

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Zeeland  
Projectbureau Zeeweringen



## Toetscriteria voor ingegoten steenzettingen

Onderzoeksprogramma  
Kennisleemtes Steenbekledingen

Analyse Deltagootonderzoek

oktober 2007

H4635

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat



WL | delft hydraulics



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat Zeeland (PBZ)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

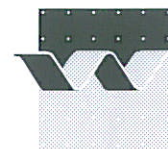
## Toetscriteria voor ingegoten bekledingen

M. Klein Breteler en I.M. van der Werf

Analyse van Deltagootproeven

oktober 2007





OPDRACHTGEVER:	Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau Zeeweringen							
TITEL:	Toetscriteria voor ingegoten steenzettingen							
SAMENVATTING:	<p>Dit verslag geeft een beschrijving van de analyse van de Deltagootproeven met ingegoten basalt, die uitgevoerd zijn in 2005. Het doel van het onderzoek is het vinden van verbeterde toetsregels voor met gietasfalt ingegoten steenzettingen.</p> <p>Er zijn twee soorten ingietingen getest:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>serie 1: half ingegoten, met een ingieting van 8,5 cm diep, terwijl de onderste 4,4 cm van de spleten was ingewassen met een mengsel van steenslag en zand (spleet voor spleet ingegoten met een emmer, niet over de koppen)</li><li>serie 2: volledig ingegoten, met ingieting van 12,9 cm diep in de spleten tot op het filter (uit kubel op talud gegoten en uitgestreken)</li></ul> <p>Het onderzoek heeft goed inzicht gegeven in het bezwijkmechanisme van ingegoten steenzettingen. Het blijkt dat de samenhang van de toplaag bedreigd wordt door de opwaartse beweging tijdens het steile stijghoogtefront, in combinatie met de golfklap. Omdat meer dan de helft van de golven een opwaartse verplaatsing geven met daaropvolgend een golfklap, zal er ook sprake zijn van vermoeiing. De stabiliteit van het geheel wordt bedreigd door de cumulerende verplaatsingen als gevolg van het migrerende filtermateriaal. Ook voor die migratie is een beweging tijdens het steile stijghoogtefront een noodzakelijke voorwaarde.</p> <p>De invloed van een statisch stijghoogteverschil blijkt klein te zijn.</p> <p>Het onderzoek heeft geleid tot een nieuwe eenvoudige toetsmethode voor ingegoten steenzettingen.</p>							
REFERENTIES:	Contract ZLD-6011 van 8 juni 2005 Projectleider RWS-Zeeland: Y. Provoost Projectbegeleider Dienst Weg- en Waterbouwkunde: R. Bosters							
VER	AUTEUR		DATUM	OPMERK.	REVIEW		GOEDKEURING	
0	M. Klein Breteler		12-12-'05		C. Kuiper		W.M.K. Tilmans	
1	M. Klein Breteler		21-2-'06		C. Kuiper		W.M.K. Tilmans	
2	M. Klein Breteler		3-10-'07		B. Hofland		W.M.K. Tilmans	
PROJECTNUMMER:			H4635					
TREFWOORDEN:			dijken, bekledingen, asfaltmastiek, toetsing					
AANTAL BLADZIJDEN:			179					
VERTROUWELIJK:			<input type="checkbox"/> JA		<input checked="" type="checkbox"/> NEE			
STATUS:			<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF	



## Inhoud

### Lijst van tabellen

### Lijst van figuren

### Symbolenlijst

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Onderzoeksresultaten uit het verleden.....</b>	<b>3</b>
2.1	Praktijkervaring .....	3
2.2	Deltagootproeven op overgoten basalt .....	3
2.3	Metingen langs de Westerschelde met statische belasting.....	5
2.4	Theoretische beschouwing van de stabiliteit tijdens golfaanval .....	7
2.5	Kennisleemtes.....	10
<b>3</b>	<b>Modelopstelling in Deltagoot en proevenprogramma.....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Aanpak van de analyse .....</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Analyse van de meetresultaten .....</b>	<b>17</b>
5.1	Bezwijkmechanisme .....	17
5.2	Leklengte.....	24
5.3	Stijghoogteverschil over de toplaag .....	26
5.3.1	Grootte van de stijghoogteverschillen .....	27
5.3.2	Locatie van de grote stijghoogteverschillen.....	30
5.4	Beweging van de toplaag.....	31
5.4.1	Cumulatieve verplaatsing van de toplaag .....	32
5.4.2	Bewegingen tijdens afzonderlijke golven.....	35
<b>6</b>	<b>Kwantificering van de stabiliteit van de bekleding.....</b>	<b>41</b>
6.1	Steil stijghoogtefront .....	42
6.2	Golfklap.....	47

6.3	Stabiliteit .....	50
6.3.1	Bezwijkmechanisme.....	50
6.3.2	Toelaatbare belasting en belastingduur.....	51
6.3.3	Eenvoudige rekenmethode.....	55
6.3.4	Gedetailleerd rekenmodel.....	60
<b>7</b>	<b>Conclusies .....</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	
<b>B</b>	<b>Figuren</b>	
<b>C</b>	<b>Gemeten belastingen</b>	
C.1	Inleiding .....	C-1
C.2	Instrumentatie.....	C-1
C.3	Golfhoogte op ondiepwater .....	C-4
C.4	Stijghoogteverschil .....	C-5
C.4.1	Integrale stijghoogteverschil.....	C-6
C.4.1.1	Stijghoogteverschil bij hogere bemonsteringsfrequentie.....	C-6
C.4.1.2	Stijghoogteverschil na laagfrequente filtering .....	C-7
C.4.2	Lokale stijghoogteverschil na filtering.....	C-11
<b>D</b>	<b>Beweging van de toplaag</b>	
D.1	Inleiding .....	D-1
D.2	Verplaatsingsopnemers .....	D-1
D.3	Beweging per golf tijdens de proeven.....	D-2
D.4	Restverplaatsingen tijdens de proeven.....	D-3
D.5	Hoogtemetingen .....	D-4
<b>E</b>	<b>Relatie tussen beweging en stijghoogte op toplaag en in filter</b>	
E.1	Inleiding .....	E-1
E.2	Proef P01.....	E-1



E.2.1	Golf met maximale verplaatsing .....	E-1
E.2.2	Golf met $\phi_w$ gelijk aan $\phi_{w2\%}$ .....	E-5
E.3	Proef P04 .....	E-5
E.3.1	Golf met maximale verplaatsing .....	E-5
E.3.2	Golf met $\phi_w$ gelijk aan $\phi_{w2\%}$ .....	E-9
E.4	Proef P11b .....	E-11
E.4.1	Golf met maximale verplaatsing .....	E-12
E.4.2	Golf met $\phi_w$ gelijk aan $\phi_{w2\%}$ .....	E-13
E.5	Proef P16 .....	E-15
E.5.1	Golf met maximale verplaatsing .....	E-15
E.5.2	Golf met $\phi_w$ gelijk aan $\phi_{w2\%}$ .....	E-18

## **F Leklengte**

F.1	Inleiding .....	F-1
F.2	Methodiek .....	F-1
F.3	Resultaat .....	F-2
F.4	Doorlatendheid van het filter en de toplaag .....	F-4

## **G Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen**



## Lijst van Tabellen

- 3.1 Gemeten stijfheden van ingegoten steenbekledingen met VGD metingen (Hofland e.a. 2005).
- 3.2 Gemeten golfcondities tijdens het Deltagootonderzoek ( $\Delta$  is gebaseerd op alleen basalt, dus  $\Delta = 2,033$ )
- 6.1 Vertaling van de langeduurbelasting ( $H_{sN}/\Delta D$ ) naar een korteduurbelasting ( $H_{s1000}/\Delta D$ )

## Lijst van Figuren

- 1.1 Modelopstelling in de Deltagoot tijdens serie 1
  
- 2.1 Overgieten van basalt in Deltagoot en blaas van de gietasfalt na langdurige golfaanval
- 2.2 Inpompproef bij Kruiningen
- 2.3 Dwarskracht op de omtrek van het getrokken zuil tijdens trekproef
- 2.4 Trekproeven bij Kruiningen
- 2.5 Schematische weergave van de beweging van de toplaag als gevolg van de golfklap
- 2.6 Water gevulde filterlaag met daarop een toplaag, schematiseerd tot een bakje (= filter) en zuiger (toplaag)
  
- 4.1 Golfaanval op ingegoten bekleding in de Deltagoot tijdens serie 2
  
- 5.1 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 01 op  $t = 6316,35$  s.
- 5.2 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 01 op  $t = 6316,95$  s.
- 5.3 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 01 op  $t = 6317,40$  s
- 5.4 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 01 op  $t = 6317,95$  s.
- 5.5 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 01 op  $t = 6318,10$  s.
- 5.6 Schematische weergave van het stijghoogteverloop op de toplaag als gevolg van de golfklap, en de resulterende stijghoogte in het filter die een breder gebied beslaat
- 5.7 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 01 op  $t = 6318,80$  s.
- 5.8 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 01 op  $t = 6319,70$  s.
- 5.9 Stijghoogteverloop en verplaatsing in P01 als functie van de tijd ter plaatste van de golfklap
- 5.10 Stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef 04 op  $t = 573,75$  s.
- 5.11 Stijghoogteverloop en verplaatsing in P04 als functie van de tijd ter plaatste van de golfklap
- 5.12 Stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie ( $\phi_{w2\%}$ ) als functie van de significante golfhoogte ( $H_s$ )
- 5.13 Gefilterd en dimensieloos stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie als functie van het totaal aantal golven tot en met de betreffende proef
- 5.14 Principe van verhinderde toestroming
- 5.15 Stijghoogteverschil als functie van de lokatie op het talud tijdens proef P03
- 5.16 Onder en bovengrens van de zone waarin 2%-stijghoogteverschil groter is dan 70% van het maximum
- 5.17 Locatie van de grootste opwaartse verplaatsing en neerwaartse verplaatsing (bolling en kuil in het taludoppervlak), zoals dat is gemeten met de profielvolger
- 5.18 Hoogte van de bolling en kuil in het S-profiel
- 5.19 Resultaten van de hoogtemeters tijdens proef P16
- 5.20 Verplaatsing in de golf met 2% overschrijdingsfrequentie
- 5.21 Verplaatsing in de golf als functie van de significante golfhoogte
- 5.22 Verplaatsing van de toplaag als functie van het stijghoogteverschil tijdens de golfklap
  
- 6.0 Bezwijkmechanisme
- 6.1 Maatgevend stijghoogteverloop volgens theorie van Rond Front

- 6.2 Berekend stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie tijdens het stijghoogtefront, als de toplaag niet beweegt
  - 6.3 Berekend dimensieloos stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront als functie van de dimensieloze belastingduur
  - 6.4 Gemeten stijghoogteverschil tijdens de golfklap (met bewegende toplaag) als functie van het berekende stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront (zonder beweging van de toplaag)
  - 6.5 Gemeten toplaagbeweging met 2% overschrijdingsfrequentie als functie van berekend stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront
  - 6.6 Stijghoogte tijdens de golfklap, met 2% overschrijdingsfrequentie, ten opzichte van het taludoppervlak
  - 6.7 Berekende dwarskrachten bij gekozen invoer
  - 6.8 Stabiliteitsrelatie voor ingegoten steenzettingen bij een belastingduur van 1000 golven met resultaten van het Deltagootonderzoek, vertaald naar een belastingduur van 1000 golven
  - 6.9 Invloed van belastingduur op stabiliteitsparameter  $F_N = \xi_{op} H_{sN} / (\Delta D)$  ( $F_A =$  waarde van  $F$  op grens stabiel/instabiel volgens ANAMOS, echter zonder 6-ksi-regel) (berekend voor  $h/H_s = 3$  en  $\tan \alpha_{bodem} = 0$ )
  - 6.10 Waterstandverloop en belastingzone tijdens toetsomstandigheden bij Kruiningen
- 
- 7.1 Bezwijkmechanisme
  - 7.2 Toetscriteria voor goed ingegoten en oppervlakkig overgoten steenzettingen.

## Symbolenlijst

$b$	=	dikte van de filterlaag (m)
$b_{\text{klei}}$	=	dikte van de kleilaag (m)
$B_{\text{klap}}$	=	breedte van golfklap (m)
$c$	=	coëfficiënt m.b.t. Rond Front (1/m)
$c_1, c_2$	=	coëfficiënten met betrekking tot de langeduursterkte (-)
$c_H$	=	coëfficiënt met betrekking tot de langeduursterkte (-)
$D$	=	dikte van de toplaag (m)
$D_{\text{f15}}$	=	korrelgrootte van het filter die door 15 gewichtsprocenten wordt onderschreden (m)
$E$	=	elasticiteitsmodulus van de toplaag (Pa)
$E_{\text{VGD}}$	=	elasticiteitsmodulus van de toplaag, bepaald door middel van valgewicht-deflectiemetingen (in formule invullen in GPa!) (Pa)
$E(f)$	=	energiedichtheid als functie van $f$ (grafiek van het spectrum) ( $\text{m}^2\text{s}$ )
$f$	=	golffrequentie = $1/T$ (Hz)
$f_B$	=	invloedsfactor voor de belastingduur m.b.t. de belasting (-)
$f_S$	=	invloedsfactor voor de belastingduur m.b.t. de sterkte (-)
$F$	=	$\xi_{\text{op}}^{2/3} H_s / \Delta D$ = stabiliteitparameter (-)
$F_A$	=	stabiliteitparameter op de grens van stabiel en instabiel volgens ANAMOS, zonder rekening te houden met de 6-ksi-regel (-)
$F_{1000}$	=	stabiliteitparameter bij een belasting van 1000 golven (-)
$F_N$	=	stabiliteitparameter bij een belasting van $N$ golven (-)
$g$	=	versnelling van de zwaartekracht ( $\text{m/s}^2$ )
$h$	=	waterstand, waterdiepte bij de teen van het talud (m)
$H_s$	=	significante golfhoogte (op basis van energie) (m)
$H_{\text{si}}$	=	significante golfhoogte in proef $i$ (m)
$H_{\text{s1000}}$	=	maximaal toelaatbare significante golfhoogte bij een belastingduur van 1000 golven (m)
$H_{\text{sN}}$	=	maximaal toelaatbare significante golfhoogte bij een belastingduur van $N$ golven (m)
$H_{\text{max}}$	=	grootste gemeten inkomende golfhoogte (m)
$i$	=	verhang in het filter (-)
$i'$	=	$\phi_w/D$ = verhang in de toplaag (-)
$k$	=	doorlatendheid van het filter (gelineariseerd) (m/s)
$k'$	=	doorlatendheid van de toplaag (gelineariseerd) (m/s)
$k_{\text{nik}}$	=	ruwheid voor de stroming in het waterlaagje tussen toplaag en filter (m)
$m_o$	=	nulde moment van de energiedichtheid (oppervlak onder het spectrum) ( $\text{m}^2$ )
$m_{-1}$	=	$\int f^{-1} \cdot E(f) df$
$L_{\text{op}}$	=	$1,56T_p^2$ = golflengte op diepwater op basis van $T_p$ (-)
$L$	=	afstand waarover de stijghoogte in het filter naar bijna nul reduceert ( $L = B_{\text{klap}}/2$ ) (m)
$n$	=	porositeit van het filter (-)
$n$	=	aantal proeven (-)
$N$	=	aantal golven (-)
$N_{\text{cum}}$	=	cumulatief aantal golven tot en met de onderhavige proef (-)
$N_i$	=	aantal golven in proef $i$ (-)

$p_{\max}$	=	maximale druk op het talud tijdens golfklap in een bepaalde golf (Pa)
$p_{\max,2\%}$	=	maximale druk op het talud tijdens golfklap met 2% overschrijdingsfrequentie (Pa)
$p_t$	=	de gemeten druk van de beschouwde drukopnemer ten opzichte van de atmosferische druk (Pa);
$p_r$	=	de gemeten druk van de referentie-drukopnemer ten opzichte van de atmosferische druk (Pa).
$q$	=	specifiek debiet door het filter (m/s)
$Q$	=	dwarskrachten in de bekleding (N/m)
$s_{op}$	=	$H_s/L_{op}$ = golfsteilheid (-)
$t$	=	tijd (s)
$t_b$	=	belastingduur (s)
$t_s$	=	stijgtijd tijdens de golfklap (s)
$T_p$	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$T_{pi}$	=	golfperiode tijdens proef i, bij de piek van het spectrum (s)
$T_m$	=	gemiddelde golfperiode (s)
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode (s)
$x$	=	horizontale coördinaat ten opzichte van de teen van het talud (m)
$Y_{x\%}$	=	verplaatsing van de toplaag haaks op het taludoppervlak met x% overschrijdingsfrequentie (m)
$Y_{\max}$	=	grootste verplaatsing van de toplaag in een golf (m)
$Y_{\min}$	=	kleinste verplaatsing van de toplaag in een golf (m)
$Y_{\text{begin}}$	=	verplaatsing van de toplaag aan het begin van de golf of de proef (m)
$Y_{VPL}$	=	verplaatsing van de toplaag zoals die gemeten is door de verplaatsingsopnemers (m)
$Y_{\text{profiler}}$	=	verplaatsing van de toplaag zoals die gemeten is door de profielvolger (m)
$z$	=	niveau op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn (onder water: negatief; $z = Z - h$ ) (m)
$z$	=	niveau op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn waar de zwaarste belasting optreedt (onder water: negatief; $z = Z - h$ ) (m)
$z'$	=	equivalente niveau op het talud = niveau van het snijpunt van een lijn haaks op het talud door het beschouwde punt in het filter en het taludoppervlak (m)
$Z$	=	niveau op het talud ten opzichte van de gootbodem (m)
$Z_f$	=	niveau van de freatische lijn in het filter (m)
$Z_t$	=	de hoogte van het talud ter plaatse van de beschouwde drukopnemer (m);
$Z_r$	=	de hoogte van de referentie-drukopnemer (m);
$\alpha$	=	taludhelling ( $^\circ$ )
$\alpha_{\text{bodem}}$	=	bodemhelling voor de constructie ( $^\circ$ )
$\Delta$	=	$(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van de stenen (-)
$\Lambda$	=	leklengte (m)
$\phi_{wx\%}$	=	stijghoogteverschil over de toplaag met x% overschrijdingsfrequentie (m)
$[\phi_{w2\%}]_{\max}$	=	maximale waarde van het lokale stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie (m)
$\phi_{\text{stat}}$	=	statisch stijghoogteverschil over de toplaag zonder golven (m)
$\phi_{\min 2\%}$	=	minimale stijghoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (bij de voet van het stijghoogtefront) (m)
$\phi_{b2\%}$	=	hoogte van het front behorende bij een stijghoogteverschil met overschrijdings-

- frequentie van 2% (m)
- $\phi_{t(i)}$  = stijghoogte op het tijdstip  $t(i)$ , namelijk tijdens de  $i$ -de bemonstering (s)
- $\xi_{op}$  =  $\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$  = brekerparameter (-)
- $\rho_s$  = soortelijke massa van de stenen ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho$  = soortelijke massa van water ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\theta_{2\%}$  = helling van het stijghoogtefront (gemiddeld onder de stilwaterlijn) met overschrijdingsfrequentie van 2% ( $^\circ$ )



## I Inleiding

Ingevolge de Wet op de Waterkering dienen steenzettingen op waterkeringen vijfjaarlijks getoetst te worden. In de praktijk kan aan veel steenzettingen geen definitief toetsoordeel toegekend worden wegens een gebrek aan wetenschappelijke kennis.

In 2003 is daarom door de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen opgestart, zie bijlage G. Doel van dit programma is het reduceren van deze kennisleemtes teneinde te komen tot scherpere toetsregels en daarmee sneller en vaker tot definitieve toetsresultaten. In het kader van dit onderzoeksprogramma heeft voorliggende rapport betrekking op het deelonderzoek C1 “Onderzoek naar met asfalt ingegoten gezette steenbekledingen”.



Figuur 1.1, modelopstelling in de Deltagoot tijdens serie 1

Het doel van het onderzoek is het vinden van verbeterde toetsregels voor met gietasfalt ingegoten steenzettingen. Daartoe is grootschalig fysisch modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics op een schaal van ongeveer 1:1,5 à 1:2,5. De schaal is niet exact aan te geven, omdat deze bekleding model staat voor een scala aan bekledingen in het prototype.

Het dijktalud was ingebouwd in de Deltagoot met een talud van 1:3,5 en bestond uit gezette basalt op een ingezand filter (gemiddelde toplaagdikte in model: 12,9 cm). In dit onderzoek is de basalt op twee manieren ingegoten (maten op modelschaal):

- **serie 1:** half ingegoten, met een ingieting van 8,5 cm diep, terwijl de onderste 4,4 cm van de spleten was ingewassen met een mengsel van steenslag en zand (spleet voor spleet ingegoten met een emmer, niet over de koppen)
- **serie 2:** volledig ingegoten, met ingieting van 12,9 cm diep in de spleten tot op het filter (uit kubel op talud gegoten en uitgestreken)

Tijdens de proeven zijn de drukken op de toplaag en in het filter gemeten, alsmede de verplaatsingen van de toplaag.

Alle details omtrent de metingen en het proevenprogramma zijn uitvoerig beschrijven door Hofland e.a. (2005). Een korte samenvatting van de uitgevoerde proeven is gegeven in hoofdstuk 3.

Het huidige verslag geeft een analyse van de meetresultaten, resulterend in een voorstel voor een nieuwe toetsmethode voor ingegoten steenzettingen. Deze analyse is te vinden in hoofdstuk 5, terwijl allerlei details ten aanzien van deze analyse te vinden zijn in de bijlagen. In hoofdstuk 6 zijn de conclusies uit de analyse gebruikt om de verschillende aspecten van de belasting en de sterkte te kwantificeren. Dit leidt uiteindelijk in een voorstel voor een toetsmethode.

De conclusies van het onderzoek zijn weergegeven in hoofdstuk 7.

Het onderzoek is uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler in opdracht van de Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau Zeeweringen. De dagelijkse begeleiding is verzorgd door ir. R. Bosters van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van RWS.

## 2 Onderzoeksresultaten uit het verleden

Voordat besloten werd om dit onderzoek in de Deltagoot te gaan uitvoeren waren er al diverse onderzoeken uitgevoerd naar de stabiliteit van ingegoten basalt. In dit hoofdstuk worden die resultaten kort samengevat omdat ze enerzijds bepalend zijn geweest voor de opzet van het huidige modelonderzoek in de Deltagoot, en anderzijds ook een belangrijke bijdrage geven aan het inzicht in de bezwijkmechanismen. Ze dragen daardoor ook bij aan de analyse van deze metingen.

Er is onderscheid gemaakt tussen twee typen met gietasfalt ingegoten bekledingen en twee typen belasting:

- typen ingegoten bekledingen (oude definitie):
  - oppervlakkig overgoten steenzettingen, waarbij het gietasfalt slechts weinig (minder dan 10 cm diep) in de spleten zit
  - goed ingegoten steenzettingen, waarbij ingegoten is tot tenminste 50% van de toplaagdikte en bovendien het gietasfalt tenminste 10 cm diep tussen de stenen zit.
- belastingtypen:
  - statische belasting, als gevolg van een hogere freatische lijn in het filter (dan de buitenwaterstand)
  - dynamische belasting, als gevolg van de golfaanval

De verschillende onderzoeken uit het verleden betreffen doorgaans een van deze typen bekledingen en/of belastingtypen.

### 2.1 Praktijkervaring

In de praktijk is gebleken dat na lange tijd een relatief lage belasting ervoor zorgt dat het gietasfalt op de koppen van de basalt eraf gaat. Als de bekleding oppervlakkig overgoten was, dan verdwijnt ook het beetje gietasfalt uit de spleten. Goed ingegoten bekledingen blijven daarentegen op de lange duur wel in goede staat.

Verder blijkt dat er maar zelden stormschade is aan ingegoten steenzettingen. Er is één geval van stormschade gerapporteerd: In 1976 is ten noorden van Westkapelle bij een storm met windsnelheden tot 28 m/s op een flauw talud 225 m<sup>2</sup> bezweken.

### 2.2 Deltagootproeven op overgoten basalt

In 1997 is de stabiliteit van een oppervlakkig ingegoten bekleding in de Deltagoot onderzocht (Smith e.a., 2000, en Lubbers en Klein Breteler, 2000), zie figuur 2.1. Enkele eigenschappen van die steenzetting waren:

- dikte van de toplaag van overgoten basalt:  $D = 0,20$  m
- de gietasfalt bestond uit 15% bitumen en 16% vulstof en zat tot maximaal 5 cm in de spleten (ingegoten tot 25% van de toplaagdikte)
- relatieve soortelijke massa van de basalt:  $\Delta = 1,955$
- dikte van de filterlaag:  $b = 0,07$  m

- filtermateriaal: 50% steenslag 4-32 mm en 50% kif 0-4 mm, aangevuld met zand
- onder het filter was een dubbele vlijlaag aangebracht en 30 cm klei
- de taludhelling was 1:3,5, met een 5 m brede berm op ca 1 m boven de waterlijn.

Allereerst is kunstmatig een statische overdruk gecreëerd door water in het filter te pompen, waardoor al snel de bekleding vele millimeters omhoog kwam. Daarna zijn proeven uitgevoerd met een golfbelasting, al dan niet in combinatie met statische overdruk. Het bleek dat de constructie erg stabiel was zolang het gietasfalt in goede staat verkeerde. De oppervlakkige ingieting kon echter op den duur niet standhouden, waarna de bekleding bezweek.

Tijdens het eerste deel van het modelonderzoek is de golfbelasting stap voor stap opgehoogd tot  $H_s = 1,56$  m. Gedurende deze belasting (totaal 6 uur; ca. 4 uur met  $1,0 < H_s < 1,6$  m) bleek het asfalt vrij goed in tact te blijven en bleek de bekleding deze zware golfbelasting goed te weerstaan. De zwaarste belasting trad op tijdens proef 3o11:

- statische belasting: freatische lijn in het filter was 13 cm hoger dan de buitenwaterstand
- golfbelasting:
  - significante golfhoogte:  $H_s = 1,56$  m
  - golfperiode bij de piek van het spectrum:  $T_p = 5,3$  s
  - golfsteilheid:  $s_{op} = H_s/L_{op} = 0,036$
  - brekerparameter:  $\xi_{op} = \tan\alpha/\sqrt{s_{op}} = 1,51$
  - belastingparameter:  $H_s/\Delta D = 4,07$
  - stabiliteitparameter:  $F = \xi_{op}^{2/3} H_s/\Delta D = 5,4$

Uiteindelijk is het de lange duur geweest die op deze oppervlakkig ingegoten bekleding geleid heeft tot schade.



Figuren 2.1, overgieten van basalt in Deltagoot (links) en blaas van de gietasfalt na langdurige golfaanval (rechts)

Het Deltagootonderzoek uit 1997 heeft geleid tot de volgende conclusies voor oppervlakkig overgoten basalt (ingegoten tot 25% van de toplaagdikte), die al enigszins beschadigd was geraakt en waarbij vermoedelijk het filter niet meer geheel dichtgeslibd was:

- 1) De maatgevende belasting voor de samenhangende toplaag als geheel blijkt op te treden tijdens de maximale golfneerloop (tijdens een hoog en steil stijghoogtefront op het talud). De toplaag maakt dan een relatief grote beweging omhoog.
- 2) Een eerste schatting voor de stijghoogteverschillen over een enigszins beschadigde bekleding van overgoten basalt kan bepaald worden met ANAMOS als er gerekend wordt met een lek lengte van orde 1 à 2 m.
- 3) Voor de eenvoudige toetsing werd voorlopig het volgende aanbevolen:
  - a) Allereerst moet de statische overdruk vergeleken worden met het eigen gewicht van de bekleding. Deze statische overdruk mag niet groter worden dan het eigen gewicht.
  - b) Langdurige statische overdruk over een overgoten constructie leidt tot het loslaten van het gietasfalt, waardoor uiteindelijk het gietasfalt plaatselijk van de basaltkoppen wordt afgedrukt. Dergelijke langdurige statische overdruk mag niet optreden.
  - c) Ten aanzien van de golfbelasting kan in de eenvoudige toetsing de bekleding beoordeeld worden alsof het een ongunstige constructie is (type 3c) als er sprake is van weinig doorlatende ondergrond en langdurige golfbelasting. Voor kort durende belasting (paar uur) kan een bekleding met gietasfalt in perfecte staat op een weinig doorlatende ondergrond getoetst worden als een normale constructie (type 3b).

### 2.3 Metingen langs de Westerschelde met statische belasting

Tijdens het Deltagootonderzoek van 1997 was duidelijk geworden dat een statische overdruk groter dan het eigengewicht van de toplaag direct tot het oplichten van de toplaag leidt. Om te onderzoeken of dit ook daadwerkelijk leidt tot het bezwijken van de toplaag, zijn een aantal praktijkproeven uitgevoerd langs de Westerschelde.



Figuur 2.2, inpompproef bij Kruiningen

## Inpompproef

In 2001 is met prototype-metingen op een dijk bij Kruiningen (zie figuur 2.2) (Nienhuis en Klein Breteler, 2002) vastgesteld dat de bekleding nog niet bezwijkt, zodra het statische stijghoogteverschil groter wordt dan het eigen gewicht. Het blijkt dat de bekleding dan weliswaar een beetje wordt opgelicht (1 tot 16 mm), maar er ontstaat vervolgens zoveel ruimte tussen de toplaag en het filter, dat hierdoor veel water kan worden afgevoerd naar de teen. Dit leidt tot een aanzienlijke afname van het stijghoogteverschil. Het stijghoogteverschil neemt zoveel af totdat er evenwicht ontstaat, waarbij er nog net voldoende water kan worden afgevoerd, maar er voldoende stijghoogteverschil overblijft om de toplaag iets van het filter op te lichten. Dit mechanisme is later bevestigd tijdens vergelijkbare metingen op de dijk bij Baarland en bij de Willem Annapolder. Dit onderzoek is samengevat door Meijers en Klein Breteler (2003).

Op basis van de inpompproeven is geconcludeerd dat het waarschijnlijk essentieel is dat de bekleding goed ingegoten was en dat de teen zodanig doorlatend was dat de overdruk daarlangs kon wegvloeien. Het is nog niet gezegd dat bij oppervlakkig overgoten steenzettingen of steenzettingen met een dichte teen hetzelfde mechanisme te zien zal zijn.

Tijdens de infiltratieproeven was er een constante aanvoer van water die onder de toplaag stroomde. De constante voeding van het filter met water van bovenaf is ook tijdens stormomstandigheden te verwachten als er boven de ingegoten bekleding een niet-ingegoten zetting ligt. De golfoploop brengt water tot hoog op die bekleding, waarna het water in het filter zakt en afstroomt tot onder de ingegoten bekleding.

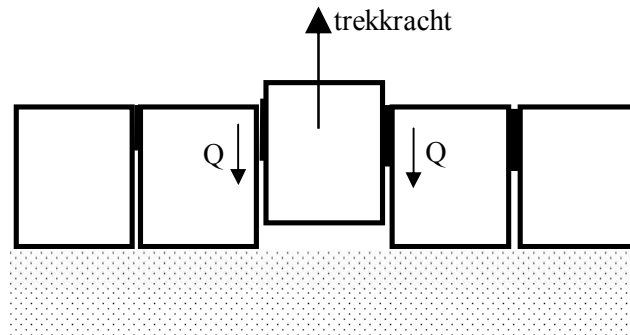
Daarentegen kan een waterdichte afdichting (waterslot) langs de bovenkant (bovenste overgangsconstructie) van de ingegoten bekleding het gevuld raken van de filterlaag beperken. Mocht de filterlaag toch gevuld raken via de teen of via gaatjes, dan zal bij een te grote overdruk de bekleding één keer iets oplichten, waarna het filter weer leegstroomt (tot een niveau gelijk aan de buitenwaterstand).

## Trekproeven

Voorafgaand aan de inpompproef bij Kruiningen zijn er trekproeven gedaan op vijf locaties. Steeds is aan één blok getrokken en is gemeten welke verplaatsing dat teweegbracht. Bij het opvoeren van de trekkracht is een aantal keren het blok uit de bekleding getrokken. De proeven waren erop gericht om de stijfheid van de toplaag te meten, maar kunnen ook gebruikt worden voor het maken van een schatting van de dwarskracht bij bezwijken.

De trekproeven waren relatief traag uitgevoerd, zodat de stijfheid van de bekleding is gemeten bij een quasi-statische belasting (tientallen minuten), die iets sneller is dan de belasting die volgt uit het getij (paar uur). De metingen tijdens twee goed gelukte proeven resulteerden in een elasticiteitsmodulus van respectievelijk 42 MPa en 200 MPa. Het is te verwachten dat bij een kortdurende belasting (minder dan 1 s), zoals tijdens golfklappen, de elasticiteits-modulus véél hoger is. Door Klein Breteler (2002) is op basis van metingen aan gietasfalt aannemelijk gemaakt dat de elasticiteitsmodulus van de toplaag tijdens golfklappen orde 1 GPa zou kunnen zijn.

Voor een schatting van de dwarskracht bij bezwijken kan gebruik gemaakt worden van de trekkracht die nodig is om een blok uit de bekleding te trekken. Immers, als een blok uit de bekleding getrokken wordt, dan wordt zijn omtrek belast met een dwarskracht en kan dat leiden tot een verschuiving (zuil beweegt uit de bekleding, zie figuur 2.3). De trekkracht houdt evenwicht met de dwarskrachten op het contactvlak van de getrokken zuil met de omliggende zuilen (contactoppervlak = omtrek x toplaagdikte). De dwarskracht,  $Q$ , per meter bekleding is dus gelijk aan de trekkracht gedeeld door de omtrek van de getrokken zuil.



Figuur 2.3, dwarskracht,  $Q$ , op de omtrek van het getrokken zuil tijdens trekproef



Figuren 2.4, trekproeven bij Kruiningen

Uit de metingen is gebleken dat de trekkracht bij bezwijken gelijk was aan 23 kN, terwijl de omtrek ongeveer 0,86 m was. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de geschatte dwarskracht bij bezwijken ongeveer gelijk is aan  $23/0,86 = 26$  kN/m (Klein Breteler 2003).

## 2.4 Theoretische beschouwing van de stabiliteit tijdens golfaanval

In deze paragraaf is de theoretische beschouwing van de stabiliteit volgens Klein Breteler (2002) samengevat.

De veldwaarnemingen hebben geleid tot de conclusie dat de statische belasting de bekleding over het hele oppervlak iets oplicht, waarbij er evenwicht is tussen de zwaartekracht van de toplaag en het stijghoogteverschil als gevolg van de statische belasting. Dit evenwicht, met een dunne waterlaag tussen de toplaag en het filter, vormt in de rekenmethode van Klein Breteler (2002) het uitgangspunt voor de beoordeling van de stabiliteit bij een combinatie van statische belasting en golfbelasting.

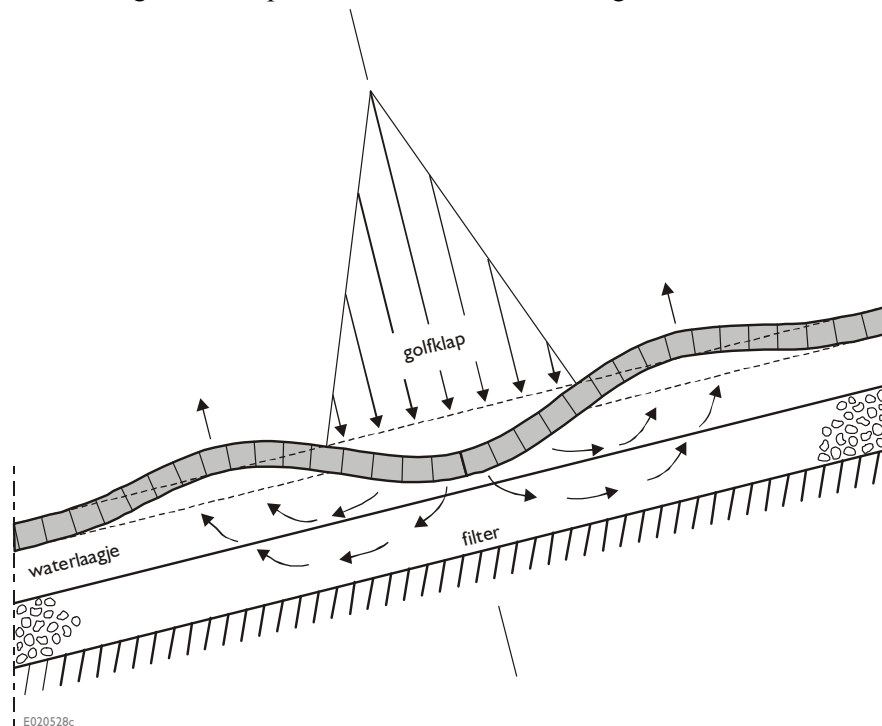
De golfbelasting bestaat uit een stijghoogteverschil over de toplaag tijdens maximale golfneerloop (golffront) en de golfklap.

Het dunne waterlaagje tussen de toplaag en het filter kan grote gevolgen hebben voor de stabiliteit onder golfaanval. De verschildruk (opwaartse kracht) die ontstaat net vóór de golfklap zal bij een toplaag die goed aansluit op een dichtgeslibde filterlaag nauwelijks kunnen leiden tot een opwaartse beweging. Dit komt omdat het water nauwelijks kan toestromen naar het deel van de toplaag dat omhoog wil bewegen (verhinderde toestroming naar de groeiende ruimte onder een bewegende toplaag). Als er echter een waterlaagje aanwezig is, dan kan het watertransport daardoorheen plaatsvinden.

Verder kan de neerwaartse belasting tijdens de golfklap voor een belangrijk deel gedragen worden door de filterlaag als de toplaag daarop goed aansluit. Met het waterlaagje ertussen zal er tijdens elke golfklap buiging ontstaan in de toplaag, die buigspanningen en grote dwarskrachten met zich meebrengen.

Ook als er een goed functionerend waterslot langs de bovenzijde van de ingegoten bekleding is aangebracht, kan tijdens golfneerloop de bekleding korte tijd enigszins (orde 1 mm) opgelicht worden. In (Klein Breteler, 2003) is berekend dat een dergelijk kleine oplichting tijdens de golfklap al tot aanzienlijke dwarskrachten in de toplaag kan leiden.

De belasting door de golfklap blijkt maatgevend te zijn ten opzichte van die tijdens de maximale golfneerloop, en is onderstaand nader uitgewerkt.



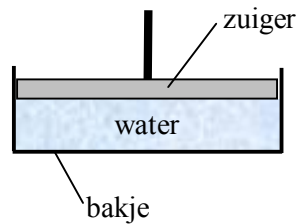
Figuur 2.5, Schematische weergave van de beweging van de toplaag als gevolg van de golfklap

Als de toplaag op een dunne waterlaag rust, zal een golfklap de bekleding plaatselijk omlaag drukken. Het water dat daar onder de toplaag aanwezig is, zal door deze beweging opzij geperst worden, hetgeen gepaard gaat met een verhoogde stijghoogte in dit gebied. Deze verhoogde stijghoogte in het dunne waterlaagje en in het filter zal zich ook uitstrekken tot



naast het gebied waar de golfklap plaatsvindt. Daardoor zal naast het golfklapgebied de bekleding juist omhoog willen bewegen. Dit is geschetst in figuur 2.5.

De druk van de golfklap wordt voor een deel gebruikt om de toplaag te buigen, en voor een deel wordt hij gebruikt om het water in het waterlaagje en in de filterlaag opzij te persen (en ook de traagheidskrachten te overwinnen). Naarmate de doorbuiging groter wordt, zal er meer druk nodig zijn om de doorbuiging in stand te houden. De druk die nodig is om het water weg te persen, is juist evenredig met de snelheid waarmee de toplaag omlaag beweegt, en niet afhankelijk van de grootte van de doorbuiging. Naarmate de snelheid toeneemt zal ook het water met een grotere snelheid moeten wegstromen en daar moet een grotere stromingsweerstand voor overwonnen worden.



Figuur 2.6, water gevulde filterlaag en toplaag met daartussen een waterlaagje, schematiseerd tot een bakje (= filter) en zuiger (toplaag)

Het mechanisme dat het water een groot deel van de golfklap kan dragen, kan toegelicht worden aan de hand van een eenvoudige schematisatie. We beschouwen daartoe een dicht bakje, gevuld met water, en van boven afgesloten met een zuiger (zie figuur 2.6). Als de zuiger goed aansluit op de wanden van het bakje, dan kan de zuiger niet naar beneden bewegen, omdat het water vrijwel incompressibel is en niet weg kan. Drukken we op de zuiger, dan beweegt de zuiger niet, maar wordt onze kracht omgezet in een waterdruk in het water. Het water geeft dus de reactiekracht die nodig is om de zuiger in evenwicht te houden. Naarmate we harder drukken, zal de druk in het water toenemen.

Vervolgens kunnen we een klein gaatje maken in het bakje. Als we dan weer op de zuiger drukken, dan kunnen we de zuiger langzaam naar beneden duwen, terwijl tegelijkertijd het water wegstroomt door het kleine gaatje. Geven we daarentegen een harde klap op de zuiger, dan is de belasting zo kort dat er nauwelijks water door het gaatje weg kan stromen en kan dus ook de zuiger nauwelijks naar beneden bewegen. Onze klap wordt dan opgevangen door een tijdelijke verhoging van de druk in het water.

De ingegoten toplaag vervult de functie van de zuiger, terwijl het filter met waterlaagje vergeleken kan worden met het bakje met water met een gaatje. De harde klap wordt verzorgd door de golfklap.

Voor dit gecompliceerde dynamische gedrag van de toplaag tijdens de golfklap is door Klein Breteler (2003) een rekenmethode opgesteld om de orde van grootte van de toplaagbeweging en de daarmee samenhangende dwarskrachten te kwantificeren. Deze methode bestaat uit een iteratief rekenproces en is onderstaand kort samengevat.

Een deel van de golfklapbelasting zal gebruikt worden om de toplaag te buigen, terwijl de rest wordt opgevangen door de verhoogde waterdruk in het dunne waterlaagje onder de toplaag. Op basis van een aangenomen doorbuiging kan berekend worden hoeveel van de golfklapbelasting gebruikt is voor de doorbuiging. Immers, er is een directe relatie tussen de belasting van een balk en de doorbuiging ervan. Als hiermee het deel van de

golfklapbelasting berekend is dat gebruikt is voor het buigen van de toplaag, dan is de rest van de belasting beschikbaar voor het wegpersen van het water onder de toplaag.

De verhoogde stijghoogte in het filter onder de golfklap is ook op enige afstand van de golfklap nog aanwezig en veroorzaakt een verhang in het filter en in het dunne waterlaagje. Met een doorlatendheidsrelatie is dit verhang om te rekenen naar een debiet. Dit debiet is nu evenredig met de snelheid waarmee de toplaag omlaag beweegt. Die snelheid, vermenigvuldigd met de grootte van de tijdstap, levert nu de grootte van de doorbuiging in de tweede tijdstap, waarna de hele rekenprocedure in de tweede en volgende tijdstappen kan worden herhaald.

Het rekenproces gaat als volgt:

1. start van de berekening
2. berekening van de golfklapgrootte op het tijdstip
3. berekening van de stijghoogte onder de toplaag
4. berekening van het debiet in het dunne waterlaagje en het filter onder de golfklap
5. berekening van de snelheid van de toplaag
6. berekening van de grootte van de doorbuiging in de tweede tijdstap
7. berekening van de golfklapgrootte en herhaling van stap 3 t/m 7 tot het maximum van de golfklap

Door een aantal berekeningen uit te voeren is aangetoond dat het resultaat nauwelijks afhangt van de stapgrootte en de beginwaarden, mits er minstens 20 stappen worden doorlopen en het begintijdstip relatief klein wordt genomen t.o.v. de golfklapduur. Ter vereenvoudiging is aangenomen dat de spleetbreedte niet veranderd.

## 2.5 Kennisleemtes

De diverse onderzoeken hebben geleid tot enig inzicht in bepaalde aspecten van de stabiliteit van ingegoten steenzettingen, maar waren toch onvoldoende om een goede toetsmethode op te baseren. Zo was het nog steeds moeilijk voor te stellen volgens welk mechanisme een ingegoten bekleding tijdens golfaanval zou kunnen bezwijken. De theorie uit paragraaf 2.4 was wel veelbelovend, maar er was een verificatie nodig om er echt in te gaan geloven.

Daarom is besloten proeven uit te voeren op goed ingegoten bekledingen in de Deltagoot, en daarbij de stijghoogte op de toplaag en in het filter te meten, alsmede de verplaatsingen van de toplaag tijdens de golven. Hiermee kan voldoende inzicht verkregen worden in het bezwijkmechanisme en kan een nieuwe toetsmethode opgesteld worden.

Het modelonderzoek in de Deltagoot is omschreven in hoofdstuk 3. De aanpak van de verwerking van de resultaten is gegeven in hoofdstuk 4, gevolgd door de analyse van de resultaten in hoofdstuk 5 en 6. De conclusies staan in hoofdstuk 7.

### 3 Modelopstelling in Deltagoot en proevenprogramma

Het modelonderzoek naar de stabiliteit van ingegoten basalt in de Deltagoot is uitgevoerd met een bekleding met de volgende eigenschappen (zie ook figuur B1 in bijlage B):

- talud: 1:3,5
- toplaag: gezette basalt  
gemiddelde toplaagdikte:  $D = 12,9$  cm  
soortelijke massa van de basalt:  $3033$  kg/m<sup>3</sup>
- filterlaag: ingezand tot  $z' = +4,35$  m boven de gootbodem (niveau van het taludoppervlak ter plaatse van de overgang), en daarboven schoon.  
steenslag 4-22 mm ( $D_{f15} = 5,6$  mm) vermengd met 23% zand  
gemiddelde filterlaagdikte:  $b = 7,9$  cm
- kleilaag: laagdikte:  $b_{\text{klei}} = 30,2$  cm
- zandlichaam: korrelgrootte:  $D_{50} = 206$   $\mu\text{m}$
- ingegoten:  $Z < +1,60$  m: niet ingegoten basalt  
vanaf  $Z = +1,6$  m tot  $+6$  m: asfaltmastiek met zand en 20% bitumen

De schaal van het modelonderzoek was ongeveer 1:2 ten opzichte van de bekledingen in het prototype. In dit rapport worden alleen de modelmaten gehanteerd.

Er zijn twee soorten ingietingen getest:

- serie 1: half ingegoten, met een ingieting van 8,5 cm diep (spleet voor spleet ingegoten met een emmer, niet over de koppen) (ingegoten tot 66% van de toplaagdikte)
- serie 2: volledig ingegoten, met ingieting van 12,9 cm tot op het filter (uit kubel op talud gegoten en uitgestreken) (ingegoten tot 100% van de toplaagdikte)

Nadat aan het eind van serie 1 schade was ontstaan aan de bekleding, is een deel van de toplaag hersteld en volledig ingegoten, namelijk voor  $+1,9$  m  $< Z < +4,4$  m boven de gootbodem.

Bij het analyseren van de resultaten is er onderscheid gemaakt in 3 proevenseries:

- **serie 1:** proef P00 tot en met proef P05  
De bekleding was tijdens deze serie slechts tot halve spleethoogte ingegoten en bovendien was het ingieten gebeurd met een emmer in plaats van een kubel. Hierdoor was de massa hete gietasfalt tijdens het ingieten op het talud relatief klein, waardoor het snel kon afkoelen. Dit heeft ertoe geleid dat de basalt matig was ingegoten, waarbij de kleine spleten niet zo goed gevuld waren met gietasfalt. Later is met een warmtebehandeling en aanvullend ingieten met reparatiebitumen gezorgd dat de toplaag wel waterdicht was.  
De bekleding werd daardoor gekenmerkt door een matige samenhang en een lage doorlatendheid van de toplaag.
- **serie 2a (met belasting hoog op het talud):** proef P11 tot en met P12, P12B tot en met P16 en proef P22 tot en met P23a

De bekleding was voor deze serie goed ingegoten tot onderin de spleten tussen de basalt. Het gietasfalt was vrijwel nergens in het filter gedrongen. De bekleding werd gekenmerkt door een grote samenhang en kleine doorlatendheid.

- **serie 2b (met belasting laag op het talud):** proef P12A en P17 tot en met P21

De bekleding was van dezelfde kwaliteit als serie 2a, maar vlak onder de meest belaste zone was de bekleding niet ingegoten. Gedurende de proeven was de niet-ingegoten basalt gevuld met steenslag en zand, waardoor het waarschijnlijk een vrij lage doorlatendheid had, maar doorlatender was dan de ingegoten bekleding.

De bekleding uit serie 2a en 2b bestond uit één geheel. Het onderscheid tussen beide series kan alleen gemaakt worden doordat de belastingzone tijdens serie 2a boven die tijdens serie 2b zat. Daardoor kunnen deze proevenseries als min of meer onafhankelijke series opgevat worden.

De freatische lijn in het filter kon kunstmatig opgehoogd worden door water via een infiltratiedrain in het filter te pompen. Deze drain lag in het filter op  $z' = +4,50$  m (niveau van het taludoppervlak boven de gootbodem ter plaatse van de drain). De drain was tijdens alle proeven aanwezig, maar is alleen tijdens proef P00 gebruikt om de freatische lijn te verhogen.

Alle details omtrent de modelopstelling zijn gerapporteerd door Hofland e.a. (2005).

Voor de karakterisering van de samenhang in de toplaag en daarmee de kwaliteit van de ingieting, zijn voorafgaand aan serie 1 en serie 2a valgewichtdeflectiemetingen (VGD-metingen) uitgevoerd. Dit levert een indicatie van de elasticiteitsmodulus van de bekleding op. Deze VGD-metingen zijn ook uitgevoerd op een prototypedijk bij Kruiningen. De resultaten van deze metingen staan in tabel 3.1.

Locatie	elasticiteitsmodulus, $E$ , op modelschaal [GPa]	elasticiteitsmodulus, $E$ , op prototypeschaal [GPa]
Kruiningen, prototype	n.v.t.	2,0
Deltagoot, serie 1	0,5	1,0
Deltagoot, serie 2	10,5	21,0

Tabel 3.1. Gemeten stijfheden van ingegoten steenbekledingen met VGD metingen (Hofland e.a. 2005).

Zoals afgeleid door Hofland e.a. (2005) geldt voor de elasticiteitsmodulus dat deze verschaalt met de lengteschaal. De gemeten waarden in de Deltagoot moeten daarom vermenigvuldigd worden met 2 om de overeenkomstige waarden in het prototype te krijgen (voor een bekleding met dikte van 26 cm).

De VGD-metingen en de golfproeven in de Deltagoot zijn bij ongeveer dezelfde temperatuur uitgevoerd. De meting bij Kruiningen is bij relatief warm weer gedaan, waardoor de elasticiteitsmodulus relatief laag is. In de winter, als er veruit de grootste kans is op het optreden van de toetscondities, is de temperatuur lager en de elasticiteitsmodulus hoger. Dit kan mogelijk een factor twee schelen.

De belangrijkste karakteristieken van de golfproeven zijn weergegeven in tabel 3.2.

In deze tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

- h = waterdiepte (m)
- $H_s$  = significante golfhoogte (m)
- $H_{max}$  = grootste gemeten inkomende golfhoogte (m)
- $T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
- $T_{m-1,0}$  = spectrale golfperiode (s)
- $S_{op}$  =  $H_s/L_{op}$  = golfsteilheid (-)
- $L_{op}$  =  $1,56T_p^2$  = golflengte op diepwater op basis van  $T_p$  (-)
- $\xi_{op}$  =  $\tan\alpha/\sqrt{s_{op}}$  = brekerparameter (-)
- F =  $\xi_{op}^{2/3}H_s/\Delta D$  = stabiliteitsparameter (-)
- N = aantal golven (-)
- D = toplaagdikte (m)
- $\Delta$  = relatieve soortelijke massa van de toplaag (-)

In de tabel is ook een schatting gegeven van de zwaarst belaste zone. Dit is berekend op basis van de formules van Klein Breteler en Eysink (2005):

$$-0,6H_s\xi_{op} < z < -0,2H_s\xi_{op} \quad (3.1)$$

met:

z = niveau op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn waar de zwaarste belasting optreedt (onder water: negatief;  $z = Z - h$ ) (m)

serie	Proef	h [m]	zwaarst belaste zone [m]		VPL in belaste zone	$H_s$	$H_{max}$	$T_p$	$T_{m-1,0}$	$\xi_{op}$	$S_{op}$	$H_s/\Delta D$	F	N	duur
			van Z =	tot Z =		[m]	[m]	[s]	[s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[uur]
1	P00	4,30	3,6	4,1	8-9	0,49	1,01	4,91	4,29	2,49	0,013	1,89	3,46	268	0,28
1	P01	3,90	3,1	3,6	7-8	0,68	1,21	4,30	3,66	1,86	0,023	2,59	3,92	2819	2,50
1	P02	3,90	3,2	3,7	7-8	0,68	1,14	4,16	3,72	1,80	0,025	2,60	3,84	2746	2,50
1	P03	3,90	2,9	3,6	(6)-7-8	0,95	1,72	4,98	4,50	1,82	0,025	3,63	5,41	2386	2,50
1	P04	3,90	2,9	3,6	(6)-7-8	0,96	1,64	4,93	4,49	1,79	0,025	3,67	5,42	2367	2,50
1	P05	4,10	2,7	3,6	6-7-8	1,22	1,63	6,03	5,01	1,95	0,021	4,64	7,25	89	0,11
2a	P11	3,91	3,2	3,7	7-8	0,67	1,18	4,20	3,72	1,83	0,024	2,56	3,83	2525	2,50
2a	P11B	3,92	3,2	3,7	(7)-8	0,67	1,12	4,03	3,73	1,76	0,027	2,56	3,72	2612	2,34
2a	P12	4,11	3,1	3,8	7-8	1,11	1,62	4,62	4,22	1,57	0,033	4,22	5,70	1084	1,11
2b	P12A	3,19	2,3	2,9	5-6	0,75	1,14	4,64	4,01	1,91	0,022	2,85	4,40	512	0,50
2a	P12B	3,59	2,7	3,3	6-7	0,79	1,15	4,51	3,97	1,81	0,025	3,01	4,47	481	0,50
2a	P13	4,11	3,2	3,8	(7)-8	0,97	1,39	4,17	3,84	1,52	0,036	3,69	4,86	1037	1,00
2a	P14	4,25	3,0	3,8	7-8	1,02	1,70	5,56	4,97	1,96	0,021	3,91	6,12	1170	1,33
2a	P14B	3,51	2,7	3,2	6-7	0,82	1,23	4,36	4,08	1,72	0,028	3,13	4,49	506	0,50
2a	P15	4,37	3,0	3,9	7-8-(9)	1,32	1,69	5,75	5,34	1,78	0,026	5,04	7,41	174	0,22
2a	P16	4,92	3,7	4,5	9	1,09	1,42	5,47	4,72	1,87	0,023	4,16	6,31	155	0,18
2b	P17	2,90	1,7	2,5	(3)-4-5	0,93	1,32	5,68	5,21	2,10	0,018	3,54	5,81	1139	1,32
2b	P18	3,15	1,8	2,7	(3)-4-5	1,10	1,54	6,09	5,57	2,07	0,019	4,19	6,81	1147	1,39
2b	P19	3,15	1,8	2,7	4-5	1,13	1,57	5,76	5,21	1,94	0,022	4,29	6,67	1735	2,00
2b	P20	3,17	1,8	2,7	4-5	1,14	1,61	5,82	5,22	1,95	0,022	4,34	6,76	1750	2,00
2b	P21	3,46	1,8	2,9	4-5-6	1,24	1,71	7,04	6,30	2,25	0,016	4,74	8,15	1135	1,56
2a	P22	4,68	3,0	4,1	7-8-9	1,41	2,36	6,52	5,81	1,96	0,021	5,36	8,40	1102	1,47
2a	P23	4,71	2,8	4,1	(6)-7-8-9	1,59	2,18	6,94	6,15	1,96	0,021	6,06	9,50	1212	1,72
2a	P23a	4,70	2,9	4,1	(6)-7-8-9	1,64	2,11	6,67	6,17	1,86	0,024	6,24	9,44	253	0,40

Tabel 3.2, Gemeten golfcondities tijdens het Deltagootonderzoek ( $\Delta$  is gebaseerd op alleen basalt, dus  $\Delta = 2,033$ )

Met deze schatting is ook aangegeven welke verplaatsingsopnemers (VPL) in die zwaarbelaste zone zitten. Als een nummer van de verplaatsingsopnemer tussen haakjes is geplaatst, dan zit deze op de rand van de zwaarst belaste zone. De verplaatsingsopnemers meten de verplaatsing van de toplaag haaks op het taludoppervlak. De lokatie van de instrumenten is gegeven in figuur B2 en B3.

