

# Het doordringen van golven in een filterlaag

## Afstudeerrapport

november 2000

Roland Jansens

R. Jansens  
Korvezeestraat 66  
2628 DC Delft  
tel. nr.: 015-2569076  
e-mail: [roland66@dds.nl](mailto:roland66@dds.nl)  
st. nr.: 9393567

Afstudeercommissie:

Prof. ir. K. d' Angremond  
dr. ir. H.L. Fontijn  
drs. R. Booij  
ir. W.H. Tutuarima  
ir. B. Steijn



## Samenvatting

Filterconstructies hebben als doel constructies te beschermen tegen uitspoeling van grond en beschadiging door wateroverdrukken. Een granulaire filterconstructie bestaat uit één of meer lagen van granulair *filtermateriaal*, die het onderliggende, loskorrelige *basismateriaal* tegenhoudt, maar het water doorlaat. Meestal wordt het criterium gehanteerd, dat er geen erosie zal optreden van het basismateriaal. In de praktijk is het nauwkeurig aanbrengen van filterconstructies, bestaande uit meerdere lagen, een lastige en kostbare aangelegenheid. Het lijkt daarom gunstig het aantal afzonderlijke lagen waaruit het filter is opgebouwd te minimaliseren. Dit is mogelijk door een criterium te hanteren, waarbij er beperkt transport van het basis- en/of filtermateriaal toelaatbaar is, waardoor het filter kan zakken. Indien de zakking een bepaalde toelaatbare grens niet overschrijdt, zal het filter zijn functie blijven vervullen. We spreken dan van een zogenaamd *zakkingsfilter*.

Er is nog maar weinig ervaring met het gedrag van zakkingsfilters, met name onder invloed van een golfbelasting. In dit kader heeft Halter (1999) een aantal kritieke golfbelastingen bepaald, waarbij voor het eerst erosie van basismateriaal in een zakkingsfilter optreedt (begin van beweging). De grootte van de waterbeweging in de filterlaag was tot op heden onbekend. Daarom zijn tijdens dit onderzoek snelheden gemeten in de poriën van de filterlaag, hier *poriesnelheden* genoemd, zoals deze ontstaan onder invloed van de door Halter (1999) bepaalde kritieke golfbelastingen. Hierbij is gebruik gemaakt van een zogenaamde *meetporie*, welke wordt gevormd door aan elkaar gekitte stenen,

Het verloop van zowel de horizontale als de verticale poriesnelheid, optredend bij de kritieke belastingsgevallen, is nagenoeg constant over de dikte van de filterlaag, indien de oriëntatie van de meetporie op de verschillende hoogten gelijk is. Dit stemt overeen met de resultaten van Van Os (1998), die vergelijkbare experimenten heeft uitgevoerd, waarbij de filterlaag werd belast door een stationaire stroming. In deze situatie zijn de bij deze experimenten gemeten poriesnelheden alle ongeveer van dezelfde grootte. De gemiddelde waarde voor de poriesnelheid lijkt sterk afhankelijk van de oriëntatie en daarmee van de toegankelijkheid van de meetporie; de snelheidsfluctuaties lijken hier niet afhankelijk van te zijn. De gemeten poriesnelheden, veroorzaakt door de kritieke golfbelastingen volgens Halter (1999), zijn groot genoeg om het basismateriaal in beweging te brengen.

Bij een kritieke golfbelasting zou een over verschillende poriën gemiddelde poriesnelheid, variërend in grootte en oriëntatie, kunnen bestaan, die gecombineerd met de fluctuaties van de poriesnelheid voor een bepaalde filterlaag significant is. Na het overschrijden van de kritieke belasting vindt er erosie onder de filterlaag en sedimenttransport door de filterlaag plaats. Er zou onderzoek verricht kunnen worden naar de hoeveelheid sediment die per tijdseenheid door de filterlaag getransporteerd kan worden, en van welke parameters de grootte van dit transport afhankelijk is. Het bovenstaande is ook mogelijk voor een situatie, waarbij de filterconstructie wordt belast door stationaire stroming of een combinatie van golven en stationaire stroming.



## Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b> .....	<b>i</b>
<b>Inhoudsopgave</b> .....	<b>iii</b>
<b>Symbolenlijst</b> .....	<b>v</b>
<b>1 Inleiding</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Aanleiding onderzoek</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Probleemstelling</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Doelstelling</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4 Opzet rapport</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Theoretische achtergrond</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Granulaire filterconstructies</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 Algemeen .....	5
2.1.2 Ontwerpcriteria en typen granulaire filterconstructies .....	6
<b>2.2 Recent onderzoek naar de werking van granulaire filterconstructies onder invloed van een hydraulische belasting</b> .....	<b>7</b>
2.2.1 Kritieke golfbelastingen .....	7
2.2.2 Kritiek verhang .....	8
2.2.3 Filtersnelheid en de Forchheimer-vergelijking .....	9
2.2.4 Snelheidsmetingen in de filterlaag door Van Os (1998) .....	10
<b>2.3 Filterconstructie onder invloed van golfbelasting</b> .....	<b>11</b>
2.3.1 Beschrijving van de geschematiseerde situatie van Halter (1999) .....	11
2.3.2 Lineaire golftheorie .....	12
2.3.3 Uitbreiding onderzoek Halter (1999) .....	14
<b>2.4 Conclusie</b> .....	<b>15</b>
<b>3 Modelonderzoek</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 De proefopstelling</b> .....	<b>17</b>
3.1.1 De inrichting van de stroomgoot.....	17
3.1.2 Het golfschot .....	17
3.1.3 De filterconstructie in de stroomgoot.....	18
3.1.4 Filtermateriaal .....	19
<b>3.2 Gebruikte instrumenten en apparatuur</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Elektromagnetische snelheidsmeter .....	19
3.2.2 Golfhoogtemeter .....	20
3.2.3 Laser-Doppler Flow Meter .....	20
<b>3.3 Het meten van stroomsnelheden in een porie van de filterlaag</b> .....	<b>21</b>
3.3.1 Geleidingsbuisjes en gefixeerde meetporie .....	21
3.3.2 Procedure stellen geleidingsbuisjes in de filterconstructie .....	23
<b>3.4 Dataverwerking</b> .....	<b>26</b>
3.4.1 Gemeten data.....	26
3.4.2 Ensemblemiddeling.....	28
3.4.3 Spectraalanalyse .....	30
<b>3.5 Uit te voeren metingen</b> .....	<b>34</b>
3.5.1 Verloop poriesnelheden over dikte filterlaag .....	34
3.5.2 Effect verhogen bemonsteringsfrequentie.....	35
3.5.3 Gevoeligheid voor verschillende oriëntaties meetporie .....	36
3.5.4 Constante golfperiode, variabele golfhoogte.....	37

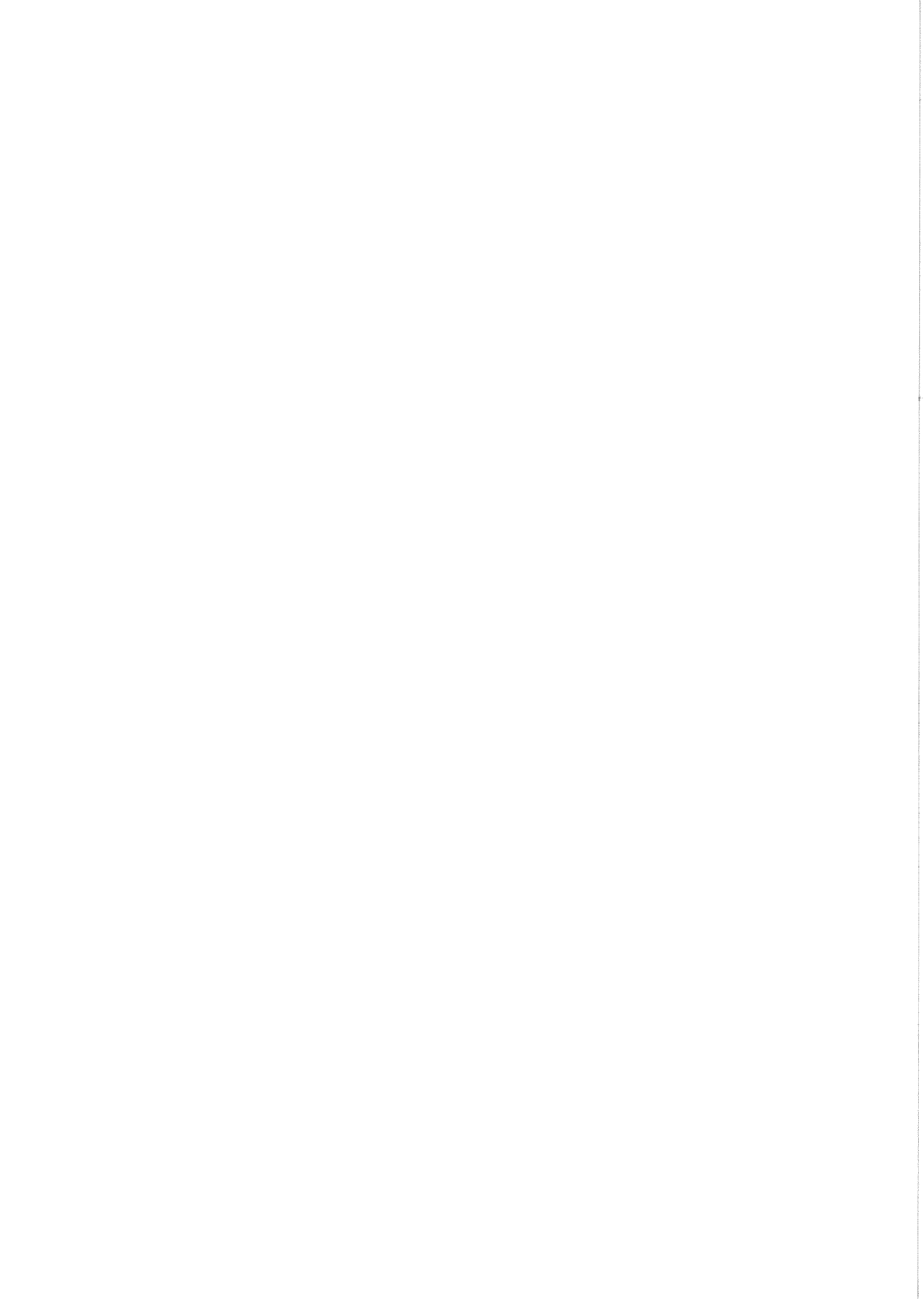
3.5.5	Constante golfhoogte, variabele golfperiode .....	37
3.5.6	Snelheidsmetingen met LDFM boven de filterlaag .....	37
3.5.7	Snelheidsmetingen met LDFM zonder de filterlaag .....	38
3.5.8	Overzicht totaal aantal uit te voeren metingen.....	38
<b>4</b>	<b>Analyse snelheidsmetingen.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Analyse verloop poriesnelheden over dikte filterlaag .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Analyse effect verhogen bemonsteringsfrequentie .....</b>	<b>46</b>
<b>4.3</b>	<b>Analyse gevoeligheid voor verschillende oriëntaties meetporie .....</b>	<b>48</b>
<b>4.4</b>	<b>Analyse variabele golfhoogte.....</b>	<b>49</b>
<b>4.5</b>	<b>Analyse variabele golfperiode .....</b>	<b>50</b>
<b>4.6</b>	<b>Analyse snelheidsmetingen boven filterlaag met LDFM .....</b>	<b>52</b>
<b>4.7</b>	<b>Analyse snelheidsmetingen zonder filterlaag met LDFM.....</b>	<b>54</b>
<b>4.8</b>	<b>Resumé analyse snelheidsmetingen .....</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b>Conclusies &amp; Aanbevelingen.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusies.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2</b>	<b>Aanbevelingen .....</b>	<b>59</b>
	<b>Bronvermelding .....</b>	<b>61</b>

**Bijlagen**

Bijlage A:	Zeefkromme filtermateriaal
Bijlage B:	Afmetingen meetvolume
Bijlage C:	Meetporie
Bijlage D:	Verband tussen de horizontale orbitaalsnelheid en het verhang
Bijlage E:	Belasting op een zandkorrel

## Symbolenlijst

Symbol	omschrijving	SI-eenheid
a	1. golfamplitude = $H/2$ 2. modelconstante voor lineaire term (Forcheimer)	[m] [s/m]
$A_f$	oppervlakte v.d. totale doorsnede v.d. filterlaag	[m <sup>2</sup> ]
$A_p$	oppervlakte v.d. totale doorsnede v.d. poriën in de filterlaag	[m <sup>2</sup> ]
b	modelconstante voor kwadratische term (Forcheimer)	[s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
c	modelconstante voor tijdsafhankelijke term (Forcheimer)	[s <sup>2</sup> /m]
$D_b$	korreldiameter basismateriaal	[m]
$D_f$	korreldiameter filtermateriaal	[m]
E	spectrale vermogensdichtheid	[(m/s) <sup>2</sup> /Hz]
f	frequentie	[Hz]
g	gravitatieversnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
H	golfhoogte	[m]
i	verhang	-
$i_{cr}$	kritiek verhang	-
k	golfgetal = $2\pi/L$	[1/m]
L	golflengte	[m]
n	porositeit	-
N	aantal golven	-
p	druk	[Pa]
t	tijd	[s]
T	golfperiode	[s]
u	stroomsnelheid in x-richting	[m/s]
$u_b$	horizontale orbitaalsnelheid in x-richting	[m/s]
$u_{cr}$	kritieke snelheid	[m/s]
$u_f$	filtersnelheid	[m/s]
$u_p$	horizontale poriesnelheid in x-richting	[m/s]
$u^*$	schuifspanningssnelheid	[m/s]
$\bar{u}$	(tijd)gemiddelde stroomsnelheid in x-richting	[m/s]
$\hat{u}$	maximale snelheidsamplitude in x-richting	[m/s]
$\langle u \rangle$	ensemblegemiddelde stroomsnelheid in x-richting	[m/s]
$u'$	r.m.s.-waarde stroomsnelheid in x-richting	[m/s]
$w_b$	verticale orbitaalsnelheid in z-richting	[m/s]
$w_p$	verticale poriesnelheid in z-richting	[m/s]
$\hat{w}$	maximale snelheidsamplitude in z-richting	[m/s]
$\langle w \rangle$	ensemblegemiddelde stroomsnelheid in z-richting	[m/s]
$w'$	r.m.s.-waarde stroomsnelheid in z-richting	[m/s]
x	plaatscoördinaat in lengterichting v.d. goot	[m]
y	plaatscoördinaat in breedterichting v.d. goot	[m]
z	plaatscoördinaat in hoogterichting v.d. goot	[m]
$\alpha$	fase	[°]
$\eta$	oppervlakte-uitwijking golfbeweging	[m]
$\nu$	kinematische viscositeit	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	soortelijke massa	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	hoekfrequentie = $2\pi/T$	[1/s]



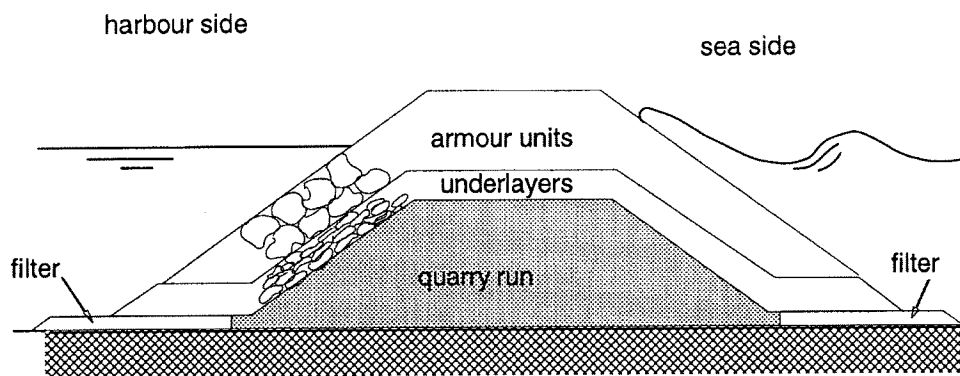


## 1 Inleiding

In dit eerste hoofdstuk wordt de aanleiding tot dit onderzoek beschreven, gevolgd door de probleemstelling en de doelstelling. Tenslotte wordt de opzet van dit rapport uitééngezét.

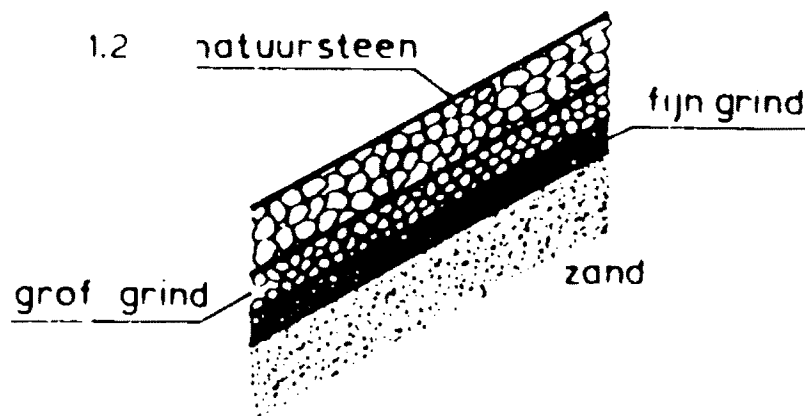
### 1.1 Aanleiding onderzoek

De afgelopen decennia is veel onderzoek verricht naar de werking van *granulaire filters*, zoals die in waterbouwkundige constructies op ruime schaal worden toegepast in o.a. oeverbekledingen, bodemverdedigingen en golfbrekers (zie figuur 1.1 en 1.2). Ze hebben als doel om de constructies te beschermen tegen uitspoeling van de grond



Figuur 1.1: Filter in een golfbreker

en beschadiging door wateroverdrukken. Een granulaire filterconstructie bestaat uit één of meer lagen van granulair *filtermateriaal*, die het onderliggende, loskorrelige *basismateriaal* tegenhoudt, maar het water doorlaat. De korreldiameter van het filtermateriaal verloopt dan van laag tot laag, waarbij de onderste laag de kleinste stenen en de bovenste laag de grootste stenen bevat.



Figuur 1.2: Filter in een oeverbekleding

Bij het ontwerp van een filterconstructie kan het criterium worden gehanteerd dat er geen transport van het basis- en/of filtermateriaal toelaatbaar is. Dit kan worden bereikt door de verhouding van de korreldiameters van de opeenvolgende lagen

dusdanig te kiezen, dat de poriën van de bovenste laag klein genoeg zijn om het uittreden van de korrels van de onderste laag te beletten, een zogenaamd *geometrisch-dicht filter*, of door een dusdanige verhouding van de korreldiameters te kiezen dat de korrels van de onderste laag wel in staat zijn uit te treden, maar de hydraulische belasting zodanig begrensd blijft dat deze niet in staat is zodanige krachten op de korrels van de onderste laag te genereren dat deze daadwerkelijk uittreden, een zogenaamd *geometrisch-open filter*. Als de verhouding van de korreldiameters een bepaalde waarde heeft bereikt, kan het basismateriaal door het filter heen bewegen. Voordeel van een geometrisch-open filter is, dat de korrelgrootteverhouding tussen twee opvolgende lagen aanzienlijk groter kan zijn dan bij een geometrisch-dicht filter, waardoor mogelijk met minder lagen kan worden volstaan.

Ook kan het criterium worden gehanteerd, waarbij er beperkt transport van het basis- en/of filtermateriaal toelaatbaar is. De verhouding tussen het filtermateriaal en het onderliggende basismateriaal laat beweging van het basismateriaal door de filterlaag ten gevolge van een bepaalde hydraulische belasting toe, waardoor het filter kan zakken. Indien de zakkingsgrens een bepaalde toelaatbare grens niet overschrijdt, zal het filter zijn functie blijven vervullen. We spreken dan van een zogenaamd *zakkingsfilter*. Voordeel van een zakkingsfilter is, dat de korrelgrootteverhouding tussen twee opvolgende lagen nog groter kan zijn dan bij een geometrisch-open filter, waardoor mogelijk met nog minder lagen kan worden volstaan.

In de praktijk is het nauwkeurig aanbrengen van filterconstructies, bestaande uit meerdere lagen, een lastige en kostbare aangelegenheid. Het lijkt daarom gunstig het aantal afzonderlijke lagen waaruit het filter is opgebouwd te minimaliseren. Het toepassen van een zakkingsfilter kan hierdoor de aantrekkelijkste oplossing zijn.

Er is nog maar weinig ervaring met het gedrag van zakkingsfilters, met name onder invloed van een golfbelasting. In dit kader heeft Halter (1999) een aantal kritieke golfbelastingen bepaald, waarbij voor het eerst erosie van basismateriaal in een zakkingsfilter optreedt (begin van beweging). De grootte van de waterbeweging in de filterlaag onder deze golfbelastingen en het verband met transport van het basismateriaal zijn tot op heden onbekend.

## **1.2 Probleemstelling**

Bij toepassing van een zakkingsfilter zal onder invloed van een bepaalde golfbelasting, de basislaag eroderen, waardoor de constructie zal zakken. De wijze waarop deze golfbelasting in de filterlaag doordringt en het verband met transport van het basismateriaal zijn tot op heden onbekend. M.a.w. wat is het verband tussen deze uitwendige belasting op het filter, waarbij voor het eerst begin van bewegen van het basismateriaal optreedt, en de interne belasting in het filter op de basislaag?

## **1.3 Doelstelling**

Het doel van dit onderzoek is het zoeken naar het verband tussen de uitwendige belasting op het filter, de interne belasting in het filter en het begin van erosie van de basislaag. Als uitgangspunt voor de uitwendige belastingen dienen de kritieke golfbelastingen volgens Halter (1999), waarbij voor het eerst begin van bewegen van het basismateriaal onder de filterlaag optreedt. We zijn hierbij geïnteresseerd in de

overeenkomst in de grootte van deze interne belastingen bij de verschillende kritieke golfbelastingen. Hiertoe zullen de snelheden gemeten worden in de poriën van de filterlaag, zoals deze ontstaan onder invloed van deze kritieke golfbelastingen.

#### **1.4 Opzet rapport**

Hoofdstuk 1 bevat de inleiding, alsmede de probleem- en doelstelling van dit onderzoek. In hoofdstuk 2 wordt de theoretische achtergrond van dit onderzoek behandeld. In hoofdstuk 3 wordt de opzet van het modelonderzoek besproken: de gebruikte opstelling, de dataverwerking en de opzet van de metingen. In hoofdstuk 4 worden de meetresultaten geanalyseerd. Tenslotte worden in hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen naar aanleiding van dit onderzoek gegeven.



## 2 Theoretische achtergrond

*Alvorens met het onderzoek wordt begonnen, dient te worden nagegaan wat er bekend is over granulaire filters. In dit hoofdstuk wordt de beschikbare, voor dit onderzoek relevante kennis op het gebied van granulaire filters kort samengevat, waarna de te onderzoeken situatie wordt besproken.*

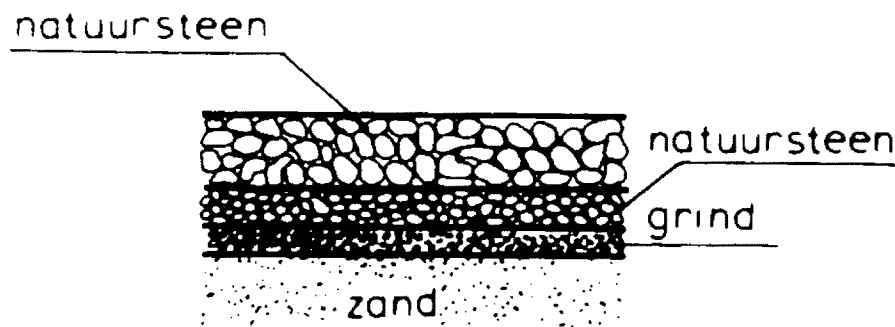
### 2.1 Granulaire filterconstructies

#### 2.1.1 Algemeen

Granulaire filters worden op ruime schaal toegepast in waterbouwkundige constructies. Van filterconstructies in de waterbouw zijn de volgende functies te onderscheiden:

- *Filterfunctie*, dat wil zeggen tegengaan van transport van materiaal uit een te beschermen laag en tegelijkertijd toestaan van afvoer van water, opdat er geen overdrukken ontstaan.
- *Drainagefunctie*, dat wil zeggen afvoeren van (grond)water teneinde overdrukken te voorkomen.

Een filter faalt als het een of meer van zijn functies niet (meer) vervult. Belangrijke eigenschappen van het filtermateriaal bij de filter- en drainagefunctie zijn de porieafmeting en de waterdoorlatendheid loodrecht op en in het vlak van het filter. Tevens dient het filtermateriaal intern stabiel te zijn, d.w.z. dat de korrels niet onderling mogen bewegen ten gevolge van een bepaalde waterbeweging. Indien dit niet het geval is, kan dit ten koste gaan van de zanddichtheid van het filter.



**Figuur 2.1:** Granulair filter uit meerdere lagen granulair filtermateriaal

Een granulaire filterconstructie bestaat uit één of meer lagen van granulair filtermateriaal (zie figuur 2.1), dat het onderliggende, loskorrelige basismateriaal tegenhoudt, maar het water doorlaat. De korreldiameter van het filtermateriaal verloopt dan van laag tot laag, waarbij de onderste laag de kleinste stenen en de bovenste laag de grootste stenen bevat. Als maat voor de stenensortering in een partij breuksteen kan het korrelgewicht worden gebruikt. De gewichtsverdeling van de korrels in een partij breuksteen wordt over het algemeen aangegeven als een percentage dat wordt overschreden door de cumelatieve gewichtscurve, waarin  $W_{50}$  het korrelgewicht uitdrukt dat door 50% van de korrels in de totale partij wordt overschreden. Op dezelfde wijze worden  $W_{85}$  en  $W_{15}$  gedefinieerd, waarvan het

korrelgewicht door respectievelijk 85% en 15% van de korrels worden onderschreden. Het korrelgewicht,  $W$ , kan eventueel worden omgerekend naar een *nominale korreldiameter* ( $D_n$ ). Dit is de lengte van de ribbe van een kubusvormige korrel met hetzelfde volume en soortelijke massa als de filterkorrel (zie ook bijlage A).

Als maat voor de verhouding tussen de grootte van de filter- en basiskorrels wordt vaak  $D_{n15F}/D_{n85B}$  gebruikt, waarin met de subscripten F en B respectievelijk de filter- en basiskorrels wordt bedoeld.

In de praktijk is het nauwkeurig aanbrengen van filterconstructies, bestaande uit meerdere lagen, een lastige en kostbare aangelegenheid. Daarom lijkt het aantrekkelijk om het aantal lagen te minimaliseren, hetgeen kan worden bereikt door de verhouding van de korreldiameters van het materiaal van opeenvolgende lagen groter te kiezen.

### 2.1.2 Ontwerpcriteria en typen granulaire filterconstructies

Voor het ontwerp van een granulaire filterconstructie kan het criterium worden gehanteerd, dat transport van filter- en/of basismateriaal niet toelaatbaar is. Er kan dan een filter worden ontworpen, waarbij het basismateriaal het korrelskelet van het filtermateriaal niet kan passeren, omdat de openingen in het filter te klein zijn. Dit kan worden bereikt door de verhouding van de korreldiameters van het materiaal van de opeenvolgende lagen dusdanig te kiezen, dat de poriën van de bovenste laag klein genoeg zijn om het uitreden van de korrels van de onderste laag te beletten: een *geometrisch-dichte filterconstructie*.

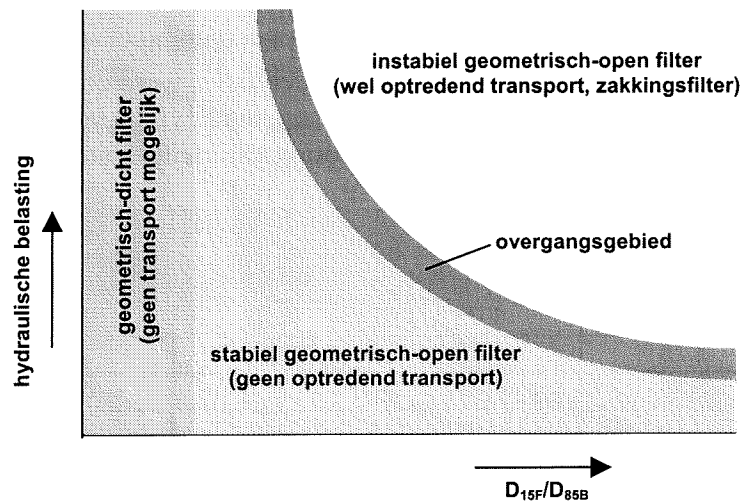
Een andere benadering van bovenstaand criterium kan zijn dat weliswaar de openingen in het filter voldoende groot zijn, waardoor transport van het basismateriaal door de filterconstructie mogelijk, maar dat de belastingen te gering zijn om de hiervoor benodigde krachten te genereren is: een *stabiele geometrisch-open filterconstructie*

Er kan ook gebruik worden gemaakt van een ander criterium, waarbij beperkt transport van filter- en/of basismateriaal toelaatbaar is. De openingen in het filter zijn dan groot genoeg, waardoor transport van het basismateriaal door de filterconstructie mogelijk is, terwijl de hydraulische belasting dan bovendien zodanig groot is dat er daadwerkelijk transport van het basismateriaal door de filterlaag optreedt: een *instabiele geometrisch-open filterconstructie of zakkingsfilter*. Een zakkingsfilter dient te worden ontworpen op een hoeveelheid erosie, die tijdens de levensduur van het filter toelaatbaar wordt geacht, zodat deze zijn functie kan blijven vervullen. Het zakkingsfilter wordt echter nog maar zelden toegepast, omdat nog niet duidelijk is welke zakking ten gevolge van transport toelaatbaar is en zakking zich ontwikkelt in de tijd. Voordeel van een geometrisch-open filter is, dat de korrelgrootteverhouding tussen twee opvolgende lagen aanzienlijk groter kan zijn dan bij een geometrisch-dicht filter, waardoor mogelijk met minder lagen kan worden volstaan. Het bovenstaande samenvattend kunnen de volgende filtertypen worden onderscheiden:

- geometrisch-dicht filter: *geen transport mogelijk;*
- geometrisch-open filter: 1) *stabiel, geen optredend transport (belasting te klein), maar in principe wel mogelijk;*  
2) *instabiel, beperkt transport toelaatbaar (zakkingsfilter)*

Deze filtertypen zijn in figuur 2.2 schematisch weergegeven, waarbij de hydraulische

belasting tegen een veelgebruikte verhouding van de korreldiameters,  $D_{15F}/D_{85B}$ , is uitgezet.



Figuur 2.2: Schematische weergave van de filtertypen

Voor het ontwerpen van een geometrisch-dicht filter zijn ontwerpregels beschikbaar die zijn gebaseerd op de verhouding van de korreldiameters van het materiaal van de opeenvolgende lagen. Aangezien de verhouding van de korreldiameters hierbij dusdanig wordt gekozen dat een korrel van de onderliggende laag fysiek niet in staat is de bovenliggende laag te passeren, is het niet noodzakelijk te beschikken over de hydraulische belastingen in de filterlaag. Daarom worden deze ontwerpregels hier niet behandeld. Voor filterconstructies, waarbij de waterbeweging wel in rekening moet worden gebracht, zoals geometrisch-open filters, zijn er geen algemeen geldende ontwerpregels beschikbaar. Om meer te weten te komen over de werking van deze filterconstructies onder invloed van een hydraulische belasting zijn we aangewezen op recent verricht onderzoek.

## 2.2 Recent onderzoek naar de werking van granulaire filterconstructies onder invloed van een hydraulische belasting

Veel recent onderzoek is gericht op het bepalen van kritieke hydraulische belastingen op de constructie, waarbij voor het eerst begin van bewegen van het basismateriaal onder een filterconstructie optreedt. Het verband tussen deze uitwendige belasting en een interne belasting op/in het filter, is echter tot op heden onbekend. Tevens zijn de meeste experimenten tijdens deze onderzoeken uitgevoerd in een gesloten filterbak, zonder waterbeweging boven de filterconstructie. In deze paragraaf worden de voor dit onderzoek relevante resultaten besproken.

