een filterlaag te testen, zijn vergelijkende experimenten gedaan zonder een filterlaag. Het resultaat hiervan is weergegeven in figuur 6.3. Bij de filters die opgebouwd zijn uit filtermateriaal B blijkt de kritieke golfhoogte altijd hoger te zijn dan in de toestand zonder filter. Met name bij de lagere golfperiodes gaat dit niet op voor het grovere filtermateriaal A. Waarschijnlijk zijn deze stenen te grof om de waterbeweging merkbaar te dempen. In plaats daarvan leveren ze extra turbulentie en opstuwing op, zodat het basismateriaal juist sneller gaat bewegen. Hierbij moet wel in beschouwing worden genomen, dat de waterdiepte niet in beide situaties gelijk is. Maar zelfs als er een kleine correctie wordt toegepast om het diepteverschil in rekening te brengen, dan blijft de kritieke golfhoogte voor een onbedekte zandlaag bij $T = 1,03\text{s}$ aanmerkelijk hoger dan in de situatie met een grof filter.

6.3 Het transport van basismateriaal

Het belangrijkste doel van de experimenten is het vinden van het begin van bewegen voor verschillende situaties. De proeven geven echter als bijkomend resultaat enig inzicht over het transport van basismateriaal voor golven die hoger zijn dan de kritieke golfhoogte. Het blijkt dat de snelheid waarmee de erosie toeneemt per situatie duidelijk anders is. Als maat voor de erosiesnelheid kunnen de richtingscoëfficiënten worden gekozen van de extrapolatielijnen, die gebruikt zijn om het begin van bewegen te bepalen (zie bijlage F). Dit is de gemiddelde toename van het erosievolume bij een stijging van de golfhoogte met 1 cm. In tabel 6.1 zijn de waarden voor alle situaties met elkaar vergeleken:

Tabel 6.1 : gemiddelde toename van het erosievolume bij een stijging van de golfhoogte met 1 cm

Situatie	$T = 1,03\text{ s}$	$T = 1,33\text{ s}$	$T = 1,90\text{ s}$	$T = 2,41\text{ s}$	gemiddeld
filter A 12 cm	$31,3\text{ cm}^3$	$206,3\text{ cm}^3$	$87,0\text{ cm}^3$	$95,7\text{ cm}^3$	$105,1\text{ cm}^3$
filter B 12 cm	$55,0\text{ cm}^3$	$64,5\text{ cm}^3$	$55,0\text{ cm}^3$	$116,7\text{ cm}^3$	$72,8\text{ cm}^3$
filter B 6 cm	$56,3\text{ cm}^3$	$138,0\text{ cm}^3$	$64,5\text{ cm}^3$	$228,0\text{ cm}^3$	$121,7\text{ cm}^3$
geen filter	$86,5\text{ cm}^3$	$168,1\text{ cm}^3$	$161,6\text{ cm}^3$	$292,3\text{ cm}^3$	$177,1\text{ cm}^3$
gemiddeld	$57,3\text{ cm}^3$	$144,2\text{ cm}^3$	$92,0\text{ cm}^3$	$183,2\text{ cm}^3$	

• De golfperiode

Er is grofweg een tendens waarneembaar, waarbij de erosietoename stijgt voor hogere periodes. Dit is te verklaren met de lineaire golftheorie. De maximale orbitaalsnelheid op de bodem stijgt bij een gelijke toename van de golfhoogte voor lange golven sneller dan voor korte golven.

- **De dikte van de filterlaag**

Bij een dikkere filterlaag is de erosietoename kleiner dan bij een dunnere filterlaag. Dit komt omdat de basiskorrels bij een dikke laag een langere weg moeten afleggen dan bij een dunne laag.

- **De grootte van de filterstenen**

Het transport van basismateriaal is bij grote filterstenen gemiddeld groter dan bij kleine filterstenen. Dit komt door het feit dat het basismateriaal wordt afgeremd als het tegen de filterstenen botst. Deze botsingen zullen frequenter voorkomen naarmate het filtermateriaal fijner wordt.

- **Wel of geen filter**

Heel duidelijk is zichtbaar dat de toename van het erosievolume zonder filter groter is dan in de situatie met een filter. Ook dit is te verklaren met de theorie dat het transport van basismateriaal wordt afgeremd door de bovenliggende stenen. Geen filter betekent in dit geval ook geen remming van het zandtransport.

Steeds is waargenomen dat het netto-zandtransport in dezelfde richting plaatsvindt als de golfvoortplanting. De verklaring kan gevonden worden in het feit dat steile golven in ondiep water asymmetrisch zijn. Er treedt dan een verschijnsel op dat wordt verwaarloosd in de lineaire golftheorie. Dit verschijnsel is dat de voorwaartse maximale orbitaalsnelheden op de bodem iets groter zijn dan de achterwaartse (Soulsby 1997).

6.4 Verklaringen voor de ribbelvorming

Bij bijna elk experiment zijn ribbels waar te nemen in de zandlaag. De onderlinge afstand tussen de ribbels, de zogenaamde ribbelgolflengte, blijkt bij elk experiment over de gehele bedlengte redelijk constant te zijn. Eerst zal de situatie zonder filter worden beschouwd.

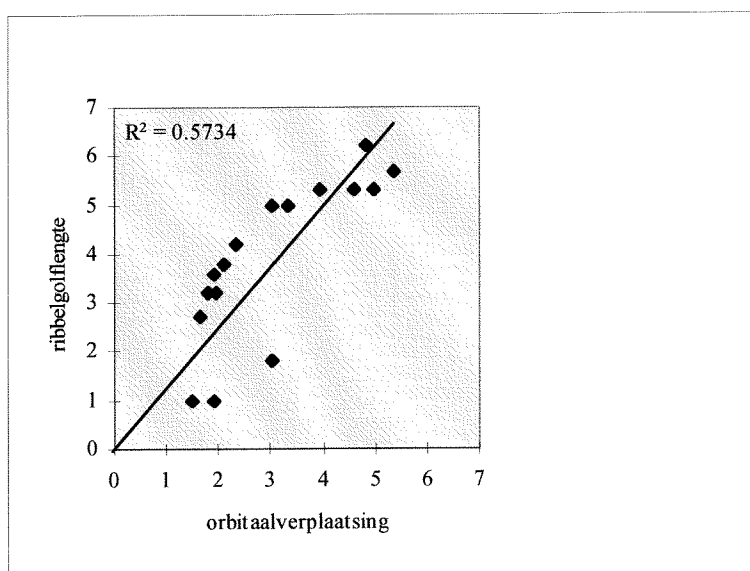
Over ribbelvorming onder invloed van golven zijn enige feiten bekend (Van Rijn 1990). Ribbels ontstaan doordat de oscillerende waterbeweging de oppervlakte deeltjes in beweging brengt. De vorm van deze ribbels is afhankelijk van de maximale waterverplaatsing op de bodem $\hat{a}_0$ en de grootte van de korrels. Deze orbitaalverplaatsing is afhankelijk van de periode T en de maximale bodemsnelheid $\hat{u}_0$:

$$a_0 = \hat{u}_0 T / 2\pi$$

Als $2\hat{a}_0/d_{50} < 1000$, zoals in de experimenten, dan ontstaan er zogenaamde orbitaalribbels. Deze zijn bijna altijd rond en symmetrisch. Ze hebben een lengte die recht evenredig is met de orbitaalverplaatsing. Orbitaalribbels komen bij kleine golven na circa een uur in een evenwichtstoestand. De eerste orbitaalribbels zijn zichtbaar bij 1,2 keer de kritieke snelheid voor het begin van bewegen.

Op het eerste gezicht lijkt de bovenstaande theorie voor de experimenten redelijk te kloppen. De waargenomen ribbels zijn rond en symmetrisch van vorm. Uit de proeven blijkt, dat na een uur de ribbelgolflengte inderdaad niet meer zo veel verandert. Bij het begin van bewegen zijn tijdens de experimenten ribbels waargenomen. Dit lijkt strijdig met het gegeven van Van Rijn, dat de eerste orbitaalribbels pas ontstaan bij 1,2 keer de kritieke snelheid. Aangezien het criterium voor het begin van bewegen echter slechts een subjectieve keuze is, hoeft dit niet strijdig te zijn.

Om te beoordelen of er ook in de experimenten een lineair verband bestaat tussen de orbitaalverplaatsing en de ribbelgolflengte worden de experimenten zonder filter beschouwd. Na vergelijking van de gemeten ribbelgolflengtes met de bijbehorende orbitaalverplaatsingen blijkt een geringe correlatie te bestaan. Dit is zichtbaar in figuur 6.4. R is hierin de regressiecoëfficiënt volgens de kleinste kwadraten-methode.



Figuur 6.4: correlatie tussen de orbitaalverplaatsing en de ribbelgolflengte

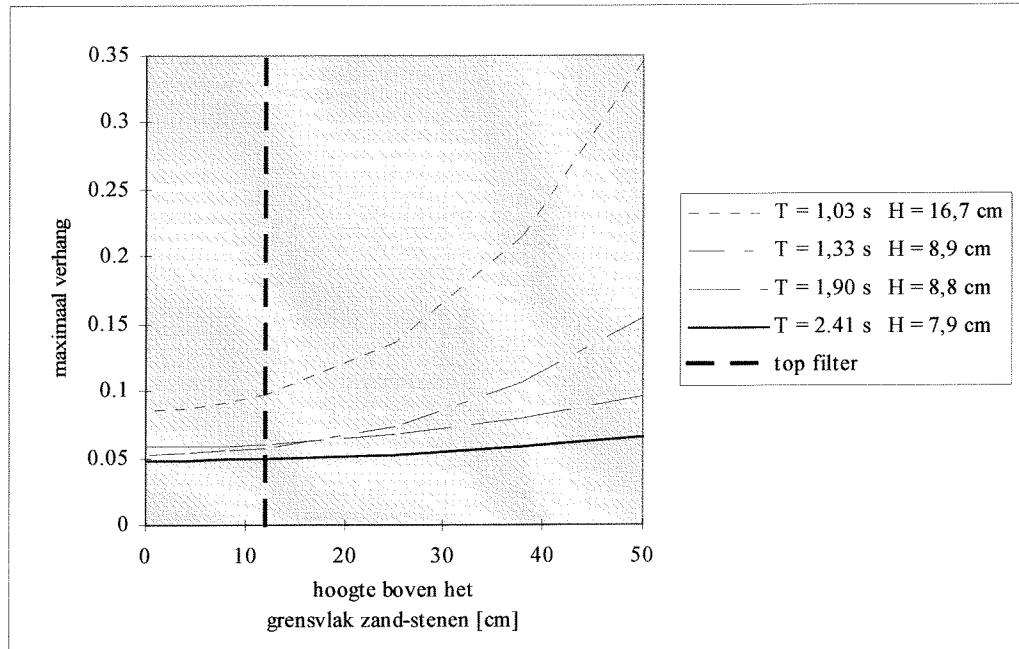
Als de theorie klopt, dat er een lineair verband bestaat tussen de orbitaalverplaatsing en de ribbelgolflengte, zou dit een hulpmiddel kunnen zijn bij de verklaring van het gedrag van basismateriaal onder een filter. Uit de ribbelgolflengtes kunnen dan de maximale orbitaalsnelheden in het grensvlak bepaald worden. Met deze methode moet echter voorzichtig worden omgesprongen. De correlatie is niet zo sterk en bovendien is de invloed van de stenen en het gaas op de vorming van ribbels onbekend.

De ribbelgolflengte in de experimenten neemt langzaam toe bij hogere golven. Boven een zekere golfhoogte neemt de ribbelgolflengte ineens sneller toe. Dit kan er op duiden dat de ribbels bij lage golven worden veroorzaakt door het gaaspatroon en turbulenties, terwijl bij hoge golven de orbitaalsnelheden beter in het filter doordringen en maatgevend zijn.

6.5 Doordringing van de orbitaalbeweging in de filterlaag

6.5.1 Het verloop van het verhang bij het begin van bewegen

Een golf veroorzaakt continu een verhang in het water. Dit verhang varieert met dezelfde frequentie als de golfhoogte en neemt af naarmate men dieper onder het wateroppervlak komt. Het verloop van het maximale verhang over de diepte kan worden berekend met de lineaire golftheorie. Dit is gedaan voor vier kritieke golven bij een 12 cm dikke filterlaag met $d_{50} = 1,99$ cm (zie figuur 6.5).

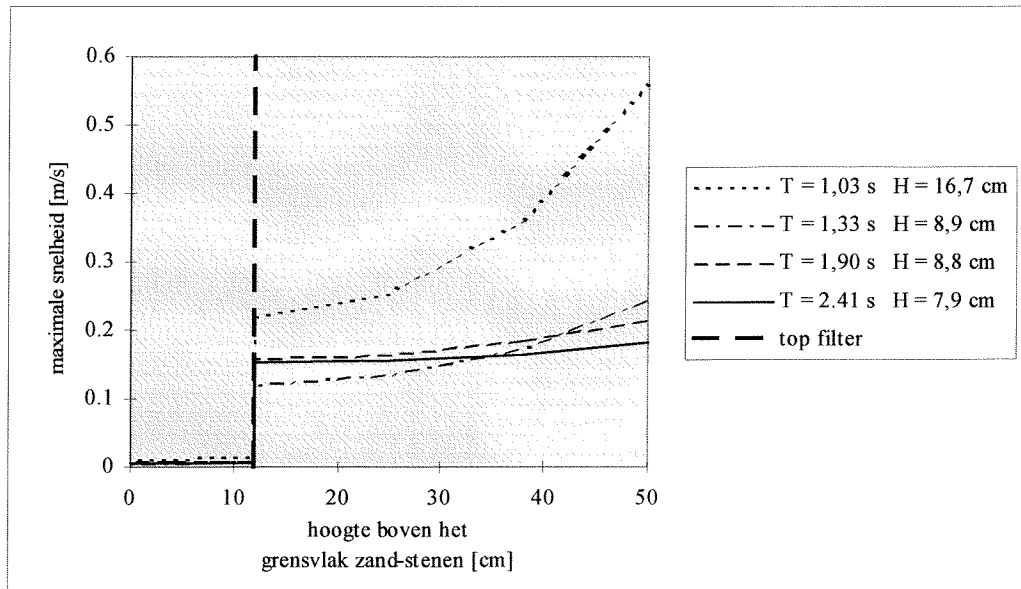


Figuur 6.5: diepteverloop van het maximale verhang bij $D = 12$ cm en filtermateriaal B ($d_{50} = 1,99$ cm).

Korte golven veroorzaken een groot verhang. De afname van het verhang over de diepte neemt echter ook toe naarmate de golven korter worden. In bijlage G zijn de verhangen in het grensvlak en aan de bovenkant van de filterlaag berekend voor alle onderzochte situaties. Net als bij de kritieke golfhoogte is er voor het verhang overal een dalende trend waarneembaar bij een stijgende golfperiode.

6.5.2 Het verloop van de snelheid bij het begin van bewegen

De watersnelheden boven het filter worden berekend met de lineaire golftheorie. Het berekende verloop van het verhang in de filterlaag wordt met behulp van de Forchheimer-vergelijking omgerekend naar het snelheidsverloop (zie bijlage G). In figuur 6.6 is de maximale snelheid uitgezet ten opzichte van de diepte bij een 12 cm dikke filterlaag met $d_{50} = 1,99$ mm.



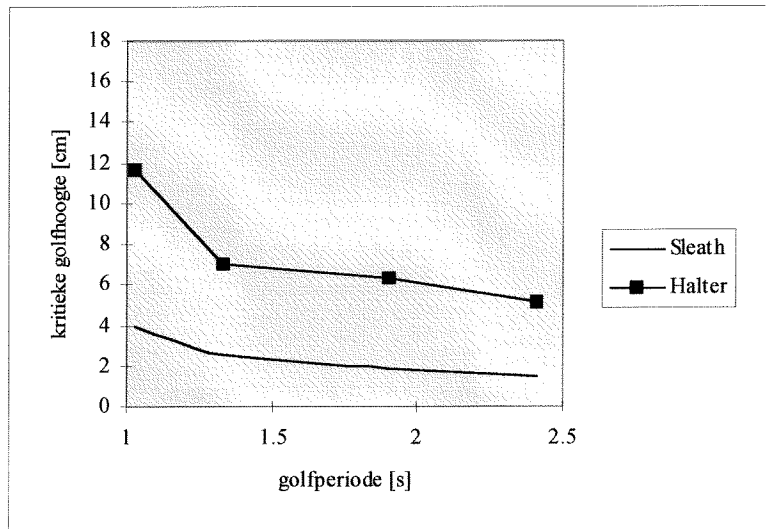
Figuur 6.6: diepteverloop van de maximale snelheid bij $D = 12$ cm en $d_{50} = 1,99$ cm.