Tijdens proef P00 t/m P04 en P11 t/m P16 waren 23 drukopnemers (DRO) op de toplaag aangebracht, en 8 in het filter, zie figuur B2 en B3. Vanaf proef P17 waaraan nog slechts drukopnemer 1 t/m 6 op de toplaag, en drukopnemer 24 en 25 in het filter aanwezig.

Tijdens alle proeven waren 7 verplaatsingsopnemers (VPL) aanwezig waarmee de beweging van de toplaag tijdens de proeven kon worden gemeten. Deze hadden een bereik van 5 cm. Helaas bleken verplaatsingsopnemer 6 en 7 tijdens serie 2 niet te werken omdat er gietasfalt tussen de basalt en het instrument was geraakt waardoor het instrument vastgeplakt zat aan de toplaag (zie ook tabel A1). Tijdens proef P04 was VPL 8 bijna en in P05 geheel buiten bereik geraakt (reeds meer dan 5 cm verplaatsing) zodat de verplaatsingen tijdens de golven niet goed meer konden worden gemeten. Ditzelfde was het geval met VPL 9 tijdens de proeven P15 tot en met P23a, VPL 8 tijdens de proeven P17 tot en met P23a en VPL 3 van proef P21 tot en met P23a.

Deze instrumenten zijn tijdens P00 met 10 Hz bemonsterd (ingolfproef) en tijdens de overige proeven met 200 Hz. De VPL's maten echter slechts om de 0,08 s de verplaatsingen (12,5 Hz).

Verder waren er tijdens serie 2 nog 3 hoogtemeters op het talud aangebracht, die geleidelijke veranderingen van de hoogte van de toplaag ten opzichte van de gootbodembodem hebben gemeten. Deze instrumenten waren echter niet bedoeld om de snelle verplaatsingen tijdens afzonderlijke golven te meten.

Tenslotte is na afloop van elke proef met een profielvolger het niveau van het taludoppervlak in 3 of 5 raaien gemeten. De resultaten hiervan zijn gegeven in het meetverslag (Hofland e.a. 2005).

## 4 Aanpak van de analyse

De Deltagootproeven zijn gebruikt als middel om het gewenste doel, namelijk het bepalen van een nieuwe toetsmethode voor ingegoten bekledingen, te bereiken. Daarbij is de kwaliteit van de bekleding gemeten door middel van valgewichtdeflectieproeven. Alle details omtrent deze proeven zijn beschreven door Hofland en Klein Breteler (2005). Een samenvatting van de relevante eigenschappen van de beproefde constructie en het proevenprogramma is gegeven in hoofdstuk 3.

Het modelonderzoek heeft een grote hoeveelheid nuttige data opgeleverd die gebruikt kan worden voor de analyse. Met drukopnemers is de stijghoogte op de toplaag en in het filter als functie van de tijd gemeten, die gebruikt zijn om het stijghoogteverschil over de toplaag te bepalen. Verder zijn de verplaatsingen van de toplaag tijdens de proeven gemeten, en is de resulterende verplaatsing na afloop van de proeven gemeten.

De analyse van deze data is stap voor stap uitgevoerd om op gestructureerde wijze onze weg te vinden in deze grote hoeveelheid meetresultaten, zodat het gedrag van ingegoten steenzettingen onder golfaanval duidelijk wordt:

1. De eerste stap in de analyse betreft het opdelen van de proeven in afzonderlijke golven. Dit maakt het mogelijk om het maximale stijghoogteverschil en de verplaatsing per golf te beschouwen en daarvan overschrijdingskrommen te maken.



Figuur 4.1, golfaanval op ingegoten bekleding in de Deltagoot tijdens serie 2

2. Vervolgens zijn per geselecteerde proef 2 interessante golven gekozen om in detail te beschouwen. Dit zijn de golven waarin een groot stijghoogteverschil over de toplaag is opgetreden, en golven waarin de maximale verplaatsing is opgetreden. Van een proef voorin de twee proevenseries en achterin de twee proevenseries zijn deze geselecteerde

golven van moment tot moment geanalyseerd. Dit heeft een goed inzicht gegeven in de belasting en de reactie van de toplaag daarop.

3. Op basis van de stijghoogte op de toplaag en in het filter is de lek lengte van de bekleding bepaald. De lek lengte is vooral afhankelijk van de doorlatendheid van de toplaag en het filter (zie par. 5.2). Veranderingen van de lek lengte geven daardoor een indruk van de veranderingen aan de toplaag en het filter gedurende het proevenprogramma.
4. Daarna zijn de tijdsignalen van de stijghoogteverschillen gefilterd en geanalyseerd. Er is gefilterd om te zorgen dat de analyse zich niet richt op de allerhoogste stijghoogtepiekjes die slechts 0,005 s duren, maar de meer relevante belastingen met een duur van orde 0,1 s. De belastingen die wat langer duren zullen gemakkelijker tot beweging van de toplaag leiden of tot scheuren.
5. Verder zijn de meetgegevens uitgewerkt, gericht op de locatie waar de vervorming van de toplaag optreedt en de locatie waar de grootste stijghoogteverschillen optreden. Dit is vergeleken met de zwaarst belaste zone op niet-ingegoten steenzettingen, zoals die bepaald is in eerder onderzoek over steenzettingen.
6. Tenslotte zijn de onderlinge relaties uitgewerkt om te komen tot conclusies.

Bij het analyseren van al deze resultaten is er onderscheid gemaakt in 3 proevenseries, zoals omschreven in het vorige hoofdstuk:

- serie 1 (6 proeven, waarvan 5 met drukopnemers in de modelopstelling):
- serie 2a (12 proeven, waarvan 9 met drukopnemers in de modelopstelling):
- serie 2b (6 proeven, alle met drukopnemers in de modelopstelling, maar een kleiner aantal dan in serie 2a)

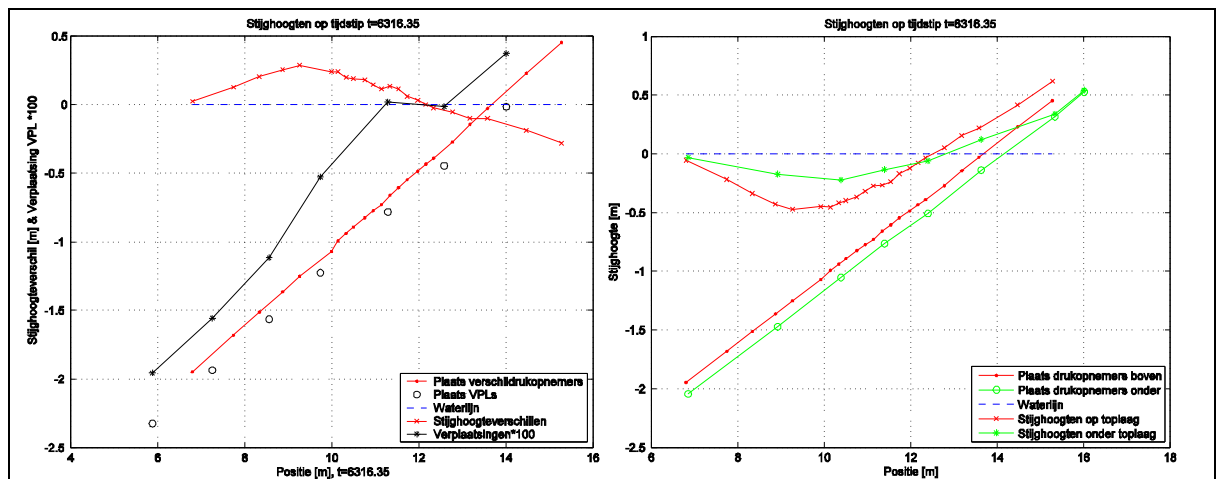
Na serie 1 is de bekleding geheel opnieuw ingebouwd. Serie 2a is uitgevoerd op het bovenste deel van deze tweede bekleding. Serie 2b is uitgevoerd met een lage waterstand, zodat alleen het onderste deel door de golven werd belast.



## 5 Analyse van de meetresultaten

### 5.1 Bezwijkmechanisme

In deze paragraaf wordt aan de hand van de proefresultaten omschreven welke processen er verantwoordelijk zijn voor de geleidelijke degeneratie van de ingegoten steenzetting tijdens golfaanval. Het algemene beeld is dat er eerst sprake is van kleine bewegingen van de toplaag, die ruimte aan het filter geven dat daardoor kan gaan migreren. Hierdoor kan de open neergaande toplaag op een gegeven moment niet meer naar beneden en ontstaat er een cumulerende verplaatsing (S-profiel).



Figuur 5.1, stijgheighteverloop en verplaatsing (100x uitvergroot, ten opzichte van oorspronkelijke talud) tijdens proef P01 op  $t = 6316,35$  s.

Voor een gedetailleerd inzicht in het bezwijkmechanisme worden de meetresultaten tijdens enkele afzonderlijke golven nader geanalyseerd. Als eerste is een golf gekozen uit proef P01 die een stijgheighteverschild over de toplaag heeft gegeven met 2% overschrijdingsfrequentie ( $\phi_{w2\%}$ , gefilterd met low-pass filter op 10 Hz). Er is gekozen voor een 2%-waarde omdat dit een hoog stijgheighteverschild is, maar niet het nadeel heeft van het maximale stijgheighteverschild dat erg afhankelijk is van toeval. Het percentage is bepaald ten opzichte van het aantal golven op het talud.

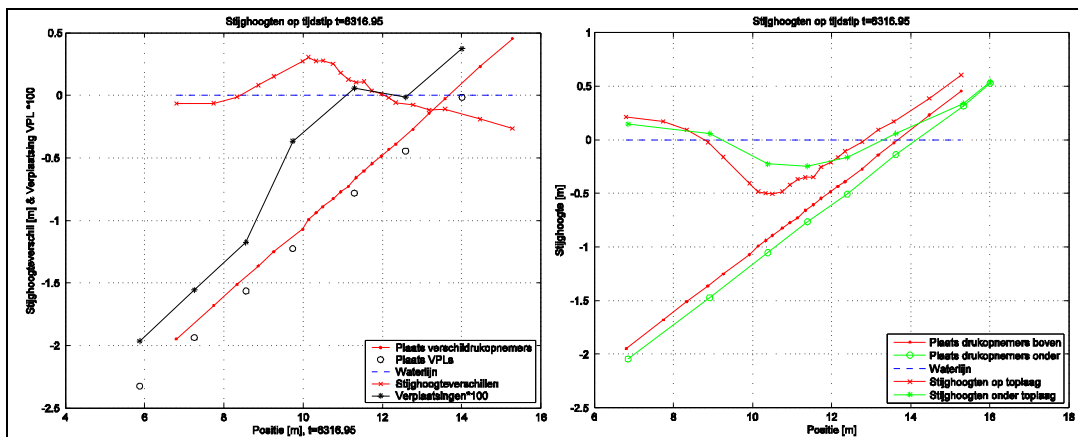
Opgemerkt wordt dat de analyse van andere golven is beschreven in bijlage E.

In figuur 5.1 is links het stijgheighteverschild en de verplaatsing van de toplaag gegeven op het moment  $t = 6316,35$  s. In de rechter figuur staat de stijgheighte op het talud en in het filter. In beide gevallen gaat het om een momentopname van het gefilterde stijgheighteverloop. Het stijgheighteverschild op basis van de rechter figuur (verschil tussen de gefilterde stijgheighte op de toplaag en in het filter) kan iets afwijken van het stijgheighteverschild in de linker figuur. Dit komt omdat er een verschil zit tussen eerst filteren en dan het verschil bepalen, of eerst het verschil bepalen en dan filteren.

Er is gekozen voor het weergeven van gefilterde waarden om te voorkomen dat de momentopname erg door toeval worden gedomineerd. In het ongefilterde signaal kunnen

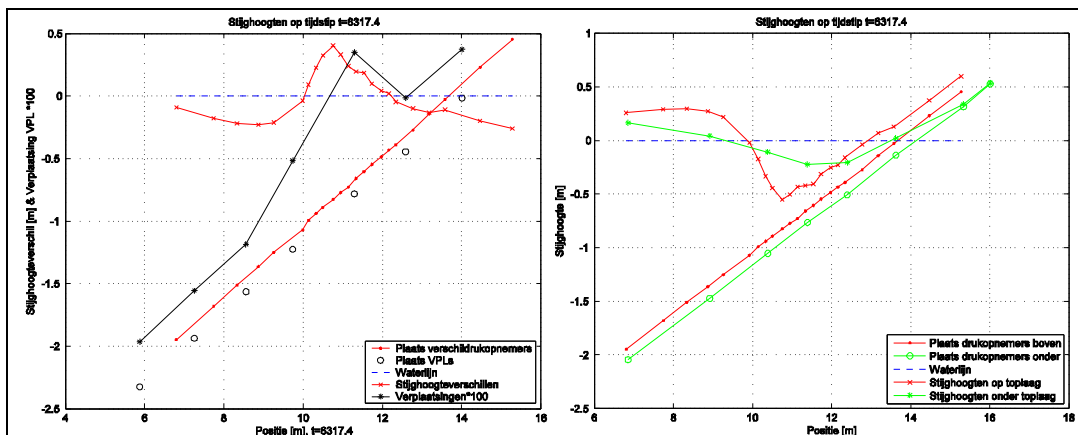
namelijk zeer kortdurende extreme stijghoogtepieken voorkomen, die het algehele beeld wat vertroebelen.

Aan het verloop van de stijghoogte op de toplaag in figuur 5.1 is te zien dat de golf zich aan het terugtrekken is en er zich een steil stijghoogtefront begint te ontwikkelen. Het stijghoogteverloop in het filter laat zien dat er laag op het talud een verhang (en stroming) evenwijdig aan het talud omhoog gericht is, terwijl hogerop het talud er een stroming naar beneden is.



Figuur 5.2, stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef P01 op  $t = 6316,95$  s.

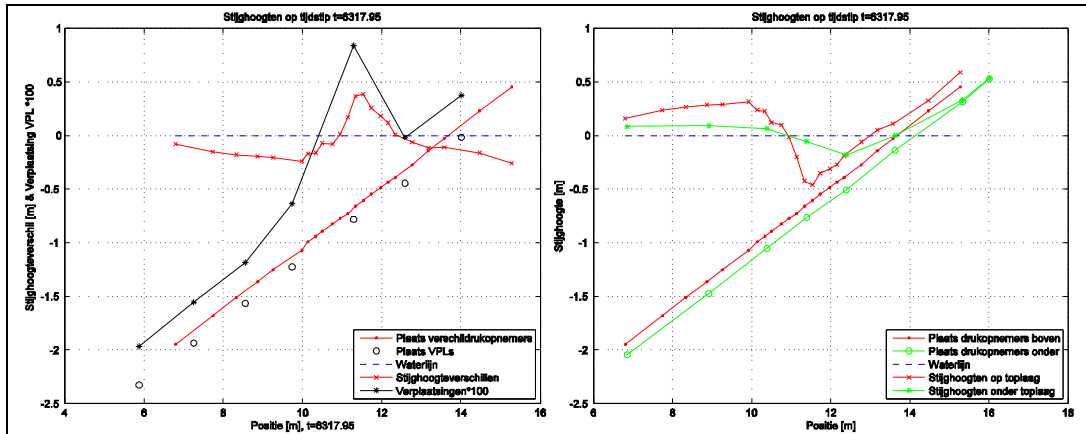
Korte tijd later, namelijk op  $t = 6316,95$  s (zie figuur 5.2), is het stijghoogtefront steiler geworden en iets naar rechts verschoven. De bekleding ter plaatse van  $x = 9,74$  m beweegt nu wat omhoog, terwijl iets lager op het talud op  $x = 8,56$  m de bekleding weer wat omlaag zakt omdat het stijghoogteverschil hier lager is geworden.



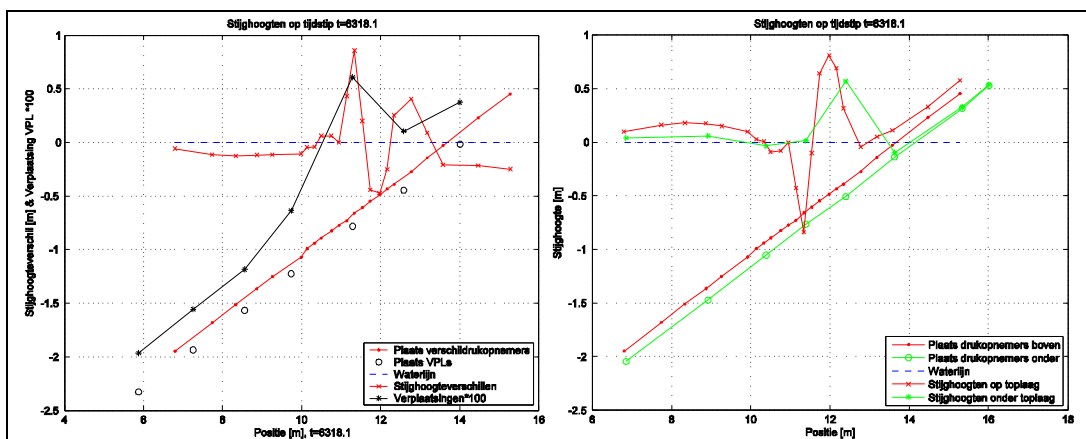
Figuur 5.3, stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef P01 op  $t = 6317,40$  s

Op  $t = 6317,40$  s is het stijghoogtefront weer wat steiler geworden en verder naar rechts verplaatst (zie figuur 5.3). Op  $x = 9,74$  m beweegt de bekleding omlaag omdat daar het stijghoogteverschil sterk is afgenomen, maar op  $x = 11,29$  m gaat hij snel omhoog.

Op  $t = 6317,95$  s wordt de grootste verplaatsing bereikt (zie figuur 5.4). Vlak daarna begint de golfklap op te treden (vanaf  $t = 6317,99$  s), die op  $t = 6318,02$  s zijn maximum bereikt.



Figuur 5.4, stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef P01 op t = 6317,95 s.



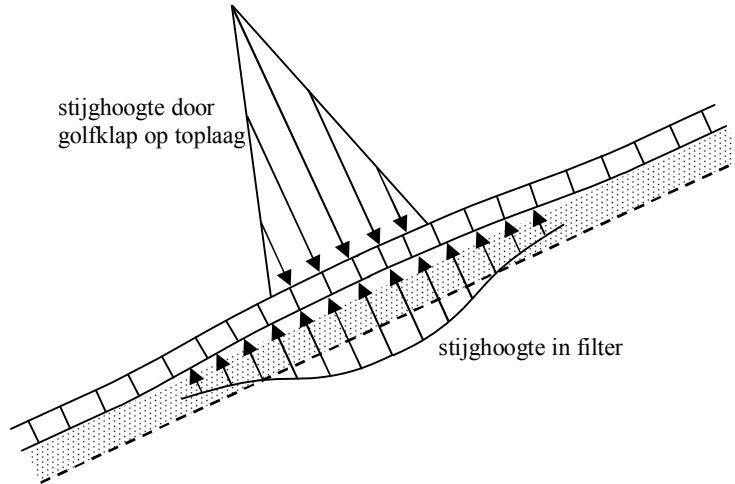
Figuur 5.5, stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef P01 op t = 6318,10 s.

Op t = 6318,10 s is aan het stijghoogteverloop op de toplaag te zien dat er nog steeds een golfklap plaatsvindt (zie figuur 5.5), en de toplaag links daarvan (op x = 11,29 m) niet beweegt. Iets hoger op het talud, namelijk op x = 12,59 m, gaat de toplaag eerst omhoog en gaat daarna wat op en neer bewegen.

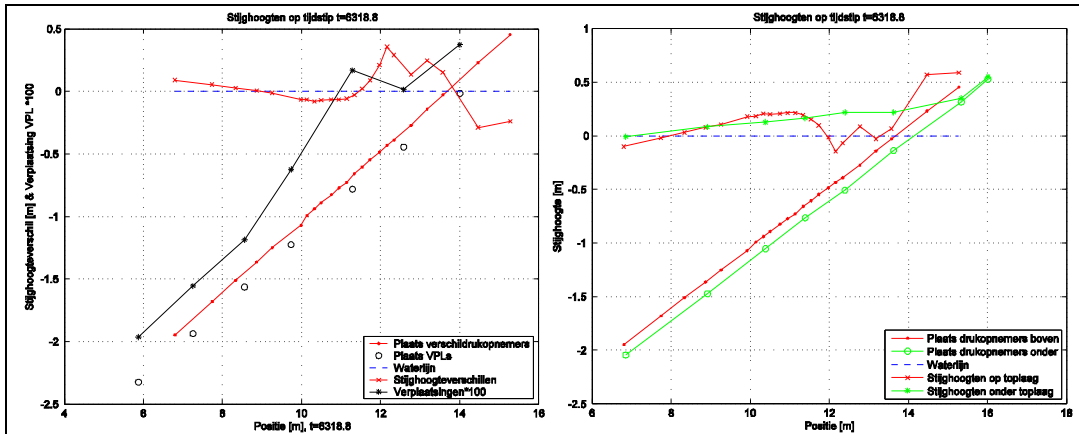
Opmerkelijk is het grote stijghoogteverschil (opwaarts gerichte belasting) aan weerszijden van de golfklap. Dit duidt op het proces dat getoond is in figuur 2.5. De relatief langzame vorming van het golffront leidt tot een opbolling van de toplaag net rechts van de voet van het front (t = 6317,95 s). De relatief snelle golfklap valt vervolgens op deze bolling en leidt tot een toename van de stijghoogte in het filter (t = 6318,10 s). De hoge stijghoogte op de toplaag wordt namelijk doorgegeven naar het water onder de toplaag, omdat het water onder de toplaag niet zo snel weg kan vloeien (zie figuur 2.6). Omdat de toplaag een zekere buigstijfheid heeft, is de zone waar de stijghoogte toeneemt breder dan de golfklap. Dit leidt tot een neerwaarts stijghoogteverschil onder de golfklap en een opwaarts stijghoogteverschil naast de golfklap, zie figuur 5.6. De verschillen zijn echter te kortdurend om tot veel vervorming te leiden.

Te zien is dat het punt links van de klap in afwijking van figuur 2.5 niet omhoog beweegt. Het punt rechts van de klap gaat wel naar boven (x = 12,59 m). Op t = 6318,20 s bereikt de toplaag hier zijn hoogste punt (niet afgebeeld): ca 2 mm hoger dan voor deze golf.

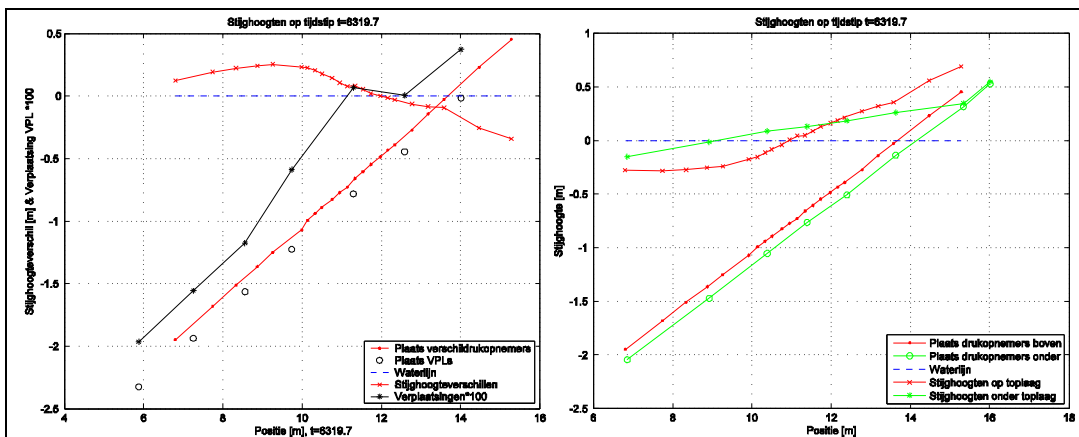
Tijdens de golfklap treedt het grootste opwaartse stijghoogteverschil op (t = 6318,14 s).



Figuur 5.6, schematische weergave van het stijghoogteverloop op de toplaag als gevolg van de golfklap, en de resulterende stijghoogte in het filter die een breder gebied beslaat (het stijghoogteverloop als gevolg van het golffront zijn voor de duidelijkheid weggelaten).



Figuur 5.7, stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef P01 op  $t = 6318,80$  s.



Figuur 5.8, stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef P01 op  $t = 6319,70$  s.

Op  $t = 6318,80$  s is de golfklap ongeveer voorbij en zakt de bekleding langzaam weer naar zijn oorspronkelijke positie (zie figuur 5.7).

Tijdens de golfoploop op  $t = 6319,70$  s (zie figuur 5.8) blijft er een opwaarts stijghoogteverschil in een groot gebied bestaan ( $6 < x < 11$  m) dat ongeveer gelijk is aan het

eigen gewicht van de toplaag. Ter plaatse van  $x = 8,56$  m leidt dat zelfs tot een omhoog gaande beweging van de toplaag.

Het stijghoogteverloop in het filter heeft ter plaatse van  $x \approx 15$  m zo'n hoge waarde, dat kennelijk de freatische lijn in het filter een paar decimeter omhoog is gegaan. Dit draagt bij aan het stijghoogteverschil, in combinatie met de lagere stijghoogte op het talud.

Aan de hand van het stijghoogteverloop in het filter is ook te zien dat er een behoorlijke stroming evenwijdig aan het talud naar beneden gericht is.

Uit bovenstaande analyse blijkt dat de opwaartse beweging van de toplaag plaatsvindt tijdens het steile stijghoogtefront op het talud gedurende de golfneerloop, dus voordat de golfklap optreedt. Aan het begin van de golfklap is de verplaatsing maximaal. Het grootste opwaartse stijghoogteverschil ontstaat tijdens de golfklap, omdat dan de toplaag omlaag geduwd wordt en het water eronder onder druk komt te staan. Dit leidt tot grote stijghoogteverschillen vlak naast de golfklap.

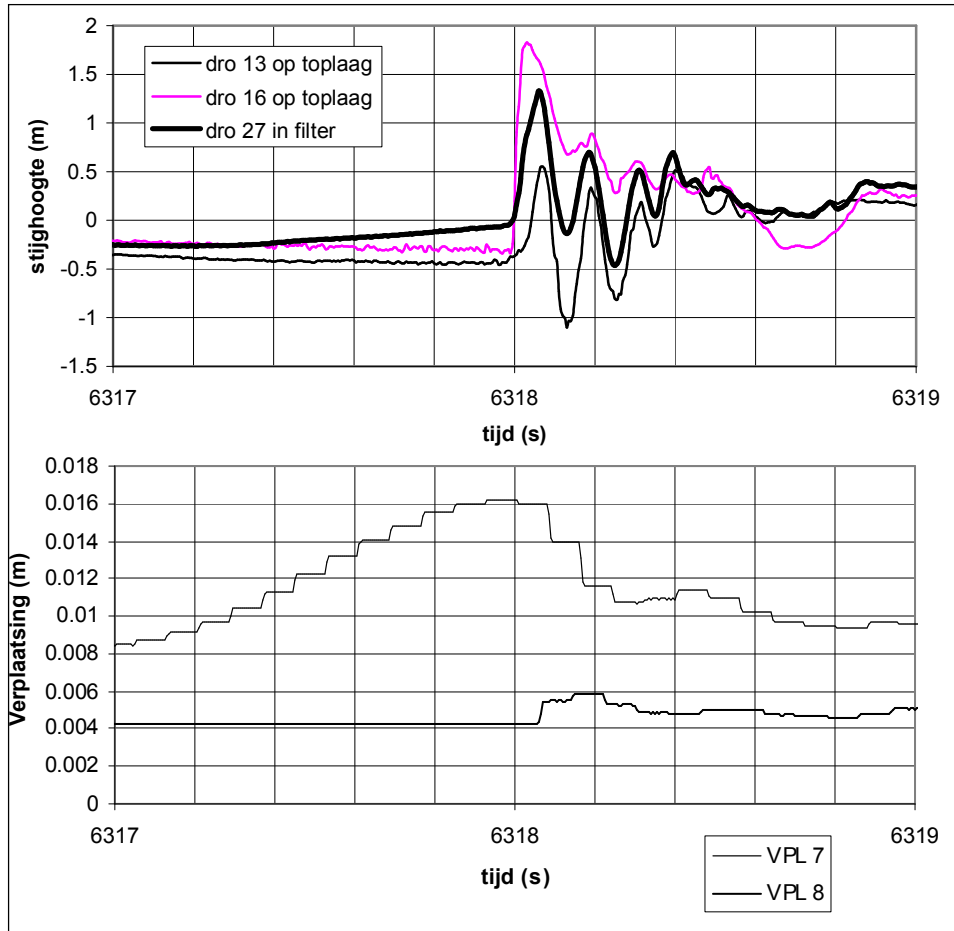
Doordat het grote stijghoogteverschil geleidelijk het talud oploopt, loopt ook het omhoog verplaatste deel van de toplaag als een golf het talud op. Een dergelijke beweging pompt het water in het filter omhoog en kan bijdragen aan het verhogen van de freatische lijn in het filter.

Hoewel de grootste beweging vlak vóór de golfklap optreedt, zouden toch de grootste krachten in de toplaag kunnen optreden tijdens de golfklap als het stijghoogteverschil maximaal is. Vooral de dwarskrachten zouden dan erg groot kunnen zijn, zoals verondersteld in het theoretische model van Klein Breteler (2003) (zie paragraaf 2.4).

Omdat meer dan de helft van de golven een opwaartse verplaatsing van de toplaag geven met daaropvolgend een golfklap, zal er ook sprake zijn van vermoeiing.

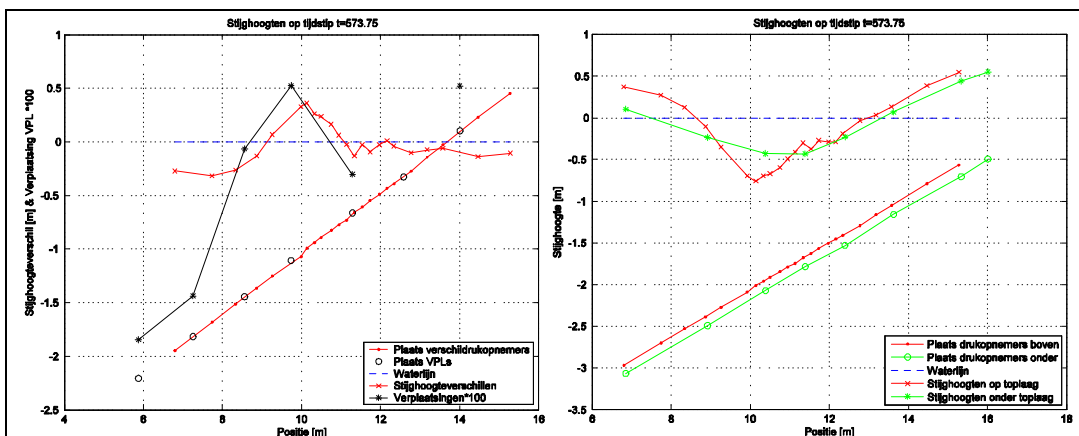
In de bovenste grafiek van figuur 5.9 is het stijghoogteverloop tijdens de hiervoor geanalyseerde golf getekend. Tot ongeveer  $t = 6318$  s is de stijghoogte op de toplaag vrijwel constant, en dan schiet ze omhoog vanwege de golfklap. Opmerkelijk is dat daarna de stijghoogte een oscillatie gaat vertonen, waarbij de stijghoogte in het filter mooi in fase is met de stijghoogte op de toplaag. Dit duidt erop dat de golfklapdruk de bekleding omlaag drukt, maar dat het water in het filter moeilijk wekomt en dus ook onder druk komt. De golfklapdruk wordt daardoor vrijwel ongedempt doorgegeven aan het filter (dit mechanisme is in paragraaf 2.4 uitgelegd aan de hand van figuur 2.6). Dit toont aan dat de toplaag zweeft op een waterlaag en reageert alsof het een waterbed is.

In de onderste grafiek van figuur 5.9 is de verplaatsing te zien. Voordat de golfklap plaatsvindt, is er een belasting als gevolg van het stijghoogtefront en dat geeft een opwaartse beweging. Zodra de golfklap plaatsvindt, gaat de toplaag weer naar beneden. We zien hier echter geen oscillatie. Dit kan veroorzaakt zijn doordat het instrument moeite heeft om de kleine verplaatsingen zo snel te volgen, omdat het slechts met 12,5 Hz meet en de oscillatie een frequentie heeft van ca 8 Hz. Dit is onvoldoende om deze snelle beweging goed in kaart te brengen. Het is echter waarschijnlijker dat dit vooral komt doordat het water in het filter niet zo snel wekomt. De toplaag kan pas bewegen als tegelijkertijd het water wegvloeit (vergelijk het gaatje in het bakje van figuur 2.6 in paragraaf 2.4). De oscillatie van de stijghoogte op de toplaag is echter zo snel, dat dit waarschijnlijk samengaat met een zeer kleine beweging. In deze korte tijd komt het water niet weg en draagt het water dus de volledige kracht van de golfklap.



Figuur 5.9, stijghoogteverloop en verplaatsing in proef P01 als functie van de tijd ter plaatse van de golfklap (zie figuur B2 voor locatie van de instrumenten)

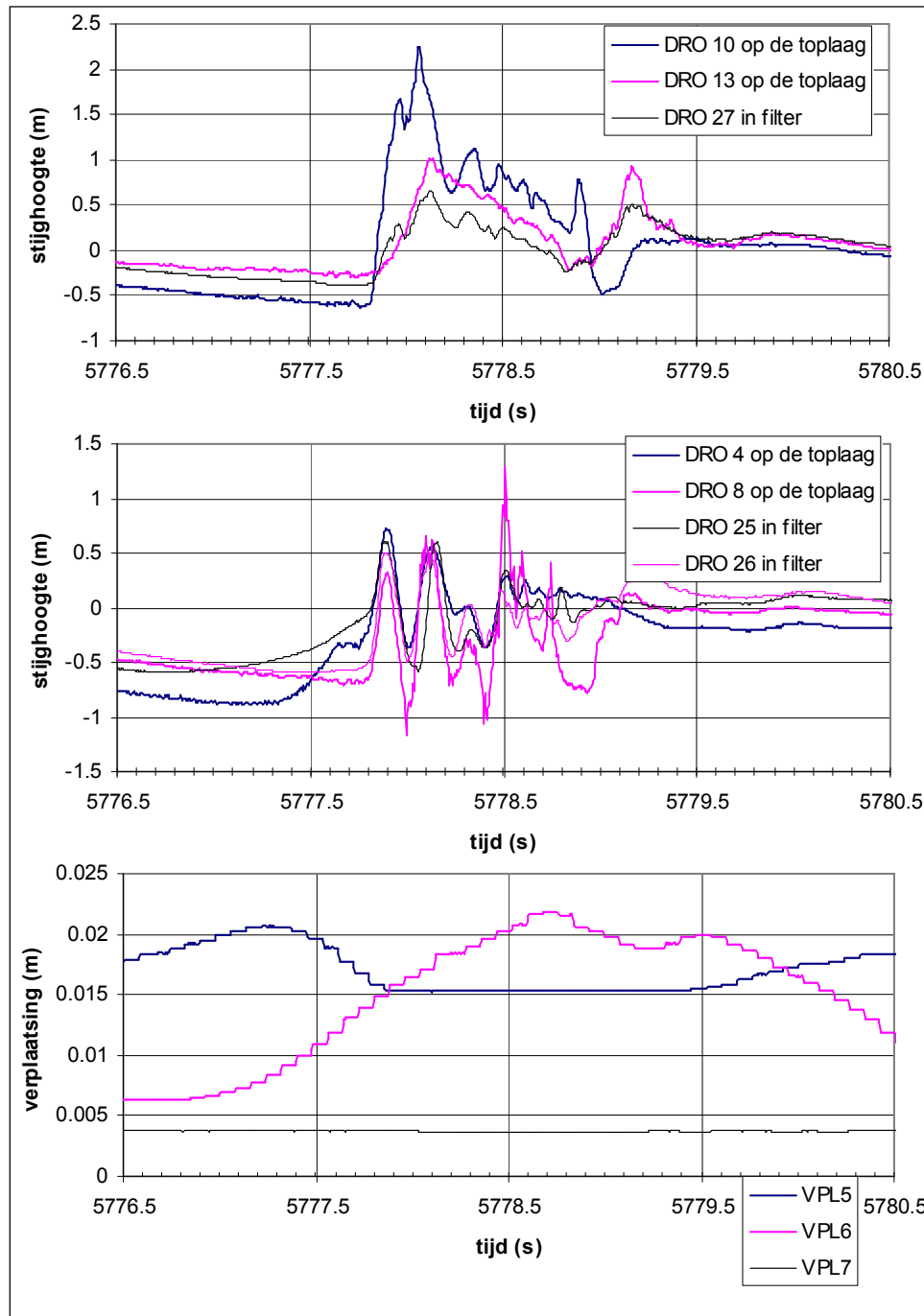
Uit bovenstaande analyse blijkt dat een belangrijk deel van de golfklap gedragen wordt door het water in het filter. Daardoor worden de spanningen in de bekleding minder groot. Hiermee is rekening gehouden in het rekenmodel van Klein Breteler (2003).



Figuur 5.10, stijghoogteverloop en verplaatsing tijdens proef P04 op t = 573,75 s.

Tijdens de andere proeven zijn vergelijkbare processen te zien.

In figuur 5.10 is het stijghoogteverloop en de verplaatsing tijdens proef P04 gegeven op een moment waarop een grote verplaatsing optreedt. Er is sprake van een diep stijghoogtefront dat ter plaatse van VPL 5 een flinke verplaatsing geeft. Even later vindt veel hoger op het talud een golfklap plaats. Dit is te zien in figuur 5.11, vanaf  $t = 5777,7$  s. Het hart van de golfklap vindt plaats op DRO 10, in de buurt van VPL 7. In de onderste grafiek van figuur 5.11 is te zien dat de toplaag niet reageert op deze golfklap, wellicht omdat de toplaag hier op de filterlaag rust.



Figuur 5.11, stijghoogteverloop en verplaatsing in proef P04 als functie van de tijd ter plaatse van de golfklap

In de grafiek is verder te zien dat de verplaatsing bij VPL 5 afneemt vanaf  $t = 5777,3$  s en dat tegelijkertijd de verplaatsing bij VPL 6 aan het toenemen is. Het water in het filter wordt dus getransporteerd van VPL 5 naar VPL 6 en geeft de toplaag daar de gelegenheid flink omhoog te komen. Zelfs tijdens de golfklap groeit de verplaatsing tot  $t = 5778,7$  s. Tijdens de golfklap, vooral  $5777,8 < t < 5778,3$  s, is er bij drukopnemer 4 en 8 (bij VPL 5 en 6) een sterk oscillerende stijghoogte op de toplaag en in het filter, waarbij de stijghoogte op de toplaag in fase is met die in het filter. De druk op de toplaag wordt weer direct doorgegeven aan het filter. De toplaag ligt hier weer op een waterlaagje.

In de bovenste grafiek zijn er geen oscillaties te zien, waaruit geconcludeerd kan worden dat de toplaag hier bij VPL7 inderdaad op het filter rust.

Het is opmerkelijk dat de helft van de verplaatsing bij VPL 6 is opgetreden tijdens de golfklap. Men zou verwachten dat de toplaag dan juist weer naar beneden wil. Het feit dat de golfklap veel hoger op het talud is neergekomen, draagt bij aan een netto opwaartse kracht ter plaatste van VPL 6.

Uit de metingen is gebleken dat tijdens bijna alle golven beweging van de toplaag optreedt. Dit maakt het denkbaar dat de degeneratie van de toplaag mede door vermoeiing ontstaat, maar wellicht is kruip nog een belangrijkere factor.

Het alsmaar bewegen van de toplaag en de aanwezigheid van een waterlaagje tussen de toplaag en het filter maakte dat het filter kan gaan schuiven. Deze migratie gaat vrij gemakkelijk door de gradiënten (stroming) in het filter. In figuur 5.8 is aan de verhanglijn in het filter te zien dat er een behoorlijke stroming in het filter naar beneden is. Zo kan na verloop van tijd steeds meer filtermateriaal verplaatsen, waardoor op de ene locatie een verzakking optreedt, terwijl op de andere locatie een bult in het taludoppervlak ontstaat. De cumulatie van dit soort vervormingen maakt de toplaag vermoedelijk zwakker, en bovendien zal de grotere lengte van de golvende toplaag trekspanningen geven die kunnen leiden tot scheuren. De langdurige trekspanningen geven een steeds grotere kruipvervorming die uiteindelijk leidt tot scheuren.

Hieruit blijkt dat de bewegingen uiteindelijk leiden tot scheuren in de toplaag. Dit komt onder andere tot uiting in het geleidelijk doorlatender worden van de toplaag (zie paragraaf 5.2).

## 5.2 Leklengte

Tijdens de proeven is gemerkt dat op den duur de toplaag niet alleen vervormt, maar dat er ook scheuren in ontstaan. De vervorming gaat gepaard met het verplaatsen van het filtermateriaal. Aan het eind van de proeven is ook nog geconstateerd dat het filtermateriaal ontmengt was geraakt: de steenslag lag boven, en het zand lag eronder.

Dit zou tot uiting kunnen komen in het veranderen van de leklengte. De leklengte kan bepaald worden aan de hand van de gemeten stijghoogte op de toplaag en die in het filter. De methode hiervoor is uitvoerig beschreven in bijlage F. Het komt erop neer dat het stijghoogteverloop in het filter op een bepaald moment meer of minder het verloop op de toplaag volgt. Hoe beter het stijghoogteverloop op de toplaag gevolgd wordt door het stijghoogteverloop in het filter, hoe kleiner de leklengte. Een complicerende factor hierbij is dat de beweging van de toplaag ook het stijghoogteverloop beïnvloedt. Dat betekent dat de leklengte alleen bepaald kan worden als de toplaag niet beweegt. Gezien het feit dat de methode nauwkeuriger werkt als er een groot stijghoogteverschil is, moest er met zorg gezocht worden naar geschikte golven.



Deze analyse heeft geleid tot de volgende resultaten:

- lek lengte tijdens proef P01:  $\Lambda \approx 1,1$  m
- lek lengte tijdens proef P04:  $\Lambda \approx 0,8$  m
- lek lengte tijdens proef P11B:  $\Lambda \approx 3,0$  m
- lek lengte tijdens proef P16:  $\Lambda \approx 2,4$  m

Uit deze resultaten blijkt dat de lek lengte tijdens de eerste serie (proef P00 t/m 05) veel kleiner was dan tijdens de tweede serie. Dit komt overeen met de waarnemingen tijdens de proeven, toen vastgesteld is dat de top laag tijdens een groot deel van de tweede serie weinig scheuren had, en tijdens de eerste serie er wel al snel allerlei scheuren ontstonden. Zo was het in de eerste serie (na de eerste proef) ook niet meer mogelijk om een statisch stijghoogteverschil over de top laag te creëren door de freatische lijn in het filter te verhogen. Daarvoor zou een veel te groot debiet nodig zijn. Zoals in het meetverslag is te zien was de lek lengte voor proef P00 wel beduidend groter dan 1 m.

Verder is aan de resultaten te zien dat de lek lengte tijdens een serie afneemt. Dit is een gevolg van het ontstaan van scheuren in de top laag. De ontmenging van het filter zou ertoe leiden dat de filter laag dikte en de doorlatendheid van het filter toeneemt en dus ook de lek lengte toeneemt. Dit blijkt uit de definitie van de lek lengte:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{bDk}{k'}}$$

met:

$\Lambda$  = lek lengte (m)

$b$  = dikte van de filter laag (m)

$D$  = dikte van de top laag (m)

$k$  = doorlatendheid van het filter (gelineariseerd) (m/s)

$k'$  = doorlatendheid van de top laag (gelineariseerd) (m/s)

Ook de dikte van de filter laag is veranderd door de vorming van een S-profiel (zie meetverslag). Het S-profiel in de top laag is immers volledig te wijten aan het migreren van filter materiaal van rond de waterlijn naar een zone 1 à 2 m onder water. In de buurt van de waterlijn is de dikte geleidelijk afgenomen, terwijl bij de bult van het S-profiel de filter laag dikte is toegenomen. Bij het uitbreken is duidelijk geworden dat de dikke filter laag bij de bult van het S-profiel was opgebouwd uit een laag zand met daarop een laag filter materiaal. Het oorspronkelijk ingezande filter materiaal was dus volledig ontmengt geraakt. Omdat er vrijwel geen stroming in het zand plaatsvindt, kan dit bij het bepalen van de lek lengte buiten beschouwing blijven. Daardoor is de filter laag die van belang is voor de lek lengte wel wat toegenomen bij de bult van het S-profiel, maar niet zoveel.

In de zone rond de waterlijn is de filter laag dikte afgenomen, waardoor de lek lengte hier lokaal wat zal zijn afgenomen. Vermoedelijk sluit hier de top laag niet overal meer perfect aan op het filter, waardoor de gemiddelde doorlatendheid van de filter laag wat zal zijn toegenomen. Het netto effect van beide invloeden is moeilijk in te schatten.

Het feit dat de lek lengte toch is afgenomen, geeft aan dat de doorlatendheid van de top laag nog veel meer is toegenomen dan de doorlatendheid en dikte van het filter.

Om een indruk te hebben van de lek lengte tijdens de andere proeven is gebruik gemaakt van een lineaire interpolatie op basis van de proefduur. Daarbij is aangenomen dat het

veranderen van de lek lengte een geleidelijk proces is gedurende de proeven en evenredig is met de duur van de proeven. Er is tevens geëxtrapoleerd naar de eerste en laatste proef uit elke serie. Dit is nader uitgelegd in bijlage F. Daar is ook een tabel gegeven met de geschatte waarde van de lek lengte voor elke proef op basis van deze interpolatie.

### 5.3 Stijghoogteverschil over de toplaag

In paragraaf 5.1 is vastgesteld dat de verplaatsing meestal grotendeels optreedt in de zone waar opwaartse stijghoogteverschillen ontstaan als gevolg van het steile stijghoogtefront op het talud. De grootste stijghoogteverschillen vinden plaats tijdens het optreden van de golfklap, namelijk net onder en boven de golfklap. Net onder de golfklap zijn soms ook nog de restanten van het stijghoogtefront in de vorm van een relatief langdurige stijghoogteverschil merkbaar en kan er dus een grote beweging optreden.

Tijdens de golfklap zullen er grote krachten in de toplaag ontstaan, omdat er onder de golfklap op een smalle strook een groot neerwaarts stijghoogteverschil is, terwijl daar vlak naast een groot opwaarts stijghoogteverschil optreedt. Dit leidt waarschijnlijk tot grote spanningen in het toplaagmateriaal.

In deze paragraaf wordt de relatie gelegd tussen de grootte van het stijghoogteverschil, de golfcondities en de staat van de toplaag. Tevens wordt aandacht besteed aan de locatie waar de stijghoogteverschillen optreden. Gedetailleerde informatie over de stijghoogteverschillen zijn te vinden in bijlage C.

Er is onderscheid gemaakt in 3 proevenseries:

1. serie 1: proef P00 tot en met proef P05  
De bekleding was tijdens deze serie slechts tot halve spleethoogte ingegoten en bovendien was het ingieten gebeurd met een relatief kleine emmer. De bekleding werd daardoor gekenmerkt door een matige samenhang en een kleine doorlatendheid van de toplaag.
2. serie 2a (met de belasting hoog op het talud): proef P11 tot en met P12, P12B tot en met P16 en proef P22 tot en met P23a  
De bekleding was voor deze serie goed ingegoten tot onderin de spleten tussen de basalt. De bekleding werd gekenmerkt door een grote samenhang en kleine doorlatendheid.
3. serie 2b (met de belasting laag op het talud): proef P12A en P17 tot en met P21  
De bekleding was van dezelfde kwaliteit als serie 2a, maar vlak onder de meest belaste zone was de bekleding niet ingegoten.

De bekleding uit serie 2a en 2b bestond uit één geheel. Het onderscheid tussen beide series kan gemaakt worden doordat de belastingzone tijdens serie 2a boven die tijdens serie 2b zat. Daardoor kunnen deze proevenseries als min of meer onafhankelijke series opgevat worden.

De stijghoogte op de toplaag is op veel meer locaties gemeten dan in het filter. Op plaatsen waar wel de stijghoogte op de toplaag is gemeten, maar niet in het filter, is de stijghoogte in het filter bepaald door middel van lineaire interpolatie tussen twee naastliggende drukopnemers in het filter, zodat het stijghoogteverschil op alle locaties berekend kon worden. Na het berekenen van het stijghoogteverschil is een filtering toegepast. Dit is gedaan om alleen de opwaartse belasting over te houden die lang genoeg duurt om de

bekleding een behoorlijke beweging te geven en/of vervormingen in de toplaag te geven. Zeer kortdurende stijghoogteverschillen (van bv. 1/200 s) zijn aanzienlijk hoger, maar duren te kort om de traagheid van de bekleding te overwinnen. Bovendien is de sterkte van het gietasfalt afhankelijk van de belasting snelheid. Hoe hoger de snelheid, hoe groter de sterkte.

De metingen van proef P00 zijn gefilterd met 5 Hz en die van de andere proeven zijn gefilterd met 10 Hz low-pass filter.

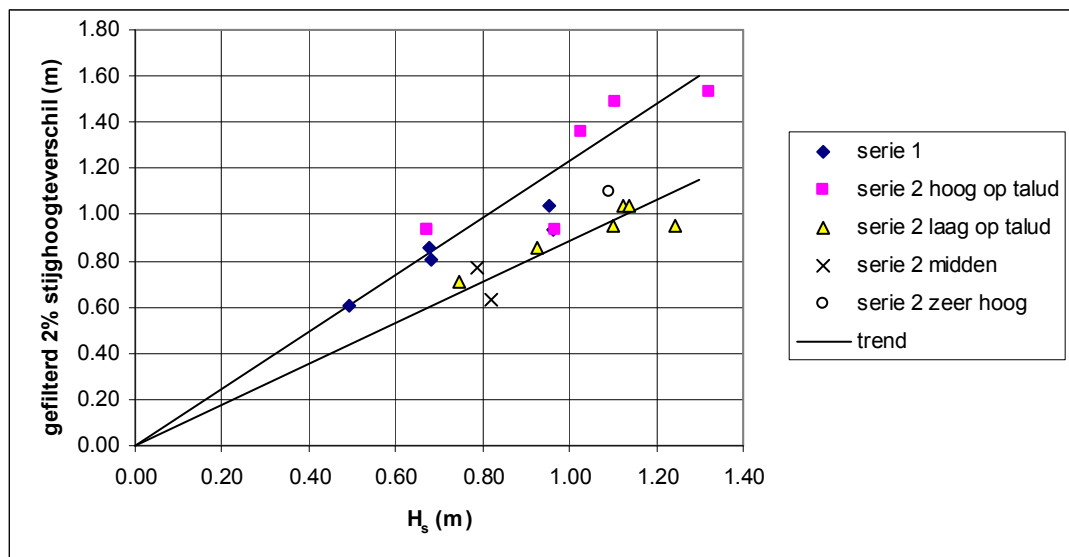
In figuur C.4.4 is de verhouding tussen de gefilterde en ongefilterde stijghoogteverschillen voor alle proeven gegeven.

### 5.3.1 Grootte van de stijghoogteverschillen

In deze paragraaf is gekeken naar het stijghoogteverschil, onafhankelijk van de locatie waar dit optreedt. Hiervoor zijn de proeven opgedeeld in afzonderlijke golven en is per golf het grootste stijghoogteverschil bepaald (van alle drukopnemerparen). Vervolgens zijn de zo verkregen stijghoogteverschillen op volgorde van grootte gezet en is de overschrijdingsfrequentie bepaald. De huidige analyse richt zich vooral op de 2%-waarde. Deze is behoorlijk groot, maar nog niet zo zeldzaam dat het een uitzondering betreft en ze beïnvloed wordt door toeval.

Tijdens de eerste golfproef van de eerste serie (P00,  $H_s = 0,49$  m), waarbij de freatische lijn in het filter ongeveer 20 cm hoger was dan de buitenwaterstand, ontstonden al direct aanzienlijke stijghoogteverschillen over de toplaag. Ondanks dat de golfhoogte slechts 49 cm was, zijn er stijghoogteverschillen gemeten tot 0,9 m (gefilterd).

Met het groter worden van de golven neemt ook het stijghoogteverschil verder toe. In figuur 5.12 is te zien dat het verband tussen de golfhoogte en stijghoogteverschil ongeveer lineair is. Daarom wordt in het vervolg het dimensieloze stijghoogteverschil  $\phi_{w2\%}/H_s$  beschouwd.