### 2.2.1 Kritieke golfbelastingen

Halter (1999) heeft onderzoek verricht, dat gericht was op het bepalen van kritieke golfbelastingen van verschillende filterconstructies (zie paragraaf 2.3.1 en 3.1.3 voor beschrijving van de gebruikte filterconstructies). De kritieke golfbelasting is de golfbelasting, waarbij het begin van bewegen van het basismateriaal onder de filterconstructie optreedt. Omdat het onderzoek van Halter als uitgangspunt voor dit onderzoek dient, worden de gevonden kritieke golfbelastingen in tabel 2.1 gepresenteerd. Tijdens de proeven zijn twee soorten filtermateriaal en één soort basismateriaal gebruikt. Halter vond voor de grotere filterstenen een lagere kritieke

golfhoogte dan voor een situatie zonder filter. Zijn verklaring hiervoor was, dat de grotere openingen tussen de filterstenen extra turbulentie op zouden kunnen wekken, waardoor het basismateriaal juist eerder gaat bewegen.

Ook tijdens de experimenten van Caus (1998), waarbij het zakkingsverloop in de tijd van een filterconstructie onder golfbelasting werd onderzocht, werd een soortgelijk resultaat gevonden, waarbij de zakking van de filterlaag ten gevolge van erosie van de basislaag sneller bleek te verlopen bij een vergroting van de filterstenen.

dikte filterlaag [cm]	$D_{n50F}$ [cm]	golfperiode T [s]	golfhoogte H [cm]	$U_{max}$ (2cm boven filter) [m/s]
12	3,75	1,03	8,2	0,08
12	3,75	1,33	6,7	0,09
12	3,75	1,9	6	0,11
12	3,75	2,41	5,6	0,14
12	1,99	1,03	16,7	0,16
12	1,99	1,33	8,9	0,14
12	1,99	1,9	8,8	0,17
12	1,99	2,41	7,9	0,19
6	1,99	1,03	12	0,12
6	1,99	1,33	9	0,13
6	1,99	1,9	7,3	0,13
6	1,99	2,41	6,7	0,17
0	-	1,03	11,7	0,09
0	-	1,33	7	0,09
0	-	1,9	6,3	0,10
0	-	2,41	5,1	0,12

Tabel 2.1: Kritieke golfbelastingen volgens Halter (1999)

Halter vond bij een toename van de laagdikte een grotere kritieke golfbelasting. Caus vond tijdens zijn experimenten afname van erosie bij een toenemende laagdikte. Caus en Halter verklaarden dit als een betere demping van de orbitaalsnelheid door interactie van het water met de filterstenen en het totale verlies aan bewegingsenergie door de langere weg die de korrel moet afleggen om uit de filterlaag te treden. De kritieke golfbelasting volgens Halter is periode-afhankelijk: bij een toenemende periode neemt de kritieke golfhoogte af.

### 2.2.2 Kritiek verhang

Iets minder recent heeft De Grauw (1983) onderzoek verricht, dat gericht was op het meten van kritieke verhangen van verschillende gesloten filterconstructies onder invloed van zowel stationaire als cyclische belastingen. Het kritieke verhang is het verhang waarbij het begin van bewegen van het basismateriaal onder de filterconstructie optreedt, en is gedefinieerd in het medium waarin de stroming optreedt die verantwoordelijk is voor het transport van het basismateriaal. Er van uitgaande dat er een analogie bestaat tussen de stroming in pijpen en poreuze media, is door De Grauw een poging gedaan om op grond van de onderzoeksresultaten voor stroming evenwijdig aan het grensvlak tussen twee opeenvolgende lagen een empirische formule af te leiden voor het verband tussen het kritieke verhang en de kritieke schuifspanningssnelheid volgens Shields:



$$i_{cr} = \left[ \frac{0.06}{n_f^3 D_f^{4/3}} + \frac{n_f^{5/3} d_f^{1/3}}{1000 D_b^{5/3}} \right] u_{*cr}^2 \quad (2.1)$$

waarin:

$i_{cr}$	kritiek verhang
$D_f$	$D_{15}$ filtermateriaal
$D_b$	$D_{50}$ basismateriaal
$n_f$	porositeit filter
$u_{*cr}$	kritieke schuifspanningsnelheid van basismateriaal

Voor parallelle cyclische belastingen werd geconcludeerd, dat voor golfbelastingen met een golfperiode  $> 2$  seconden een quasi-stationaire benadering aan de veilige kant blijft, waardoor in die gevallen bovenstaande formule gebruikt kan worden. De formule is echter afgeleid in een stroming zonder vrij wateroppervlak en is dus niet zonder meer geschikt voor een situatie met een vrij wateroppervlak, hetgeen ook volgde uit de experimenten van Van Os (1998). Van Os vond tijdens zijn experimenten kritieke verhangen voor filterconstructies die werden belast door stroming met een vrij wateroppervlak, die lager waren dan de kritieke verhangen berekend met de formule van De Grauw, naar mate de stroomsnelheid boven de filterconstructie toenam.

Halter (1999) bepaalde, met de *lineaire golftheorie* (zie paragraaf 2.3.2), kritieke verhangen op het grensvlak tussen de filterlaag en de basislaag ten gevolge van kritieke golfbelastingen met een golfperiode  $> 2$  seconden, waarbij werd aangenomen dat de filterlaag geen invloed op het diepteverloop van het verhang heeft. Ook deze verhangen bleken lager te zijn dan die berekend volgens de formule van De Grauw.

### 2.2.3 Filtersnelheid en de Forchheimer-vergelijking

De waterbeweging, veroorzaakt door stroming en/of golven, dringt door in de filterlaag. De weerstand van het filter tegen deze doordringing is afhankelijk van vele parameters, zoals de vorm, de plaats, de oppervlakteruwheid, de porositeit en de oriëntatie van de individuele filterstenen. Om de watersnelheden tussen de filterstenen te weten te komen, moeten al deze parameters worden meegenomen. Dit is praktisch gezien onmogelijk en daarom is het begrip *filtersnelheid* ingevoerd. De filtersnelheid is gedefinieerd als:

$$u_f = \frac{1}{A_f} \iint_{A_p} u da_p = n_f \cdot u \quad (2.2)$$

Hierin is:

$u_f$	de filtersnelheid
$A_f$	de oppervlakte van de totale doorsnede van de filterlaag
$A_p$	de oppervlakte van de totale doorsnede van de poriën in de filterlaag
$u$	de optredende snelheid in de poriën
$n_f$	de porositeit van het filtermateriaal

De filtersnelheid is dus geen grootte die de optredende snelheid in het filter weergeeft, maar het debiet door het filter gedeeld door de doorsnede van de filterlaag.

De waterbeweging in een filterpakket, bestaande uit granulair materiaal, kan worden beschreven met de Forchheimer-vergelijking. De Forchheimer-vergelijking geeft het verband weer tussen het verhang over de filterlaag en de filtersnelheid, waarbij een lineaire, een kwadratische en een tijdsafhankelijke term van de filtersnelheid worden onderkend:

$$\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial p}{\partial x} = i = au_f + bu_f |u_f| + c \frac{\partial u_f}{\partial t} \quad (2.3)$$

Hierin is:

- i verhang over de filterlaag
- a modelconstante voor de lineaire term [s/m]
- b modelconstante voor de kwadratische term [s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>]
- c modelconstante voor de tijdsafhankelijke term [s<sup>2</sup>/m]

De modelconstanten in deze formule zijn een functie van diverse variabelen, waarin weer coëfficiënten zijn verwerkt met een grote standaardafwijking. Van Gent (1995) geeft experimenteel bepaalde uitdrukkingen voor deze modelconstanten voor zowel stationaire als niet-stationaire stroming. Deze zijn echter wederom afgeleid voor filterconstructies in stromingssituaties zonder een vrij wateroppervlak.

Desondanks bepaalde Halter (1999), met de *lineaire golftheorie*, het verloop van de verhangen over de filterlaag onder invloed van de kritieke golfbelastingen, en vervolgens met de Forchheimer-vergelijking en de modelconstanten van Van Gent (1995), het verloop van de filtersnelheid over de filterlaag. Hierbij vond hij dat de berekende kritieke snelheden boven de zandlaag in het filterbed 5 tot 20 keer zo klein waren als de, in dezelfde situatie, zonder filterlaag, gemeten kritieke snelheden.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat de filtersnelheid een gemiddelde waarde voor de snelheid in de filterlaag is, waarbij er in een porie lokaal hogere snelheden kunnen voorkomen die verantwoordelijk kunnen zijn voor het begin van bewegen van het basismateriaal onder het filter. De tijdens dit onderzoek uit te voeren snelheidsmetingen in de filterlaag kunnen uitsluitend geven over de geldigheid van bovenstaande bewering.

Van Os (1998) heeft tijdens zijn onderzoek snelheidsmetingen uitgevoerd in een geometrisch-open filter onder invloed van stationaire stroming met en zonder een vrij oppervlak. Voor de gesloten filterconstructie komt het verband tussen de gemeten filtersnelheid en het verhang over het filter goed overeen met het verband volgens Forchheimer. De filtersnelheid in een filterconstructie met een vrij oppervlak werd gezien als een superpositie van twee invloeden, namelijk de invloed van het verhang en de invloed van de stroming boven de constructie. Aangezien we ook snelheden in de poriën van een filterlaag willen meten, zullen we eerst de door Van Os gebruikte meetmethode bespreken.

#### 2.2.4 Snelheidsmetingen in de filterlaag door Van Os (1998)

Van Os (1998) heeft snelheidsmetingen uitgevoerd in de poriën van een filterlaag, waarbij stroming boven de filterlaag aanwezig was. Hierbij is gebruik gemaakt van een *Laser-Doppler Flow Meter* (LDFM). De stroomsnelheid wordt dan gemeten in een klein gebiedje, het *meetvolume*, dat wordt gevormd door twee elkaar snijdende lichtstralen, die door een laser worden gegenereerd. Voor een uitgebreidere

beschrijving van het principe van een LDFM wordt verwezen naar paragraaf 3.2.3. Meestal worden er met een LDFM stroomsnelheden gemeten in een vrije stroming, waarbij de lichtstralen ongestoord het meetvolume kunnen bereiken. Om echter snelheden in de porie van de filterlaag te meten, moesten de laserstralen door de filterlaag worden geleid, waarvoor gebruik werd gemaakt van geleidingsbuisjes met een constante diameter, die los in het filterbed werden geplaatst. De afmeting van de diameter van deze geleidingsbuisjes had dezelfde orde van grootte als de gemiddelde korreldiameter van het filtermateriaal, waarbij werd aangenomen dat de stroming in de filterlaag hierdoor nauwelijks werd beïnvloed.

De gemeten stroomsnelheden zijn de gemiddelde snelheden van de waterdeeltjes die het meetvolume passeren. Deze stroomsnelheden werden door Van Os (1998) *poriënsnelheden* genoemd. Tijdens de door Van Os uitgevoerde experimenten werd de horizontale richtingscomponent van de *poriënsnelheid* in de stroomrichting gemeten. Om het verloop van de *poriënsnelheid* over de laag te bepalen, moest op verschillende hoogten in de laag worden gemeten. Van Os vond het te gecompliceerd om de LDFM na iedere meting in hoogte te verstellen, hetgeen werd opgelost door de filterlaag te verhogen, zodat de LDFM relatief zakte. Een voordeel van deze methode is dat de porie en de positie van het meetvolume in principe gelijk blijven. Door problemen met het ontluchten van de geleidingsbuisjes tijdens de experimenten van Van Os moest echter de steensstapeling rondom het meetvolume worden gewijzigd. Daarbij werd een aanwijzing gevonden dat de steensstapeling van het filtermateriaal rondom het meetvolume van invloed is op de frequentie van de snelheidsfluctuatie.

Uit de resultaten van de snelheidsmetingen van Van Os bleek dat bij stroming boven het filter na een diepte van 1,5 maal de korreldiameter van het filtermateriaal in de filterlaag het gemiddelde en de standaarddeviatie van de horizontale poriesnelheid niet verder afnamen.

### 2.3 Filterconstructie onder invloed van golfbelasting

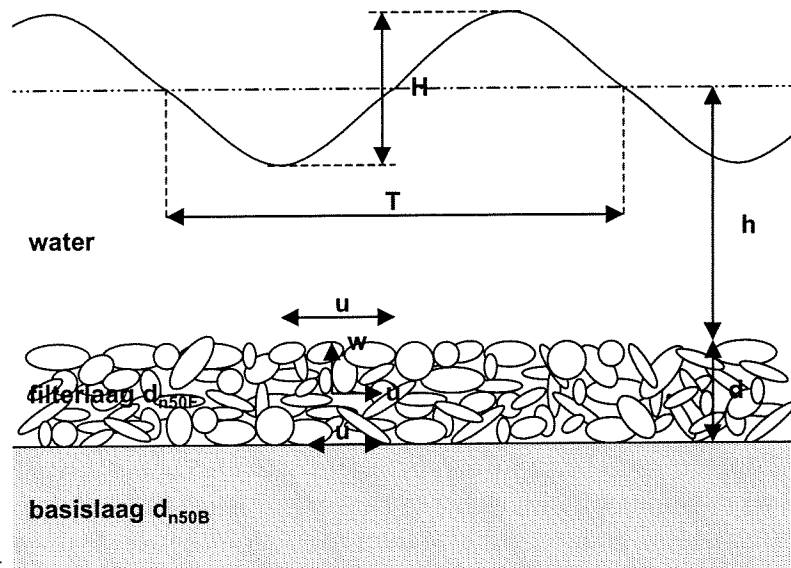
Het is dus de bedoeling stroomsnelheden in de poriën van een filterconstructie te meten, onder invloed van de door Halter (1999) gevonden de kritieke golfbelastingen. Om een verband te kunnen leggen met het onderzoek van Halter (1999) is het noodzakelijk tijdens dit onderzoek de door Halter (1999) onderzochte situaties exact te reproduceren. De door Halter (1999) gebruikte proefopstelling dient daartoe te worden nagebouwd en aangepast voor het uitvoeren van snelheidsmetingen in de poriën van de filterlaag. De proefopstelling wordt in het volgende hoofdstuk behandeld. In de volgende paragrafen wordt besproken hoe de door Halter onderzochte situatie kan worden geschematiseerd.

#### 2.3.1 Beschrijving van de geschematiseerde situatie van Halter (1999)

De situatie, die in het onderzoek van Halter (1999) werd beschouwd, is weergegeven in figuur 2.3. Het is een horizontaal zakkingsfilter, onder invloed van een golfbelasting. De golfbelasting wordt geschematiseerd als een lopende, sinusvormige golf met golfhogte  $H$  en golfperiode  $T$ . Dergelijke sinusvormige golven laten zich beschrijven met de *lineaire golftheorie*, welke in paragraaf 2.3.2 kort zal worden toegelicht. Halter (1999) vond een aantal kritieke golfbelastingen, welke zijn uitgedrukt in een golfhogte en –periode (zie tabel 2.2).

De te beschermen basislaag bestaat uit loskorrelig, niet-cohesief materiaal. De

basislaag wordt bedekt met de filterlaag, die eveneens uit loskorrelig, niet-cohesief



**Figuur 2.3:** Geschematiseerde situatie volgens Halter (1999)

materiaal bestaat. De filterlaag heeft een constante dikte  $d$ . De diameterverhouding tussen de filterstenen en de basiskorrels is dusdanig, dat de basiskorrels tussen de filterstenen door kunnen bewegen. Tijdens de proeven zijn twee soorten filtermateriaal en één soort basismateriaal gebruikt. De eigenschappen van het door Halter (1999) gebruikte filter- en basismateriaal zijn uit monsters bepaald en in tabel 2.2 weergegeven.

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

**Tabel 2.2:** Eigenschappen door Halter (1999) gebruikt filter- en basismateriaal

Boven de filterlaag bevindt zich een watermassa met een vrij oppervlak; de afstand tussen het stilwaterniveau en de bovenkant van het filter is de waterdiepte  $h$ .

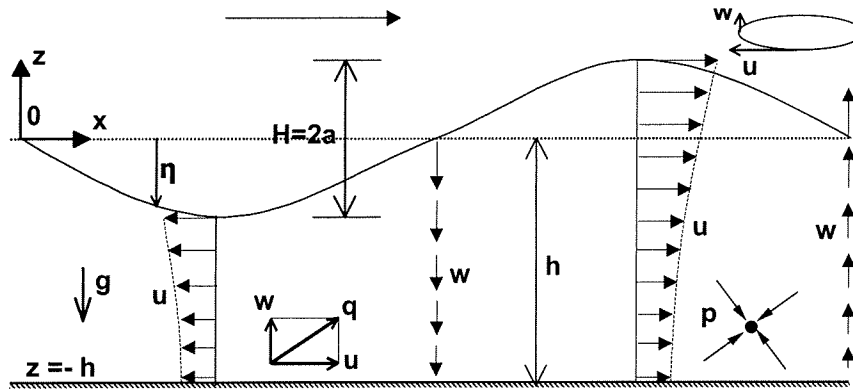
### 2.3.2 Lineaire golftheorie

De beweging van het zeeoppervlak als gevolg van golven is onregelmatig. Het zeeoppervlak is echter te schematiseren door een grote verzameling van gesuperponeerde sinusvormige golven, allemaal met een eigen periode, fase, hoogte en richting (zie figuur 2.3). Zo'n sinusvormige golf met vaste periode, hoogte en fase wordt een regelmatige golf genoemd. De tijdens de experimenten op te wekken golven kunnen beschouwd worden als regelmatig. Sinusvormige golven zijn te beschrijven met de lineaire golftheorie. Hierin wordt aangenomen dat de beweging van het oppervlak te beschrijven is door:

$$\eta = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{2\pi x}{L}\right) = a \sin(\omega t - kx) = a \sin \theta \quad (2.4)$$

Hierin is:

- a de amplitude van de beweging =  $H/2$
- $\omega$  de hoekfrequentie =  $2\pi/T$
- k het golfgetal =  $2\pi/L$
- H de golfhoogte
- T de golfperiode



Figuur 2.4: Definitieschets

De golf veroorzaakt een beweging van de waterdeeltjes, 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 het 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:

$$\text{horizontale snelheid: } u = \omega a \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx) = \hat{u} \sin \theta \quad (2.5)$$

$$\text{verticale snelheid: } w = \omega a \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(\omega t - kx) = \hat{w} \cos \theta \quad (2.6)$$

De uitdrukkingen voor de snelheidsamplitude aan het oppervlak ( $z = 0$ ) en bij de bodem ( $z = -h$ ) zijn respectievelijk:

$$\hat{u} = \frac{\omega a}{\tanh kh} \quad \text{en} \quad \hat{w} = \omega a \quad \text{voor} \quad z = 0 \quad (2.7)$$

$$\hat{u} = \frac{\omega a}{\sinh kh} \quad \text{en} \quad \hat{w} = 0 \quad \text{voor} \quad z = -h \quad (2.8)$$

De relatieve grootte van deze grootheden wordt bepaald door de waarde van de factor  $kh$ , ofwel door de verhouding waterdiepte/golflengte ( $h/L$ ). Het door de golfbeweging veroorzaakte drukverloop in het water is te berekenen met:

$$p = -\rho g z + \rho g a \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \sin(\omega t - kx) \quad (2.9)$$

Door de druk te differentiëren naar  $x$  en te delen door  $\rho g$ , wordt een uitdrukking voor het verhang gevonden:

$$i = k a \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(\omega t - kx) = \hat{i} \cos \theta \quad (2.10)$$

De uitdrukkingen voor de verhangamplitudes geldt aan het oppervlak ( $z = 0$ ) en bij de bodem ( $z = -h$ ) luiden respectievelijk:

$$\hat{i} = k a \quad \text{voor } z = 0 \quad (2.11)$$

$$\hat{i} = \frac{k a}{\cosh kh} \quad \text{voor } z = -h \quad (2.12)$$

Voor een uitgebreide behandeling van de lineaire golftheorie wordt verwezen naar het collegedictaat CTwa4320 (Battjes, 1997).

### 2.3.3 Uitbreiding onderzoek Halter (1999)

Het doel van dit onderzoek is het zoeken naar het verband tussen de uitwendige belasting op het filter en een interne (in het filter) belasting, op de basislaag, en het begin van erosie c.q. begin van bewegen van het basismateriaal. Als uitgangspunt voor de uitwendige belastingen dienen de kritieke golfbelastingen volgens Halter (1999), waarbij voor het eerst begin van bewegen van het basismateriaal onder de filterlaag optreedt. We zijn hierbij geïnteresseerd in de overeenkomst in de grootte van de interne belastingen, bij de verschillende kritieke golfbelastingen. Hiertoe zullen snelheden worden gemeten in de poriën van de filterlaag, zoals deze optreden onder invloed van de kritieke golfbelastingen. Het onderzoek kan dus worden gezien als een uitbreiding van het onderzoek van Halter (1999). De door Halter bepaalde kritieke golfbelastingen voor het begin van bewegen van het basismateriaal zijn weergegeven in tabel 2.1. Hieruit blijkt dat de kritieke golfbelasting bij kleine stenen groter is dan bij grote stenen, en dat er bij het toepassen van een filterlaag met deze grote stenen een minder gunstige situatie ontstaat dan zonder filterlaag. In verband met de beschikbare tijd voor de uit te voeren experimenten en het bovenstaande is besloten om alleen bij de in tabel 2.3 gepresenteerde kritieke golfbelastingen poriesnelheden te meten, waarbij gebruik wordt gemaakt van één soort filterstenen. De horizontale orbitalsnelheden, gemeten op 2 cm boven deze filterlaag, zijn onder invloed van deze golfbelastingen groter dan in de situatie zonder filter, waarbij ook begin van bewegen optreedt. De grootte van de kritieke horizontale stroomsnelheid

dikte filterlaag [cm]	$D_{n50F}$ [cm]	golfperiode $T$ [s]	golfhoogte $H$ [cm]	$U_{\max}$ (2cm boven filter/bodem) [m/s]
12	1,99	1,03	16,7	0,16
12	1,99	1,33	8,9	0,14
12	1,99	1,9	8,8	0,17
12	1,99	2,41	7,9	0,19
0	-	1,03	11,7	0,09
0	-	1,33	7	0,09
0	-	1,9	6,3	0,10
0	-	2,41	5,1	0,12

Tabel 2.3: Te onderzoeken situaties

ter plaatse van de grenslaag tussen filter- en basislaag zal waarschijnlijk kleiner zijn dan de gelijktijdig boven de filterlaag gemeten horizontale orbitaalsnelheid, maar niet kleiner dan de in de situatie zonder filterlaag gemeten kritieke horizontale orbitaalsnelheid. De filterlaag zal waarschijnlijk een dempende werking hebben op de waterbeweging, het water moet zich immers een weg banen door de poriën van de filterlaag, waarbij energieverlies voornamelijk zal optreden door vertragsingsverliezen ten gevolge van de geometrie van de filterstenen. De geometrie van de filterlaag is hierbij van invloed op het optredende stromingstype. Een maat voor het optredende stromingstype, turbulent of laminair, is het (dimensieloze) getal van Reynolds,  $Re$ :

$$Re = \frac{U * L}{\nu} \quad (2.13)$$

Hierin is:

- U een voor de stroming karakteristieke snelheid;
- L een karakteristieke maat waarover zo'n snelheid optreedt;
- $\nu$  de kinematische viscositeit.

Bij relatief kleine getallen van Reynolds ( $Re < \text{orde } 1000$ ) is de stroming laminair. Typische waarden voor de overgang tussen laminaire en turbulente stroming zijn  $Re = 1000 - 2000$ .

We kunnen aan de hand van schattingen getallen van Reynolds bepalen voor de in de poriën van de filterlaag optredende stroming onder een kritieke golfbelasting. De karakteristiek snelheid zal liggen tussen ca. 0,1-0,2 m/s, hetgeen resp. de horizontale orbitaalsnelheid voor begin van bewegen van het basismateriaal is zonder en met filterlaag. Voor de karakteristieke maat nemen we de poriebreedte, welke we schatten als  $0.5 * D_{n50F}$ . Als kinematische viscositeit van water nemen we  $\nu = 1.0 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , hetgeen met het bovenstaande  $Re = 1000 - 2000$  geeft, dus typische waarden voor de overgang tussen laminaire en turbulente stroming. De stroming tussen de stenen zou in deze situatie dus niet turbulent zijn. De stroming tussen de grotere stenen zou dat volgens bovenstaande schatting wel zijn, aangezien de poriebreedte dan ca. 2x zo groot is. Dit komt overeen met de conclusie van Halter (1999), dat het basismateriaal dan eerder gaat bewegen i.v.m. turbulentie tussen de filterstenen.

## 2.4 Conclusie

Zoals reeds is opgemerkt aan het begin van paragraaf 2.2 is veel recent onderzoek gericht op het bepalen van kritieke hydraulische belastingen op de constructie, waarbij begin van bewegen van het basismateriaal onder een filterconstructie optreedt. Van Os (1998) heeft hierbij snelheden gemeten in een filterlaag belast door stroming met een vrij oppervlak, waaruit bleek dat bij stroming boven het filter na een diepte van 1,5 maal de korreldiameter van het filtermateriaal in de filterlaag het gemiddelde en de standaarddeviatie van de poriesnelheid niet verder afnamen. Dergelijke snelheidsmetingen in een filterlaag onder invloed van golfbelasting met een vrij oppervlak zijn echter nog niet uitgevoerd. Het uitvoeren van snelheidsmetingen in een filterlaag onder invloed van de door Halter (1999) bepaalde kritieke golven is daarom een logische volgende stap.

Om een verband te kunnen leggen met het onderzoek van Halter (1999) is het noodzakelijk tijdens dit onderzoek de door Halter (1999) onderzochte situaties exact te reproduceren. De door Halter(1999) gebruikte proefopstelling dient daartoe te

worden nagebouwd en aangepast voor het uitvoeren van snelheidsmetingen in de poriën van de filterlaag.

De voor de snelheidsmetingen te gebruiken meettechniek is gebaseerd op de door Van Os (1998) gebruikte meettechniek. Hierbij is extra aandacht besteed aan de mogelijkheid om een experiment te reproduceren. Van Os (1998) vond namelijk een aanwijzing dat de steensstapeling van het filtermateriaal rondom het meetvolume van invloed zou kunnen zijn op de gemeten frequentie van de snelheidsfluctuatie.

In het volgende hoofdstuk worden de proefopstelling, de gebruikte meettechniek en de opzet van de metingen besproken.



### 3 Modelonderzoek

*Het experimenteel onderzoek is uitgevoerd in de korte speurwerkgoet van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. De uitwendige geometrie van de filterconstructie tijdens de experimenten moest gelijk zijn aan die van Halter (1999).*

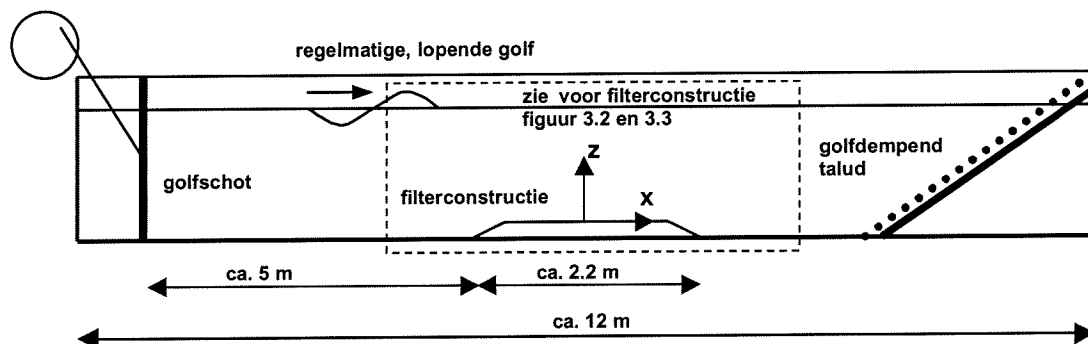
*In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de goet voor het uitvoeren van de experimenten is ingericht en welke meetinstrumenten er zijn gebruikt. Tevens wordt beschreven hoe er in een porie snelheden zijn gemeten.*

#### 3.1 De proefopstelling

##### 3.1.1 De inrichting van de stroomgoet

De experimenten zijn uitgevoerd in de korte speurwerkgoet van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. De korte speurwerkgoet is een 12 meter lange goet met een breedte van 50 cm en een hoogte van 70 cm. Met behulp van een golfschot kunnen golven worden opgewekt. Op circa 5 meter afstand van het golfschot is een filterconstructie (zie figuur 3.2 en 3.3) gebouwd. Aan het einde van de goet is een golfdempend talud aangebracht, dat de reflectie van de opgewekte golven moet reduceren.

Er is een assenstelsel gedefinieerd met als oorsprong het midden van de bovenkant van de filterlaag (zie figuur 3.1). De x-as loopt in de golfvoortplantingsrichting. De y-as staat hier loodrecht op in het horizontale vlak. De z-as loopt verticaal omhoog.



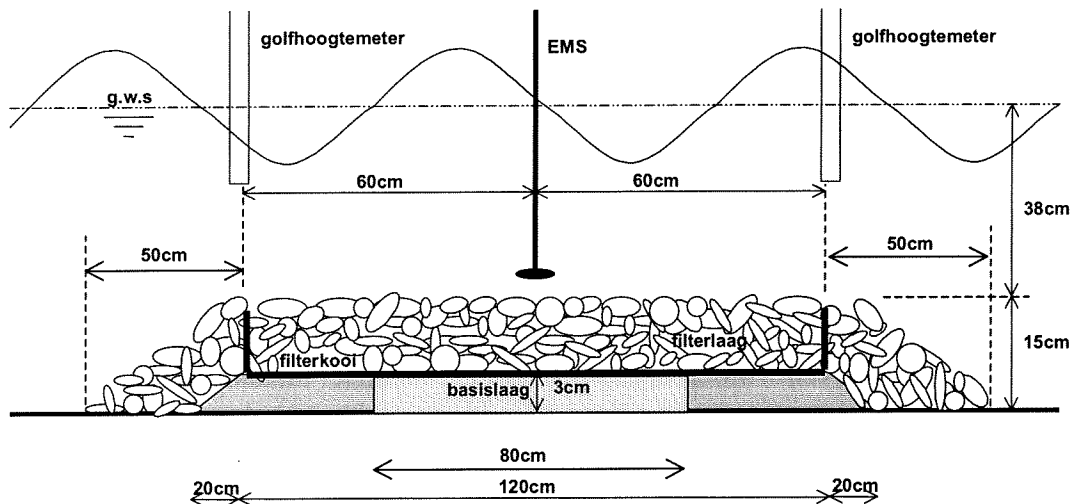
**Figuur 3.1:** Schematische weergave korte speurwerkgoet

##### 3.1.2 Het golfschot

Op de goet is een mechanisch golfschot gemonteerd, dat via een reductor met variomatic wordt aangedreven door een elektromotor. Voor het opwekken van een regelmatige, lopende golf laten we het golfschot transleren, waarbij het toerental en de slaglengte kunnen worden gewijzigd om de gewenste golfbelasting in te stellen. Tijdens het instellen kunnen op een digitale display de periode en de gemiddelde golfhoogte worden afgelezen. Uit tests is gebleken dat de standaardafwijking van de gemiddelde golfhoogte kleiner is dan 0,4 cm, en die van de golfperiode kleiner is dan 0,005 s. Hierdoor is het betrekkelijk eenvoudig om bij afzonderlijke metingen dezelfde golfbelasting in te stellen.