Wat de golfperiode-afhankelijkheid betreft geldt voor de maximale snelheid hetzelfde als voor het maximale verhang. In dit geval zit er echter een discontinuïteit in de curve ter plaatse van de bovenkant van de filterlaag. De watersnelheden in het filter zijn namelijk veel lager dan daarboven. De berekende snelheden boven de filterlaag zijn van dezelfde orde van grootte als de snelheden, die gemeten zijn met de EMS. Opvallend is dat de kritieke snelheden boven de zandlaag in het filterbed 5 tot 20 keer zo klein zijn als in dezelfde situatie zonder filterlaag.

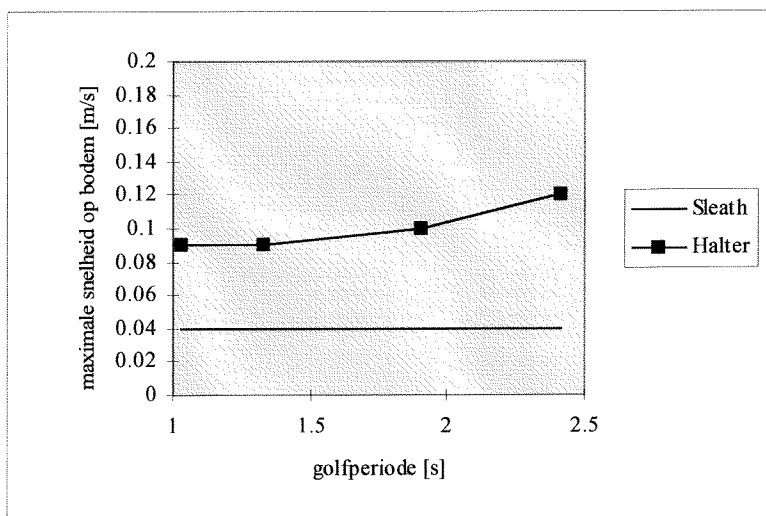
6.6 Vergelijking van de resultaten met eerder onderzoek

6.6.1 Vergelijking met de resultaten van Sleath

Sleath deed onderzoek naar het begin van bewegen van loskorrelig materiaal onder invloed van een oscillerende waterbeweging. Met behulp van deze theorie is in bijlage H afgeleid, wat het begin van bewegen zou zijn in de onderzochte situatie zonder filterlaag. In figuur 6.7a zijn deze berekende kritieke golfhoogtes vergeleken met de waarden zoals die zijn gevonden in de experimenten. In figuur 6.7b is hetzelfde gedaan voor de kritieke orbitaalsnelheden.



Figuur 6.7a: kritieke golfhoogtes zonder een filterlaag



Figuur 6.7b: kritieke orbitaalsnelheden op de bodem zonder een filterlaag

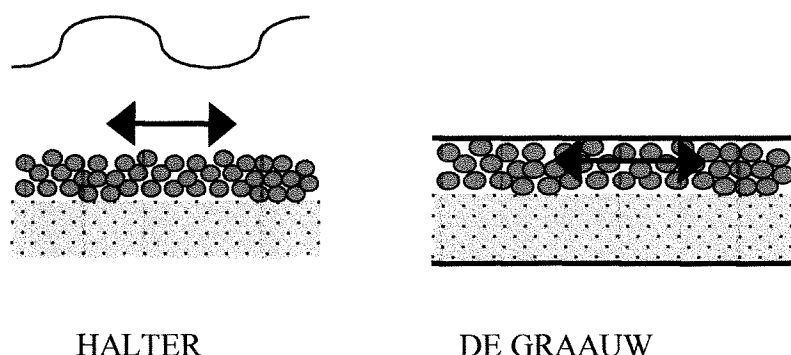
Beide methoden geven een dalende trend aan van de kritieke golfhoogte bij stijgende golfperiodes. De kritieke orbitaalsnelheden zijn volgens Sleath onafhankelijk van de golfperiode, terwijl uit dit onderzoek volgt dat de kritieke snelheden stijgen bij een toenemende golfperiode. De gemeten kritieke waarden liggen echter aanzienlijk hoger dan de Sleath-lijn. Sleath geeft zelf aan dat het verschil met ander onderzoek moet worden gezocht in de definitie voor het begin van bewegen. Dit verschil in definitie kan worden weggewerkt door vermenigvuldiging met een correctiefactor. Als de uit het experiment gevonden waarden voor de kritieke golfhoogte worden vermenigvuldigd met 0,32, komen ze inderdaad redelijk overeen met de waarden van Sleath.

Als andere onderzoeksresultaten met die van Sleath in verband worden gebracht, blijken de correctiefactoren altijd lager te zijn dan één (zie figuur 3.2). Het criterium dat Sleath heeft gesteld voor het begin van bewegen van basismateriaal is er dus een met relatief weinig transport van basismateriaal. Dit terwijl het bewegingscriterium in het experiment pas opgaat bij relatief veel transport. In het experiment is er namelijk

pas sprake van beweging als er een zandvolume uit het bed is verdwenen. Ribbelforming zonder verandering van het zandvolume in het bed telt dus niet als beweging.

6.6.2 Vergelijking met de resultaten van De Graauw et al.

Onderzoek naar het begin van bewegen van basismateriaal onder een filter onder invloed van een vrij golvend oppervlak is nog nooit gedaan. Wel is er enigszins vergelijkbaar onderzoek verricht. De Graauw et al. vonden een formule waarmee het kritieke verhang kan worden berekend in een filter met een cyclische waterbeweging evenwijdig aan het grensvlak. Er zijn drie verschillen met het experiment uit dit rapport. Ten eerste ontbreekt het vrij golvende oppervlak. Verder is er bij De Graauw geen sprake van waterstroming boven de filterlaag. Tenslotte is het verhang constant over de dikte van de filterlaag. In figuur 6.8 zijn beide situaties schematisch weergegeven.



Figuur 6.8: Schematische weergave van de twee verschillende stroomsituaties

In tabel 6.2 worden de kritieke verhangen volgens het onderzoek van de Graauw in 1983 getoond. De berekening hiervan is te vinden in bijlage I. Ze zijn vergeleken met de kritieke verhangen op het grensvlak uit de experimenten.

Tabel 6.2: vergelijking met de kritieke verhangen van De Graauw

gegevens filter	i_{cr} voor $T = 1,03 \text{ s}$	i_{cr} voor $T = 1,33 \text{ s}$	i_{cr} voor $T = 1,90 \text{ s}$	i_{cr} voor $T = 2,41 \text{ s}$	i_{cr} volgens De Graauw
12 cm A	0,021	0,021	0,022	0,020	0,076
12 cm B	0,043	0,027	0,032	0,029	0,086
6 cm B	0,040	0,034	0,030	0,027	0,086

De kritieke verhangen volgens de Graauw zijn onafhankelijk van de golfperiode. De formule waarmee ze zijn uitgerekend is echter alleen geldig voor $T > 2\text{s}$. De kritieke verhangen die in de experimenten zijn vastgesteld, zijn wel periode-afhankelijk. Bij hogere periodes blijkt echter, dat er een tendens is naar een constant verhang. Dit stemt overeen met de golfperiode-onafhankelijkheid voor $T > 2\text{s}$ volgens De Graauw.

Het blijkt dat de kritieke verhangen volgens De Graauw hoger liggen dan in de experimenten. Het ligt niet voor de hand om de oorzaak van dit verschil te zoeken in

het verschil in de definitie voor het begin van bewegen, omdat er bij de experimenten al gebruik is gemaakt van een bewegingscriterium met relatief veel transport. Een waarschijnlijker oorzaak voor het verschil is het feit dat er uit de vrije watermassa boven het filter turbulente wervels in de filterlaag doordringen, die het begin van bewegen van basismateriaal vervroegen.

6.6.3 Vergelijking met de resultaten van Caus

In zijn onderzoek naar de erosie onder zakkingsfilters zegt Caus iets over het begin van bewegen van basismateriaal. Uit de waarnemingen zijn bij een 4,6 cm dikke en een 11,0 cm dikke filterlaag, stenen met $d_{50} = 1,83$ cm en een golfperiode van 1,90 s, waarden voor een kritieke golf gevonden. Ze worden vergeleken met de resultaten uit dit experiment in tabel 6.3.

Tabel 6.3: vergelijking met het begin van beweging volgens Caus

Bron	Filterdikte	Kritieke golf	Kritieke snelheid
Caus	4,6 cm	15 cm - 20 cm	0,23 m/s - 0,30 m/s
Halter	6,0 cm	7,3 cm	0,13 m/s
Caus	11,0 cm	> 15 cm	> 0,24 m/s
Halter	12,0 cm	8,8 cm	0,17 m/s

Het begin van bewegen volgens Caus ligt hoger dan in dit experiment is waargenomen. Er zijn twee oorzaken te bedenken voor dit feit:

- Er was minder doorstroom van water. In het experiment zijn de taludjes van filterstenen gemaakt en dus waterdoorlatend, terwijl Caus' filter was ingeklemd tussen ondoorlatende taludjes,
- De definitie voor het begin van bewegen van basismateriaal was zwaarder. In de experimenten trad het begin van bewegen op als het eerste zand onder de stenen was weggespoeld. Caus stelde pas een begin van bewegen vast als er duidelijke zakking optrad van de daaropliggende filterlaag. Op dat moment moeten de eerste erosiekuiltjes echter al zijn ontstaan.

In het onderzoek van Caus kwamen verder enkele feiten over transport van basismateriaal bij hogere golven aan het licht. Zowel bij een dunnere filterlaag als bij grover filtermateriaal was er meer transport. De erosiesnelheid nam af in de tijd. Deze feiten komen overeen met de resultaten van de hier gerapporteerde experimenten.

6.6.4 Vergelijking met de resultaten van Van Os

Van Os deed geen onderzoek naar golferosie. Het onderzoek richtte zich op erosie door een filter onder invloed van een stationaire stroming. Een belangrijk onderdeel waren de snelheidsmetingen in de laag. Er werd aangetoond, dat de mate van erosie vooral afhangt van de turbulente wervels in de filterlaag en niet zozeer van de watersnelheden boven het filter. Uit de experimenten komen ook aanwijzingen naar voren, die duiden op een belangrijke invloed van turbulentie.

- Er is geen duidelijk verband tussen de gemeten orbitaalsnelheden en het begin van bewegen. Bovendien zijn de snelheden bij het begin van bewegen zonder filter veel groter dan die bij de situatie met een filter. Er moeten dus andere invloedsfactoren zijn bij het begin van bewegen van het zand (zie § 6.5.2).
- De aanwezigheid van grove stenen lijkt voor een lager begin van bewegen te zorgen dan een onbeschermde zandlaag. Het is waarschijnlijk dat dit komt door de verhoging van de turbulentie door de interacties van de stenen met de waterbeweging (zie § 6.2).
- Een vrij wateroppervlak boven het filter geeft een lager begin van bewegen dan een filter zonder vrij wateroppervlak. In een vrij wateroppervlak komen turbulente wervels voor, die kunnen doordringen in de filterlaag (zie § 6.6.2).
- Bij de proeven zonder filter is waargenomen dat een turbulente neer aan de rand van het zandbed relatief veel erosie kan veroorzaken (zie § 5.2.2).

7. Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Na het doen van de experimenten kunnen de volgende conclusies worden getrokken over het gedrag van zakkingsfilters onder invloed van een golfbelasting. Deze zijn opgesplitst in conclusies over het begin van bewegen van basismateriaal en conclusies over transport van basismateriaal bij iets hogere golven.

7.1.1 Het begin van bewegen van basismateriaal in een zakkingsfilter

- De methode die in de experimenten is gebruikt, is goed geschikt om te bepalen voor welke golfbelasting er in een bepaalde situatie voor het eerst erosie van basismateriaal in een zakkingsfilter optreedt.
- De golfbelasting bij het begin van bewegen van basismateriaal wordt voornamelijk bepaald door de mate van demping van de orbitaalsnelheden door interactie van het water met de filterstenen.
- De kritieke golfbelasting is periode-afhankelijk. Naarmate de periode toeneemt, zal de kritieke golfhoogte afnemen en zal de kritieke orbitaalbeweging op de bodem meestal toenemen.
- Hoe dikker de filterlaag, hoe groter de golfbelasting moet zijn om het basismateriaal in beweging te brengen.
- Fijn filtermateriaal dempt de golfbelasting beter dan grof filtermateriaal. Te grove filterstenen kunnen er zelfs toe leiden, dat het basismateriaal eerder in beweging komt dan in de situatie zonder een filter.
- Het criterium voor begin van bewegen dat in dit onderzoek is gedefinieerd staat meer transport toe dan het bewegingscriterium volgens Sleath.
- De kritieke golfhoogte is lager dan volgens de formule van De Graauw. Dit komt voornamelijk door de verschillen in de manier waarop de instationaire belasting op het filter werkt.
- De gemeten kritieke golfhoogte is lager dan die van Caus. Dit valt te verklaren uit de verschillen tussen de bewegingscriteria en de opstellingen in beide experimenten.
- Bij het onderzoek bij stationaire stroming door Van Os is een belangrijke invloed van turbulente wervels op het begin van bewegen van basismateriaal aangetoond. Deze invloed is niet aangetoond in de experimenten met instationaire stroming, maar er zijn wel aanwijzingen gevonden in deze richting.

7.1.2 Het transport van basismateriaal in een zakkingsfilter

- De methode die in de experimenten is gebruikt, is niet geschikt om de mate van transport van basismateriaal onder bepaalde omstandigheden te bepalen. De methode is wel geschikt om globaal te onderzoeken hoe snel de erosie toeneemt bij een kleine stijging van de golfhoogte. Het laatste geldt alleen maar voor golven die net iets hoger zijn dan de kritieke golfhoogte.
- De snelheid waarmee de erosie toeneemt wordt voornamelijk bepaald door de mate waarin het transport van basismateriaal wordt tegengehouden door botsingen met de filterlaag.
- Een zakkingsfilter zorgt voor een remming van het transport van basismateriaal ten opzichte van de situatie zonder een filter.
- Hoe kleiner de golfperiode is, hoe groter de toename van de erosie zal zijn bij een gelijke toename van de golfhoogte.
- De remmende werking op het transport van basismateriaal is groter naarmate de filterlaag dikker is.
- De remmende werking op het transport is groter bij fijner filtermateriaal.
- De bevindingen uit dit onderzoek over transport van basismateriaal komen overeen met de resultaten van Caus.

7.2 Aanbevelingen

Er kunnen enkele aanbevelingen worden gedaan voor vervolgonderzoek. Deze zijn onderverdeeld in aanbevelingen om het huidige onderzoek te verbeteren en aanbevelingen om het huidige onderzoek uit te breiden.

7.2.1 Aanbevelingen ter verbetering van dit onderzoek

- Een apart onderzoek naar de doordringing van de waterbeweging in filterlagen kan veel inzicht opleveren over de oorzaken van erosie in zakkingsfilters. Laser-Doppler-snelheidsmetingen in de poriën van de filterlaag zijn hierbij een goed hulpmiddel.
- Er zijn numerieke modellen ontwikkeld, die de snelheden in de poriën van steenpakketten kunnen berekenen. Deze modellen kunnen worden toegepast op de onderzochte situaties.
- De invloed van de filterkooi kan worden getest. Dit kan worden gedaan door experimenten te herhalen bij andere gaaswijdtes of zonder filterkooi.

- Het erosievolume kan nauwkeuriger worden bepaald door het zand voor en na het experiment nat te wegen.

7.2.2 Aanbevelingen ter uitbreiding van dit onderzoek

- In plaats van erosie door oppervlaktegolven die over een steenpakket lopen kan worden gekeken naar erosie door oppervlaktegolven die door een steenpakket lopen.
- Het onderzoek kan worden uitgebreid voor de erosie in de teen van een talud ten gevolge van golven die tegen het talud oplopen.
- Er kan gekeken worden naar de invloed van staande golven op de erosie van basismateriaal.
- Het is interessant om de erosie onder een filterlaag te beschouwen onder invloed van een combinatie van golven en stroming.