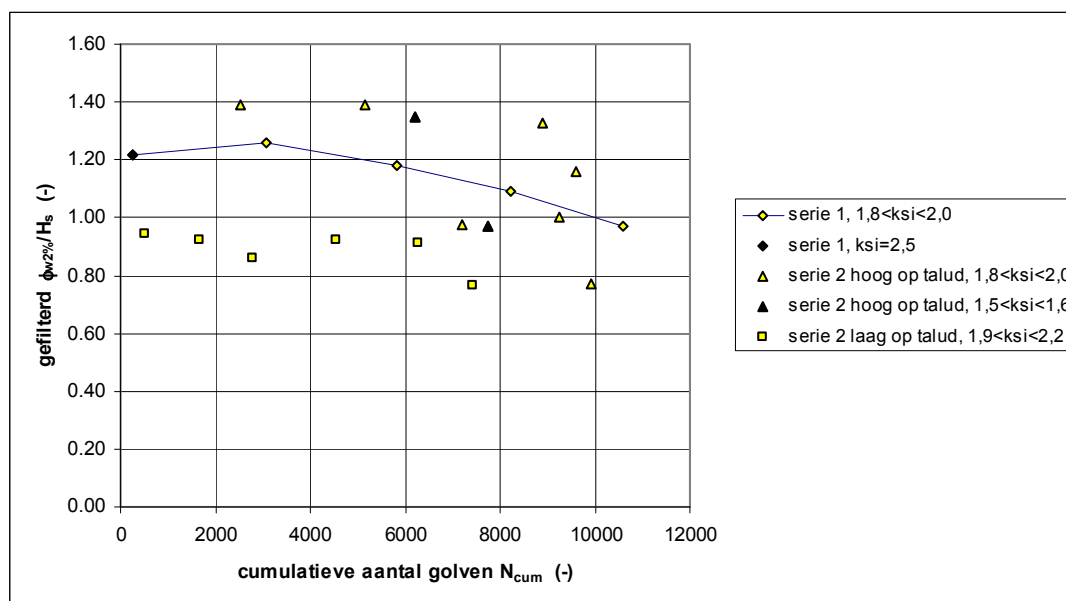
Figuur 5.12, stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie ( $\phi_{w2\%}$ ) als functie van de significante golfhoogte ( $H_s$ ) (zie ook tabel A5)

In figuur 5.13 is het dimensieloze stijghoogteverschil per proef,  $\phi_{w2\%}/H_s$ , uitgezet tegen het cumulatieve aantal golven,  $N_{cum}$ . Het gaat hier om het totaal aantal golven tot en met de proef die in de figuur met een meetpunt is weergegeven. Van die proef is het stijghoogteverschil uitgezet. Het doel van deze figuur is om te kijken of het dimensieloze stijghoogteverschil verandert naarmate de toplaag langer belast is. Met het toenemen van de belastingduur zal de toplaag geleidelijk meer gescheurd raken en neemt de lek lengte af (zie vorige paragraaf), hetgeen invloed heeft op het stijghoogteverschil. Gezien het feit dat het stijghoogteverschil ook in belangrijke mate beïnvloed wordt door de beweging van de toplaag, zal het verband met de lek lengte niet overeenkomen met de theorie zoals die bijvoorbeeld in ANAMOS is gebruikt.

In de figuur is te zien dat de meetpunten van de eerste serie een duidelijke tendens vertonen. Naarmate de belastingduur toeneemt wordt het dimensieloze stijghoogteverschil kleiner. Alleen proef P01 past niet helemaal in deze tendens (zie zwarte ruit in de figuur), maar die is met een afwijkende brekerparameter uitgevoerd en bovendien gefilterd op 5 Hz, in plaats van 10 Hz.

Voor de metingen uit de tweede serie is onderscheid gemaakt tussen de proeven hoog op het talud en laag op het talud, en bovendien is er een verschil gemaakt voor de gebruikte brekerparameter. Voor de proeven die uitgevoerd zijn met een hoge waterstand (hoog op het talud) is ook een licht dalende tendens te onderkennen, vooral voor  $N_{cum} > 6000$ , hoewel de spreiding van de meetpunten met  $7000 < N_{cum} < 10000$  vrij groot is. De 2 meetpunten met het grootste aantal golven zijn door hun korte duur minder betrouwbaar.

De eerste 5137 golven (proef P11 en P11B) zijn uitgevoerd met relatief kleine golven, die niet in staat waren schade te brengen. Tijdens deze proeven waren de bewegingen ook uitzonderlijk gering (maximaal ongeveer 0,5 mm). Vanaf proef P12 was er een bult in het taludoppervlak die een nadelige invloed had op de stabiliteit van de toplaag. De daarmee samenhangende migratie van het filter en scheuren in de toplaag hebben bijgedragen aan het degeneratieproces van de toplaag.



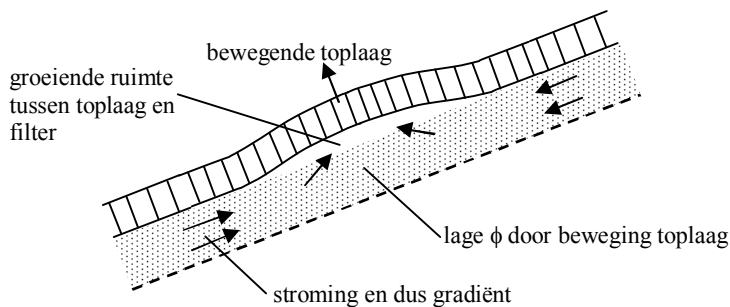
Figuur 5.13, gefilterd dimensieloos stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie als functie van het totaal aantal golven tot en met de betreffende proef (zie ook tabel A5)

De meetpunten in figuur 5.13 betreffende de hoog op het talud uitgevoerde proeven geven geen aanleiding te veronderstellen dat de brekerparameter een grote invloed had.

De metingen die laag op het talud zijn uitgevoerd laten in figuur 5.13 een nauwelijks dalende tendens zien. Voor deze punten geldt dat de nauwkeurigheid niet zo groot is. Deze proeven zijn uitgevoerd met veel minder drukopnemers dan de proeven P11 tot en met P16. De onderlinge afstand tussen de drukopnemers was tijdens de proeven P17 tot en met P21 zo groot, dat waarschijnlijk het stijghoogteverschil met ca 10 à 20% is onderschat (zie bijlage C). Zelfs als rekening gehouden wordt met deze onderschatting, kan toch gesteld worden dat  $\phi_{w2\%}/H_s$  tijdens de proeven laag op het talud kleiner was dan tijdens de proeven hoog op het talud. Dit kan veroorzaakt zijn door de aanwezigheid van het niet-ingegoten stuk bekleding vlak onder het tijdens deze proeven zwaar belaste deel van het talud, hoewel dit tot het einde toe vrij goed ingezand is gebleven. De onderzijde van het zwaarst belaste deel van het talud ligt op een niveau van ongeveer +1,7 à +1,8 m boven de gootbodembodem. Het niet-ingegoten deel van de bekleding lag op  $+1,3 < Z < +1,6$  m.

Het blijkt dat het stijghoogteverschil tijdens de proeven aanzienlijk groter is dan het eigengewicht van de toplaag ( $\Delta D \cos \alpha \approx 0,24$  m en  $\phi_{w2\%} \approx 0,6$  à 1,6 m). Qua orde van grootte is het gefilterde stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie vergelijkbaar met de golfhoogte ( $\phi_{w2\%}/H_s = 0,8$  à 1,4). Deze enorm grote stijghoogteverschillen geven daarentegen slechts kleine bewegingen van de toplaag. Dit kan niet verklaard worden aan de hand van de verhinderde toestroming zoals bij niet-ingegoten steenzettingen.

De verhinderde toestroming maakt dat de toplaag in hoge mate vastgezogen is op de ondergrond, en vloeit voort uit het volgende proces: Zodra de toplaag wil bewegen, moet er water verplaatst worden in het filter zodat de groeiende ruimte tussen de toplaag en het filter gevuld blijft het water (zie figuur 5.14). Dit water zal aangevoerd of afgevoerd moeten worden vanaf een locatie hoger of lager op het talud. Dit gaat gepaard met een verhang, waardoor tijdens een opwaartse beweging de stijghoogte onder de toplaag daalt. Dit verkleint daardoor de aandrijvende kracht om de beweging in stand te houden.



Figuur 5.14, principe van verhinderde toestroming

We constateren echter bij ingegoten steenzettingen wel een groot stijghoogteverschil, maar toch geen bewegingen. Dit kan daardoor slechts verklaard worden aan de hand van het mechanisme zoals dat beschreven is in paragraaf 5.1. Tijdens een golfklap wordt onder de golfklap de stijghoogte in het filter heel hoog, en deze hoge stijghoogte wordt doorgegeven naar het gebied vlak naast de golfklap, zie figuur 2.5. Daar zal dus ook het stijghoogteverschil hoog zijn. Door de buigstijfheid en samenhang van de toplaag kan de toplaag vlak naast de golfklap niet omhoog bewegen, omdat hij onder de golfklap juist

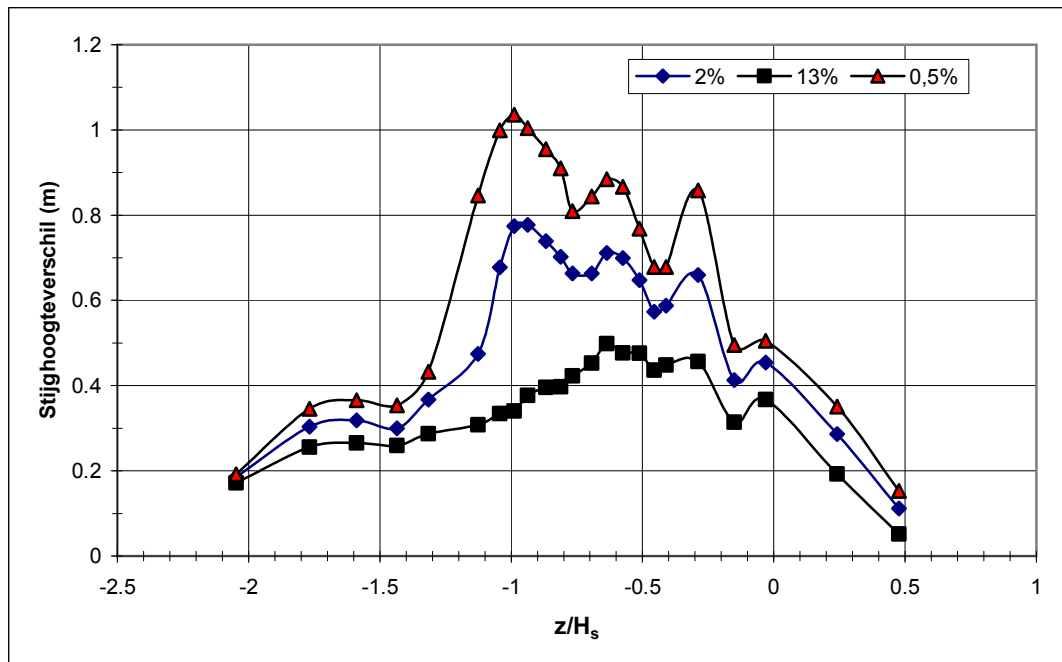
omlaag gedrukt wordt. De beweging zoals getekend in figuur 2.5 kan daardoor niet in die mate optreden. Kleine bewegingen van enkele millimeters zijn uiteraard wel mogelijk.

### 5.3.2 Locatie van de grote stijghoogteverschillen

Voor het analyseren van de locatie waar de grote stijghoogteverschillen zijn opgetreden, zijn de stijghoogteverschillen per drukopnemer op het talud beschouwd. Als er op de betreffende locatie geen drukopnemer in het filter zat, dan is de stijghoogte in het filter berekend door middel van interpolatie. Steeds zijn de gefilterde stijghoogteverschillen beschouwd.

Zo zijn er figuren gemaakt met op de verticale as het stijghoogteverschil en op de horizontale as de dimensieloze locatie:  $z/H_s$  met  $z$  = niveau op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn (m). Een voorbeeld van een dergelijke figuur is gegeven in figuur 5.15. In die figuur is te zien dat de stijghoogteverschillen het grootst zijn voor  $-1,1 < z/H_s < -0,3$ . Als criterium is hiervoor gebruikt de zone waarin het 2%-stijghoogteverschil groter is dan 70% van het maximum:  $\phi_{w2\%} > 0,7 \cdot [\phi_{w2\%}]_{\max}$ .

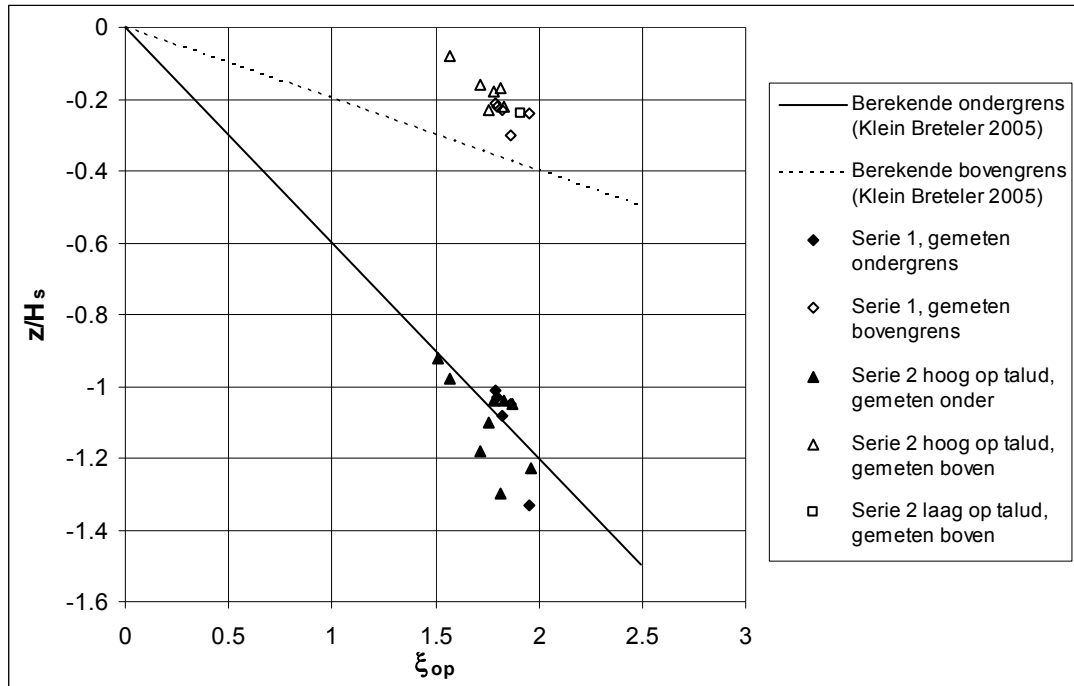
In bijlage C zijn de figuren van de andere proeven gegeven.



Figuur 5.15, stijghoogteverschil als functie van de locatie op het talud tijdens proef P03, met overschrijdingspercentage van respectievelijk 0,5%, 2% en 13%.

Door Klein Breteler en Eysink (2005) is afgeleid dat de grootste stijghoogteverschillen voor open steenzettingen optreden bij  $-0,6\xi_{op} < z/H_s < -0,2\xi_{op}$ . Voor deze proef zou dat uitkomen op:  $-1,09 < z/H_s < -0,36$  en dat scheelt niet veel met de gemeten zone.

In figuur 5.16 is voor alle proeven de zone met grootste stijghoogteverschillen gegeven. Het blijkt dat de ondergrens van de zone vrij goed overeenkomt met de formule van Klein Breteler en Eysink (2005), maar de bovengrens ligt iets dichterbij de stilwaterlijn.



Figuur 5.16, onder en bovengrens van de zone waarin 2%-stijgheighteverskil groter is dan 70% van het maximum (zie ook tabel A5)

## 5.4 Beweging van de toplaag

Voor het meten van de verplaatsingen van de toplaag zijn diverse instrumenten gebruikt:

- profielvolger, waarmee na elke proef langs 3 of 5 raaien de hoogte van het taludoppervlak is gemeten
- verplaatsingsopnemers (VPL), die de ‘snelle’ verplaatsingen van de toplaag binnen een golf meten (iedere 0,08 s)
- hoogtemeters, die de geleidelijke ontwikkeling van de cumulatieve verplaatsing meten

De cumulatieve verplaatsing van de toplaag is de verplaatsing die in de loop der tijd ontstaat en niet meer verdwijnt. Naast deze geleidelijke ontwikkeling van de vervorming, is er een op en neergaande beweging van de toplaag tijdens afzonderlijke golven. Het is gebleken dat bij vrijwel elke golf de toplaag een paar mm omhoog beweegt, waarna hij weer naar beneden zakt in zijn oorspronkelijke positie. Soms blijft een deel van deze tijdelijke beweging bestaan, en draagt daarmee bij aan de grootte van de cumulatieve verplaatsing.

In onderstaande paragrafen zijn de verschillende aspecten van de beweging van de toplaag en de migratie van het filter beschreven. De uitwerking van de metingen is in meer detail weergegeven in bijlage D.

Opgemerkt wordt dat de beweging volgens de verplaatsingsopnemers haaks op het talud gedefinieerd is, terwijl de verplaatsing als gevolg van de profielvolger verticaal is gedefinieerd. In deze analyse wordt dit verschil verwaarloosd, omdat dit slechts een paar procent is en daardoor wegvalt ten opzichte van de nauwkeurigheid van de metingen.

### 5.4.1 Cumulatieve verplaatsing van de toplaag

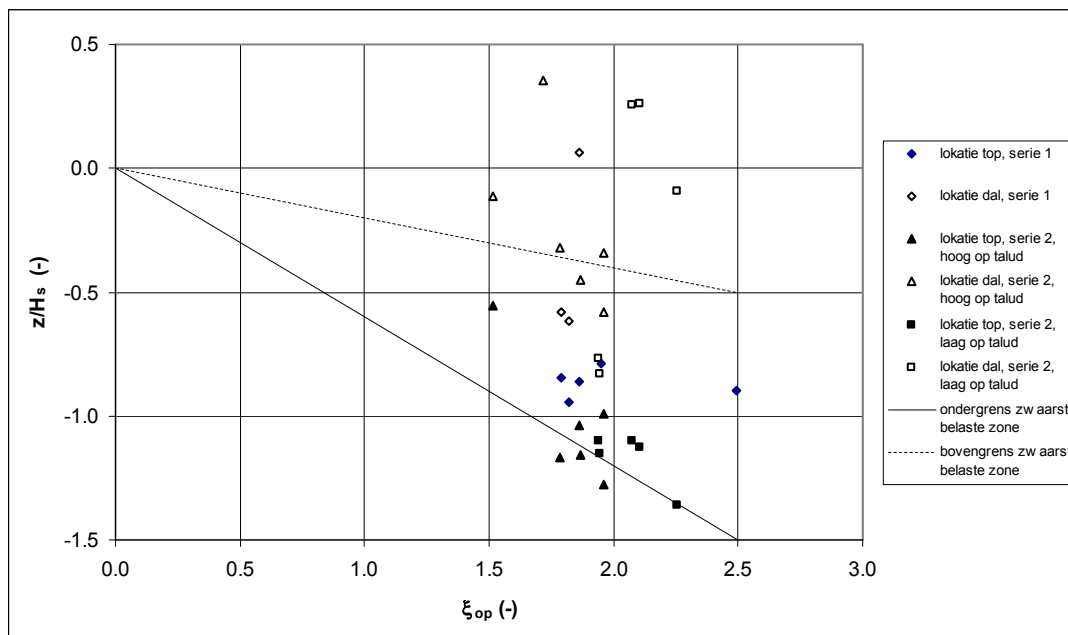
De meeste detailinformatie betreffende de locatie van de cumulatieve verplaatsing van de toplaag is verkregen met de profielvolger. De resultaten hiervan zijn weergegeven in het meetverslag (Hofland e.a., 2005) en worden onderstaand nader geanalyseerd.

De verplaatsingsopnemers onder de toplaag waren ook bedoeld voor het meten van de cumulatieve verplaatsing. Het is echter gebleken dat de cumulatieve verplaatsing niet goed door de verplaatsingsopnemers is gemeten (zie bijlage D). Als het filter ging migreren, is er vaak ook een verplaatsing van het instrument opgetreden. Daarom zijn deze instrumenten slechts geschikt om de verplaatsingen tijdens de golven te meten.

De 3 hoogtemeters op de toplaag zijn echter wel geschikt om de vervorming tijdens de proeven te meten, echter met een nauwkeurigheid van orde 1 cm.

#### Resultaten van profielvolger

Tijdens de proeven is steeds net onder de waterlijn een verzakking ontstaan, terwijl wat dieper de toplaag omhoog gekomen is. Er ontstaat als het ware een S-profiel waardoor in de zwaarst belaste zone het talud wat flauwer wordt. In figuur 5.17 zijn de locaties gegeven waar de top en de kuil in het S-profiel zich bevinden, zoals dat met de profielvolger is gemeten. Het gaat hier om de vervorming per proef (verschil tussen profiel voor en na de proef).



Figuur 5.17, locatie van de grootste opwaartse verplaatsing en neerwaartse verplaatsing (bolling en kuil in het taludoppervlak), zoals dat is gemeten met de profielvolger (zie ook tabel A5), en onder- en bovengrens van zwaarst belaste zone volgens Klein Breteler en Eysink (2005)

Het blijkt dat de top in het S-profiel aan de onderkant van de zwaarst belaste zone ligt. Vanuit het bezwijkmechanisme is dit wel te verklaren. Als een golf op het talud aankomt, vormt zich eerst een steil stijghoogtefront dat diep onder de stilwaterlijn de toplaag omhoog beweegt. Vervolgens ontstaat wat hoger op het talud een golfklap, waarna de toplaag weer naar beneden wil bewegen. Tijdens deze bewegingen is er gelegenheid voor het filter om naar beneden te migreren vanaf de locatie waar de golfklap neerkomt. Het migrerende

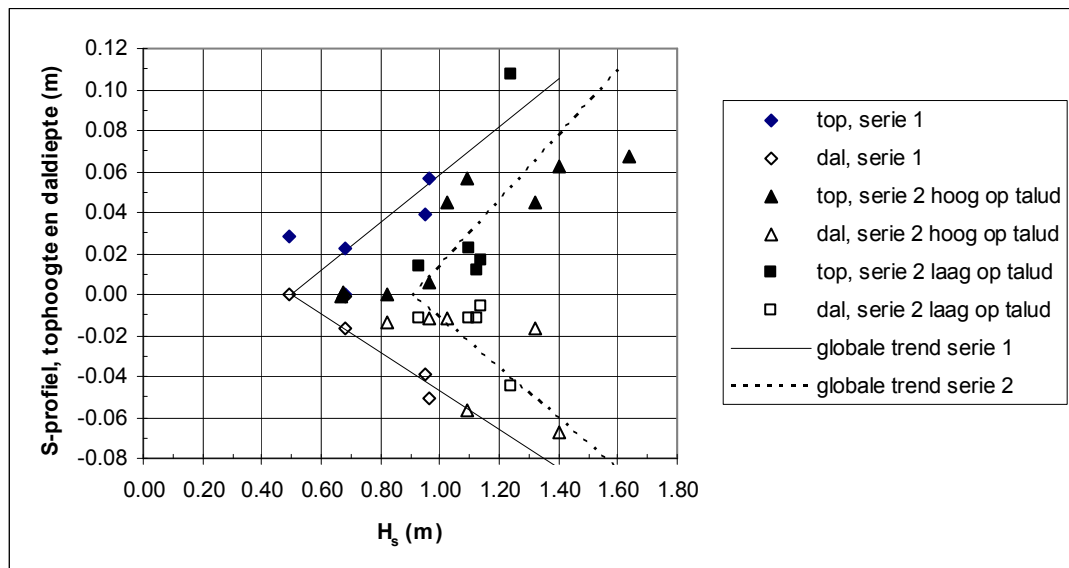


filtermateriaal kan zich ophopen in de zone waar de bekleding tijdens het golffront iets opgelicht is. Daar zal dus een cumulatieve verplaatsing ontstaan (bolling), terwijl wat hoger op het talud de kuil ontstaat.

De locatie van de top van het S-profiel ligt voor serie 1 consequent wat hoger (wat minder diep onder de waterlijn) dan voor serie 2. Wellicht liggen de top en het dal dichterbij elkaar vanwege de geringere stijfheid van deze toplaag.

De locatie van de kuil van het S-profiel blijkt een grote spreiding te hebben, variërend van het midden van de zwaarst aangevallen zone, tot zelfs boven de stilwaterlijn.

In figuur 5.18 is de grootte van het S-profiel uitgedrukt in de tophoogte en daldiepte van het taludoppervlak die per proef ontstaan zijn. In de figuur is ook een globale trend gegeven. Het blijkt dat een grotere golfhoogte doorgaans ook een groter S-profiel teweegbrengt. Dit proces startte bij serie 1 bij een golfhoogte van ongeveer  $H_s \approx 0,5$  m, terwijl bij serie 2 de vervorming pas bij  $H_s \approx 0,9$  m aanving.



Figuur 5.18, hoogte van de bolling en kuil in het S-profiel (zie ook tabel A5)

Driemaal zijn twee of drie opeenvolgende proeven met dezelfde golfcondities en waterstand uitgevoerd: P01&P02 ( $H_s = 0,68$  m), P03&P04 ( $H_s = 0,95$  à  $0,96$  m) en P18&P19&P20 ( $H_s = 1,10$  à  $1,14$  m). Tijdens P01&P02 is de vervorming tijdens de eerste proef wat groter, terwijl tijdens P03&P04 juist de tweede proef een wat grote vervorming heeft gegeven. De vervorming tijdens de proeven P18&P19&P20 was ongeveer gelijk. Hieruit wordt geconcludeerd dat de voorafgaande vervorming van de bekleding niet zo'n grote invloed had op de vervorming tijdens een proef.

Tijdens proef P00 uit serie 1, die uitgevoerd is met  $H_s = 0,49$  m en een statisch stijghoogteverschil van 0,2 m, is er al een vrij aanzienlijke bolling in de toplaag ontstaan van 3 cm (top), terwijl er hoger op het talud nog geen verzakking is geconstateerd (dal). Het is denkbaar dat het statisch stijghoogteverschil hieraan bijgedragen heeft. Tijdens 'serie 2 hoog op het talud' zijn de top en het dal tegelijk ontstaan (P17,  $H_s = 0,93$  m), net als tijdens

‘serie 2 laag op het talud’ (P13,  $H_s = 0,97$  m). Bij de iets later uitgevoerde proef P14B uit ‘serie 2 laag op het talud’ is alleen het dal dieper geworden (P14B,  $H_s = 0,82$  m).

De proeven van de serie 1 en die van ‘serie 2 laag op het talud’ hadden allemaal een vergelijkbare duur. De spreiding in deze series is daarom niet te verklaren uit de proefduur. Voor serie 2 hoger op het talud geldt dat sommige korte proeven juist een vrij grote vervorming hebben gegeven, terwijl andere langdurige proeven juist weinig vervorming hebben veroorzaakt. Maar andersom komt ook voor.

De 5 proeven met grote golfhoogte en vervorming, namelijk P15, P16, P21, P22 en P23A, laten een vrij grote spreiding zien, maar als de tophoogte relatief groot is, is tegelijkertijd ook de daldiepte relatief diep. Dit is logisch omdat de vervorming een gevolg is van migratie van filtermateriaal, dat op de ene plaats verdwijnt en de andere plaats ophoopt.

Er is geen relatie te ontdekken tussen de vervorming en de waterstand, bijvoorbeeld ten opzichte van de overgang van ingezand filter naar niet-ingezand filter of ten opzichte van de drainage in het filter.

### Resultaten van hoogtemeters

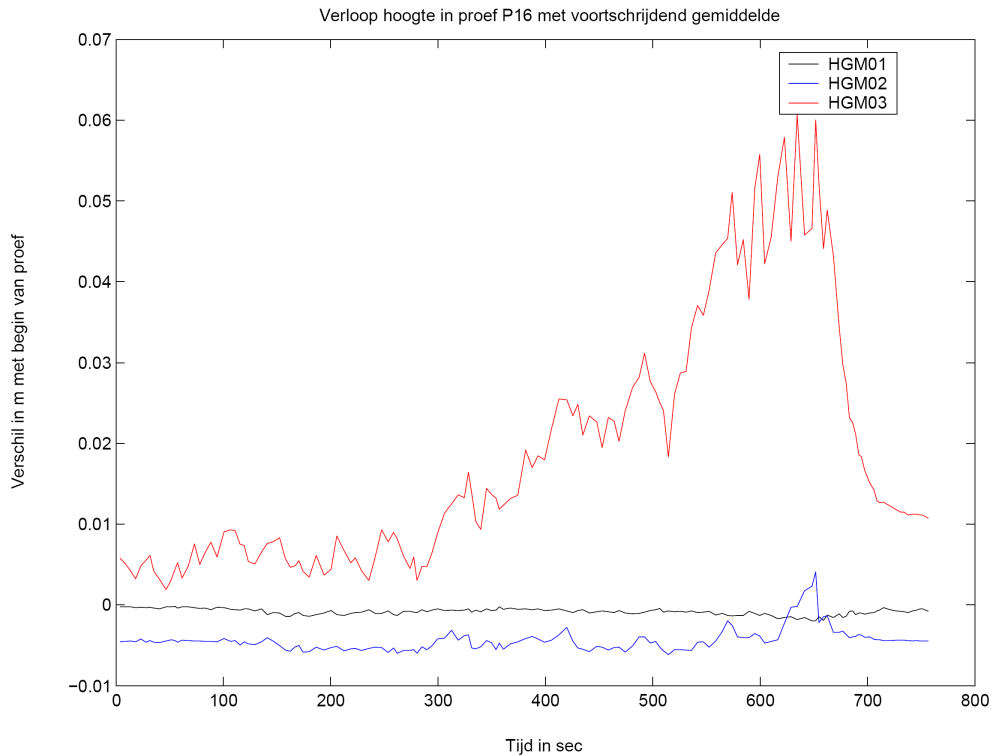
Op drie locaties waren hoogtemeters (HGM) op het talud aangebracht, vlakbij raai 1 van de profielvolger. De instrumenten waren bedoeld om de wat grotere bewegingen van het taludoppervlak tijdens een proef te volgen, die samenhangen met het mechanisme afschuiving. Gezien het feit dat er geen afschuiving is opgetreden, zijn ze ook bruikbaar voor het volgen van de toplaagbewegingen. Kleine bewegingen zijn echter niet nauwkeurig met dit meetprincipe te meten, omdat het wat gevoelig is voor temperatuurinvloeden. Daardoor kunnen er afwijkingen van orde 0,5 à 1 cm ontstaan.

De coördinaten van HGM1 t/m HGM3 waren respectievelijk:  $(x; Z) = (7,277; 2,079)$ ,  $(10,455; 2,987)$  en  $(14,154; 4,044)$ .

Deze drie instrumenten zaten zo ver uit elkaar dat er meestal maar één in de zone met verplaatsingen van de toplaag zat. Daardoor bieden ze relatief weinig extra informatie.

Een van de meest interessante metingen van het verloop van de hoogtemeters is opgetreden tijdens proef P16 en is weergegeven in figuur 5.19. Deze proef is uitgevoerd met een erg hoge waterstand, waardoor de zwaarst belaste zone  $+3,7 < Z < +4,5$  m was. In deze zone lag HGM3. In de figuur is te zien dat de toplaag tijdens de proef geleidelijk omhoog gaat tot een hoogte van 6 cm ten opzichte van het begin van de proef, maar daarna weer naar beneden zakt zodat er uiteindelijk maar een restverplaatsing van 1 cm overblijft. Het resultaat van de meting met de profielvolger geeft ook aan dat daar niet zoveel restverplaatsing is, namelijk ca 0,7 cm. Het is denkbaar dat tijdens de grote verplaatsing het aantal scheuren flink is toegenomen waardoor de doorlatendheid van de toplaag is toegenomen. Een grotere doorlatendheid van de toplaag zal kleinere stijghoogteverschillen geven waardoor de bewegingen weer minder worden.

De nabijgelegen verplaatsingsopnemer VPL9 was tijdens deze proef helaas al buiten zijn bereik gekomen (meer dan vijf centimeter verplaatsing). Alleen tijdens  $495 < t < 660$  s komt hij weer even in bereik en geeft een sterk wisselend signaal, wat aangeeft dat er in die periode veel gebeurde. Het is denkbaar dat er toen aanzienlijke verschuivingen van het filtermateriaal optraden.



Figuur 5.19, resultaten van de hoogtemeters tijdens proef P16

Geconcludeerd kan worden dat resultaten van de profielvolger de meest gedetailleerde informatie opleverde, en dat de hoogtemeters hier weinig aan toevoegen.

#### 5.4.2 Bewegingen tijdens afzonderlijke golven

De bewegingen van de toplaag zijn tijdens de proeven gemeten met de verplaatsingsopnemers (VPL). Hoewel de verplaatsingsopnemers soms samen met het filter wat verschoven zijn, is het onwaarschijnlijk dat de instrumenten ook steeds bewogen hebben tijdens het bewegen van de toplaag in iedere golf. Het is namelijk uiterst onwaarschijnlijk dat het instrument, dat geheel ingebed in het filter lag, honderden tot duizenden malen per proef op en neer heeft bewogen.

In tabel 3.2 is aangegeven in welke zone de zwaarste belasting van de toplaag optreedt, en welke verplaatsingsopnemers in die zone zitten. Dat zijn doorgaans de verplaatsingsopnemers die de grootste beweging meten, maar verplaatsingsopnemers net onder en net boven deze zone verplaatsen vaak ook wel wat.

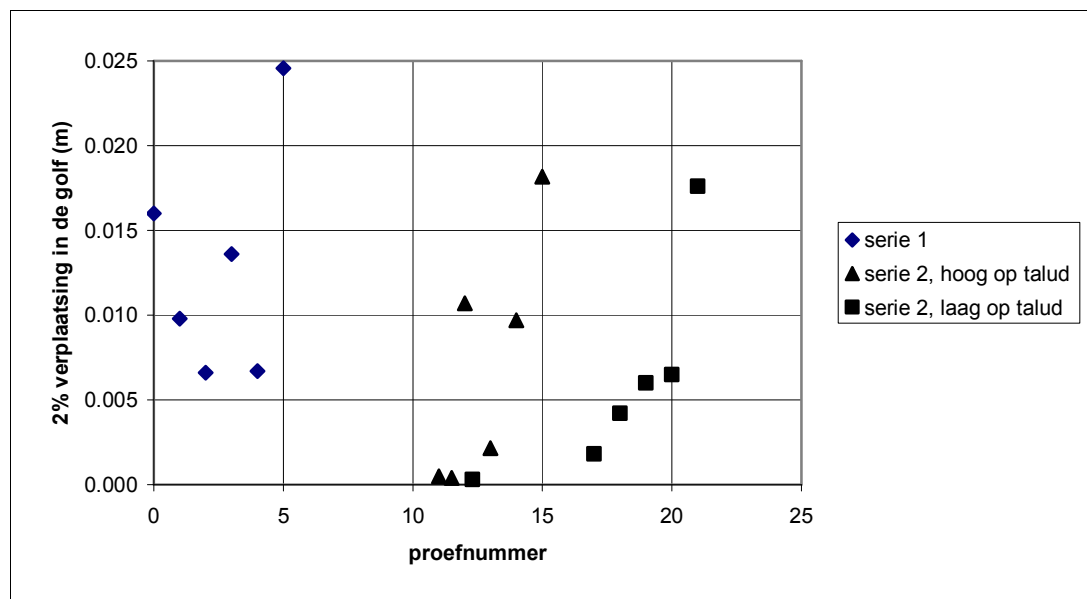
De analyse van de verplaatsingsopnemers wordt helaas gehinderd door het feit dat niet altijd alle verplaatsingsopnemers goed gefunctioneerd hebben, en de verplaatsingsopnemers een beperkt bereik van 5 cm hadden. Tijdens proef P04 was VPL 8 bijna en in P05 geheel buiten bereik geraakt (reeds meer dan 5 cm verplaatsing) zodat de verplaatsingen tijdens de golven niet goed meer konden worden gemeten. Ditzelfde was het geval met VPL 9 tijdens de proeven P15 tot en met P23a, VPL 8 tijdens de proeven P17 tot en met P23a en VPL 3 van proef P21 tot en met 23a. Helaas bleken verplaatsingsopnemer 6 en 7 tijdens serie 2 niet te

werken omdat er gietasfalt tussen de basalt en het instrument was geraakt waardoor het instrument vastgeplakt zat aan de toplaag.

Hierdoor is er geen goede informatie verkregen over de bewegingen van de toplaag tijdens de proeven P12B, P14B, P16 en P22 t/m P23A.

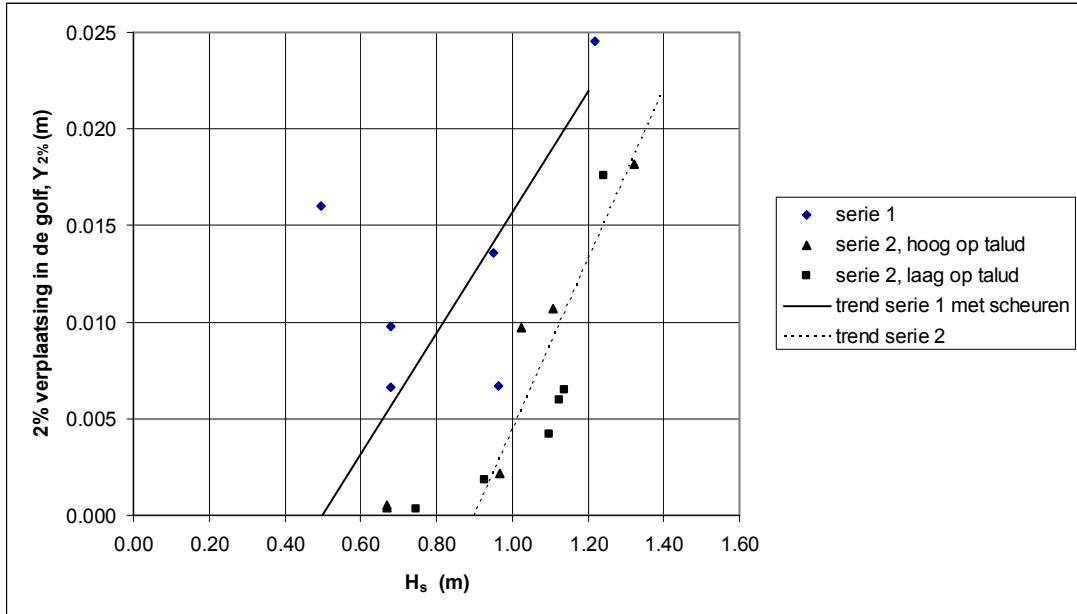
De meetsignalen van de verplaatsingsopnemers zijn geanalyseerd door steeds de proeven op te delen in afzonderlijke golven en per golf de grootste waarde van de verplaatsing ten opzichte van het begin van de golf te bepalen (onafhankelijk bij welke VPL dit optreedt). Zo worden er evenveel verplaatsingen gevonden als er golven zijn in een proef. Vervolgens zijn deze verplaatsingen in overschrijdingskrommen getekend. De zo verkregen verplaatsingen met 2%-overschrijdingsfrequentie,  $Y_{2\%}$ , zijn weergegeven in figuur 5.20.

In de figuur is te zien dat gelijk bij proef P00 er al een relatief grote verplaatsing tijdens de golven optreedt van  $Y_{2\%} = 16$  mm. Tijdens 'serie 2 hoog op het talud' en 'serie 2 laag op het talud' is de beweging tijdens de eerste proeven nog vrijwel 0, en neemt daarna met toenemende belasting verder toe. Wellicht heeft het statische stijghoogteverschil tijdens P00 ( $\phi_{\text{stat}} \approx 0,2$  m) bijgedragen aan de grote verplaatsingen, hoewel ook proef P01 een relatief grote  $Y_{2\%}$  heeft.



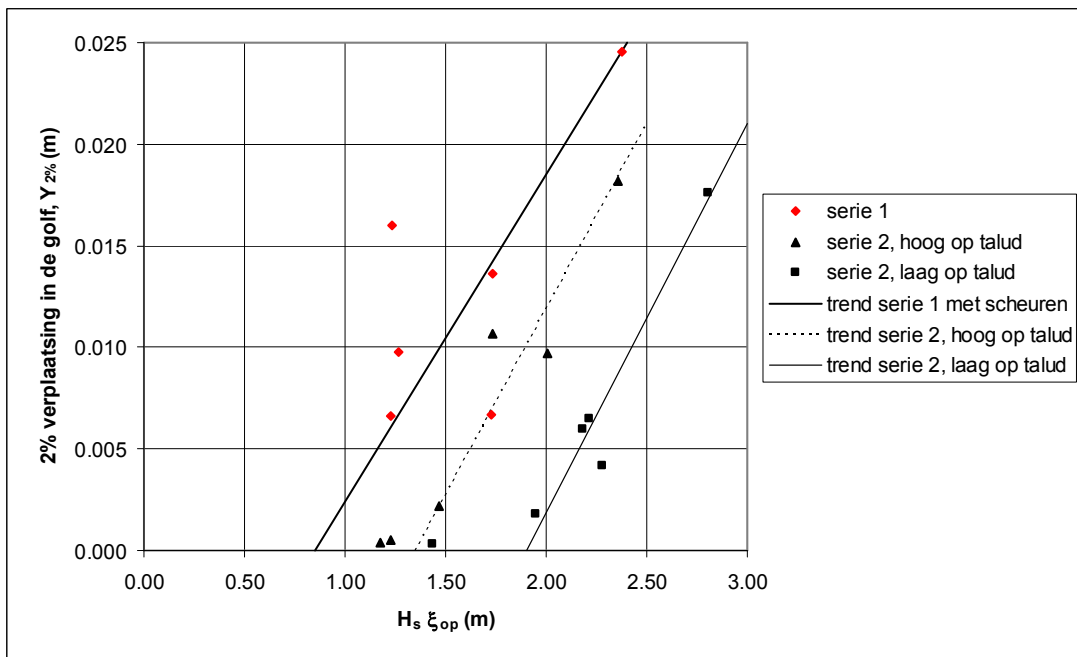
Figuur 5.20, verplaatsing in de golf met 2% overschrijdingsfrequentie (zie ook tabel A5)

Tijdens proef P18, P19 en P20 waren de golfcondities en waterstand ongeveer gelijk, terwijl duidelijk te zien is dat de 2%-verplaatsing tijdens de golf steeds verder toeneemt. Het is denkbaar dat dit samenhangt met de geleidelijke degeneratie van de bekleding, waardoor de samenhang afneemt. De proefparen P01&P02 en P03&P04 zijn echter ook met ongeveer gelijke condities uitgevoerd, terwijl daar de verplaatsing juist afneemt. Tijdens deze proeven is de lek lengte echter ca 20 à 30% afgenomen, terwijl tijdens P18 t/m P20 deze afname slechts 10 à 15% was. Een grote afname van de lek lengte zorgt voor een kleiner stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront, en leidt daardoor tot een kleinere beweging.



Figuur 5.21, verplaatsing in de golf als functie van de significante golfhoogte (zie ook tabel A5)

In figuur 5.21 is de relatie tussen de significante golfhoogte en de  $Y_{2\%}$  getoond. Er blijkt een vrij goede correlatie te zijn met  $H_s$ , behalve dat P00 (met  $H_s = 0,49$  m) weer uit de toon valt. Dit laatste maakt het vermoeden dat het statisch stijghoogteverschil van invloed is steeds sterker.



Figuur 5.22, verplaatsing in de golf met 2% overschrijdingsfrequentie als functie van  $H_s \xi_{op}$ .

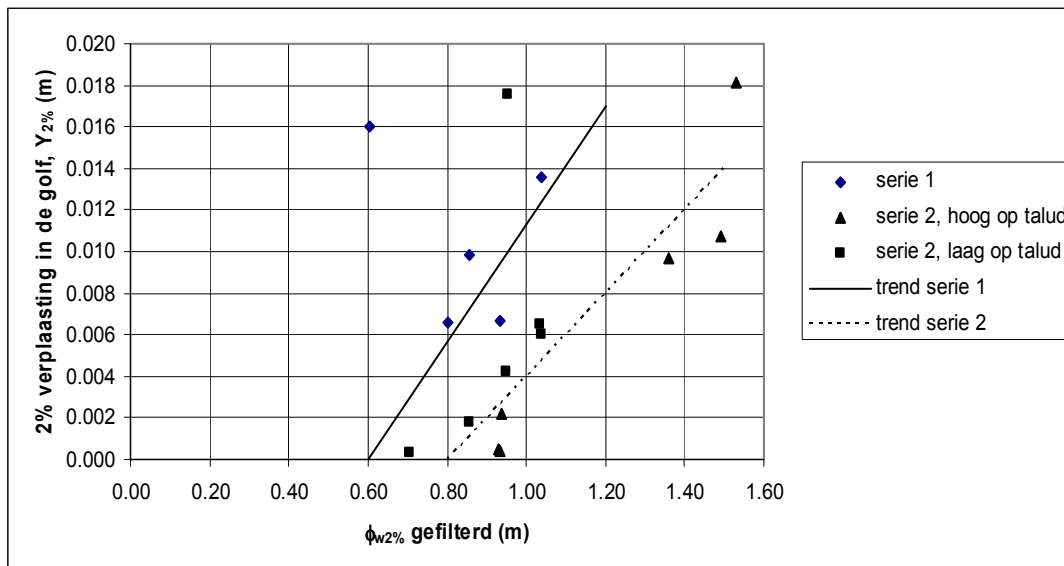
Een toenemende golfhoogte geeft ook een toenemende verplaatsing, waarbij een golfhoogte tot  $H_s \approx 0,5$  m in serie 1 en tot  $H_s \approx 0,9$  m in serie 2 geen verplaatsing geeft. Volgens ANAMOS is het stijghoogteverschil over de toplaag tijdens het golffront ongeveer evenredig met  $H_s \xi_{op}$ . Het is daarom te verwachten dat de verplaatsing tijdens de golf van een

ingegoten steenzetting ook een verband zou hebben met  $H_s \xi_{op}$ . Daarom is in figuur 5.22 dit product gebruikt om de meetpunten nog eens uit te zetten.

We zien in deze figuur dat P00 nog steeds erg hoog ligt, maar wel wat dichterbij de trend van de andere meetpunten van serie 1 ligt. De spreiding in de meetpunten van 'serie 2 hoog op het talud' (2a) is iets toegenomen, maar die van 'serie 2 laag op het talud' (2b) is iets afgenomen. Verder valt op dat er een duidelijk verschil is tussen de metingen van serie 2a (hoog op het talud) en serie 2b (laag op het talud), terwijl dat in figuur 5.21 nog niet tot uiting kwam. Dit kan enerzijds een gevolg zijn van het feit dat de proeven van serie 2b zijn uitgevoerd met een beduidend kleinere waarde van  $\xi_{op}$  (gemiddeld 1,8) dan die van serie 2a (met gemiddelde van 2,1). Anderzijds kan dit veroorzaakt zijn doordat de stabiliteit van de bekleding tijdens de serie 2b hoger was, als gevolg van het feit dat vlak onder de zwaarst belaste zone de bekleding niet was ingegoten. De metingen bieden wat te weinig aanknopingspunten om een keuze te maken tussen deze twee redeneringen.

In figuur 5.23 zijn de gemeten verplaatsingen,  $Y_{2\%}$ , uitgezet ten opzichte van de gemeten stijghoogteverschillen met 2% overschrijdingsfrequentie na filtering op 10 Hz,  $\phi_{w2\%}$ . Deze metingen zijn vaak niet in dezelfde golf gedaan. Ook hier zien we een duidelijke trend, waarbij in serie 1 de verplaatsing begint toe te nemen vanaf  $\phi_{w2\%} \approx 0,6$  m en in serie 2 vanaf  $\phi_{w2\%} \approx 0,8$  m.

Opgemerkt moet worden dat het gemeten stijghoogteverschil optreedt tijdens de golfklap, als de verplaatsing op zijn hoogtepunt zit. Dit betekent dat de verplaatsing geen gevolg is van dit stijghoogteverschil, maar dat dit stijghoogteverschil een gevolg is van de verplaatsing in combinatie met de golfklap.



Figuur 5.23, verplaatsing van de toplaag als functie van het stijghoogteverschil tijdens de golfklap (zie ook tabel A5)

Ook hier zijn een paar punten die uit de toon vallen. Zo zien we weer dat de meting van proef P00 bij  $\phi_{w2\%} = 0,6$  m veel hoger ligt dan de andere punten. Wellicht is tijdens deze proef de toplaag nog zo waterdicht, dat zelfs een kleine belasting al een behoorlijke verplaatsing geeft en heeft het statische stijghoogteverschil hieraan nog bijgedragen.

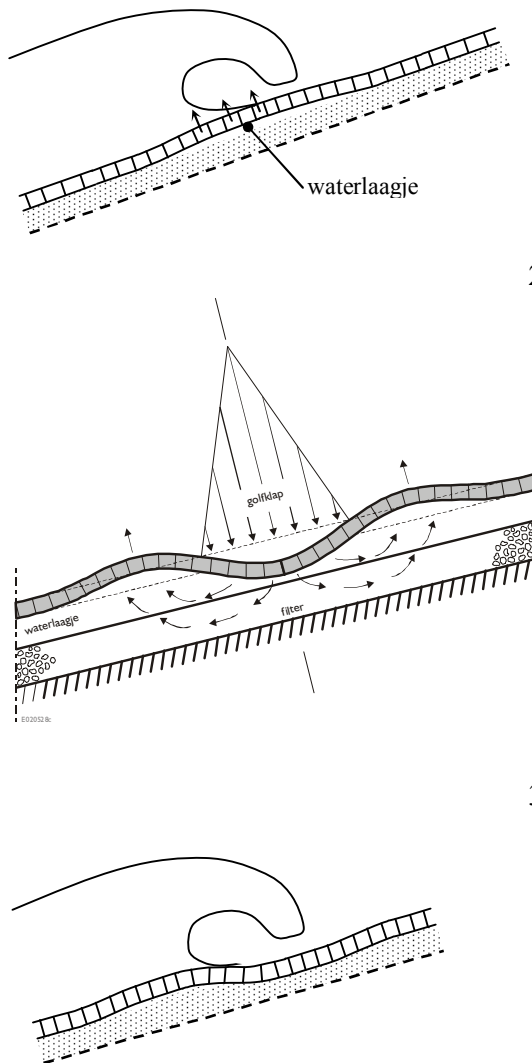
In de figuur ligt ook de meting van proef P21 ( $\phi_{w2\%} = 0,95$  m;  $Y_{2\%} = 0,018$ ) erg hoog, terwijl de zwaarst belaste VPL9 niet eens meedeed omdat die al buiten bereik was. Wellicht is dit een gevolg van het feit dat in de voorgaande proeven er al erg veel migratie van filtermateriaal was opgetreden, terwijl deze proef juist met een erg hoge waterstand is uitgevoerd. Hoog op het talud was weinig filtermateriaal meer over, waardoor er een zeer doorlatende holle ruimte tussen toplaag en ondergrond overblijft, waardoor de toplaag niet vastgezogen kan zitten op de ondergrond (er is weinig of geen verhinderde toestroming). Aan de andere kant zijn de stijghoogteverschillen tijdens ‘serie 2 laag op het talud’ wat onderschat vanwege het feit dat er betrekkelijk weinig drukopnemers in de toplaag zaten. In werkelijkheid zouden de stijghoogteverschillen 10 tot 20% hoger kunnen zijn. Desondanks ligt de meting van P16 ver van de andere metingen.





## 6 Kwantificering van de stabiliteit van de bekleding

Nadat in het vorige hoofdstuk de meetresultaten als functie van de golfcondities en belastingduur zijn weergegeven, wordt in dit hoofdstuk een eerste aanzet tot relevante rekenmodellen gepresenteerd. Hierbij wordt voortgeborduurd op het verkregen inzicht in het bezwijkmechanisme, dat als volgt kort samengevat kan worden (zie figuur 6.0):



1. Vlak voor de golfklap ontwikkelt zich een steil stijghoogtefront dat in een relatief groot gebied een positief stijghoogteverschil (opwaarts gerichte belasting) veroorzaakt. Dit stijghoogteverschil doet de toplaag omhoog bewegen, zodat er een waterlaagje tussen toplaag en filter ontstaat.
2. Tijdens de golfklap drijft de toplaag op het waterlaagje, waardoor de toplaag niet ondersteund wordt door de filterlaag. De golfklap drukt de toplaag lokaal naar beneden waardoor tegelijkertijd het waterlaagje tussen de toplaag en het filter naar opzij wordt weggeperst. Tijdens de golfklap is sprake van een negatief stijghoogteverschil over de toplaag (neerwaartse belasting) onder de golfklap en een positief stijghoogteverschil naast de golfklap. Deze belasting van de toplaag geeft grote dwarskrachten, die mogelijk kunnen leiden tot scheuren.
3. De op en neer bewegende toplaag geeft het filter de ruimte om te migreren. In de loop van de tijd zal steeds meer filtermateriaal in de zone van golfklap tot aan waterlijn naar beneden schuiven en zich ophopen aan de onderzijde van de golfklapzone, waar ook grote positieve stijghoogteverschillen (opwaartse belasting) optreden tijdens het steile stijghoogtefront.

Figuur 6.0, Bezwijkmechanisme.

Hieruit blijkt dat de samenhang van de toplaag bedreigd wordt door de opwaartse beweging tijdens het steile stijghoogtefront, in combinatie met de golfklap. Omdat meer dan de helft van de golven een opwaartse verplaatsing geven met daaropvolgend een golfklap, maakt het denkbaar dat de degeneratie van de toplaag mede door vermoeiing ontstaat, maar wellicht is kruip nog een belangrijkere factor. De migratie van het filtermateriaal zorgt immers voor

een S-profiel dat een grotere lengte heeft dan het oorspronkelijke profiel. Daardoor ontstaan er trekspanningen die leiden tot een steeds grotere (kruip)vervorming die uiteindelijk uitmondt in scheuren.

De stabiliteit van het geheel wordt dus vooral bedreigd door de cumulerende verplaatsingen als gevolg van het migrerende filtermateriaal. Ook voor die migratie is een beweging tijdens het steile stijghoogtefront een noodzakelijke voorwaarde.

De invloed van een statisch stijghoogteverschil blijkt tijdens het bezwijkproces klein te zijn, want de scheuren in de toplaag zorgen ervoor dat dit wegvloeit door de toplaag. De golfbelasting en daarmee samenhangende beweging van de toplaag geeft echter wel een verhoging van de fretatische lijn, maar die wordt niet opgevat als een extra statische belasting, omdat hij samenhangt met de dynamische belasting.

In de aanloop naar het uiteindelijke bezwijkproces zou een statisch stijghoogteverschil nog wel belangrijk kunnen zijn. Tijdens P00 was de stijghoogte in het filter verhoogd door water in het filter te pompen, hetgeen als gevolg had dat er relatief grote bewegingen van de toplaag ontstonden. Hierdoor draagt het statisch stijghoogteverschil toch bij tot het overgaan tot een tweede fase in het degeneratieproces, waarbij er scheuren zijn in de toplaag.