### 3.1.3 De filterconstructie in de stroomgoot

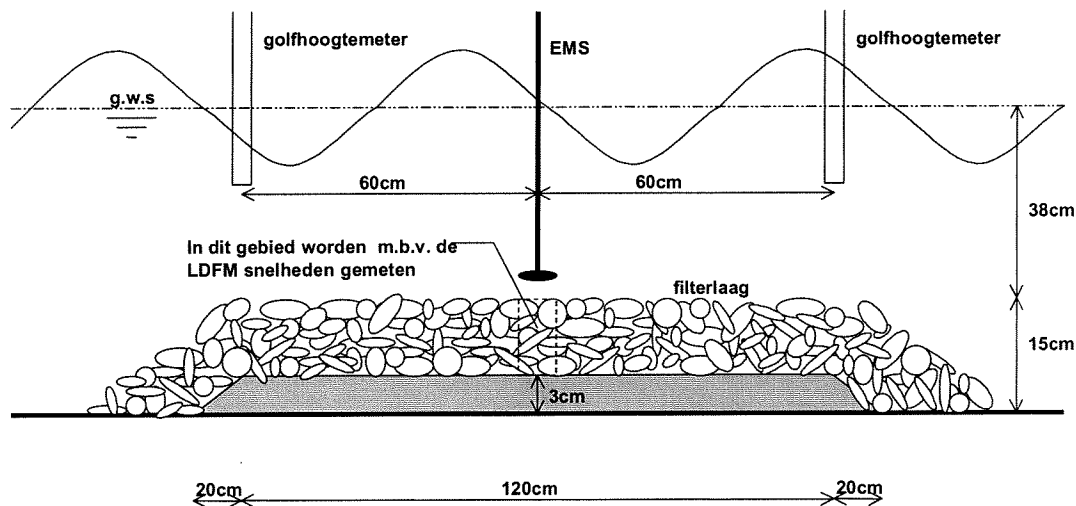
De filterconstructie zag er tijdens de experimenten van Halter (1999) als volgt uit (zie figuur 3.2). Als basis fungeert een verhoogde cementen bodem van 3 cm dik en 120 cm lang. Om geen abrupte overgang te krijgen met de bodem van de goot is aan weerszijden van de verhoogde bodem een klein talud gemaakt met een lengte van 20 cm. In het midden van deze cementen bodem bevindt zich een uitsparing van 80 cm bij 25 cm, die net als de verhoogde bodem 3 cm diep is. In deze uitsparing werd zand aangebracht.



**Figuur 3.2:** Schematische tekening van de door Halter (1999) gebruikte filterconstructie

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 de filterdikte over een afstand van 50 cm geleidelijk verminderd tot nul. Tijdens door Halter uitgevoerde erosieproeven waren de stenen verpakt in een doorlatende kooiconstructie, hetgeen voordelen had bij het uitvoeren van deze proeven (zie Halter (1999)). Boven de filterconstructie staan drie meetinstrumenten opgesteld. Precies boven het midden van het filter staat een *elektromagnetische snelheidsmeter* (zie paragraaf 3.2.1) opgesteld. De probe hiervan bevindt zich op twee cm boven de bodem. Zowel 60 cm voor als achter dit meetinstrument staat een *golfhoogtemeter* (zie paragraaf 3.2.2) opgesteld. Uit proeven van Halter (1999) blijkt dat het gemiddelde van de met deze twee golfhoogtemeters gemeten golfhoogtes goed overeenkomt met de golfhoogte er precies tussenin. In het vervolg wordt met de gemiddelde golfhoogte deze golfhoogte bedoeld.

Voor het uitvoeren van snelheidsmetingen in de filterlaag moest deze opstelling worden aangepast. Aangezien er geen erosieproeven werden uitgevoerd, was de filterkooi overbodig en werd deze weggelaten. De uitsparing van 80 cm bij 15 cm in het midden van de cementen bodem werd vervangen door een uitsparing van 15 cm bij 50 cm, die net als de verhoogde bodem 3 cm diep is. In deze uitsparing past precies de grondplaat van de *geleidingsbuisjes*, die zijn gebruikt om de laserstralen van de LDFM (zie paragraaf 3.2.3) te geleiden. Deze geleidingsbuisjes en de meettechniek worden uitgebreid besproken in paragraaf 3.3.



**Figuur 3.3:** Schematische weergave aangepaste filterconstructie in stroomgoot (niet op schaal)

### 3.1.4 Filtermateriaal

Het filter moet zijn opgebouwd uit filtermateriaal met dezelfde steensortering als het filtermateriaal dat door Halter (1999) is gebruikt. De eigenschappen van het gebruikte filtermateriaal zijn uit monsters bepaald en zijn in tabel 3.1 weergegeven. Deze blijken goed overeen te komen met het door Halter (1999) gebruikte filtermateriaal.

filtermateriaal	Halter (1999)	dit onderzoek
nominale diameter	1,99 cm	1,96
wijdte ( $D_{85}/D_{15}$ )	1,28	1,29
dichtheid	2540 kg/m <sup>3</sup>	2540 kg/m <sup>3</sup>
porositeit	0,39	0,4
vormfactor (l/t)	2,5	2,5

**Tabel 3.1:** Eigenschappen filtermateriaal

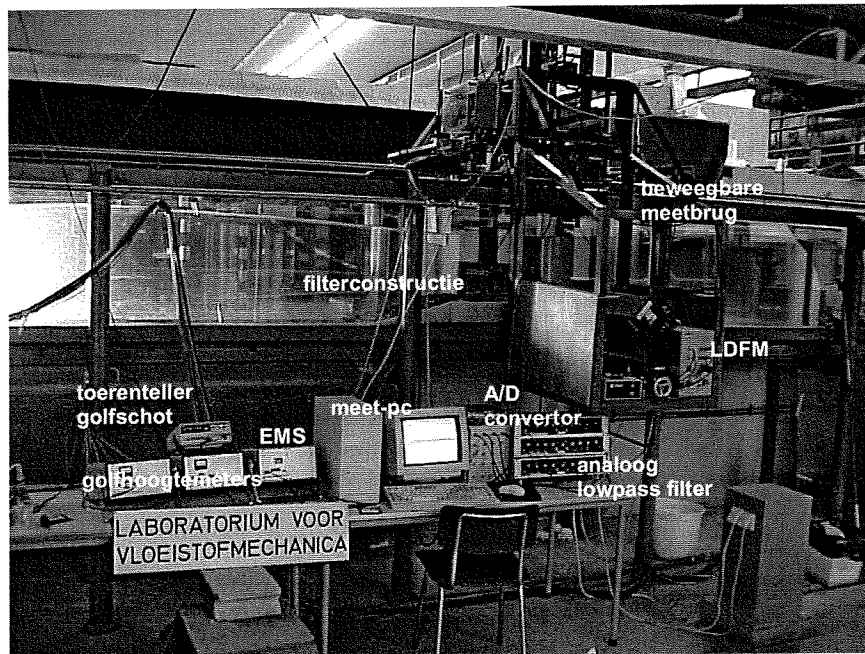
De zeefkromme van de stenen in het filtermateriaal wordt weergegeven in Bijlage A.

## 3.2 Gebruikte instrumenten en apparatuur

In paragraaf 3.1.3 is reeds vermeld dat ten behoeve van de experimenten gebruik is gemaakt van een *elektromagnetische snelheidsmeter* (EMS) voor het meten van snelheden 2 cm boven de filterlaag, twee *golfhogtemeters* voor het meten van de oppervlakteuitwijkingen, en een *Laser-Doppler Flow Meter* (LDFM) voor het meten van snelheden in een porie van de filterlaag (zie ook figuur 3.3). In de volgende paragrafen worden deze instrumenten besproken. De meetinstrumenten zijn via een A/D convertor aangesloten op een meet-pc (data-acquisitie systeem). Met behulp van daarvoor geschikte dataverwerkingssoftware worden de metingen vervolgens opgeslagen. Bij een aantal metingen zijn tussen de snelheidsmeters en de A/D-convertor analoge lowpass-filters geplaatst.

### 3.2.1 Elektromagnetische snelheidsmeter

De x-component van de horizontale snelheid boven de filterconstructie wordt gemeten met een *elektromagnetische snelheidsmeter* (EMS). Een EMS maakt



**Figuur 3.4:** meetapparatuur in opstelling

gebruik van de inductiewet van Faraday en bestaat uit een schotelvormig kunststof meetschijfje, dat onderaan een metalen schacht is bevestigd. In dit meetschijfje is een kleine spoel geplaatst die met behulp van wisselstroom een magnetisch veld opwekt rondom het meetschijfje. De passerende vloeistofdeeltjes veroorzaken een verstoring van dit veld, hetgeen een elektrische spanningsverschil tussen twee elektroden tot gevolg heeft. De ontstane spanningsvariaties worden gemeten en kunnen worden omgerekend naar watersnelheden. Doordat een EMS in de vloeistof wordt ondergedompeld, wordt de stroming hierdoor beïnvloed.

### 3.2.2 Golfhoogtemeter

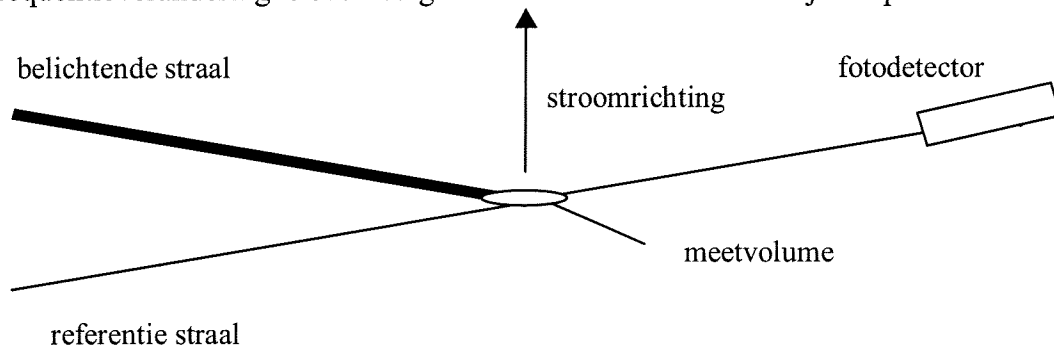
Met behulp van een golfhoogtemeter kan de oppervlakte-uitwijking ten opzichte van het stilwaterniveau worden gemeten. De golfhoogtemeter bestaat uit twee elektroden, die gedeeltelijk in het water zijn ondergedompeld. Door de elektrische geleiding van het water ontstaat ter plaatse van het wateroppervlak 'kortsluiting'. De dan gemeten spanningsvariatie is, via een lineair verband, om te rekenen naar een oppervlakte-uitwijking.

### 3.2.3 Laser-Doppler Flow Meter

De *Laser-Doppler Flow Meter* (LDFM) is een bijzonder geschikt apparaat voor het meten van turbulente stroomsnelheden in vloeistoffen, zonder dat de stroming hierdoor wordt verstoord, op een verwaarloosbare temperatuurstijging na. Met de LDFM wordt ervoor gezorgd dat twee lichtstralen, gegenereerd door een laser, elkaar snijden in een gebiedje in de vloeistof, waar de turbulente stroomsnelheid gemeten dient te worden. De twee lichtstralen hebben een verschillende intensiteit. De straal met de hoogste intensiteit heet de belichtende straal, de straal met de laagste intensiteit heet de referentiestraal.

Bij het snijden van de lichtstralen wordt het *meetvolume* gevormd (zie Bijlage B). Kleine deeltjes in de vloeistof verstrooien het laserlicht terwijl deze het meetvolume passeren, waardoor de frequentie verandert. Het verstrooide licht van de belichtende

straal wordt door een fotodetector opgevangen en door vergelijking met de frequentie van de referentiestraal wordt de frequentieverandering gemeten. De frequentieverandering is evenredig met de snelheid van de deeltjes. Op deze manier



**Figuur 3.5:** Principe LDFM

wordt de snelheid van de deeltjes bepaald, welke worden gemiddeld over het meetvolume, waardoor indirect de stroomsnelheid wordt bepaald. Door het toepassen van een belichtende straal en twee referentie stralen kunnen in hetzelfde punt twee richtingscomponenten worden gemeten.

### 3.3 Het meten van stroomsnelheden in een porie van de filterlaag

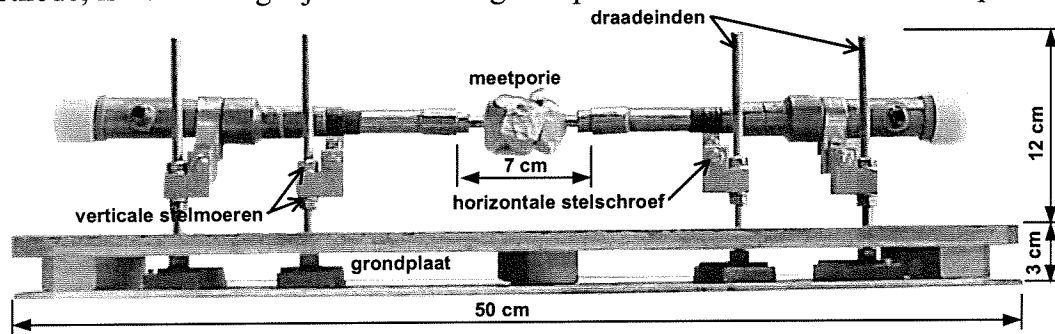
#### 3.3.1 Geleidingsbuisjes en gefixeerde meetporie

Ten behoeve van de experimenten willen we de stroomsnelheden meten in een porie van de filterlaag. Hiervoor gaan we gebruik maken van een meettechniek die gebaseerd is op de door Van Os (1998) gebruikte meettechniek (paragraaf 2.2.4). De aanpassingen, die nodig waren om de meettechniek geschikt te maken voor de uit te voeren experimenten, worden hier besproken.

Om op verschillende hoogten in de filterlaag te kunnen meten, moet de LDFM op de gewenste hoogte worden ingesteld. Van Os bereikte dat door bij iedere meting de filterlaag te verhogen, zodat de LDFM relatief zakte. Deze aanpak is bij de uit te voeren experimenten niet mogelijk, omdat de uitwendige geometrie van de filterconstructie in de stroomgoot bij ieder experiment dezelfde afmetingen moest hebben. Om de laser en de fotodetectoren tijdens de experimenten in hoogte te kunnen verstellen zijn deze op een, met een elektromotor, beweegbare meetbrug gemonteerd, welke op de goot is geplaatst. Hierdoor kan de LDFM traploos op iedere hoogte in de filterlaag worden gesteld. De optiek van de laser is zo afgesteld dat het meetvolume zich precies in het midden van de goot bevindt.

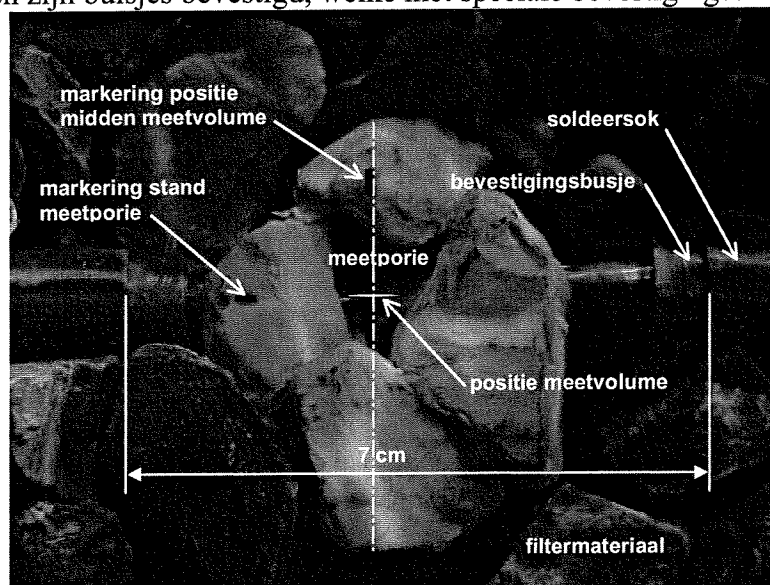
De laserstralen worden met geleidingsbuisjes ongestoord door de filterlaag geleid. De door Van Os (1998) gebruikte geleidingsbuisjes hebben een constante diameter, met dezelfde orde van grootte als de gebruikte filterstenen, terwijl de laserstralen in de richting van het meetvolume convergeren. Het is dus mogelijk de diameter van de geleidingsbuisjes in de richting van het meetvolume te laten afnemen, zodat de orde van grootte ervan kleiner is dan van de afmeting van de gebruikte filterstenen, waardoor de stroming in de nabijheid van het meetvolume veel minder wordt verstoord. Door het gebruik van deze aangepaste geleidingsbuisjes is het echter lastiger deze te stellen als ze los in de filterlaag zouden worden geplaatst. Om dit probleem op te lossen zijn de geleidingsbuisjes met draadeinden op een grondplaat bevestigd, die precies in de uitsparing in de cementen bodem past (zie figuur 3.6). M.b.v. moeren op deze draadeinden zijn de buisjes in verticale richting verstelbaar.

Om kleine afwijkingen in horizontale richting op te vangen, zijn de buisjes ook voorzien van een horizontale stelmogelijkheid. Doordat de geleidingsbuisjes op deze wijze nauwkeuriger zijn te stellen dan met de door Van Os (1998) gebruikte methode, is het nu mogelijk twee richtingscomponenten van de snelheid in de porie



Figuur 3.6: Geleidingsbuisjes en meetporie op grondplaat

te meten, namelijk de x- en de z-component. Het meetvolume kan nu bij verschillende experimenten op dezelfde positie in de filterlaag worden gesteld, waarbij de stralen door de geleidingsbuisjes worden geleid. Bij verschillende experimenten is het praktisch onmogelijk exact dezelfde steenstapeling rondom het meetvolume te reproduceren. Uit de experimenten van Van Os (1998) bleek dat de steenstapeling van het filtermateriaal rondom het meetvolume wel eens van invloed zou kunnen zijn op de gemeten frequentie van de snelheidsfluctuatie. Dit kan deels worden veroorzaakt door verandering van de grootte van de porie waarin de poriesnelheden worden gemeten. Door iedere meting uit te voeren in dezelfde porie, hetgeen praktisch binnen de mogelijkheden ligt, zou deze invloed kunnen afnemen. We maken dan gebruik van een zogenaamde *meetporie* (zie Bijlage C). Deze meetporie wordt gevormd door aan elkaar gekitte stenen, waar gaten in geboord zijn. In deze gaten zijn buisjes bevestigd, welke met speciale bevestigingsbusjes precies in



Figuur 3.7: Meetporie in filterlaag

het midden van de geleidingsbuisjes kunnen worden gecentreerd en vastgezet. De grootte van de porie is dusdanig dat het meetvolume, dat 13,4 mm lang is, zich in zijn geheel in de porie bevindt. Uit visuele waarnemingen blijkt dat er in een losgestorte filterlaag veelvuldig poriën voorkomen met grootten gelijk aan die van de gebruikte meetporie, echter de exacte verdeling van de poriegrootten is onbekend.

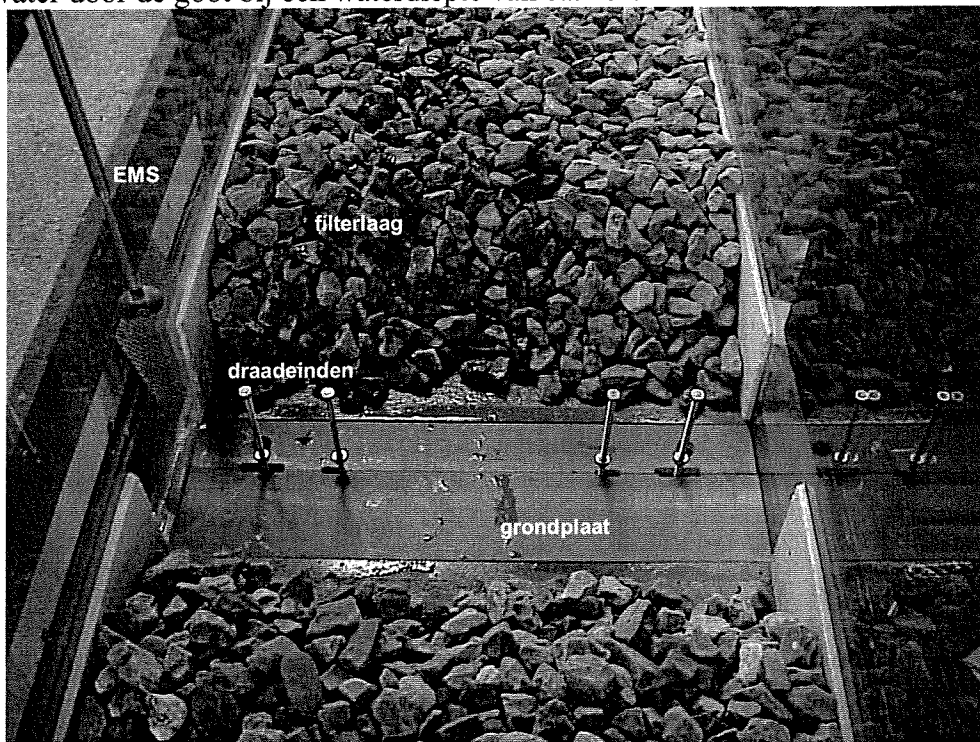
Bij de experimenten is gebruik gemaakt van één meetporie. Met deze opstelling (zie figuur 3.6) kunnen de x- en z-component van de snelheid in de meetporie worden gemeten in een gebied tussen één keer de nominale steendiameter vanaf de bovenkant en de onderkant van de filterlaag. De snelheid in de meetporie noemen we in het vervolg van dit rapport de *poriesnelheid*. Op de meetporie en op de geleidingsbuisjes zijn markeringen aangebracht, waardoor het meetvolume bij ieder experiment op dezelfde plaats in de meetporie kan worden gepositioneerd (zie figuur 3.7).

In de volgende paragraaf wordt de procedure van het stellen van de geleidingsbuisjes in de filterconstructie voor het uitvoeren van de snelheidsmetingen in de meetporie behandeld.

### 3.3.2 Procedure stellen geleidingsbuisjes in de filterconstructie

De procedure van het stellen van de geleidingsbuisjes in de filterconstructie voor het uitvoeren van de snelheidsmetingen in de meetporie wordt hier stapsgewijs behandeld.

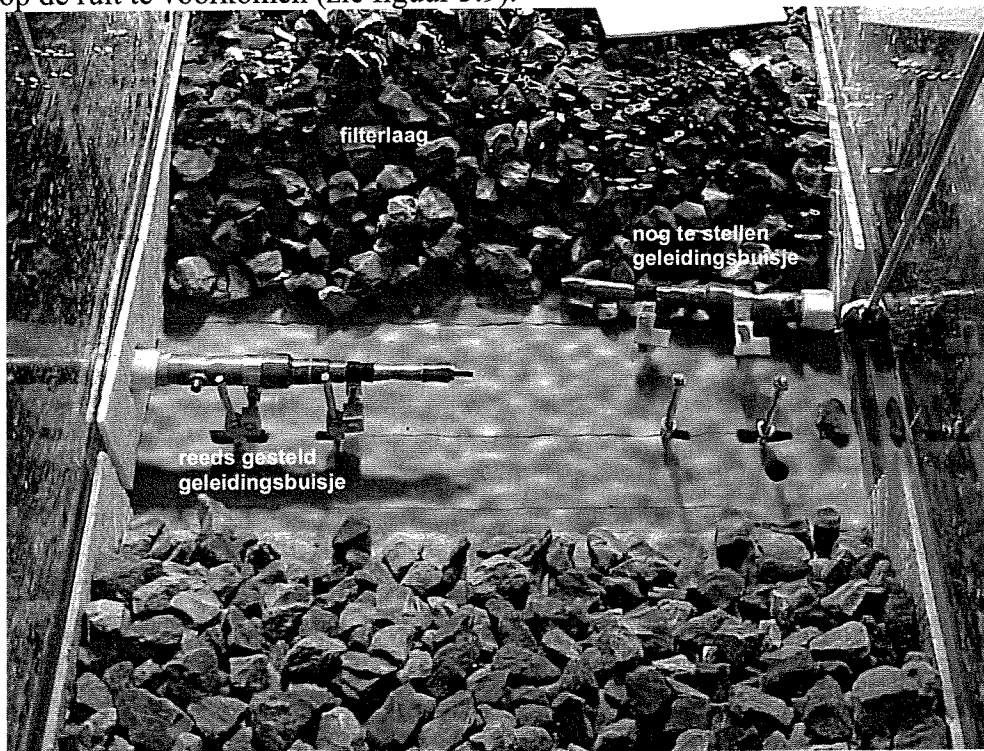
1. De grondplaat met daarop de draadeinden is in de uitsparing in de verhoogde cementen bodem onder de filterconstructie in de goot geplaatst. De filterstenen ter plaatse van deze grondplaat zijn ten behoeve van het stellen verwijderd (zie figuur 3.8); de EMS wordt tijdelijk naar de kant van de goot geschoven. De laser met de beweegbare meetbrug wordt op de gewenste hoogte gesteld door de afstand vanaf de verhoogde bodem tot het meetvolume te meten. Er stroomt dan water door de goot bij een waterdiepte van ca. 15 cm.



Figuur 3.8: Grondplaat in uitsparing in cementen bodem

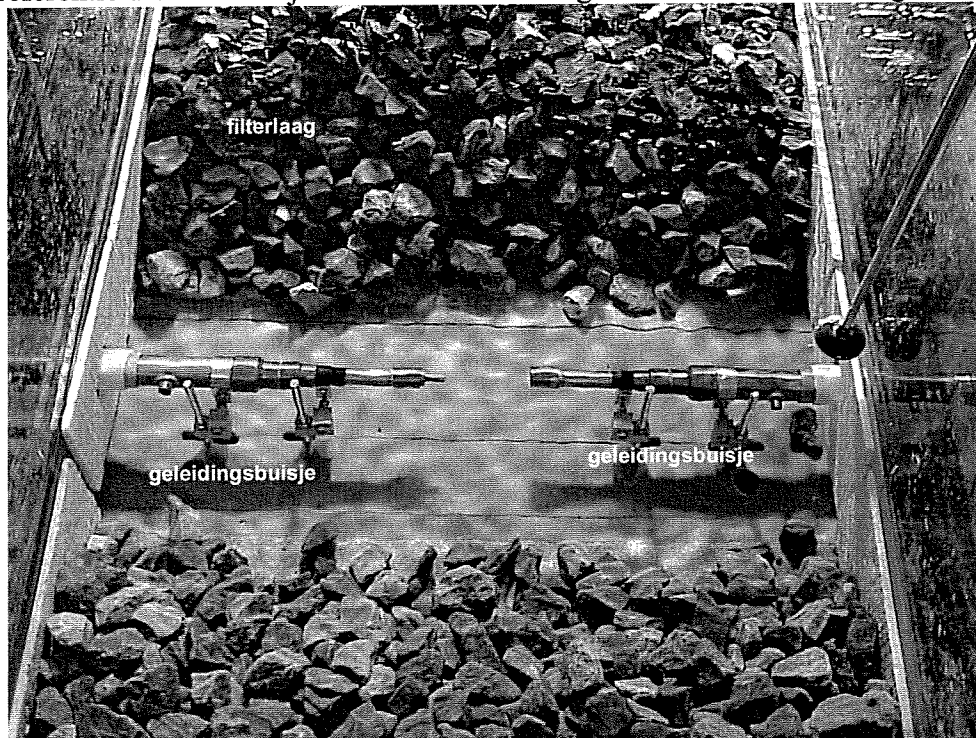
2. Het geleidingsbuisje aan de zijde van de laser wordt aangebracht, ontluicht en gesteld. De laserstralen zijn hierbij rond het midden van het geleidingsbuisje

gecentreerd. Tegen de ruit wordt beschermingsmateriaal aangebracht om krassen op de ruit te voorkomen (zie figuur 3.9).



Figuur 3.9: Eén geleidingsbuisje gesteld

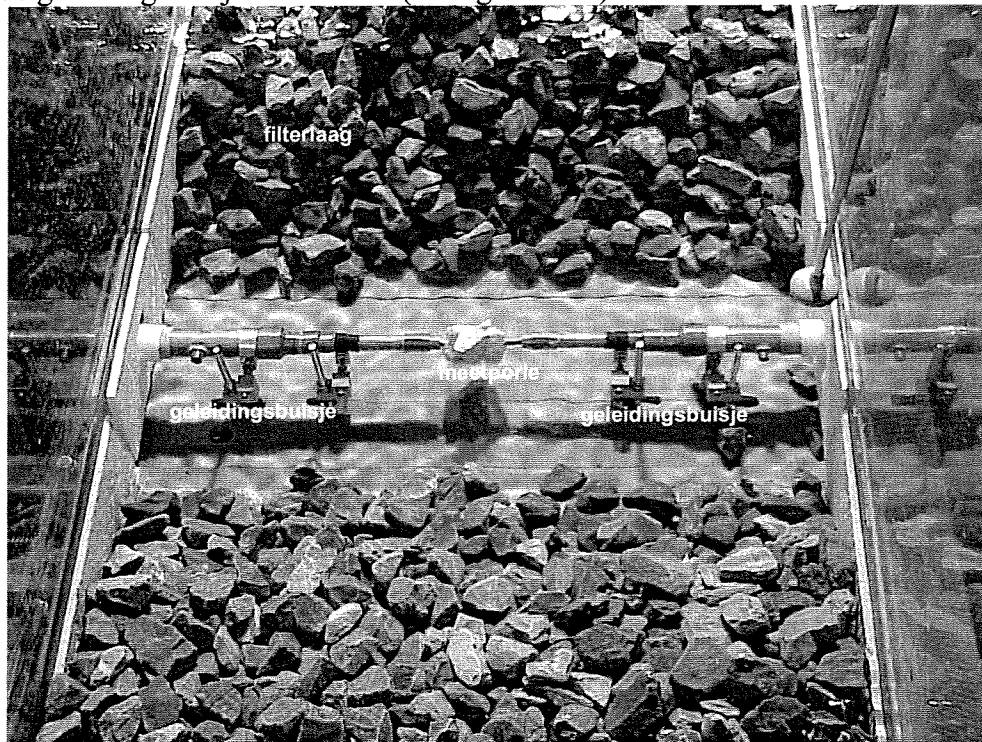
3. Als de meetporie goed is ondersteund en de geleidingsbuisjes bijna volledig zijn begraven, wordt de goot gevuld met water tot op het niveau van de bovenkant van de filterconstructie, waarna de geleidingsbuisjes verder worden begraven en het filter op de juiste hoogte kan worden afgewerkt, waarbij de waterstand als referentie dient. Hierbij wordt een nauwkeurigheid van  $\pm 0.5 \cdot D_{h50}$  aangehouden.



Figuur 3.10: Beide geleidingsbuisjes gesteld



4. Het geleidingsbuisje aan de zijde van de fotodetectoren wordt aangebracht, ontluicht en gesteld. De laserstralen zijn hierbij ook rond het midden van het geleidingsbuisje gecentreerd (zie figuur 3.10).
5. De meetporie wordt met de bevestigingsbusjes tussen de geleidingsbuisjes gecentreerd en vastgezet. In deze situatie kan de meetporie nog  $360^\circ$  om de as van de geleidingsbuisjes roteren, en in beide richtingen ca. 0.5 cm langs de as van de geleidingsbuisjes transleren (zie figuur 3.11).



Figuur 3.11: Meetporie bevestigd tussen geleidingsbuisjes

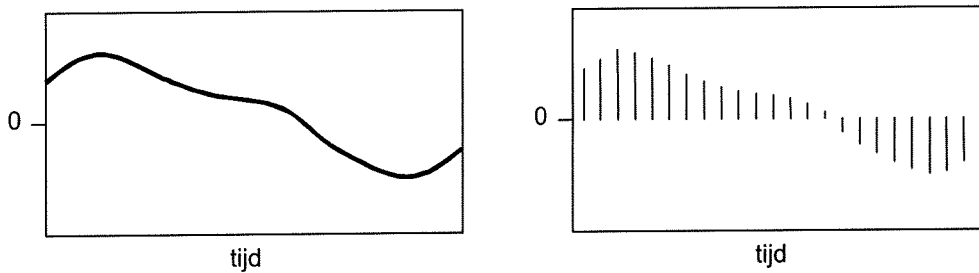
6. De geleidingsbuisjes worden voorzichtig gedeeltelijk in de filterlaag begraven. De meetporie wordt in een dusdanige positie gezet, dat de markeringen op de geleidingsbuisjes en de meetporie in lijn staan. De markering voor de positie van het meetvolume in de porie wordt in het midden van de goot gecentreerd. De meetporie (zie figuur 3.7) wordt in deze stand ondersteund door de omliggende filterstenen, die voorzichtig worden aangebracht.
7. Nadat het filter op hoogte is afgewerkt, wordt de goot tot een constant niveau van 53 cm ten opzichte van de gootbodem, het stilwaterniveau, gevuld met water.
8. De golfhoogtemeters en EMS worden in positie gebracht (zie figuur 3.3) en geijkt in stilstaand water.
9. Het golfschot wordt gestart, waarna de gewenste golfbelastingen kunnen worden ingesteld en op de ingestelde hoogte in de filterlaag snelheidsmetingen kunnen worden uitgevoerd.