Literatuur

- ADEL, H. DEN 1989
Transportmodel voor filters,
Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft.
 - CAUS, E. 1998
Imperfecte filterconstructies onder golfbrekers,
afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft.
 - CUR 1993
Filters in de waterbouw,
No. 161, Gouda.
 - CUR 1992
Construeren met grond,
No. 162, Gouda.
 - CUR 1995
Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering,
No. 169, Gouda.
 - GENT, M.R.A. VAN 1993
Stationary and oscillatory flow through coarse porous media,
Technische Universiteit Delft.
 - GESSLER, J. 1970
Self-stabilizing tendencies of alluvial channels,
Proc. ASCE 96 WW2, p. 235-246.
 - GRAAUW ET AL., A. DE 1983
Design criteria for granular filters,
Delft Hydraulics publication 287.
 - GROOT ET AL., M.B. DE 1994
Pore pressures in rubble mound breakwaters,
Coastal Engineering: chapter 124.
 - GROOT, M.B. DE EN LINDENBERG J. 1994
Pore pressures in riprap structures due to non-stationary loads,
River, Coastal and Shoreline protection, Thorne C.R. et al.
 - ISHIHARA, K. EN YAMAZAKI A. 1983
Wave induced liquefaction in seabed deposits of sand,
symposium proceedings 'Seabed Mechanics'.
-

- MAENO, S. EN NAGO, H 1988
Settlement of a concrete block into a sand bed under wave pressure variation,
Modelling Soil-Water-Structure Interactions, pp.67-76.
 - NIEKERK, C.A.C. VAN 1993
Burial of small objects on the bottom of the North Sea,
afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft.
 - OKITA, Y. EN NISHIGAKI, M. 1993
Filtration processes observed with γ -ray density meter,
Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Karlsruhe, Germany.
 - OS, P. VAN 1998
Hydraulische belasting op een geometrisch open filterconstructie,
afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft.
 - RIJN, L.C. VAN 1990
Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.
 - SAKAI. ET AL., T. 1992
Wave-induced effective stress in seabeds and its momentary liquefaction,
symposium proceedings 'Seabed Mechanics'.
 - SCHIERECK, G.J. 1996
Introduction to bed, bank and shore protection,
dictaat f4, Technische Universiteit Delft.
 - SLEATH, J. 1978
Measurements of bed load in oscillatory flow,
Journal of the waterway, port, coastal and ocean division,
Vol. 104, No. WW4, page 291-307.
 - SOULSBY, R. 1997
Dynamics of marine sands.
 - WÖRMAN, A. 1989
Rip rap protection without filter layers,
Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No. 12, page 1615-1630.
-

Bijlage A : Berging in de filterlaag

In de filterlaag kunnen twee soorten interne berging kunnen een rol spelen. Dit zijn elastische berging en plastische berging. Elastische berging treedt op door compressie van het water in de poriën. Plastische berging wordt veroorzaakt door verplaatsingen in de korrelstructuur.

De Groot en Lindenberg formuleerden in 1994 vuistregels, waarmee de invloed van elke bergingssoort kan worden bepaald. Voor elke bergingssoort is een karakteristieke tijdschaal T gedefinieerd. Uit de grootte van deze tijdschalen ten opzichte van andere tijdschalen en ten opzichte van de golfperiode kan vervolgens de mate van invloed van een bepaald soort berging worden bepaald. Als blijkt dat een bepaald soort berging belangrijk is, kan de effectieve lengte L worden bepaald. Deze lengte geeft aan in hoeverre de oscillerende waterbeweging in de filterlaag doordringt.

Voor de elastische berging gelden de volgende formules:

$$T_{es} = \frac{\pi D^2}{c_v} \text{ en } L_{es} = \sqrt{\frac{T c_v}{\pi}}$$

waarin:

D is de dikte van de laag
 c_v is de consolidatiecoëfficiënt

De consolidatiecoëfficiënt valt als volgt te berekenen:

$$c_v = \frac{k}{\rho_w g (m_v + n / \beta)}$$

waarin:

k permeabiliteit
 m_v volume compressibiliteitscoëfficiënt
 β bulkmodulus van het poriënwater

Voor de plastische berging gelden de volgende formules:

$$T_{ps} = \frac{D^2}{N c_v} \text{ en } L_{ps} = \sqrt{N T c_v}$$

met N is het aantal golven

Beschouw een 12 cm dikke filterlaag met stenen van $d_{50} = 2$ cm. Dan geldt $k = 0,1$ m/s en $m_v = 10^{-2}$ m²/N. Neem aan dat β oneindig is. Hieruit volgt:

$$c_v = 100 \text{ m}^2/\text{s}$$

Voor de karakteristieke tijdschaal van de elastische berging geldt:

$$T_{es} = 3,14 \times (0,12 \text{ m})^2 / (100 \text{ m}^2/\text{s}) = 4,5 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Bij 100 golven geldt voor de karakteristieke tijdschaal van de plastische berging:

$$T_{ps} = (0,12 \text{ m})^2 / (100 \times 100 \text{ m}^2/\text{s}) = 1,4 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Gezien het feit dat zowel $T_{es} \ll T$ als $T_{ps} \ll T$ spelen deze vormen van berging geen rol en zullen zij niet zorgen voor demping van de orbitaalsnelheden in het beschouwde filter.

Bijlage B : Toetsing aan het verwekingscriterium

Er zijn verschillende studies verricht naar de gevoeligheid van een loskorrelige zeebodem voor momentane verweking door golfbelasting. Deze momentane verweking is afhankelijk van een groot aantal factoren, waaronder de belastingsduur, de grootte van de belasting en de pakkingsdichtheid van de korrels. In deze bijlage zullen twee criteria worden behandeld, waarmee een globale schatting kan worden gemaakt of er in een bepaalde situatie verweking zal optreden. Elk criterium zal worden getoetst voor twee situaties:

- een situatie die zich in de praktijk zou kunnen voordoen:

$$H = 4 \text{ m}, T = 8 \text{ s en } h = 10 \text{ m}$$

- en een maatgevende situatie in het experiment:

$$H = 0,20 \text{ m}, T = 2 \text{ s en } h = 0,5 \text{ m}$$

1. Het verwekingscriterium van Ishihari en Yamazaki (1983)

Ishihari en Yamazaki stelden in 1983 een criterium op dat aangeeft of er verweking optreedt in een loskorrelige zeebodem na 50 tot 100 golfperiodes. Hierin wordt gewerkt met de critical stress ratio. Dit is een maat voor de verhouding tussen de cyclische belasting en de korreldruk. Zolang de critical stress ratio, die wordt veroorzaakt, kleiner is dan de critical stress ratio waarbij bezwijking van de bodem optreedt, treedt er geen verweking op. De critical stress ratio bij bezwijking van de bodem is als volgt opgebouwd:

$$csr = 0,00278 D_r \frac{(1 + 2K_0)}{3}$$

D_r is de relatieve dichtheid van het zand. Dit is de pakkingsdichtheid vergeleken met de maximaal mogelijke pakking. Bij de maximaal mogelijke pakking geldt: $D_r = 100\%$.

K_0 is de laterale aardspanningscoëfficiënt. Deze geeft de invloed weer van anisotrope consolidatie.

In normaal gepakt zand geldt:

$$D_r = 70\% \text{ en } K_0 = 0,7 \Rightarrow csr = 0.16$$

Kenmerkende waarden voor losgepakt zand zijn:

$$D_r = 50\% \text{ en } K_0 = 0,5 \Rightarrow csr = 0.09$$

Verweking treedt op als:

$$c_{sr} \leq \frac{\rho_w}{\rho'} \frac{2H\pi^2}{gT^2} \frac{1}{\cosh(kh)} \quad \text{met} \quad \frac{\rho_w}{\rho'} = 1,06$$

waarin:

ρ' effectieve dichtheid basismateriaal
 ρ_w dichtheid water

Voor beide situaties komt deze term neer op 0,13. Dit betekent dat er voor zowel het experiment als in het praktijkgeval wel verweking is bij het losgepakt zand en geen verweking bij het normaal gepakte zand. Er zit dus geen verschil tussen het grootschalige en het kleinschalige geval. Daarbij moet wel worden vermeld, dat het criterium is afgeleid voor een half-oneindig zandvolume. In het experiment is daarvan geen sprake. Volgens De Groot en Lindenberg (1994) zullen overdrukken relatief snel wegvloeien als de zandlaag dun is. De verwekingsgevoeligheid zal in het experimentele geval dan ook minder zijn dan is berekend.

De diepte tot waar de verweking optreedt, is als volgt te bepalen:

$$l = \sqrt{\frac{Tc_v}{\pi}}$$

waarin:

T de golfperiode
 c_v de consolidatiecoëfficiënt

De consolidatiecoëfficiënt valt als volgt te berekenen:

$$c_v = \frac{k}{\rho_w g (m_v + n / \beta)}$$

waarin:

k permeabiliteit
 m_v volume compressibiliteitscoëfficiënt
 β bulkmodulus van het poriënwater

Voor fijn zand geldt, dat de permeabiliteit in de orde is van 10^{-5} m/s. Verder wordt gesteld dat $m_v = 10^{-2}$ m²/N en de bulkmodulus van het poriënwater oneindig groot is ($\beta = \infty$ N/m²). Hieruit volgt:

$$c_v = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$$

Voor de verwekingsdiepte geldt dus:

$l = 0,16$ m in de praktijk

$l = 0,08$ m in het experiment

De diepte tot waar de verweking optreedt, is dus groot genoeg is om een steen een substantiële zakking mee te geven.

2. Het verwekingscriterium van Sakai et al. (1992)

Sakai et al. stelden in 1992 een ander verwekingscriterium op. Uit een analytische beschouwing volgde een ongelijkheid tussen twee dimensieloos gemaakte parameters:

$$\text{Als } \frac{kG}{\rho_w g^2 Th} \leq 10^{-3} \times \frac{G}{\beta}, \text{ dan zal er verweking optreden.}$$

Hierin is G de afschuivingsmodulus van zand ($G = 1,0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$). β is nu de bulkmodulus van water. Voor met water verzadigd zand geldt: $\beta = 1,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. Het rechterdeel van de ongelijkheid wordt dan: 10^{-4} . Als er echter 1% lucht in het water zit opgelost geldt: $\beta = 1,0 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Het rechterdeel van de ongelijkheid wordt dan ineens: 10^{-1} .

Voor het linkerdeel blijkt na invulling:

In het praktijkgeval: $1,3 \times 10^{-5}$

In het experimentele geval: $1,0 \times 10^{-3}$

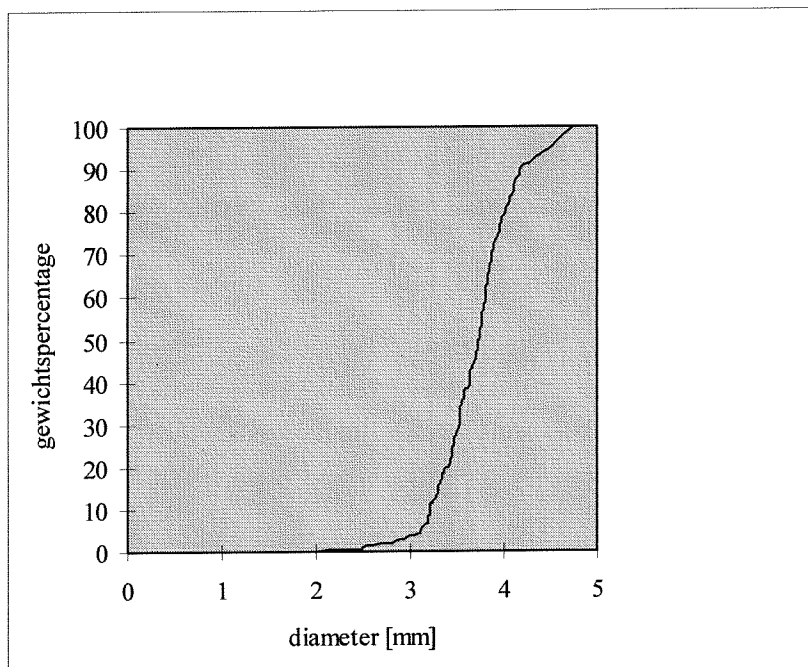
Hieruit blijkt, dat in het praktijkgeval altijd verweking zal optreden, terwijl dit in het experimentele geval alleen gebeurt als er een kleine hoeveelheid lucht is opgelost. De bulkmodulus van water is van grote invloed op dit criterium. Verder blijkt hier, dat er in de praktijk veel meer kans is op verweking dan in de golfgoot.

3. Conclusie

Ondanks de vele aannames die moeten worden gedaan, kunnen uit de bovenstaande schattingen toch enige conclusies worden getrokken. Ten eerste wordt aangetoond dat verweking onder normale omstandigheden kan voorkomen in een zandbodem. Verder wordt duidelijk dat er in de praktijk eerder verweking ontstaat dan in de experimentele situatie in de golfgoot. Door de zandlaag in de experimenten een goede pakking te geven, kunnen de verwekingseffecten worden geminimaliseerd. De kans op verweking in de experimenten zal toch al klein zijn, omdat de overdrukken relatief snel uit de dunne laag kunnen wegvloeien.

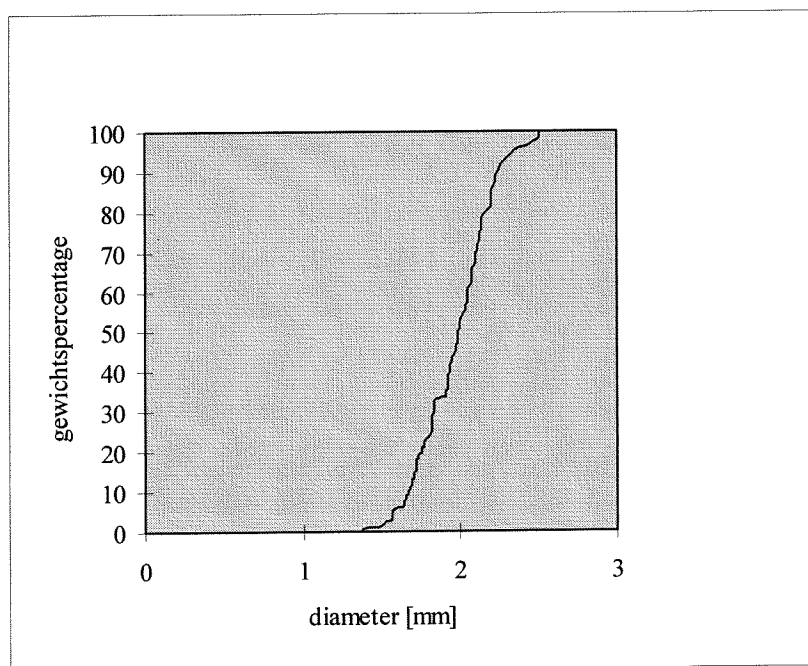
Bijlage C : Materiaalgegevens

Gegevens filtermateriaal A



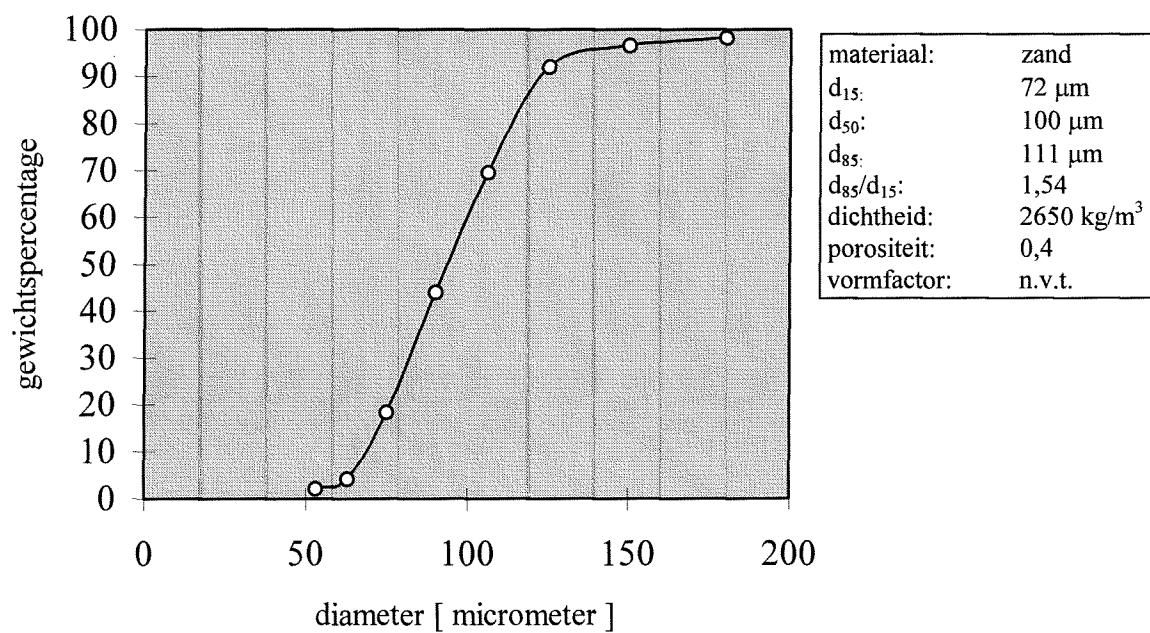
materiaal:	stenen
d_{15} :	3,30 cm
d_{50} :	3,75 cm
d_{85} :	4,11 cm
d_{85}/d_{15} :	1,25
dichtheid:	2550 kg/m ³
porositeit:	0,42
vormfactor:	2,5