Op grond hiervan worden verschillende fases in het bezwijkproces onderscheiden:

1. De bekleding is nog niet gescheurd, waardoor een betrekkelijk lage golfbelasting, eventueel in combinatie met een statisch stijghoogteverschil, kan leiden tot beweging van de toplaag.
2. In de bekleding zijn scheuren ontstaan als gevolg van de bewegingen. Als gevolg van de migratie van het filtermateriaal ontstaat er een S-profiel.
3. Het S-profiel heeft zulke grote vormen aangenomen dat de bekleding zijn samenhang verliest en bekledingsschollen door de golfbelasting kunnen worden losgerukt. Als er een substantieel gat in de bekleding is ontstaan (groter dan orde  $10 \text{ m}^2$ ) geeft de bekleding onvoldoende bescherming aan de onderlagen en faalt de bekleding.

In dit hoofdstuk is de belasting tijdens de verschillende stadia van het bezwijkmechanisme nader uitgewerkt, resulterend in voorlopige conclusies ten aanzien van de stabiliteit. Daarbij is de aandacht vooral gericht op de tweede fase van het bezwijkproces.

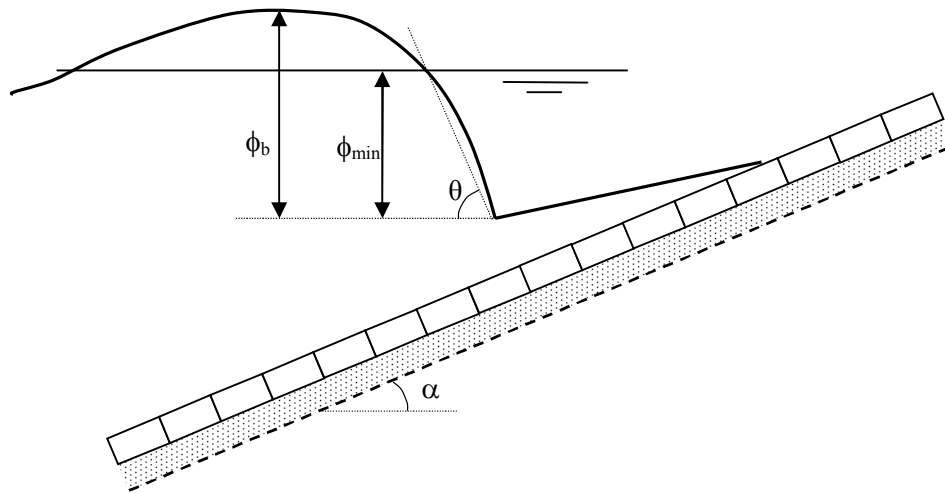
## 6.1 Steil stijghoogtefront

In het eerste deel van de golf, net voor de golfklap, ontwikkelt zich een steeds steiler stijghoogtefront dat een stijghoogteverschil over de toplaag geeft. Het grootste stijghoogteverschil beweegt daarbij het talud op en neemt in grootte toe totdat de golfklap plaatsvindt. Tezelfdertijd groeit de opwaartse verplaatsing van de toplaag en beweegt als een golf mee met het grootste stijghoogteverschil. Dit proces is nader beschreven in hoofdstuk 5.1.

Tijdens de proeven is doorlopend de stijghoogte in het filter en op de toplaag gemeten. De stijghoogte in het filter wordt echter beïnvloed door de beweging van de toplaag. Voor het inzicht in het bezwijkproces is het echter belangrijk om de verschillende aspecten van de belasting te onderscheiden. Daarom is het wenselijk om het stijghoogteverschil exclusief de invloed van beweging te kennen.

Om zicht te krijgen op de grootte van het stijghoogteverschil zonder beweging tijdens het steile stijghoogtefront, is deze berekend. Gezien het feit dat de lek lengte relatief lang is en het gaat om het stijghoogteverschil vóór de golfklap, kan ANAMOS goed gebruikt worden. Nog betere resultaten worden verkregen met de iets verfijndere theorie van het Ronde Front (Klein Breteler, 2000). Net als ANAMOS heeft ook het Ronde Front de lek lengtetheorie als basis, maar vervolgens is gebruikgemaakt van onregelmatige golven om het stijghoogteverloop op de toplaag te kwantificeren. Daardoor sluit het beter aan op het huidige onderzoek dan ANAMOS.

De theorie van het Ronde Front is genoemd naar de vorm van het maatgevende stijghoogtefront, zie figuur 6.1.



Figuur 6.1, maatgevend stijghoogteverloop volgens theorie van Rond Front

Het maximale stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie kan berekend worden met:

$$\frac{\phi_{w2\%}}{\Lambda} = \frac{1}{2} \left( \frac{-c\phi_{\min 2\%}}{1+c\Lambda} + \frac{\tan \theta_{2\%} \cos \alpha}{(1+c\Lambda)^2} + \sin \alpha \right) \cdot \left( 1 - \exp \left\{ \frac{-2z_f}{\Lambda \sin \alpha} \right\} \right) \quad (6.1)$$

$$c = \frac{\tan \theta_{2\%} \cos \alpha}{3\phi_{b2\%} + 2,4\phi_{\min 2\%}} \quad (6.2)$$

$$\frac{\phi_{b2\%}}{H_s} = \min \left\{ 0,27 \frac{\xi_{op}}{(\tan \alpha)^{0,75}} ; 2,5 \right\} \quad (6.3)$$

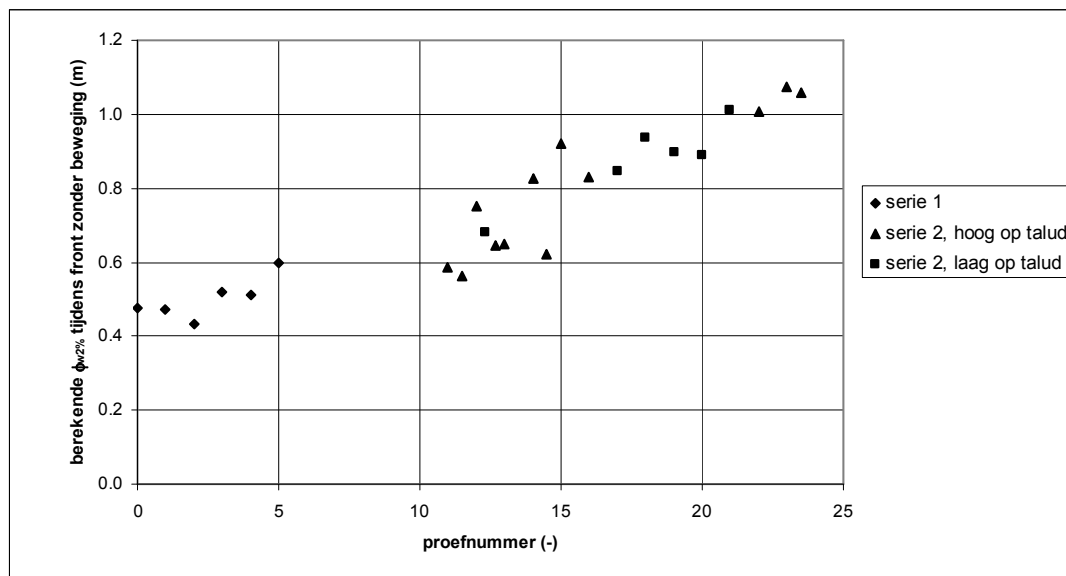
$$\tan \theta_{2\%} = \frac{2,7}{\xi_{op}^{1/3}} \quad (6.4)$$

$$\frac{\phi_{\min 2\%}}{H_s} = \max \left\{ -0,16 \left( \frac{\xi_{op}}{\sqrt{\tan \alpha}} \right)^{1,25} ; \frac{-2,5}{1 + 0,9/\sqrt{\xi_{op}}} \right\} \quad (6.5)$$

met:

$\phi_{b2\%}$  = hoogte van het front behorende bij een stijghoogteverschil met overschrijdingsfrequentie van 2% (m)

- $\theta_{2\%}$  = helling van het stijghoogtefront (gemiddeld onder de stilwaterlijn) met overschrijdingsfrequentie van 2% ( $^{\circ}$ )
- $\phi_{\min 2\%}$  = minimale stijghoogte ten opzichte van de stilwaterlijn (bij de voet van het stijghoogtefront) (m)
- $Z_f$  = niveau van de freatische lijn in het filter (m)
- $\Lambda$  = lek lengte (m)
- $c$  = coëfficiënt (1/m)

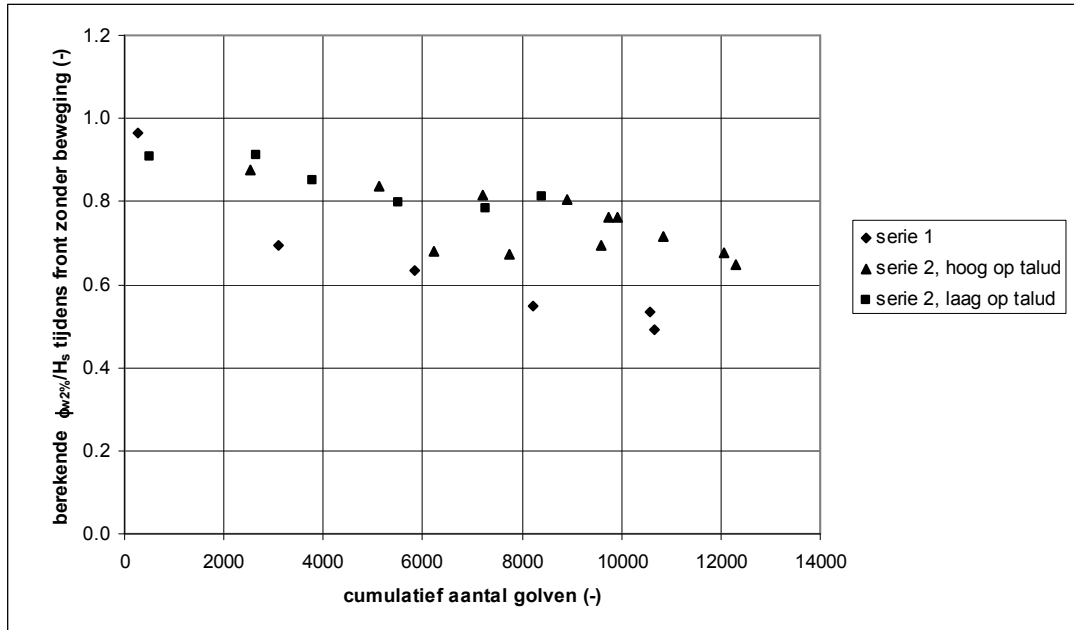


Figuur 6.2, berekend stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie tijdens het stijghoogtefront, als de toplaag niet beweegt (zie ook tabel A5)

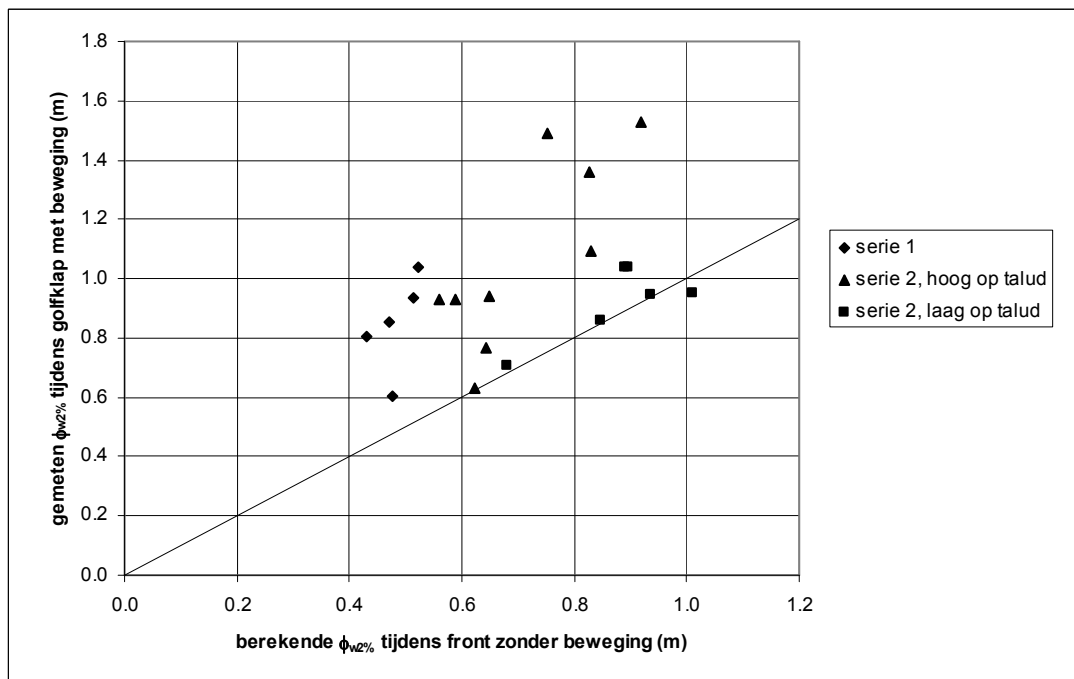
Voor het berekenen van het stijghoogteverschil over de toplaag is de lek lengte van de steenetting nodig. In het huidige onderzoek is deze uit de metingen bepaald voor proef P01, P04, P11B en P16, zie paragraaf 5.2. De lek lengte tijdens de overige proeven is geschat met een lineaire interpolatie op basis van het cumulatief aantal golven. Hierbij is aangenomen dat de lek lengte kleiner wordt naarmate er meer golven op het talud gebeukt hebben (zie ook bijlage F). Tijdens serie 1 neemt de lek lengte af van 1,2 m tot 0,8 m en tijdens serie 2 van 3,5 m tot 2,2 m.

Het resultaat van de berekeningen is gegeven in figuur 6.2. In de figuur is te zien dat het stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront steeds hoger is geworden dankzij het toenemen van de golfbelasting.

In figuur 6.3 is het stijghoogteverschil dimensieloos uitgezet tegen het cumulatieve aantal golven tot en met de beschouwde proef (dimensieloze belastingduur). Het valt op dat  $\phi_{w2\%}/H_s$  afneemt met het toenemen van de belastingduur. Dit wordt voor een deel veroorzaakt doordat het rekenmodel voor  $\phi_{w2\%}$  zodanig is dat een toename van  $H_s$  bij eenzelfde lek lengte een kleine afname van de  $\phi_{w2\%}/H_s$ -verhouding geeft. Voor de huidige proevenserie geeft dat een afname van ongeveer 10%. Hier is er sprake van een afname van ongeveer 30%, waardoor 20% toegeschreven kan worden aan het kleiner worden van de lek lengte.



Figuur 6.3, berekend dimensieloos stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront als functie van de dimensieloze belastingduur (zie ook tabel A5)



Figuur 6.4, gemeten stijghoogteverschil tijdens de golfklap (met bewegende toplaag) als functie van het berekende stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront (zonder beweging van de toplaag).

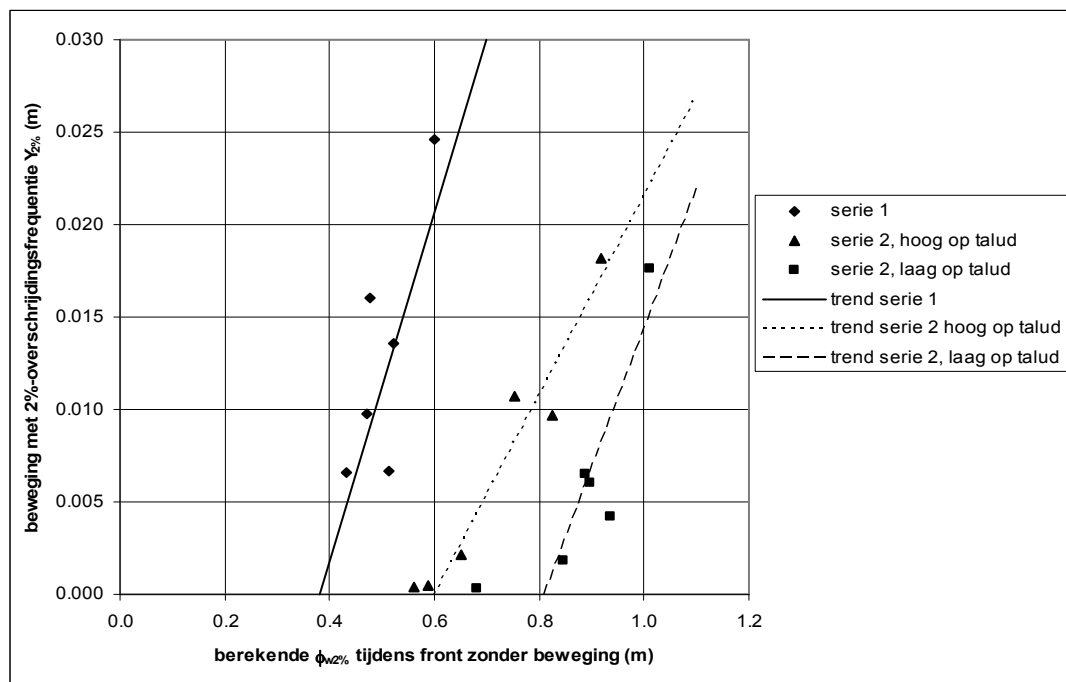
Figuur 6.4 toont het berekende stijghoogteverschil tijdens het front zonder beweging in vergelijking tot het gemeten stijghoogteverschil tijdens de golfklap, waarbij ook de toplaagbeweging van invloed was. Het blijkt dat in bijna alle proeven het stijghoogteverschil tijdens de golfklap groter is dan het berekende stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront. Hierbij moet meegeteld worden dat de stijghoogteverschillen tijdens 'serie 2 laag op het talud' ongeveer 10 à 20% onderschat zijn vanwege het beperkte aantal drukopnemers in de modelopstelling. Verder zouden de stijghoogteverschillen

beïnvloed kunnen zijn door de niet ingegoten bekleding direct onder de zwaarbelaste zone. Het verschil tussen de resultaten ‘hoog op het talud’ en ‘laag op het talud’ tijdens serie 2 zou veroorzaakt kunnen zijn doordat het stijghoogteverschil tijdens de golfklap hierdoor lager is. Het grootste stijghoogteverschil tijdens de golfklap treedt namelijk op als de dichte bekleding naar beneden wordt gedrukt door de golfklap en het water nergens naartoe kan. Tijdens de proeven ‘laag op het talud’ kan de overdruk dan weg door het niet-ingegoten deel.

Voor proef P14B blijkt het gemeten stijghoogteverschil tijdens de golfklap ongeveer gelijk te zijn aan het berekende stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront.

Volgens de beschrijving van het bezwijkmechanisme zou het stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront verantwoordelijk zijn voor de beweging van de toplaag. In figuur 6.5 is de gemeten beweging met 2% overschrijdingsfrequentie uitgezet tegen het berekende stijghoogteverschil. Deze figuur vertoont een grote overeenkomst met figuur 5.22, omdat het berekende stijghoogteverschil ongeveer evenredig is met  $H_s \xi_{op}$ .

Het blijkt dat er inderdaad een verband is tussen het stijghoogteverschil en de beweging. In de figuur is te zien dat er sprake is van een drempel, tot welk stijghoogteverschil er nog geen beweging optreedt. Deze drempel ligt kennelijk voor ‘serie 1’ bij  $\phi_{w2\%} \approx 0,4$  m, voor ‘serie 2 hoog op het talud’ bij  $\phi_{w2\%} \approx 0,6$  m en voor ‘serie 2 laag op het talud’ bij  $\phi_{w2\%} \approx 0,8$  m. Het is verder opmerkelijk dat de trendlijnen zo steil lopen. Dat betekent dat het overschrijden van de drempel ten aanzien van het stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront, een snel toenemende beweging optreedt.



Figuur 6.5, gemeten toplaagbeweging met 2% overschrijdingsfrequentie als functie van berekend stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront (zie ook tabel A5)

Het stijghoogteverschil bij begin van beweging is vrij hoog ten opzichte van het eigengewicht. Dit laatste komt overeen met  $\Delta D = 0,24$  m. Door traagheid en verhinderde toestroming lijkt het stijghoogteverschil tijdens serie 1 orde 2 keer zo hoog te kunnen worden als het eigengewicht, en in serie 2 orde 3 keer, zonder dat de toplaag veel beweegt.

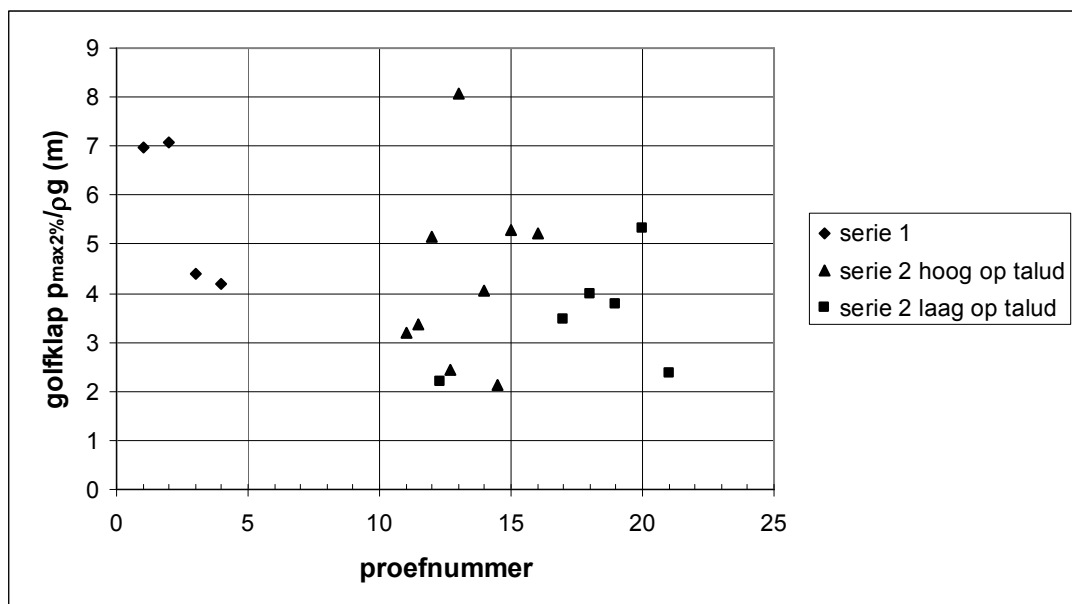
Het stijghoogteverschil tijdens het front is voor serie 2 ‘laag op het talud’ berekend zonder rekening te houden met het niet-ingegoten stuk steenzetting vlak onder de zwaarst belaste zone. Waarschijnlijk is deze invloed niet zo groot, omdat dit stuk steenzetting tot het einde vrij dicht ingezand is gebleven.

## 6.2 Golfklap

Zodra de toplaag door het steile stijghoogtefront iets van het filter is opgelicht en niet ondersteund wordt door het filter, krijgt het de daverende belasting van de golfklap op zich. Tijdens het huidige onderzoek zijn golfklappen van maar liefst 8 m waterkolom gemeten, zie figuur 6.6. De golfklap zal lokaal de toplaag naar beneden doen bewegen, en tegelijkertijd het water eronder wegpersen. De hoge stijghoogte op de toplaag wordt doorgegeven naar het water onder de toplaag, omdat het water onder de toplaag niet zo snel weg kan vloeien (zie figuur 2.6). Omdat de toplaag een zekere buigstijfheid heeft, is de zone waar de stijghoogte toeneemt breder dan de golfklap, zie figuur 5.6. Dit leidt tot een neerwaarts stijghoogteverschil onder de golfklap en een opwaarts stijghoogteverschil naast de golfklap. De verschillen zijn echter te kortdurend om tot veel vervorming te leiden, en daardoor zullen waarschijnlijk ook de buigende momenten beperkt blijven.

Dit leidt echter wel tot grote dwarskrachten in de toplaag. Deze situatie is geschetst in figuur 2.5 en kwantitatief uitgewerkt door Klein Breteler (2003). Met de rekenmethode die samengevat is in paragraaf 2.4 is onderstaand de dwarskracht in de toplaag berekend tijdens de belasting van de huidige proeven. Er is hierbij uitgegaan van de veronderstelling dat de toplaag op een waterlaag rust op een moment dat de golfklap plaatsvindt. Gezien het feit dat dit bij meer dan de helft van de golven het geval is, is dit een redelijke aanname.

Omdat een golfklap maar heel kort duurt, zou een grote dwarskracht de sterkte weliswaar kunnen overschrijden, maar zal dit waarschijnlijk toch slechts weinig verplaatsing opleveren. Er zijn daardoor veel golfklappen nodig voordat de bekleding kapot gaat.



Figuur 6.6, stijghoogte tijdens de golfklap, met 2% overschrijdingsfrequentie, ten opzichte van het taludoppervlak (gefilterd op 100 Hz, zie ook tabel A5)

Voor het uitvoeren van de berekeningen is het noodzakelijk de doorlatendheid van het filter te kennen. Deze is helaas niet gemeten, en bovendien gedurende de proeven flink veranderd als gevolg van het migrerende filtermateriaal, waarbij ook ontmenging optrad.

In bijlage F is de doorlatendheid van het filtermateriaal bepaald aan de hand van de infiltratieproef die uitgevoerd is voor P00. Daaruit blijkt dat de gelineariseerde doorlatendheid  $k = 0,04$  m/s was.

Met deze doorlatendheid van het filtermateriaal zijn de eerste proeven uit de drie series doorgerekend. Zodra de migratie van het filtermateriaal op gang komt, is gerekend met een tweemaal zo grote doorlatendheid, en als de migratie grote vormen aanneemt, is het nogmaals verdubbeld. Hierdoor is gerekend met  $k = 0,04$  m/s in proef P00 t/m P02 en P11, P11B, P17 en P18, met  $k = 0,08$  m/s in proef P03, P04, P12 t/m P15 en P19, en met  $k = 0,15$  m/s in proef P05, P16, P20 en P21.

Verder zijn er per proef 5 golven geselecteerd waarvoor een dwarskrachtberekening is uitgevoerd. Voor elke golf is gerekend met de actuele waarde van de golfklapgrootte ( $p_{\max}/\rho g$ ), golfklapbreedte ( $B_{\text{klap}}$ ) en stijgtijd ( $t_s$ ). De golven zijn als volgt geselecteerd:

1. golf met golfklapgrootte met overschrijdingsfrequentie kleiner dan 2%, en waarvan de golfklapbreedte maximaal is.
2. golf met golfklapgrootte met overschrijdingsfrequentie kleiner dan 2%, en waarvan de golfklapbreedte minimaal is.
3. golf met golfklapgrootte met overschrijdingsfrequentie kleiner dan 10%, en waarvan de golfklapbreedte maximaal is.
4. golf met golfklapgrootte met overschrijdingsfrequentie kleiner dan 10%, en waarvan de golfklapbreedte minimaal is.
5. golf met golfklapgrootte met overschrijdingsfrequentie kleiner dan 33%, en waarvan de golfklapbreedte maximaal is.

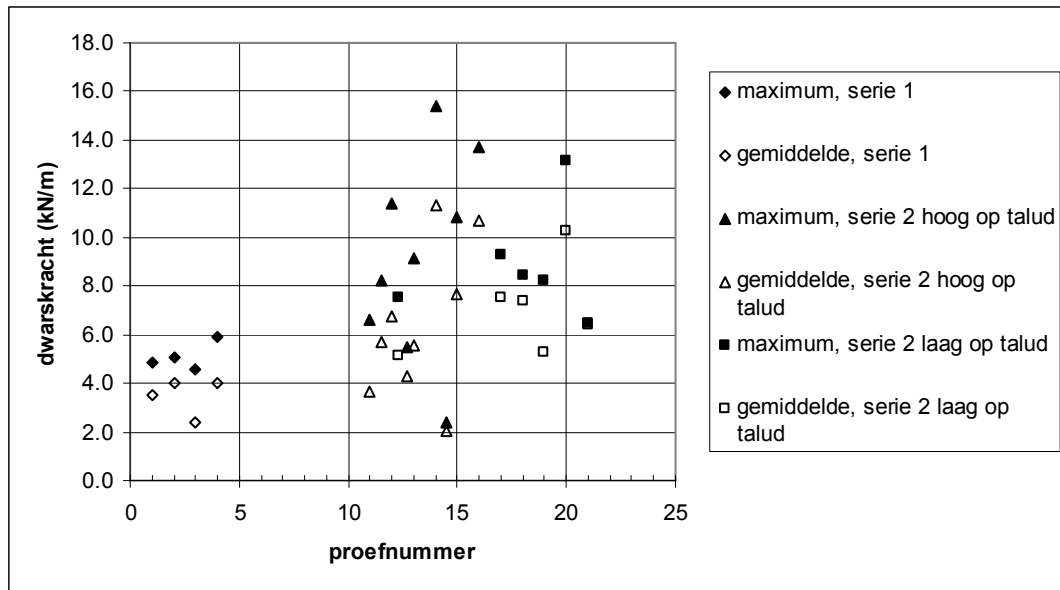
Deze selectie is zo gemaakt omdat zowel de golfklapgrootte als de golfklapbreedte belangrijke parameters zijn. Hiermee zijn golven verkregen die een grote belasting veroorzaken.

Andere parameters in de berekeningen zijn als volgt gekozen:

- elasticiteitsmodulus van de toplaag (gelijk aan de waarde die bepaald is aan de hand van de valgewichtdeflectiemeting):
  - serie 1:  $E = 0,474$  GPa
  - serie 2:  $E = 10,49$  GPa
- waterlaagje tussen toplaag en filter:
  - dikte is gelijk aan  $Y_{2\%}$
  - Nikuradse-ruwheid:  $k_{\text{nik}} = 3$  mm
- dikte van filterlaag:  $b = 0,08$  m (ongewijzigd in alle berekeningen)
- afstand waarover de stijghoogte in het filter naar bijna nul reduceert (conform Klein Breteler, 2003):  $L = B_{\text{klap}}/2$

Met bovenstaande gegevens zijn de dwarskrachten in de toplaag tijdens de proeven berekend. De resultaten zijn weergegeven in figuur 6.7. In de figuur zijn de grootste dwarskrachten van de 5 doorgerekende golven gegeven, en het gemiddelde van die 5. Deze blijken niet zoveel te verschillen, waaruit geconcludeerd kan worden dat de berekende dwarskracht tijdens de proeven veelvuldig voorkomt.





Figuur 6.7, berekende dwarskrachten bij gekozen invoer per proef

De dwarskracht die leidt tot schade is in de Deltagoot helaas niet gemeten. Een schatting maken aan de hand van metingen bij Kruiningen valt ook niet mee, zoals blijkt uit het onderstaande.

Door Klein Breteler (2003) is uit veldmetingen bij Kruiningen afgeleid dat een langdurige dwarskracht van 26 kN/m op een half ingegoten steenzetting met een toplaagdikte van ongeveer 25 à 28 cm leidt tot bezwijken. De huidige bekleding is half zo dik en zal dus bij een lagere dwarskracht reeds bezwijken. De belasting is tijdens de huidige golfbelasting echter niet langdurig aangebracht, maar vele malen gedurende zeer korte duur. Het is moeilijk in te schatten welk van de twee belastingsscenario's de laagste schadebelasting zal geven.

Op de bekleding in Kruiningen is ook een VGD-meting uitgevoerd, met als resultaat:  $E = 2,0$  GPa. Op grond hiervan kan gesteld worden dat de bekleding van serie 1 wat minder samenhang had en daardoor ook een kleinere dwarskracht bij schade heeft dan bij Kruiningen. Die van serie 2 zal meer samenhang hebben en dus ook een grotere dwarskracht bij schade.

De dwarskracht bij schade in de Deltagoot kan dus groter of kleiner zijn dan de gemeten waarde bij Kruiningen. Er kan slechts gesteld worden dat de berekende dwarskrachten die op zijn getreden in de Deltagoot van dezelfde orde zijn als de dwarskrachten bij schade bij Kruiningen.

Tenslotte is onderzocht wat de invloed van de geschatte parameters is. Hiervoor is de dikte van het waterlaagje, de doorlatendheid van het filter, de stijgtijd en de waarde van  $L$  gevarieerd. Een grote variatie van de invoerparameters zorgde echter voor een betrekkelijk kleine verandering van de berekende dwarskrachten. Per parameter veranderde de dwarskracht maximaal orde 30%.

Als dwarskrachten de sterkte overschrijden, kunnen scheurtjes in de toplaag ontstaan. Dat er scheurtjes ontstaan, was reeds geconcludeerd aan de hand van het geleidelijk afnemen van de lek lengte van de bekleding. Uit bovenstaande analyse blijkt dat de belasting tijdens golfklappen mogelijk de oorzaak is van scheurtjes in de toplaag. Door de korte duur van de

belasting in de golfklap zijn er vele overschrijdingen van de sterkte nodig voordat er een significante verplaatsing in de bekleding optreedt.

De vervorming van de toplaag als gevolg van het migrerende filter kan ook bijgedragen hebben aan de vorming van scheurtjes, maar kan ook de samenhang in de bekleding verminderen, waarna de golfklappen meer kans hebben om scheurtjes te veroorzaken. Het S-profiel was na verloop van tijd zo groot dat de totale lengte van de bekleding moet zijn toegenomen, met de volgende mogelijke consequenties:

- lokaal brede scheuren, en/of
- over het hele oppervlak trekspanningen in het gietasfalt, waardoor het gietasfalt op vele plaatsen losscheurt van de basalt, en/of
- over het hele oppervlak trekspanningen in het gietasfalt die leidt tot kruipvervorming. Hierdoor zal de interactie tussen de basaltzuilen verminderen en moet de volledige sterkte ontleend worden aan het gietasfalt, dat slechts matig hecht aan de basalt.

Met ANAMOS kan een indruk verkregen worden van de hoeveelheid scheuren die nodig zijn om de gemeten lek lengte te verklaren. Dit is nader uitgewerkt in bijlage F. Het blijkt dat scheurtjes van 1 à 4 mm breedte op een onderlinge afstand van 2 m al voldoende zijn voor serie 1 en scheurtjes van 0,5 à 1,1 mm breedte op een onderlinge afstand van 3 m voor serie 2.

## 6.3 Stabiliteit

### 6.3.1 Bezwijkmechanisme

Uit de analyse van de meetgegevens en de schade na de proeven is gebleken dat de schade aan de bekleding veroorzaakt wordt door een combinatie van factoren:

#### Fase 1:

De bekleding is nog niet gescheurd, waardoor een betrekkelijk lage golfbelasting, eventueel in combinatie met een statisch stijghoogteverschil, kan leiden tot beweging van de toplaag.

#### Fase 2:

In de bekleding zijn scheuren ontstaan als gevolg van de bewegingen. Een statisch stijghoogteverschil is nu niet meer belangrijk. Het proces verloopt als volgt:

- Een steil stijghoogtefront licht de bekleding op.
- Zware golfklappen zorgen voor grote dwarskrachten in de toplaag, die kunnen leiden tot scheurtjes. Het gietasfalt kan losscheuren van de basalt.
- Onder de bewegende toplaag kan het filter migreren waardoor een S-profiel ontstaat.
- Het S-profiel verzwakt de toplaag zodat golfklappen gemakkelijker schade aan kunnen richten.
- Na het migreren van het filter is lokaal het filter deels of geheel verdwenen waardoor een ruimte tussen toplaag en ondergrond ontstaat met hoge doorlatendheid. Hierdoor vermindert de invloed van de verhinderde toestroming en kan de toplaag gemakkelijker op en neer bewegen.

### Fase 3:

Het S-profiel heeft zulke grote vormen aangenomen dat de bekleding zijn samenhang verliest en bekledingsschollen door de golfbelasting kunnen worden losgerukt. Als er een substantieel gat in de bekleding is ontstaan (groter dan orde  $10 \text{ m}^2$ ) geeft de bekleding onvoldoende bescherming aan de onderlagen en faalt de bekleding.

De bewegingen als gevolg van de belasting bij het golffront zijn mogelijk belangrijker dan de golfklappen, omdat die laatste erg kort duren. Een overschrijding van de sterkte tijdens de golfklappen kan weliswaar een scheurtje doen ontstaan, maar de duur is zo kort dat er nauwelijks een belangrijke verplaatsing door kan optreden. De bewegingen van de toplaag tijdens het golffront zijn substantieel en kunnen belangrijke hoeveelheden filtermateriaal de gelegenheid geven te migreren.

Aanvankelijk was het filter ingezand tot een niveau van  $z' = 4,35 \text{ m}$  boven de gootbodem, en daarboven niet ingezand. Zolang de bekleding nog niet veel bewogen heeft, zal deze inzanding de doorlatendheid van het filter beperkt hebben. Daardoor zal er ook een duidelijke invloed van de verhinderde toestroming op de beweging van de toplaag geweest zijn (zie ook figuur 5.14). De verhinderde toestroming verkleint de bewegingen. Naarmate de toplaag meer bewegingen heeft gemaakt en het filter is gaan migreren, zal er steeds meer ontmenging van het filter hebben plaatsgevonden, en is het dus doorlatender geworden. De invloed van de verhinderde toestroming neemt dan af. In een latere fase van het bezwijkproces zal de bekleding daarom waarschijnlijk steeds gemakkelijker zijn gaan bewegen.

Een dergelijke proces kan ook in het prototype verwacht worden.

Tijdens proef P00, P11 en P11B verkeerde de bekleding in fase 1. Aan het eind van proef P05 en P23a was het bezwijkproces zo ver gevorderd dat de bekleding in fase 3 verkeerde. Vooral fase 2 is belangrijk voor de stabiliteit van de bekleding. De verschillende factoren in fase 2 beïnvloeden elkaar en versterken elkaar. Dit maakt het moeilijk om een gedetailleerd rekenmodel op te stellen. Onderstaand is eerst de problematiek van de belastingduur behandeld, om op basis van de resultaten een eenvoudig stabiliteitsmodel af te kunnen leiden. Tenslotte zijn elementen aangedragen voor een gedetailleerd rekenmodel.

### **6.3.2 Toelaatbare belasting en belastingduur**

In dit onderzoek zijn twee verschillende ingegoten bekledingen beproefd, waarbij die van serie 1 gekarakteriseerd kan worden door een matige samenhang, en serie 2 met een goede samenhang. Het is gebleken dat de kwaliteit van de bekleding goed vastgesteld kan worden met een VGD-meting. De elasticiteitsmodulus die volgt uit de VGD-meting schaalt met de lengteschaal, net als de golfhoogte en de bekledingsdikte.

De proeven hebben laten zien dat de bekleding van serie 1 lange tijd weerstand kan bieden aan een golfbelasting van  $H_s = 0,7 \text{ m}$  (P01 en P02). Na 5565 golven met deze golfhoogte is er nauwelijks enige vervorming van de toplaag of migratie van het filter ontstaan.

Als vervolgens gedurende proef P03 en P04 orde 4753 golven met  $H_s = 1,0 \text{ m}$  en  $\xi_{op} \approx 1,8$  op de bekleding zijn neergekomen, is de vervorming van de toplaag en de migratie aanzienlijk, maar er is nog geen falen van de bekleding. We spreken pas van falen als de

ondergrond niet meer beschermd wordt door de bekleding. Dat is pas aan de orde als er grote gaten in de bekleding zijn (groter dan orde  $10 \text{ m}^2$  een prototype, groter dan orde 2 à  $3 \text{ m}^2$  in het huidige model op schaal 2). Bij een iets hogere belasting ( $H_s = 1,22 \text{ m}$ ) ontstaat er vrij snel een groot gat in de toplaag en faalt de bekleding. Waarschijnlijk was dit ook gebeurd als de belasting met  $H_s = 1,0 \text{ m}$  nog enige tijd had voortgeduurd. Bij een grotere golfhoogte gaat het echter veel sneller, omdat er een aanzienlijk grotere beweging van de toplaag optreedt en het schadeproces dus sneller verloopt (zie figuur 6.5).

De belastingduur is hierbij uitgedrukt in het aantal golven. Deze dimensieloze grootte is in het schaalmodel in de Deltagoot weergegeven met schaal 1. Het is de meest geschikte maat voor de belastingduur. De grootte van de belasting wordt gekarakteriseerd door de grootte van de golven ( $H_s$  en  $H_{\max}$ ), de golfperiode ( $T_p$ ,  $T_{m-1,0}$ ), de belastingduur (het aantal golven) en de hoek van golfinval. Dit laatste aspect is in het huidige onderzoek niet gevarieerd.

Tijdens de proeven zijn de golfhoogte en periode stap voor stap verhoogd, en is in elke stap de belasting enige tijd aangehouden. Ook in werkelijkheid zullen golfhoogte en golfperiode tijdens de storm toenemen tot een maximum, en vervolgens weer afnemen. Voor het interpreteren van de belastingduur moet er dus gedacht worden aan de gehele storm (toenemende  $H_s$  en  $T_p$ , en vervolgens weer afnemend), maar moet ook de maximale belasting gedurende enige tijd weerstaan worden. Dit betekent dat enerzijds de belastingduur gedurende het gehele proevenprogramma van belang is, maar anderzijds ook de duur van de maximale golfbelasting tot bezwijken.

Tijdens serie 1 was de totale belastingduur 10.675 golven. De maximale belasting tijdens proef P05 duurde slechts 89 golven en bovendien was de vervorming na proef P04 al zodanig dat het bezwijken naderde. Daardoor is de golfbelasting tijdens P05 minder relevant en worden de golfcondities tijdens proef P03 t/m P05 beschouwd als maximale belasting. De duur van de maximale belasting is gelijk aan de duur van proef P03 t/m P05, namelijk 4842 golven.

Opgemerkt kan worden dat de grootste golf tijdens de proeven P03 t/m P05 al was opgetreden tijdens P03. Ook dit is een argument om deze drie proeven tezamen te beschouwen.

De gemiddelde significante golfhoogte en periode tijdens deze proeven wordt bepaald op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven):

$$\left. \begin{aligned} m_o &= \frac{1}{16} H_s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{16 \sum_{i=1}^n N_i} \\ T_{m-1,0} &= \frac{m_{-1}}{m_o} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i m_{-1i})}{\sum_{i=1}^n (N_i m_{oi})} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (6.6)$$

$$H_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{\sum_{i=1}^n N_i}} \quad (6.7)$$

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{pi})}{H_s^2 \sum_{i=1}^n N_i} \quad (6.8)$$

met:

$H_s$  = significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)

$T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)

$N_i$  = aantal golven in proef i (-)

$H_{si}$  = significante golfhoogte in proef i (m)

$T_{pi}$  = de golfperiode tijdens proef i, bij de piek van het spectrum (s)

$n$  = aantal proeven (-)

$T_{m-1,0}$  = golfperiode op basis van het spectrum ( $T_{m-1,0} \approx T_p/1,1$ ) (s)

$m_0$  =  $\int E(f) df$  = nulde moment van de energiedichtheid (oppervlak onder het spectrum) ( $m^2$ )

$m_{-1}$  =  $\int f^{-1} \cdot E(f) df$

$E(f)$  = energiedichtheid als functie van  $f$  (grafiek van het spectrum) ( $m^2s$ )

$f$  = golfrequentie =  $1/T$  (Hz)

Met deze formules kan de belasting tijdens de eerste proevenserie als volgt omschreven worden:

- totale belastingduur: 10.675 golven (alle proeven)
- gemiddelde golfcondities tijdens maximale belasting (proef P03 t/m P05):
  - $H_s = 0,96$  m (berekend met formule 6.7)
  - $T_p = 4,98$  s (berekend met formule 6.8)
  - $\xi_{op} = 1,81$ ;  $H_s/\Delta D = 3,67$ ;  $F = 5,46$  (op basis van soortelijke massa van basalt)
- duur van de maximale belasting: 4842 golven (proef P03 t/m P05)

De proeven op de volledig ingegoten bekleding in de tweede serie hebben geen bezwijken opgeleverd tijdens de proeven met een lage waterstand (serie 2b). Aan het eind van deze serie is bij proef P21 met  $H_s = 1,24$  m ( $\xi_{op} = 2,25$ ) enige vervorming van de toplaag en migratie van het filter opgetreden, maar er is nog lang geen sprake van falen.

Voor het bepalen van de gemiddelde golfcondities tijdens de maximale belasting worden alle proeven beschouwd waarvoor geldt dat de significante golfhoogte ten minste 90% is van de proef die uiteindelijk tot de grootste schade leidde (arbitraire keuze). Hierdoor kan de belasting voor de ‘serie 2 laag op het talud’ als volgt omschreven worden (serie 2b):

- totale belastingduur: 7418 golven (alle proeven: P12A en P17 t/m P21)
- gemiddelde golfcondities tijdens maximale belasting (proef P19 t/m P21):
  - $H_s = 1,16$  m (berekend met formule 6.7)
  - $T_p = 6,14$  s (berekend met formule 6.8)
  - $\xi_{op} = 2,04$ ;  $H_s/\Delta D = 4,42$ ;  $F = 7,10$  (op basis van soortelijke massa van basalt)
- duur van de maximale belasting: 4620 golven (proef P19 t/m P21)

De proeven tijdens serie 2a met een hoge waterstand en belasting hoog op het talud hebben uiteindelijk wel geleid tot bezwijken. Uiteindelijk zijn er ruim 2000 golven met  $H_s = 1,4$  à  $1,6$  m en  $\xi_{op} \approx 2,0$  nodig om een gat in de toplaag te krijgen en de bekleding te laten falen

(proef 22 t/m 23a). De toplaaag was toen echter al sterk verzwakt door grote vervormingen en een aanzienlijke migratie van filtermateriaal in de voorgaande proeven. Ook de aanwezigheid van de infiltratiebuis voor het regelen van de freatische lijn in het filter kan bijgedragen hebben aan de schade.

De belasting die tijdens serie 2a (hoog op het talud) uiteindelijk geleid heeft tot schade kan als volgt omschreven worden:

- totale belastingduur: 12.311 golven (alle proeven: P11 t/m P12, P12B t/m P16 en P22 t/m P23a)
- gemiddelde golfcondities tijdens maximale belasting (proef P23 en P23a):
  - $H_s = 1,60$  m (berekend met formule 6.7)
  - $T_p = 6,89$  s (berekend met formule 6.8)
  - $\xi_{op} = 1,95$ ;  $H_s/\Delta D = 6,09$ ;  $F = 9,49$  (op basis van soortelijke massa van basalt)
- duur van de maximale belasting: 1465 golven (proef P23 en P23a)

Om de verschillende proefresultaten goed met elkaar te kunnen vergelijken, is het gewenst deze resultaten te vertalen naar een standaard duur van 1000 golven. Om dit nauwkeurig te kunnen doen, zijn er resultaten nodig van langeduurproeven waarbij op verschillende belastingniveaus bepaald is na hoeveel golven de bekleding bezwijkt. Helaas zijn deze resultaten niet beschikbaar. Daarom moet de invloed van de langeduurbelasting geschat worden op basis van de beschikbare gegevens. Door Klein Breteler en Eysink (2005) is de invloed van de langeduurbelasting bepaald voor verschillende typen steenzetting. Dit heeft geleid tot de volgende formules waarmee de bezwijkgolffoogte bij langeduurbelasting kan worden berekend op basis van onder andere de bezwijkgolffoogte,  $H_{s1000}$ , bij een kort durende belasting van 1000 golven (exclusief 6-ksi-regel):

$$\frac{H_{sN}}{\Delta D} = f_B f_S \frac{H_{s1000}}{\Delta D} \quad \text{of} \quad F_N = f_B f_S F_{1000} \quad (6.9)$$

$$f_B = \frac{1,71 \cdot \min\{1,54; c_H\}}{\min\{\sqrt{\ln N}; c_H (\ln N)^{1/3,6}\}} \quad (6.10)$$

$$f_S = \max\left\{1 - c_1 \cdot \log \frac{N}{1000}; c_2\right\} \quad (6.11)$$

$$c_H = \max\left\{1,06; 0,8 + \frac{(0,098 + 1,62 \tan \alpha_{\text{bodem}}) h^2}{0,673 H_{s1000} h + 0,203 H_{s1000}^2}\right\} \quad (6.12)$$

- Basalt, Basalton en Hydroblocks:  $c_1 \approx 0,2$  en  $c_2 \approx 0,8$
- Blokken op hun kant:  $c_1 \approx 0,35$  en  $c_2 \approx 0,65$

met:

$H_{s1000}$  = maximaal toelaatbare significante golffoogte bij een belastingduur van 1000 golven (m)

$H_{sN}$  = maximaal toelaatbare significante golffoogte bij een belastingduur van N golven (m)

$F_{1000}$  = stabiliteitparameter bij een belastingduur van 1000 golven (-)

$F_N$  = stabiliteitparameter bij een belastingduur van N golven (-)

$f_B$  = invloedsfactor m.b.t. de belasting (-)

$f_S$  = invloedsfactor m.b.t. de sterkte (-)

$\alpha_{\text{bodem}}$  = bodemhelling voor de constructie ( $^\circ$ )

h = waterdiepte bij de teen (m)

	serie 1				serie 2b	serie 2a hoog op talud		
	P01 en 02	P03	P03 en P04	P03 t/m P05	P19 t/m P21	P22	P22 en P23	P23 en P23a
$H_{sN}/\Delta D$	2,59	3,63	3,64	3,67	4,42	5,37	5,74	6,09
$F_N$	3,88	5,41	5,41	5,46	7,10	8,40	9,01	9,49
$\xi_{op}$	1,83	1,82	1,81	1,81	2,04	1,96	1,97	1,95
N	5565	2386	4753	4842	4620	1102	2314	1465
$h/H_s$	5,74	4,11	4,06	4,06	2,84	3,32	3,13	2,94
$\tan(\alpha_{bodem})$	0	0	0	0	0	0	0	0
$c_H$	1,59	1,36	1,35	1,35	1,17	1,24	1,22	1,19
$f_B$	0,91	0,97	0,94	0,94	0,95	1,00	0,97	0,98
$f_S$	0,85	0,92	0,86	0,86	0,87	0,99	0,93	0,97
$F_{1000}$	5,02	6,05	6,62	6,70	8,66	8,51	10,04	9,97
$H_{s1000}/\Delta D$	3,36	4,06	4,46	4,51	5,38	5,43	6,39	6,39
schade?	nee	nee	bijna	ja	nee	nee	bijna	ja

Tabel 6.1, vertaling van de langeduurbelasting ( $H_{sN}/\Delta D$ ) naar een korteduurbelasting ( $H_{s1000}/\Delta D$ )

De steenzettingen die beproefd zijn in het onderzoek naar de langeduursterkte hadden helaas een ander bezwijkmechanisme dan een ingegoten steenzetting. Bij gebrek aan beter wordt toch de relatie die afgeleid is voor zuilen ook hier gebruikt. Het bezwijkmechanisme bij Hydroblocks lijkt nog het meeste op dat van ingegoten steenzettingen omdat ook daar sprake was van het ontstaan van een bolling en migratie van filtermateriaal.

Met bovenstaande formules zijn een aantal groepjes proeven vertaald naar een belasting van 1000 golven, zie tabel 6.1. In de tabel is te zien dat wanneer er bijna schade optreedt, de vertaalde belasting ( $H_{s1000}/\Delta D$ ) ongeveer gelijk is aan die nadat er echt schade is opgetreden. Vergelijk bijvoorbeeld het resultaat van proef P03 en P04 ( $H_{s1000}/\Delta D = 4,46$ ; bijna schade) en proef P03 t/m P05 ( $H_{s1000}/\Delta D = 4,51$ ; schade), of proef P22 en P23 ( $H_{s1000}/\Delta D = 6,39$ ; bijna schade) en proef P23 en P23a ( $H_{s1000}/\Delta D = 6,39$ ; schade). Dit geeft het vertrouwen dat de vertaling van de proefresultaten naar een belasting van 1000 golven goed interpreteerbare resultaten geeft.

### 6.3.3 Eenvoudige rekenmethode

De resultaten van het onderzoek zijn gebruikt om een eenvoudige rekenmethode af te leiden. In een eenvoudige rekenmethode voor de stabiliteit van ingegoten steenzettingen wordt er gebruikgemaakt van  $H_s/(\Delta D)$  en  $\xi_{op}$  voor het beschrijven van de relatieve grootte van de belasting. Afhankelijk van de waarde van deze parameters kan er sprake zijn van een stabiele bekleding (toetsresultaat 'goed').

Allereerst wordt er gekeken naar de invloed van de brekerparameter,  $\xi_{op}$ .

Golven met een relatief kleine waarde van  $\xi_{op}$  (bv. 1,5) geven een kleiner stijghoogteverschil tijdens het steile stijghoogtefront dan golven met een grotere  $\xi_{op}$  (bv. 2,2). De bekleding zal daardoor minder bewegen en de waterlaag tussen de toplaag en het filter zal dunner zijn tijdens het neerkomen van de golfklappen. De dwarskrachten in de toplaag zullen dan ook kleiner zijn. Tevens heeft een kleine beweging van de toplaag tijdens het steile stijghoogtefront tot gevolg dat het filter minder ruimte heeft om te migreren. Dit alles zal ertoe leiden dat de stabiliteit van de toplaag bij een golfbelasting met een kleine  $\xi_{op}$  groter is. Als de golfbelasting daarentegen juist een grote  $\xi_{op}$  heeft, zal de beweging juist groter zijn. Weliswaar zal de golfklapgrootte met toenemende waarde van  $\xi_{op}$  afnemen (als  $\xi_{op} \gg 2$ ), maar toch mag verwacht worden dat de toenemende ruimte voor het migreren van het filter doorslaggevend is als  $\xi_{op} < 2,5$  à 3.

Gezien de grote invloed van het stijghoogteverschil tijdens het stijghoogtefront wordt verwacht dat de stabiliteit met toenemende  $\xi_{op}$  afneemt overeenkomstig de trend in ANAMOS. Dat betekent dat de bezwijkgolffhoogte evenredig is met  $\xi_{op}^{-2/3}$ .

De trend van  $H_{s1000}/\Delta D$  met  $\xi_{op}^{-2/3}$  is in figuur 6.8 getekend met de meetpunten, die in de vorige paragraaf zijn teruggerekend naar een belastingduur van 1000 golven. Op basis van de ligging van de meetpunten is de waarde van  $F_{1000}$  bepaald in de relatie  $H_s/\Delta D = F_{1000}\xi_{op}^{-2/3}$ .

Dit leidt tot de volgende eenvoudige stabiliteitsformules voor ingegoten bekledingen bij een belastingduur (maximale belasting tijdens top van de storm) van 1000 golven:

- ingegoten bekledingen met matige samenhang (met resultaat van VGD-meting van  $E \approx 0,5$  GPa in het model; dus in prototype:  $E \approx 1$  GPa):

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{bij bezwijken}} = 6,4 \cdot \xi_{op}^{-2/3} \quad (6.13)$$

- ingegoten bekledingen met grote samenhang (met resultaat van VGD-meting van  $E \approx 10$  GPa in het model; dus in prototype:  $E \approx 20$  GPa):

$$\left[ \frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{bij bezwijken}} = 9,2 \cdot \xi_{op}^{-2/3} \quad (6.14)$$

Deze formules zijn grafisch weergegeven met de conclusies uit de metingen in figuur 6.8.