Stap 1 t/m 8 neemt ongeveer 2 uur in beslag, stap 9 is afhankelijk van het aantal uit te voeren metingen op een bepaalde hoogte in de filterlaag en de meetduur van de afzonderlijke metingen. Hierover meer in de volgende paragrafen.

### 3.4 Dataverwerking

#### 3.4.1 Gemeten data

De gemeten signalen, elektrische voltages geproduceerd door de meetapparatuur, zijn continue functies van de tijd. Bij de digitale verwerking met behulp van de computer wordt echter gewerkt op een discrete tijd-as. Een oorspronkelijke continue functie, geproduceerd door de meetapparatuur, dient daarom eerst te worden geconverteerd naar een discrete functie. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een A/D convertor die tussen de meetapparatuur en de meet-pc is geplaatst. Een discrete functie van de tijd wordt een *tijdreeks* genoemd. Een tijdreeks is een verzameling van waarnemingen van een functie op *discrete tijden*  $t_m = m\Delta t$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots, M$ ,  $\Delta t = \text{constant}$ . Deze ontstaan door het *bemonsteren* van de oorspronkelijke continue functie, met  $\Delta t$  als *bemonsteringsinterval* of  $\Delta f = 1/\Delta t$  als *bemonsteringsfrequentie*. In figuur 3.12 staan een continue functie en zijn bemonsterde versie, de tijdreeks, afgebeeld.



**Figuur 3.12** Links: continue functie. Rechts: bemonsterde versie, tijdreeks

De bemonsterde signalen (elektrische voltages), worden hier via een omrekenfactor omgerekend naar oppervlakte-uitwijkingen of stroomsnelheden, welke met de meet-pc in een datafile opgeslagen kunnen worden. Voor het opslaan van de data wordt gebruik gemaakt van het programma *DasyLab*. De registratie van een meting wordt opgeslagen in een datafile en bevat informatie over de oppervlakte-uitwijkingen en de snelheden boven- en in de filterlaag. Deze datafile levert de volgende matrix op:

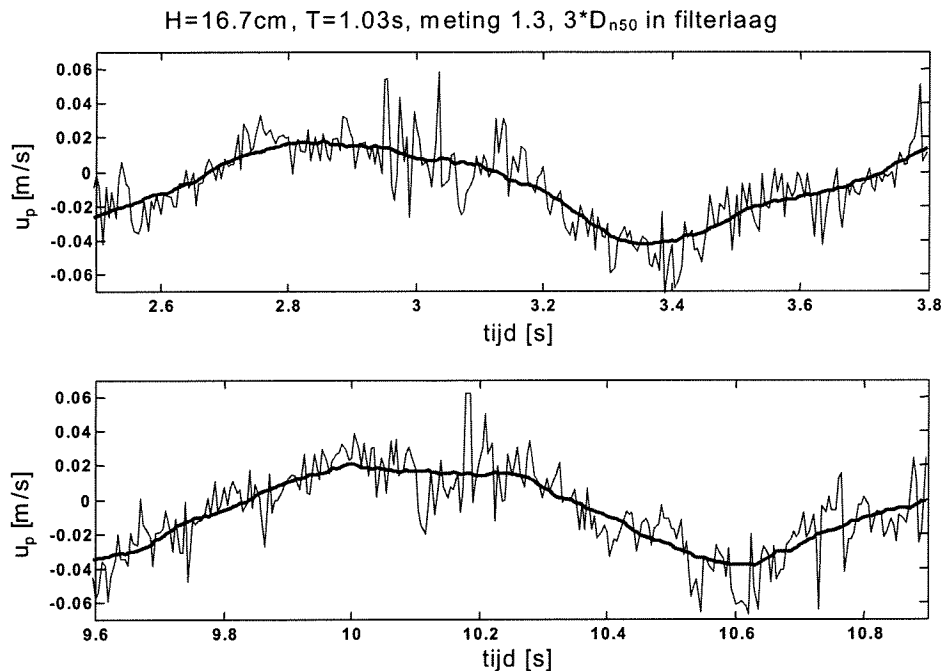
$$\begin{bmatrix} t_0 & u_{p,0} & w_{p,0} & u_{b,0} & \eta_{1,0} & \eta_{2,0} \\ t_1 & u_{p,1} & w_{p,1} & u_{b,1} & \eta_{1,1} & \eta_{2,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_m & u_{p,m} & w_{p,m} & u_{b,m} & \eta_{1,m} & \eta_{2,m} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Hierin is:

- $t_m$  discrete tijd  $t_m = m\Delta t$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots, M$ ,  $\Delta t = \text{constant}$
- $u_{p,m}$  horizontale poriesnelheid op tijdstip  $t_m$
- $w_{p,m}$  verticale poriesnelheid op tijdstip  $t_m$
- $u_{b,m}$  horizontale orbitaalsnelheid 2 cm boven de filterlaag op tijdstip  $t_m$
- $\eta_{1,m}$  oppervlakte-uitwijking golfhoogtemeter 1 op tijdstip  $t_m$
- $\eta_{2,m}$  oppervlakte-uitwijking golfhoogtemeter 2 op tijdstip  $t_m$

De grootte van een datafile is afhankelijk van de bemonsteringsfrequentie,  $\Delta f = 1/\Delta t$ , en de meetduur,  $T_M = M\Delta t$ , welke in *DasyLab* kunnen worden ingesteld. De in te stellen bemonsteringsfrequentie en de meetduur zijn afhankelijk van de gewenste

mate van nauwkeurigheid van de belangrijkste te meten grootheden, de poriesnelheden in de porie van de filterlaag. In figuur 3.13 is de horizontale poriesnelheid uitgezet tegen de tijd voor twee verschillende tijdsintervallen in dezelfde meting. Tevens is hierin een tijdgemiddelde waarde over 61 meetwaarden weergegeven, waarin de periode van de golfbelasting is terug te vinden.



**Figuur 3.13:** Horizontale poriesnelheid op verschillende tijdsintervallen in één meting.

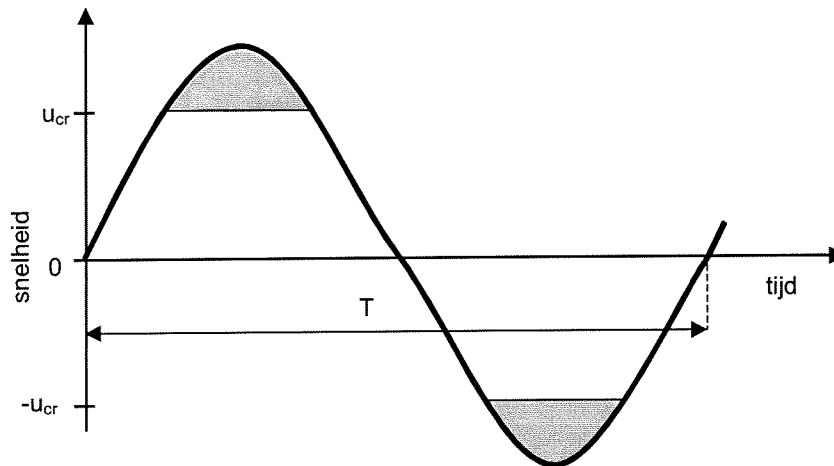
Uit figuur 3.13 blijkt dat de gemeten (horizontale) poriesnelheid in de meetporie een *stochastisch* karakter heeft en afhankelijk is van de tijd. Dit betekent dat herhalingen van het experiment bij gelijke, controleerbare omstandigheden tot verschillende niet van tevoren bekende resultaten zullen leiden. Ook al zouden de controleerbare omstandigheden, zoals gemiddelde waterdiepte, de gemiddelde golfbelasting etc., bij herhaling van een experiment constant worden gehouden, dan nog zouden de daarbij op te nemen registraties van de poriesnelheid niet (in detail) steeds hetzelfde beeld opleveren, en ook niet voorspelbaar zijn. De poriesnelheid in de filterlaag is dus een *stochastische variabele* als functie van de tijd. Met experiment wordt in deze context de bepaling van de grootte van de poriesnelheid in een bepaald fasepunt binnen de golfperiode  $T$  bedoeld. De waarde die de poriesnelheid tijdens een experiment aanneemt in een bepaalde fasepunt van de golfperiode noemen we een *realisatie* van de poriesnelheid in dat fasepunt. Een verzameling van beschikbare of mogelijke realisaties noemen we een *ensemble*. Om de uitkomsten van de verschillende experimenten met elkaar te kunnen vergelijken moeten we afzien van toevallige verschillen tussen de registraties, en zoeken naar datgene dat zij gemeenschappelijk hebben. Hiervoor maken we gebruik van de volgende tijdreeksanalysemethoden:

- *Ensemblemiddeling*;
- *Spectraalanalyse*.

Deze methoden worden in de volgende paragrafen besproken.

### 3.4.2 Ensemblemiddeling

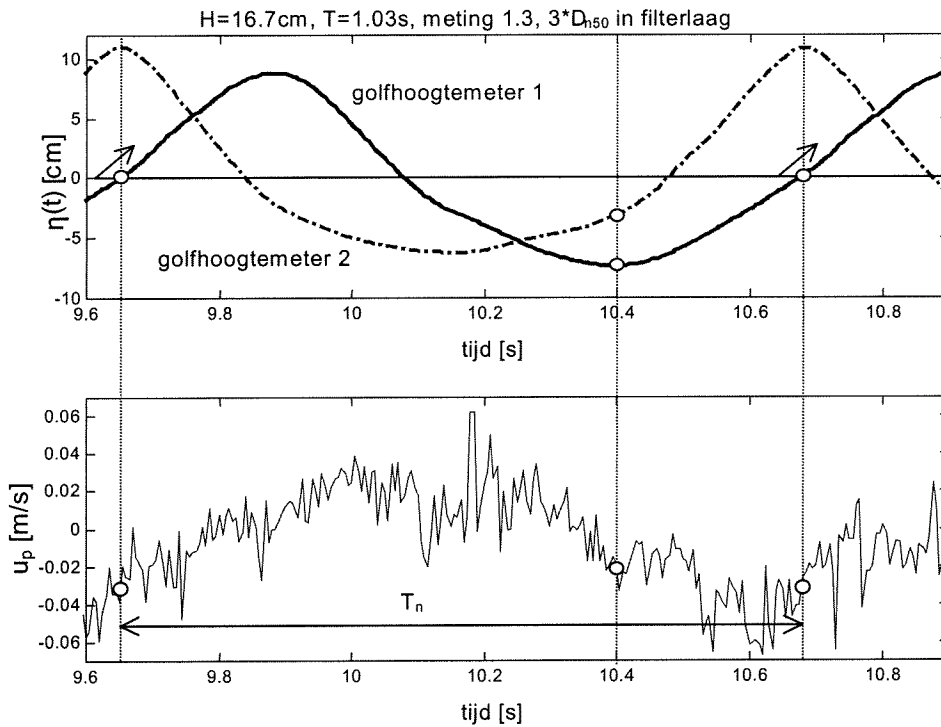
Het doel van dit onderzoek is het zoeken naar het verband tussen de golfbelasting op het filter, de interne belasting in het filter en het begin van erosie van de basislaag. Begin van bewegen van basismateriaal vindt plaats als een bepaalde kritische snelheid,  $u_{cr}$ , voor het begin van bewegen wordt overschreden. De golfbelasting veroorzaakt een oscillerende waterbeweging, waarbij de poriesnelheid gedurende de golfperiode  $T$  van teken wisselt. Hierdoor zal er slechts gedurende bepaalde fasegebieden beweging van basismateriaal mogelijk zijn (zie figuur 3.14).



**Figuur 3.14:** In de grijze fasegebieden is beweging van basismateriaal mogelijk

We zijn dus geïnteresseerd in de fasegebieden gedurende de golfperiode waarin de poriesnelheid dusdanig groot is dat beweging van het basismateriaal mogelijk is. Hiervoor willen we het verloop van de poriesnelheid in de verschillende fasepunten binnen de golfperiode weten. In verband met de onvoorspelbaarheid van de poriesnelheid moeten we onze toevlucht nemen tot statistische methoden om de grootte van de poriesnelheid in de verschillende fasen binnen de golfperiode te kunnen schatten. Hiervoor gebruiken we de *ensemblemiddeling*, waarbij we middelen over een ensemble van gemeten poriesnelheden in dezelfde fasepunten binnen de golfperiode. Het aantal realisaties,  $N$ , moeten we hierbij zo groot nemen dat van een representatieve steekproef gesproken kan worden. We gaan er hier vanuit dat dit voor  $N=100$  het geval is, hetgeen betekent dat één meting uit ruim 100 golven moet bestaan. Hiermee hebben we in principe de meetduur bepaald, namelijk  $T_M > NT$ .

Om te kunnen middelen over een ensemble van 100 gemeten poriesnelheden in hetzelfde fasepunt binnen de golfperiode, moeten we een meting eerst opdelen in 100 golfperiodes,  $T_n$ ,  $n=1,2,3,\dots,100$ . Als golfperiode  $T_n$  gebruiken we het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende opgaande nuldoorgangen van de oppervlakte-uitwijking,  $\eta(t_m)$ , waarvoor we het signaal van golfhoogtemeter 1,  $\eta_{1,m}$ , gebruiken (zie figuur 3.15). Op dit interval zijn waarden gemeten voor  $J=T_n/\Delta t$  fasepunten van de oppervlakte-uitwijking,  $\eta_{1,m}$ , maar ook voor oppervlakte-uitwijking,  $\eta_{2,m}$ , de horizontale- en verticale poriesnelheid, respectievelijk  $u_{p,m}$  en  $w_{p,m}$ , en de horizontale orbitaalsnelheid boven het bed,  $u_{b,m}$ . Voor iedere golfperiode  $T_n$  is dan het verloop van elk van deze signalen over de verschillende fasepunten van deze golfperiode bekend. Ter illustratie zijn in figuur 3.15 de waarden van de oppervlakte-uitwijkingen, van golfhoogtemeter 1 en 2, respectievelijk  $\eta_{1,m}$  en  $\eta_{2,m}$  en de horizontale poriesnelheid,  $u_{p,m}$ , in hetzelfde fasepunt ( $t=10,4$  s) weergegeven.



**Figuur 3.15:** Tijdsinterval tussen twee opgaande nuldoorgangen van  $\eta(t)$

Het opdelen van het signaal van b.v. de horizontale poriesnelheid,  $u_{p,m}$ , levert dan de volgende matrix op:

$$\begin{array}{l}
 \text{verloop horizontale poriesnelheid golfperiode 1} \\
 \text{verloop horizontale poriesnelheid golfperiode 2} \\
 \vdots \\
 \text{verloop horizontale poriesnelheid golfperiode } N
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 u_{p,1,1} & u_{p,1,2} & \cdots & u_{p,1,J} \\
 u_{p,2,1} & u_{p,2,2} & & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 u_{p,N,1} & u_{p,N,2} & \cdots & u_{p,N,J}
 \end{bmatrix}
 \quad (3.2)$$

De waarden in de kolomen van deze matrix zijn een ensemble van gemeten horizontale poriesnelheden in hetzelfde fasepunt binnen de golfperiode, waarvan het ensemblegemiddelde bepaald kan worden:

$$\left\langle \begin{array}{l}
 \text{gemiddeld verloop} \\
 \text{horizontale poriesnelheid} \\
 \text{gemiddelde golfperiode}
 \end{array} \right\rangle = \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{p,n,1} \quad \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{p,n,2} \quad \cdots \quad \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{p,n,J} \right] \quad (3.3)$$

Het resultaat van de ensemblemiddeling is het gemiddelde verloop van de horizontale poriesnelheid over de verschillende fasepunten binnen de gemiddelde golfperiode  $T$ .

In ieder gemeten fasepunt is de waarde van de horizontale poriesnelheid te splitsen in een ensemblegemiddelde waarde en de incidentele afwijking ervan, dat het onvoorspelbare, fluctuerende aandeel voorstelt:

$$u_p = \langle u_p \rangle + u_p' \quad (3.4)$$

Hierin is:

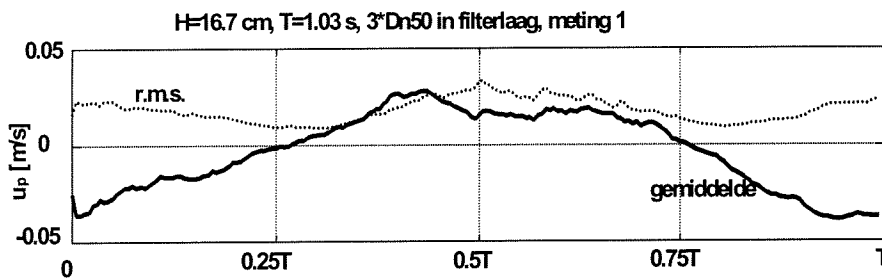
$u_p$  (gemeten) horizontale poriesnelheid;

$\langle u_p \rangle$             ensemblegemiddelde horizontale poriesnelheid;  
 $u_p'$                 fluctuerend aandeel horizontale poriesnelheid.

Een maat voor de grootte van dit fluctuerende aandeel is de r.m.s.-waarde van  $u_{p,m}'$ :

$$\sqrt{\overline{(u_p')^2}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_{p,i} - \langle u_p \rangle)^2} \quad (3.5)$$

Voor ieder gemeten fasepunt binnen de gemiddelde golfperiode kunnen we nu het verloop van de horizontale poriesnelheid beschrijven door de ensemblegemiddelde waarde  $\langle u_p \rangle$  en de r.m.s.-waarde van  $u_{p,m}'$  (zie figuur 3.16).



Figuur 3.16: Resultaat ensemblemiddeling, verloop gemiddelde- en r.m.s.-waarde

### 3.4.3 Spectraalanalyse

De registratie van bijvoorbeeld de horizontale poriesnelheid,  $u_p$ , is te beschouwen als opgebouwd uit componenten met een reeks frequenties  $f_n$  en amplitudes  $\hat{u}_{p,n}$  met verschillende fasen  $\alpha_n$ :

$$u_p(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{u}_{p,n} \cos(2\pi f_n t - \alpha_n) \quad (3.6)$$

Dit wordt een *Fourierreeks* genoemd. Voor een stochastische tijdreeks, zoals de registratie van de horizontale poriesnelheid,  $u_p$ , kunnen de bijdragen van de verschillende frequentiecomponenten worden gemeten in termen van een spectrale vermogen dichtheid,  $E_{u_p}$ , (Engels: *power spectral density* (PSD)), en tegen elkaar worden uitgezet in een *powerspectrum* (zie figuur 3.20). Vermogen wordt hier gedefinieerd als energie per eenheid van tijd, energie is evenredig met  $\hat{u}_p^2$ .

Voor het begin van bewegen en het transport van het basismateriaal is energie nodig. De vermogensinhoud van de verschillende frequentiecomponenten is een maat voor het transporterend vermogen bij die frequenties. We zijn hierbij op zoek naar bepaalde structuren binnen de waterbeweging in de filterlaag, die verantwoordelijk zouden kunnen zijn voor het begin van bewegen en het transport van het basismateriaal. In deze paragraaf wordt beschreven hoe uit een registratie het *powerspectrum* kan worden bepaald.

Het woord *spectrum* is afkomstig uit de optica. De kleuren rood, wit en blauw van het electro-magnetische spectrum kunnen hier ook gebruikt worden. Een spectrum waarvan de spectrale dichtheid afneemt bij toenemende frequentie wordt een 'rood'spectrum genoemd, analoog aan zichtbaar licht, waar rood correspondeert met langere golflengten (lagere frequenties). Op dezelfde wijze wordt een spectrum waarvan de spectrale dichtheid toeneemt bij toenemende frequentie een 'blauw'spectrum genoemd. Een 'wit' spectrum is een spectrum waarvan de spectrale

componenten over het gehele frequentiebereik een nagenoeg constante amplitude hebben. Signaalruis veroorzaakt door de meetapparatuur heeft meestal een ‘wit’ spectrum.

Voor de procedure van het schatten van de verschillende spectrale componenten uit een registratie (spectraalanalyse) wordt gebruik gemaakt van de Fast Fourier Transform (FFT). De Fourier Transformatie van een eindig, gediscretiseerd signaal  $x_n$  is te schrijven als:

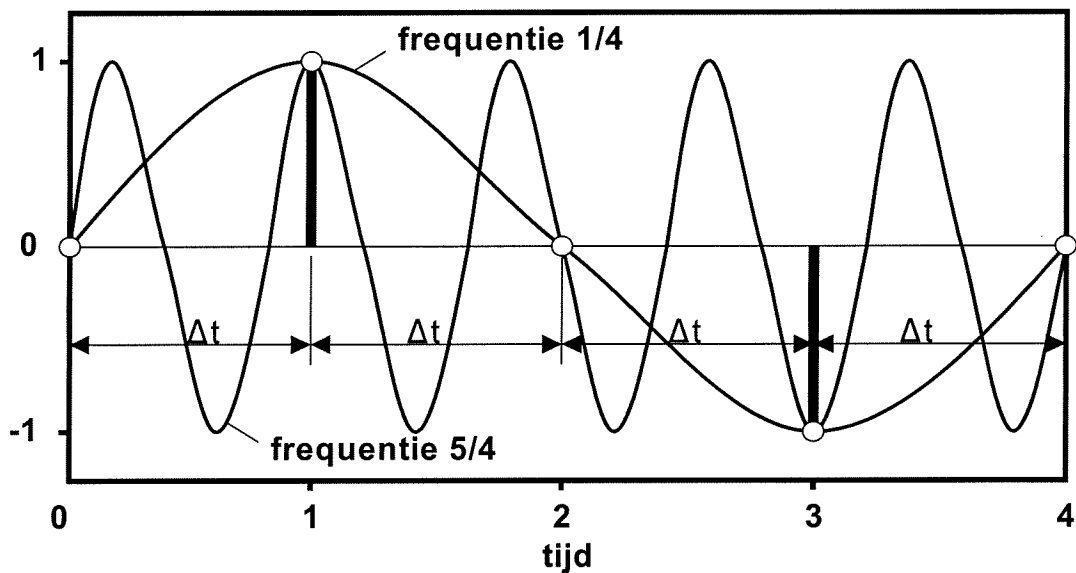
$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n e^{-i(2\pi kn/N)}; \quad k=1,2,\dots,N, \quad i = \sqrt{-1} \quad (3.7)$$

Het signaal  $x_n$  kan ieder gewenst signaal zijn, bijvoorbeeld de horizontale poriesnelheid,  $u_p(t)$ .

Een belangrijk aspect, waar rekening mee gehouden dient te worden, is dat voor een gegeven bemonsteringsinterval  $\Delta t$ , de hoogste frequentie die we kunnen oplossen de *Nyquist frequentie*,  $f_N$ , is:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3.8)$$

De bemonsteringsfrequentie,  $\Delta f=1/\Delta t$ , moet dus twee maal zo groot worden gekozen als de hoogste frequentie waarin we geïnteresseerd zijn. De energie die aanwezig is voor  $f > f_N$  komt tot uiting als energie in de lagere frequenties, het zgn. *stroboscoop- of vouweffect* (Engels: *aliasing*). De reden hiervan is dat het bemonsteren van twee continue harmonische functies met verschillende frequenties kan resulteren in dezelfde tijdreeks. Dit verschijnsel wordt in figuur 3.16 geïllustreerd, twee continue

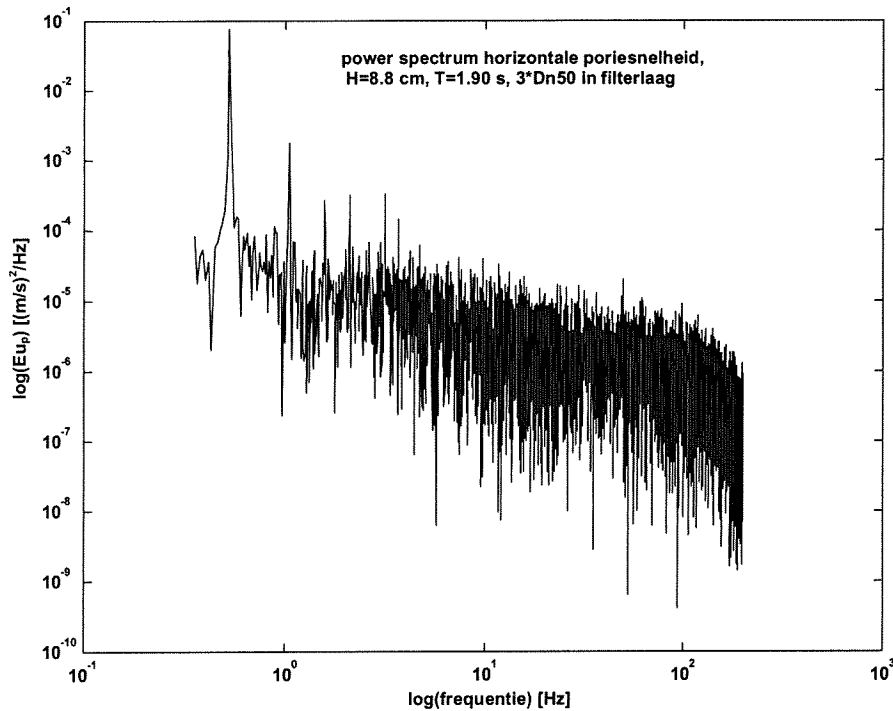


**Figuur 3.17:**  $\sin(2\pi f_1 t)$  en  $\sin(2\pi f_2 t)$  met  $f_1 = 1/4$  en  $f_2 = 5/4$ , vallen samen op discrete tijdas

harmonische functies,  $\sin(2\pi f_1 t)$  en  $\sin(2\pi f_2 t)$  met  $f_1 = 1/4$  Hz en  $f_2 = 5/4$  Hz, vallen samen op de discrete tijdas, d.w.z. leveren dezelfde waarden bij een discrete tijdreeks. Het vouweffect kan worden voorkomen door het plaatsen van een *analoog lowpass-filter* tussen de meetapparatuur en de A/D-converter. Een analoog lowpass-filter zorgt ervoor dat alleen de frequentiecomponenten die kleiner zijn dan de *Nyquist frequentie* worden doorgelaten naar de A/D-converter.

Een belangrijk probleem waarmee we rekening moeten houden bij het schatten van de PSD van een stochastisch proces uit één registratie met een eindige meetduur, is

de beperkte statistische betrouwbaarheid. Wanneer hiermee geen rekening wordt gehouden, kan dit leiden tot incorrecte resultaten en ziet het geschatte spectrum er uit als “gras” (figuur 3.18).



**Figuur 3.18:** Powerspectrum met beperkte statistische betrouwbaarheid ziet er uit als “gras”.

Het resultaat kan worden verbeterd door gebruik te maken van een *window functie*,  $w_n$ , waarmee de data in het tijdsdomein worden vermenigvuldigd, waarna ze met een Fourier Transformatie wordt getransformeerd:

$$\hat{X}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_n x_n e^{-i(2\pi kn / N)}; \quad k=1,2,\dots,N \quad (3.9)$$

$$\hat{X}_k = X_k \text{ gewogen met } w_n$$

Het vermenigvuldigen met een *window functie* heeft invloed op de volgende twee eigenschappen van het uiteindelijke spectrum:

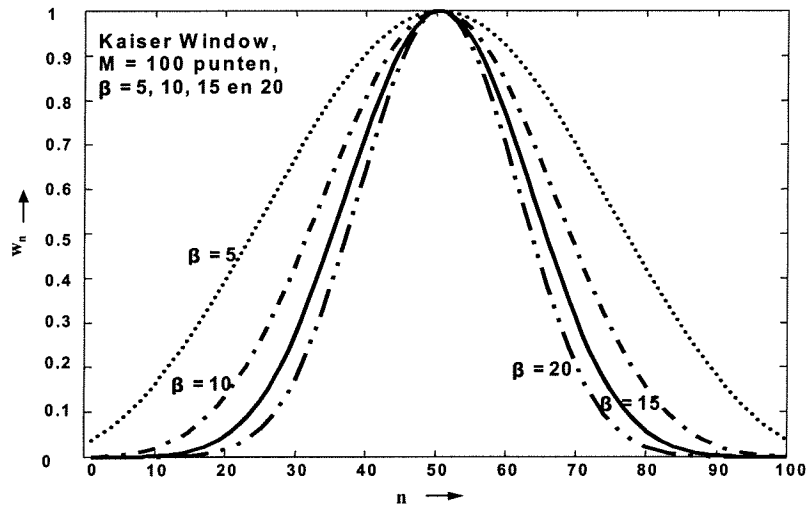
1. *scheidend vermogen*: kunnen we twee dicht bij elkaar liggende frequenties nog van elkaar onderscheiden?
2. *lekkage*: energie van één frequentie wordt verspreid over de aangrenzende frequenties.

Er zijn verschillende window functies beschikbaar, die alle pogen een compromis te treffen tussen deze twee effecten. Over het algemeen bepaald de *windowlengte* het scheidend vermogen, en de *windowvorm* de lekkage. Bij de meeste window functies ligt de windowvorm vast en is de windowlengte de enige parameter waarmee het uiteindelijke resultaat kan worden beïnvloed. We maken gebruik van een zogenaamd *Kaiserwindow*, (zie figuur 3.19), omdat de windowvorm hierbij wel kan worden gewijzigd met een vormparameter. De Kaiserwindow-functie wordt gedefinieerd door:

$$w_{Kaiser,n} = \begin{cases} I_0 \left[ \beta(1 - [n - \alpha] / \alpha)^2 \right]^{1/2} & 0 \leq n \leq M \\ 0 & \text{in andere gevallen} \end{cases} \quad (3.10)$$

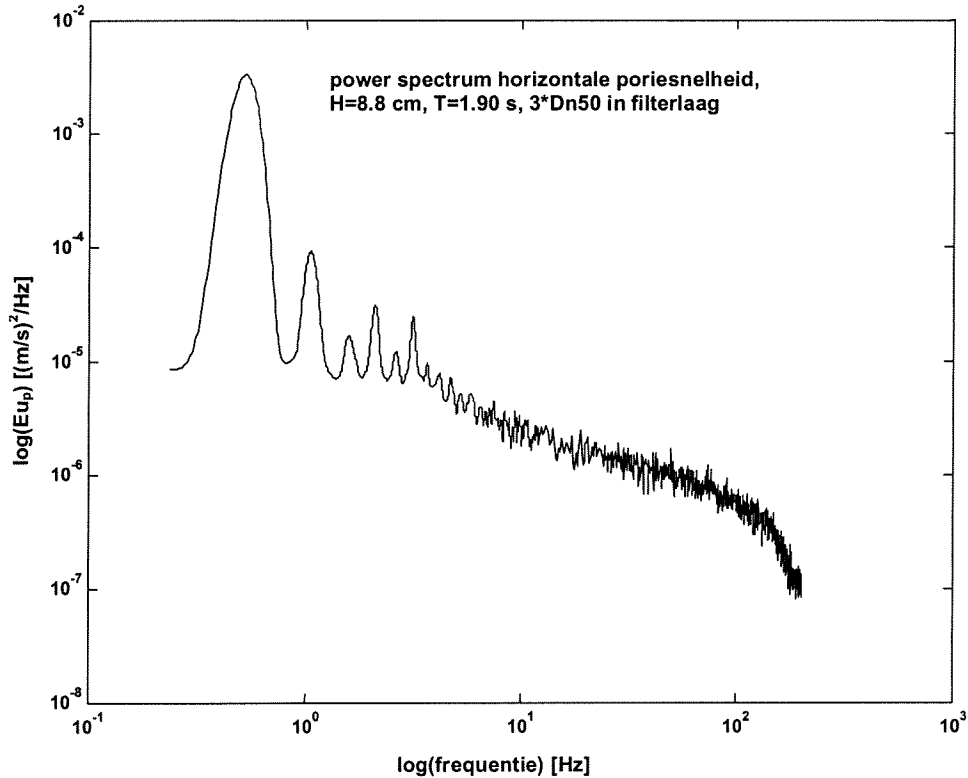


waarin  $M$  de windowlengte is,  $\alpha = M/2$  en  $I_0(\cdot)$  is de *gemodificeerde Besselfunctie* van de orde nul en van de eerste soort,  $\beta$  is een vormparameter. De registratie wordt



Figuur 3.19: Kaiserwindow

opgedeeld in een aantal secties, met windowlengte  $M$ , welke elkaar 50 % overlappen, die vervolgens worden vermenigvuldigd met de *Kaiserwindow functie*,  $w_{Kaiser,n}$ . Iedere sectie wordt met een FFT getransformeerd en van iedere sectie wordt het *energiespectrum* bepaald. Het powerspectrum wordt verkregen door de energiespectra van de elkaar overlappende secties te middelen.