Gegevens filtermateriaal B



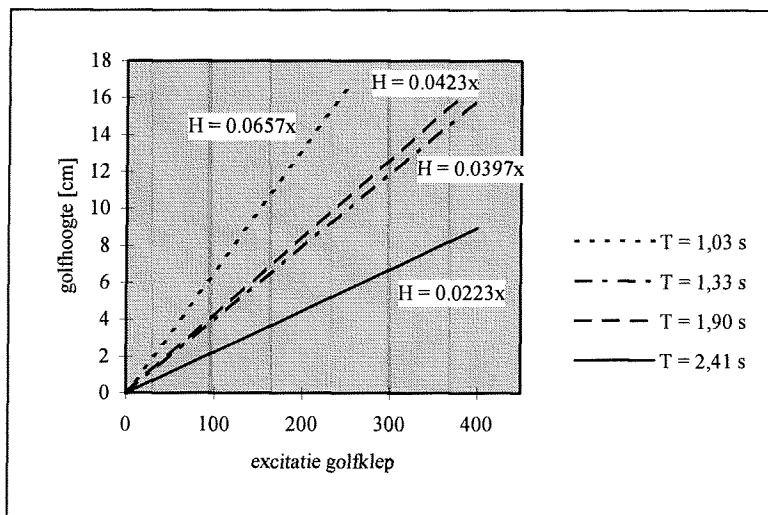
materiaal:	stenen
d_{15} :	1,71 mm
d_{50} :	1,99 mm
d_{85} :	2,20 mm
d_{85}/d_{15} :	1,29
dichtheid:	2540 kg/m ³
porositeit:	0,39
vormfactor:	2,5

Gegevens basismateriaal

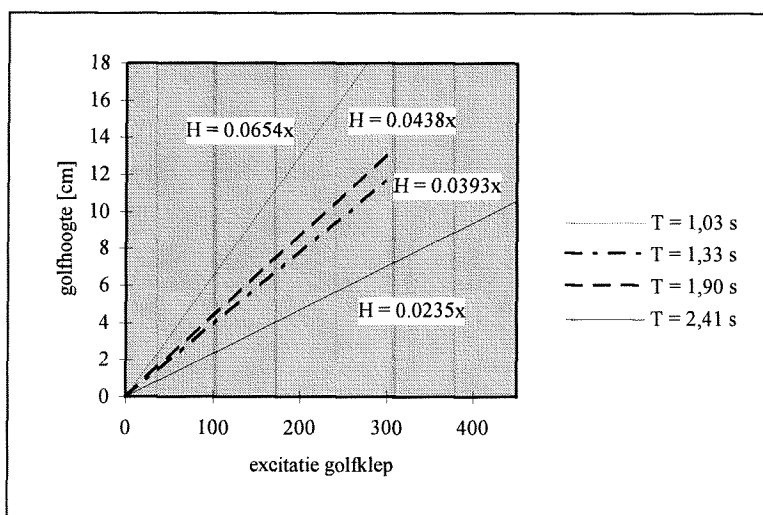


Bijlage D : Eigenschappen van de opgewekte golven

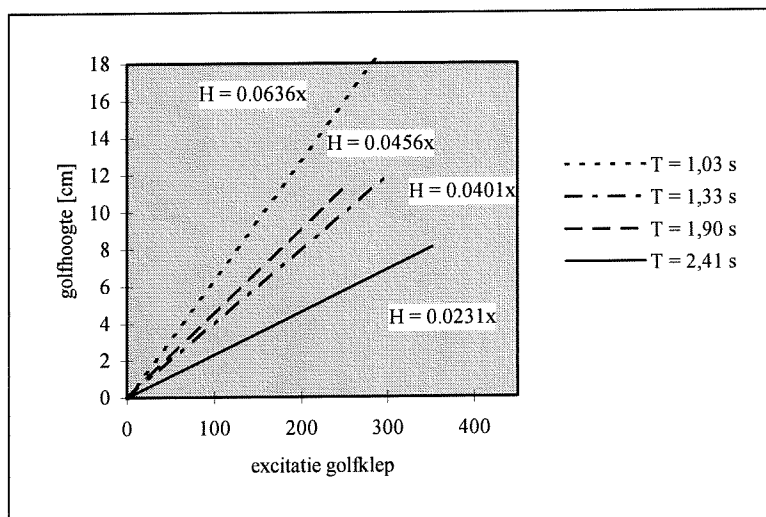
In de experimenten is telkens door middel van een iteratief proces de kritieke golfhoogte bepaald. Om dit efficiënt te laten verlopen is het nuttig om van tevoren te weten welke golfhoogte er ontstaat bij bepaalde instellingen van het golfschot. In deze bijlage is getoond hoe de periode en de excitatie van het golfschot van invloed zijn op de golfhoogte. In alle gevallen beweegt het golfschot heen en weer zonder te roteren.



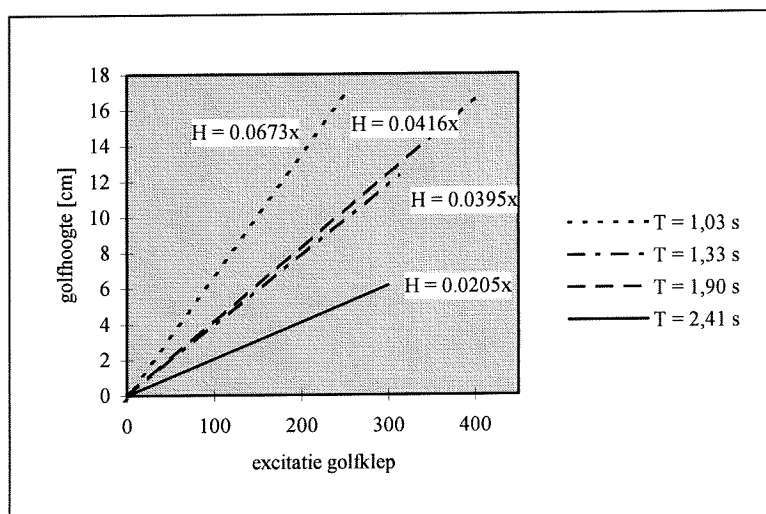
Figuur D.1: golfhoogtes bij een 12 cm dik filter, opgebouwd uit filtermateriaal A



Figuur D.2: golfhoogtes bij een 12 cm dik filter, opgebouwd uit filtermateriaal B



Figuur D.3: golfoohtes bij een 6 cm dik filter, opgebouwd uit filtermateriaal B



Figuur D.4: golfoohtes bij de toestand zonder filter

Bijlage E : Waarnemingen erosieproeven

Tabel E.1: Erosie bij $T = 0,87$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
14,6 cm	0,6 cm	0,10 m/s	0 cm ³	0,0 cm	1,2 cm

Tabel E.2: Erosie bij $T = 1,03$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
9,1 cm	0,8 cm	0,09 m/s	20 cm ³	0,0 cm	1,5 cm
11,0 cm	0,8 cm	0,12 m/s	90 cm ³	0,1 cm	2,1 cm
13,9 cm	1,0 cm	0,12 m/s	200 cm ³	0,2 cm	2,0 cm
16,6 cm	-0,8 cm	0,14 m/s	250 cm ³	0,2 cm	2,4 cm

Tabel E.3: Erosie bij $T = 1,33$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
5,6 cm	-0,3 cm	0,08 m/s	0 cm ³	0,0 cm	2,0 cm
6,5 cm	-0,4 cm	0,09 m/s	0 cm ³	0,0 cm	2,2 cm
7,7 cm	-0,6 cm	0,10 m/s	200 cm ³	0,2 cm	2,4 cm
9,8 cm	-0,6 cm	0,13 m/s	810 cm ³	0,4 cm	2,4 cm
10,0 cm	-1,6 cm	0,15 m/s	540 cm ³	0,4 cm	2,5 cm
11,6 cm	-0,5 cm	0,17 m/s	1010 cm ³	0,5 cm	2,7 cm

Tabel E.4: Erosie bij $T = 1,90$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
4,3 cm	1,8 cm	0,08 m/s	0 cm ³	0,0 cm	2,1 cm
6,2 cm	2,4 cm	0,11 m/s	20 cm ³	0,0 cm	2,3 cm
8,5 cm	2,6 cm	0,15 m/s	230 cm ³	0,2 cm	2,5 cm
10,4 cm	3,5 cm	0,17 m/s	350 cm ³	0,3 cm	2,4 cm
11,2 cm	4,4 cm	0,19 m/s	480 cm ³	0,4 cm	4,0 cm
17,4 cm	5,2 cm	0,30 m/s	2430 cm ³	1,0 cm	5,0 cm

Tabel E.5: Erosie bij $T = 2,41$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
3,3 cm	-0,8 cm	0,08 m/s	0 cm ³	0,0 cm	geen ribbels
5,5 cm	-0,9 cm	0,14 m/s	0 cm ³	0,1 cm	2,3 cm
6,6 cm	-0,5 cm	0,17 m/s	100 cm ³	0,1 cm	2,4 cm
7,9 cm	-0,7 cm	0,19 m/s	230 cm ³	0,1 cm	2,4 cm
8,9 cm	-0,6 cm	0,23 m/s	300 cm ³	0,4 cm	2,4 cm
10,4 cm	-0,3 cm	0,27 m/s	470 cm ³	0,2 cm	2,3 cm

Tabel E.6: Erosie bij $T = 1,03$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
14,9 cm	0,0 cm	0,15 m/s	40 cm ³	0,1 cm	1,9 cm
16,7 cm	0,0 cm	0,16 m/s	0 cm ³	0,0 cm	1,9 cm
17,5 cm	-1,4 cm	0,16 m/s	120 cm ³	0,1 cm	1,9 cm
18,3 cm	-2,9 cm	0,17 m/s	200 cm ³	0,1 cm	1,9 cm

Tabel E.7: Erosie bij $T = 1,33$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
8,9 cm	-1,0 cm	0,14 m/s	0 cm ³	0,0 cm	1,8 cm
9,6 cm	-1,4 cm	0,16 m/s	110 cm ³	0,1 cm	1,8 cm
10,8 cm	-1,1 cm	0,18 m/s	130 cm ³	0,1 cm	1,9 cm
11,9 cm	-1,2 cm	0,19 m/s	260 cm ³	0,1 cm	1,9 cm

Tabel E.8: Erosie bij $T = 1,90$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
9,8 cm	3,0 cm	0,18 m/s	60 cm ³	0,1 cm	2,0 cm
10,8 cm	2,9 cm	0,20 m/s	110 cm ³	0,1 cm	2,0 cm
12,2 cm	2,9 cm	0,22 m/s	180 cm ³	0,1 cm	1,9 cm
13,2 cm	3,8 cm	0,24 m/s	250 cm ³	0,1 cm	1,7 cm
16,3 cm	-1,3 cm	0,30 m/s	1310 cm ³	0,4 cm	3,0 cm

Tabel E.9: Erosie bij $T = 2,41$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
7,6 cm	-0,8 cm	0,19 m/s	0 cm ³	0,1 cm	1,8 cm
8,2 cm	-0,3 cm	0,20 m/s	40 cm ³	0,1 cm	1,9 cm
9,4 cm	-0,4 cm	0,23 m/s	180 cm ³	0,2 cm	2,2 cm
10,6 cm	-0,3 cm	0,27 m/s	340 cm ³	0,2 cm	1,8 cm

Tabel E.10: Erosie bij $T = 1,03$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
12,0 cm	0,0 cm	0,12 m/s	0 cm ³	0,0 cm	1,8 cm
13,4 cm	0,3 cm	0,14 m/s	80 cm ³	0,3 cm	1,8 cm
15,8 cm	-0,9 cm	0,16 m/s	210 cm ³	0,1 cm	1,9 cm
18,2 cm	-2,6 cm	0,17 m/s	350 cm ³	0,3 cm	1,8 cm

Tabel E.11: Erosie bij $T = 1,33$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
9,0 cm	-0,8 cm	0,13 m/s	40 cm ³	0,0 cm	1,8 cm
10,0 cm	-0,9 cm	0,14 m/s	30 cm ³	0,1 cm	1,8 cm
10,9 cm	-0,9 cm	0,16 m/s	280 cm ³	0,2 cm	1,9 cm
12,2 cm	-1,2 cm	0,19 m/s	440 cm ³	0,4 cm	1,8 cm

Tabel E.12: Erosie bij $T = 1,90$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
7,0 cm	2,8 cm	0,12 m/s	0 cm ³	0,0 cm	geen ribbels
7,8 cm	2,7 cm	0,15 m/s	50 cm ³	0,0 cm	1,8 cm
9,0 cm	2,7 cm	0,17 m/s	100 cm ³	0,1 cm	2,0 cm
11,5 cm	3,5 cm	0,19 m/s	300 cm ³	0,4 cm	3,5 cm

Tabel E.13: Erosie bij $T = 2,41$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B

gemiddelde golfhoopte	stijging golfhoopte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
6,4 cm	-0,7 cm	0,15 m/s	0 cm ³	0,0 cm	1,8 cm
6,9 cm	-0,3 cm	0,19 m/s	90 cm ³	0,1 cm	1,8 cm
7,6 cm	-0,5 cm	0,21 m/s	110 cm ³	0,1 cm	1,8 cm
8,1 cm	-0,4 cm	0,22 m/s	380 cm ³	0,2 cm	1,8 cm

Tabel E.14: Erosie bij $T = 1,03$ s zonder filter

gemiddelde golfhoopte	stijging golfhoopte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
11,7 cm	1,0 cm	0,09 m/s	0 cm ³	0,0 cm	1,0 cm
12,8 cm	2,0 cm	0,10 m/s	100 cm ³	0,0 cm	2,7 cm
15,8 cm	0,6 cm	0,11 m/s	500 cm ³	0,5 cm	3,2 cm
16,8 cm	0,2 cm	0,12 m/s	390 cm ³	0,3 cm	3,2 cm

Tabel E.15: Erosie bij $T = 1,33$ s zonder filter

gemiddelde golfhoopte	stijging golfhoopte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
6,8 cm	0,0 cm	0,09 m/s	0 cm ³	0,0 cm	1,0 cm
7,5 cm	0,0 cm	0,09 m/s	40 cm ³	0,0 cm	3,6 cm
8,4 cm	0,6 cm	0,10 m/s	290 cm ³	0,3 cm	3,8 cm
9,8 cm	0,0 cm	0,11 m/s	440 cm ³	0,4 cm	4,2 cm

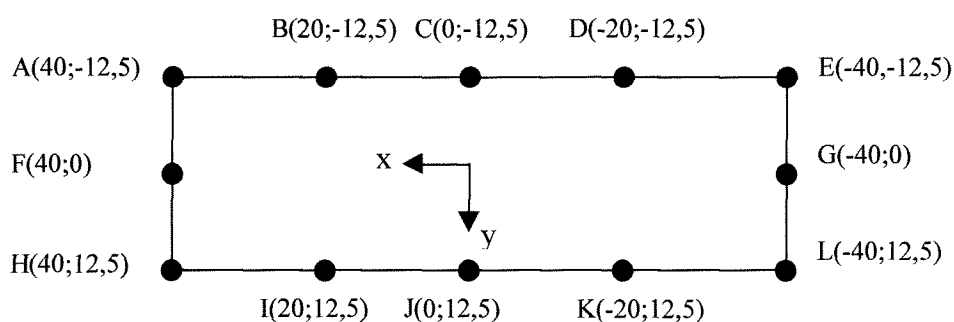
Tabel E.16: Erosie bij $T = 1,90$ s zonder filter

gemiddelde golfhoopte	stijging golfhoopte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
6,3 cm	2,9 cm	0,10 m/s	0 cm ³	0 cm	1,8 cm
6,6 cm	2,7 cm	0,10 m/s	180 cm ³	0,2 cm	5,0 cm
7,4 cm	2,8 cm	0,11 m/s	300 cm ³	0,3 cm	5,0 cm
8,9 cm	3,8 cm	0,13 m/s	550 cm ³	0,2 cm	5,3 cm
10,7 cm	4,7 cm	0,16 m/s	1130 cm ³	1,8 cm	6,2 cm
16,1 cm	6,7 cm	0,23 m/s	2800 cm ³	1,1 cm	5,7 cm