Bij het bepalen van bovenstaand criterium is nog geen rekening gehouden met (model)onzekerheden. De criteria zijn immers afgeleid op basis van slechts twee proevenseries. Als echter expliciet rekening gehouden wordt met onzekerheden, moet ook rekening gehouden worden met de representativiteit van deze bekleding. Er zijn diverse factoren die maken dat deze bekledingen in de Deltagoot zwakker waren dan de overeenkomstige bekledingen op een dijk in het prototype:

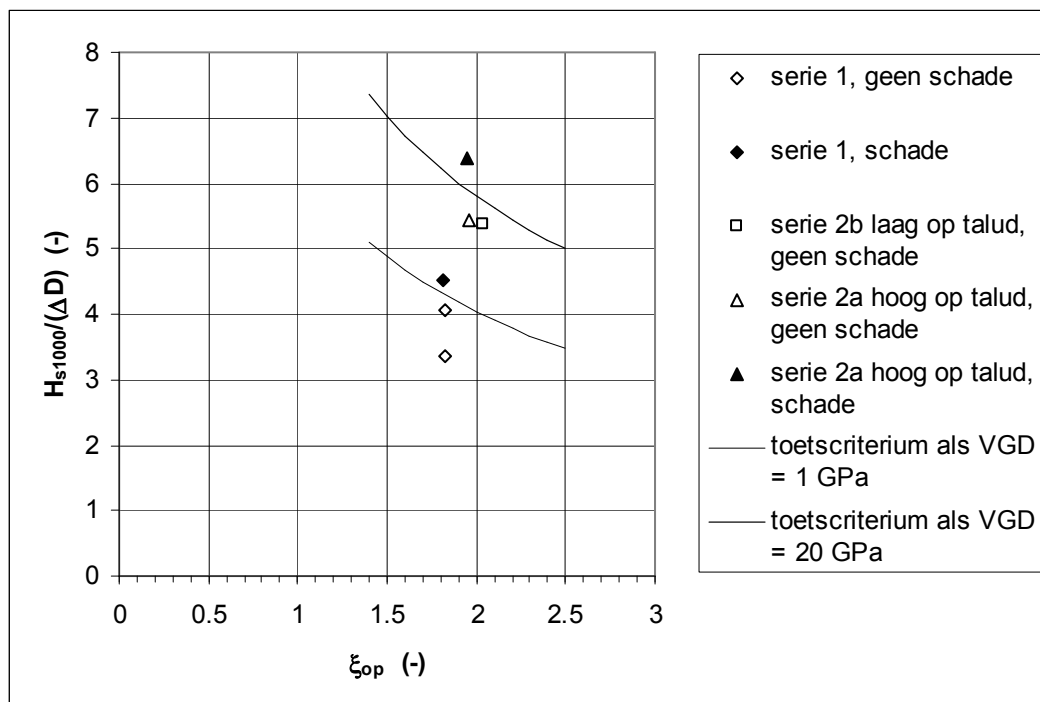
- Het gietasfalt tijdens de eerste serie was vrij koud aangebracht, waardoor alleen de grote spleten gevuld waren.
- Het filter was ingezand met niet-cohesief materiaal, terwijl in werkelijkheid er vaak ook slib in het filter wordt aangetroffen. Daardoor ging het ontmengen van het filter in de Deltagoot relatief gemakkelijk en is de verhinderde toestroming dus wat sneller



afgenomen waardoor de bewegingen sneller toenamen dan te verwachten is in het prototype.

- Het infiltratie-incident tussen proef P11 en P12 heeft een grote vervorming veroorzaakt die de bekleding verzwakt heeft.
- Het bezwijken van de bekleding in de tweede serie werd waarschijnlijk gestimuleerd door de aanwezigheid van de filterinfiltratiebuis.

Deze aspecten maken dat de bekledingen in de Deltagoot sneller en/of bij een kleinere golfhoopte zijn bezweken dan te verwachten is in het prototype. Ingeschat wordt dat dit aspect een grotere invloed heeft dan de (model)onzekerheden. Bovenstaande criteria zijn daardoor conservatief (veilig).



Figuur 6.8, stabiliteitsrelatie voor ingegoten steenzettingen bij een belastingduur van 1000 golven met resultaten van het Deltagootonderzoek, vertaald naar een belastingduur van 1000 golven.

In de formules moet de waarde van  $\Delta$  berekend worden op basis van de soortelijke massa van de stenen (niet de combinatie van gietasfalt en stenen).

Voor tussenliggende waarden van de elasticiteitsmodulus volgens de VGD-meting wordt aangenomen dat er lineair geïnterpoleerd kan worden ( $E_{VGD}$  in formule invullen in GPa!):

$$F_{1000} = 6,4 + 0,15 \cdot (E_{VGD} - 1) \tag{6.15}$$

Voor het vaststellen van de elasticiteitsmodulus wordt aanbevolen meerdere VGD-metingen uit te voeren. Per locatie, gedefinieerd als een bekledingoppervlak van orde 100 m<sup>2</sup>, moeten meerdere metingen uitgevoerd worden en geldt de gemiddelde waarde. Er wordt gekozen voor een gemiddelde waarde omdat er sprake is van een gecompliceerde meting waarbij ook uitvoeringstechnische toevalligheden een rol spelen. Daardoor zal ook op een bekleding met constante elasticiteit toch een variatie aan waarden van de VGD-metingen verkregen worden.

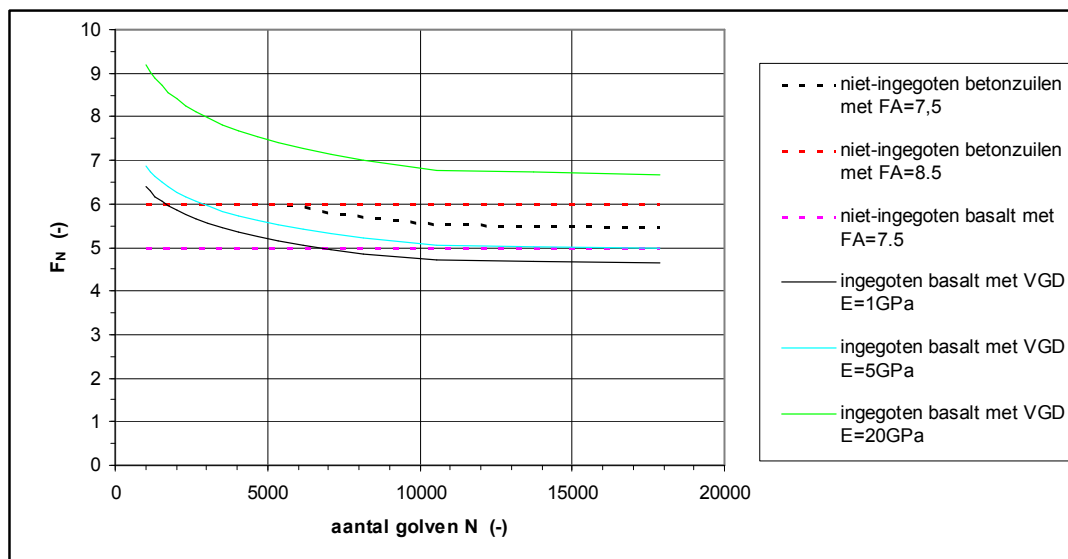
Vervolgens moet langs de dijk op meerdere locaties VGD-metingen uitgevoerd worden, bijvoorbeeld met een onderlinge afstand van 100 à 300 m. De locatie met laagste gemiddelde elasticiteitsmodulus is de maatgevende.

De toetscriteria zijn weergegeven voor een belasting, waarbij de golfhoogte tijdens de storm geleidelijk toeneemt tot een maximum, die gedurende 1000 golven aanhoudt, waarna de golfhoogte weer afneemt. Voor een belasting met een andere duur van de maximale belasting kunnen de daarvoor bestemde formules van Klein Breteler en Eysink (2005) gebruikt worden met  $c_1 \approx 0,2$  en  $c_2 \approx 0,8$ .

In deze toetsmethode komen geen criteria voor ten aanzien van het eventueel optreden van een statisch stijghoogteverschil. In fase 2 van het bezwijkproces zorgt de golfbelasting al snel voor scheuren die het eventuele stijghoogteverschil doen wegvloeien, waardoor het uiteindelijke bezwijken niet door de statische overdrukken wordt beïnvloed.

Bij de aanleg van nieuwe bekledingen, bijvoorbeeld op het talud boven de ingegoten bekleding, zijn maatregelen ten aanzien van het beperken van statische stijghoogteverschillen wel aan te bevelen. Dit kan bijvoorbeeld door het aanleggen van een dichte overgangsconstructie aan de bovenzijde van het ingegoten vak (waterslot).

Ook de waterdichtheid van de teen heeft invloed op statische overdrukken. Bij de aanleg van nieuwe constructies zal men moeten voorkomen dat de teen volledig waterdicht is om grote vervormingen kort na de aanleg te voorkomen.



Figuur 6.9, invloed van belastingduur op stabiliteitsparameter  $F_N = \xi_{op} H_{sN} / (\Delta D)$  ( $F_A$  = waarde van  $F$  op grens stabiel/instabiel volgens ANAMOS, echter zonder 6-ksi-regel) (berekend voor  $h/H_s = 3$  en  $\tan \alpha_{bodem} = 0$ )

Deze toetsmethode is gebaseerd op metingen met  $1,5 < \xi_{op} < 2,3$  met  $\cot \alpha = 3,5$ . Daarom wordt aanbevolen om als geldigheidsgebied  $1,4 < \xi_{op} < 2,5$  en  $3 < \cot \alpha < 4$  te hanteren.

In vergelijking met een open steenzetting levert het goed ingieten een grotere stabiliteit, mits de belasting kort duurt. Voor niet-ingegoten betonzuilen geldt namelijk  $F_{1000} = \xi_{op}^{2/3} \cdot H_{s1000} / (\Delta D) = 6$  en voor basalt  $F_{1000} = 5$  à  $6$ , terwijl voor ingegoten basalt afgeleid is dat  $F_{1000} = 6,4$  à  $9,2$  bij 1000 golven. Bij langdurige belasting kan de ingegoten bekleding echter wel zwakker zijn dan de niet ingegoten bekleding. Dit is weergegeven in figuur 6.9. Voor

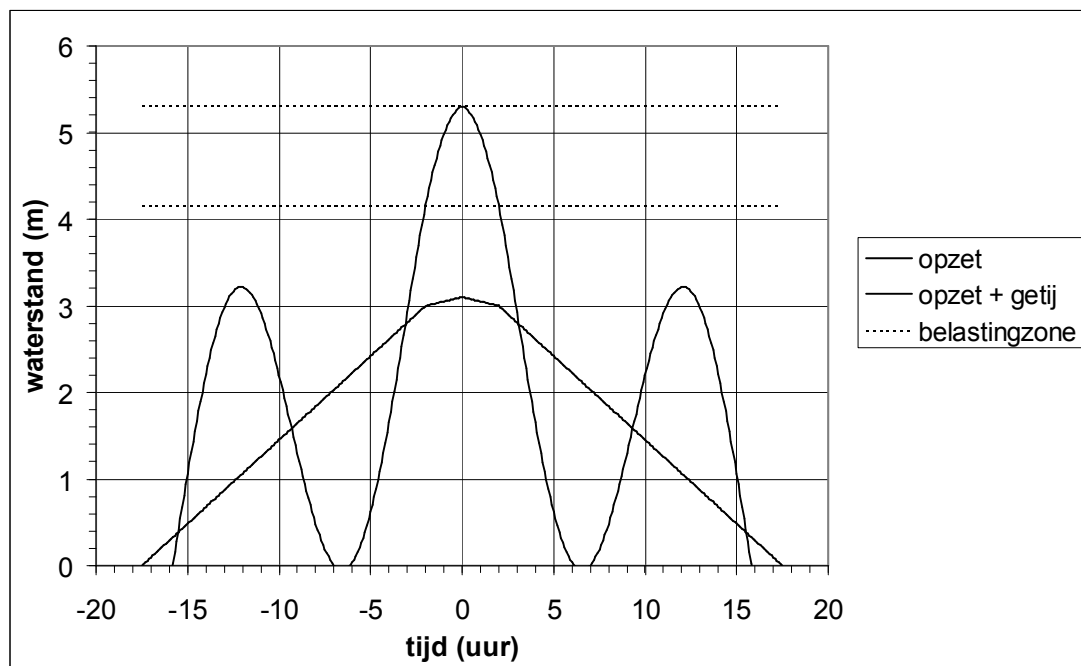
een vol en zat ingegoten basaltbekleding, waarvoor geldt dat  $E \approx 20$  GPa, is de stabiliteit ook bij zeer langdurige belasting nog aanzienlijk groter dan een niet-ingegoten bekleding. Maar voor een ingegoten bekleding van matige kwaliteit met  $E \approx 1$  GPa geldt dat bij een belastingduur van meer dan 2000 golven de stabiliteit al lager is dan die van een niet-ingegoten Basaltonbekleding. Voor basalt ligt het omslagpunt bij een belastingduur van ruim 6000 golven.

In de figuur lopen de lijntjes voor niet ingegoten betonzuilen met  $F_A = 8,5$  en niet ingegoten basalt met  $F_A = 7,5$  horizontaal (geen invloed van de belastingduur) omdat hier respectievelijk de 6- $\xi$ -regel en 5- $\xi$ -regel maatgevend zijn.

### Voorbeeld

Als voorbeeld van de toepassing van bovenstaande eenvoudige toetsmethode wordt de bekleding bij Kruiningen beoordeeld.

De toplaag had een dikte van gemiddeld  $D \approx 0,26$  m en bestond uit basalt ( $\Delta \approx 1,85$ ) op een talud van 1:3,65. Het gietasfalt was tot 10 à 20 cm diepte in de spleten doorgedrongen, waardoor deze bekleding in de categorie goed ingegoten steenzettingen (type 1) valt.



Figuur 6.10, waterstandverloop en belastingzone tijdens toetsomstandigheden bij Kruiningen

De VGD-meting heeft een elasticiteitsmodulus van  $E_{VGD} = 2$  GPa opgeleverd. Deze meting is echter in de zomer uitgevoerd. Tijdens het stormseizoen is het veel kouder, en zal dus ook een beduidend hogere elasticiteitsmodulus gelden. Geschat wordt dat voor de maatgevende waarde geldt:  $E_{VGD} = 4$  GPa. De  $F$ -waarde kan bepaald worden door lineaire interpolatie ( $E_{VGD}$  in formule invullen in GPa!):

$$F_{1000} = 6,4 + 0,15 \cdot (E_{VGD} - 1) \tag{6.15}$$

Voor Kruiningen levert dit een toelaatbare waarde van  $F_{1000} = 6,85$  op.

Voor de optredende belasting geldt:  $F_N = \xi_{op}^{-2/3} \cdot H_s / (\Delta D) = 1,44^{-2/3} \cdot 2,0 / (0,26 \cdot 1,85) = 5,30$ .

De belastingduur kan berekend worden met de methode van Klein Breteler en Eysink (2005). De bovenzijde van de te toetsen bekleding ligt op NAP+4,40 m, terwijl het toetspeil NAP+5,30 m is. De gemiddelde getijrange is 4,4 m.

De locatie van de belastingzone ten opzichte van de stilwaterlijn is:  $-0,6H_s\xi_{op} < z < -0,2H_s\xi_{op}$ , dus:  $-1,7 < z < -0,6$  m. Met deze gegevens is het verwachte waterstandsverloop tijdens toetsomstandigheden en de belastingzone getekend in figuur 6.10. Het blijkt dat de belastingduur  $t = 4$  uur is. Met  $N = t/T_m \approx t/(T_p/1,1) = 4 \cdot 3600 / (5,95/1,1) = 2662$  golven.

Met formule 6.9 tot en met 6.12 kan het volgende berekend worden als geschat wordt dat  $h/H_s = 3$  en  $\tan\alpha_{bodem} = 0$  (beide parameters hebben een verwaarloosbare invloed):  $c_H = 1,2$ ,  $f_B = 0,96$ ,  $f_S = 0,91$ . Dit levert een toelaatbare waarde van de stabiliteitsparameter bij  $N = 2662$  van  $F_N = 6,04$  op.

Gezien het feit dat de toelaatbare waarde van  $F_N = 6,04$  groter is dan de optredende waarde  $F_N = 5,30$ , kan geconcludeerd worden dat de bekleding 'goed' is.

### 6.3.4 Gedetailleerd rekenmodel

Het onderzoek in de Deltagoot en de analyse van de meetresultaten heeft veel inzicht verschaft in het bezwijkproces van een ingegoten steenzetting. Dit inzicht biedt de mogelijkheid om de relevante processen te kwantificeren en op basis daarvan een gedetailleerd rekenmodel op te stellen. Helaas ontbreken er nog essentiële schakels, waardoor het gedetailleerd rekenmodel nog niet compleet te maken is. Dit wordt onderstaand toegelicht.

Allereerst komt de bekleding in beweging tijdens het steile stijghoogtefront. Het stijghoogteverschil dat dit veroorzaakt kan berekend worden met de formules van de Rond Front theorie, zie paragraaf 6.1 (formule 6.1 tot en met 6.5). De relatie tussen het berekende stijghoogteverschil en de beweging is weergegeven in figuur 6.5. Om deze relatie te kunnen leggen voor andere types bekledingen, is het nodig om de beweging te kunnen berekenen aan de hand van het optredende stijghoogteverschil. Het is daarbij essentieel dat de verhinderde toestroming goed wordt berekend. Een poging daartoe met de formules uit ANAMOS heeft helaas niets opgeleverd. De invloed van verhinderde toestroming volgens deze formules is véél te groot.

Kleine bewegingen zijn waarschijnlijk niet zo'n probleem voor de toplaag, omdat het waterlaagje dan erg dun is. Daardoor kan de daaropvolgende golfklap nog niet zo'n grote dwarskracht veroorzaken en bovendien is er nog onvoldoende ruimte voor migratie van het filter. De toelaatbare beweging zou in de orde grootte van de korrelgrootte van het filter kunnen liggen (bijvoorbeeld  $D_{f50}$  of  $D_{f90}$ ). Dit was in dit geval 10 à 20 mm.

Verder speelt de duur van de belasting ongetwijfeld een rol. Naarmate de belasting langer duurt, zal de migratie tot een groter S-profiel leiden.

Ten tweede komt er een golfklap op de bekleding terwijl deze op een dun waterlaagje drijft. De belangrijkste consequentie van een dergelijke golfklap is het ontstaan van grote dwarskrachten die kunnen leiden tot scheuren. Met de rekenmethode van Klein Breteler (2003), samengevat in paragraaf 2.4 en toegepast op de huidige proeven in paragraaf 6.2, kan de grootte van de dwarskrachten geschat worden. De toelaatbare dwarskracht zou bepaald kunnen worden met een snel uitgevoerde trekproef op de dijk. De kracht die nodig

is om een steen, of groepje stenen, uit de bekleding te trekken, gedeeld door de omtrek van de stenen, is een maat voor de toelaatbare dwarskracht. Omdat dergelijke trekproeven niet uitgevoerd zijn op de beproefde bekledingen, is het moeilijk om de rekenmethode te verifiëren.

Als zowel de toelaatbare beweging als de toelaatbare dwarskrachten overschreden worden, zal het degeneratieproces na verloop van tijd leiden tot falen van de bekleding. Tijdens het degeneratieproces is er een migratie van het filter en het ontstaan van scheuren te verwachten, die uiteindelijk leiden tot het loskomen van bekledingsschollen.

Een gedetailleerd rekenmodel zou het mogelijk moeten maken om ook voor andere typen ingegoten bekledingen en belastingsituaties de stabiliteit te beoordelen. Lange golven geven bijvoorbeeld een veel zwakkere golfklap, maar wel een groter stijghoogteverschil tijdens het steile stijghoogtefront. Een bekleding met een grof filter zou wellicht een grotere beweging mogen maken, voordat migratie van het filter op gang komt. Dit soort aspecten kunnen nu nog niet meegenomen worden in de beoordeling.



## 7 Conclusies

De huidige analyse van de proeven in de Deltagoot met ingegoten basalt op een talud van 1:3,5 heeft geleid tot een gedetailleerd inzicht in de processen die verantwoordelijk zijn voor de geleidelijke degeneratie van dit soort bekledingen tijdens golfaanval. Er zijn 3 proevenseries geanalyseerd met in totaal 24 proeven:

- serie 1: half ingegoten, met een ingieting van 8,5 cm diep, terwijl de onderste 4,4 cm van de spleten was ingewassen met een mengsel van steenslag en zand (spleet voor spleet ingegoten met een emmer, niet over de koppen)
- serie 2a: volledig ingegoten, met ingieting van 12,9 cm diep in de spleten tot op het filter (uit kubel op talud gegoten en uitgestreken)
- serie 2b: dezelfde bekleding als bij 2a, maar nu met een belasting laag op het talud, vlak boven een niet ingegoten stuk bekleding.

De onderzochte bekledingen waren goed geïnstrumenteerd met 23 drukopnemers op de toplaag, 8 drukopnemers in het filter, 7 verplaatsingsopnemers voor het meten van de verplaatsing van de toplaag ten opzichte van de ondergrond, en 3 hoogtemeters die het absolute niveau van de toplaag registreerden. Verder is na elke proef het oppervlak van de bekleding in drie raaien in detail ingemeten.

De analyse van de proefresultaten heeft geleid tot de conclusie dat het proces van degeneratie van de bekleding tot aan falen in drie fases verloopt:

### Fase 1:

De bekleding is nog niet gescheurd, waardoor een betrekkelijk lage golfbelasting, eventueel in combinatie met een statisch stijghoogteverschil, kan leiden tot beweging van de toplaag.

### Fase 2:

In de bekleding zijn scheuren ontstaan als gevolg van de bewegingen. Een statisch stijghoogteverschil is nu niet meer belangrijk. Het proces verloopt als volgt:

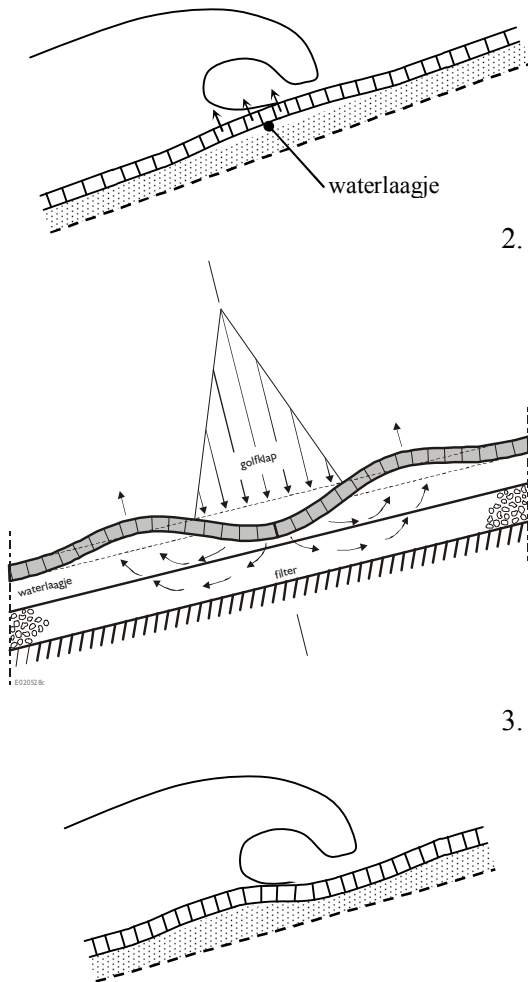
- Een steil stijghoogtefront licht de bekleding op.
- Zware golfklappen zorgen voor grote dwarskrachten in de toplaag, die kunnen leiden tot scheurtjes. Het gietasfalt kan losscheuren van de basalt.
- Onder de bewegende toplaag kan het filter migreren waardoor een S-profiel ontstaat.
- Het S-profiel verzwakt de toplaag zodat golfklappen gemakkelijker schade aan kunnen richten.
- Na het migreren van het filter is lokaal het filter deels of geheel verdwenen waardoor een ruimte tussen toplaag en ondergrond ontstaat met hoge doorlatendheid. Hierdoor vermindert de invloed van de verhinderde toestroming en kan de toplaag gemakkelijker op en neer bewegen.

### Fase 3:

Het S-profiel heeft zulke grote vormen aangenomen dat de bekleding zijn samenhang verliest en bekledingsschollen door de golfbelasting kunnen worden losgerukt. Als er

een substantieel gat in de bekleding is ontstaan (groter dan orde  $10 \text{ m}^2$ ) geeft de bekleding onvoldoende bescherming aan de onderlagen en faalt de bekleding.

Het bezwijkmechanisme in fase 2 verloopt in detail als volgt (zie figuur 7.1):



1. Vlak voor de golfklap ontwikkelt zich een steil stijghoogtefront dat in een relatief groot gebied een positief stijghoogteverschil (opwaarts gerichte belasting) veroorzaakt. Dit stijghoogteverschil doet de toplaag omhoog bewegen, terwijl de ruimte tussen het filter en de toplaag gevuld wordt met water.
2. Tijdens de golfklap drijft de toplaag op het waterlaagje, waardoor de toplaag niet ondersteund wordt door de filterlaag. De golfklap drukt de toplaag lokaal naar beneden waardoor tegelijkertijd het waterlaagje tussen de toplaag en het filter naar opzij wordt weggeperst. Tijdens de golfklap is sprake van een negatief stijghoogteverschil over de toplaag (neerwaartse belasting) onder de golfklap en een positief stijghoogteverschil naast de golfklap. Deze belasting van de toplaag geeft grote dwarskrachten, die mogelijk kunnen leiden tot scheuren.
3. De op en neer bewegende toplaag geeft het filter de ruimte om te migreren. In de loop van de tijd zal steeds meer filtermateriaal in de zone van golfklap tot aan waterlijn naar beneden schuiven en zich ophopen aan de onderzijde van de golfklapzone, waar ook grote positieve stijghoogteverschillen (opwaartse belasting) optreden tijdens het steile stijghoogtefront.

Figuur 7.1, bezwijkmechanisme

Hieruit blijkt dat de samenhang van de toplaag bedreigd wordt door de opwaartse beweging tijdens het steile stijghoogtefront, in combinatie met de golfklap. De stabiliteit van het geheel wordt bedreigd door de cumulerende verplaatsingen als gevolg van het migrerende filtermateriaal. Ook voor die migratie is een beweging tijdens het steile stijghoogtefront een noodzakelijke voorwaarde.

De resultaten van het huidige onderzoek, in combinatie met de conclusies ten aanzien van de invloed van langeduurbelasting van Klein Breteler en Eysink (2005), hebben een nieuwe toetsmethode opgeleverd. Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen ingegoten steenzettingen:

1. Voor **goed ingegoten steenzettingen**, waarbij ingegoten is tot tenminste 40 à 60% van de toplaagdikte en bovendien het gietasfalt tenminste 10 cm diep tussen de stenen zit (type 1), geldt (zie Figuur 7.2):



– goed als:  $\frac{H_s}{\Delta D} < F_N \xi_{op}^{-2/3}$  (7.1)

– in andere gevallen: twijfelachtig met:

$$F_N = f_B f_S F_{1000} = f_B f_S (6,4 + 0,15 \cdot (E_{VGD} - 1)) \quad (7.2)$$

$$f_B = \frac{1,71 \cdot \min\{1,54; c_H\}}{\min\{\sqrt{\ln N}; c_H (\ln N)^{1/3,6}\}} \quad (7.3)$$

$$f_S = \max\left\{1 - 0,2 \cdot \log \frac{N}{1000}; 0,8\right\} \quad (7.4)$$

$$c_H = \max\left\{1,06; 0,8 + \frac{(0,098 + 1,62 \tan \alpha_{bodem}) h^2}{0,673 H_{s1000} h + 0,203 H_{s1000}^2}\right\} \quad (7.5)$$

$E_{VGD}$  = elasticiteitsmodulus van de toplaag, bepaald door middel van valgewicht-deflectiemetingen (in formule invullen in GPa!) (GPa)

$D$  = dikte van de toplaag (m)

$F_{1000}$  = stabiliteitparameter bij een belastingduur van 1000 golven (-)

$F_N$  = stabiliteitparameter bij een belastingduur van N golven (-)

$f_B$  = invloedsfactor m.b.t. de belasting (-)

$f_S$  = invloedsfactor m.b.t. de sterkte (-)

$H_s$  = significante golfhoogte (m)

$h$  = waterdiepte bij de teen (m)

$N$  =  $t_b/T_m$  = aantal golven (-)

$T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

$T_m$  = gemiddelde golfperiode (s)

$t_b$  = belastingduur (s)

$\alpha$  = taludhelling ( $^\circ$ )

$\alpha_{bodem}$  = bodemhelling voor de constructie ( $^\circ$ )

$\Delta$  =  $(\rho_s - \rho)/\rho$  = relatieve soortelijke massa van de stenen (-)

$\xi_{op}$  =  $\tan \alpha / \sqrt{(H_s / (1,56 T_p^2))}$  = brekerparameter (-)

$\rho_s$  = soortelijke massa van de stenen ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho$  = soortelijke massa van water ( $\text{kg/m}^3$ )

2. Voor **oppervlakkig overgoten steenzettingen**, waarbij het gietasfalt slechts is ingegoten tot 20 à 30% van de toplaagdikte (type 2), geldt (Klein Breteler, 2000) (zie Figuur 7.2):

Toetsing alsof het een ongunstige steenzetting is (type 3c uit de eenvoudige toetsing van niet-ingegoten steenzettingen), echter zonder t/o-grens. Dit betekent dat de volgende formules van toepassing zijn:

- goed als:

–  $0,6 < \xi_{op} \leq 2,0$ :  $\frac{H_s}{\Delta D} < 3,07 \cdot \xi_{op}^{-1,014}$  (7.6)

–  $2,0 < \xi_{op} < 5$ :  $\frac{H_s}{\Delta D} < 6,5 \cdot \xi_{op}^{-4} + 0,02 \cdot \xi_{op} + 1,09$  (7.7)

- in andere gevallen: twijfelachtig

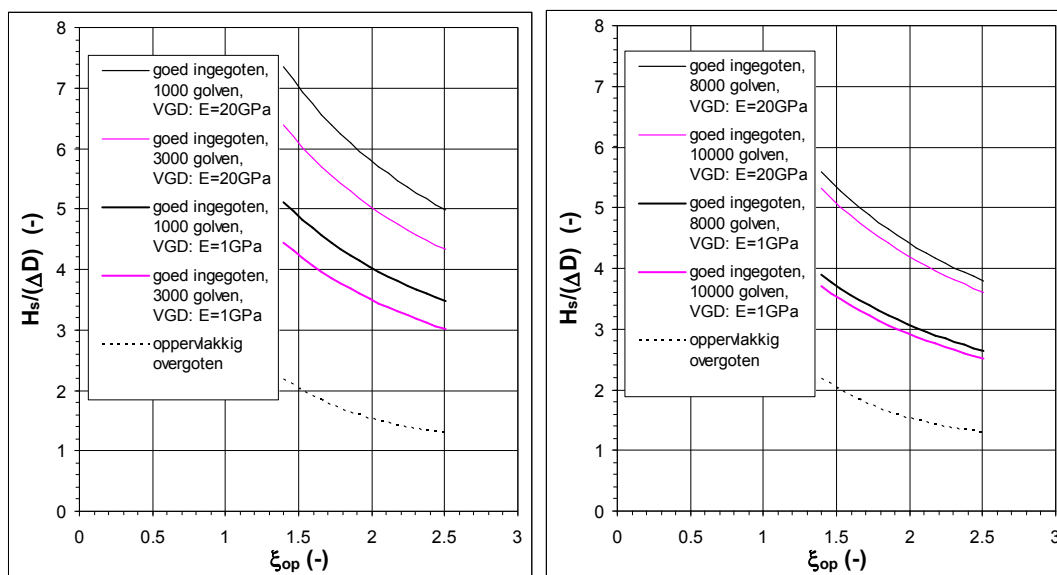
Het geldigheidsgebied van deze eenvoudige toetsmethode voor goed ingegoten steenzettingen is:  $1,4 < \xi_{op} < 2,5$  en taluds van 1:3 tot en met 1:4.

De invloed van de langeduurbelasting is niet expliciet onderzocht, hoewel de belasting wel langdurig is aangehouden (1000 tot 5000 golven). De formules 7.3 tot en met 7.5 geven de invloed van de langeduurbelasting weer. Deze formules zijn hetzelfde als voor niet-ingegoten betonzuilen en basalt uit Klein Breteler en Eysink (2005).

Voor het vaststellen van de elasticiteitsmodulus wordt aanbevolen meerdere VGD-metingen uit te voeren. Per locatie, gedefinieerd als een bekledingoppervlak van orde  $100 \text{ m}^2$ , moeten meerdere metingen uitgevoerd worden en geldt de gemiddelde waarde. Vervolgens moet langs de dijk op meerdere locaties VGD-metingen uitgevoerd worden, bijvoorbeeld met een onderlinge afstand van 100 à 300 m. De locatie met de laagste gemiddelde elasticiteitsmodulus is de maatgevende. Als grote verschillen als functie van de hoogte op het talud of locatie langs de dijk gevonden worden, kan overwogen worden de toetsing per taluddeel uit te voeren.

Concreet zou men kunnen denken aan het uitvoeren van VGD-metingen met een onderlinge afstand van 5 m en vervolgens het voortschrijdend gemiddelde over vijf metingen bepalen. De laagste waarde van dit voortschrijdend gemiddelde is maatgevend. Voor brede bekledingsstroken (breder dan 10 à 15 m) kan men overwegen om langs twee lijnen de VGD-metingen uit te voeren, representatief voor de onderste helft van het talud en de bovenste helft van het talud.

Als geen VGD-metingen beschikbaar zijn kan deze toetsing uitgevoerd worden met  $E_{VGD} = 0,5 \text{ GPa}$ .



Figuur 7.2, Toetscriteria voor goed ingegoten en oppervlakig overgoten steenzettingen.

In deze toetsmethode komen geen criteria voor ten aanzien van het eventueel optreden van een statisch stijghoogteverschil. In fase 2 van het bezwijkproces zorgt de golfbelasting al snel voor scheuren die het eventuele stijghoogteverschil doen wegvloeien, waardoor het uiteindelijke bezwijken niet door de statische overdrukken wordt beïnvloed.

Bij de aanleg van nieuwe bekledingen, bijvoorbeeld op het talud boven de ingegoten bekleding, zijn maatregelen ten aanzien van het beperken van statische

stijghoogteverschillen wel aan te bevelen. Dit kan bijvoorbeeld door het aanleggen van een dichte overgangsconstructie aan de bovenzijde van het ingegoten vak (waterslot). Ook de waterdichtheid van de teen heeft invloed op statische overdrukken. Bij de aanleg van nieuwe constructies zal men moeten voorkomen dat de teen volledig waterdicht is om grote vervormingen kort na de aanleg te voorkomen.

In paragraaf 6.3.3 is een rekenvoorbeeld met deze methode gegeven.

Het onderzoek in de Deltagoot en de analyse van de meetresultaten heeft veel inzicht verschaft in het bezwijkproces van een ingegoten steenzetting. Dit inzicht biedt de mogelijkheid om de relevante processen te kwantificeren en op basis daarvan een gedetailleerd rekenmodel op te stellen. Helaas ontbreken er nog essentiële schakels, waardoor het gedetailleerd rekenmodel nog niet compleet te maken is (zie paragraaf 6.3.4).



## Referenties

- Hofland, B., en M. Klein Breteler (2005)  
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes steenbekledingen  
Stabiliteit ingegoten basalt en afschuiving ondergrond  
Meetverslag Deltagootonderzoek  
WL | Delft Hydraulics, verslag H4635, oktober 2005
- Klein Breteler (1992)  
Taludbekledingen van gezette steen  
Stabiliteit van de toplaag  
WL | Delft Hydraulics, verslag M1795/H195, deel XX, band A, april 1992
- Klein Breteler (2000)  
Grootschalige modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen  
Analyse van resultaten van Deltagootproeven  
WL | Delft Hydraulics, verslag H3272, mei 2000
- Klein Breteler (2002)  
Ingegaten steenzettingen  
WL | Delft Hydraulics, verslag H3167, juli 2002
- Klein Breteler (2003)  
Dwarskracht in ingegoten basalt tijdens golfaanval  
WL | Delft Hydraulics, verslag H4134, februari 2003
- Klein Breteler en Eysink (2005)  
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes steenbekledingen  
Langeduursterkte van steenzettingen  
WL | Delft Hydraulics, verslag H4475, november 2005
- Lubbers en Klein Breteler (2000)  
Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen  
WL | Delft Hydraulics, samenvatting van onderzoek H3272.77 november 2000
- Meijers, P., en M. Klein Breteler (2003)  
Toetsing ingegoten bekledingen, bestaande kennis en Kennisleemten  
GeoDelft, verslag CO-410220-0006, oktober 2003
- Nienhuis en Klein Breteler (2002)  
Verplaatsingsmetingen tijdens inpompproef bij Kruiningen  
WL | Delft Hydraulics, meetverslag H3990 februari 2002
- Smith, Wouters en Klein Breteler (2000)  
Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen  
WL | Delft Hydraulics, meetverslag H3272 februari 2000



# **A Tabellen**





**Drukopnemers (DRO)**

DRO nummer	Proefnummer	Begintijd defect [s]	Eindtijd defect [s]
DRO 8	P11	Begin proef	Eind proef
DRO 8	P11B	Begin proef	Eind proef
DRO 29	P13	2667	2832
DRO 29	P14	Begin proef	Eind proef
DRO 29	P14b	Begin proef	Eind proef

**Verplaatsingsopnemers (VPL)**

VPL nummer	Proefnummer	Begintijd defect [s]	Eindtijd defect [s]
VPL 6 en 7	P11 t/m P23a	Begin proef	Eind proef

**Hoogtemeters (HGM, DRO32 - 34)**

HGM nummer	Proefnummer	Begintijd defect [s]	Eindtijd defect [s]
allemaal	P18	565	Eind proef
1 (DRO32)	P19 en P20	Begin proef	Eind proef
allemaal	P21	2000	Eind proef

Tabel A.1 Defecte instrumenten

**Drukopnemers (DRO)**

DRO nummer	Proefnummer	Reden
alle DRO's	P05	Bezwijkproef
DRO 7 t/m 23, 26 en 31	P17 t/m P21	Einde serie 2a (hoog talud)
alle DRO's	P22 t/m P23a	Bezwijkproeven

**Hoogtemeters (HGM, DRO32 - 34)**

HGM nummer	Proefnummer	Reden
allemaal	P22-P23a	Bezwijkproeven

Tabel A.2 Verwijderde instrumenten

Drukopnemers

	x	y	Z	x'	z'
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
DRO01	6.800	1.952	1.953	7.072	= Z
DRO02	7.742	2.005	2.218	8.052	= Z
DRO03	8.335	1.963	2.389	8.669	= Z
DRO04	8.872	1.995	2.535	9.227	= Z
DRO05	9.265	1.998	2.649	9.636	= Z
DRO06	9.922	1.923	2.829	10.319	= Z
DRO07	10.141	1.980	2.907	10.547	= Z
DRO08	10.334	1.982	2.960	10.748	= Z
DRO09	10.502	1.907	3.009	10.922	= Z
DRO10	10.756	2.012	3.075	11.186	= Z
DRO11	10.948	2.065	3.128	11.386	= Z
DRO12	11.141	1.990	3.171	11.587	= Z
DRO13	11.340	1.285	3.241	11.794	= Z
DRO14	11.540	2.012	3.295	12.002	= Z
DRO15	11.735	2.030	3.353	12.205	= Z
DRO16	11.977	2.010	3.414	12.456	= Z
DRO17	12.165	1.992	3.467	12.652	= Z
DRO18	12.341	2.023	3.510	12.835	= Z
DRO19	12.775	2.013	3.626	13.286	= Z
DRO20	13.182	2.047	3.757	13.709	= Z
DRO21	13.578	2.003	3.871	14.121	= Z
DRO22	14.470	1.990	4.130	15.049	= Z
DRO23	15.280	1.990	4.353	15.891	= Z
DRO24	6.853	1.915	1.853	7.072	1.953
DRO25	8.920	1.964	2.426	9.227	2.535
DRO26	10.386	1.950	2.847	10.748	2.960
DRO27	11.392	2.253	3.134	11.794	3.241
DRO28	12.396	1.990	3.391	12.835	3.510
DRO29	13.628	1.974	3.761	14.121	3.871
DRO30	15.338	1.955	4.215	15.891	4.353
DRO31	16.013	1.970	4.427	16.654	4.564

waterpaspunten

hiervoor zijn de drukopnemers gebruikt

Symbol	Verklaring
x	horizontale coördinaat vanaf teen (m)
y	dwarscoördinaat vanaf oostwand (m)
Z	verticale coördinaat vanaf bodem (m)
x'	coördinaat langs talud (vanaf teen) (m)
z'	Z-coördinaat van een punt, geprojecteerd op het talud (m)

Golfhoogtemeters

GHM (oppervlaktevolgers)

	x	y	Z
	[m]	[m]	[m]
GHM11	-91.000	2.500	4.500
GHM12	-86.000	2.500	4.500
GHM13	-84.000	2.500	4.500

WHM (weerstandsdraden)

	x	y	Z
	[m]	[m]	[m]
WHM02	-91.000	0.000	4.200
WHM03	-86.000	0.000	4.500
WHM04	-84.000	0.000	4.500

Verplaatsingsmeters

(VPL)

	x	y	Z	x'	z'
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
VPL01	11.355	2.000	2.975	11.804	3.224
VPL02	13.105	2.000	3.261	13.619	3.708
VPL03	5.880	2.420	1.574	6.113	1.672
VPL04	7.260	1.950	1.963	7.548	2.066
VPL05	8.560	2.010	2.334	8.900	2.437
VPL06	9.740	2.000	2.674	10.127	2.775
VPL07	11.290	2.030	3.118	11.740	3.218
VPL08	12.590	2.010	3.454	13.091	3.586
VPL09	14.010	2.050	3.883	14.568	3.994

Waterspanningsmeters

	x	y	Z	x'	z'
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
WSM01	5.060	2.500	0.936	5.252	1.407
WSM02	9.080	2.500	2.073	9.433	2.555
WSM03	13.105	2.500	3.218	13.619	3.705

**Tabel A.3 Instrumentatie Deltagoot serie 1**

Drukopnemers

	x	y	Z	x'	z'
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
DRO01	6.800	1.952	1.951	7.072	= Z
DRO02	7.630	2.057	2.186	7.935	= Z
DRO03	8.393	2.020	2.411	8.729	= Z
DRO04	8.880	2.245	2.537	9.235	= Z
DRO05	9.313	2.065	2.653	9.686	= Z
DRO06	9.680	2.028	2.758	10.067	= Z
DRO07	10.128	2.020	2.890	10.533	= Z
DRO08	10.320	2.060	2.942	10.733	= Z
DRO09	10.486	2.116	2.995	10.906	= Z
DRO10	10.731	2.127	3.058	11.160	= Z
DRO11	10.929	2.022	3.106	11.366	= Z
DRO12	11.155	2.068	3.171	11.601	= Z
DRO13	11.365	2.088	3.226	11.820	= Z
DRO14	11.556	1.852	3.278	12.018	= Z
DRO15	11.745	2.008	3.328	12.215	= Z
DRO16	11.921	1.965	3.383	12.398	= Z
DRO17	12.166	2.023	3.470	12.653	= Z
DRO18	12.388	2.025	3.533	12.884	= Z
DRO19	12.759	2.163	3.634	13.270	= Z
DRO20	13.183	1.992	3.747	13.711	= Z
DRO21	13.630	1.970	3.866	14.175	= Z
DRO22	14.425	1.990	4.110	15.002	= Z
DRO23	15.292	2.010	4.356	15.904	= Z
DRO24	6.853	1.915	1.851	7.127	1.951
DRO25	8.895	2.214	2.428	9.251	2.537
DRO26	10.334	2.027	2.830	10.748	2.942
DRO27	11.385	2.058	3.122	11.841	3.226
DRO28	12.415	2.005	3.414	12.912	3.533
DRO29	13.612	1.995	3.760	14.157	3.866
DRO30	15.279	2.050	4.211	15.890	4.356
DRO31	15.975	1.974	4.413	16.614	4.553

Golfhoogtemeters

GHM (oppervlaktevolgers)

	x	y	Z
	[m]	[m]	[m]
GHM11	-91.000	2.500	4.500
GHM12	-86.000	2.500	4.500
GHM13	-84.000	2.500	4.500

WHM (weerstandsdraden)

	x	y	Z
	[m]	[m]	[m]
WHM02	-91.000	0.000	4.200
WHM03	-86.000	0.000	4.500
WHM04	-84.000	0.000	4.500

Verplaatsingsmeters

	x	y	Z	x'	z'
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
VPL01*	11.355	2.000	2.975	11.804	3.224
VPL02*	13.105	2.000	3.261	13.619	3.708
VPL03	5.880	2.420	1.569	6.113	1.672
VPL04	7.347	2.050	1.993	7.639	2.091
VPL05	8.620	1.980	2.355	8.963	2.455
VPL06	9.895	2.030	2.706	10.288	2.818
VPL07	11.250	1.850	3.086	11.698	3.205
VPL08	12.660	1.980	3.496	13.164	3.608
VPL09	13.980	1.940	3.862	14.537	3.984

\* afschuifmeters

Waterspanningsmeters

	x	y	Z	x'	z'
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
WSM01	5.060	2.500	0.936	5.252	1.407
WSM02	9.080	2.500	2.073	9.433	2.555
WSM03	13.105	2.500	3.218	13.619	3.705
WSM04	21.500	0.500	4.000	nvt	nvt

Drukopnemers

tbv hoogtemeting

	x	y	Z	x'	z'	opmerking	DRO nr.
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		
HGM 1	7.277	1.250	2.079	7.568	2.079	op talud	DRO32
HGM 2	10.455	1.250	2.987	10.873	2.987	op talud	DRO33
HGM 3	14.154	1.250	4.044	14.720	4.044	op talud	DRO34
Ref DRO 1	4.000	0.000	2.720	nvt	nvt	referentie	DRO35
Ref DRO 2	4.000	0.000	2.712	nvt	nvt	referentie	DRO36

waterpaspunten

punt:	West y = 4 m			Midden y = 2,5 m			Oost y = 1 m		
	x'	x	Z	x'	x	Z	x'	x	Z
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	16.63	15.988	4.575	16.64	16.001	4.567	16.63	15.993	4.557
2	15.13	14.546	4.235	15.13	14.549	4.163	15.12	14.541	4.155
3	13.62	13.097	3.755	13.63	13.104	3.739	13.62	13.098	3.742
4	12.12	11.655	3.346	12.13	11.665	3.334	12.13	11.663	3.344
5	10.62	10.215	2.952	10.63	10.223	2.925	10.62	10.215	2.945
6	9.13	8.778	2.522	9.14	8.784	2.526	9.12	8.765	2.534
7	7.63	7.333	2.120	7.63	7.338	2.117	7.63	7.341	2.118
8	6.12	5.888	1.700	6.13	5.897	1.700	6.12	5.884	1.718

Symbol	Verklaring
x =	horizontale coördinaat vanaf teen (m)
y =	dwarscoördinaat vanaf oostwand (m)
Z =	verticale coördinaat vanaf bodem (m)
x' =	coördinaat langs talud (vanaf teen) (m)
z' =	Z-coördinaat van een punt, geprojecteerd op het talud (m)

Tabel A.4 Instrumentatie Deltagoot serie 2

serie	proef	h	H <sub>s</sub>	H <sub>max</sub> /H <sub>s</sub>	ξ <sub>op</sub>	N	N <sub>cum</sub>	belaste zone		vervorming volgens profielvolger				φ <sub>w</sub> gefilterd		VPL	φ <sub>w</sub> tijdens front		golfklap
								Z <sub>onder</sub> /H <sub>s</sub>	Z <sub>boven</sub> /H <sub>s</sub>	Z <sub>top</sub> /H <sub>s</sub>	Z <sub>dal</sub> /H <sub>s</sub>	tophoogte	daldiepte	φ <sub>w2%</sub>	φ <sub>w2%</sub> /H <sub>s</sub>	Y <sub>2%</sub>	φ <sub>w2%</sub>	φ <sub>w2%</sub> /H <sub>s</sub>	p <sub>max2%</sub> /ρg
		(m)	(m)	(-)	(-)	(-)	(-)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(-)	(m)	(m)	(-)	(-)	
1	P00	4.30	0.49	2.04	2.49	268	268			-0.90		0.028	0.000	0.60	1.22	0.016	0.47	0.95	
1	P01	3.90	0.68	1.78	1.86	2819	3087	-1.05	-0.30	-0.86	0.06	0.023	-0.017	0.85	1.26	0.010	0.47	0.69	6.96
1	P02	3.90	0.68	1.68	1.80	2746	5833	-1.03	-0.22			0.000	-0.001	0.80	1.18	0.007	0.44	0.64	7.08
1	P03	3.90	0.95	1.81	1.82	2386	8219	-1.08	-0.23	-0.95	-0.62	0.039	-0.039	1.04	1.09	0.014	0.52	0.55	4.41
1	P04	3.90	0.96	1.70	1.79	2367	10586	-1.01	-0.21	-0.85	-0.58	0.056	-0.051	0.93	0.97	0.007	0.51	0.53	4.18
1	P05	4.10	1.22	1.34	1.95	89	10675	-1.33	-0.24	-0.79						0.025	0.59	0.48	
2a	P11	3.91	0.67	1.76	1.83	2525	2525	-1.04	-0.22			-0.001	0.000	0.93	1.39	0.001	0.59	0.87	3.20
2a	P11B	3.92	0.67	1.66	1.76	2612	5137	-1.10	-0.23			0.001	0.000	0.93	1.39	0.000	0.56	0.83	3.36
2a	P12	4.11	1.11	1.47	1.57	1084	6221	-0.98	-0.08					1.49	1.35	0.011	0.75	0.68	5.16
2b	P12A	3.19	0.75	1.53	1.91	512	512		-0.24					0.71	0.94	0.000	0.67	0.90	2.21
2a	P12B	3.59	0.79	1.46	1.81	481	7214	-1.30	-0.17					0.77	0.97	0.000	0.64	0.82	2.44
2a	P13	4.11	0.97	1.44	1.52	1037	7739	-0.92		-0.56	-0.11	0.006	-0.011	0.94	0.97	0.002	0.65	0.67	8.08
2a	P14	4.25	1.02	1.66	1.96	1170	8909	-1.23		-1.28	-0.58	0.045	-0.011	1.36	1.33	0.010	0.82	0.80	4.07
2a	P14B	3.51	0.82	1.51	1.72	506	9927	-1.18	-0.16		0.35	0.000	-0.014	0.63	0.77	0.000	0.63	0.76	2.13
2a	P15	4.37	1.32	1.28	1.78	174	9589	-1.04	-0.18	-1.17	-0.32	0.045	-0.017	1.53	1.16	0.018	0.92	0.70	5.29
2a	P16	4.92	1.09	1.30	1.87	155	9238	-1.05		-1.16	-0.45	0.056	-0.056	1.10	1.00	0.018	0.83	0.76	5.23
2b	P17	2.90	0.93	1.42	2.10	1139	1651			-1.12	0.26	0.014	-0.011	0.86	0.92	0.002	0.84	0.91	3.46
2b	P18	3.15	1.10	1.40	2.07	1147	2798			-1.10	0.25	0.023	-0.011	0.95	0.86	0.004	0.94	0.85	3.99
2b	P19	3.15	1.13	1.39	1.94	1735	4533			-1.10	-0.77	0.011	-0.011	1.04	0.92	0.006	0.90	0.80	3.78
2b	P20	3.17	1.14	1.42	1.95	1750	6283			-1.15	-0.83	0.017	-0.006	1.04	0.91	0.007	0.89	0.78	5.32
2b	P21	3.46	1.24	1.37	2.25	1135	7418			-1.36	-0.09	0.107	-0.045	0.95	0.77	0.018	1.02	0.82	2.37
2a	P22	4.68	1.41	1.68	1.96	1102	10846			-0.99	-0.34	0.062	-0.068			0.016	1.00	0.71	
2a	P23	4.71	1.59	1.37	1.96	1212	12058									0.005	1.06	0.67	
2a	P23a	4.70	1.64	1.29	1.86	253	12311			-1.04		0.068				0.003	1.05	0.64	

Tabel A5 Zone met grootste stijghoogteverschillen, vervorming van het talud, stijghoogteverschillen en golfklapgrootte

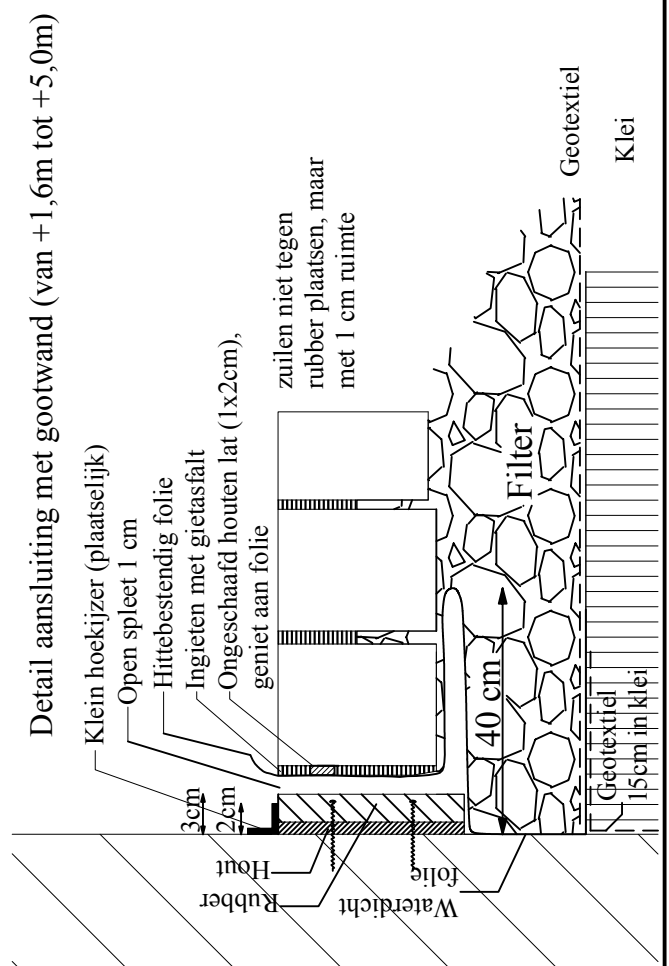
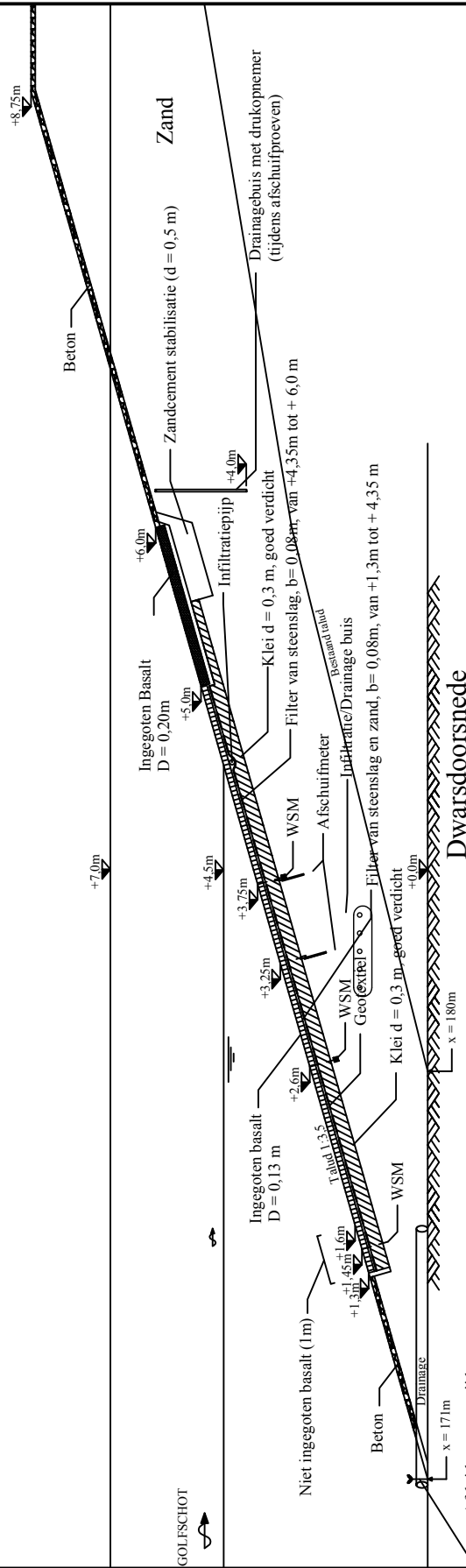