Figuur 3.20: Powerspectrum berekend met de methode van Welch.

Voor het berekenen van de PSD is gebruik gemaakt van een functie in het computerprogramma *MATLAB* die werkt volgens bovenstaande methode. Deze

methode voor het schatten van de PSD wordt de *methode van Welch* genoemd. In figuur 3.20 wordt een *powerspectrum* voor de horizontale poriesnelheid,  $u_p$ , weergegeven, dat volgens de *methode van Welch* is bepaald.

Tenslotte geven we de volgende relatie, die geldt voor powerspectra:

$$\int_0^{\infty} E u_p(f) df = \overline{u_p^2} \quad (3.11)$$

De oppervlakte van het spectrum kan worden geïntegreerd en worden vergeleken met de r.m.s.-waarde van het beschouwde signaal, om de numerieke routine te controleren.

### 3.5 Uit te voeren metingen

Het doel van dit onderzoek is het zoeken naar het verband tussen de uitwendige belasting op het filter en een interne belasting in het filter op de basislaag, en het begin van erosie. Hiertoe zullen snelheidsmetingen met de in paragraaf 3.3.1 beschreven opstelling worden uitgevoerd in de poriën van de filterlaag, bij de in tabel 2.3 aangegeven kritieke golfbelastingen. De snelheidsmetingen zijn onderverdeeld in een aantal meetseries, welke in de volgende paragrafen zullen worden besproken:

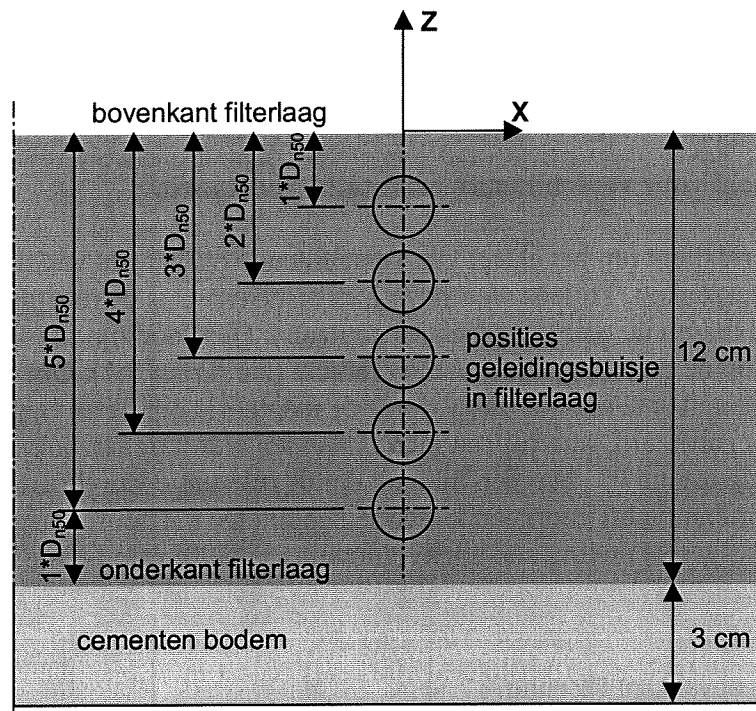
- *meetserie 1*: verloop poriesnelheden over dikke filterlaag;
- *meetserie 2*: effect verhogen bemonsteringsfrequentie;
- *meetserie 3*: gevoeligheid voor verschillende oriëntaties meetporie;
- *meetserie 4*: gefixeerde golfperiode, variabele golfhoogte;
- *meetserie 5*: gefixeerde golfhoogte, variabele golfperiode;
- *meetserie 6*: snelheidsmetingen met LDFM boven de filterlaag;
- *meetserie 7*: snelheidsmetingen met LDFM zonder de filterlaag.

#### 3.5.1 Verloop poriesnelheden over dikke filterlaag

De eerste meetserie dient om het verloop van de poriesnelheden over de dikte van de filterlaag in kaart te brengen. Hiertoe zijn de geleidingsbuisjes achtereenvolgens op de in figuur 3.21 aangegeven posities gesteld (zie paragraaf 3.3.2), waarna de snelheidsmetingen zijn uitgevoerd. Er kan echter maar op één positie tegelijk worden gemeten. Voor het opnieuw stellen van de geleidingsbuisjes moeten deze worden ontgraven en weer opnieuw worden begraven, waardoor de stenenstapeling van de filterconstructie bij ieder experiment anders zal zijn. Omdat we voor het meten van de poriesnelheden gebruik maken van een zogenaamde *meetporie* (zie paragraaf 3.3.2), bevindt het meetvolume zich wel iedere keer op dezelfde plaats in deze *meetporie*, echter de stenenstapeling rondom deze *meetporie* wordt iedere keer gewijzigd. De stenenstapeling rondom de *meetporie* is een praktisch niet te controleren parameter in de opstelling: het is namelijk niet mogelijk bij verschillende experimenten een eerder gebruikte stenenstapeling exact te reproduceren. Om de gevoeligheid voor een gewijzigde stenenstapeling te onderzoeken wordt op iedere positie een experiment drie maal herhaald, waarbij de stenenstapeling wordt gewijzigd, maar de oriëntatie van de meetporie exact hetzelfde blijft.

Een aantal gegevens van *meetserie 1* is weergegeven in tabel 3.2. Naast het onderzoeken van de gevoeligheid voor een gewijzigde stenenstapeling zijn we ook zeer geïnteresseerd in de overeenkomst tussen de grootte van de poriesnelheden, zoals deze ontstaan onder invloed van de verschillende belastingsgevallen. Tijdens

meetserie 1 is de bemonsteringsfrequentie 200 Hz voor alle belastingsgevallen. Bij deze meetserie was er geen analoog lowpass-filter tussen de meetapparatuur en de A/D-converter geplaatst. De resultaten en analyse van deze meetserie zijn te vinden in paragraaf 4.1.



Figuur 3.21: Posities geleidingsbuisje in filterlaag

golfbelasting	golfhogte [cm]	golfperiode [s]	meetduur [s]	aantal stenen-stapelingen	aantal posities	aantal metingen/golfbelasting
A	16,7	1,03	110	3	5	15
B	8,9	1,33	140	3	5	15
C	8,8	1,90	200	3	5	15
D	7,9	2,41	250	3	5	15
totaal aantal metingen meetserie 1						60

Tabel 3.2: Gegevens meetserie 1

### 3.5.2 Effect verhogen bemonsteringsfrequentie

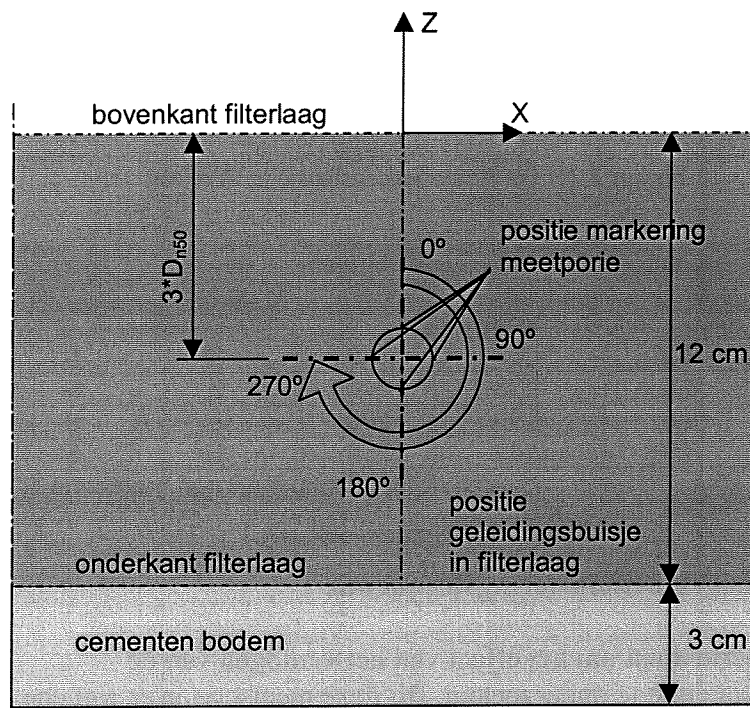
De tweede meetserie dient om het effect van het verhogen van de bemonsteringsfrequentie te onderzoeken. Bij deze meetserie is er wel een analoog lowpass-filter tussen de meetapparatuur en de A/D-converter geplaatst. Dit filter laat alleen frequenties  $<$  Nyquist-frequentie door, hetgeen betrouwbaardere schattingen voor de spectrale componenten tot gevolg heeft. Misschien zijn we dan wel in staat eventuele aanwezige wervelstructuren in de porie, in powerspectra van het gemeten signaal van elkaar te onderscheiden. Gezien de resultaten van meetserie 1 (zie paragraaf 4.1), hebben we besloten bij deze meetserie één belastingsgeval op één positie in de filterlaag te onderzoeken, namelijk belastingsgeval C,  $3 \cdot D_{n50}$  in de filterlaag. Een aantal gegevens van *meetserie 2* is weergegeven in tabel 3.3. De resultaten en analyse van deze meetserie zijn te vinden in paragraaf 4.2.

golfbelasting	golfhoogte [cm]	golfperiode [s]	meetduur [s]	bemonsterings-frequentie [Hz]	aantal metingen
C	8,8	1,90	200	200	1
C	8,8	1,90	200	400	1
C	8,8	1,90	200	800	1
totaal aantal metingen meetserie 2					3

Tabel 3.3: Gegevens meetserie 2

### 3.5.3 Gevoeligheid voor verschillende oriëntaties meetporie

De derde meetserie dient om het effect van verschillende oriëntaties van de meetporie te onderzoeken. Tijdens *meetserie 1* en *meetserie 2* is de meetporie telkens in dezelfde stand tussen de geleidingsbuisjes geplaatst. Hiervoor zijn markeringen op de meetporie en op de geleidingsbuisjes aangebracht (zie figuur 3.7). Om verschillende oriëntaties te onderzoeken wordt de meetporie om de as van de geleidingsbuisjes geroteerd, waarbij een viertal standen wordt onderzocht. Bij de eerste meting is de rotatie  $0^\circ$ , hetgeen inhoudt dat de oriëntatie van de meetporie gelijk is aan de oriëntatie bij voorgaande experimenten. De meetporie krijgt hierna bij iedere opeenvolgende meting een hoekverdraaiing van  $90^\circ$  (zie figuur 3.22). Ook



Figuur 3.22: Rotatie meetporie om as geleidingsbuisjes

golfbelasting	golfhoogte [cm]	golfperiode [s]	meetduur [s]	rotatie [°]	aantal metingen
C	8,8	1,90	200	0	1
C	8,8	1,90	200	90	1
C	8,8	1,90	200	180	1
C	8,8	1,90	200	270	1
totaal aantal metingen meetserie 3					4

Tabel 3.4: Gegevens meetserie 3

bij deze meetserie wordt één belastingsgeval op één positie in de filterlaag te onderzocht, namelijk belastingsgeval C,  $3 \cdot D_{n50}$  in de filterlaag. Een aantal gegevens van *meetserie 3* is weergegeven in tabel 3.4.

De resultaten en analyse van deze meetserie zijn te vinden in paragraaf 4.3.

### 3.5.4 Constante golfperiode, variabele golfhoogte

De vierde meetserie dient om het effect van de variatie in de golfhoogte te onderzoeken. De golfperiode (1,90 s) wordt bij deze meetserie constant gehouden, terwijl de golfhoogte wordt gevarieerd met stappen van 1 cm van 2 cm tot 16 cm. Een aantal gegevens van *meetserie 4* is weergegeven in tabel 3.5.

golfhoogte (variabel) [cm]	golfperiode [s]	meetduur [s]	aantal metingen
2 tot 16	1,90	200	15
totaal aantal metingen meetserie 4			15

Tabel 3.5: Gegevens meetserie 4

### 3.5.5 Constante golfhoogte, variabele golfperiode

De vijfde meetserie dient om het effect van de variatie in de golfperiode te onderzoeken. De golfhoogte (8,8 cm) wordt bij deze meetserie constant gehouden, terwijl de golfperiode wordt gevarieerd met stappen van 0,1 s van 0,9 s tot 2,5 s. Een aantal gegevens van *meetserie 5* is weergegeven in tabel 3.6.

golfhoogte [cm]	golfperiode (variabel) [s]	meetduur [s]	aantal metingen
8,8	0,9 tot 2,5	95 tot 260	17
totaal aantal metingen meetserie 5			17

Tabel 3.6: Gegevens meetserie 5

### 3.5.6 Snelheidsmetingen met LDFM boven de filterlaag

De zesde meetserie bestaat uit snelheidsmetingen met de LDFM op een aantal hoogten boven de filterlaag. Tijdens alle voorgaande experimenten is de horizontale orbitaalsnelheid 2 cm boven de filterlaag gemeten met een EMS. De bij de eerste meetseries gebruikte EMS kan tot 5 Hz nauwkeurig meten en is daardoor niet erg geschikt voor het bepalen van r.m.s.-waarden en spectra. We zijn geïnteresseerd in de grootte van de fluctuaties boven de filterlaag, waarvoor de r.m.s.-waarde een maat is. De LDFM-metingen zijn wel geschikt voor het bepalen van bruikbare r.m.s.-

golfbelasting	golfhoogte [cm]	golfperiode [s]	meetduur [s]	hoogte boven filterlaag [cm]	aantal metingen
C	8,8	1,90	200	2	1
C	8,8	1,90	200	4	1
C	8,8	1,90	200	6	1
C	8,8	1,90	200	8	1
totaal aantal metingen meetserie 6					4

Tabel 3.7: Aantal uit te voeren metingen meetserie 6

waarden. Met de LDFM worden de horizontale- en verticale orbitaalsnelheid gemeten. Door beperkingen nabij de goot kan er niet hoger dan 8 cm boven de filterlaag worden gemeten. Bij deze meetserie is één belastingsgeval onderzocht, namelijk belastingsgeval C. Een aantal gegevens van *meetserie 6* is weergegeven in tabel 3.7.

### 3.5.7 Snelheidsmetingen met LDFM zonder de filterlaag

De zevende meetserie bestaat uit snelheidsmetingen met de LDFM op 2cm boven de cementen bodem, zonder filterlaag. Halter (1999) heeft voor de situatie zonder filterlaag ook een aantal kritieke golfbelastingen bepaald. Hierbij zijn met een EMS snelheden gemeten op 2 cm boven de bodem. We zijn geïnteresseerd in de overeenkomst tussen de kritieke golfbelastingen met en zonder filterlaag en de grootte van de fluctuaties boven de bodem. Daarom wordt om dezelfde reden als genoemd in de vorige paragraaf de EMS vervangen door de LDFM. Een aantal gegevens van *meetserie 7* is weergegeven in tabel 3.8.

golfbelasting	golfhoogte [cm]	golfperiode [s]	Meetduur [s]	aantal metingen
A	11,7	1,03	110	1
B	7,0	1,33	140	1
C	6,3	1,90	200	1
D	5,1	2,41	250	1
totaal aantal metingen meetserie 7				4

Tabel 3.8: Gegevens meetserie 7

### 3.5.8 Overzicht totaal aantal uit te voeren metingen

In tabel 3.9 is een overzicht gegeven van het totale aantal uit te voeren metingen.

meetserie	aantal metingen
1	60
2	3
3	4
4	15
5	17
6	4
7	4
Totaal	107

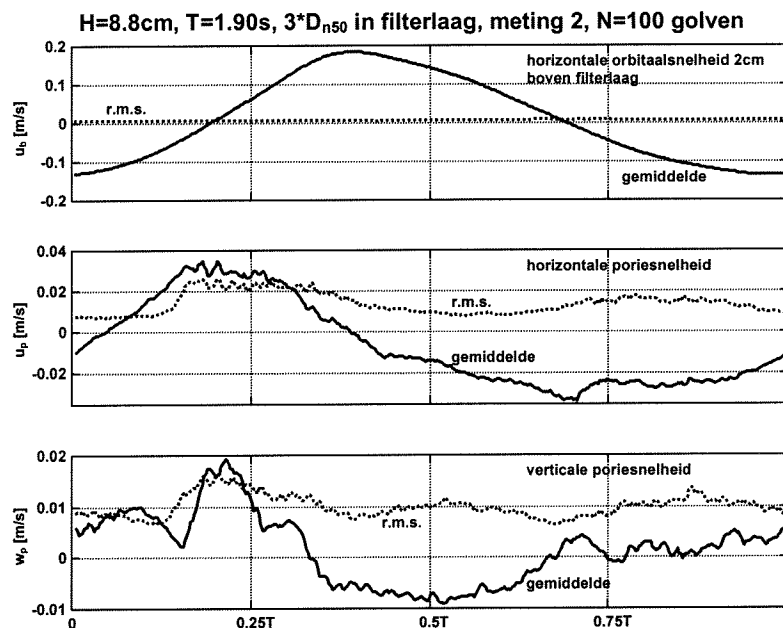
Tabel 3.9: Totaal aantal uit te voeren metingen

## 4 Analyse snelheidsmetingen

De uitgevoerde metingen zijn onderverdeeld in de in paragraaf 3.5 besproken meetseries. De meetresultaten van alle uitgevoerde metingen zijn opgenomen in Appendix Meetresultaten. In dit hoofdstuk worden de meetresultaten van de verschillende metingen per meetserie geanalyseerd.

### 4.1 Analyse verloop poriesnelheden over dikte filterlaag

Om de verschillende snelheidsmetingen met elkaar te vergelijken zijn ensemblemiddelingen uitgevoerd, waarbij we middelen over een ensemble van gemeten poriesnelheden in dezelfde fasepunten binnen de golfperiode (zie paragraaf 3.4.2). In figuur 4.1 is het verloop van de horizontale orbitaalsnelheid, 2cm boven de filterlaag, en van de horizontale en verticale poriesnelheid,  $3 \cdot D_{n50}$  in de filterlaag, binnen de gemiddelde golfperiode van één van de uitgevoerde metingen



Figuur 4.1: Ensemblemiddeling snelheidsmetingen, meetserie 1

weergegeven. Alle uitgevoerde metingen geven een soortgelijk beeld (zie Appendix Meetresultaten): in de horizontale orbitaal- en poriesnelheid is de gemiddelde golfperiode duidelijk te herkennen, de verticale poriesnelheid geeft een warrig beeld. De tijdens dit onderzoek gemeten maximale horizontale orbitaalsnelheden, 2 cm boven de filterlaag, komen net als bij het onderzoek van Halter (1999) redelijk overeen met de volgens de lineaire golftheorie (vergelijking 2.5) berekende waarden (zie tabel 4.1). Per positie in de filterlaag zijn voor ieder belastingsgeval drie metingen uitgevoerd. De waarden in tabel 4.1 voor dit onderzoek zijn respectievelijk de onder- en bovengrens voor de maximale, ensemblegemiddelde, horizontale orbitaalsnelheden, zoals deze per belastingsgeval zijn gemeten tijdens verschillende experimenten. Voor deze orbitaalsnelheden gebruiken we de volgende notatie:  $\hat{u}_b$ . Ook voor de maximale horizontale- en verticale poriesnelheden zijn dergelijke boven- en ondergrenzen bepaald, namelijk de maximale ensemblegemiddelde

maximale horizontale orbitaalsnelheid [m/s]	gemeten		berekend met lineaire golftheorie
	Halter (1999)	dit onderzoek	
Belastingsgeval A H=16,7 cm, T=1,03 s	0,16	0,18 - 0,23	0,22
Belastingsgeval B H=8.9 cm, T=1,33 s	0,14	0,13 - 0,16	0,16
Belastingsgeval C H=8,8 cm, T=1,90 s	0,17	0,16 - 0,21	0,19
Belastingsgeval D H=7,9 cm, T=2,41 s	0,19	0,16 - 0,21	0,18

Tabel 4.1: Maximale horizontale orbitaalsnelheid, meetserie 1

Belastingsgeval A H=16,7 cm, T=1,03 s	$\hat{u}_p$ [m/s]	$u_p'$ [m/s]	$\hat{w}_p$ [m/s]	$w_p'$ [m/s]
1*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.06-0.08	0.04-0.05	0.03-0.04	0.02-0.03
2*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04-0.06	0.04	0.04-0.05	0.02-0.03
3*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04-0.05	0.03-0.04	0.02-0.03	0.02-0.03
4*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.06-0.07	0.03-0.04	0.02-0.03	0.02-0.03
5*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.05-0.06	0.03-0.05	0.02-0.03	0.02

Tabel 4.2: Poriesnelheden belastinggeval A, meetserie 1

Belastingsgeval B H=8.9 cm, T=1,33 s	$\hat{u}_p$ [m/s]	$u_p'$ [m/s]	$\hat{w}_p$ [m/s]	$w_p'$ [m/s]
1*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04-0.05	0.03-0.04	0.02-0.03	0.02
2*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.03-0.05	0.03-0.04	0.02-0.03	0.02
3*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.03-0.04	0.02-0.03	0.01-0.02	0.02
4*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.05	0.03	0.02	0.02
5*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04-0.05	0.02-0.04	0.02	0.02

Tabel 4.3: Poriesnelheden belastinggeval B, meetserie 1

Belastingsgeval C H=8,8 cm, T=1,90 s	$\hat{u}_p$ [m/s]	$u_p'$ [m/s]	$\hat{w}_p$ [m/s]	$w_p'$ [m/s]
1*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.05-0.06	0.04	0.02	0.02
2*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04	0.03-0.04	0.02-0.03	0.02-0.03
3*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.03-0.04	0.02-0.04	0.01-0.02	0.02
4*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04-0.05	0.02-0.04	0.02	0.02
5*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.05-0.06	0.03-0.05	0.02-0.03	0.02

Tabel 4.4: Poriesnelheden belastinggeval C, meetserie 1

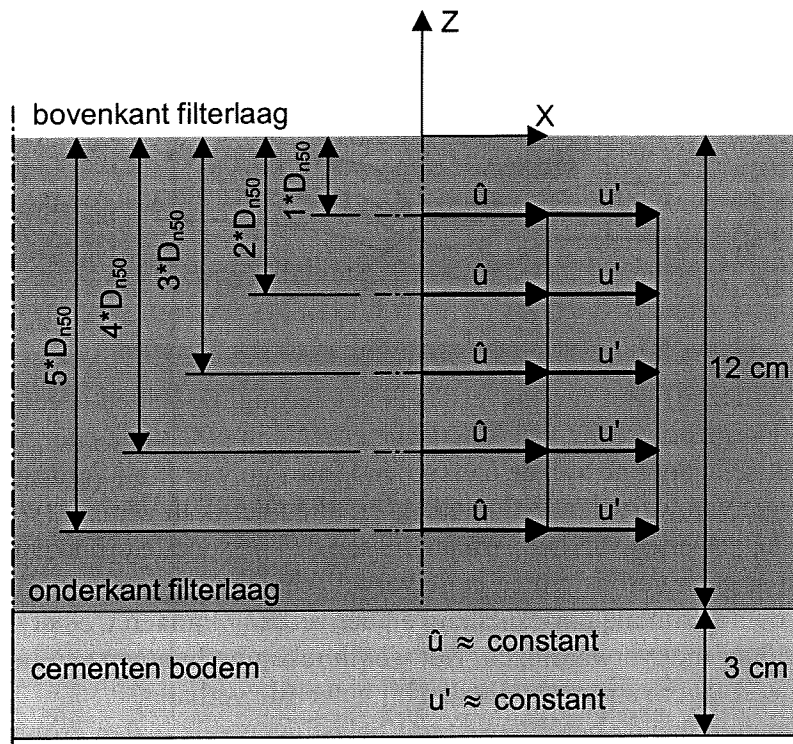
Belastingsgeval D H=7,9 cm, T=2,41 s	$\hat{u}_p$ [m/s]	$u_p'$ [m/s]	$\hat{w}_p$ [m/s]	$w_p'$ [m/s]
1*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04-0.05	0.03-0.04	0.02-0.03	0.02
2*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04	0.03	0.02-0.03	0.02-0.03
3*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.03	0.02-0.03	0.01-0.02	0.01-0.02
4*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04	0.03	0.01-0.02	0.02
5*D <sub>n50</sub> in filterlaag	0.04-0.05	0.02-0.03	0.02	0.01-0.02

Tabel 4.5: Poriesnelheden belastinggeval D, meetserie 1



waarden (notatie respectievelijk  $\hat{u}_p$  en  $\hat{w}_p$ ) en de maximale r.m.s.-waarden (notatie respectievelijk  $u_p'$  en  $w_p'$ ). De resultaten zijn per belastingsgeval weergegeven in tabel 4.2 t/m 4.5.

Als we de resultaten in de verschillende tabellen bekijken, dan zien we dat de waarden voor zowel de horizontale als de verticale poriesnelheid over de dikte van de filterlaag bij ieder belastingsgeval nagenoeg constant blijven. Dit komt overeen met de door Van Os (1998) gevonden resultaten. Uit de resultaten van de snelheidsmetingen van Van Os bleek dat bij stroming boven het filter na een diepte van 1,5 maal de korreldiameter van het filtermateriaal in de filterlaag het gemiddelde en de standaarddeviatie van de horizontale poriesnelheid niet verder afnamen. De opstelling lijkt niet erg gevoelig voor wijzigingen van de stenenstapeling rondom de meetporie: de bij de verschillende experimenten gemeten waarden zijn nagenoeg gelijk. Het resultaat is voor de horizontale poriesnelheid grafisch weergegeven in



Figuur 4.2: Verloop horizontale poriesnelheid over dikte filterlaag

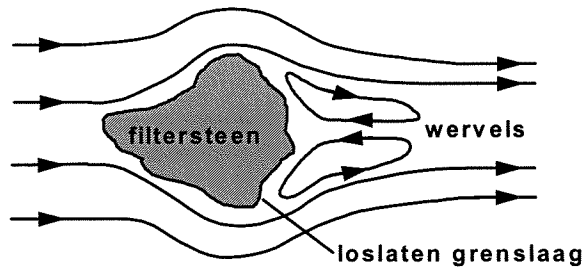
figuur 4.2. De waarden voor de poriesnelheden gemeten op  $4 * D_{n50}$  en  $5 * D_{n50}$  in de filterlaag zijn in alle gevallen iets hoger dan de daarboven gemeten waarden. Voor het meten op deze hoogten in de filterlaag moet over de gehele dikte van de filterlaag worden ontgraven om de geleidingsbuisjes te kunnen stellen. Omdat de geleidingsbuisjes daarna voorzichtig moeten worden begraven, zal de filterlaag hierna waarschijnlijk over de gehele dikte iets poreuzer zijn, hetgeen een grotere doorlatendheid tot gevolg zal hebben. Een grotere doorlatendheid zal bij eenzelfde golfbelasting hogere poriesnelheden tot gevolg hebben. De porositeit van de filterlaag in de opstelling is een moeilijk te controleren parameter in de opstelling. De horizontale orbitaalsnelheid wordt voornamelijk veroorzaakt door het verhang over de filterlaag (vergelijking 2.10). Het verband tussen de horizontale orbitaalsnelheid en het verhang, volgens de lineaire golftheorie wordt aangetoond in Bijlage D. Voor de verschillende belastingsgevallen zijn met de lineaire golftheorie de golfenlengte, de maximale orbitaalsnelheid en het maximale verhang net boven de

filterlaag berekend (zie tabel 4.6). De horizontale poriesnelheid ontstaat waarschijnlijk ook voornamelijk door het verhang over de filterlaag. De

golfbelasting	golfhoogte [cm]	golfperiode [s]	golflengte [m]	$\hat{u}_b$ [m/s]	verhang [-]
A	16,7	1,03	1,52	0,22	0,14
B	8,9	1,33	2,20	0,16	0,08
C	8,8	1,9	3,41	0,19	0,06
D	7,9	2,41	4,45	0,18	0,05

Tabel 4.6: Maximaal verhang net boven de filterlaag

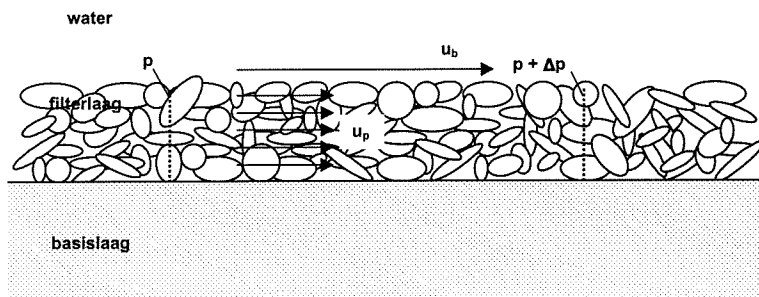
poriesnelheden zijn echter veel kleiner dan de orbitaalsnelheden net boven de filterlaag. Door het loslaten van de stroming aan de achterzijde van de filterstenen (zie figuur 4.3) vindt in het daarop aansluitende vertragsgebied energieverlies



Figuur 4.3: Loslaten van de grenslaag achter een filtersteen

plaats (Carnot-verliezen). Het energieverlies in het vertragsgebied is een gevolg van een niet volledige omzetting van kinetische energie in potentiële energie; een deel van de kinetische energie van de aankomende stroom wordt bij vertraging omgezet in energie van wervelende fluctuaties en uiteindelijk in warmte (via viscositeit). Bij het afleiden van het verband tussen de horizontale orbitaalsnelheid en het verhang zijn er geen verliestermen in de vergelijkingen meegenomen. Bij een verband tussen de horizontale poriesnelheid en het verhang kunnen we het energieverlies echter niet verwaarlozen. Het wel in rekening brengen van het energieverlies geeft lagere stroomsnelheden bij hetzelfde verhang.

Omdat de golflengten van de beschouwde golfbelastingen vele malen groter zijn dan de dikte van de filterlaag (12 cm), mogen we er vanuit gaan dat de druk over de dikte van de filterlaag constant zal zijn. Dit geeft een verklaring voor de constante horizontale poriesnelheid over de dikte van filterlaag, waarvan we aannemen dat deze wordt veroorzaakt door drukverschillen over de lengte van de filterlaag (zie figuur 4.4). Aangezien de druk over de dikte van de filterlaag constant wordt



Figuur 4.4: Stroomsnelheden door drukverschillen over lengte filterlaag

verondersteld, zullen de verticale poriesnelheden waarschijnlijk voornamelijk door de poriegeometrie veroorzaakt worden.