Tabel E.17: Erosie bij $T = 2,41$ s zonder filter

gemiddelde golfhoogte	stijging golfhoogte over de filterlaag	Maximale orbitaalsnelheid op de bodem	erosievolume	gemiddelde erosiediepte over twaalf randpunten	lengte ribbels
5,1 cm	0,1 cm	0,12 m/s	0 cm ³	0,0 cm	geen ribbels
5,4 cm	-0,1 cm	0,12 m/s	180 cm ³	0,3 cm	5,3 cm
5,6 cm	0,2 cm	0,13 m/s	400 cm ³	0,2 cm	5,3 cm
6,2 cm	0,1 cm	0,14 m/s	460 cm ³	0,5 cm	5,7 cm

Erosiedieptemetingen



Figuur E.1: Meetposities van de erosiedieptemetingen

Tabel E.18 : Overzicht van alle gemeten erosiedieptes

Verklaring van de afkortingen:

- 12A = 12 cm dikke filterlaag opgebouwd uit filtermateriaal A
 12B = 12 cm dikke filterlaag opgebouwd uit filtermateriaal B
 6B = 6 cm dikke filterlaag opgebouwd uit filtermateriaal B
 0 = geen filter

H [cm]	T [s]	filter	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	gem
17,4	1,90	12A	1	7	5	6	18	14	9	0	20	20	8	9	10
8,5	1,90	12A	0	0	2	4	6	2	1	0	0	0	5	3	2
4,3	1,90	12A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,2	1,90	12A	0	1	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1	0
10,4	1,90	12A	0	0	0	3	11	0	10	0	0	0	8	4	3
7,7	1,33	12A	0	0	0	10	1	4	2	0	0	0	0	4	4
5,6	1,33	12A	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0
11,6	1,33	12A	5	8	1	8	4	7	4	0	5	5	8	8	5
9,8	1,33	12A	0	14	0	6	2	3	2	0	4	4	9	5	4
10,0	1,33	12A	1	8	0	3	0	0	4	0	1	8	9	10	4

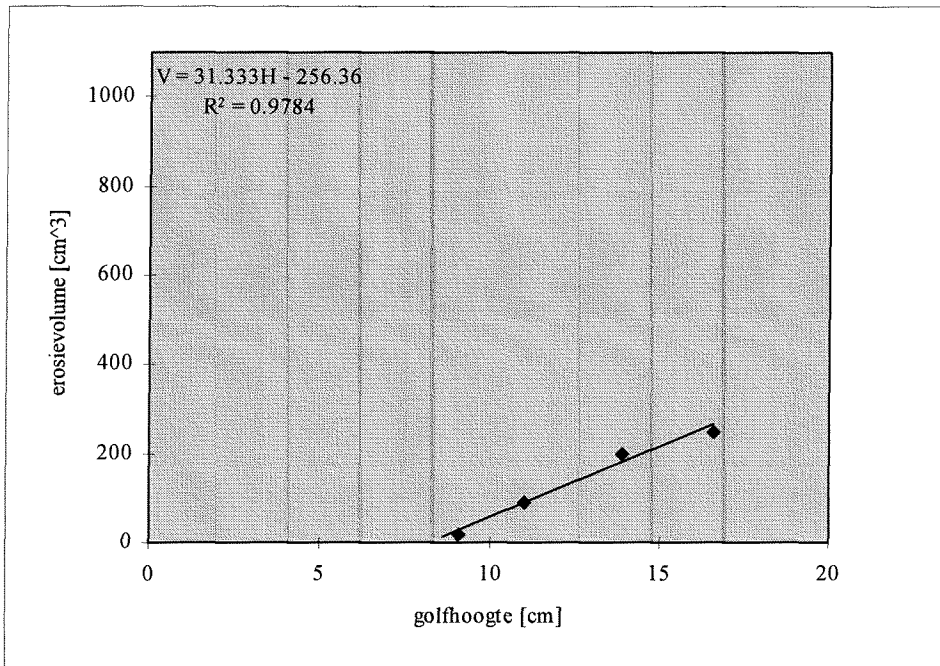
Waarnemingen erosieproeven

H [cm]	T [s]	filter	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	g
11,2	1,90	12A	0	6	0	0	11	1	4	0	13	0	0	9	
6,5	1,33	12A	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
3,3	2,41	12A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5,5	2,41	12A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	
6,6	2,41	12A	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	2	
7,9	2,41	12A	0	0	0	0	2	2	2	0	2	0	2	4	
8,9	2,41	12A	0	0	0	0	9	15	9	0	5	0	6	6	
14,6	0,87	12A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	
13,9	1,03	12A	3	2	0	2	6	2	0	0	1	1	3	0	
9,1	1,03	12A	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	
16,6	1,03	12A	2	2	1	0	5	0	2	0	0	0	5	7	
11,0	1,03	12A	0	2	0	0	0	4	2	0	0	1	6	0	
10,4	2,41	12A	6	8	0	2	0	1	5	3	0	0	0	0	
16,1	1,90	0	8	8	0	15	25	0	20	0	1	10	12	27	
6,3	1,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10,7	1,90	0	6	0	12	11	5	0	1	0	8	5	17	1	
8,9	1,90	0	4	0	1	10	0	0	0	0	3	1	10	0	
7,4	1,90	0	0	0	7	9	7	0	0	0	0	0	10	7	
6,6	1,90	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	4	7	4	
16,8	1,03	0	7	0	6	0	4	2	1	0	6	1	6	2	
15,8	1,03	0	3	5	0	8	4	0	5	4	8	6	8	5	
11,7	1,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12,8	1,03	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9,8	1,33	0	2	6	5	5	3	0	0	2	6	6	10	0	
6,8	1,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8,4	1,33	0	5	4	0	0	5	5	0	2	5	0	4	3	
7,5	1,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5,1	2,41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6,2	2,41	0	15	6	1	10	0	9	0	9	1	2	0	1	
5,6	2,41	0	4	0	4	4	6	0	1	0	0	0	0	0	
5,4	2,41	0	11	2	0	5	0	7	0	8	2	2	4	0	
16,3	1,90	12B	0	0	10	6	4	0	2	0	3	12	5	9	
13,2	1,90	12B	0	0	0	2	4	0	3	0	3	0	0	4	
12,2	1,90	12B	0	0	0	1	4	0	2	0	2	0	0	0	
10,8	1,90	12B	1	0	0	0	0	0	3	1	0	2	2	2	
9,8	1,90	12B	0	0	0	0	5	0	2	0	0	0	0	3	
11,9	1,33	12B	0	0	0	0	6	1	2	0	0	0	0	5	
10,8	1,33	12B	2	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	2	
9,6	1,33	12B	0	0	0	0	2	4	1	0	0	0	0	3	
8,9	1,33	12B	1	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	
14,9	1,03	12B	3	0	0	0	0	0	4	0	3	0	0	0	
16,7	1,03	12B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
8,2	2,41	12B	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5	
9,4	2,41	12B	1	0	0	1	1	4	2	0	0	0	1	9	

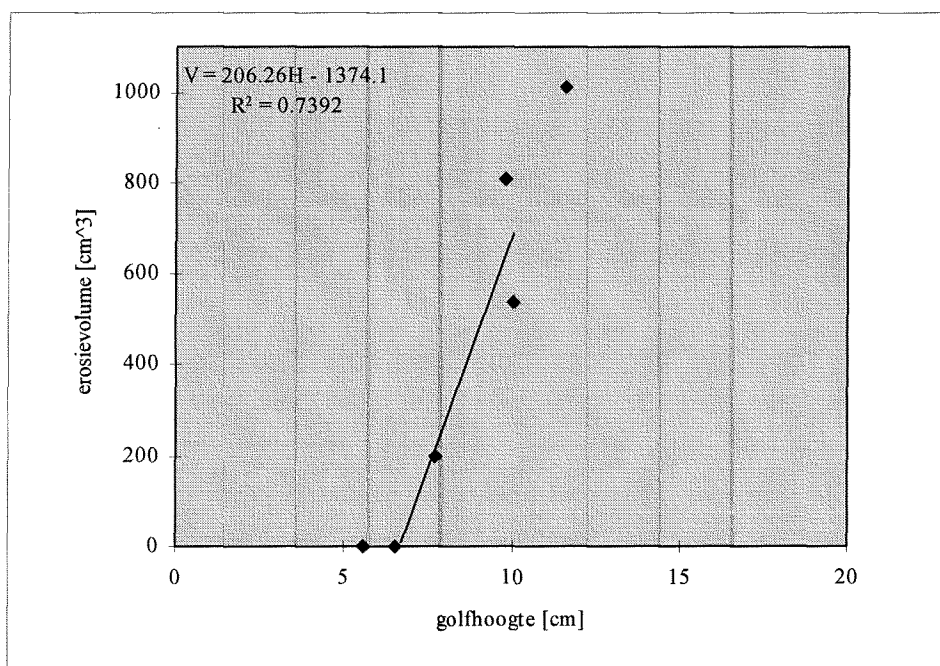
Waarnemingen erosieproeven

H [cm]	T [s]	filter	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	gem
7,6	2,41	12B	1	0	0	0	1	0	2	0	2	0	2	2	1
10,6	2,41	12B	0	0	0	7	3	3	8	3	0	0	0	4	2
17,5	1,03	12B	2	0	0	0	3	0	2	0	5	0	0	2	1
18,3	1,03	12B	3	0	0	0	1	0	3	2	0	0	0	1	1
18,2	1,03	6B	5	0	0	3	5	2	7	0	0	0	0	8	3
15,8	1,03	6B	1	0	0	3	0	2	1	0	3	0	0	5	1
13,4	1,03	6B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12,0	1,03	6B	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
11,5	1,90	6B	0	1	0	11	8	1	9	0	0	0	3	9	4
9,0	1,90	6B	1	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	9	1
7,0	1,90	6B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
7,8	1,90	6B	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
10,0	1,33	6B	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	1
12,2	1,33	6B	7	2	0	5	10	5	12	8	0	0	0	3	4
9,0	1,33	6B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10,9	1,33	6B	1	0	0	1	9	0	8	1	0	0	1	4	2
8,1	2,41	6B	8	0	0	0	6	2	0	0	0	0	4	7	2
6,9	2,41	6B	3	0	0	0	4	3	0	6	0	0	2	0	2
7,6	2,41	6B	2	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	2	1
6,4	2,41	6B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

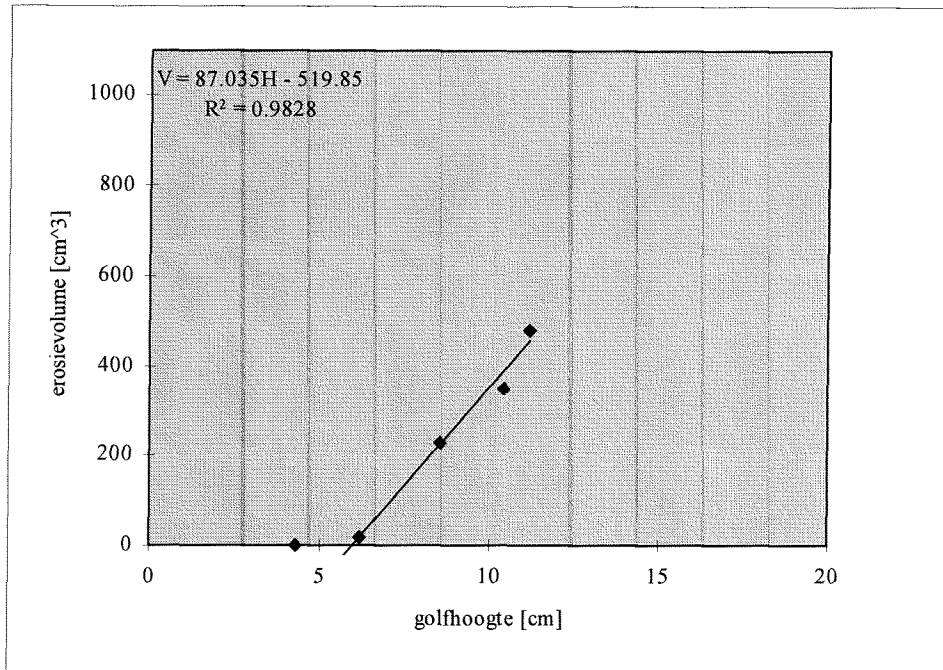
Bijlage F : Bepaling van het begin van bewegen van het basismateriaal



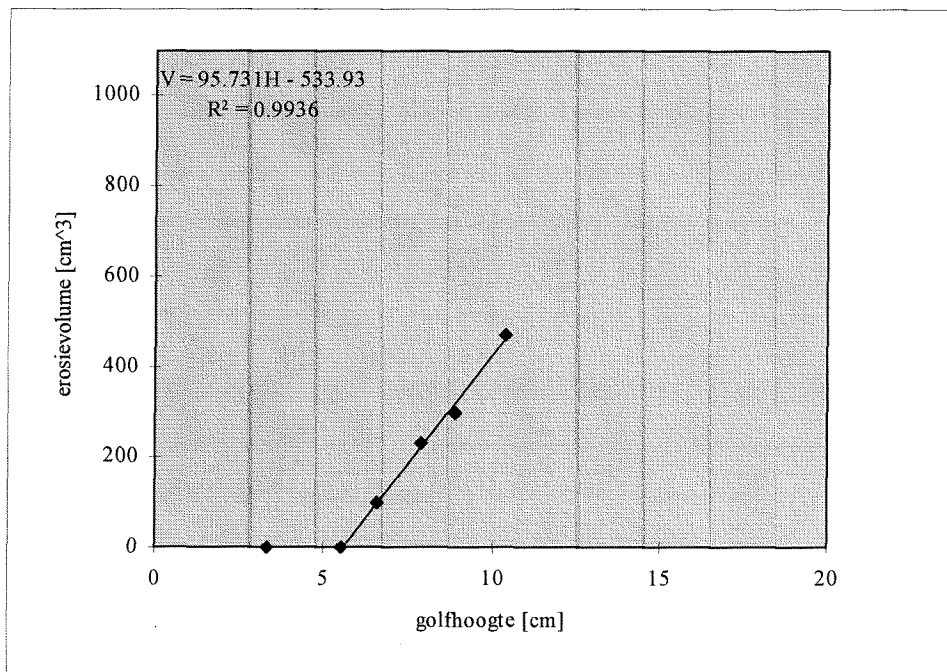
*Figuur F.1: $T = 1,03$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A
Kritieke golffhoogte: 8,2 cm*



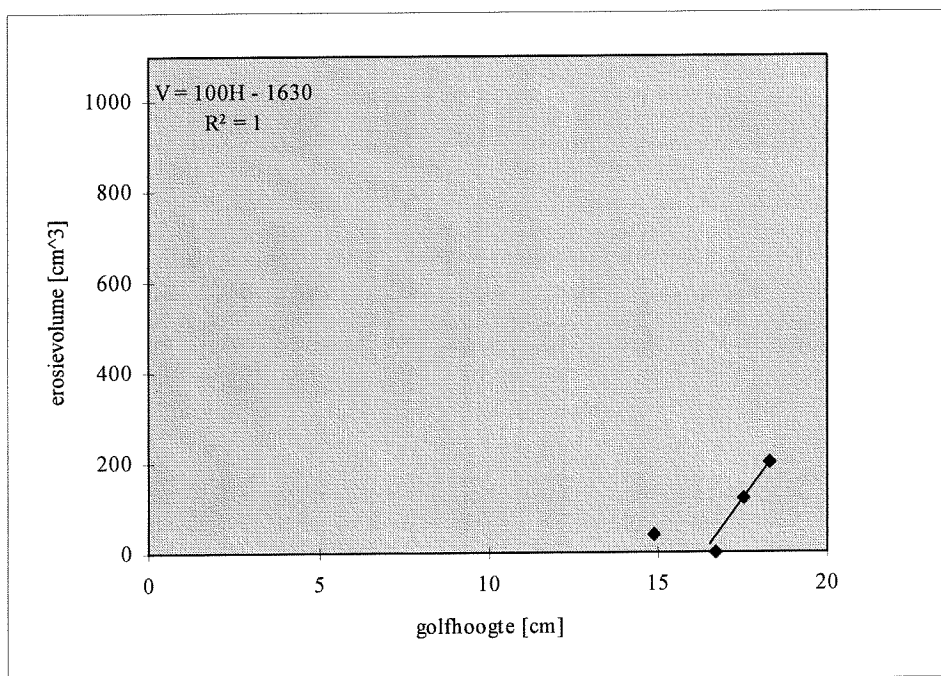
*Figuur F.2: $T = 1,33$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A
Kritieke golffhoogte: 6,7 cm*