## **B**      **Figuren**



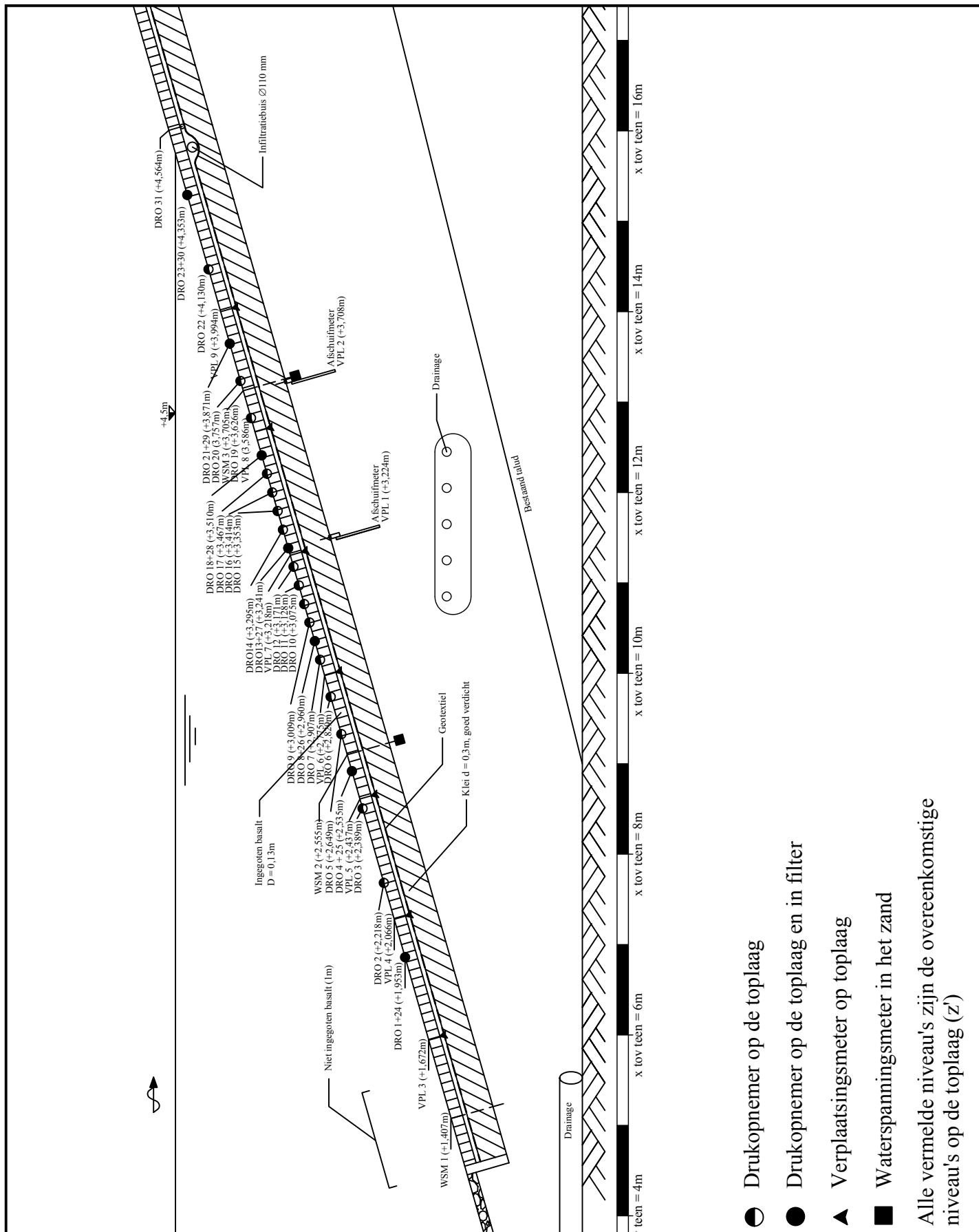


Onderste deel van de Basaltbekleding is gevuld met steenslag/zand mengsel  
 Bovenste 7 tot 9 cm is gevuld met gietasfalt (geen gietasfalt over de koppen)

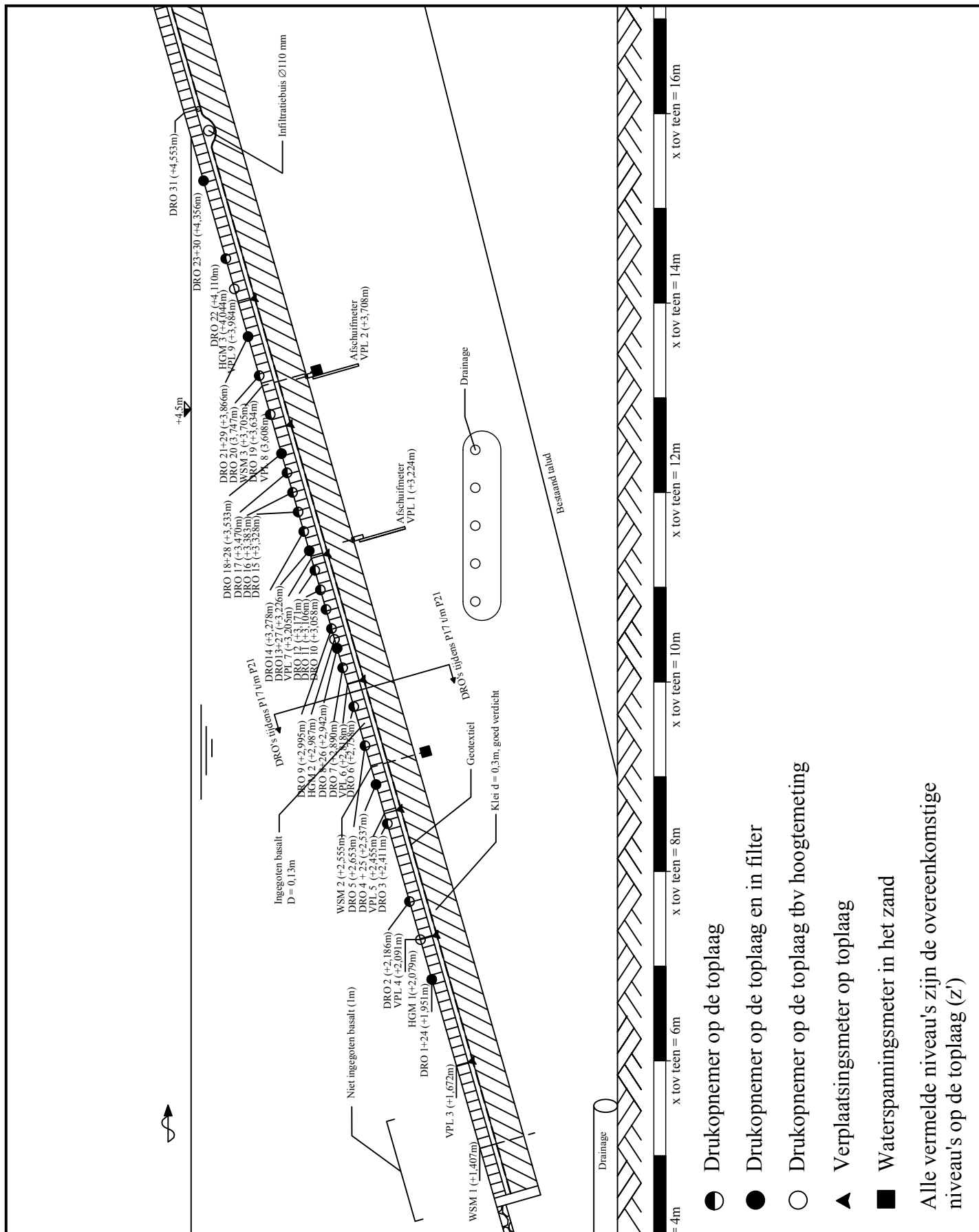


Detail aansluiting met gootwand (van +1,6m tot +5,0m)

Doorsnede ontwerp

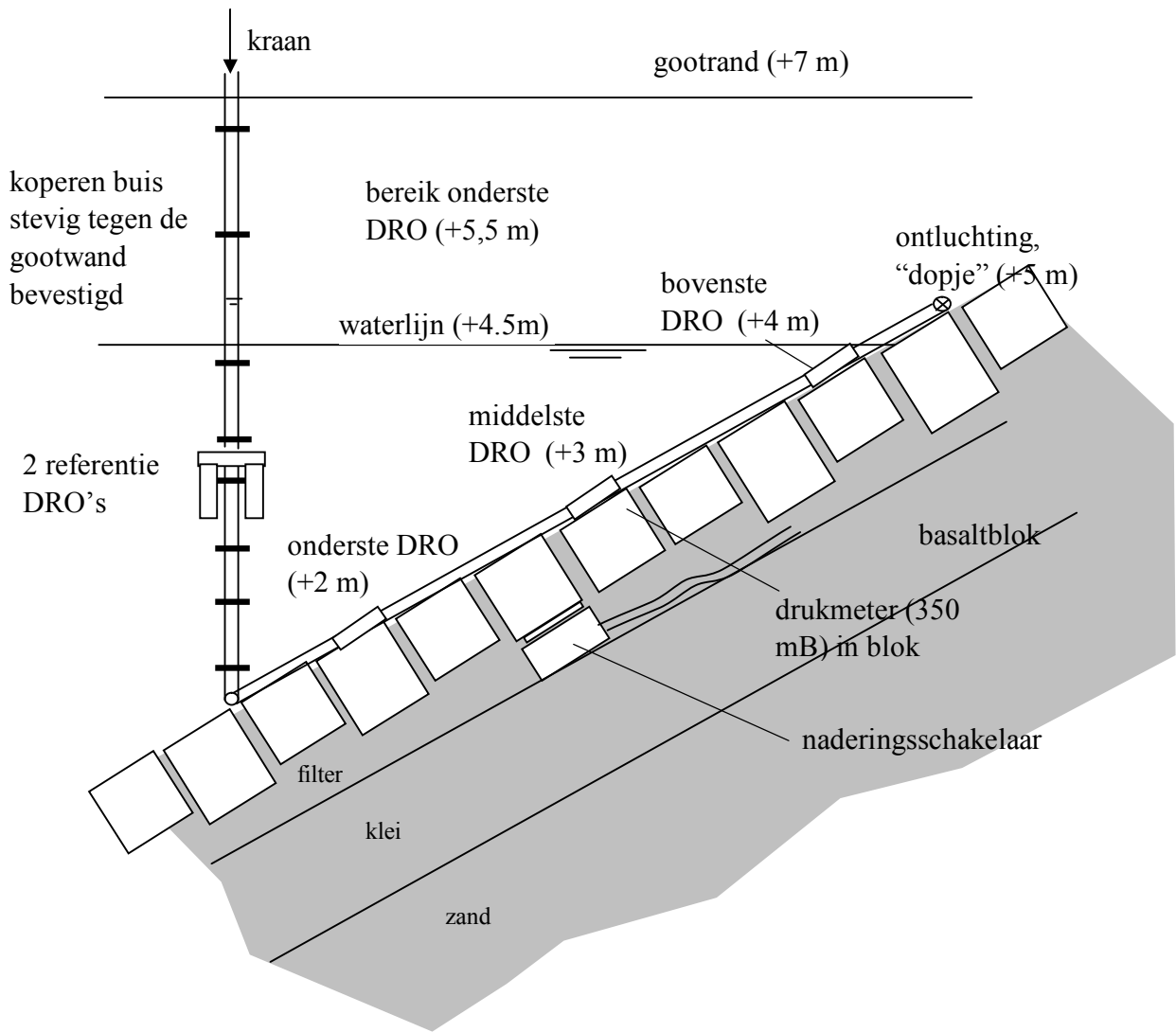


Instrumentatie serie 1, dwarsdoorsnede

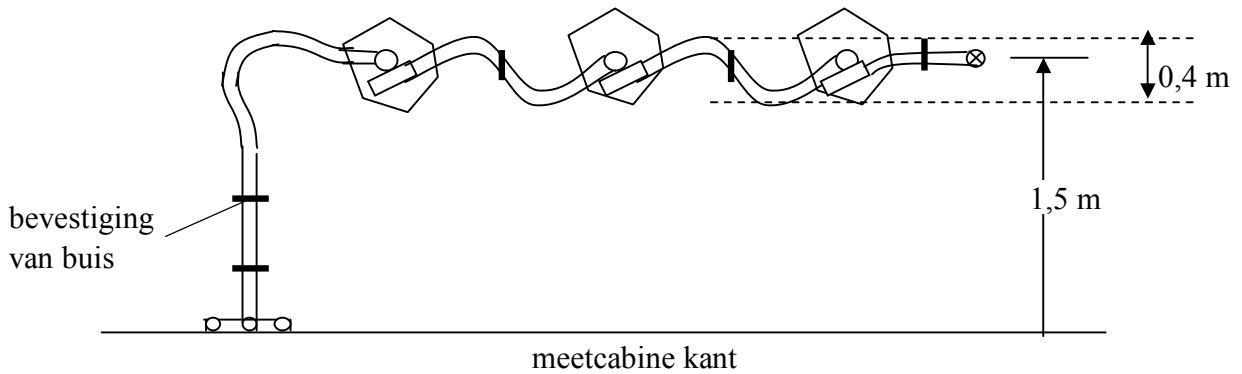


Instrumentatie serie 2, dwarsdoorsnede

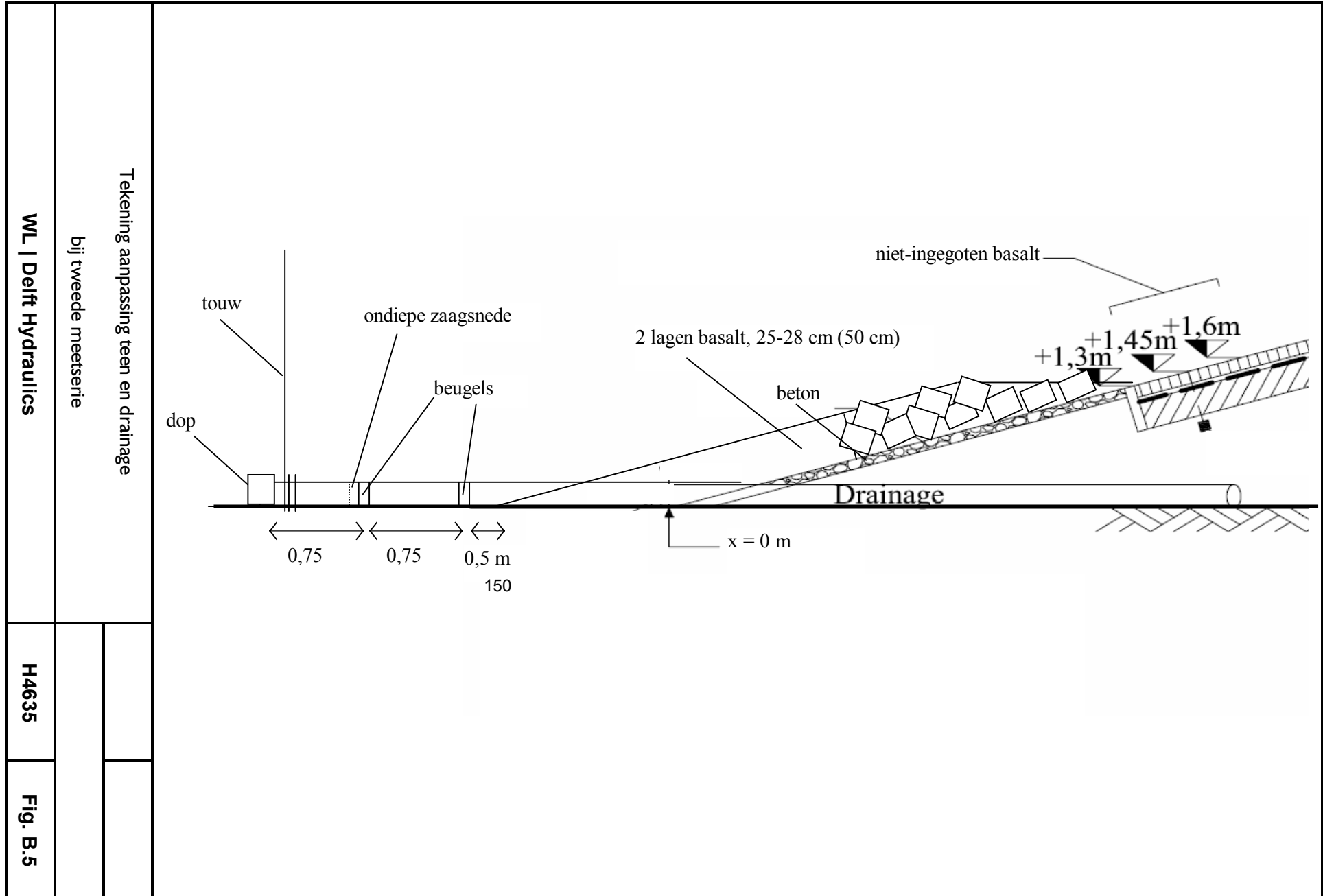
langsdoorsnede

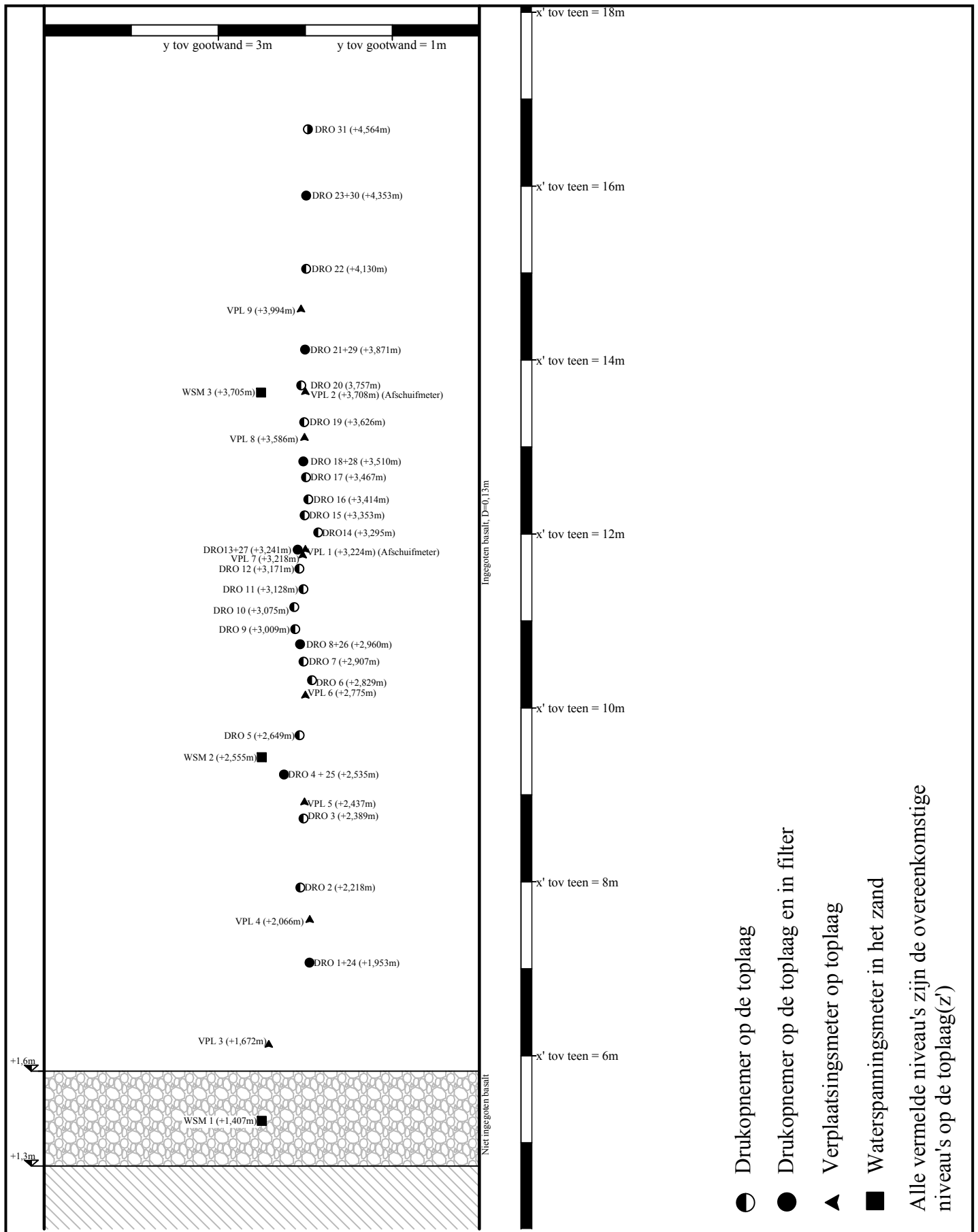


bovenaanzicht

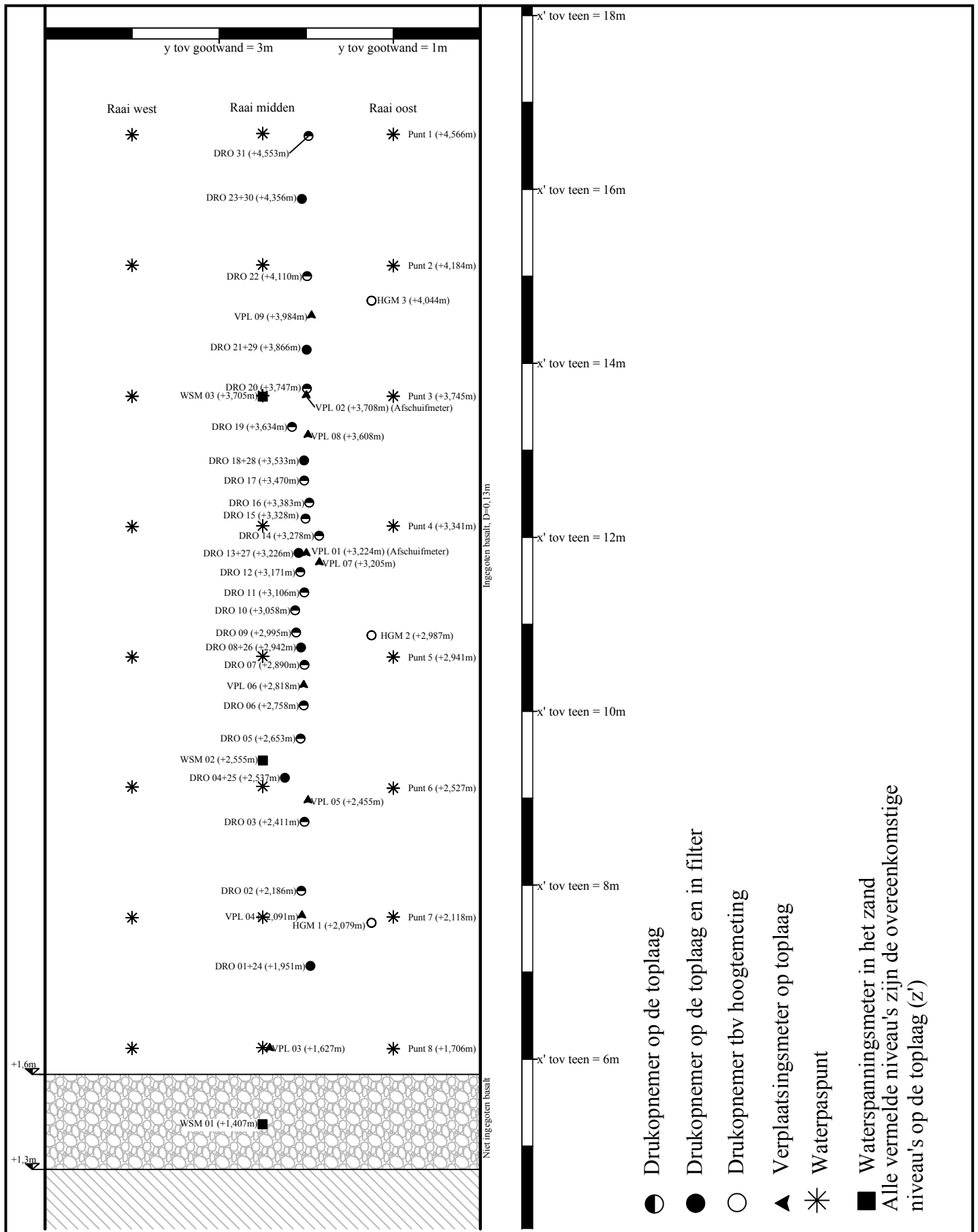


principeschets meting hoogtes





Instrumentatie serie 1, bovenaanzicht



Instrumentatie serie 2, bovenaanzicht

## C Gemeten belastingen



## C Gemeten belastingen

### C.1 Inleiding

De belasting op de bekleding bestaat voor het eenvoudige rekenmodel uit de significante golfhoogte, golfperiode bij de piek van het spectrum en het aantal golven. Als echter meer in detail gekeken wordt naar de processen die spelen bij de bezwijkmechanismen, zal het stijghoogteverschil over de toplaag als belasting gezien worden. Dit betekent dat de relevante belastingparameters afhankelijk zijn van de mate van detail van de analyse. In het onderhavige verslag is zowel een analyse op het eenvoudige niveau uitgevoerd, als op het gedetailleerde. Daarom zijn zowel  $H_s$ ,  $T_p$  en  $N$  als ook de stijghoogteverschillen over de toplaag,  $\phi_w$ , beschouwd.

In deze bijlage is eerst de nauwkeurigheid van de instrumentatie behandeld, daarna de golfhoogte op ondiepwater, en tenslotte de stijghoogteverschillen.

### C.2 Instrumentatie

#### Golfhoogtemeters

Op een afstand van 80 tot 87 m van het golfschot (84 tot 91 m van de teen van het talud) waren 3 golfhoogtemeters aangebracht van het type ‘wateroppervlakvolger’ en 3 van het type ‘weerstandsdraden’. Voor vrijwel alle proeven is de golfhoogte bepaald met de golfhoogtemeters van het type ‘wateroppervlakvolger’, omdat hiermee de meeste ervaring was opgedaan. De nauwkeurigheid van deze instrumenten is  $\pm 5$  mm bij lange golven, en  $\pm 10$  mm bij korte golven. Gezien de golfhoogte, was de nauwkeurigheid derhalve ongeveer 1%.

Zodra er brekende golven optreden, kan de ‘wateroppervlakvolger’ de verandering van het wateroppervlak niet snel genoeg volgen en ontstaat er niet alleen een fout in de metingen, maar is er ook een grote kans op schade aan het instrument. Voor de proeven met een grote kans hierop, namelijk proef P23 en 23a, is gebruikgemaakt van de golfhoogtemeters van het type ‘weerstandsdraden’. De nauwkeurigheid van dit instrument is ongeveer  $\pm 5$  mm voor zowel lange als korte golven. De ijking van het instrument is echter wat lastiger, waardoor er een systematische fout van enkele centimeters kan ontstaan. Door tijdens bijna alle proeven met beide golfhoogtemeetsystemen te meten, was het mogelijk om voor P23 en P23a, toen alleen met de weerstandsdraden werd gemeten, een correctie uit te voeren ter voorkoming van een systematische fout.

De instrumenten zijn zeer nauwkeurig ten aanzien van het meten van de golfperiode. Hier treedt de grootste fout op tijdens het berekenen van de piekperiode. Deze fout bedraagt orde 0,05 s.

## Drukopnemers

De drukopnemers die gebruikt zijn voor het meten van de stijghoogteverschillen waren bevestigd in messing bussen die gemonteerd waren in de stenen. De drukopnemers waren van het merk KULITE (HKM-375), met een bereik van ongeveer één bar. Dit is gelijk aan ongeveer 10 m waterkolom.

De drukopnemers waren zo geplaatst dat zoveel mogelijk van de golfklappen gemeten werden. In het gebied waar de meeste golfklappen te verwachten waren, is dus ook de hoogste concentratie aan drukopnemers geplaatst.

Tijdens de meeste metingen zijn er in totaal 31 drukopnemers gebruikt. Hiervan zijn er 14 tegenover elkaar in een stenen geplaatst, zodat ze een paar vormen waarmee het stijghoogteverschil over de toplaag bepaald kan worden. Er waren zeven van deze paren. Het totale aantal drukopnemers op de toplaag was 23 en onder de toplaag waren 8 drukopnemers gemonteerd. Zie hiervoor de tekeningen van de modelopstellingen in Figuur B.1 t/m B.3 in bijlage B. De coördinaten van alle drukopnemers zijn vermeld in bijlage A.3 en A.4.

Op de toplaag zaten de drukopnemers veel dichter bij elkaar dan in het filter. Dit is zo gedaan omdat de drukgradiënten in de plaats,  $\partial\phi/\partial x$ , op de toplaag veel groter zijn dan in het filter. Het vrij vloeiende verloop van de stijghoogte in het filter op elk specifieke tijdstip, dat gezien kan worden als een gedempte weergave van het verloop op de toplaag op dat tijdstip, maakt het mogelijk om voor tussenliggende locaties de stijghoogte in het filter te berekenen d.m.v. interpolatie. Zo zijn er drukregistraties gecreëerd op tussenliggende locaties, direct onder de drukopnemers op de toplaag. Deze door interpolatie verkregen drukregistraties in het filter worden registraties van virtuele drukopnemers genoemd.

Door op deze wijze virtuele drukopnemers in het filter toe te voegen was het mogelijk om het stijghoogteverschil op 23 locaties te bepalen. Tijdens proef P17 tot en met P21 waren er slechts vier locaties. Toen zijn er geen virtuele drukopnemers gecreëerd door extrapolatie naar de bovenste drukopnemer op het talud (waar geen drukopnemer in het filter zat).

De drukopnemers zijn geijkt vlak vóór en vlak na elke proef. Dit ijkten is gedaan door vóór een proef de waarden van de drukopnemers te vergelijken met het stilwaterniveau. Er werd steeds voor gezorgd dat het stilwaterniveau als nul gezien werd. Voor de drukopnemers die boven de stilwaterlijn lagen is de plaatshoogte ten opzichte van het wateroppervlak als nul meegegeven. Dit heeft als gevolg dat deze drukopnemers, zodra ze onder water komen te staan, de stijghoogte ten opzichte van de stilwaterlijn weergeven. Daarentegen geven de drukopnemers constant een druk aan die gelijk is aan de plaatshoogte als ze niet onder water staan.

Tijdens de proef is er echter soms wat verloop, waardoor een fout van enkele mm waterkolom ontstaat. Verder is het instrument niet perfect lineair, waardoor ook een fout van enkele mm waterkolom kan ontstaan. Bij grote waterdrukken is er bovendien een bijdrage van de fout in de omrekenfactor van Volt naar meter waterkolom. Deze fout is ongeveer 0,01 % (dus ca 1 mm).

De totale fout is bij elk instrument verschillend en niet constant in de tijd, noch bij elke druk gelijk. Geschat wordt dat de fout kleiner is dan orde 4 mm waterkolom. Erg kleine stijghoogteverschillen over de toplaag en kleine gradiënten in het filter moeten daarom gewantrouwd worden. Om de fout kleiner dan 10% te houden gelden de volgende eisen:

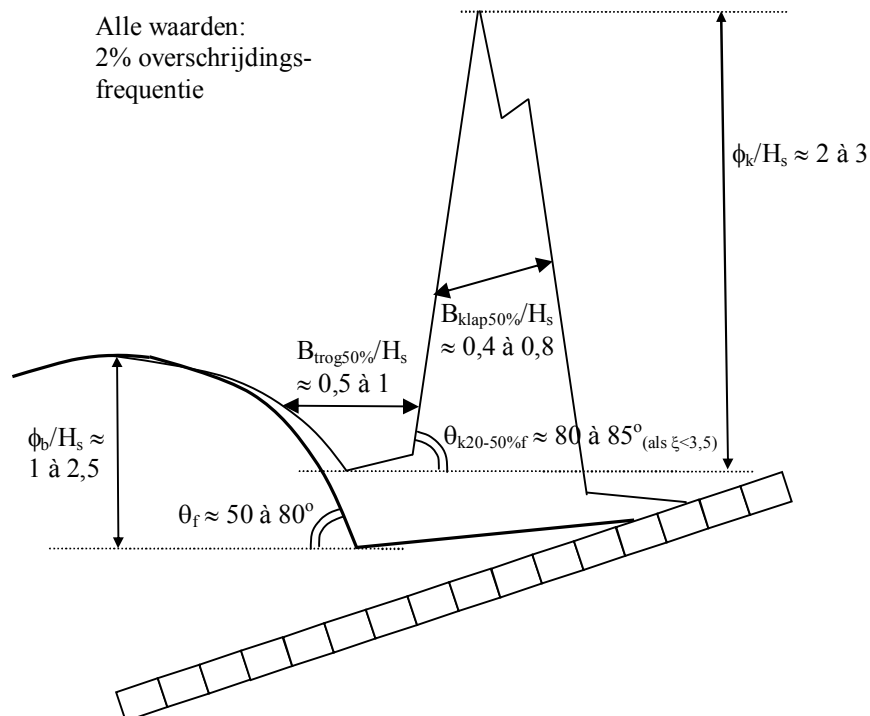
- stijghoogteverschil over de toplaag:  $\phi' - \phi > 0,06 \text{ m}$
- gradiënt in het filter:  $i > 0,06/y_i$

De onderlinge afstand tussen de drukopnemers in het filter was 1,0 à 1,5 m. De fout in de gemeten verhangen is dus kleiner dan 10% als het verhang tenminste 0,06 is. Om kleinere verhangen nauwkeurig te kunnen vaststellen, zijn meerdere drukopnemers in het filter nodig.

Een ander aspect van de nauwkeurigheid van de drukmetingen is de ruimtelijke resolutie. Een golfklap geeft lokaal een hoge stijghoogte op de toplaag. Om die nauwkeurig te kunnen meten is door Klein Breteler en Coeveld (2004) vastgesteld dat de drukopnemers maximaal  $0,13H_s$  uit elkaar mogen zitten. Gezien de afmetingen van golfklappen (zie figuur C.2.1, uit Klein Breteler en Coeveld 2004) kan globaal gesteld worden dat bij een onderlinge afstand kleiner dan  $0,3H_s$  de fout in de golfklapgrootte en het stijghoogteverschil kleiner dan 10% is, maar bij  $0,7H_s$  een fout van orde 20 tot 50% kan ontstaan. Dit is bepaald door het driehoekige stijghoogteverloop van een golfklap te tekenen en vervolgens drukopnemers met verschillende afstanden op een gunstige of ongunstige locatie te plaatsen en de gemiddelde stijghoogte te vergelijken met de werkelijke. Er kan zowel een onderschatting als een overschatting van het gemiddelde optreden.

In het onderhavige onderzoek zaten de drukopnemers op de toplaag tijdens serie 1 en tijdens serie 2 tot en met proef P16 ongeveer 21 cm uit elkaar, terwijl de golfhoogte orde 1 m was. Dit betekent dat de drukopnemers wat te veruit elkaar zaten om de golfklappen nauwkeurig te meten, waardoor een fout van orde 5% in de golfklapgrootte ontstaat.

Tijdens proef P17 tot en met P21 is gewerkt met een lage waterstand en was de onderlinge afstand van de drukopnemers 0,4 m, terwijl de golfhoogte orde 1,1 m was. Hierdoor worden de golfklappen en stijghoogteverschillen orde 10 à 20% onderschat.



Figuur C.2.1 Schematische schets van golfklap (dunne lijn) en front (dikke lijn) met de globale maten (Klein Breteler en Coeveld 2004)

De meeste metingen zijn gedaan met een bemonsteringsfrequentie van 200 Hz, alleen P00 heeft een bemonsteringsfrequentie van 5 Hz gehad. Door Klein Breteler en Coeveld (2004) is vastgesteld dat voor dergelijke proeven de bemonsteringsfrequentie tenminste 40 Hz moet zijn, waar hier dus royaal aan voldaan is.

Tenslotte zijn er altijd een paar instrumenten die niet voldeden aan de verwachtingen. Deze drukopnemers waren voor een deel van of voor de gehele proef kapot. Het kan hierbij zijn dat de drukopnemer tijdelijk een nulverschuiving heeft gehad door bijvoorbeeld een steentje dat ertegenaan is gekomen of anderszins een beschadiging. Soms kan dit weer goed komen door bij de volgende proef gewoon te ijken zoals normaal, soms trekt de drukopnemer uit zichzelf weer bij. Deze drukopnemers zijn niet gebruikt in de analyse.

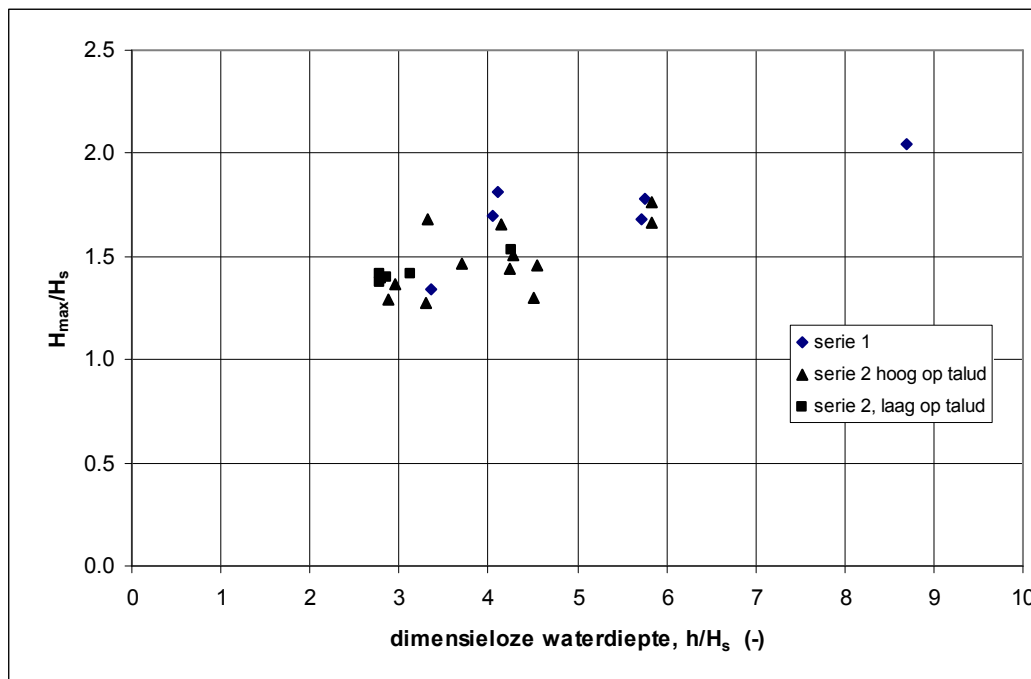
Zie voor de defecte drukopnemers bijlage A.1 en A.2.

Tijdens proef P05 en P22 t/m P23a waren er geen drukopnemers aanwezig, omdat die proeven gericht waren op het bezwijken van de toplaag. Als de toplaag bezwijkt, zou dit ook schade aan de drukopnemers kunnen geven.

### C.3 Golfhoogte op ondiepwater

Naarmate de waterdiepte ten opzichte van de golfhoogte kleiner wordt, zullen steeds meer hoge golven in het spectrum gaan breken. Het gevolg hiervan is dat de hoogte van de grootste golf,  $H_{\max}$ , kleiner wordt, en bij vrij ondiepwater zelfs  $H_s$  kleiner kan worden dan op diep water.

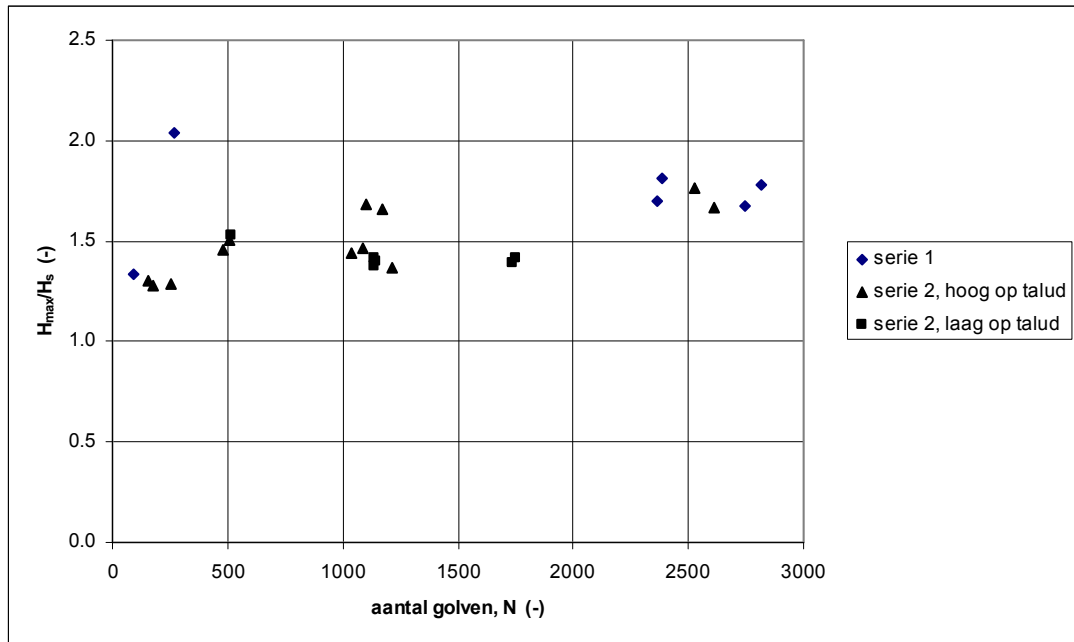
De huidige proeven zijn uitgevoerd met een verhouding tussen waterdiepte en golfhoogte van  $2,8 \leq h/H_s \leq 8,7$ . In deze reeks is het niet te verwachten dat de significante golfhoogte meetbaar kleiner wordt door het breken van de golven, maar als  $h/H_s < 4$  dan wordt dit mogelijk wel merkbaar op de maximaal golfhoogte.



Figuur C.3.1, verhouding van maximaal golfhoogte en significante golfhoogte als functie van de dimensieloze waterdiepte

In figuur C.3.1 is de verhouding tussen de maximale golfhoogte en de significante golfhoogte als functie van de waterdiepte gegeven. Het blijkt dat de proeven met een relatief kleine waterdiepte geen afwijkende verhouding hebben. Dit is een aanwijzing dat de waterdiepte voldoende groot was.

De maximaal golfhoogte is echter ook afhankelijk van het aantal golven tijdens de proef, en bovendien afhankelijk van toeval. Naarmate de proef langer duurt, is er meer kans op een extreem hoge golf. Deze tendens is duidelijk te zien in figuur C.3.2.



Figuur C.3.2, verhouding van maximaal golfhoogte en significante golfhoogte als functie van het aantal golven tijdens de betreffende proef (proefduur)

In deze figuur is verder te zien dat de proeven met een lage waterstand (serie 2, laag op het talud) bij een relatief korte proefduur ( $N < 1000$ ) een verhouding van  $H_{\max}/H_s$  hebben die goed vergelijkbaar is met de andere proeven. Als de proefduur echter groter wordt, zoals te zien is bij de punten bij  $N \approx 1700$ , neemt de verhouding  $H_{\max}/H_s$  niet toe, terwijl dat bij de andere proeven wel het geval is. Hieruit blijkt dat er een kleine waterdiepte invloed aanwezig is tijdens de proeven P19 en P20 (met  $h/H_s = 2,8$ ), waarbij de maximale golfhoogte orde 10% kleiner is geworden dan bij vergelijkbare proeven met een grotere relatieve waterdiepte. Hiermee is in de analyse rekening gehouden.

## C.4 Stijghoogteverschil

Het stijghoogteverschil over de toplaag,  $\phi_w$ , is tijdens de proeven P00 t/m P16 door toevoeging van de virtuele drukopnemers in het filter bekend op 23 locaties. Tijdens proef P17 tot en met P21 (serie 2 laag op het talud) waren dit 4 locaties. In deze analyse wordt de aandacht volledig gericht op het stijghoogteverschil dat een kracht omhoog geeft.

De grootte van dit stijghoogteverschil over de toplaag wordt, behalve door de golfcondities, ook bepaald door:

- het niveau van de freatische lijn
- doorlatendheid van de toplaag en filter

- beweging van de top laag

Naarmate de freatische lijn in het filter hoger is, zal ook het stijghoogteverschil groter zijn. Een verhoogde freatische lijn ten opzichte van de buitenwaterstand zal een verhang geven in het filter (met stroming naar beneden), waardoor het stijghoogteverschil hoog op het talud het meeste toeneemt.

Tijdens proef P00 is de freatische lijn op 20 cm boven de buitenwaterstand ingesteld. Tijdens de andere proeven is dit niet gedaan. Uit de metingen is echter gebleken dat ook de golven en de daarmee samenhangende beweging van de top laag, een verhoging van de freatische lijn kan geven.

De verhouding tussen de doorlatendheid van de top laag en die van het filter komt tot uiting in de lek lengte. Naarmate de doorlatendheid van de top laag groter is, is de lek lengte kleiner, en zullen ook de stijghoogteverschillen bij overigens gelijke omstandigheden kleiner zijn.

Ook de beweging van de top laag heeft invloed op het stijghoogteverschil. Als de top laag omhoog beweegt, zuigt hij als het ware water achter zich aan. Dit gaat gepaard met een verhang richting het bewegende deel van de top laag, waardoor daar de stijghoogte lager zal zijn dan zonder de beweging.

De stijghoogteverschillen zijn per proef geanalyseerd door een overschrijdingskromme van de stijghoogteverschillen per golf te maken. Dit is op verschillende manieren gedaan:

1. Integrale stijghoogteverschil:

Het integrale stijghoogteverschil per golf is het grootste stijghoogteverschil dat door de drukopnemerparen is gemeten in een afzonderlijke golf. Er wordt hier dus geen onderscheid gemaakt waar dat stijghoogteverschil is opgetreden. In elke golf van de proef wordt deze waarde bepaald, om vervolgens een overschrijdingskromme daarmee te bepalen.

Deze procedure is niet alleen uitgevoerd met de originele meetsignalen, die bemonsterd zijn op 200 Hz, maar ook op signalen die gefilterd zijn op 10 Hz. Deze filtering zorgt ervoor dat de zeer kortdurende piekjes in het stijghoogteverschil, die geen invloed kunnen hebben op de zware top laag, de analyse niet vertroebelen.

2. Lokale stijghoogteverschil:

Voor de bepaling van de overschrijdingskromme van de lokale stijghoogteverschillen wordt voor elk drukopnemerpaar het grootste stijghoogteverschil per golf bepaald, en wordt vervolgens voor elk drukopnemerpaar de overschrijdingskromme van de stijghoogteverschillen bepaald.

## **C.4.1 Integrale stijghoogteverschil**

### **C.4.1.1 Stijghoogteverschil bij hogere bemonsteringsfrequentie**

In de tabel C.4.1 zijn de stijghoogteverschillen voor enkele karakteristieke overschrijdingsfrequenties gegeven van de signalen met 200 Hz. In figuur C.5.1 t/m C5.4 zijn als voorbeelden de overschrijdingskrommen van de proeven P01, P04, P11b en P16 getekend.

De stijghoogteverschillen zijn bepaald aan de hand van het aantal ingekomen golven, zoals gemeten met de laagste drukopnemer op het talud.

In de tabel valt op dat de stijghoogteverschillen tijdens proef P12 en P15 wat hoger waren dan tijdens de andere proeven. Dit komt enerzijds door de vrij grote golfhoogte tijdens deze proeven, en anderzijds door het feit dat de proefduur van proef P15 vrij klein was. Daardoor was het niet mogelijk om een betrouwbare waarde van  $\phi_{w0,5\%}$  te krijgen en is deze bepaald door middel van extrapolatie met het hoogst gemeten stijghoogteverschil. Die waarde was echter door toeval vrij groot.

Ook proef P16 was vrij kort, waardoor de waarde van  $\phi_{w0,5\%}$  verkregen moest worden met extrapolatie, zoals te zien is in figuur C.5.4. De 0,5%-waarde ligt los van de lijn die de gemeten waarden aangeeft en is dus geëxtrapolerd. Doordat hier echter het grootste gemeten stijghoogteverschil niet erg door toeval is beïnvloed, is ook de 0,5%-waarde redelijk in overeenstemming met de rest van de overschrijdingskromme.

Proef	$\phi_{w13\%}$ (m)	$\phi_{w5\%}$ (m)	$\phi_{w2\%}$ (m)	$\phi_{w0,5\%}$ (m)
P00	0,47	0,52	0,60	0,89
P01	0,76	0,94	1,13	1,43
P02	0,66	0,89	1,06	1,54
P03	0,88	1,18	1,39	1,84
P04	0,79	1,05	1,20	1,60
P11	0,83	0,99	1,14	1,45
P11B	0,81	0,99	1,16	1,49
P12	1,17	1,50	1,79	2,39
P12A	0,62	0,78	0,90	1,07
P12B	0,67	0,81	0,99	1,14
P13	0,91	1,08	1,28	1,52
P14	0,95	1,20	1,52	2,17
P14B	0,55	0,70	0,86	1,13
P15	1,27	1,47	2,52	4,21
P16	1,05	1,24	1,38	1,44
P17*	0,77	0,88	1,02	1,37
P18*	0,85	0,98	1,18	1,57
P19*	0,84	1,03	1,18	1,45
P20*	0,85	1,03	1,28	1,50
P21*	0,80	0,93	1,05	1,24

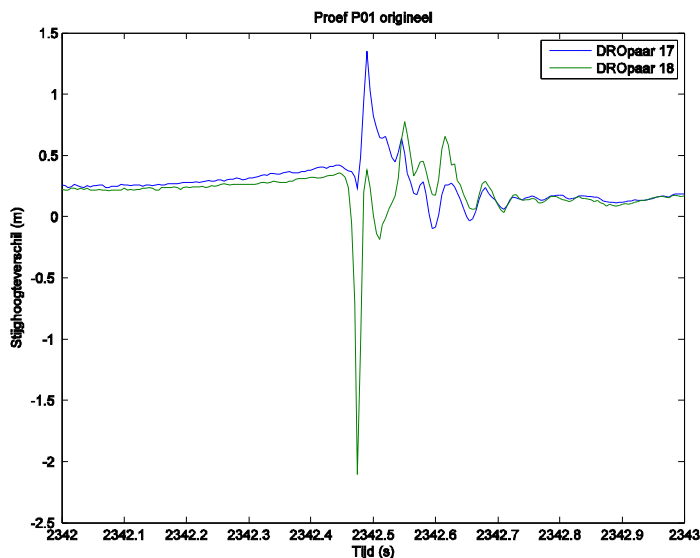
Tabel C.4.1, Ongefilterd stijghoogteverschil,  $\phi_w$ , voor verschillende overschrijdingsfrequenties (\*=drukopnemers zaten te ver uit elkaar waardoor gemeten  $\phi_w$  ongeveer 10 à 20% te laag is)

### C.4.1.2 Stijghoogteverschil na laagfrequente filtering

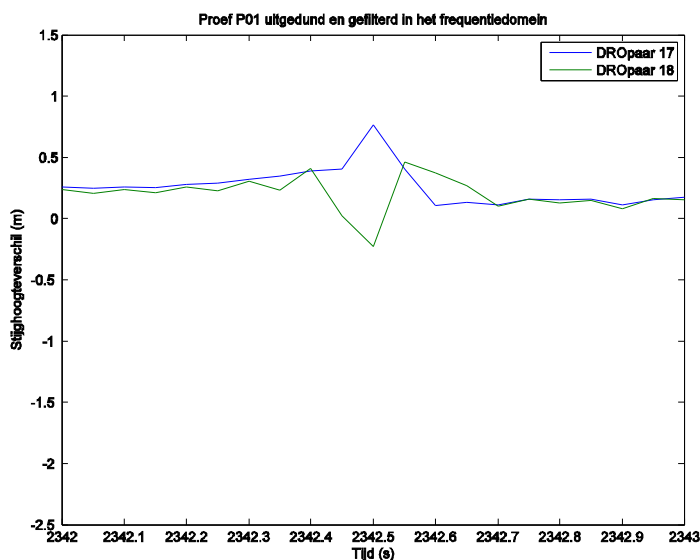
Bij de proeven is een bemonsteringsfrequentie gebruikt van 200 Hz. Dit betekent dat zeer kortdurende, extreme belastingen meegenomen worden in de metingen. Het is echter de vraag of zulke kortdurende belastingen relevant zijn voor de bekleding, omdat deze een zekere traagheid bezit. Met de formules van Klein Breteler (1992) voor het berekenen van de invloed van traagheid op de stabiliteit van steenzettingen (zoals deze ook opgenomen is in ANAMOS) kan berekend worden dat een beweging van 2 mm in 0,01 s een stijghoogteverschil van 1,9 m vergt, uitsluitend voor het overwinnen van de traagheid. Als

de beweging van 2 mm echter in 0,1 s plaatsvindt, is voor het overwinnen van de traagheid slechts een stijghoogteverschil van 0,02 m nodig.

Daarnaast is er de invloed van de verhinderde toestroming. Dit houdt verband met het feit dat de toplaag vastgezogen lijkt op de ondergrond en pas in beweging kan komen als de groeiende ruimte onder de toplaag gevuld blijft met water, dat toestroomt via het filter. Deze toestroming gaat gepaard met een drukverval, waardoor de stijghoogte onder de bewegende toplaag lager is dan zonder beweging. Naarmate de beweging sneller gaat, is de drukval groter en is dus de invloed van verhinderde toestroming groter. Met de formules van Klein Breteler (1992) kan berekend worden dat in dit geval de stijghoogte onder de toplaag 0,1 à 1,0 m kan afnemen tijdens een beweging van 2 mm in 0,1 s.