We zijn ook geïnteresseerd in de overeenkomst in grootte van de gemeten poriesnelheden, bij de verschillende kritieke golfbelastingen. Bij al deze golfbelastingen treedt begin van bewegen van hetzelfde basismateriaal op, waardoor het aannemelijk is dat ze ongeveer even groot zijn. De gemeten poriesnelheden veroorzaakt door de golfbelastingen B, C en D zijn ongeveer van dezelfde grootte, de gemeten poriesnelheden veroorzaakt door golfbelasting A zijn iets hoger. De drukgradiënten over de filterlaag veroorzaken versnellingen en daarmee ook snelheden in de poriën van de filterlaag. We maken een voorspelling van het globale gedrag van de gemiddelde horizontale poriesnelheid op grond van het verhang en de golfperiode met volgende relatie:

$$\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial p}{\partial x} \cdot T \propto \hat{u}_p \quad (4.1)$$

Om de berekende snelheden met de gemeten snelheden te kunnen vergelijken wordt het linkerlid van relatie 4.1 wordt met een factor worden vermenigvuldigd. De resultaten zijn weergegeven tabel 4.7. De berekende snelheden zijn van dezelfde

golfbelasting	i*T	factor	$\hat{u}_{p, \text{berekend}}$	$\hat{u}_{p, \text{gemeten}}$
A	0.144	0.4	0.058	0.04-0.08
B	0.106	0.4	0.042	0.03-0.05
C	0.114	0.4	0.046	0.03-0.06
D	0.121	0.4	0.048	0.03-0.05

Tabel 4.7: Voorspelling van het globale gedrag van de gemiddelde horizontale poriesnelheid

orde als de gemeten snelheden. De berekende poriesnelheden bij de golfbelastingen B, C en D zijn ongeveer van dezelfde grootte; de berekende poriesnelheid bij golfbelasting A is iets hoger. Om te onderzoeken of de gemeten poriesnelheden groot genoeg zijn om de benodigde krachten voor het begin van bewegen van een korrel in de basislaag te genereren is in Bijlage E de daarvoor benodigde stroomsnelheid geschat:  $u \geq 0,05$  m/s. Uit de tabellen 4.2 t/m 4.5 is op te maken dat de maximale ensemblegemiddelde waarde van de horizontale poriesnelheid,  $\hat{u}_p$ , de benodigde stroomsnelheid niet altijd overschrijdt. In de praktijk wordt echter vaak, in een situatie met stroming boven stenen, de volgende vuistregel gebruikt voor het schatten van de optredende stroomsnelheid:

$$u = \bar{u} + \alpha \sqrt{(u')^2} \quad (4.2)$$

Hierin is:

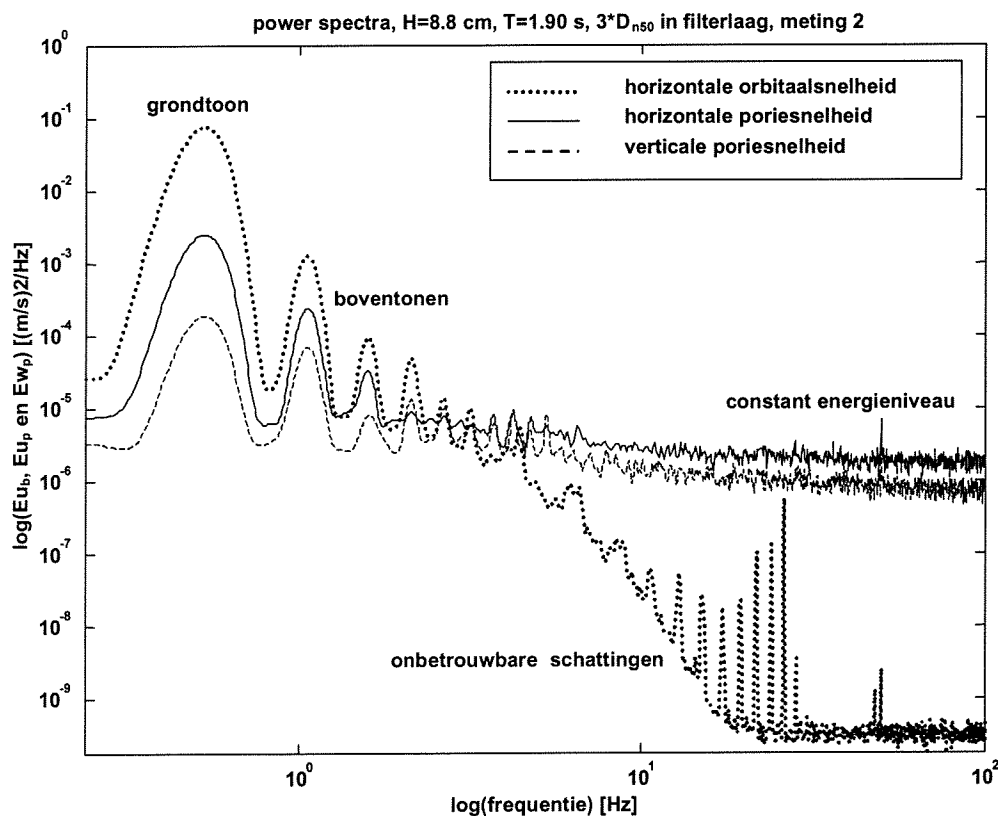
- u de optredende stroomsnelheid
- $\bar{u}$  de (tijd)gemiddelde stroomsnelheid
- $\sqrt{(u')^2}$  de r.m.s.-waarde van de stroomsnelheid
- $\alpha$  een constante, b.v. 3

Bij gebruik van vergelijking 4.2, waarin we de maximale ensemblegemiddelde waarden van de horizontale poriesnelheid,  $\hat{u}_p$ , en de maximale r.m.s.-waarden,  $u_p'$ , uit de tabellen 4.2 t/m 4.5 invullen, blijkt dat alle onderzochte kritieke golfbelastingen in staat zijn het basismateriaal in beweging te brengen.

Golfbelasting A veroorzaakt echter iets hogere stroomsnelheden in de meetporie, waardoor het basismateriaal eerder in beweging zal worden gebracht dan bij de overige golfbelastingen. In figuur 3.14 zagen we dat er onder invloed van een

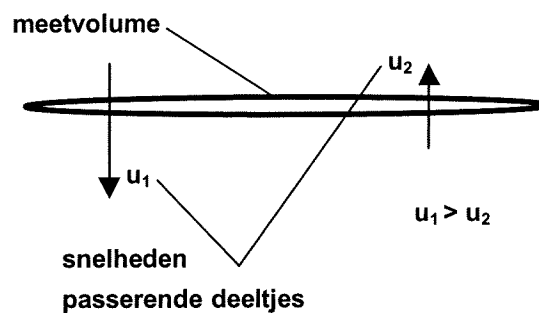
golfbelasting slechts in bepaalde fasegebieden binnen de golfperiode beweging van basismateriaal mogelijk is. De golfperiode van golfbelasting A is het kleinst van alle golfbelastingen; hierdoor is ook de lengte van dit fasegebied kleiner. De basislaag wordt dan korter, maar heviger belast, hetgeen hetzelfde effect zou kunnen hebben als een langere, minder hevige belasting.

We zouden ons echter af kunnen vragen of golfbelasting A daadwerkelijk in het rijtje van kritieke golfbelastingen thuishoort. De door Halter (1999) gemeten maximale horizontale orbitaalsnelheid is in dit geval ongeveer  $4/5$  berekende orbitaalsnelheid (zie tabel 4.1). De bij dit onderzoek gemeten horizontale orbitaalsnelheden komen echter goed overeen met de berekende waarde. Het lijkt erop dat Halter(1999) een fout heeft gemaakt;  $4/5$  de berekende poriesnelheid =  $4/5 \cdot 0.058 = 0.046$  m/s, hetgeen goed overeenkomt met de overige berekende poriesnelheden in tabel 4.7. In figuur 4.5 zijn powerspectra van de horizontale orbitaalsnelheid, 2cm boven de filterlaag, en de horizontale en verticale poriesnelheid,  $3 \cdot D_{n50}$  in de filterlaag, voor één van de uitgevoerde metingen weergegeven. Alle uitgevoerde metingen geven een soortgelijk beeld, namelijk een grote piek ter plaatse van de *grondfrequentie* (of grondtoon), welke gelijk is aan de frequentie van de gebruikte golfbelasting en een aantal kleinere, afnemende pieken, *de harmonischen* (of boventonen), welke worden veroorzaakt door niet-lineaire effecten (o.a. translerende beweging golfschot, invloed gootbodem). Aan de hand van de gemeten poriesnelheden en de afmetingen van de meetporie kunnen we schattingen maken van de frequenties van eventuele structuren in de meetporie. Ter plaatse van deze frequenties zouden we pieken kunnen verwachten in de powerspectra van de poriesnelheden. Als we voor de



Figuur 4.5: Powerspectra, meetserie 1

poriesnelheden 0,02 tot 0,08 m/s en voor de afmetingen van de meetporie 0,5 tot 2 cm aanhouden, dan geeft dit een schatting voor de te verwachten frequenties in de meetporie van 1 tot 16 Hz. In het frequentiegebied tussen 1 en 10 Hz zijn pieken in de powerspectra van de poriesnelheden te vinden, maar dit zijn waarschijnlijk boventonen. Het energieniveau voor frequenties  $> 10$  Hz van de powerspectra van de horizontale en verticale poriesnelheid lijkt constant (wit spectrum, mogelijk apparaatruis), terwijl het eigenlijk af zou moeten nemen (rood spectrum). Een mogelijke oorzaak hiervan kan zijn dat er bij deze meetserie geen analoog lowpass-filter tussen de meetapparatuur en de A/D-converter geplaatst is. De energie die aanwezig is voor frequenties  $>$  Nyquist frequentie wordt dan “teruggevouwen”, waardoor het energieniveau hoger lijkt dan het in werkelijkheid is.



**Figuur 4.6:** Deeltjes met verschillende snelheden passeren het meetvolume

Een andere mogelijke oorzaak kan liggen in de lengte van het meetvolume. Het meetvolume is bijna net zo lang als de meetporie breed is. De stroomsnelheid wordt bepaald door middeling van de deeltjessnelheden over het meetvolume. Middeling over grote meetvolumina kan gemeten fluctuaties ernstig onderdrukken. Het kan dan voorkomen dat deeltjes die met verschillende snelheden op verschillende plaatsen het meetvolume passeren het gemeten snelheidssignaal beïnvloeden (zie figuur 4.6). Dit geeft (ook) ruis, waardoor de frequenties van eventuele aanwezige wervelstructuren in de porie (b.v. loslaatwervels), in powerspectra van het gemeten signaal niet van elkaar te onderscheiden zijn.

Het powerspectrum van de horizontale orbitaalsnelheid 2 cm boven het bed geeft alleen informatie over de lagere frequenties. De horizontale orbitaalsnelheid is gemeten met een EMS, die tot 5 Hz nauwkeurig kan meten. Hierdoor zakt het spectrum bij ca. 5 Hz plotseling in. De schattingen van de aanwezige energie voor frequenties  $> 5$  Hz zijn hierdoor niet betrouwbaar.

De resultaten van *meetserie 1* samenvattend kan gesteld worden:

- Zowel het verloop van de horizontale als de verticale poriesnelheid is nagenoeg constant over de dikte van de filterlaag.
- De opstelling lijkt niet erg gevoelig voor wijzigingen van de stenenstapeling rondom de meetporie; bij verschillende experimenten zijn de op dezelfde positie in de filterlaag gemeten waarden nagenoeg gelijk.
- De door de verschillende kritieke belastingsgevallen, voor het begin van bewegen, veroorzaakte poriesnelheden zijn alle ongeveer van dezelfde grootte en groot genoeg om het basismateriaal in beweging te brengen. Aan de juistheid van golfbelasting A wordt getwijfeld.
- Het constante energieniveau bij de hogere frequenties in de powerspectra van de horizontale en verticale poriesnelheid wordt waarschijnlijk veroorzaakt door ruis.

## 4.2 Analyse effect verhogen bemonsteringsfrequentie

Er zijn in totaal drie metingen uitgevoerd waarbij de bemonsteringsfrequentie op respectievelijk 200, 400 en 800 Hz werd ingesteld. Om de verschillende snelheidsmetingen met elkaar te vergelijken zijn ook hier ensemblemiddelingen uitgevoerd, waarbij we middelen over een ensemble van gemeten poriesnelheden in dezelfde fasepunten binnen de golfperiode. Voor deze ensemblemiddelingen zijn, van de horizontale poriesnelheid, maxima bepaald voor de gemiddelde waarden,  $\hat{u}_p$ , en de r.m.s.-waarden,  $u_p'$ , welke worden weergegeven in tabel 4.8. We zien hier dat de gemiddelde waarde voor alle gevallen gelijk is, maar de r.m.s.-waarde een geringe stijging vertoont. Voor we de resultaten van deze meetserie gaan vergelijken met de resultaten van *meetserie 1* moeten we opmerken dat:

- Tijdens deze meetserie alleen belastingsgeval C,  $3 \cdot D_{n50}$  in de filterlaag is onderzocht en er wel een analoge lowpass-filter is gebruikt.
- Tijdens *meetserie 1* is de meetporie iedere keer met een gemarkeerd steentje afgedekt, waardoor de meetporie minder toegankelijk was voor de waterdeeltjes dan tijdens deze meetserie.

De gemiddelde waarden zijn echter wel ongeveer twee keer zo groot als de tijdens *meetserie 1* op dezelfde positie gemeten waarde. Dit komt waarschijnlijk doordat de meetporie tijdens deze meetserie toegankelijker was voor de waterdeeltjes. De r.m.s.-waarden zijn echter wel ongeveer gelijk aan de tijdens *meetserie 1* gemeten waarden.

Belastingsgeval C H=8,8 cm, T=1,90 s $3 \cdot D_{n50}$ in filterlaag	$\hat{u}_p$ [m/s]	$u_p'$ [m/s]
Bemonsteringsfrequentie 200 Hz	0,07	0,030
Bemonsteringsfrequentie 400 Hz	0,07	0,035
Bemonsteringsfrequentie 800 Hz	0,07	0,041

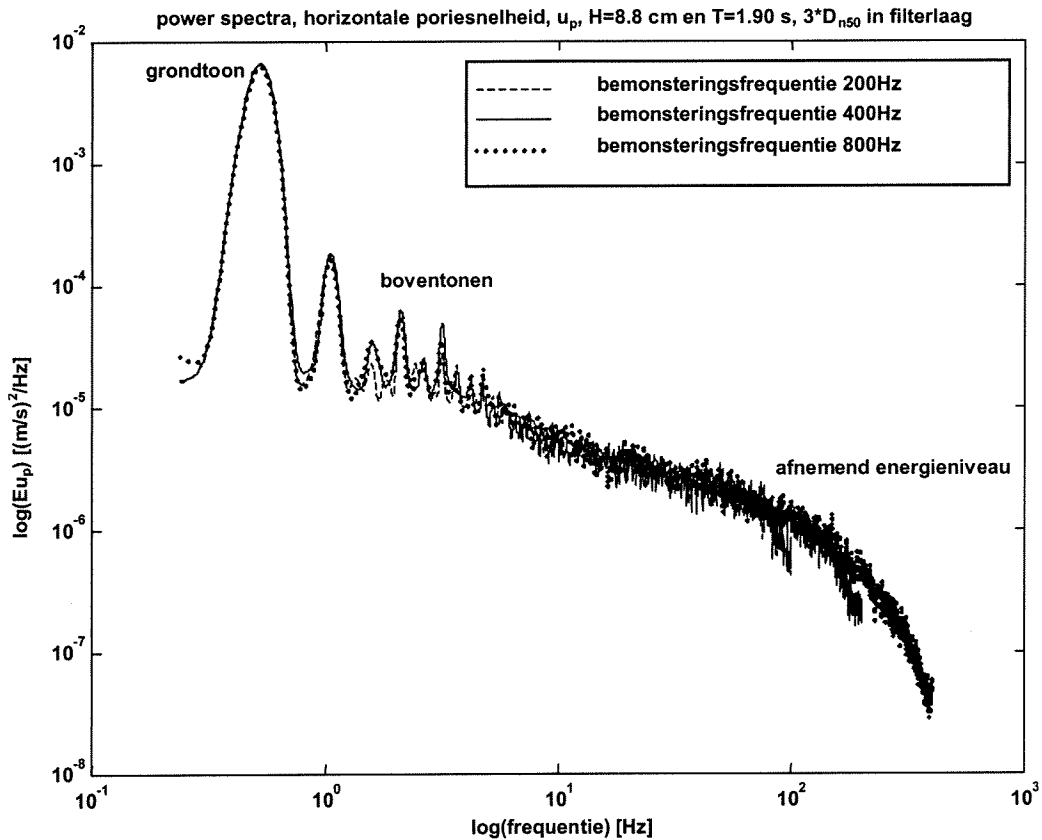
Tabel 4.8: Poriesnelheden belastingsgeval C, meetserie 2

In figuur 4.7 zijn powerspectra getekend voor de horizontale poriesnelheid, gemeten op dezelfde positie, maar met verschillende bemonsteringsfrequenties. Als we het powerspectrum van de horizontale poriesnelheid, gemeten met een bemonsteringsfrequentie van 200 Hz, in figuur 4.7 vergelijken met het powerspectrum van de horizontale poriesnelheid in figuur 4.5, dan valt het volgende op:

- De grondtoon bevat in het powerspectrum in figuur 4.7 meer energie dan in het powerspectrum in figuur 4.5. Dit valt te verklaren door de hogere gemeten gemiddelde snelheden (vergelijk tabellen 4.4 en 4.8), die ongeveer de gemiddelde golfperiode volgen.
- In tegenstelling tot het constante energieniveau voor frequenties  $> 10$  Hz in figuur 4.5, neemt het energieniveau in figuur 4.7 af. Dit is het gevolg van het toepassen van het analoge lowpass-filter, waardoor de energie die aanwezig is voor frequenties  $>$  Nyquist-frequentie niet meer wordt “teruggevouwen”. Ondanks dat vertonen de hogere frequenties nog steeds een warrig beeld, hetgeen nog zou kunnen worden veroorzaakt door het grote meetvolume.

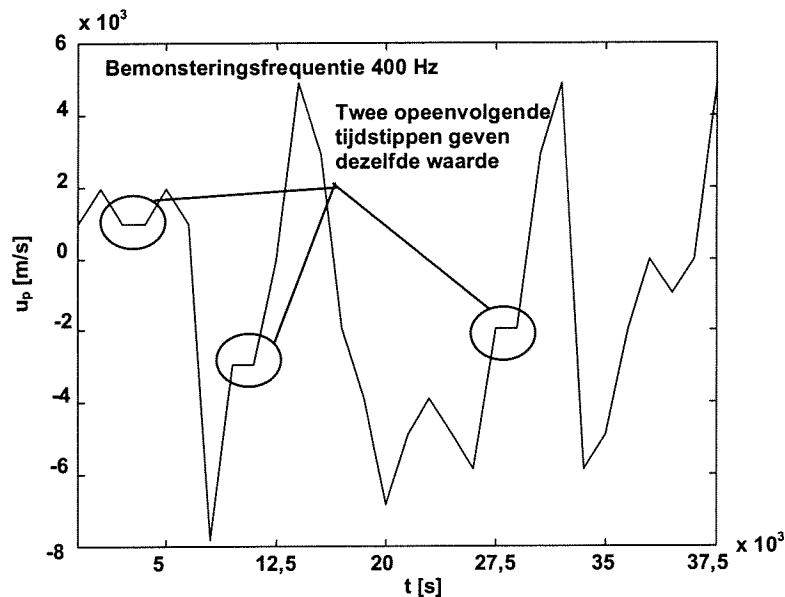
De spectra van de metingen met verschillende bemonsteringsfrequenties vallen, zoals te verwachten, goed over elkaar heen.

De geringe stijging van de r.m.s.-waarde wordt waarschijnlijk veroorzaakt door ruis. De met de LDFM op een tijdstip  $t$  gemeten stroomsnelheid is de gemiddelde snelheid van de waterdeeltjes, die op dat tijdstip het meetvolume passeren. Bij een hoge



Figuur 4.7: Powerspectra horizontale poriesnelheid, meetserie 2

bemonsteringsfrequentie is het mogelijk dat een waterdeeltje na een tijdstap,  $\Delta t$ , het meetvolume nog niet gepasseerd is, waardoor op twee of meer opeenvolgende tijdstippen dezelfde waarde wordt gemeten of dat nog geen nieuw deeltje is gepasseerd, waardoor het meetapparaat de laatst gemeten waarde vasthoudt, totdat een nieuw deeltje is gepasseerd (*sample & hold* principe). We noemen dit verschijnsel *discretisatieruis* (zie figuur 4.8).



Figuur 4.8: Discretisatieruis

Ondanks het toepassen van een analog lowpass-filter, geven de spectra in figuur 4.7

ook geen aanwijzingen dat er in de meetporie eventueel significante wervelstructuren aanwezig zijn.

De resultaten van *meetserie 2* samenvattend kan gesteld worden:

- Door het toepassen van een analoog lowpass-filter neemt het energieniveau af voor frequenties  $> 10$  Hz (rood spectrum).
- Het verhogen van de bemonsteringsfrequentie gaat gepaard met een geringe verhoging van de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid, hetgeen waarschijnlijk wordt veroorzaakt door discretisatieruis.
- De gemiddelde waarde van de horizontale poriesnelheid lijkt sterk afhankelijk van de toegankelijkheid van de meetporie, de r.m.s.-waarde lijkt hier veel minder afhankelijk van te zijn.
- Er zijn wederom geen aanwijzingen gevonden van eventueel in de meetporie aanwezige significante wervelstructuren.

### 4.3 Analyse gevoeligheid voor verschillende oriëntaties meetporie

Er zijn in totaal vier metingen uitgevoerd, waarbij de meetporie respectievelijk  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  en  $270^\circ$  om de as van de geleidingsbuisjes is gerooteerd, zodat de oriëntatie van de meetporie in de filterlaag bij iedere meting verschillend is. Om de verschillende snelheidsmetingen met elkaar te vergelijken zijn ook hier ensemblemiddelingen uitgevoerd, waarbij we middelen over een ensemble van gemeten poriesnelheden in dezelfde fasepunten binnen de golfperiode. Van deze ensemblemiddelingen zijn maxima bepaald voor de gemiddelde waarden,  $\hat{u}_p$  en  $\hat{w}_p$ , en voor de r.m.s.-waarden,  $u_p'$  en  $w_p'$ , welke zijn weergegeven in tabel 4.9. Bij een rotatie van de meetporie van  $90^\circ$  en  $270^\circ$  zijn de maximale waarden voor de gemiddelde, horizontale poriesnelheid het hoogst. In deze positie is de toegankelijkheid van de meetporie in de x-richting namelijk het grootst, waardoor de waterdeeltjes gemakkelijker door de meetporie kunnen stromen. De bij een rotatie van de meetporie van  $0^\circ$  gemeten waarden, voor zowel de horizontale als de verticale poriesnelheid, zijn zoals te verwachten ongeveer gelijk aan de waarden zoals die zijn gemeten tijdens *meetserie 2*, omdat de oriëntatie van de meetporie in beide gevallen hetzelfde is. De afwijkende waarde bij een rotatie van de meetporie van  $180^\circ$  wordt ook verklaard door de mate van toegankelijkheid van de meetporie. De maximale r.m.s.-waarden van de horizontale poriesnelheid zijn alle weer ongeveer even groot als bij voorgaande meetseries. De variatie in de waarden van de verticale poriesnelheden wordt hier ook verklaard door de mate van toegankelijkheid van de meetporie.

Belastingsgeval C H=8,8 cm, T=1,90 s	$\hat{u}_p$ [m/s]	$u_p'$ [m/s]	$\hat{w}_p$ [m/s]	$w_p'$ [m/s]
Rotatie : $0^\circ$	0,07	0,04	0,02	0,04
Rotatie : $90^\circ$	0,09	0,04	0,01	0,02
Rotatie : $180^\circ$	0,04	0,03	0,03	0,02
Rotatie : $270^\circ$	0,09	0,03	0,02	0,02

Tabel 4.9: Poriesnelheden belastinggeval C, meetserie 3

De resultaten van *meetserie 3* samenvattend kan gesteld worden:

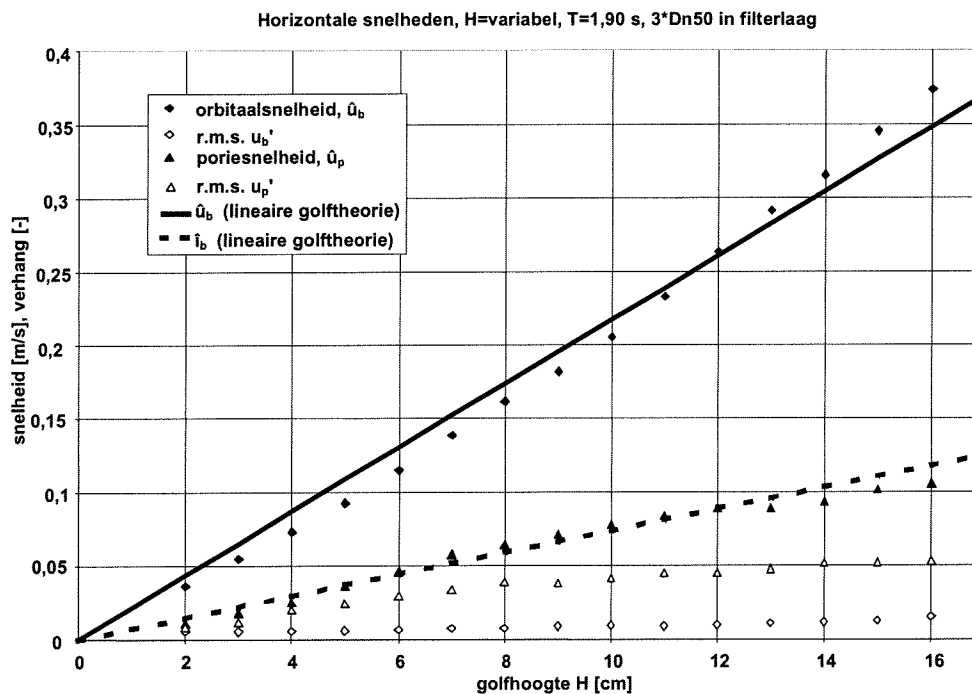
- De gemiddelde waarde van de horizontale poriesnelheid lijkt sterk afhankelijk van de toegankelijkheid van de meetporie, de r.m.s.-waarde lijkt hier niet afhankelijk van te zijn.



- De variatie in de waarden van de verticale poriesnelheden wordt hier ook verklaard door de mate van toegankelijkheid van de meetporie.

#### 4.4 Analyse variabele golfhoogte

Om de verschillende snelheidsmetingen met elkaar te vergelijken zijn wederom ensemblemiddelingen uitgevoerd. Van deze ensemblemiddelingen zijn de maxima bepaald voor de gemiddelde waarden van de horizontale snelheden,  $\hat{u}_b$  en  $\hat{u}_p$ , en voor hun r.m.s.-waarden,  $u_b'$  en  $u_p'$ , welke zijn uitgezet tegen de golfhoogte in figuur 4.9. Een toenemende golfhoogte heeft een stijging van de meetwaarden van zowel de gemiddelde orbitaal- als van de poriesnelheid tot gevolg. In deze figuur is ook de met de lineaire golftheorie berekende orbitaalsnelheid uitgezet tegen de golfhoogte. De berekende orbitaalsnelheid komt redelijk goed overeen met de gemiddelde waarde van de gemeten orbitaalsnelheden. Omdat de horizontale orbitaal- en de poriesnelheid voornamelijk worden veroorzaakt door het verhang over de filterlaag, is ook het met de lineaire golftheorie berekende, maximale verhang net boven de filterlaag (vergelijking 2.12), in figuur 4.9 tegen de golfhoogte uitgezet. Het verband tussen de golfhoogte en het verhang is lineair, hetgeen ook direct uit vergelijking 2.12 valt op te maken. Opvallend is de wijze waarop het berekende verhang in figuur

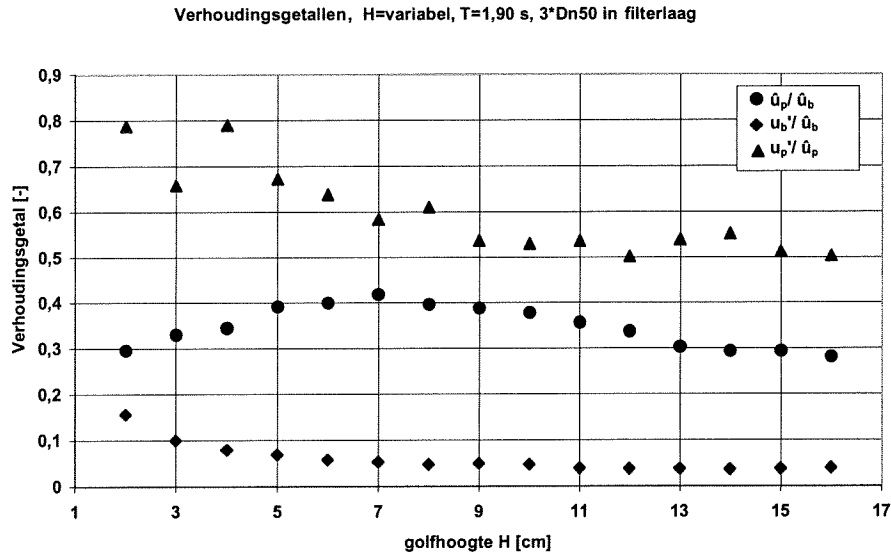


Figuur 4.9: Variabele golfhoogte, constante golfperiode

4.9 de gemeten poriesnelheden benadert. De resultaten van *meetserie 3* geven echter aanwijzingen dat de gemiddelde poriesnelheid sterk afhankelijk is van de oriëntatie van de meetporie, waardoor het in dit geval waarschijnlijk slechts toeval is.

Een toenemende golfhoogte heeft ook een stijging van de r.m.s.-waarden van zowel de orbitaal- als van de poriesnelheid tot gevolg. Voor lage golfhoogten zijn het gemiddelde en de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid ongeveer even groot.

Om het verband tussen de gemiddelde orbitaal- en poriesnelheid te onderzoeken is in figuur 4.10 de verhouding tussen de poriesnelheid en de orbitaalsnelheid weergegeven ( $\hat{u}_p/\hat{u}_b$ ). De variatie van de verhoudingsgetallen van de gemeten



Figuur 4.10: Verhoudingsgetallen variabele golfhoogte

waarden is zo gering, dat deze verhouding theoretisch een constante waarde zou kunnen zijn. Door variatie van de gemiddelde poriesnelheid bij verschillende oriëntaties van de meetporie (*meetserie 3*) kan de grootte van het verhoudingsgetal,  $\hat{u}_p' / \hat{u}_b$ , echter toch sterk variëren, waardoor de verhoudingsgetallen alleen geldig zijn voor de onderzochte situatie. In figuur 4.10 zijn ook de verhoudingen tussen de r.m.s.-waarde van de orbitaalsnelheid en de gemiddelde orbitaalsnelheid ( $u_b' / \hat{u}_b$ ) en de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid en de gemiddelde poriesnelheid ( $u_p' / \hat{u}_p$ ) zijn weergegeven. Het verhoudingsgetal tussen de orbitaalsnelheid en de r.m.s.-waarde ( $u_b' / \hat{u}_b$ ) is vanaf een golfhoogte van 6 cm nagenoeg constant. De orbitaalsnelheid is echter gemeten met een EMS die tot 10 Hz nauwkeurig kan meten, waardoor de betrouwbaarheid van de r.m.s.-waarde van de orbitaalsnelheid twijfelachtig is. Het verhoudingsgetal tussen de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid en de gemiddelde poriesnelheid ( $u_p' / \hat{u}_p$ ) vertoont een grote variatie, waardoor het niet erg bruikbaar lijkt voor bijvoorbeeld het berekenen van de grootte van de snelheidsfluctuaties uit de gemiddelde snelheid. Hiervoor kan overigens ook weer worden verwezen naar de resultaten van *meetserie 3*, waaruit bleek dat de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid niet erg afhankelijk van de orientatie van de meetporie is, maar de gemiddelde waarde van de poriesnelheid wel. Hierdoor zal dit verhoudingsgetal dus per situatie sterk kunnen variëren.