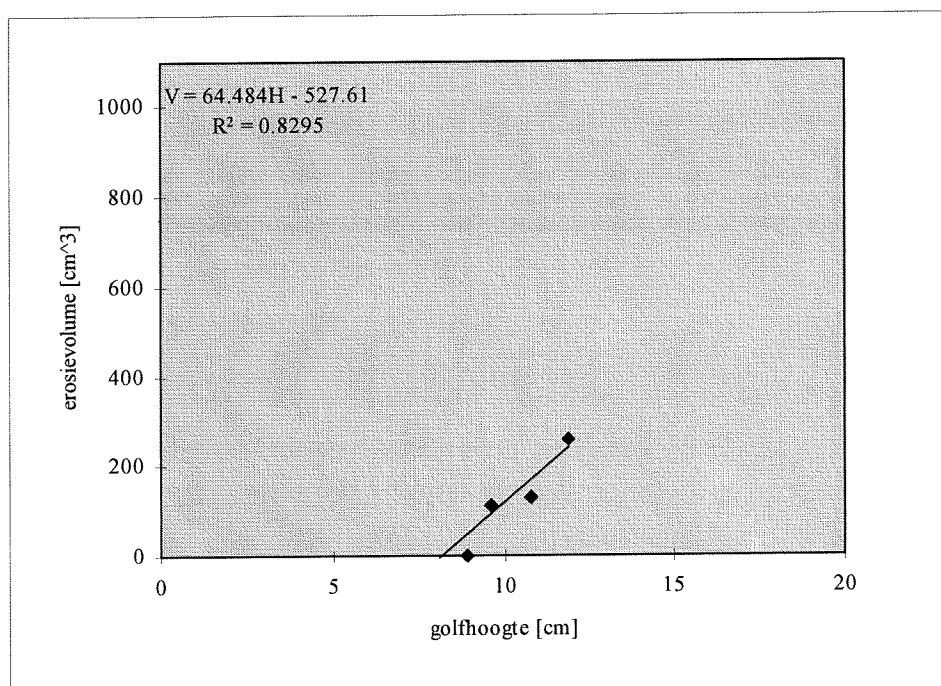
Figuur F.3: $T = 1,90$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A
Kritieke golffhoogte: 6,0 cm



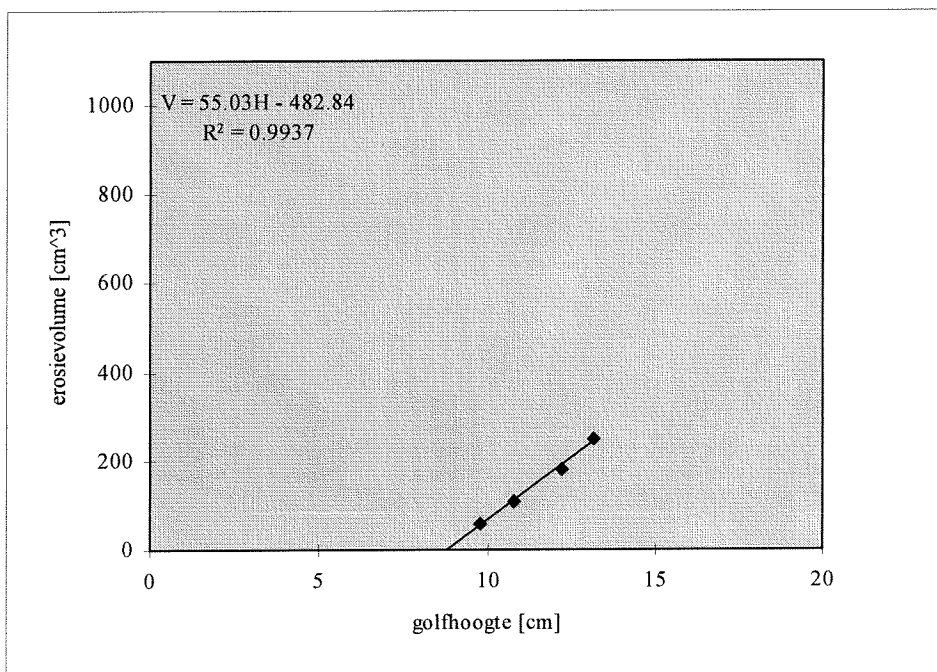
Figuur F.4: $T = 2,41$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A
Kritieke golffhoogte: 5,6 cm



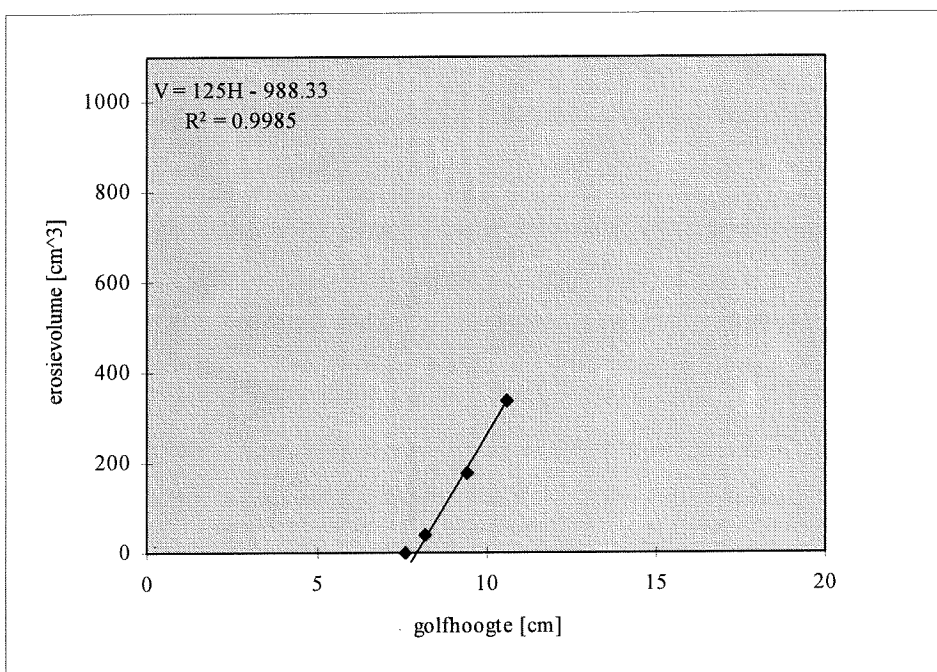
Figuur F.5: $T = 1,03$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfhoogte: 16,7 cm



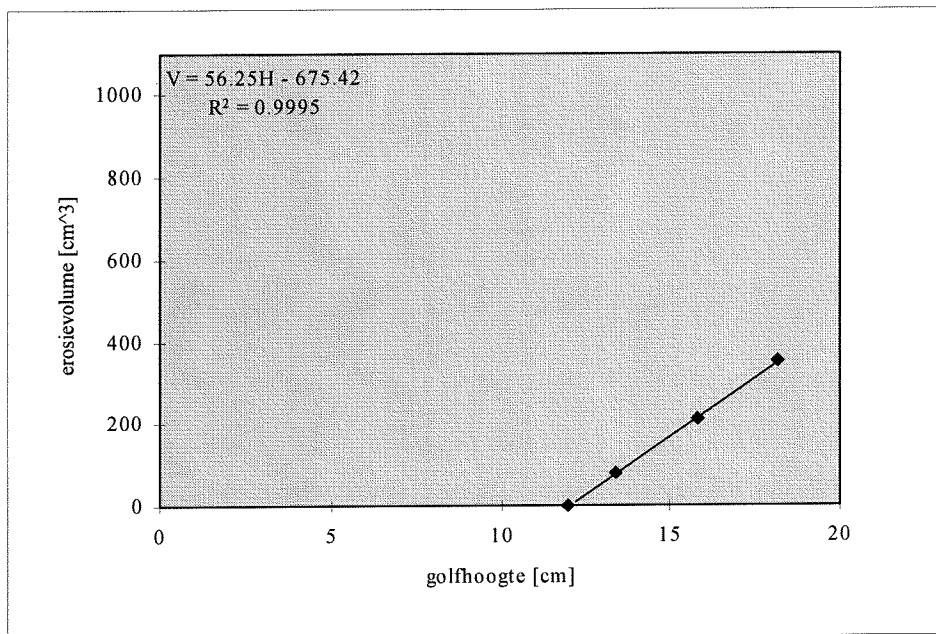
Figuur F.6: $T = 1,33$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfhoogte: 8,9 cm



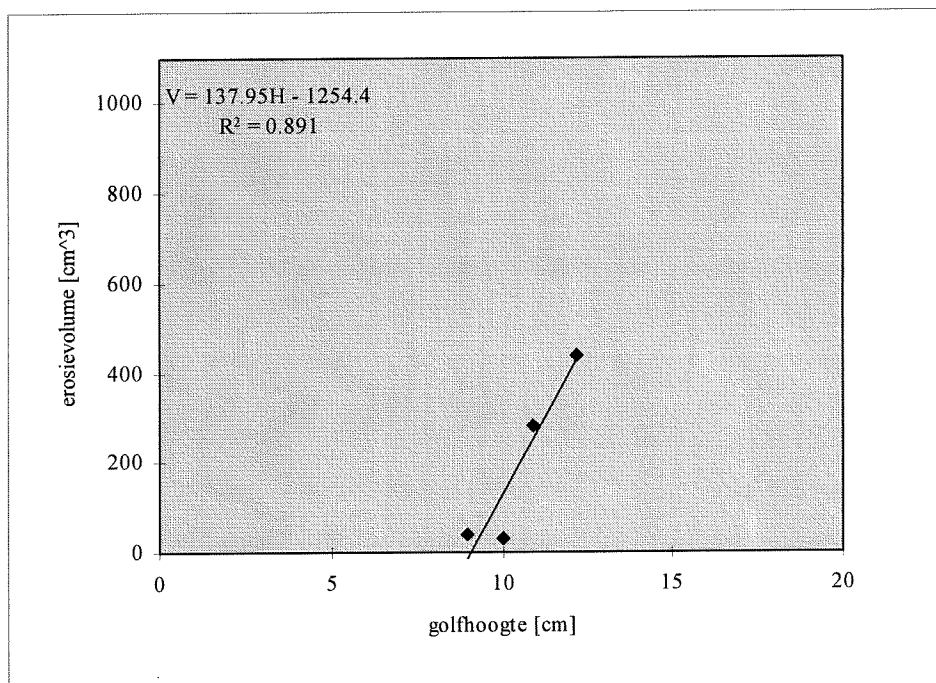
Figuur F.7: $T = 1,90$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfhoogte: 8,8 cm



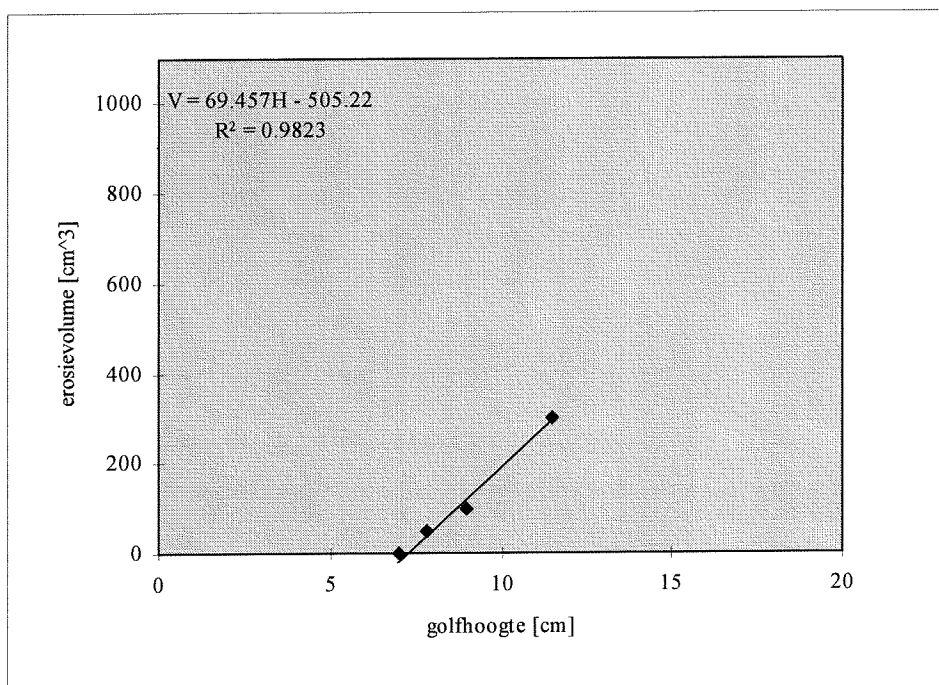
Figuur F.8: $T = 2,41$ s, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfhoogte: 7,9 cm



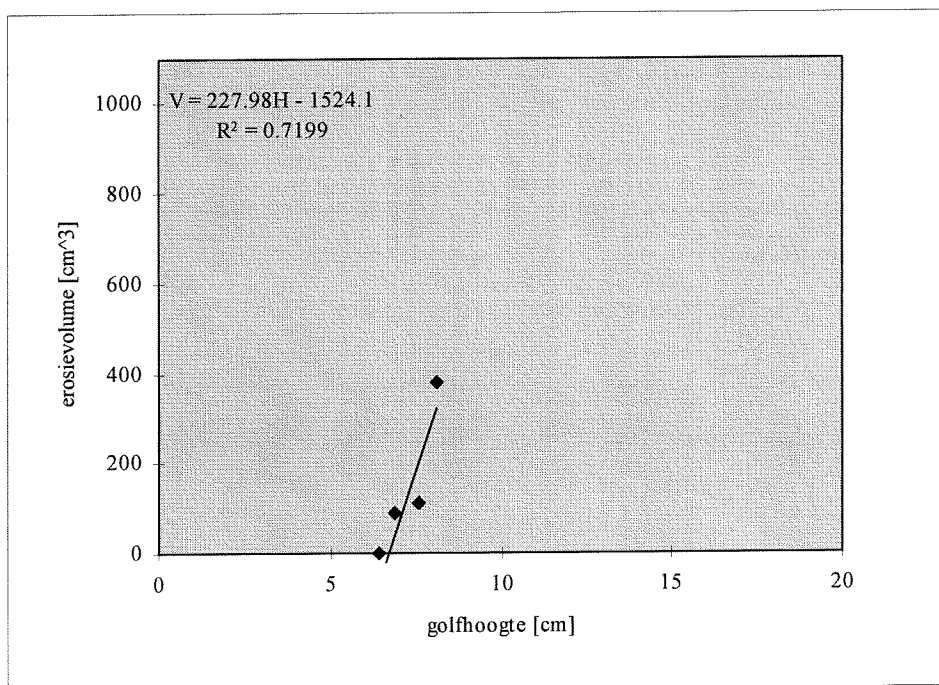
Figuur F.9: $T = 1,03$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfoohte: 12,0 cm



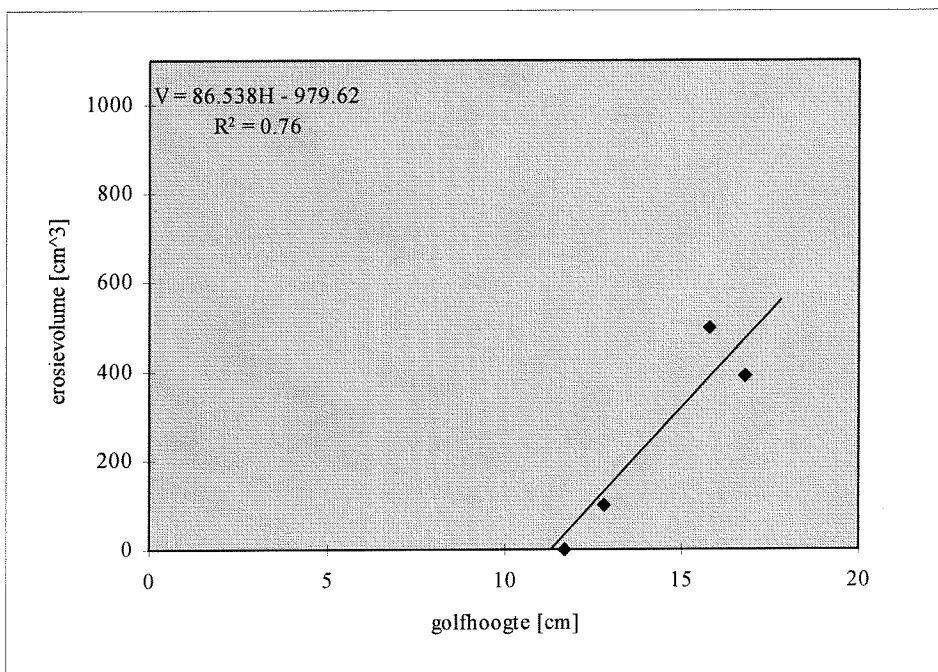
Figuur F.10: $T = 1,33$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfoohte: 9,1 cm