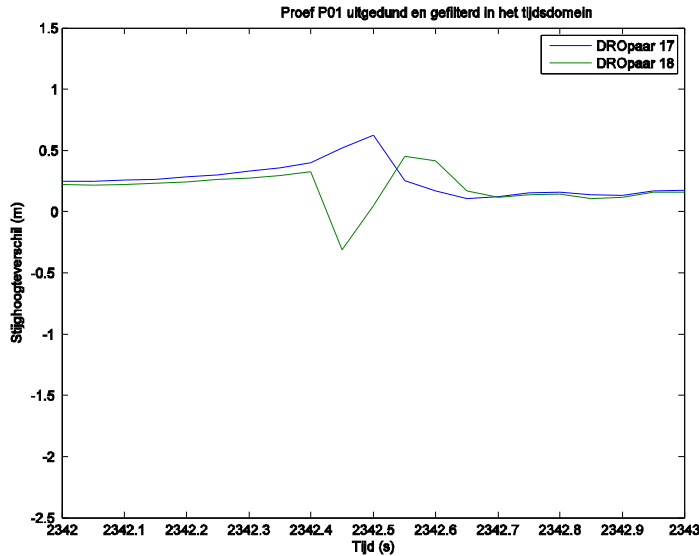


Figuur C.4.1, verloop van het stijghoogteverschil als functie van de tijd ter plaatse van drukopnemers 17 en 18 met het volledige 200 Hz signaal.



Figuur C.4.2, verloop van het stijghoogteverschil als functie van de tijd ter plaatse van drukopnemers 17 en 18 na een low-pass filtering in het frequentiedomein





Figuur C.4.3, verloop van het stijghoogteverschil als functie van de tijd ter plaatse van drukopnemers 17 en 18 na een low-pass filtering met een voortschrijdend gemiddelde

Op grond van bovenstaande resultaten wordt geconcludeerd dat de toplaag nauwelijks kan bewegen tijdens een belasting die slechts 0,01 s duurt. Tijdens een belasting die 0,1 s aanhoudt, kan dat wel. Daarom is besloten om de stijghoogteverschillen te beschouwen die gefilterd zijn met een low-pass filter van 10 Hz. Tevens is het signaal uitgedund naar 20 Hz.

De filtering is uitgevoerd op basis van een voortschrijdend gemiddelde. Deze methode heeft de voorkeur gekregen boven een filter in het frequentiedomein omdat zo'n filter het signaal vervormd rond een plotseling stap in het signaal. Als bijvoorbeeld het stijghoogteverschil als gevolg van een golfklap omhoog schiet, zal het frequentiedomein-filter een aanloopje nemen om deze piek te kunnen bereiken. Dit uit zich in een oscillatie voor en na de piek in het signaal. Bovendien wordt er impuls verwijderd uit het signaal. Dit is in figuur C.4.1 en C.4.2 getoond aan de hand van een voorbeeld. Het oorspronkelijke signaal op 200 Hz is getekend een figuur C.4.1. Het gefilterde signaal in het frequentiedomein in figuur C.4.2 laat duidelijk de oscillatie zien die optreedt voor de stijghoogtepiek.

Een filtering door middel van een voortschrijdend gemiddelde vlt de piek echter gewoon wat uit, maar behoudt de impuls. In figuur C.4.3 is te zien dat de oscillatie in de aanloop naar de hoge stijghoogtepiek in het met het voortschrijdend gemiddelde gefilterde signaal niet aanwezig is.

De filtering is uitgevoerd op een frequentie van 10 Hz met een voortschrijdend gemiddelde met de volgende formule:

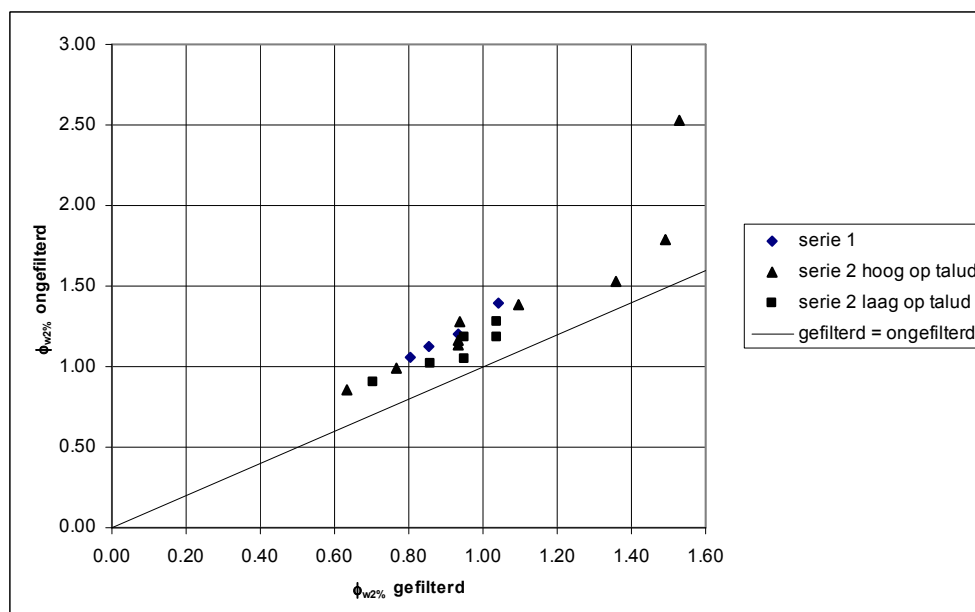
$$\phi_{t(i)} = (0,3\phi_{t(i-5)} + 0,6\phi_{t(i-4)} + 0,8\phi_{t(i-3)} + 0,9\phi_{t(i-2)} + \phi_{t(i-1)} + \phi_{t(i)} + \phi_{t(i+1)} + 0,9\phi_{t(i+2)} + 0,8\phi_{t(i+3)} + 0,6\phi_{t(i+4)} + 0,3\phi_{t(i+5)}) / 8,2$$

Na het filteren is uitgedund tot een frequentie van 20 Hz. Door het filteren zijn er geen kortdurende stijghoogtepiekjes meer en kan er dus straffeloos uitgedund worden. Het uitdunnen heeft daarom een verwaarloosbare invloed op het verloop van het signaal.

In tabel C.4.2 zijn de overschrijdingswaarden weergegeven. In figuur C.4.4 is de verhouding tussen de gefilterde en ongefilterde stijghoogteverschillen getoond.

Proef	$\phi_{w13\%}$ (m)	$\phi_{w5\%}$ (m)	$\phi_{w2\%}$ (m)	$\phi_{w0,5\%}$ (m)
P00	0,28	0,31	0,33	0,34
P01	0,61	0,75	0,85	0,99
P02	0,58	0,68	0,80	0,94
P03	0,70	0,91	1,04	1,25
P04	0,63	0,80	0,93	1,14
P11	0,68	0,82	0,93	1,07
P11B	0,66	0,79	0,93	1,05
P12	1,04	1,26	1,49	1,68
P12A	0,57	0,65	0,71	0,82
P12B	0,58	0,68	0,77	0,93
P13	0,72	0,85	0,94	1,06
P14	0,86	1,05	1,36	1,88
P14B	0,48	0,56	0,63	0,81
P15	1,04	1,20	1,53	2,16
P16	0,71	0,95	1,10	1,15
P17*	0,69	0,77	0,86	0,99
P18*	0,76	0,88	0,95	1,20
P19*	0,79	0,91	1,04	1,19
P20*	0,80	0,93	1,04	1,24
P21*	0,76	0,86	0,95	1,11

Tabel C.4.2, Gefilterd stijghoogteverschil voor verschillende overschrijdingsfrequenties (\*=drukopnemers zaten te ver uit elkaar waardoor gemeten  $\phi_w$  ongeveer 10 à 20% te laag is)



Figuur C.4.4, verhouding tussen gefilterd stijghoogteverschil en ongefilterd stijghoogteverschil met 2% overschrijdingsfrequentie.

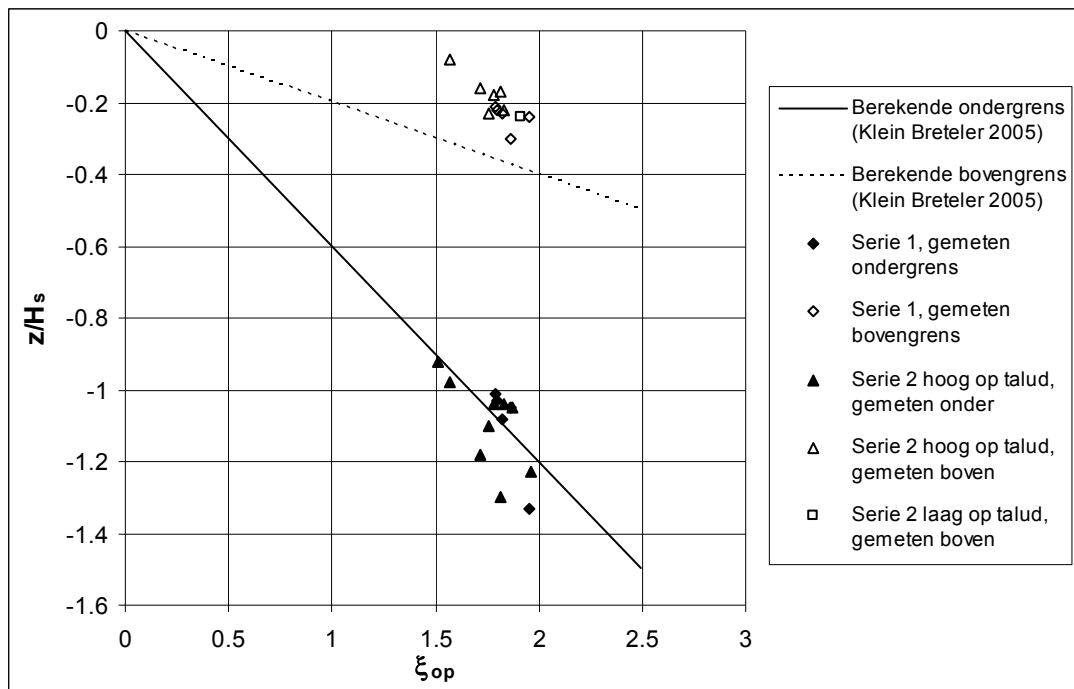
In de figuren C.6.1 tot en met C.6.4 zijn de overschrijdingskrommen weergegeven die gemaakt zijn met de gefilterde data van de proeven P01, P04, P11b en P16.

### C.4.2 Lokale stijghoogteverschil na filtering

Voor het integrale stijghoogteverschil over de toplaag wordt er geen onderscheid gemaakt ten aanzien van de locatie waar het betreffende stijghoogteverschil optreedt. In deze paragraaf is de analyse per drukopnemerpaar uitgevoerd, waardoor de informatie over de locatie waar de stijghoogteverschillen optreden wel behouden blijft. Dit levert overschrijdingskrommen per drukopnemerpaar waardoor het stijghoogteverschil met een bepaalde overschrijdingsfrequentie als functie van de locatie op het talud beschouwd kan worden.

Er is gebruikgemaakt van de 10 Hz gefilterde stijghoogteverschillen.

Zo zijn er figuren gemaakt met op de verticale as het stijghoogteverschil en op de horizontale as de dimensieloze locatie:  $z/H_s$  met  $z$  = niveau op het talud ten opzichte van de stilwaterlijn (m). In figuur C.7.1 t/m C.7.7 zijn deze figuren gegeven voor het stijghoogteverschil met overschrijdingspercentage van 0,5%, 2% en 13%. Bij de figuren met P15, P16 en P23a moet nog aangetekend worden dat deze proeven minder dan 200 golven hadden en dat derhalve de stijghoogteverschillen met overschrijdingspercentage van 0,5% door extrapolatie bepaald moesten worden.



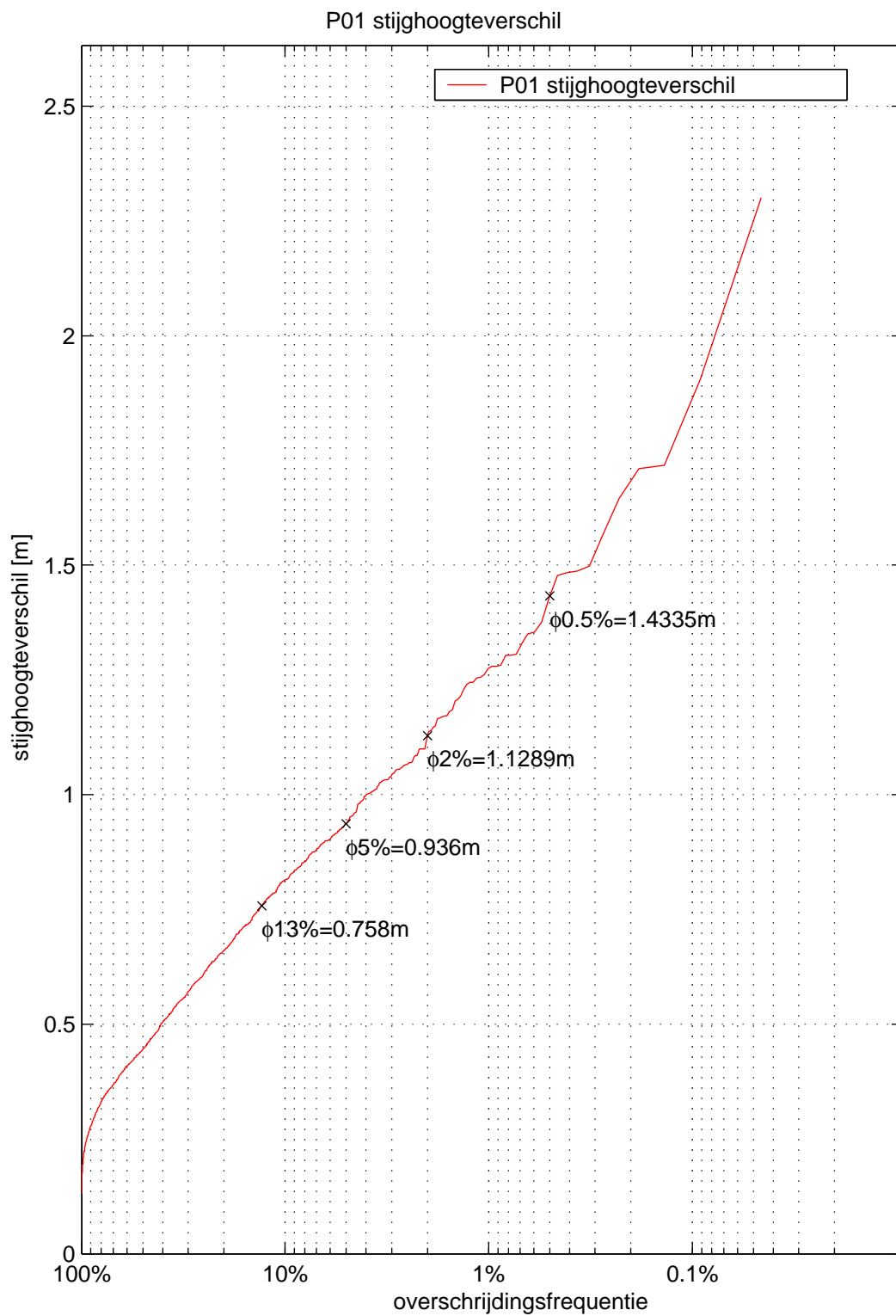
Figuur C.4.5, onder en bovengrens van de zone waarin 2%-stijghoogteverschil groter is dan 70% van het maximum

In de figuren is te zien dat het stijghoogteverschil met overschrijdingsfrequentie van 13% vrij constant is in een breed gebied, terwijl die voor 2% en 0,5% in een veel smaller gebied optreden.

Uit de figuren is de locatie afgelezen waar het stijghoogteverschil tenminste 70% is van het maximale stijghoogteverschil:  $\phi_{w2\%} > 0,7 \cdot [\phi_{w2\%}]_{\max}$ . Dit levert een ondergrens en een bovengrens per proef waar de grootste stijghoogteverschillen zijn opgetreden.

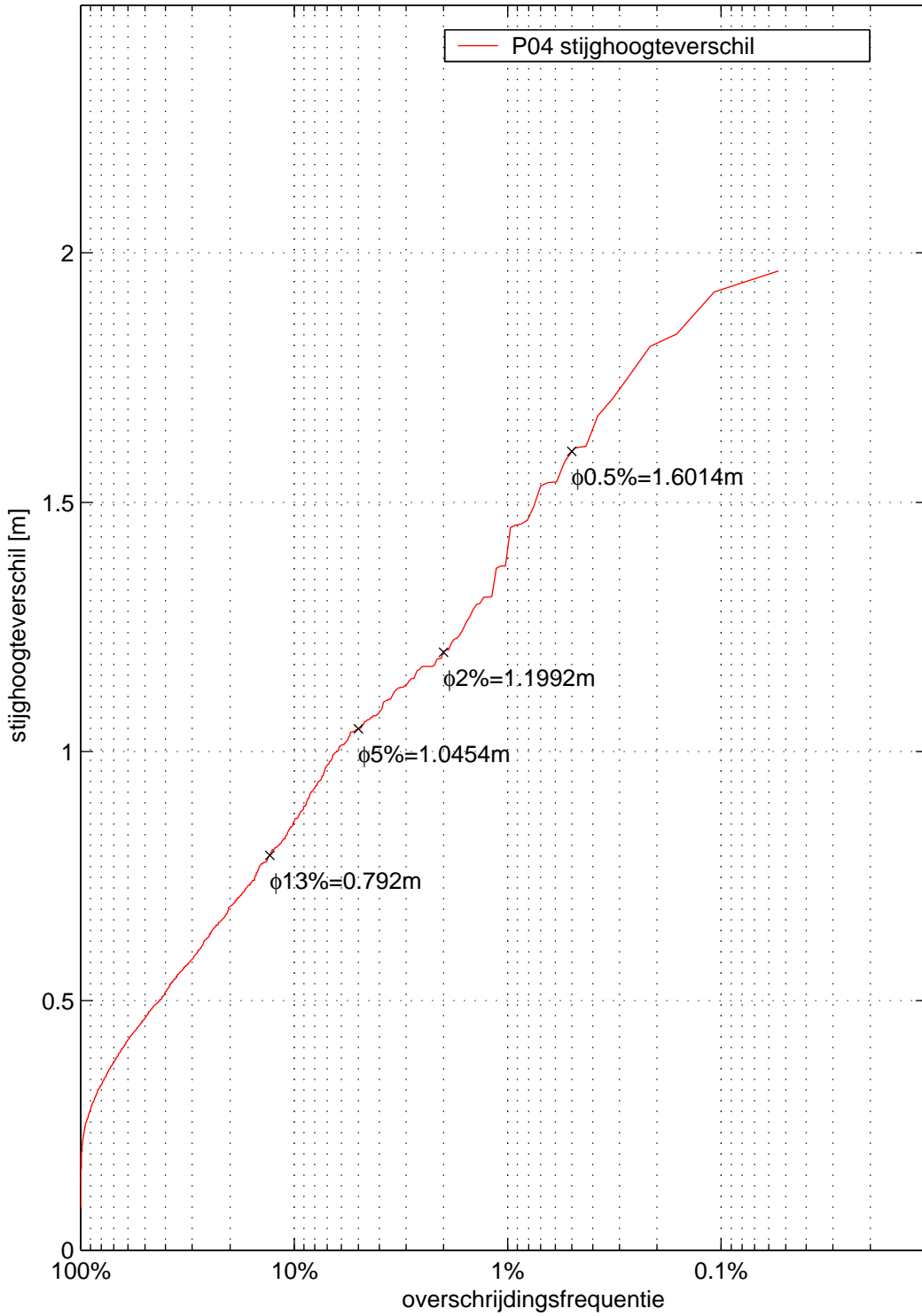
Door Klein Breteler en Eysink (2005) is afgeleid dat de grootste stijghoogteverschillen voor open steenzettingen optreden bij  $-0,6\xi_{\text{op}} < z/H_s < -0,2\xi_{\text{op}}$ .

In figuur C.4.5 is voor alle proeven de zone met grootste stijghoogteverschillen gegeven. Het blijkt dat de ondergrens van de zone vrij goed overeenkomt met de formule van Klein Breteler en Eysink (2005), maar de bovengrens ligt iets dichterbij de stilwaterlijn.



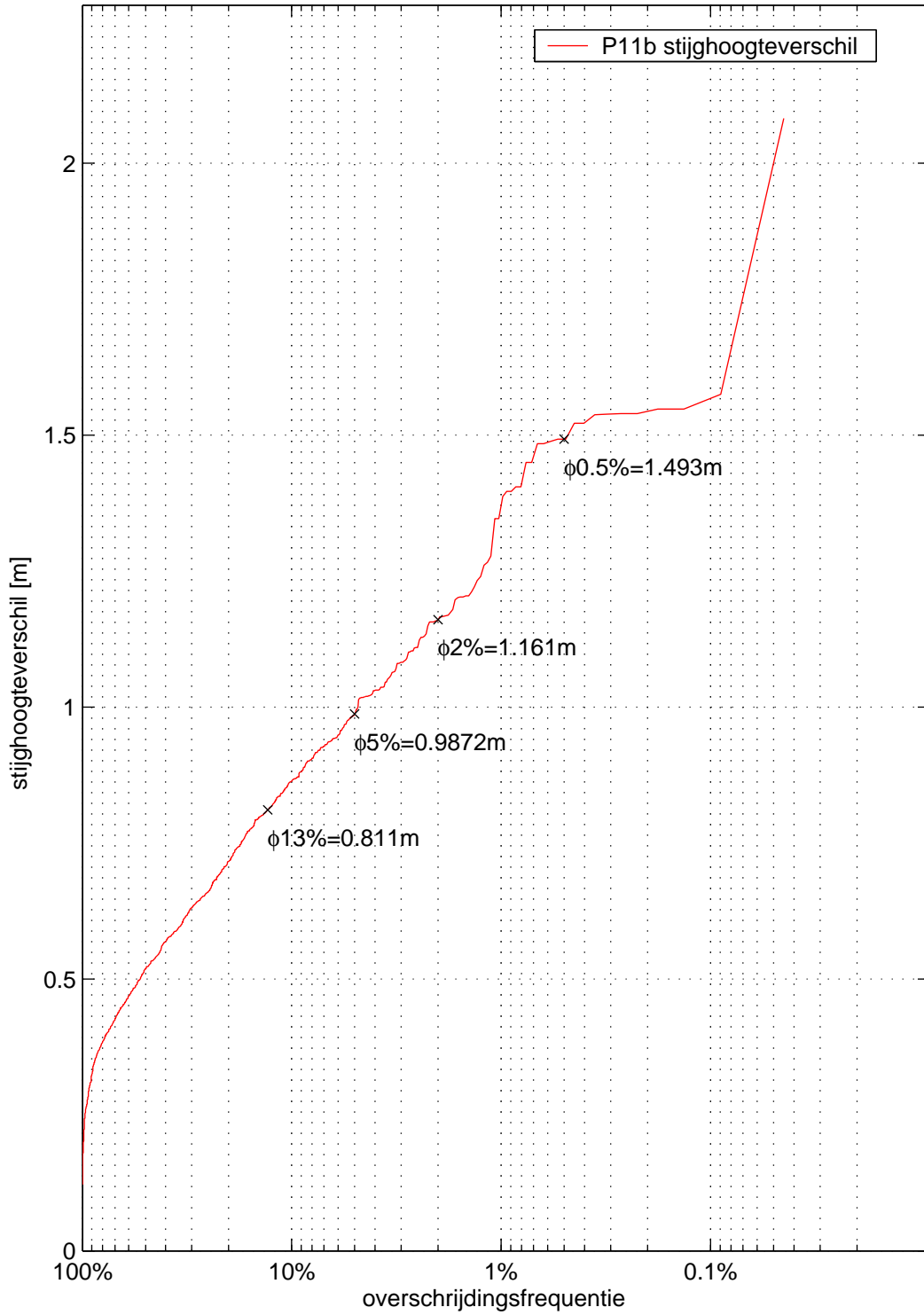
Stijghoogteverschil tijdens P01 Ongefilterd	P01	
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4635	Fig. C.5.1

P04 stijghoogteverschil

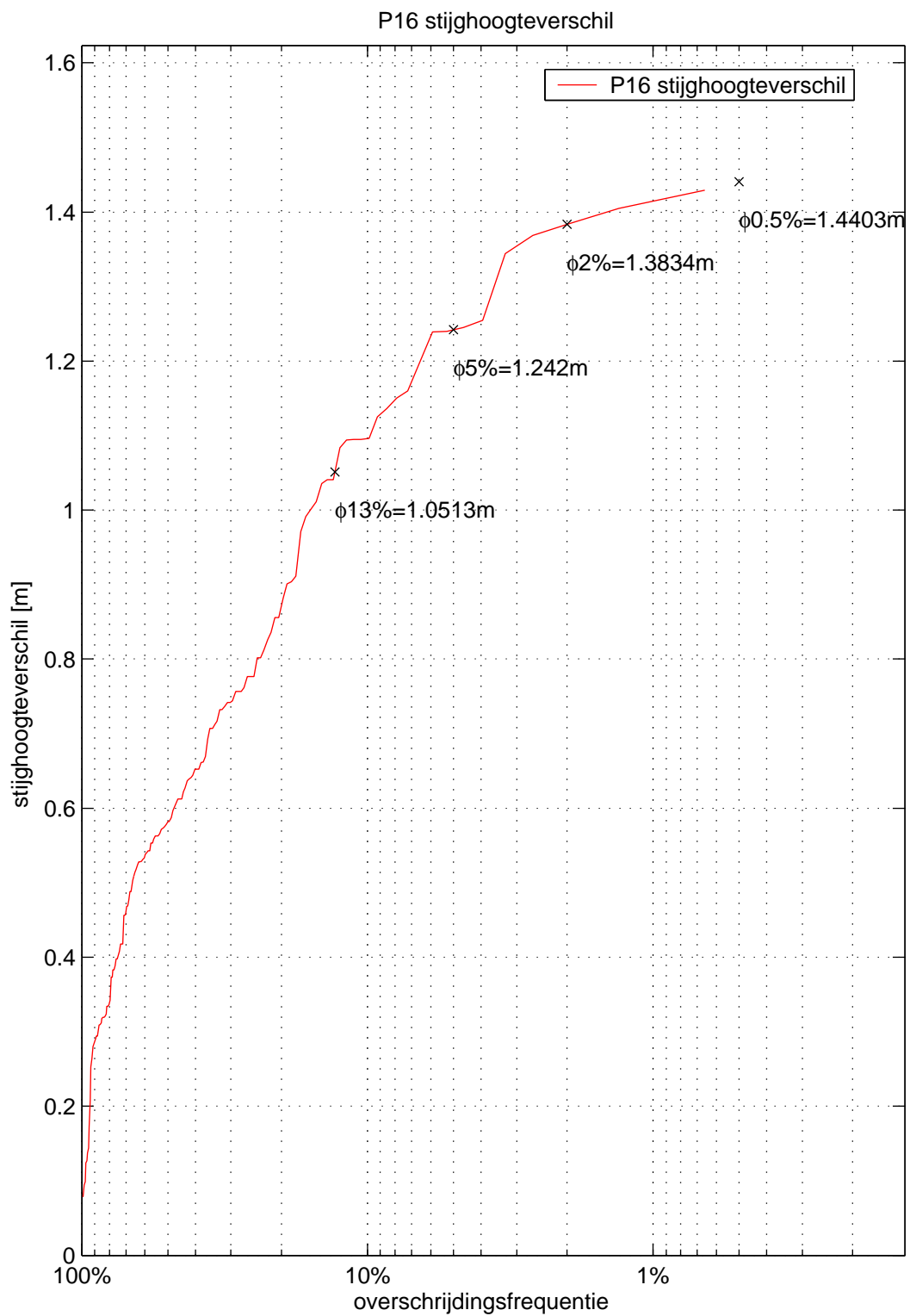


Stijghoogten tijdens P04 Ongefilterd	P04	
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4635	Fig. C.5.2

P11b stijghoogteverschil



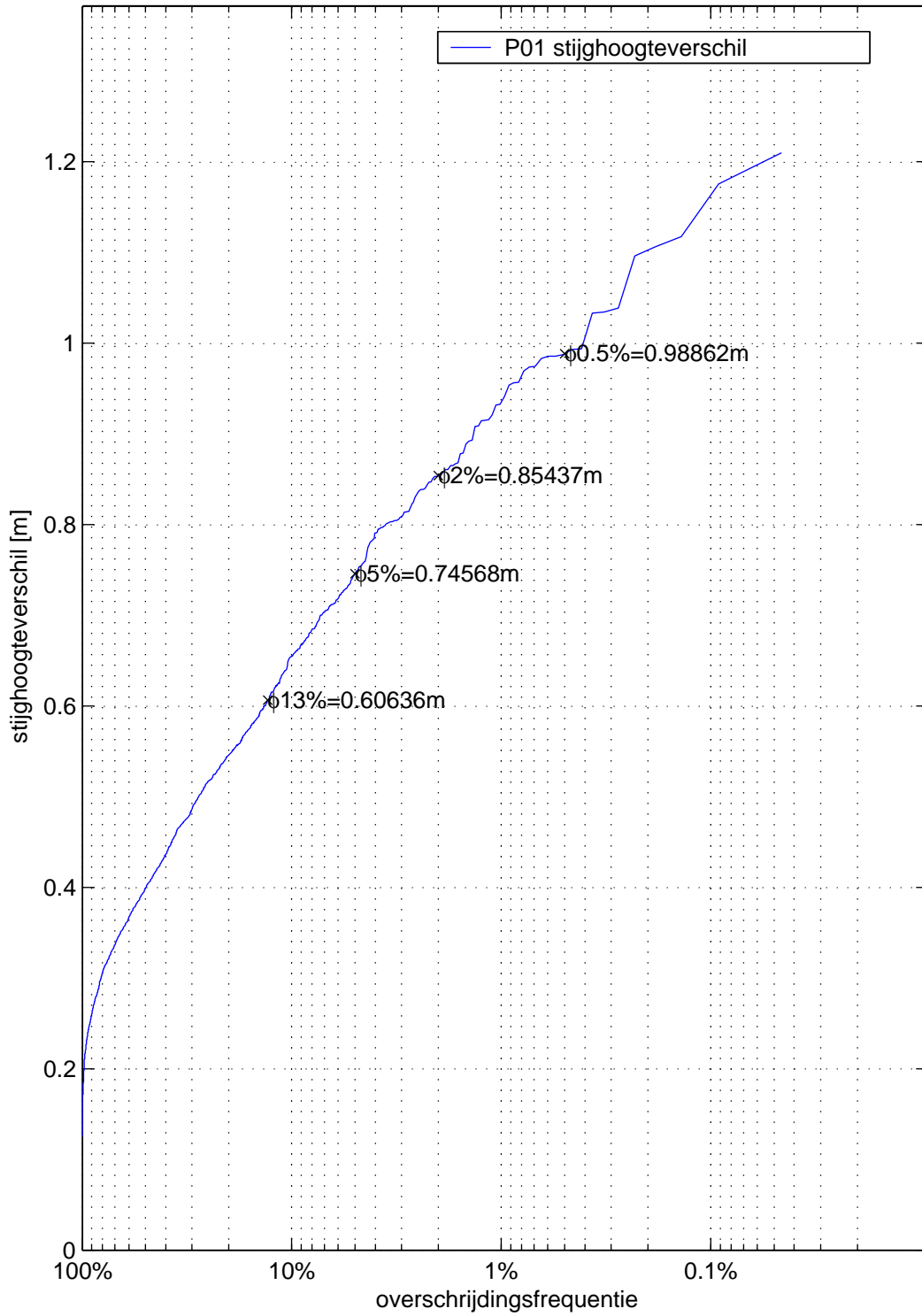
Stijghoogteverschillen tijdens P11b Ongefilterd	P11b	
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4635	Fig. C.5.3



Stijghoogteverschillen tijdens P16 Ongefilterd	P16	
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4635	Fig. C.5.4

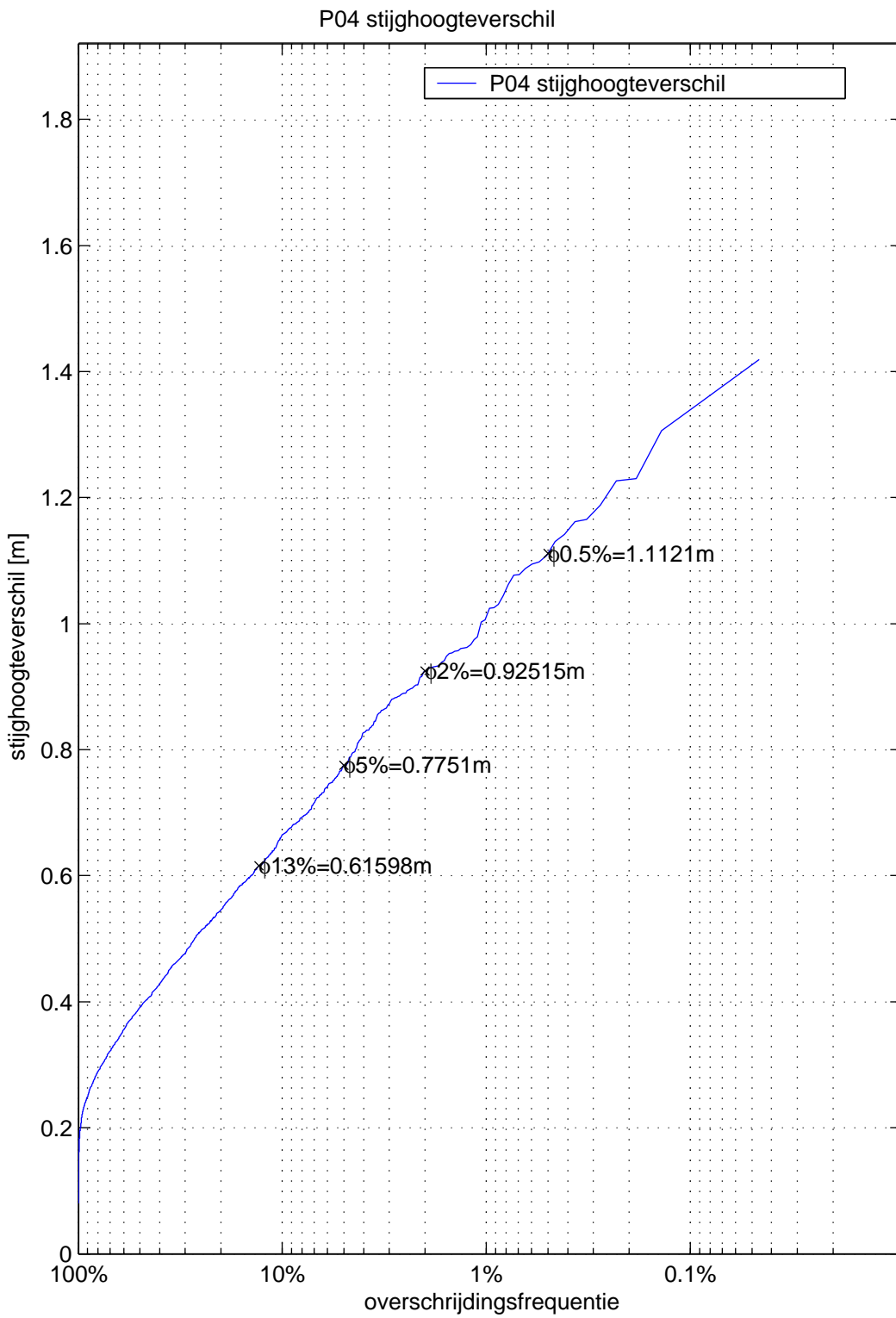


P01 stijghoogteverschil



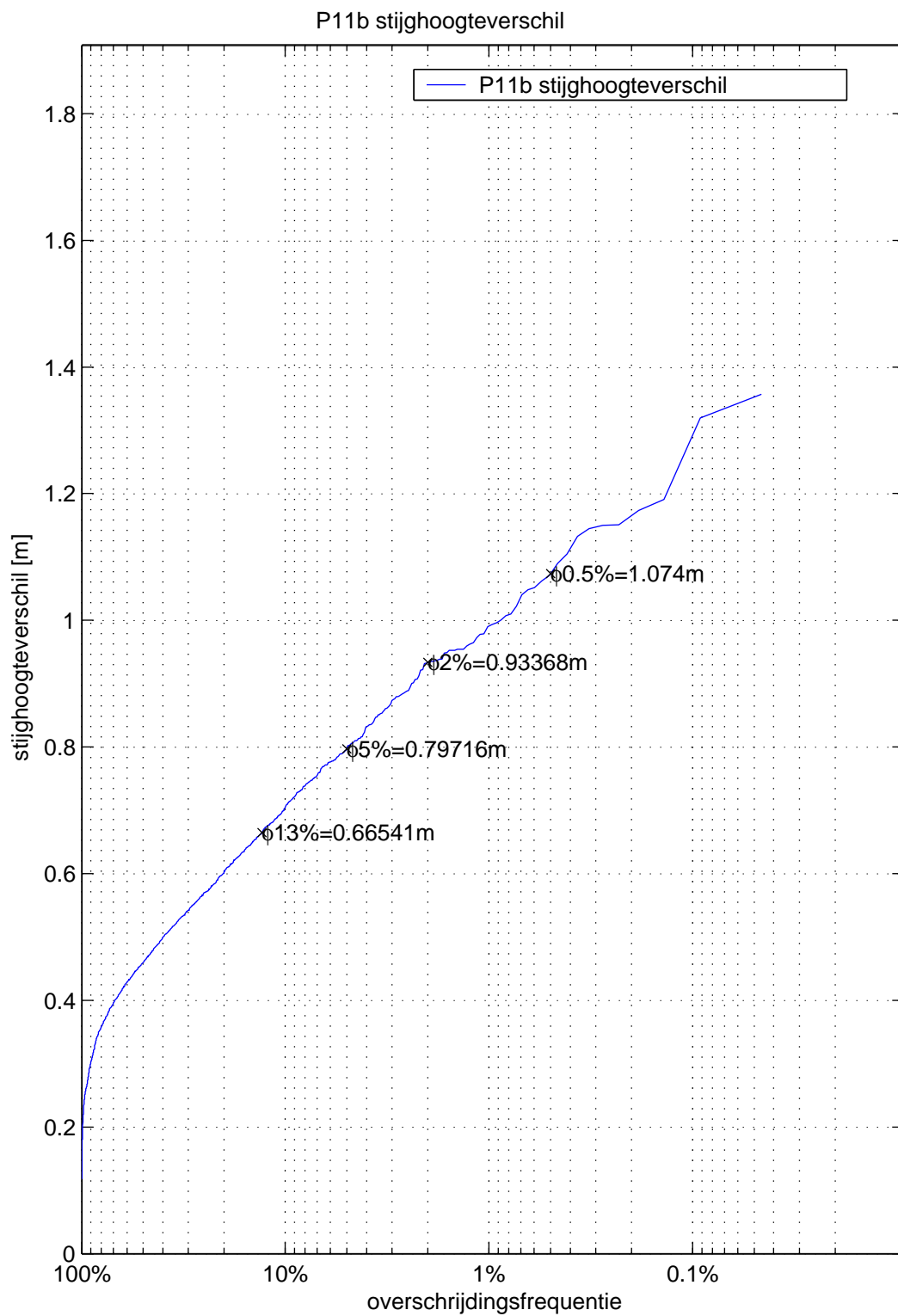
Stijghoogteverschillen tijdens P01  
Gefilterd

P01

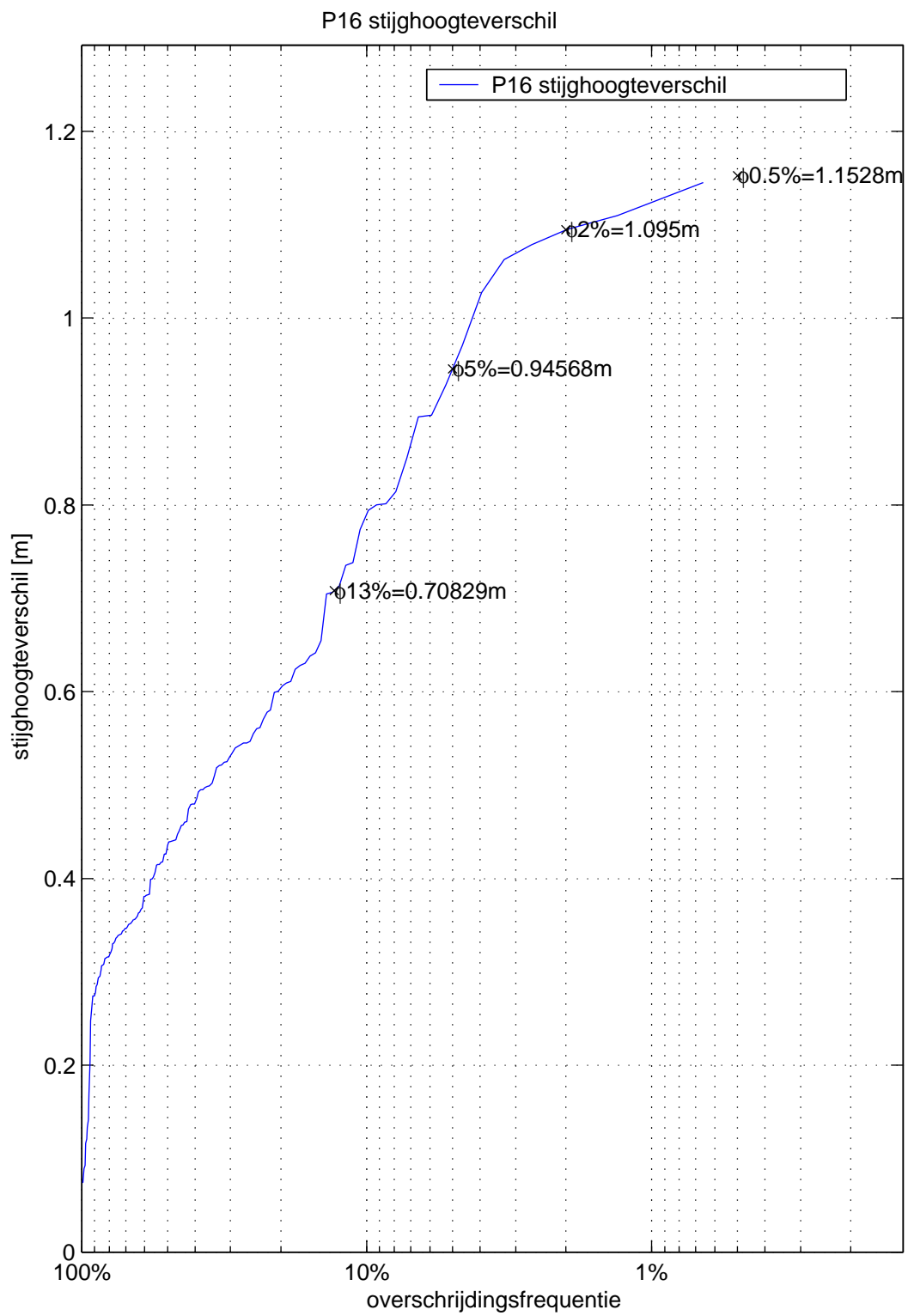


Stijghoogteverschillen in P04  
Gefilterd

P04



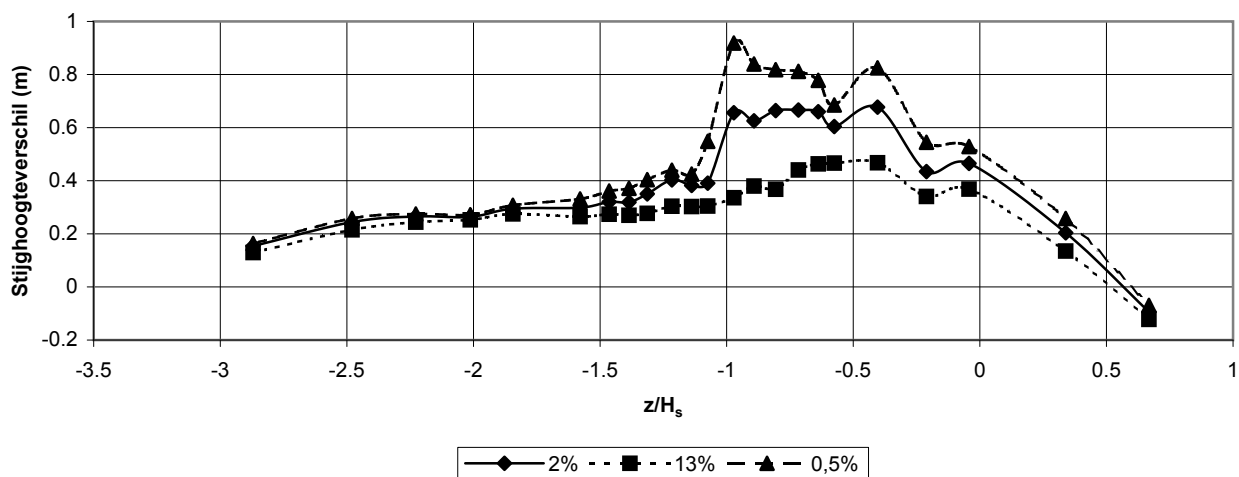
Stijghoogteverschillen tijdens P11b Gefilterd	P11b	
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4635	Fig. C.6.3



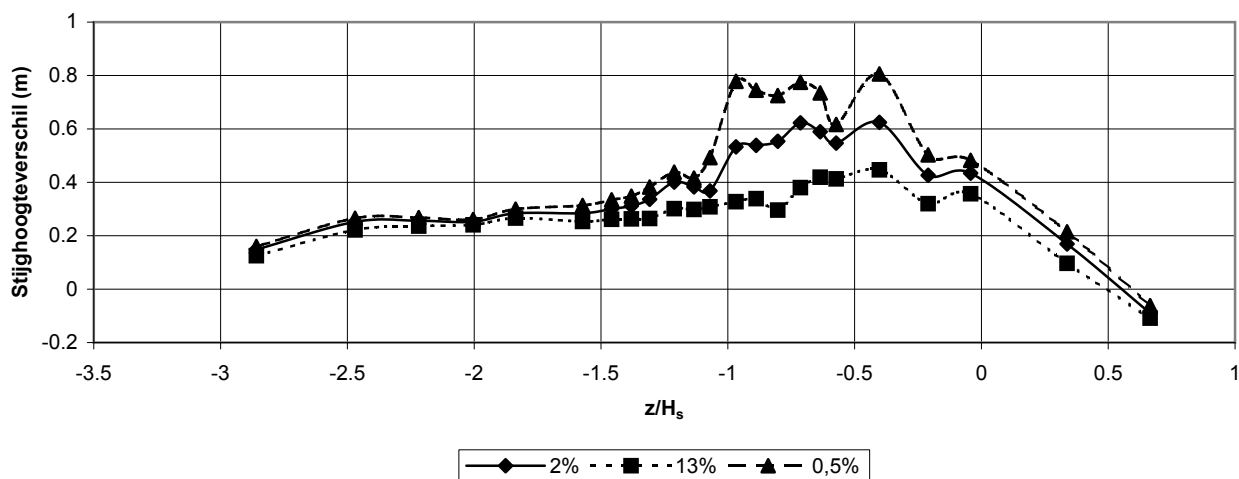
Stijghoogteverschillen tijdens P16  
Gefilterd

P16

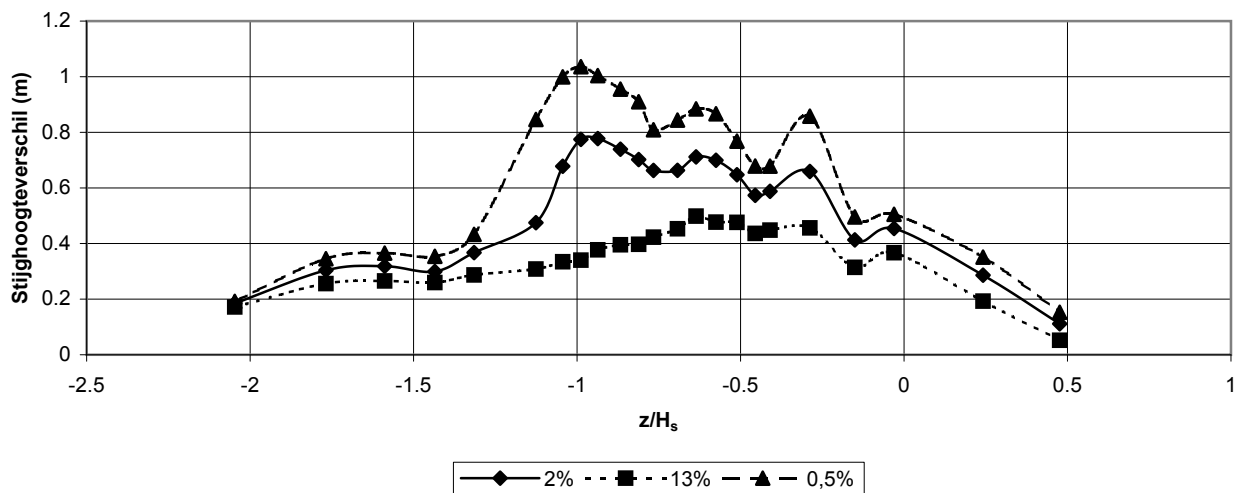
gefilterd stijghoogteverschil Proef P01 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil Proef P02 per overschrijdingsfrequentie

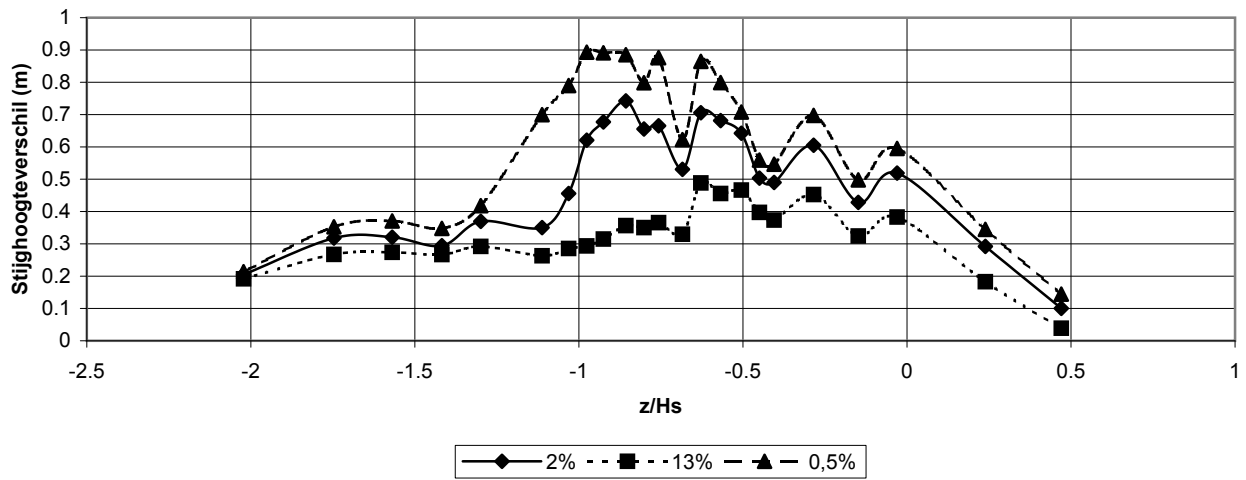


gefilterd stijghoogteverschil Proef P03 per overschrijdingsfrequentie

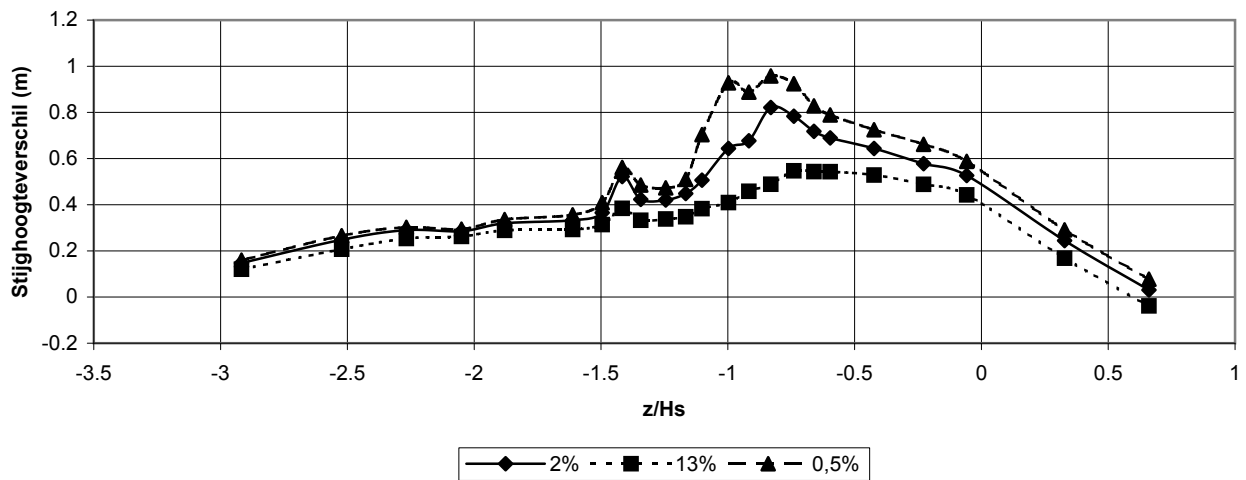


gefilterd stijghoogteverschil per drukopnemerpaar  
als functie van de locatie

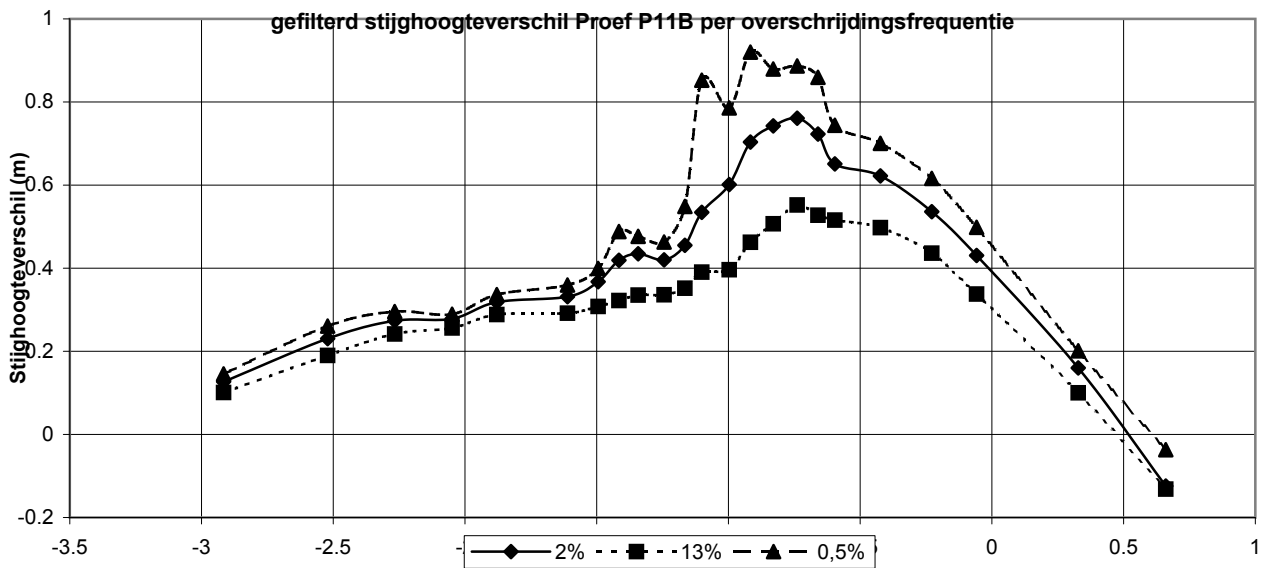
gefilterd stijghoogteverschil Proef P04 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil Proef P11 per overschrijdingsfrequentie