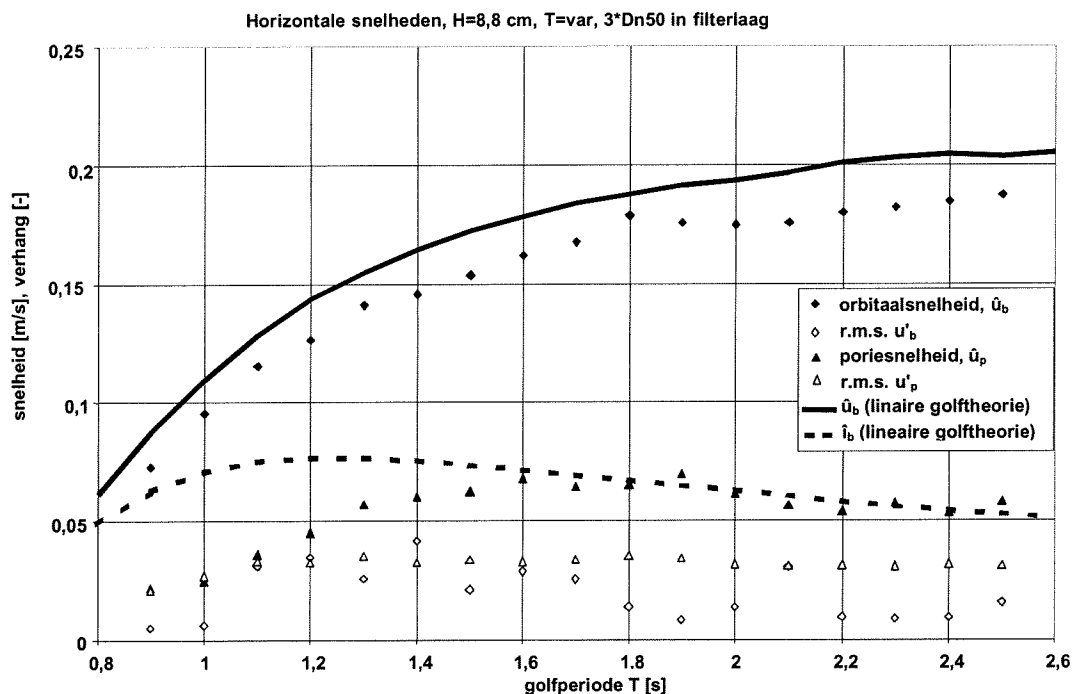
Het resultaat van *meetserie 4* samenvattend kan gesteld worden:

- De horizontale orbitaalsnelheden boven het bed zijn redelijk nauwkeurig te voorspellen met de lineaire golftheorie.
- Een toename van de golfhoogte heeft onder gelijke omstandigheden een stijging van de poriesnelheden tot gevolg.

#### 4.5 Analyse variabele golfperiode

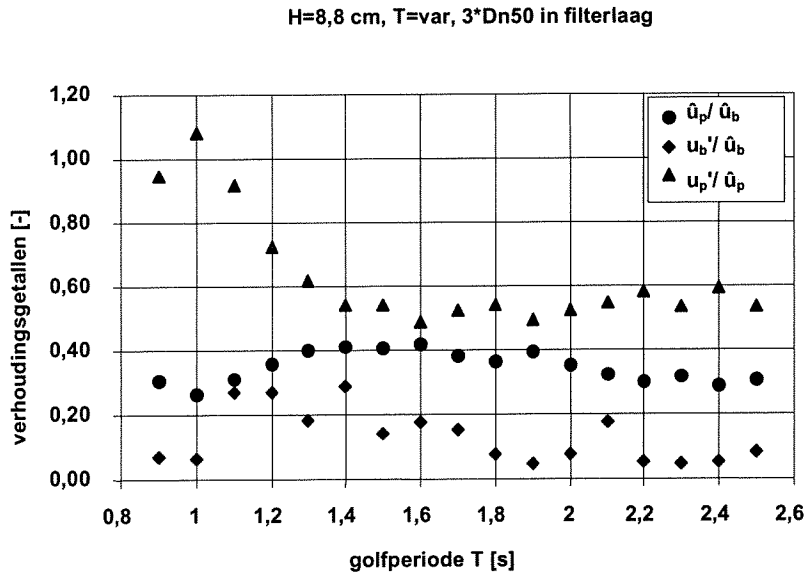
Om de verschillende snelheidsmetingen met elkaar te vergelijken zijn ook hier ensemblemiddelingen uitgevoerd. Van deze ensemblemiddelingen zijn de maxima bepaald voor de gemiddelde waarden van de horizontale snelheden,  $\hat{u}_b$  en  $\hat{u}_p$ , en voor hun r.m.s.-waarden,  $u_b'$  en  $u_p'$ , welke in figuur 4.11 zijn uitgezet tegen de golfperiode. Een toenemende golfperiode heeft een stijging van zowel de gemiddelde

orbitaal- als van de poriesnelheid tot gevolg. In deze figuur is ook de met de lineaire golftheorie berekende orbitaalsnelheid uitgezet tegen de golfperiode. De berekende orbitaalsnelheid komt redelijk overeen met de gemiddelde waarde van de gemeten orbitaalsnelheid. Het met de lineaire golftheorie berekende, maximale verhang net boven de filterlaag (vergelijking 2.12), is ook uitgezet tegen de golfperiode in figuur 4.11. Het verband tussen de golfperiode en het verhang is in vergelijking 2.12 verwerkt in het golfgetal, waardoor het gedrag niet eenvoudig voorspelbaar is. De r.m.s.-waarde van de orbitaalsnelheid geeft een erg warrig beeld, waarbij we weer kunnen opmerken dat de orbitaalsnelheid ook hier gemeten is met een EMS die tot 10 Hz nauwkeurig kan meten, waardoor de betrouwbaarheid van de r.m.s.-waarde twijfelachtig is. Opvallend is de geringe variatie van de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid bij toename van de golfperiode. De grootte van de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid lijkt hierdoor onafhankelijk van de golfperiode. In figuur 4.12 zijn, net als in figuur 4.10, de respectieve verhoudingen tussen de poriesnelheid en de orbitaalsnelheid ( $\hat{u}_p/\hat{u}_b$ ), de r.m.s.-waarde van de orbitaalsnelheid en de gemiddelde orbitaalsnelheid ( $u_b'/\hat{u}_b$ ) en de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid en de gemiddelde poriesnelheid ( $u_p'/\hat{u}_p$ ) weergegeven. De verhouding tussen de r.m.s.-waarde van de orbitaalsnelheid en de gemiddelde orbitaalsnelheid vertoont net



Figuur 4.11: Variabele golfperiode, constante golfhoogte

als de r.m.s.-waarde van de orbitaalsnelheid een warrig beeld. Opvallend is de overeenkomst in grootte van de verhoudingen van de poriesnelheid en de orbitaalsnelheid ( $\hat{u}_p/\hat{u}_b$ ) van deze meetserie en van *meetserie 4*. De variatie van de verhoudingsgetallen van de gemeten waarden is ook hier zo gering, dat deze theoretisch constant zouden kunnen zijn. De stenenstapeling en de oriëntatie van de meetporie waren bij beide meetseries identiek. In dezelfde situatie varieert het verhoudingsgetal ( $\hat{u}_p/\hat{u}_b$ ) dus bijna niet bij variatie van de golfhoogte of golfperiode. Verder opmerkingen bij figuur 4.10 ook op figuur 4.12 van toepassing.



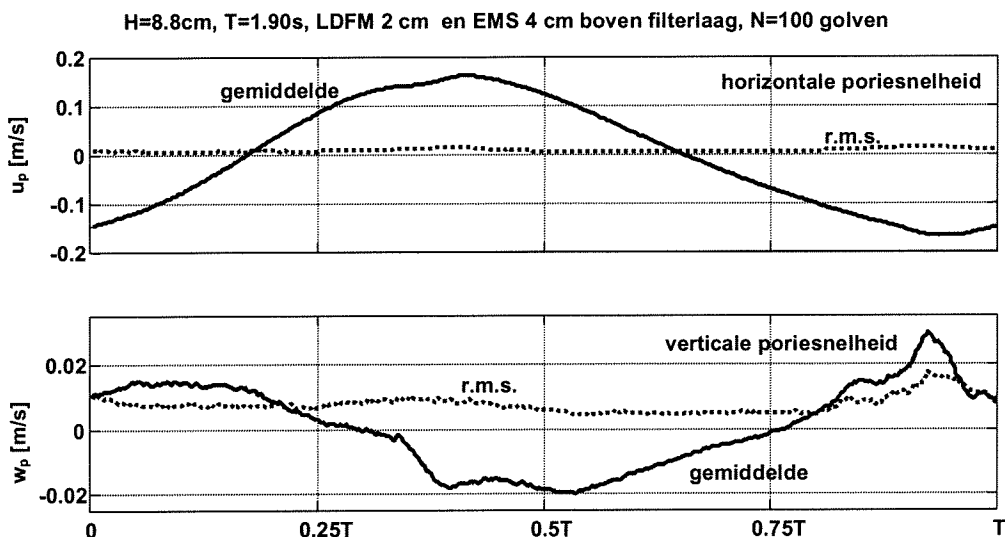
Figuur 4.12: Verhoudingsgetallen variabele golperiode

Het resultaat van *meetserie 5* samenvattend kan gesteld worden:

- De horizontale orbitaalsnelheden boven het bed zijn opnieuw redelijk nauwkeurig te voorspellen met de lineaire golftheorie.
- De grootte van de r.m.s.-waarde van de poriesnelheid lijkt onafhankelijk van de golperiode.
- Bij dezelfde stenenstapeling en dezelfde oriëntatie van de meetporie varieert het verhoudingsgetal ( $\hat{u}_p / \hat{u}_b$ ) bijna niet bij variatie van de golfhoogte of de golperiode.

#### 4.6 Analyse snelheidsmetingen boven filterlaag met LDFM

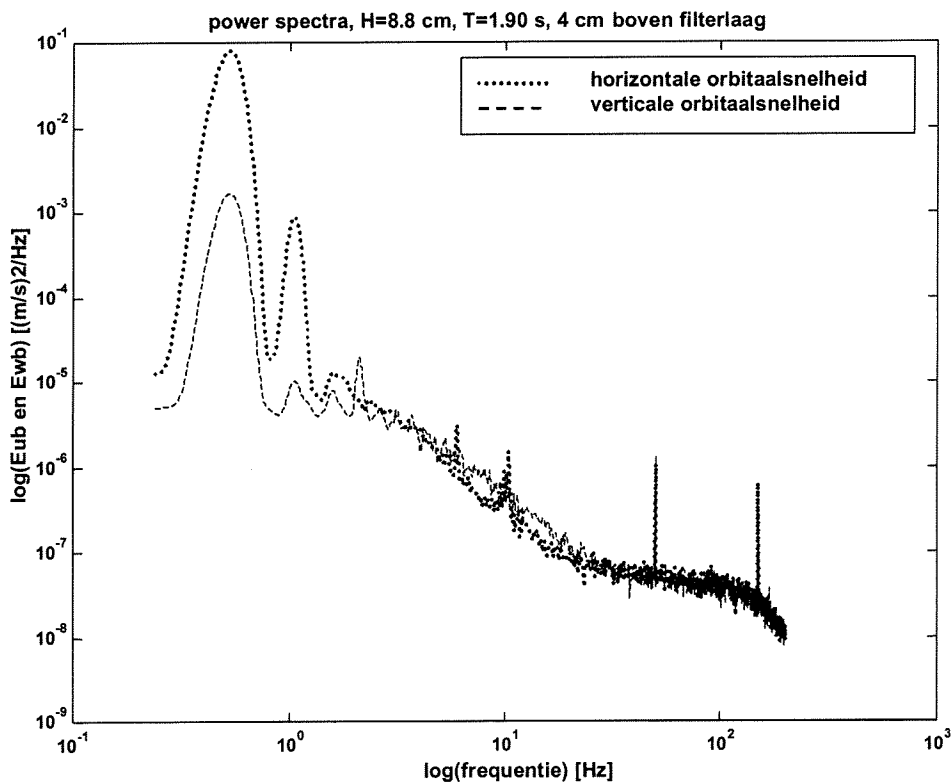
Er zijn op vier verschillende hoogten boven de filterlaag snelheidsmetingen met de LDFM uitgevoerd, namelijk op 2, 4, 6 en 8 cm boven de filterlaag. Om de verschillende snelheidsmetingen met elkaar te vergelijken zijn ook hier weer ensemblemiddelingen uitgevoerd. In figuur 4.13 is het verloop van de horizontale en de verticale orbitaalsnelheid, 2cm boven de filterlaag, binnen de gemiddelde golperiode weergegeven. Van de ensemblemiddelingen zijn de maxima bepaald voor de gemiddelde waarden,  $\hat{u}_b$  en  $\hat{w}_b$ , en de r.m.s.-waarden,  $u_b'$  en  $w_b'$ , welke zijn weergegeven in tabel 4.10. In deze tabel zijn ook de met de lineaire golftheorie berekende waarden voor de horizontale en verticale orbitaalsnelheden weergegeven. De berekende horizontale orbitaalsnelheid komt goed overeen met de gemiddelde waarde van de gemeten horizontale orbitaalsnelheid. De berekende waarden voor de verticale orbitaalsnelheid zijn echter aanzienlijk lager dan de gemeten waarden. Dit valt te verklaren uit het feit dat de lineaire golftheorie is afgeleid voor een vlakke, ondoorlatende bodem, hetgeen niet van toepassing is op de filterlaag. De fluctuaties van de orbitaalsnelheid worden waarschijnlijk veroorzaakt door de ruwheid van de filterlaag: hoe verder boven de filterlaag gemeten, des te lager de r.m.s.-waarde. De berekende horizontale orbitaalsnelheid komt goed overeen met de gemiddelde waarde van de gemeten horizontale orbitaalsnelheid. De berekende waarden voor de verticale orbitaalsnelheid zijn echter aanzienlijk lager dan de gemeten waarden. Dit valt te verklaren uit het feit dat de lineaire golftheorie is afgeleid voor een vlakke, ondoorlatende bodem, hetgeen niet van toepassing is op de



Figuur 4.13: Orbitaalsnelheden boven filterlaag

Belastingsgeval C	$\hat{u}_b$	$u_b'$	$\hat{u}_{b, \text{berekend}}$	$\hat{w}_b$	$w_b'$	$\hat{w}_{b, \text{berekend}}$
H=8,8 cm, T=1,90 s	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2 cm boven filterlaag	0,16	0,018	0,192	0,03	0,018	0,007
4 cm boven filterlaag	0,17	0,015	0,192	0,03	0,010	0,014
6 cm boven filterlaag	0,18	0,008	0,193	0,03	0,006	0,021
8 cm boven filterlaag	0,18	0,008	0,194	0,04	0,007	0,028

Tabel 4.10: Orbitaalsnelheden belastinggeval C, meetserie 6



Figuur 4.14: Powerspectra horizontale en verticale orbitaalsnelheden

filterlaag. De fluctuaties van de orbitaalsnelheid worden waarschijnlijk veroorzaakt door de ruwheid van de filterlaag: hoe verder boven de filterlaag gemeten, des te lager de r.m.s.-waarden.

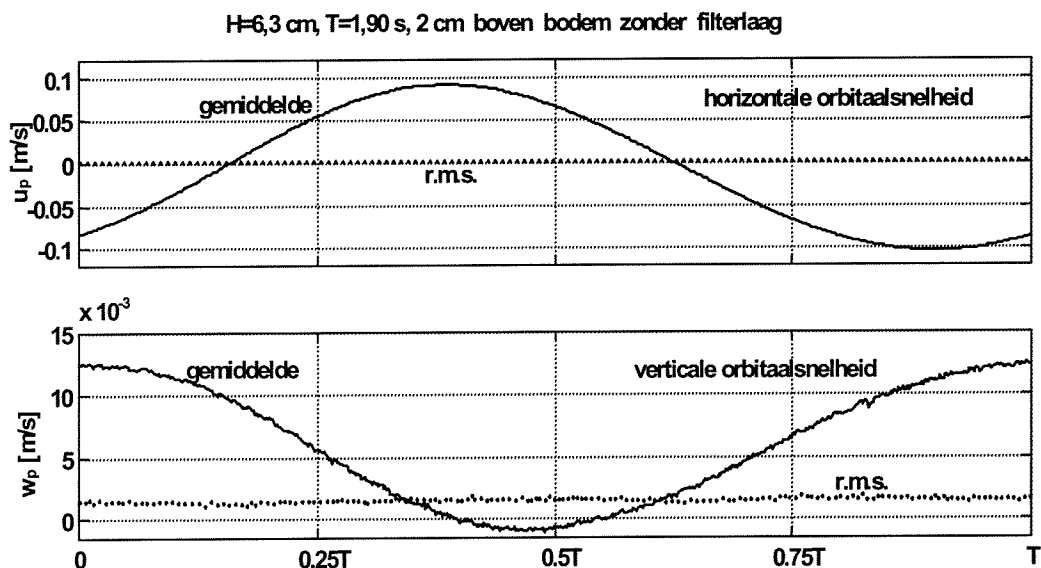
In figuur 4.14 zijn powerspectra van de horizontale en verticale orbitaalsnelheid, 4 cm boven de filterlaag, weergegeven. Het energieniveau bij de hogere frequenties is boven de filterlaag lager dan in de filterlaag.

De resultaten van *meetserie 6* samenvattend kan gesteld worden:

- De berekende horizontale orbitaalsnelheid komt wederom goed overeen met het gemiddelde van de gemeten horizontale orbitaalsnelheid.
- De berekende waarden voor de verticale orbitaalsnelheid zijn echter aanzienlijk lager dan de gemeten waarden.
- Hoe verder boven de filterlaag gemeten, des te lager de r.m.s.-waarde.
- Het energieniveau van de waterbeweging bij de hogere frequenties is boven de filterlaag lager dan in de filterlaag; Door de extra ruwheid van de filterlaag wordt de golfbeweging (lage frequenties) in de filterlaag meer gedempt dan daarboven en ontstaan tussen de filterstenen kleinschalige wervelstructuren (hogere frequenties). Hierbij vindt er overdracht van energie van de grote structuren (golfbeweging) naar de kleine wervelstructuren plaats.

#### 4.7 Analyse snelheidsmetingen zonder filterlaag met LDFM

Er zijn vier verschillende golfbelastingen onderzocht in de situatie zonder filterlaag. Om de verschillende snelheidsmetingen met elkaar te vergelijken zijn ook hier weer ensemblemiddelingen uitgevoerd. In figuur 4.15 is het verloop van de horizontale en de verticale orbitaalsnelheid, 2cm boven de bodem, binnen de gemiddelde



Figuur 4.15: Orbitaalsnelheden boven bodem zonder filterlaag

golfperiode van één van de uitgevoerde metingen weergegeven. Van deze ensemblemiddelingen zijn de maxima bepaald voor de gemiddelde waarden,  $\hat{u}_b$  en  $\hat{w}_b$ , en de r.m.s.-waarden,  $u_b'$  en  $w_b'$ , welke zijn weergegeven in tabel 4.11. In deze tabel zijn ook de met de lineaire golftheorie berekende waarden voor de horizontale en verticale orbitaalsnelheden weergegeven. De berekende waarden voor de horizontale orbitaalsnelheden komen redelijk goed overeen met de gemiddelde

waarde van de gemeten horizontale orbitaalsnelheden. De r.m.s.-waarde van de horizontale orbitaalsnelheid is klein, waarschijnlijk doordat boven een vlakke bodem is gemeten, i.p.v. boven een ruwe filterlaag, waardoor buiten de bodemgrenslaag wordt gemeten. Battjes (1997) geeft een eenvoudige orde-van-grootte schatting van de grenslaagdikte ( $\delta$ ) voor een oscillerende waterbeweging langs een vlakke bodem:

$$\delta = O(\nu/\omega)^{1/2} \quad (4.3)$$

Voor golven in water ( $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ), met golfperioden ( $T = 2\pi/\omega$ ) van 1,03 s tot 2,41 s, is  $(\nu/\omega)^{1/2}$  circa  $10^{-4} \text{ m}$ , dus er is inderdaad buiten de bodemgrenslaag gemeten. De berekende waarden voor de verticale orbitaalsnelheid zijn echter aanzienlijk lager dan de gemeten waarden. De r.m.s.-waarden zijn in vergelijking met die van de horizontale orbitaalsnelheid erg hoog. Het kan zijn dat de drempel, waarboven gemeten wordt, structuren opwekt die vooral de verticale snelheden beïnvloeden. De verschillende belastingsgevallen veroorzaken orbitaalsnelheden, die alle ongeveer even groot zijn. Dit was te verwachten, aangezien het hier, volgens Halter (1999), om kritieke belastingsgevallen gaat voor de situatie zonder filterlaag. De overeenkomst

maximale orbitaalsnelheid [m/s]	$\hat{u}_b$ [m/s]	$u_b'$ [m/s]	$\hat{u}_{b,\text{berekend}}$ [m/s]	$\hat{w}_b$ [m/s]	$w_b'$ [m/s]	$\hat{w}_{b,\text{berekend}}$ [m/s]
<b>Belastingsgeval Azf</b> H=11,7 cm, T=1,03 s	0.08	0.003	0,10	0.014	0.004	0,008
<b>Belastingsgeval Bzf</b> H=7,0 cm, T=1,33 s	0.09	0.003	0,10	0.015	0.006	0,005
<b>Belastingsgeval Czf</b> H=6,3 cm, T=1,90 s	0.10	0.003	0,11	0.013	0.006	0,004
<b>Belastingsgeval Dzf</b> H=5,1 cm, T=2,41 s	0.09	0.002	0,10	0.011	0.006	0,002

Tabel 4.11: Maximale orbitaalsnelheden, meetserie 7

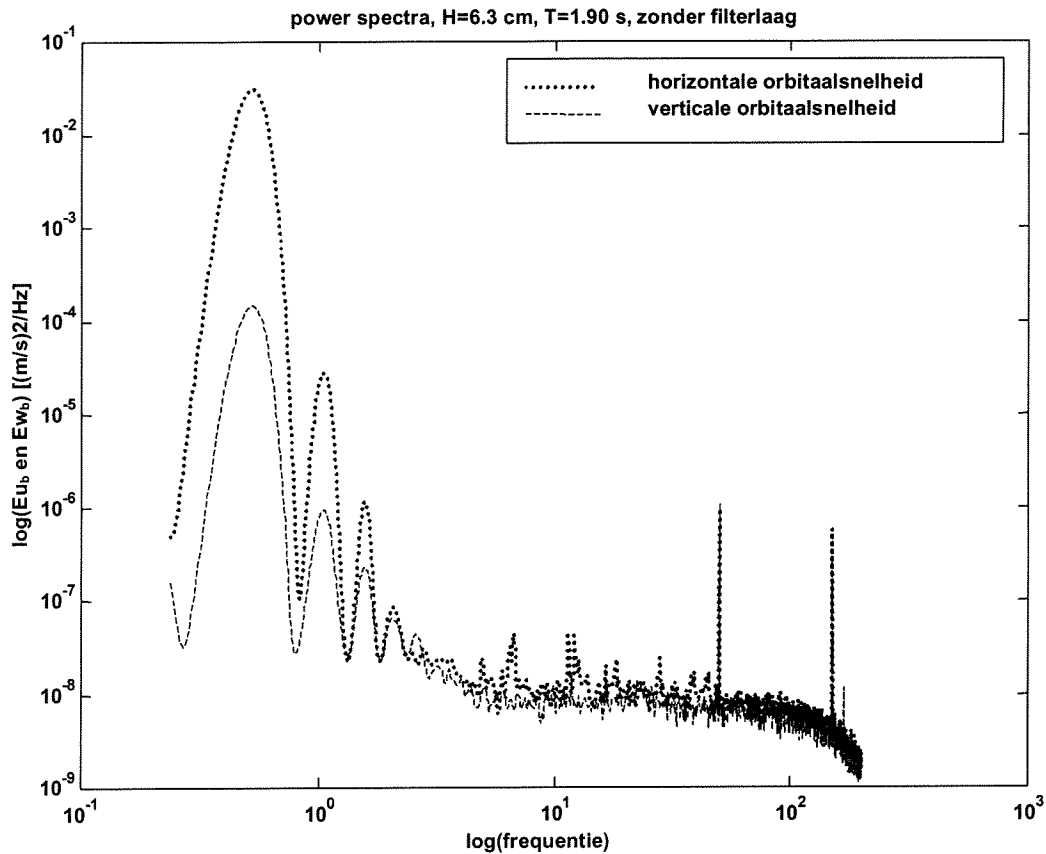
met de gemeten poriesnelheden veroorzaakt door de onderzochte kritieke belastingsgevallen, is minder duidelijk. De r.m.s.-waarde van de horizontale poriesnelheid is in het geval met filter in ieder geval minimaal 10 maal zo groot als de r.m.s.-waarde van de horizontale orbitaalsnelheid in het geval zonder filter (vergelijk tabellen 4.2 tot 4.5 met tabel 4.11). De gemiddelde waarde van de poriesnelheid is afhankelijk van de oriëntatie van de meetporie en kan bij hetzelfde belastingsgeval een factor 2 verschillen (zie *meetserie 3*).

In figuur 4.16 zijn powerspectra van de horizontale en verticale orbitaalsnelheid, 2 cm boven de filterlaag, weergegeven. De twee 'spijkers' worden veroorzaakt door het lichtnet. Het energieniveau bij de hogere frequenties is in de situatie zonder filterlaag lager dan in de situatie met filterlaag en bij lagere frequenties hoger dan in de situatie met filterlaag. Het lijkt er dus op dat er door de filterlaag een verplaatsing van energie plaatsvindt van de lagere frequenties naar de hogere frequenties.

De resultaten van *meetserie 7* samenvattend kan gesteld worden:

- De door de verschillende kritieke belastingsgevallen, voor het begin van bewegen, veroorzaakte orbitaalsnelheden zijn alle ongeveer van dezelfde grootte.
- De berekende horizontale orbitaalsnelheid komt goed overeen met het gemiddelde van de gemeten horizontale orbitaalsnelheid.
- De berekende waarden voor de verticale orbitaalsnelheid zijn echter aanzienlijk lager dan de gemeten waarden.
- De r.m.s.-waarde van de horizontale poriesnelheid is in het geval met filter in ieder geval minimaal 10 maal zo groot als de r.m.s.-waarde van de horizontale orbitaalsnelheid in het geval zonder filter.

- Het energieniveau van de waterbeweging bij de hogere frequenties is in de situatie zonder filterlaag lager dan in situatie met de filterlaag. Dit komt ook weer door de extra ruwheid van de filterlaag, waardoor in de situatie met filterlaag energieoverdracht van de lage naar de hoge frequenties plaatsvindt (zie ook meetserie 6).



Figuur 4.16: Powerspectra horizontale- en verticale orbitaalsnelheid

## 4.8 Resumé analyse snelheidsmetingen

### *Orbitaalsnelheid boven filterlaag*

De met de lineaire golftheorie berekende horizontale orbitaalsnelheid komt goed overeen met de gemiddelde waarde van de gemeten horizontale orbitaalsnelheid. De berekende waarden voor de verticale orbitaalsnelheid zijn echter aanzienlijk lager dan de gemeten waarden. Dit valt te verklaren uit het feit dat de lineaire golftheorie is afgeleid voor een vlakke, ondoorlatende bodem, hetgeen niet van toepassing is op de filterlaag. De fluctuaties van de orbitaalsnelheid worden waarschijnlijk veroorzaakt door de ruwheid van de filterlaag: hoe verder boven de filterlaag gemeten, des te lager de r.m.s.-waarden.

In de situatie zonder filterlaag zijn de gemeten orbitaalsnelheden, optredend bij de kritieke belastingsgevallen, alle ongeveer van dezelfde grootte, en ze zijn groot genoeg om het bodemmateriaal in beweging te brengen..



### *Poriesnelheid in filterlaag*

Het verloop van zowel de horizontale als de verticale poriesnelheid, optredend bij de kritieke belastingsgevallen, is nagenoeg constant over de dikte van de filterlaag, indien de oriëntatie van de meetporie op de verschillende hoogten gelijk is. De opstelling is hierbij niet erg gevoelig voor wijzigingen van de stenenstapeling rondom de meetporie. In deze situatie zijn de gemeten poriesnelheden, alle ongeveer van dezelfde grootte en ze zijn groot genoeg om het basismateriaal in beweging te brengen.

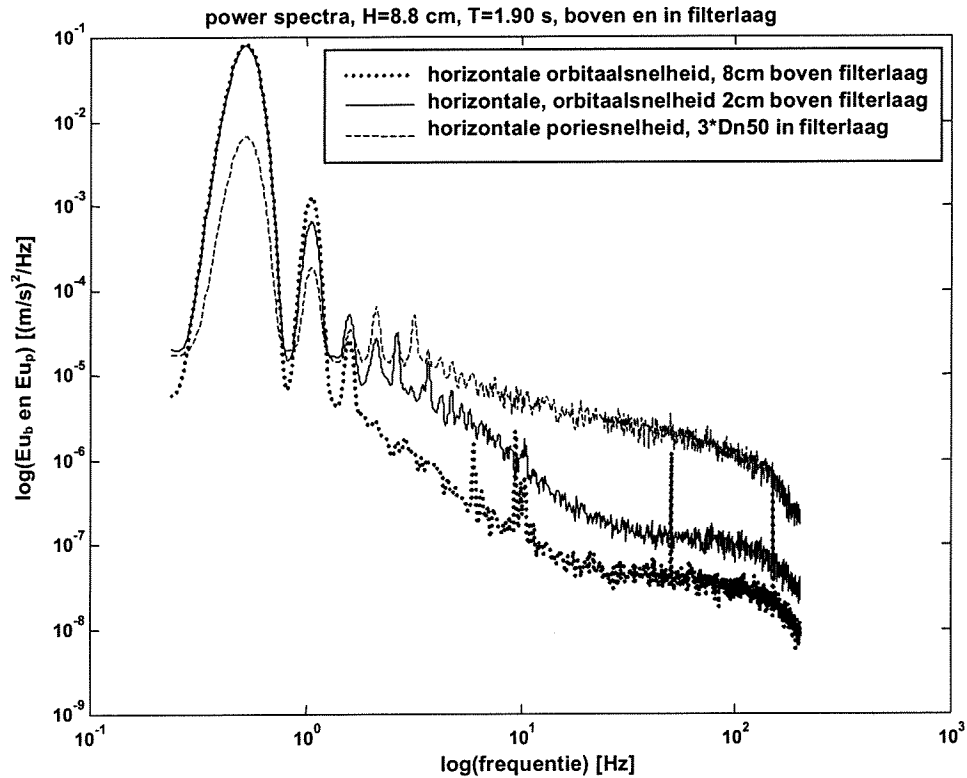
De gemiddelde waarde voor de poriesnelheid lijkt sterk afhankelijk van de oriëntatie en daarmee van de toegankelijkheid van de meetporie; de r.m.s.-waarde lijkt hier niet afhankelijk van te zijn. De betrouwbaarheid van de gemeten fluctuaties (uitgedrukt als de r.m.s.-waarden van de snelheid) is ook niet helemaal duidelijk. In paragraaf 4.1 is gesteld dat middeling over grote meetvolumina de gemeten fluctuatie ernstig kan onderdrukken; (apparatuur/discretisatie)ruis kan de gemeten fluctuatie doen toenemen (zie ook paragraaf 4.2). Het meetvolume past maar net in de meetporie, waardoor het goed mogelijk is dat de gemeten fluctuatie wordt onderdrukt. Het uitvoeren van metingen met een kleiner meetvolume zou hier uitsluitsel over kunnen geven.