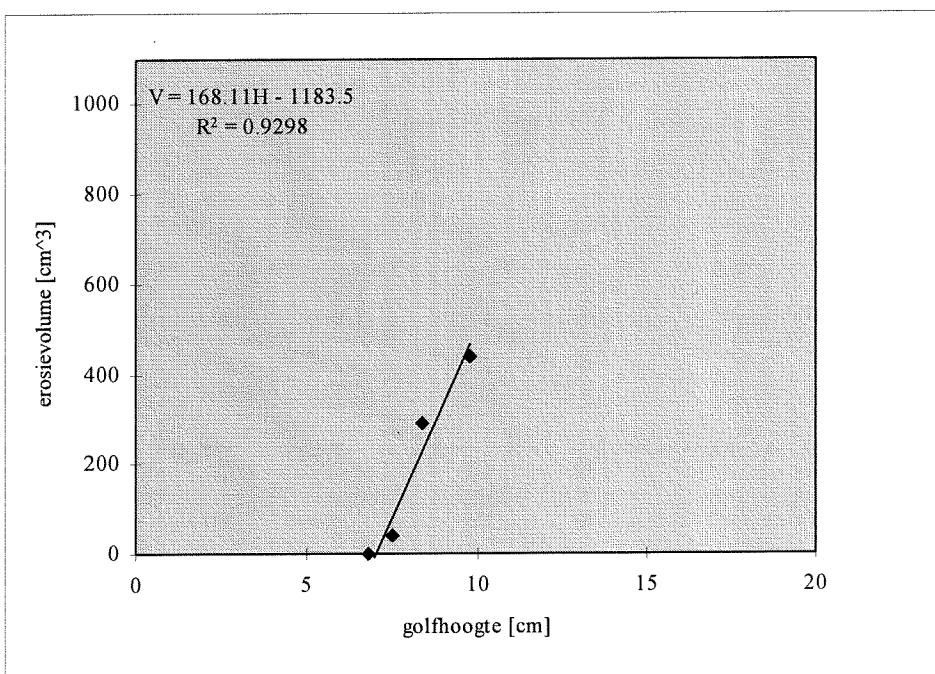
Figuur F.11: $T = 1,90$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfhoogte: 7,3 cm



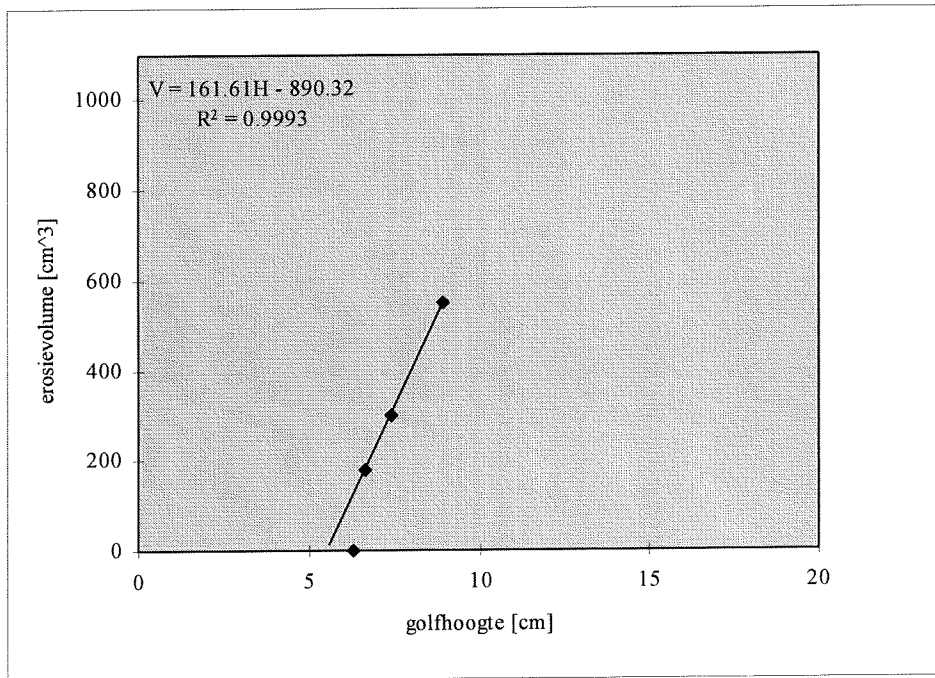
Figuur F.12: $T = 2,41$ s, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B
Kritieke golfhoogte: 6,7 cm



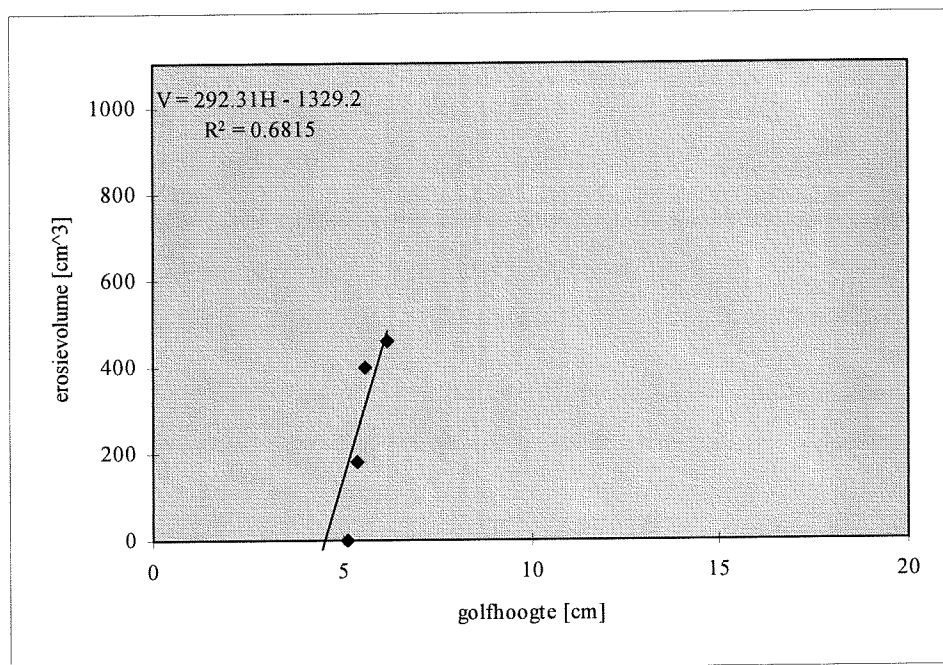
Figuur F.13: $T = 1,03$ s, geen filter
Kritieke golfhoogte: 11,7 cm



Figuur F.14: $T = 1,33$ s, geen filter
Kritieke golfhoogte: 7,0 cm



Figuur F.15: $T = 1,90$ s, geen filter
Kritieke golffhoogte: 6,3 cm



Figuur F.16: $T = 2,41$ s, geen filter
Kritieke golffhoogte: 5,1 cm

Bijlage G : Berekening van de kritieke snelheden en verhangen

In deze bijlage worden de resultaten getoond van de berekeningen van de kritieke snelheden en verhangen. Van deze grootheden is het verloop over de diepte berekend tot aan het grensvlak tussen het filter- en het basismateriaal.

Met behulp van de lineaire golftheorie kan voor elke golf het verloop van het maximale verhang over de diepte worden berekend. De filterlaag heeft geen invloed op dit diepteverloop. De gebruikte formule is:

$$i = \frac{1}{2} kH \frac{\cosh kz}{\cosh kh}$$

Bij de berekening van de snelheden wordt wel een onderscheid gemaakt tussen de waterbeweging in het filter en de waterbeweging boven het filter. De watersnelheden boven het filter worden benaderd met behulp van de lineaire golftheorie. De bovenkant van het filter wordt hierbij beschouwd als de bodem. Met de volgende formule berekent men de maximale horizontale snelheid:

$$u = \frac{1}{2} \omega H \frac{\cosh kz}{\sinh kh}$$

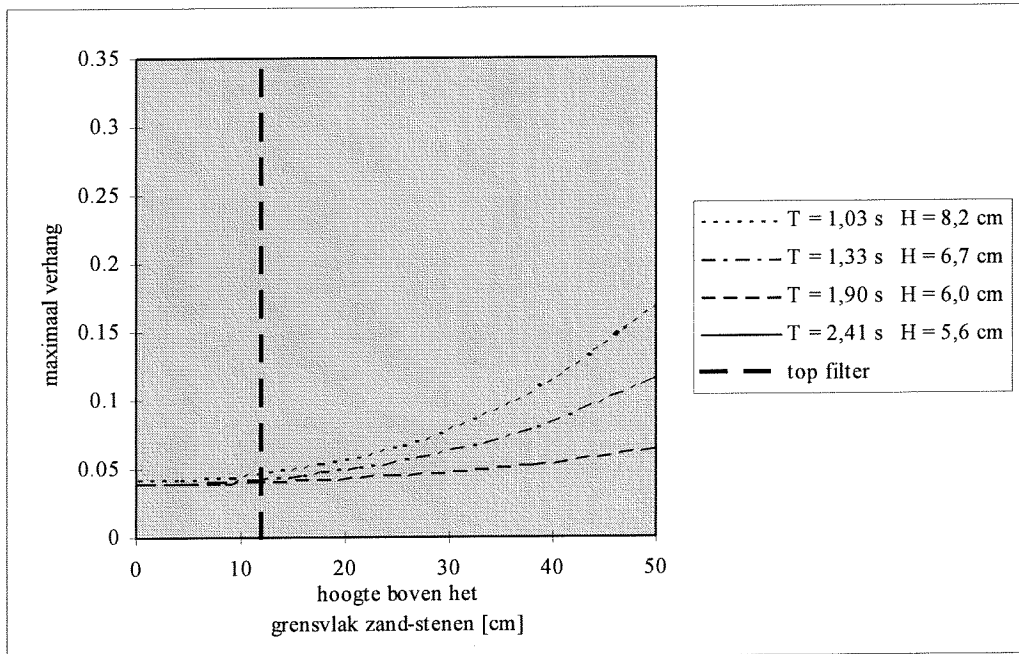
De watersnelheden in het filter worden terugberekend uit het verhangverloop met behulp van de Forchheimer-vergelijking:

$$i = au_f + bu_f |u_f| + c \frac{\partial u_f}{\partial t}$$

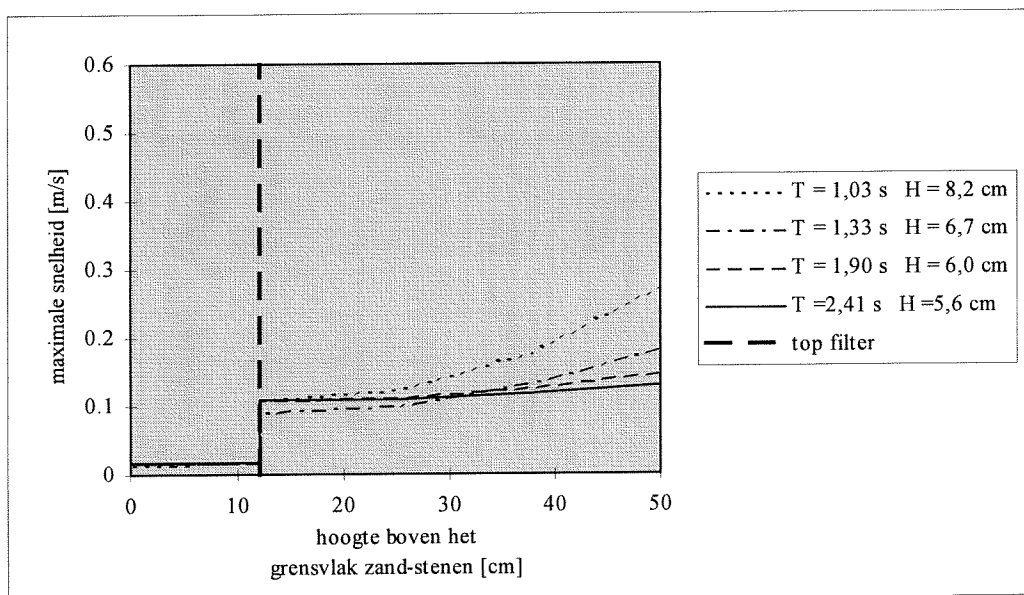
Hierin worden de modelconstanten van Van Gent ingevuld. Er wordt alleen naar de maximale snelheden gekeken. Dan geldt altijd: $\partial u_f / \partial t = 0$. Dit betekent, dat modelconstante c wegvalt uit de formule van Forchheimer. De berekeningen zijn uitgevoerd in EXCEL. De uitkomsten zijn getoond in tabel G.1.

Tabel G.1: kritieke snelheden en verhangen in de filterlaag

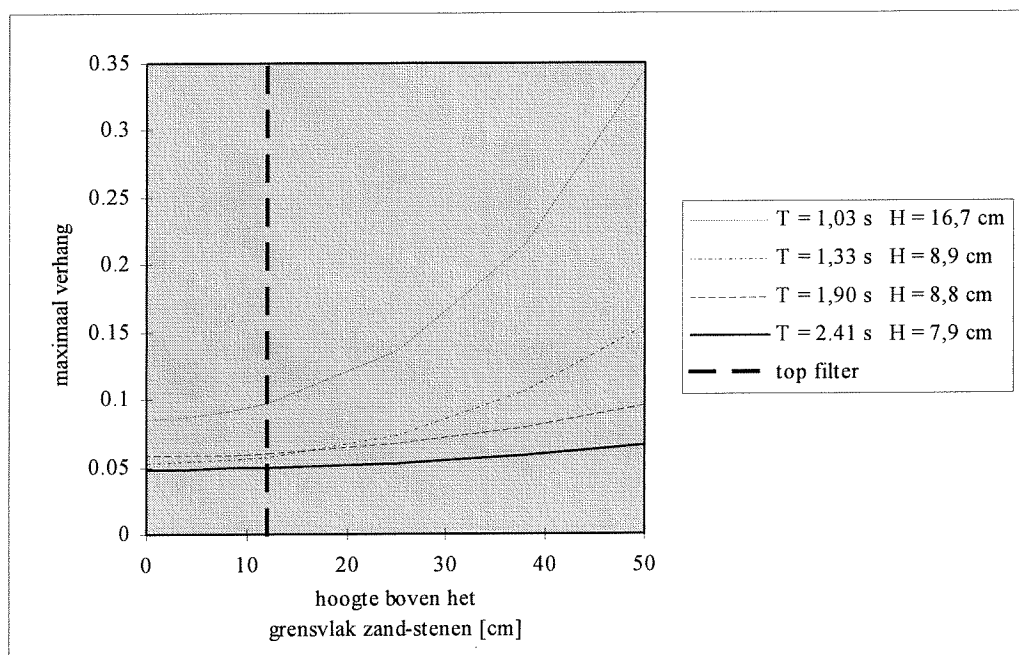
filter	kritieke golf hoogte	golf periode	verhang vlak boven het filter	verhang op het grensvlak	gemeten snelheid	snelheid vlak boven het filter	snelheid op het grensvlak
12 cm A	8,2 cm	1,03 s	0,047	0,042	0,08 m/s	0,11 m/s	0,016 m/s
12 cm A	6,7 cm	1,33 s	0,043	0,040	0,09 m/s	0,09 m/s	0,016 m/s
12 cm A	6,0 cm	1,90 s	0,041	0,039	0,11 m/s	0,11 m/s	0,018 m/s
12 cm A	5,6 cm	2,41 s	0,035	0,034	0,14 m/s	0,11 m/s	0,017 m/s
12 cm B	16,7 cm	1,03 s	0,097	0,086	0,16 m/s	0,22 m/s	0,013 m/s
12 cm B	8,9 cm	1,33 s	0,058	0,053	0,14 m/s	0,12 m/s	0,007 m/s
12 cm B	8,8 cm	1,90 s	0,060	0,058	0,17 m/s	0,16 m/s	0,008 m/s
12 cm B	7,9 cm	2,41 s	0,049	0,048	0,19 m/s	0,15 m/s	0,007 m/s
6 cm B	12,0 cm	1,03 s	0,064	0,062	0,12 m/s	0,16 m/s	0,008 m/s
6 cm B	9,0 cm	1,33 s	0,055	0,054	0,13 m/s	0,12 m/s	0,007 m/s
6 cm B	7,3 cm	1,90 s	0,048	0,048	0,13 m/s	0,13 m/s	0,007 m/s
6 cm B	6,7 cm	2,41 s	0,041	0,041	0,17 m/s	0,13 m/s	0,006 m/s
geen filter	11,7 cm	1,03 s	0,063	0,063	0,09 m/s	0,10 m/s	0,10 m/s
geen filter	7,0 cm	1,33 s	0,046	0,046	0,09 m/s	0,10 m/s	0,10 m/s
geen filter	6,3 cm	1,90 s	0,038	0,038	0,10 m/s	0,12 m/s	0,12 m/s
geen filter	5,1 cm	2,41 s	0,024	0,024	0,12 m/s	0,12 m/s	0,12 m/s



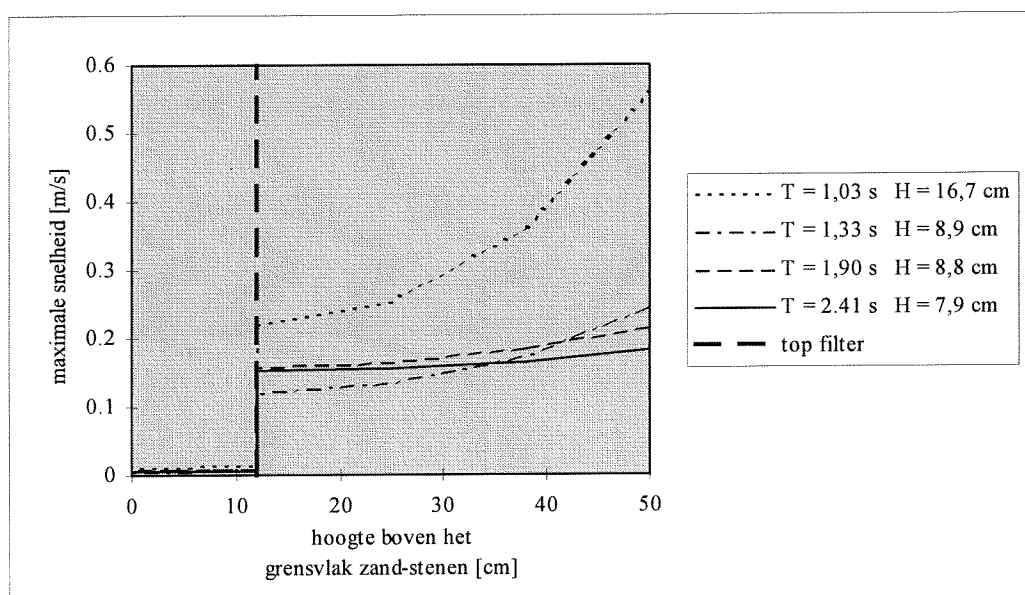
Figuur G.1: kritieke verhangen, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A ($d_{50} = 3,75 \text{ cm}$)



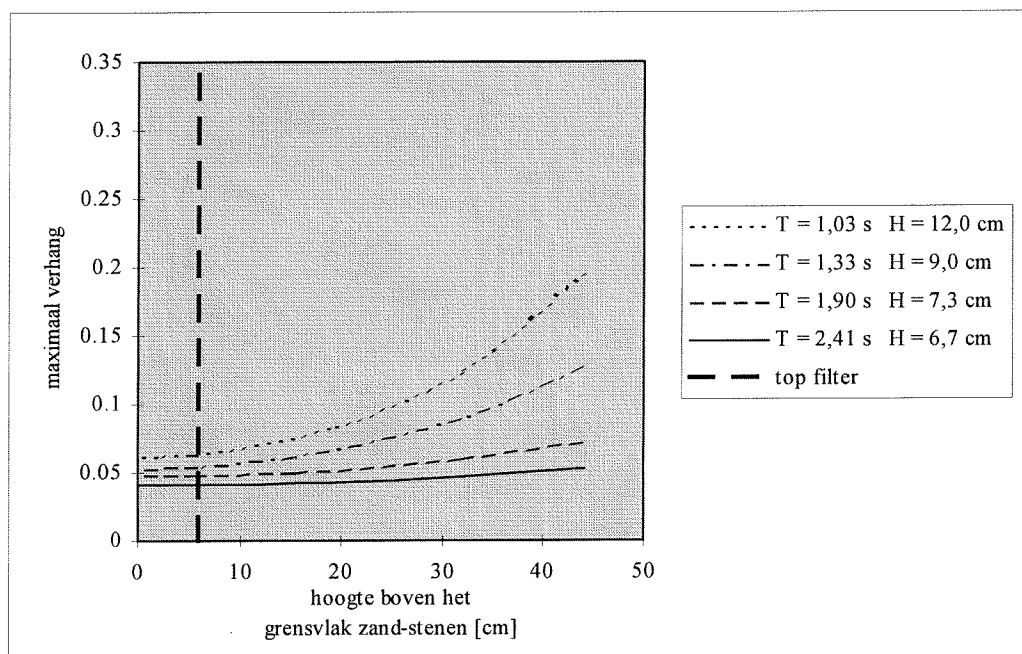
Figuur G.2: kritieke snelheden, filterdikte 12 cm, filtermateriaal A ($d_{50} = 3,75 \text{ cm}$)



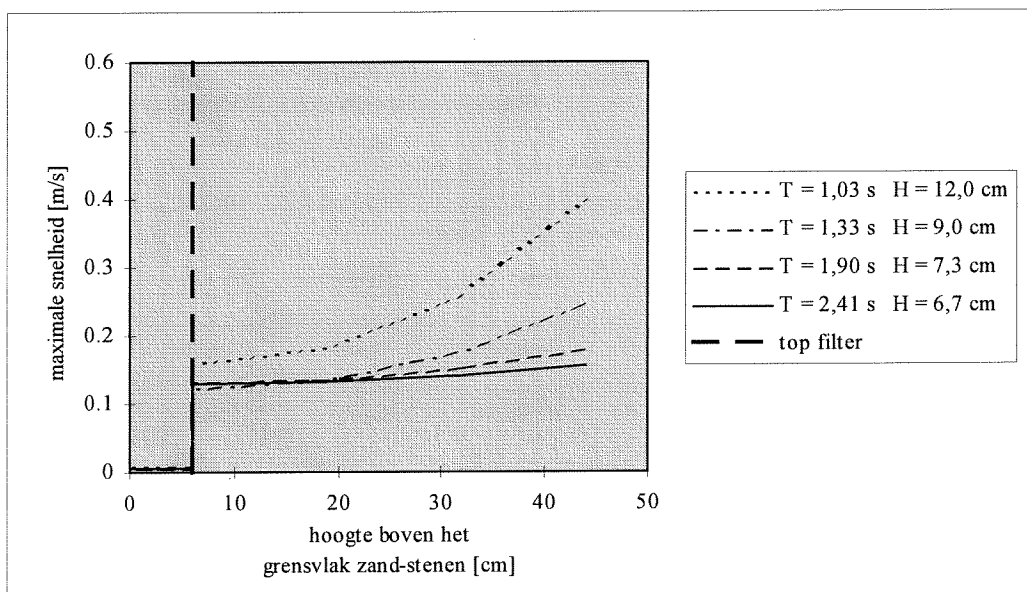
Figuur G.3: kritieke verhangen, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B ($d_{50} = 1,99 \text{ cm}$)



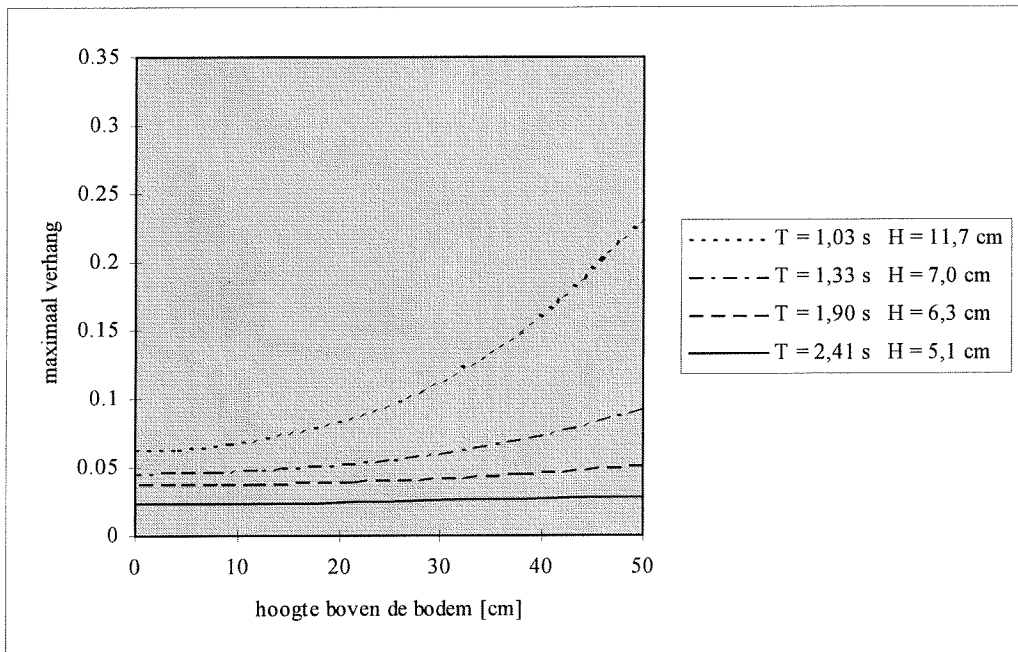
Figuur G.4: kritieke snelheden, filterdikte 12 cm, filtermateriaal B ($d_{50} = 1,99 \text{ cm}$)



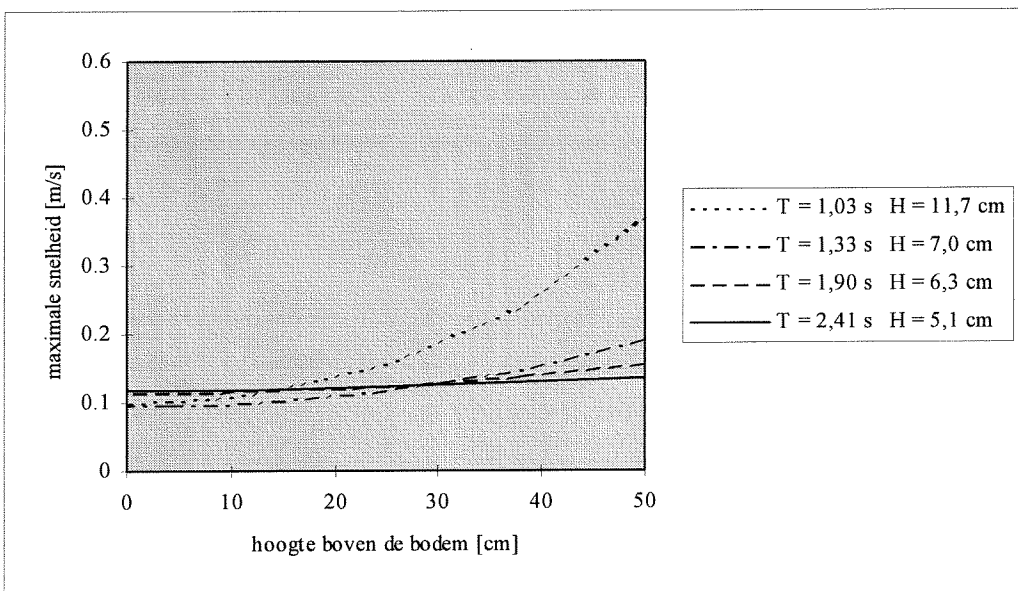
Figuur G.5: kritieke verhangen, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B ($d_{50} = 1,99 \text{ cm}$)



Figuur G.6: kritieke snelheden, filterdikte 6 cm, filtermateriaal B ($d_{50} = 1,99 \text{ cm}$)



Figuur G.7: kritieke verhangen, geen filter



Figuur G.8: kritieke snelheden, geen filter

Bijlage H : Het begin van bewegen van basismateriaal zonder filter

Van het begin van bewegen van loskorrelig bodemmateriaal onder invloed van een orbitaalbeweging kan theoretisch een schatting worden gemaakt. Dit zal nu worden gedaan voor de situatie uit het experimenteel onderzoek zonder een filterlaag.

Na uitspoeling van de fijnere fracties aan het oppervlak van het bodemmateriaal zal een zogenaamde pantserlaag van grove korrels overblijven. Daarom zal bij deze stabiliteitsberekening worden gekeken naar de d_{85} van het bodemmateriaal. Deze wordt vervolgens dimensieloos gemaakt:

$$d_{85} = 111 \mu\text{m} \quad \Rightarrow \quad d_* = d(\Delta g / \nu^2)^{1/3} = 2,42$$

Hierin is $\Delta = 1,65$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ en $\nu = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Uit het diagram van Sleath (zie figuur 3.2) kan vervolgens worden bepaald, dat $\psi = 0,10$. Voor de kritieke schuifspanning op de bodem volgt dan:

$$\tau_c = \psi(\rho_s - \rho_w)gd = 1,79 \text{ N/m}^2$$

Een benadering voor de kritieke schuifspanning onder golven is:

$$\tau_{c, \max} = \frac{1}{2} \rho_w f_w \hat{u}_0^2 \quad (\text{Jonsson 1966})$$

f_w is hierin de bodemwrijving. Deze is afhankelijk van de maximale orbitaalverplaatsing van korrels op de bodem a_0 en de bodemruwheid r .

$$a_0 = \hat{u}_0 T / 2\pi \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Voor } T = 1,03 \text{ s en } \hat{u}_0 \approx 0,05 \text{ m/s geldt } a_0 = 0,8 \text{ cm} \\ \text{Voor } T = 1,33 \text{ s en } \hat{u}_0 \approx 0,05 \text{ m/s geldt } a_0 = 1,1 \text{ cm} \\ \text{Voor } T = 1,90 \text{ s en } \hat{u}_0 \approx 0,05 \text{ m/s geldt } a_0 = 1,5 \text{ cm} \\ \text{Voor } T = 2,41 \text{ s en } \hat{u}_0 \approx 0,05 \text{ m/s geldt } a_0 = 1,9 \text{ cm} \end{array}$$

De bodemwrijving is afhankelijk van de afmetingen van de ribbels die ontstaan in het bed. In de experimenten zijn ribbels waargenomen in de toestand van begin van bewegen met een hoogte van 0,5 cm en een lengte van 2 cm.

$$r = 25(H_{\text{rib}}^2 / L_{\text{rib}}) = 3,1 \text{ cm} \quad (\text{Swart 1976})$$

In alle gevallen geldt $a_0/r < 1,59$ en dan blijkt $f_w = 0,30$ te zijn. De kritieke maximale orbitaalsnelheid kan nu worden berekend uit de vergelijking van Jonsson:

$$\hat{u}_{0;kr} = 0,035 \text{ m/s}$$

Uit de lineaire-golf-theorie kunnen nu de kritieke golfhoogtes worden bepaald voor de beschouwde golfperiodes bij $h = 50 \text{ cm}$:

$$\begin{array}{l} \text{Voor } T = 1,03 \text{ s geldt } H_{kr} = 4,0 \text{ cm} \\ \text{Voor } T = 1,33 \text{ s geldt } H_{kr} = 2,6 \text{ cm} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{Voor } T = 1,90 \text{ s geldt } H_{kr} = 1,9 \text{ cm} \\ \text{Voor } T = 2,41 \text{ s geldt } H_{kr} = 1,5 \text{ cm} \end{array}$$

Bijlage I : De filterformule van de Graauw et al.

De Graauw et al. leidden in 1983 een formule af voor het begin van bewegen van basismateriaal onder een filterlaag. In de beschouwde situatie is er geen sprake van een vrij wateroppervlak en is het verhang constant over de filterlaag. De formule is afgeleid voor een stationaire stroming. Uit experimenten blijkt echter dat hij ook mag worden gebruikt voor een instationaire stroming, mits $T > 2$ s. De filterformule luidt:

$$i_{cr} = \left(\frac{0,06}{n_f^3 d_f^{4/3}} + \frac{n_f^{5/3} d_f^{1/3}}{1000 d_b^{5/3}} \right) u_{*cr}^2$$

In bijlage H is al afgeleid dat $\psi = 0,10$. Voor de kritieke schuifspanningssnelheid geldt nu:

$$u_{*c}^2 = \psi \Delta g d = 0,10 * 1,65 * 9,8 \text{ m/s}^2 * 111 * 10^6 \text{ m} = 1,79 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

Dit kan tezamen met de porositeit en de diameters ingevuld worden in de formule. Voor beide soorten filtermateriaal kan nu een waarde worden gevonden voor het kritieke verhang.

Voor het kritiek verhang bij filtermateriaal A geldt:

$$\left. \begin{array}{l} n = 0,42 \\ d_{15f} = 33,0 \text{ mm} \\ d_{50b} = 0,100 \text{ mm} \end{array} \right\} \Rightarrow i_{cr} = 0,076$$

Voor het kritiek verhang bij filtermateriaal B geldt:

$$\left. \begin{array}{l} n = 0,39 \\ d_{15f} = 17,1 \text{ mm} \\ d_{50b} = 0,100 \text{ mm} \end{array} \right\} \Rightarrow i_{cr} = 0,086$$