### *Vergelijking situatie met en zonder filterlaag*

Er zou een verband kunnen bestaan tussen de respectieve waterbewegingen veroorzaakt door de kritieke belastingsgevallen met en zonder filterlaag: in beide gevallen wordt immers hetzelfde sediment in de basislaag in beweging gebracht. Binnen een filterlaag variëren de oriëntaties van de verschillende poriën en daarmee ook de gemiddelde waarde van de poriesnelheid. Mede hierdoor is het moeilijk de gemeten snelheden bij kritische golfbelasting met en zonder filterlaag met elkaar te vergelijken. Waarschijnlijk is er een over verschillende poriën gemiddelde poriesnelheid, variërend in grootte en oriëntatie, die voor een bepaalde filterlaag significant is en die, gecombineerd met de fluctuaties van de poriesnelheid, een zelfde sedimenttransportcapaciteit heeft als de waterbeweging in het geval zonder filterlaag. We kunnen ons hierbij afvragen of het wel correct is, deze twee verschillende situaties met elkaar te vergelijken op basis van de waterbeweging. In de situatie met filterlaag wordt een deel van de basislaag bedekt met de stenen van de filterlaag, waardoor niet het gehele oppervlak van de basislaag door de waterbeweging kan worden belast. De snelheden in de poriën van de filterlaag zullen hierdoor groter moeten zijn om dezelfde hoeveelheid sediment te kunnen transporteren dan in de situatie zonder filterlaag. De optredende snelheden in de poriën van de filterlaag kunnen lokaal groter zijn dan de gemeten snelheden.

### *Invloed filterlaag op de waterbeweging*

De filterlaag is ruwer dan de basislaag. Door de extra ruwheid van de filterlaag wordt de golfbeweging (lage frequenties) aan de bovenkant van de filterlaag gedempt en ontstaan tussen de filterstenen kleinschalige wervelstructuren (hogere frequenties). Hierbij vindt er net boven en in de filterlaag overdracht van energie van de grote structuren (golfbeweging) naar turbulente wervelstructuren plaats (zie figuur 4.17). De turbulente wervelstructuren veroorzaken de hoger frequente snelheidsfluctuaties,



**Figuur 4.17:** Powerspectra boven en in filterlaag

die we uitdrukken als r.m.s.-waarden van de gemeten stroomsnelheden. In de situatie met filterlaag blijkt: hoe verder boven de filterlaag gemeten, des te lager de r.m.s.-waarde. De r.m.s.-waarde van de horizontale poriesnelheid is in het geval met filter in ieder geval minimaal 10 maal zo groot als de r.m.s.-waarde van de horizontale orbitaalsnelheid in het geval zonder filter.

## 5 Conclusies & Aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Na het uitvoeren van de experimenten en de analyse van de meetresultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken over de doordringing van golven in de filterlaag:

- Zowel de horizontale als de verticale poriesnelheid, optredend bij de kritieke belastingsgevallen, is nagenoeg constant over de dikte van de filterlaag, indien de oriëntatie van de meetporie op de verschillende hoogten gelijk is. De constante horizontale poriesnelheid over de dikte van filterlaag, wordt veroorzaakt door drukgradiënten, waarvan het aannemelijk is dat deze constant zijn over de dikte van de filterlaag, omdat de golflengten van de beschouwde golfbelastingen vele malen groter zijn dan de dikte van de filterlaag (12 cm). Dit stemt overeen met de resultaten van Van Os (1998), die vergelijkbare experimenten heeft uitgevoerd, waarbij de filterlaag werd belast door een stationaire stroming. De opstelling is hierbij niet erg gevoelig voor wijzigingen van de stenenstapeling rondom de meetporie. In deze situatie zijn de gemeten poriesnelheden alle ongeveer van dezelfde grootte.
- De gemiddelde waarde voor de horizontale en de verticale poriesnelheid lijkt sterk afhankelijk van de oriëntatie en daarmee van de toegankelijkheid van de meetporie; de r.m.s.-waarde lijkt hier niet afhankelijk van te zijn. Aan de betrouwbaarheid van de r.m.s.-waarde kan worden getwijfeld i.v.m. de grootte van het meetvolume en onduidelijkheid m.b.t. de eventuele aanwezigheid van signaalruis.
- De gemeten poriesnelheden, veroorzaakt door de kritieke golfbelastingen volgens Halter (1999), zijn groot genoeg om het basismateriaal in beweging te brengen.
- De filterlaag is ruwer dan de basislaag. Door de extra ruwheid van de filterlaag wordt de golfbeweging (lage frequenties) aan de bovenkant van de filterlaag meer gedempt dan daarboven en ontstaan tussen de filterstenen kleinschalige wervelstructuren (hogere frequenties). Hierbij vindt er overdracht van energie van de grote structuren (golfbeweging) naar de kleinere wervelstructuren plaats.

### 5.2 Aanbevelingen

Na het uitvoeren van de experimenten en de analyse van de meetresultaten kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan voor vervolgonderzoek:

- Het meetvolume past maar net in de meetporie, waardoor het goed mogelijk is dat de gemeten fluctuatie wordt onderdrukt en door ruis wordt vergroot. Het uitvoeren van metingen met een kleiner meetvolume zou hier uitsluitel over kunnen geven. Hierbij zou gebruik gemaakt kunnen worden van een LDFM, die werkt volgens een '*side scatter*' systeem. Hierbij snijden twee lichtstralen van gelijke intensiteit elkaar in het water. Het licht wordt in alle richtingen verstrooid door de deeltjes die het meetvolume passeren. Buiten de goot wordt het verstrooide licht in een willekeurige richting opgevangen op een fotodetector. Het signaal van de fotodetector wordt omgezet naar een stroomsnelheid in het meetvolume.

- Bij een kritieke golfbelasting zou een over verschillende poriën of plaatsen in een porie gemiddelde poriesnelheid, variërend in grootte en oriëntatie, kunnen bestaan, die gecombineerd met de fluctuaties van de poriesnelheid voor een bepaalde filterlaag significant is. Voor het bepalen van dergelijke significante poriesnelheden zijn naast een bruikbaar statistisch model nog vele meetseries met verschillende meetporiën nodig.
- Na het overschrijden van de kritieke belasting vindt er erosie onder de filterlaag en sedimenttransport door de filterlaag plaats. Er zou onderzoek verricht kunnen worden naar de hoeveelheid sediment die per tijdseenheid door de filterlaag getransporteerd kan worden, en van welke parameters de grootte van dit transport afhankelijk is.
- Het bovenstaande is ook mogelijk voor een situatie, waarbij de filterconstructie wordt belast door stationaire stroming en door een combinatie van golven en stationaire stroming.

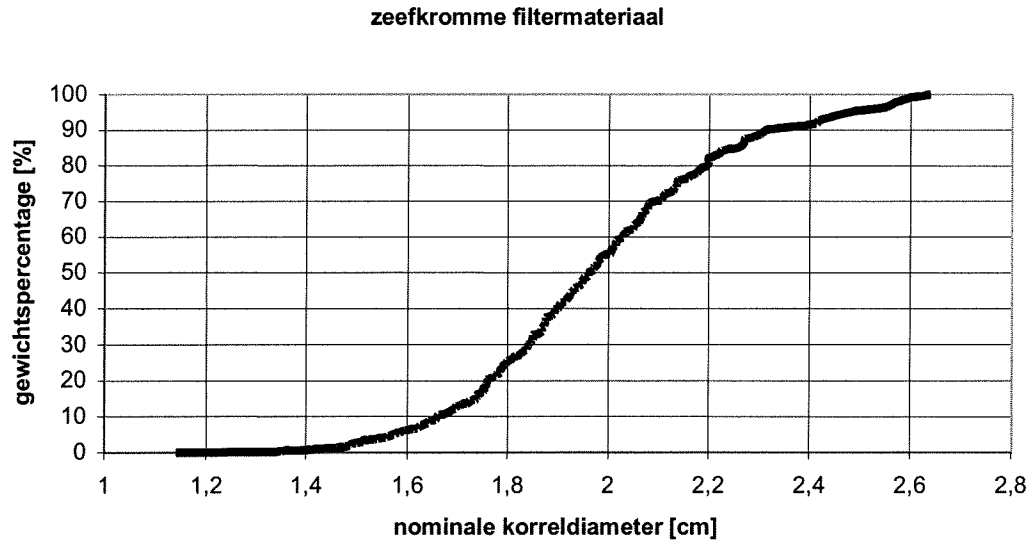
**Bronvermelding**

- BATTJES, J.A. (1997)  
Korte golven  
Collegedictaat CTwa4320, Technische Universiteit Delft
- BOOIJ, R. (1992)  
Turbulentie in de waterloopkunde  
Collegedictaat b82, Technische Universiteit Delft
- CAUS, E. (1998)  
Imperfecte filterconstructies onder golfbrekers  
Afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft
- CUR (1991)  
Toegepast filteronderzoek  
Rapport 91-1, CUR Gouda
- CUR (1991)  
Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering  
Rapport 169, CUR Gouda
- GENT, M.R.A. VAN (1995)  
Wave Interaction with Permeable Coastal Structures  
Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Technische  
Universiteit Delft
- GRAAUW ET AL., A. DE (1983)  
Design criteria for granular filters  
Delft Hydraulics publication 287
- HALTER, W. (1999)  
Het gedrag van zakkingsfilters onder invloed van golfbelasting  
Afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft
- OS, P. VAN (1998)  
Hydraulische belasting op een geometrisch open filterconstructie  
Afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft
- SCHIERECK, G.J. (1998)  
Introduction to bed, bank and shore protection  
Collegedictaat CTwa4310, Technische Universiteit Delft
- TERMES, A.P.P. (1984)  
Watermovement over a horizontal bed and solitary sanddune  
Delft University of Technology, appendix A

Internet

- <http://www.spd.eee.strath.ac.uk/users/interact/moved/dft.html>  
Fourier Transform Tutorial for DSP,  
University of Strathclyde, UK
- [http://www.datan.de/dataplore/docu/dp\\_manual12.html#firfilt](http://www.datan.de/dataplore/docu/dp_manual12.html#firfilt)  
Introduction To Linear Filters, Finite Impulse Response (FIR) Filters,  
Dataplore ® Functions Reference Manual
- [http://www.arl.hpc.mil/PET/training/slides/Matlab2/SP\\_Course/tsld001.htm](http://www.arl.hpc.mil/PET/training/slides/Matlab2/SP_Course/tsld001.htm)  
Signal Processing using Matlab,  
The Ohio State University

## Bijlage A : Zeefkromme filtermateriaal



**Figuur A-1:** Zeefkromme van het filtermateriaal

De zeefkromme (figuur A-1) is bepaald door een willekeurig monster van 250 stenen te nemen en elke steen afzonderlijk te wegen. Het gewicht van de stenen is vervolgens met onderstaande formule omgerekend naar de nominale korreldiameters:

$$D_n = (W / \gamma)^{1/3} \quad (\text{A-1})$$

Hierin is:

- $D_n$     ribbe van de equivalente kubus
- $W$      gewicht van de korrel
- $\gamma$     soortelijk gewicht korrel

In tabel A-1 worden de eigenschappen van het filtermateriaal weergegeven.

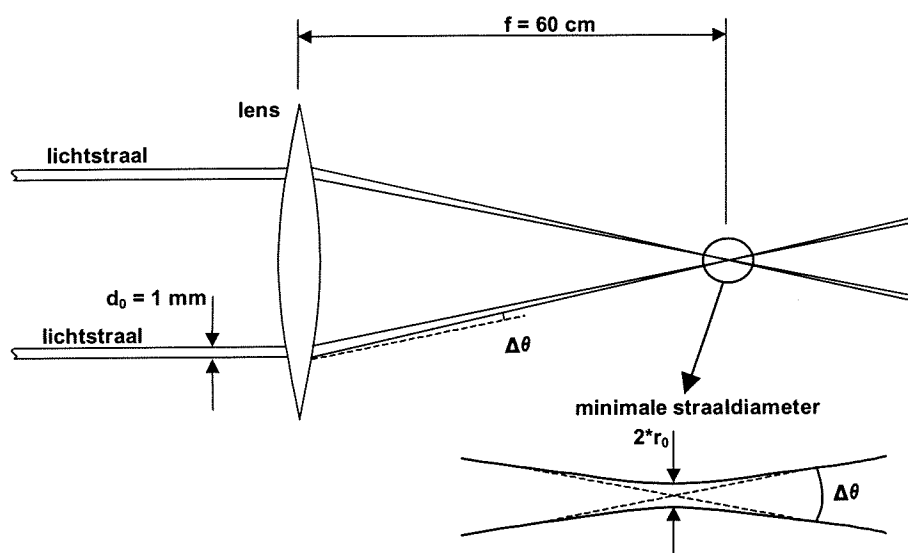
filtermateriaal	Halter (1999)	Dit onderzoek
<b>nominale diameter</b>	1,99 cm	1,96
<b>wijde (<math>D_{85} / D_{15}</math>)</b>	1,28	1,29
<b>dichtheid</b>	2540 kg/m <sup>3</sup>	2540 kg/m <sup>3</sup>
<b>porositeit</b>	0,39	0,4
<b>vormfactor (l/t)</b>	2,5	2,5

**Tabel A-1:** Eigenschappen filtermateriaal

## Bijlage B : Afmetingen meetvolume

De onderstaande gegevens zijn van toepassing op de tijdens de experimenten gebruikte LDFM (6 mW, He-Ne laser met golflengte:  $\lambda_0 = 632,8 \cdot 10^{-9}$  m, straaldiameter  $d_0 = 1$  mm).

Er zijn twee lichtstralen nodig om het meetvolume te vormen; deze zijn door een lens gericht. De intensiteit van het licht van een straal is Gaussisch verdeeld in een doorsnede van de straal. Na het passeren van de lens neemt de diameter van de lichtstraal door convergentie af (zie figuur B-1), maar wordt niet nul. De minimale straaldiameter bevindt zich in het brandpunt van de lens, waarna de straal weer divergeert.

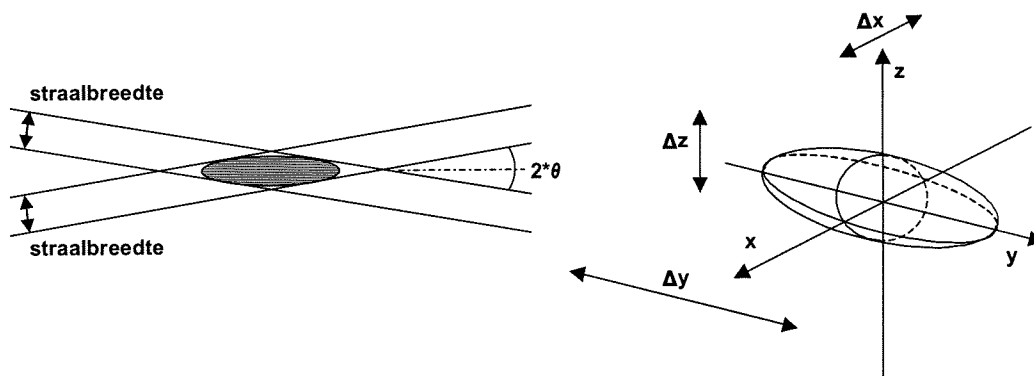


**Figuur B-1:** Convergentie van de lichtstralen

Het meetvolume heeft de vorm van een ellipsoïde (zie figuur B-2). De dimensies van het meetvolume zijn:

$$\text{breedte } \Delta x = 2 \cdot r_0 / \cos\theta; \quad \text{lengte } \Delta y = 2 \cdot r_0 / \sin\theta; \quad \text{dikte } \Delta z = 2 \cdot r_0$$

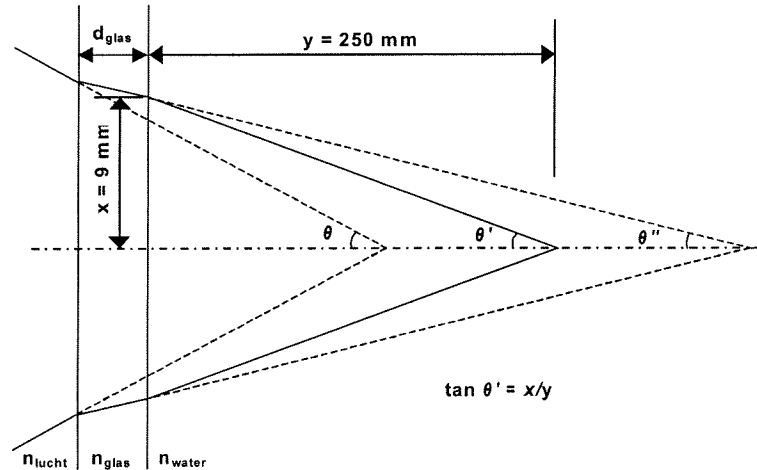
De straal van de lichtstraal nabij het meetvolume is  $r_0 = 2 \cdot \lambda_0 / \pi \cdot \Delta\theta$  en  $\Delta\theta \approx d_0 / f$ .



**Figuur B-2:** meetvolume



Een lichtstraal, die via lucht door glas schijnt, refracteert door de verandering van de refractie-index. Hetzelfde gebeurt als de straal via het glas door het water schijnt (zie figuur B3). De breedte en de dikte van het meetvolume worden niet beïnvloed door de refractie van



**Figuur B-3:** Refractie van de lichtstralen

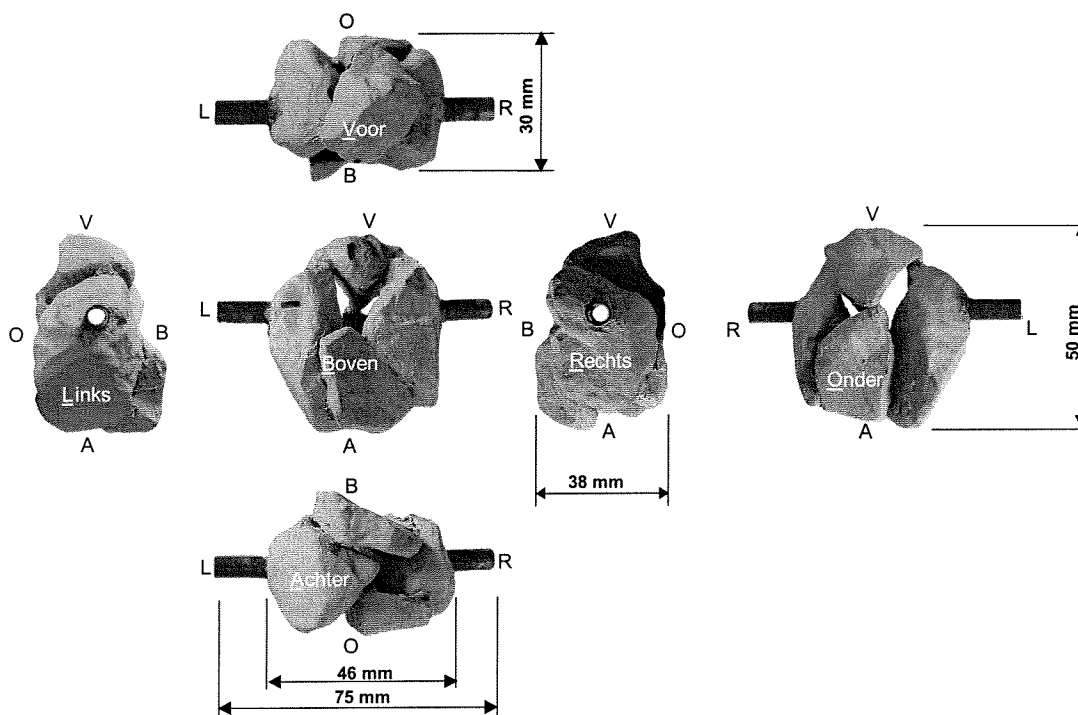
de lichtstraal, de lengte echter wel, door  $\sin \theta' = \sin \theta / n$ , met refractie-index  $n = n_{\text{water}} / n_{\text{lucht}} = 1,33$ . Na substitutie kunnen de dimensies van het meetvolume als volgt worden berekend:

breedte:	$\Delta x = 4 \cdot \lambda_0 \cdot f / (\pi \cdot d_0 \cdot \cos \theta)$	[m]
lengte:	$\Delta y = 4 \cdot \lambda_0 \cdot f / (\pi \cdot d_0 \cdot \sin \theta')$	[m]
dikte:	$\Delta z = 4 \cdot \lambda_0 \cdot f / (\pi \cdot d_0)$	[m]

Invullen geeft de volgende dimensies van het meetvolume zoals dat wordt gevormd door de tijdens de experimenten gebruikte LDFM:  $\Delta x = 0,5 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = 13,4 \text{ mm}$  en  $\Delta z = 0,5 \text{ mm}$ .

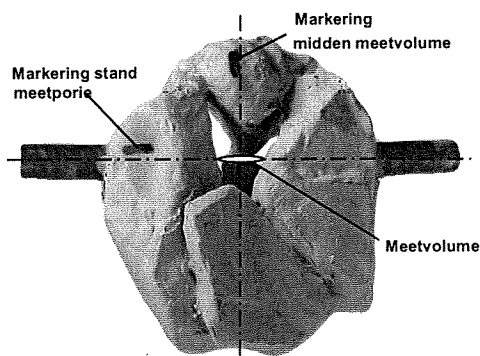
## Bijlage C : Meetporie

Bij de experimenten is gebruik gemaakt van een zogenaamde *meetporie*. Deze meetporie wordt gevormd door vijf aan elkaar gekitte stenen, waar gaten in geboord zijn (zie figuur C-1). In deze gaten zijn buisjes bevestigd, welke met speciale bevestigingsbusjes precies in het midden van de geleidingsbuisjes kunnen worden gecentreerd en vastgezet (zie figuur 3.6).



**Figuur C-1:** Meetporie, aanzichten en afmetingen

Uit waarnemingen blijkt dat er in een losgestorte filterlaag veelvuldig poriën voorkomen met grootten gelijk aan die van de gebruikte meetporie; de exacte verdeling van de poriegrootten is echter onbekend. Op de meetporie en op de geleidingsbuisjes zijn markeringen aangebracht, waardoor het meetvolume bij ieder experiment op dezelfde plaats in de meetporie kan worden gepositioneerd. De grootte van de porie is dusdanig dat het meetvolume zich in zijn geheel in de meetporie bevindt. Ter plaatse van het meetvolume is

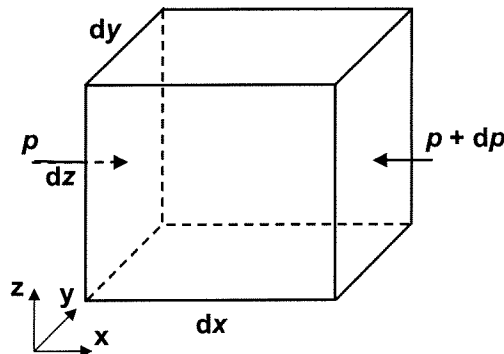


**Figuur C-2:** Positie meetvolume in meetporie

de meetporie circa 15 mm breed. Het meetvolume is 13,4 mm lang (zie Bijlage B) en past daarom maar net in de meetporie. Dit kan belangrijk zijn i.v.m. middelen e.g. fluctuatieruis.

## Bijlage D : Verband tussen de horizontale orbitaalsnelheid en het verhang

De horizontale orbitaalsnelheid wordt, volgens de lineaire golftheorie, veroorzaakt door het verhang (vergelijking 2.10). Om het verband tussen de horizontale orbitaalsnelheid,  $u$ , en het verhang,  $i$ , te bepalen, wordt een willekeurig, infinitesimaal blokje ergens in de stroming tussen  $x$  en  $x + dx$ ,  $y$  en  $y + dy$ , en  $z$  en  $z + dz$  beschouwd. Zo wordt een watervolume met de grootte  $dx dy dz$  gevormd. Wanneer er een drukgradiënt  $\partial p / \partial x$  over het watervolume aanwezig is, is de druk aan de ene zijde van het watervolume  $dp$  groter dan aan de andere zijde van het watervolume. De situatie is geschetst in figuur D-1. De versnelling van een waterdeeltje in



**Figuur D-1:** Druk op een infinitesimaal watervolume

de x-richting, is de meebewegende afgeleide van de snelheid van dat waterdeeltje:

$$a_x = \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \quad (\text{D-1})$$

Hierin is:

- $a_x$       versnelling in x-richting
- $u$         horizontale orbitaalsnelheid in x-richting

Deze bestaat uit de *lokale* versnelling  $\partial u / \partial t$  en de *convectieve* versnelling  $(u \cdot \nabla)u$ . We passen de tweede wet van Newton toe op het infinitesimale watervolume in de vorm kracht = massa \* versnelling:

$$p \cdot dy dz - (p + \frac{\partial p}{\partial x} dx) \cdot dy dz = \rho_w \cdot dx dy dz \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) \quad (\text{D-2})$$

Hierin is:

- $p$         druk
- $\rho_w$      dichtheid van het water

Vergelijking D-2 kan, door verwaarlozing van de niet-lineaire termen, worden vereenvoudigd tot:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_w \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{D-3})$$

Als we in vergelijking D-3 vergelijking 2.5 invullen voor de horizontale orbitaalsnelheid:

$$u = \omega a \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx) \quad (\text{D-4})$$

en gebruik maken van de *dispersierelatie* (Battjes, 1997):

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (\text{D-5})$$

waarin:

$\omega$	de hoekfrequentie = $2\pi/T$
$g$	versnelling van de zwaartekracht
$k$	het golfgetal = $2\pi/L$
$h$	waterdiepte

is, dan geeft dit vergelijking 2.10, de uitdrukking voor het verhang:

$$-\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial p}{\partial x} = k a \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cos(\omega t - kx) \quad (\text{D-6})$$

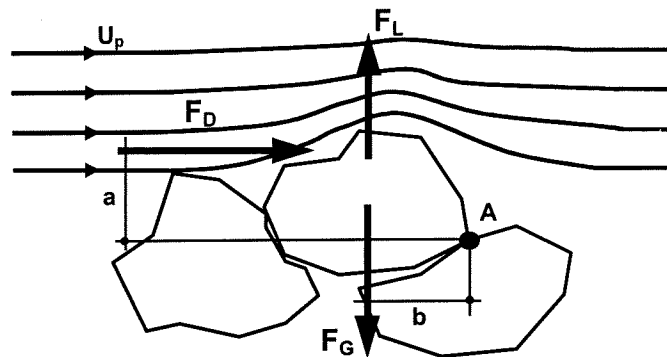
Hiermee is via een alternatieve benadering het verband tussen de horizontale orbitaalsnelheid en het verhang volgens de lineaire golftheorie aangetoond.

## Bijlage E : Belasting op een zandkorrel

Indien we een vloeistofstroming boven een loskorrelig bed beschouwen, oefent die vloeistofstroming krachten uit op de korrels. Een korrel zal in beweging komen, indien de krachten die er op werken een bepaalde kritische waarde overschrijden. Halter (1999) heeft een aantal golfbelastingen bepaald, waarbij de krachten op een korrel in de basislaag onder een filterlaag dusdanig zijn, dat deze kritische waarde wordt overschreven. De vloeistofstroming boven de filterlaag moet eerst in de filterlaag doordringen, alvorens deze de basislaag kan belasten. Tijdens dit onderzoek zijn watersnelheden in een porie van de filterlaag gemeten, welke worden veroorzaakt door de kritische golfbelastingen volgens Halter (1999). In deze bijlage schatten we de kritieke stroomsnelheid benodigd voor het begin van bewegen van een korrel zoals die in de basislaag voorkomt. Na uitspoeling van de fijnere fracties aan het oppervlak van het bodemmateriaal zal een zogenaamde pantserlaag van grovere korrels overblijven. Daarom zal bij deze stabiliteitsberekening worden gekeken naar de  $D_{85}$  van het basismateriaal ( $D_{b85} = 111 \mu\text{m}$ , (Halter, 1999)).

Een analyse van de krachtwerving op een korrel vergroot het inzicht in het begin van bewegen. We beschouwen de volgende krachten die op een korrel werken (zie figuur E-1):

- Stromingskrachten: deze bestaat uit de sleepkracht en de liftkracht;
- Zwaartekracht (gewicht onder water);
- Resultante van de reactiekrachten van de omliggende korrels.



Figuur E-1: Beschouwde krachten op een korrel

De verschillende krachten die op een korrel werken kunnen als volgt worden uitgedrukt:

$$\text{sleepkracht ('drag force') : } F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w u^2 A_k$$

$$\text{liftkracht ('lift force') : } F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w u^2 A_k \quad (\text{E-1})$$

$$\text{zwaartekracht ('gravity force') : } F_G = \frac{1}{6} \pi D_b^3 g (\rho_b - \rho_w)$$

Hierin is:

$C_D$	de sleepcoëfficiënt
$\rho_w$	de dichtheid van het water
$u$	de watersnelheid
$A_k$	de oppervlakte van de korrel, gelijk aan $\frac{1}{4}\pi d_b^2$
$C_L$	de liftcoëfficiënt
$D_b$	de diameter van een korrel van het basismateriaal
$g$	de gravitatieversnelling
$\rho_b$	de dichtheid van het basismateriaal (hier: $2650 \text{ kg/m}^3$ )

De stromingskrachten op de korrel zijn evenredig met het kwadraat van de snelheid en het oppervlak, dat evenredig is met het kwadraat van de diameter van een korrel. In de evenwichtssituatie moet de liftkracht direct worden gecompenseerd door het gewicht van de korrel onder water. De sleepkracht moet worden gecompenseerd door het moment rond punt A of door de wrijvingskracht. De stromingskrachten, de sleepkracht en de liftkracht, worden aan elkaar gelijk gesteld door voor zowel de sleep- als de liftcoëfficiënt 0,5 aan te nemen. We beschouwen het horizontale krachten-, verticale krachten- en momentenevenwicht:

$$\begin{aligned}\sum H = 0: & F_D = f * F_G \quad (f = \text{wrijvingcoëfficiënt}) \\ \sum V = 0: & F_L = F_G \\ \sum M = 0: & F_D * a = F_G * b\end{aligned}\tag{E-2}$$

Als de resulterende kracht en/of het resulterende moment die de korrel verplaatsen groter zijn dan de stabiliserende kracht of moment, wordt het evenwicht verstoord. We schatten, aan de hand van het horizontale krachten-, verticale krachten- en momentenevenwicht, de benodigde stroomsnelheden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de vergelijkingen E-1 en E-2, en de volgende parameters:  $C_D = C_L = 0,5$ ,  $\rho_b = 2650 \text{ kg/m}^3$  en  $D_{b85} = 111 \mu\text{m}$ .

$$\sum H = 0: \quad (2,42 * 10^{-6}) * u^2 \text{ N} = f * 11,82 * 10^{-9} \text{ N}$$

Nemen we een wrijvingscoëfficiënt 0,5 tot 1 aan, dan wordt het evenwicht verstoord als:

$$u \geq 0,05\text{-}0,07 \text{ m/s}$$

$$\sum V = 0: \quad (2,42 * 10^{-6}) * u^2 \text{ N} = 11,82 * 10^{-9} \text{ N}$$

Dan wordt het evenwicht verstoord als:

$$u \geq 0,07 \text{ m/s}$$

$$\sum M = 0: \quad ((2,42 * 10^{-6}) * u^2 \text{ N}) * a = (11,82 * 10^{-9} \text{ N}) * b$$

Voor het momentenevenwicht zijn de armen  $a$  en  $b$  belangrijk, een grote  $a$  en een kleine  $b$  zijn het ongunstigst. Voor  $a$  nemen we aan dat deze maximaal  $2/3 * D_b$  groot is, voor  $b$  nemen we aan dat deze minimaal  $1/3 * D_b$  groot is. Dit betekent dat in het ongunstigste geval het evenwicht wordt verstoord indien de liftkracht  $\geq 0,5 * \text{zwaartekracht}$ , dus als:

$$u \geq 0,05 \text{ m/s}$$

Uit bovenstaande beschouwing volgt dat het basismateriaal in beweging zal komen als voor de optredende stroomsnelheden geldt:  $u \geq 0,05 \text{ m/s}$ . Er is hier echter geen rekening gehouden met het oscillerende gedrag van de optredende stroomsnelheden en de aanwezigheid van de filterlaag.

Halter (1999) heeft, voor de situatie zonder filterlaag, de kritieke maximale orbitaalsnelheid berekend uit de vergelijking van Jonsson. Hieruit bleek dat het bodemmateriaal in beweging zal komen als voor de optredende stroomsnelheden geldt:  $u \geq 0,035 \text{ m/s}$ . Hier is wel rekening gehouden met het oscillerende gedrag van de optredende stroomsnelheden, maar er is geen filterlaag aanwezig.