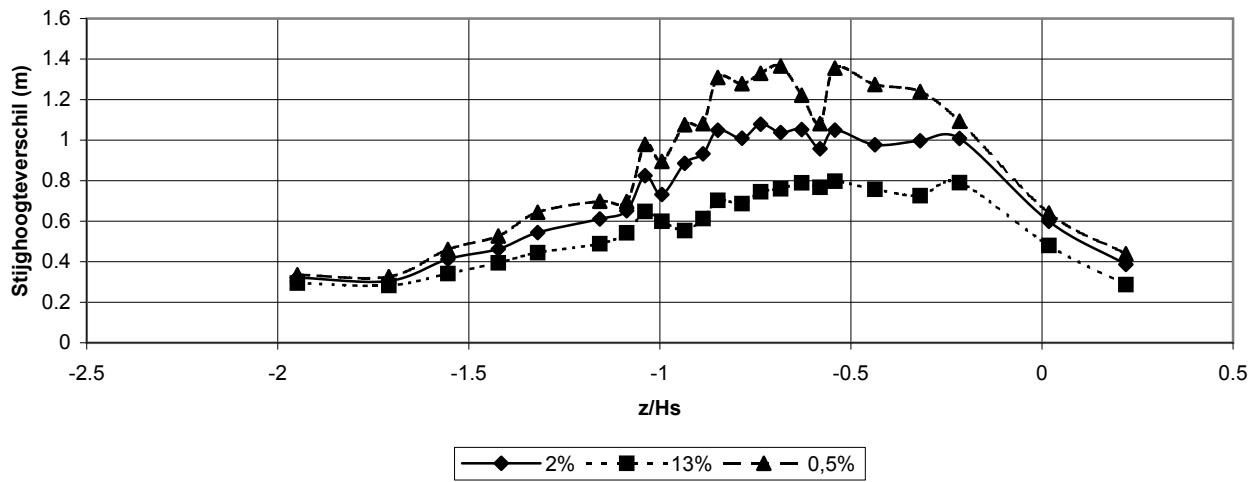


gefilterd stijghoogteverschil Proef P11B per overschrijdingsfrequentie

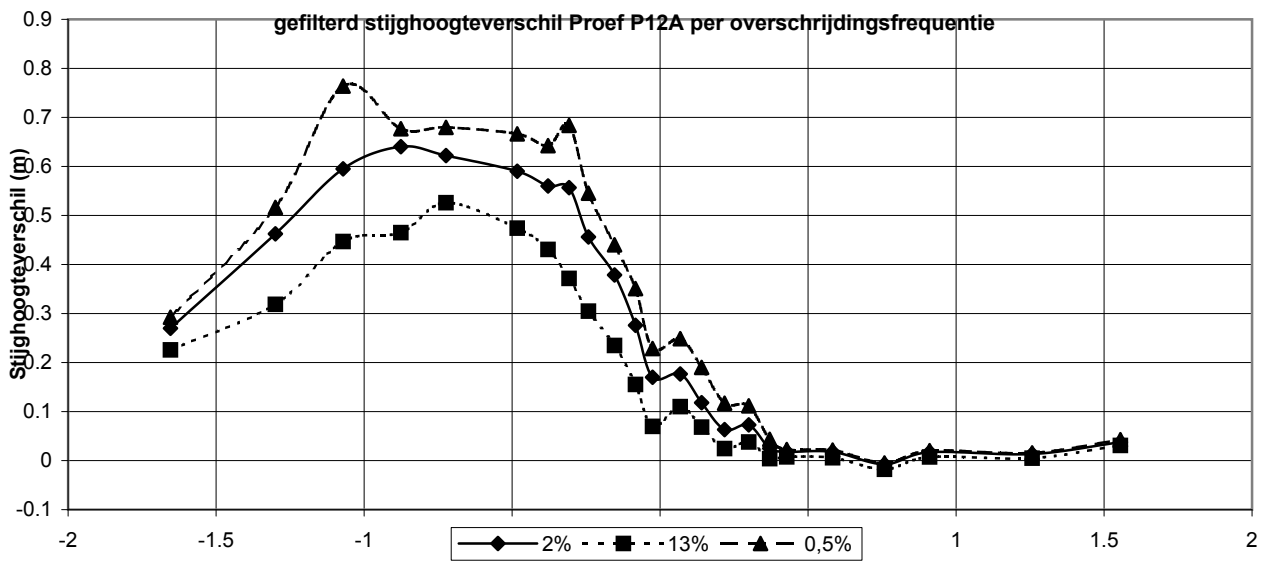


gefilterd stijghoogteverschil per drukopnemerpaar  
als functie van de locatie

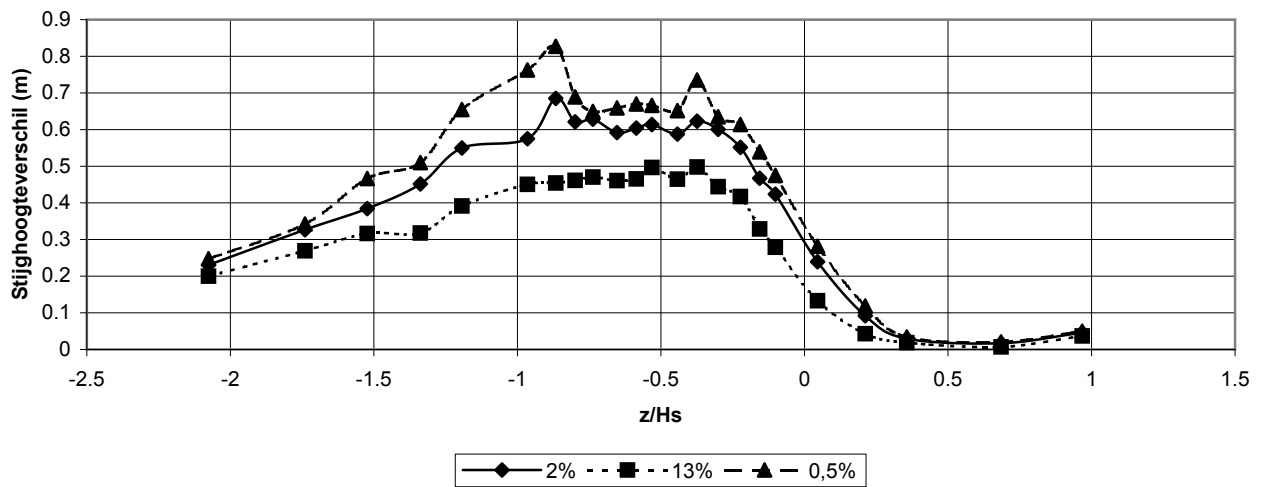
gefilterd stijghoogteverschil Proef P12 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil Proef P12A per overschrijdingsfrequentie

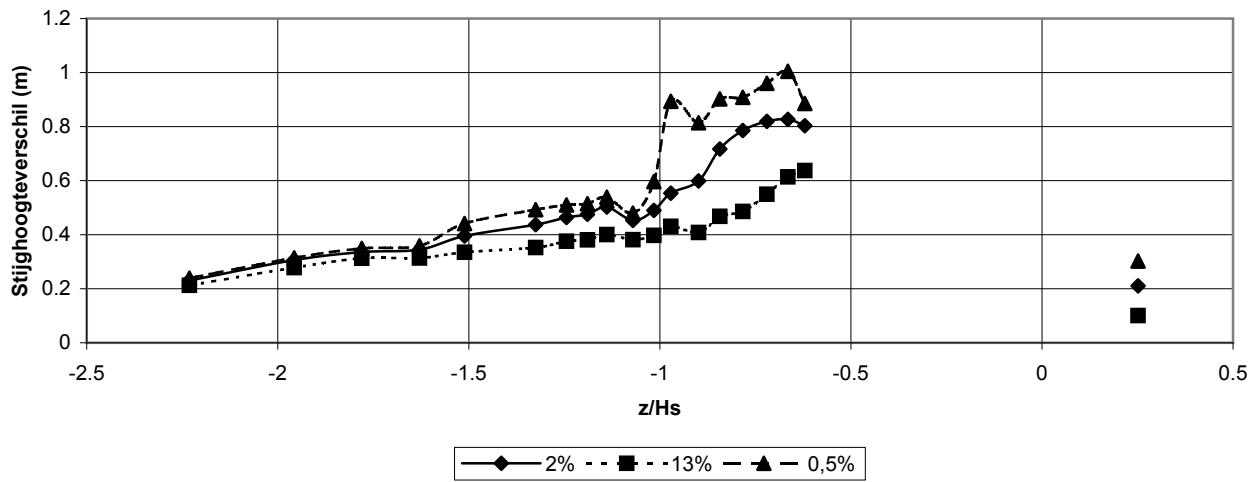


gefilterd stijghoogteverschil Proef P12B per overschrijdingsfrequentie

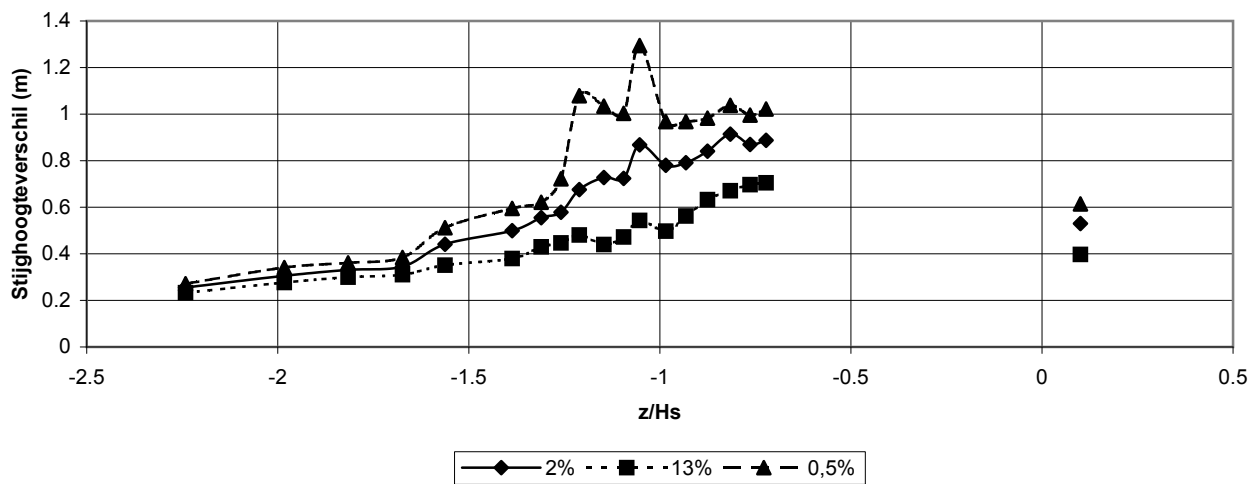


gefilterd stijghoogteverschil per drukopnemerpaar  
als functie van de locatie

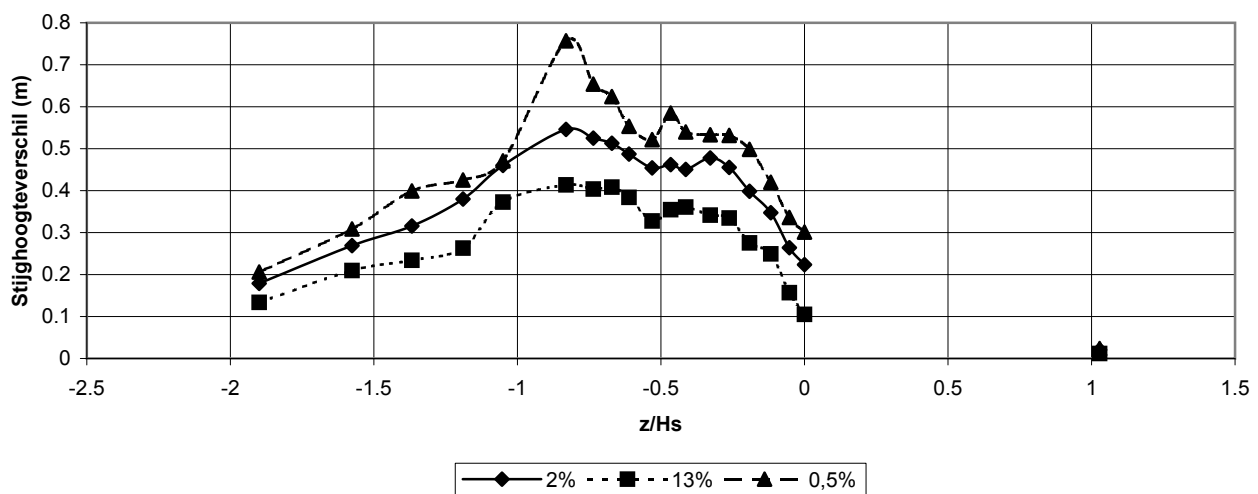
gefilterd stijghoogteverschil Proef P13 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil Proef P14 per overschrijdingsfrequentie



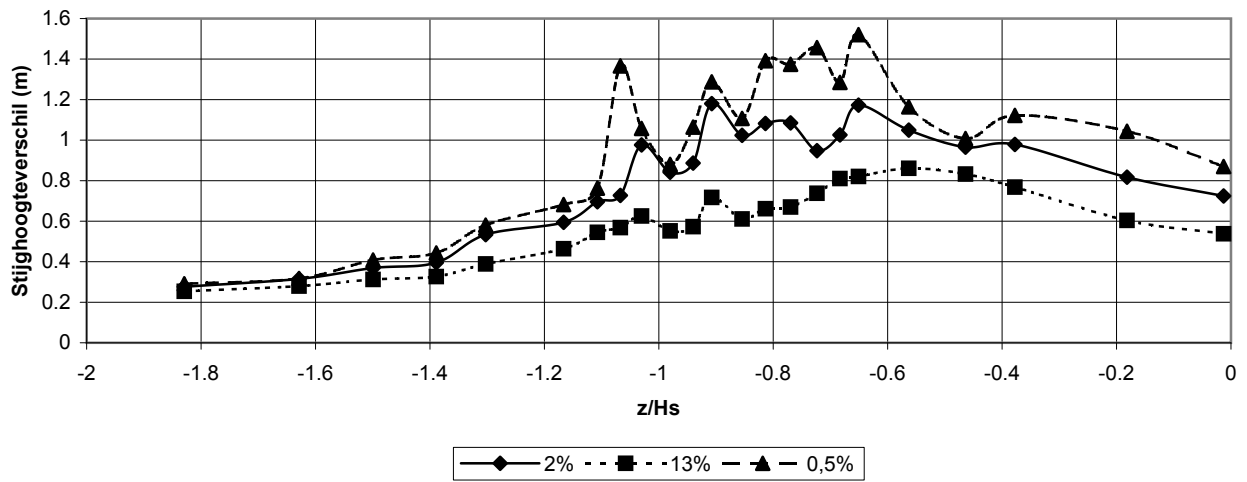
gefilterd stijghoogteverschil Proef P14B per overschrijdingsfrequentie



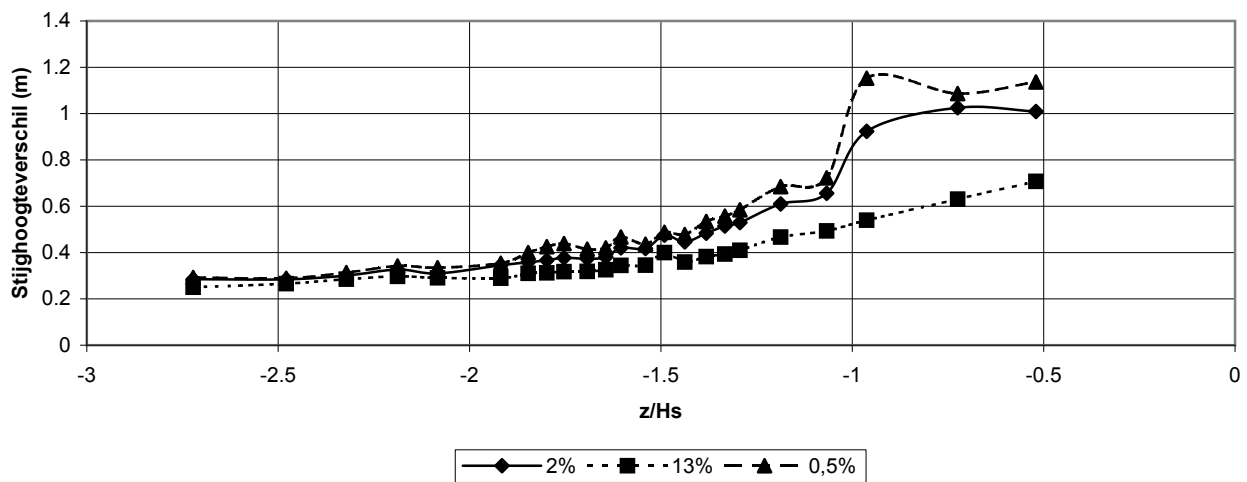
gefilterd stijghoogteverschil per drukopnemerpaar  
als functie van de locatie



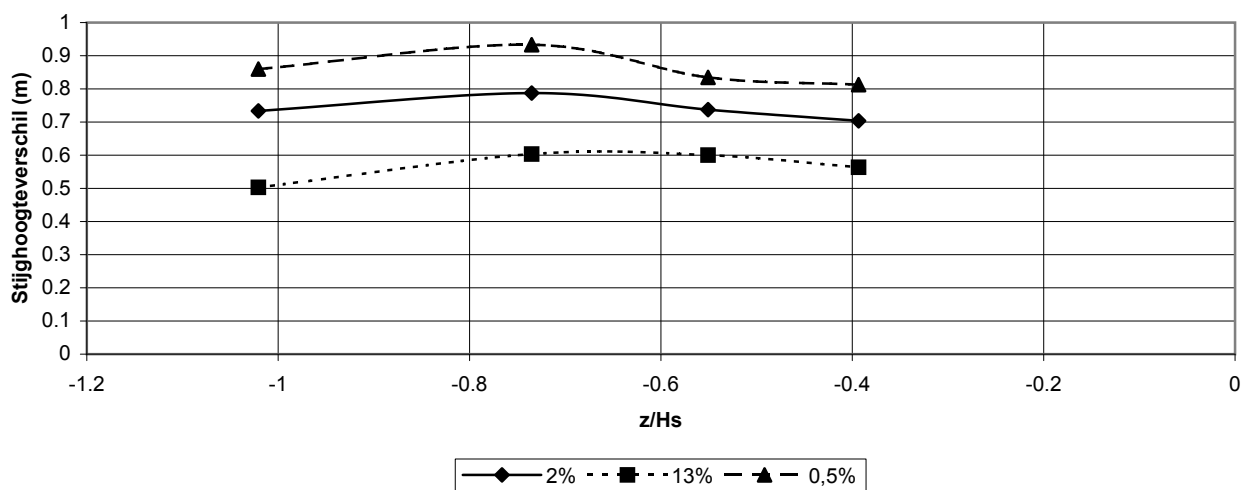
gefilterd stijghoogteverschil Proef P15 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil Proef P16 per overschrijdingsfrequentie

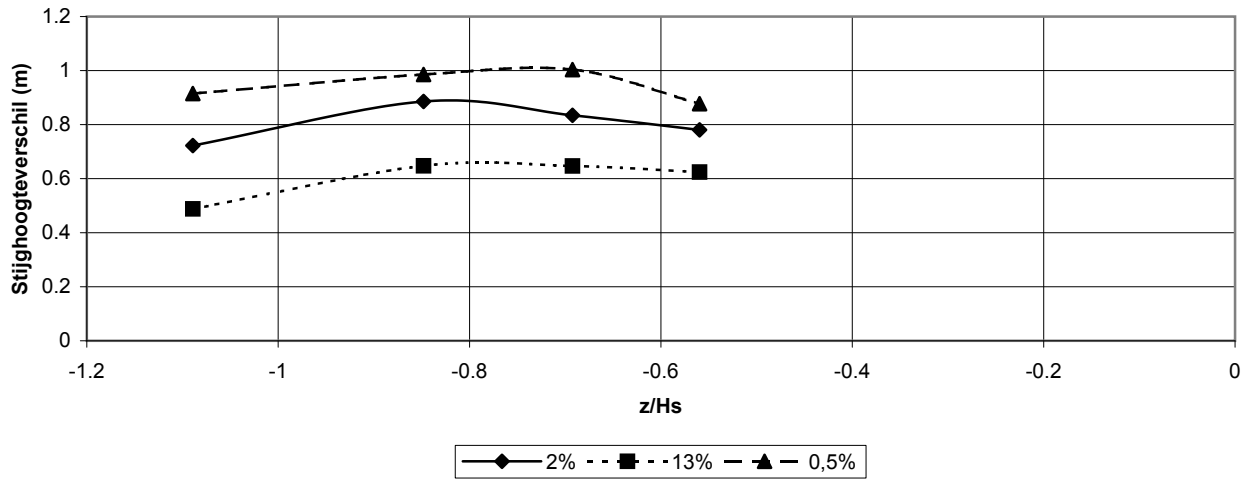


gefilterd stijghoogteverschil Proef P17 per overschrijdingsfrequentie

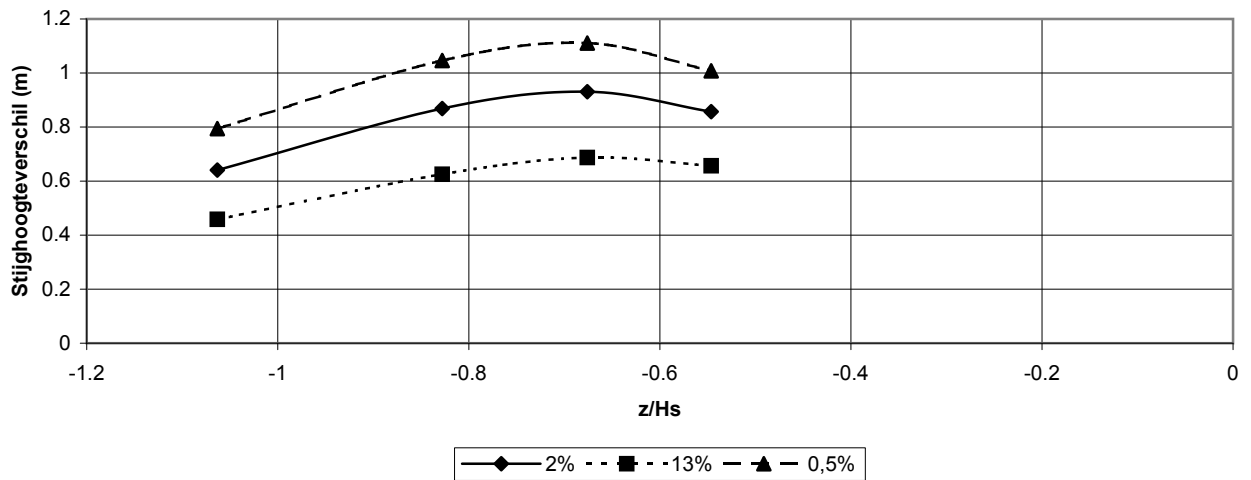


gefilterd stijghoogteverschil per drukopnemerpaar  
als functie van de locatie

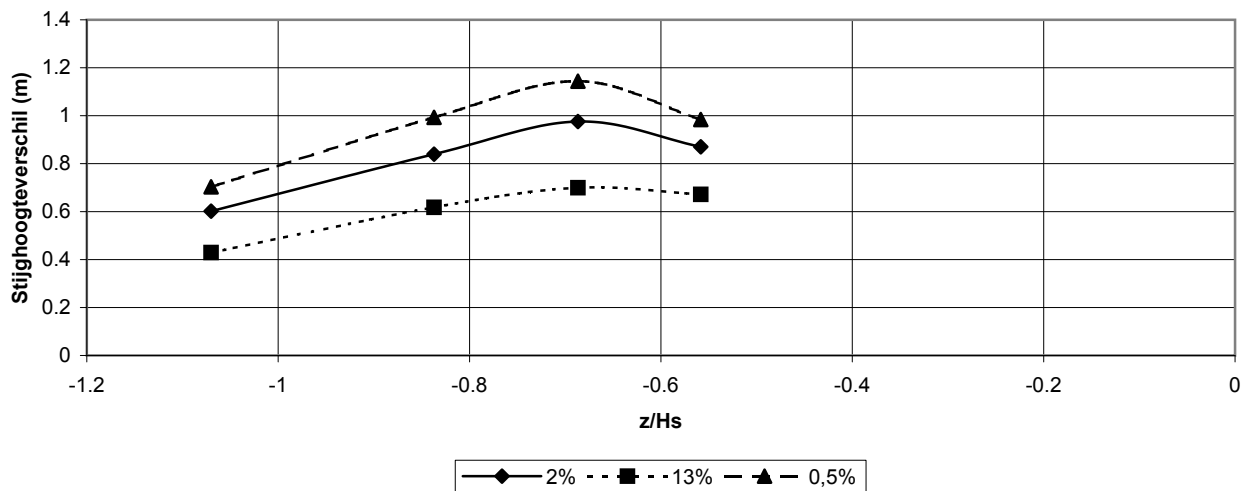
gefilterd stijghoogteverschil Proef P18 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil Proef P19 per overschrijdingsfrequentie

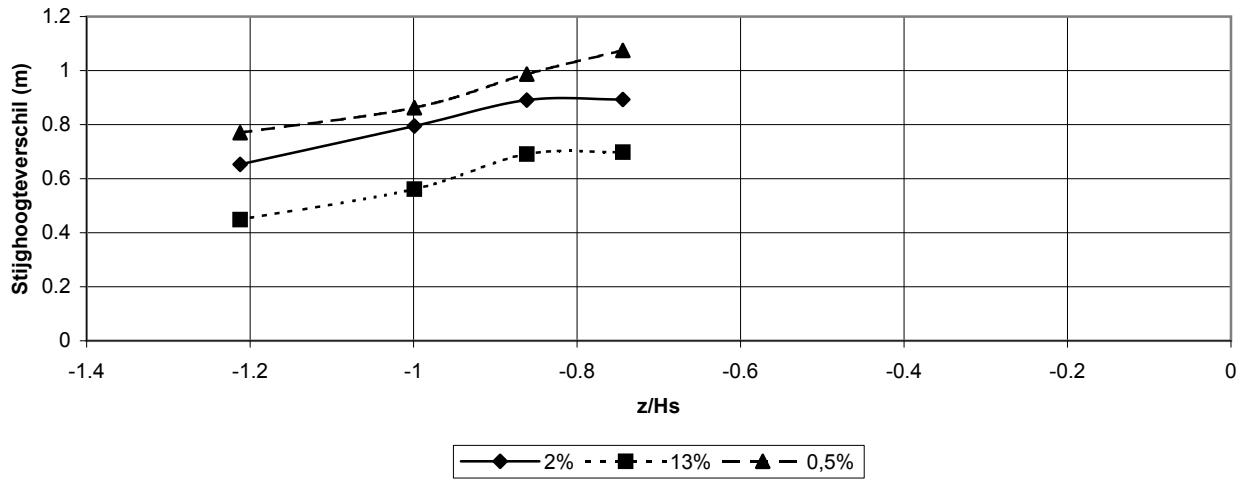


gefilterd stijghoogteverschil Proef P20 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil per drukopnemerpaar  
als functie van de locatie

gefilterd stijghoogteverschil Proef P21 per overschrijdingsfrequentie



gefilterd stijghoogteverschil per drukopnemerpaar  
als functie van de locatie



## D Beweging van de toplaag



## D Beweging van de toplaag

### D.1 Inleiding

De bewegingen van de toplaag zijn gemeten omdat deze de voorbode zijn van een degeneratieproces dat uiteindelijk leidt tot schade aan de bekleding. Door de bewegingen kunnen scheuren ontstaan en kan het filter migreren. In deze bijlage wordt de aandacht vooral gericht op de op- en neergaande beweging van de toplaag in afzonderlijke golven.

Voor het meten van de verplaatsingen van de toplaag zijn diverse instrumenten gebruikt:

- profielvolger, waarmee na elke proef langs 3 of 5 raaien de hoogte van het taludoppervlak is gemeten
- verplaatsingsopnemers (VPL), die de ‘snelle’ verplaatsingen van de toplaag binnen een golf meten (iedere 0,08 s)
- hoogtemeters, die de geleidelijke ontwikkeling van de cumulatieve verplaatsing meten

De cumulatieve verplaatsing van de toplaag is de verplaatsing die in de loop der tijd ontstaat en niet meer verdwijnt. Naast deze geleidelijke ontwikkeling van de vervorming, is er een op- en neergaande beweging van de toplaag tijdens afzonderlijke golven. Het is gebleken dat vrijwel elke golf de toplaag een paar mm omhoog beweegt, waarna hij weer naar beneden zakt in zijn oorspronkelijke positie. Soms blijft een deel van deze tijdelijke beweging bestaan, en draagt daarmee bij aan de grootte van de cumulatieve verplaatsing.

Opgemerkt wordt dat de beweging volgens de verplaatsingsopnemers haaks op het talud gedefinieerd is, terwijl de verplaatsing als gevolg van de profielvolger verticaal is gedefinieerd. In deze analyse wordt dit verschil verwaarloosd, omdat dit slechts een paar procent is en daardoor wegvalt ten opzichte van de onnauwkeurigheid van de metingen.

In deze bijlage zijn eerst de resultaten van de verplaatsingsopnemers gerapporteerd. In paragraaf D.5 komen de hoogtemeters aan bod. De resultaten van de profielvolger zijn gerapporteerd in paragraaf 5.4.1.

### D.2 Verplaatsingsopnemers

De verplaatsingen zijn gemeten met zogenaamde naderingssensors. Dit zijn sensors die de verplaatsing van een plaatje metaal meten door middel van het magnetisch veld.

De naderingssensoren hadden een bereik van 50 mm en waren van het type BES MKK 050.19 S4 van PROXITRON. Deze instrumenten hebben een meetfrequentie van 12,5 Hz, hetgeen betekent dat elke 0,08 s een nieuwe waarde van de verplaatsing wordt bepaald, die dan vervolgens gedurende 0,08 s constant blijft.

Deze naderingssensors waren geplaatst in het filter op de locaties zoals vermeld in bijlage A.3 en A.4 en de figuren B.2 en B.3, genummerd van VPL3 tot en met VPL9. Ze meten de verplaatsing van de toplaag.

Tijdens serie 2 zijn 2 instrumenten uitgevallen, namelijk de verplaatsingsopnemers 6 en 7. Deze zijn door het te goed ingieten aan de toplaag vastgeplakt komen te zitten. Deze vertonen door de proeven heen dus geen beweging. Zie ook bijlage A.1.

De nauwkeurigheid van de instrumenten was zeer hoog zolang de toplaag haaks op het instrument omhoog beweegt:  $\pm 0,1$  mm. Als het instrument, of de toplaag, tevens parallel aan het taludoppervlak beweegt dan ontstaat er echter een fout in de meting. Gedurende de eerste 3 à 5 cm van de verplaatsing parallel aan het taludoppervlak is de fout nog betrekkelijk klein: een paar mm. Daarna zal fout ongeveer eenderde zijn van de optredende verplaatsing parallel aan het taludoppervlak.

### D.3 Beweging per golf tijdens de proeven

In principe worden er twee soorten bewegingen geregistreerd:

1. Een op- en neergaande beweging per golf;
2. restverplaatsing die gedurende meerdere golven of proeven blijft bestaan.

Proef	$Y_{13\%}$ (mm)	$Y_{5\%}$ (mm)	$Y_{2\%}$ (mm)	$Y_{0,5\%}$ (mm)	$\Sigma Y_{VPL} / Y_{profiler}$ (-)
P00	13	15	16	20	56
P01	7	9	10	11	476
P02	3	5	7	8	147
P03	8	11	14	16	115
P04	2	5	7	11	28
P05	6	21	25	34	5
P11	0	0	1	1	4
P11B	0	0	0	1	29
P12	8	9	11	13	
P12A	0	0	0	0	0
P12B	0	0	0	0	96
P13	2	2	2	3	104
P14	7	9	10	11	0
P14B	0	0	0	0	14
P15	11	14	18	24	11
P16	9	13	18	29	7
P17	0	1	2	3	11
P18	1	3	4	5	288
P19	5	6	6	7	132
P20	6	6	7	7	45
P21	11	13	18	21	22
P22	2	8	16	22	1
P23	1	3	5	9	56
P23a	0	1	3	9	476

Tabel D.3-1: Overschrijdingsfrequenties voor de verplaatsingen binnen een golf per proef

De verplaatsingen,  $Y$ , per golf zijn berekend door de hoogste waarde van de verplaatsing binnen de golf te nemen en hiervan de beginwaarde van de verplaatsing per golf af te trekken:  $[Y_{\max} - Y_{\text{begin}}]_{\text{in de golf}}$ . Hierdoor is de maximale bewegingsafstand bepaald, die ter plaatse van het instrument is opgetreden binnen die golf. Vervolgens is de grootste waarde



per golf genomen om te gebruiken voor een overschrijdingskromme van de verplaatsingen per proef.

De overschrijdingswaarden voor die verplaatsingen per golf, onafhankelijk van de locatie waar die optreedt, zijn in tabel D.3.1 weergegeven. In de tabel is als laatste kolom de verhouding toegevoegd van de som van alle verplaatsingen, gedeeld door de grootste verplaatsing die in de betreffende proef is opgetreden in raai 2. Deze waarde zou aan kunnen sluiten op het stabiliteit criterium in Zsteen.

De overschrijdingskrommen van de proeven P01, P04, P11b en P16, zijn weergegeven in de figuren D.6.1 tot en met D.6.4 aan het einde van deze bijlage.

## D.4 Restverplaatsingen tijdens de proeven

Naast de hiervoor genoemde verplaatsingen per golf zijn er ook de restverplaatsingen. De verplaatsingen per golf zijn als het ware de tijdelijke verplaatsingen. Als de steen een tijdelijke verplaatsingen omhoog krijgt zal deze ook weer terug komen op zijn oude locatie. Bij de restverplaatsingen is dat niet zo. Dit zijn verplaatsingen die meerdere golven of zelfs proeven aanwezig zijn. Het is gedefinieerd als het verschil tussen de waarde van de verplaatsing aan het begin van de proef en de kleinste verplaatsing tijdens de laatste golf aan het eind van de proef:  $[Y_{\min, \text{ laatste golf}} - Y_{\text{begin}}]_{\text{in de proef}}$ . Dit levert per verplaatsingsopnemer een waarde voor de restverplaatsing.

Uit een vergelijking van de gemeten verplaatsingen volgens de verplaatsingsopnemers met de resultaten van de profielvolger blijkt dat de verplaatsingen niet goed overeenkomen. In tabel D.4.1 zijn de resultaten van de verplaatsingsopnemers, die een duidelijke restverplaatsing hebben gemeten, vergeleken met de resultaten van de profielvolger op de raai die vlak langs de rij met de verplaatsingsopnemers loopt. In de tabel is te zien dat de waarden van de profielvolger en de VPL meestal sterk verschillend zijn. Meestal zijn de waarden van de VPL veel kleiner dan de waarden van de profielvolger. Het is denkbaar dat bijvoorbeeld ten tijde van de migratie van het filter de VPL mee omhoog gekomen is.

Een ander voorbeeld is VPL 8 in de eerste proevenserie. Deze verplaatsingsopnemer zit op ongeveer 12,5 m van de teen. Hier is een behoorlijke verplaatsing opgetreden volgens de verplaatsingsopnemer, in tegenstelling tot de profielvolger. Dit kan verklaart worden door een zijwaartse verplaatsing van de sensor.

Verder zijn er negatieve verplaatsingen gemeten met de profielvolger (toplaag ging naar beneden), terwijl daar met de verplaatsingsopnemers toch een positieve verplaatsing is gemeten.

De oorzaak van deze verschillen is waarschijnlijk het feit dat de verplaatsingsopnemers onvoldoende vastzaten en zijn gaan meebewegen met het migrerende filter. Daardoor zijn de gemeten restverplaatsingen onbruikbaar.

Dit probleem heeft zich waarschijnlijk niet voorgedaan bij de verplaatsingen binnen de golf. Er is dan sprake van een op- en neergaande beweging in een tijdsbestek van orde 1 s. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de verplaatsingsopnemer tijdens deze beweging ook op en neer of heen en weer is bewogen.

proef	VPL nr	$Y_{VPL}$ (mm)	$Y_{\text{profiler}}$ (mm)
P03	5	11	11
P03	6	5	33
P03	7	12	-11
P03	8	33	8
P04	7	4	-39
P04	8	11	0
P14	9	3	-10
P15	8	21	3
P15	9	42	-5
P16	8	43	50
P17	3	8	11
P18	3	7	11
P19	3	5	0
P20	3	2	5
P21	3	25	94
P21	4	25	39
P21	5	9	25
P22	9	43	-17
P23a	5	2	28

Tabel D.4.1, Restverplaatsing tijdens de proef, gemeten met de verplaatsingsopnemers en met de profiler

## D.5 Hoogtemetingen

Op drie locaties waren hoogtemeters (HGM) op het talud aangebracht tijdens serie 2 (proef P11 t/m P21), vlakbij raai 1 van de profielvolger. De instrumenten waren bedoeld om de wat grotere bewegingen van het taludoppervlak tijdens een proef te volgen, die samenhangen met het mechanisme afschuiving. Gezien het feit dat er geen afschuiving is opgetreden, zijn ze ook bruikbaar voor het volgen van de toplaagbewegingen. Kleine bewegingen zijn echter niet nauwkeurig met dit meetprincipe te meten, omdat het wat gevoelig is voor temperatuurinvloeden. Daardoor kunnen er afwijkingen van orde 0,5 à 1 cm ontstaan. De instrumenten reageren ook niet snel, waardoor op- en neergaande verplaatsingen die zich voltrekken in een paar seconden hiermee niet kunnen worden gemeten. Hierdoor zijn deze instrumenten voornamelijk relevant voor de restverplaatsing van de toplaag.

De coördinaten van HGM1 t/m HGM3 waren respectievelijk:  $(x; Z) = (7,277; 2,079)$ ,  $(10,455; 2,987)$  en  $(14,154; 4,044)$ .

Deze drie instrumenten zaten zo ver uit elkaar dat er meestal maar één in de zone met verplaatsingen van de toplaag zat. Daardoor bieden ze relatief weinig extra informatie.

Het principe dat tijdens de proeven gebruikt is voor de hoogtemeting is hiervoor gebruikt tijdens veldproeven voor ingegoten bekledingen langs de Westerschelde (Nienhuis en Klein Breteler, 2002). Het principe berust op het meten van de hydrostatische druk van water in een buis. Hiertoe was een buis bevestigd die langs de gootwand naar beneden liep en daarna verder over het talud naar boven. Op een bepaald punt aan de gootwand wordt de referentiedruk gemeten en op het talud wordt de druk in een drietal punten gemeten. Alle drukken worden gemeten ten opzichte van de atmosferische druk.

Met de volgende formule is de hoogte van de punten op het talud te bepalen:

$$z_t = \frac{(p_r - p_t)}{\rho g} + z_r$$

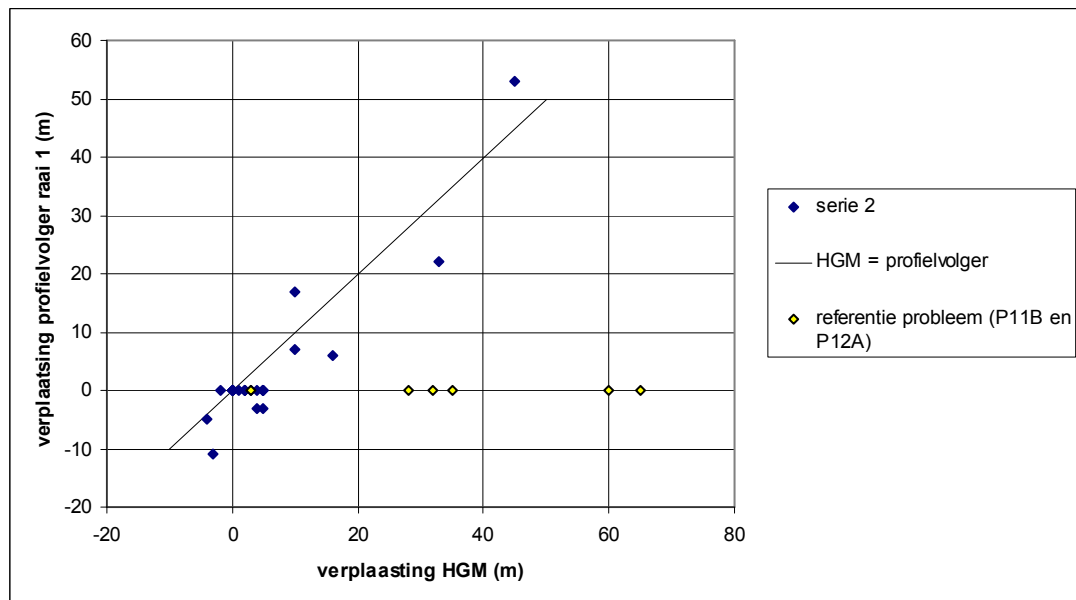
Waarin:

$z_t$  = de hoogte van het talud ter plaatse van de beschouwde drukopnemer (m);

$z_r$  = de hoogte van de referentie-drukopnemer (m);

$p_t$  = de gemeten druk van de beschouwde drukopnemer ten opzichte van de atmosferische druk (Pa);

$p_r$  = de gemeten druk van de referentie-drukopnemer ten opzichte van de atmosferische druk (Pa).



Figuur D.5.1, vergelijking tussen de verplaatsing volgens de profielvolger en die volgens de HGM

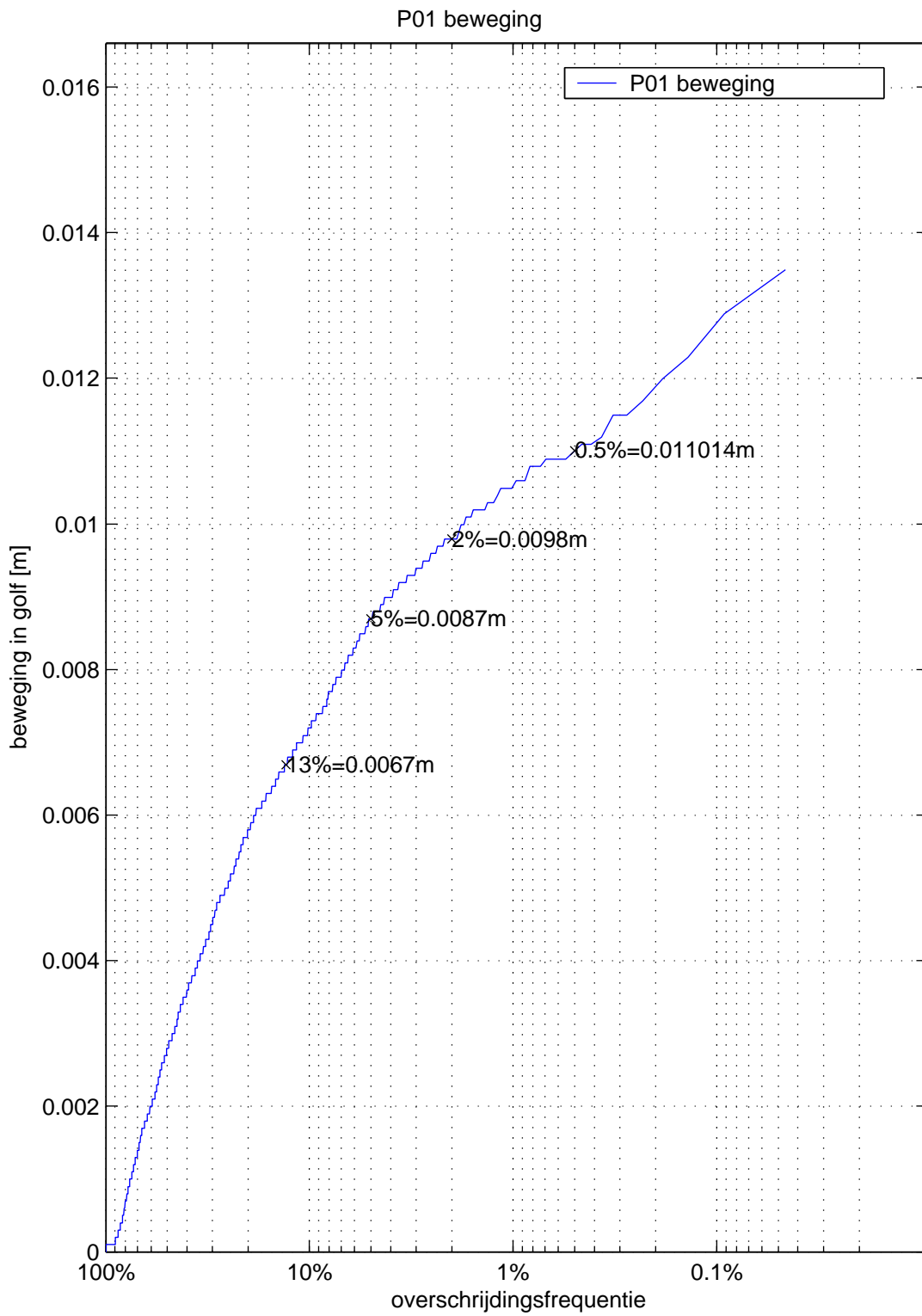
Er is gebleken dat de referentiedrukopnemer in het begin van sommige proeven wat verloopt in de tijd. Dit is waarschijnlijk een gevolg van een temperatuursverandering. Teneinde dit niet door te laten werken in de metingen, is als referentie niet de actuele referentiedruk aangehouden, maar het gemiddelde van de referentiedrukmeter over de hele proef.

In de figuren D.7.1 tot en met D.7.4 zijn de tijdseries van de hoogtemeters tijdens enkele interessante proeven weergegeven. De tijdseries zijn tot stand gekomen door een voortschrijdend gemiddelde te nemen per golf.

In deze figuren zijn de restverplaatsingen van de top laag goed te zien. Tijdens proef P12, P14 en P15 zat HGM2 het dichtst bij het zwaarst belaste gebied en geeft ook de grootste restverplaatsing. Maar ook HGM3 zat er dicht in de buurt, vooral tijdens P15.

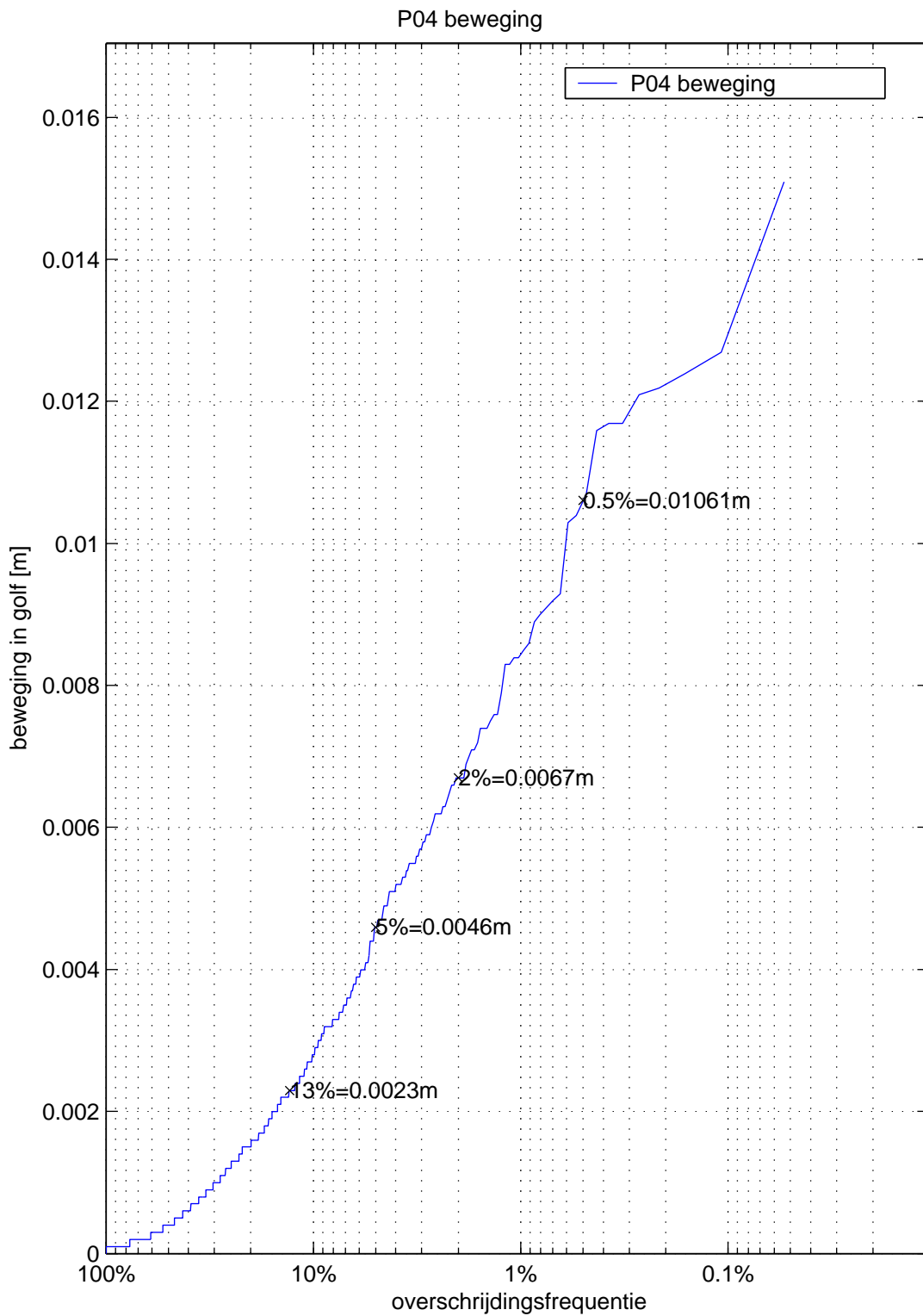
Tijdens proef P16 zat HGM3 in het zwaarst belaste gebied.

In figuur D.5.1 is een vergelijking gegeven tussen de metingen volgens de profielvolger en die volgens de hoogtemeters. Het blijkt dat deze metingen vrij goed correleren. Alleen tijdens proef P11A en P12B waren er problemen met de referentiedrukopnemer en zijn de resultaten dus onbetrouwbaar.

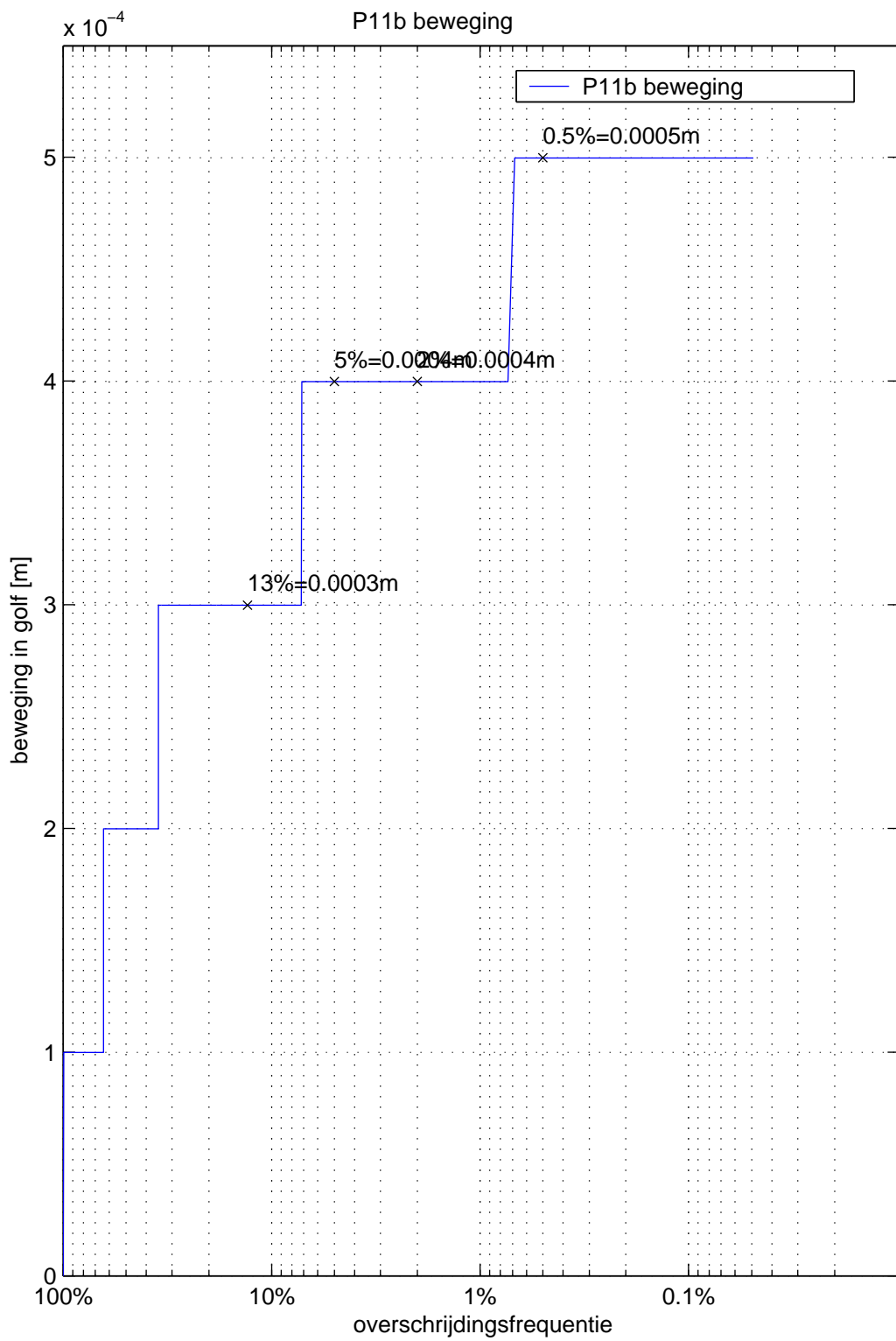


Beweging tijdens afzonderlijke golven tijdens P01

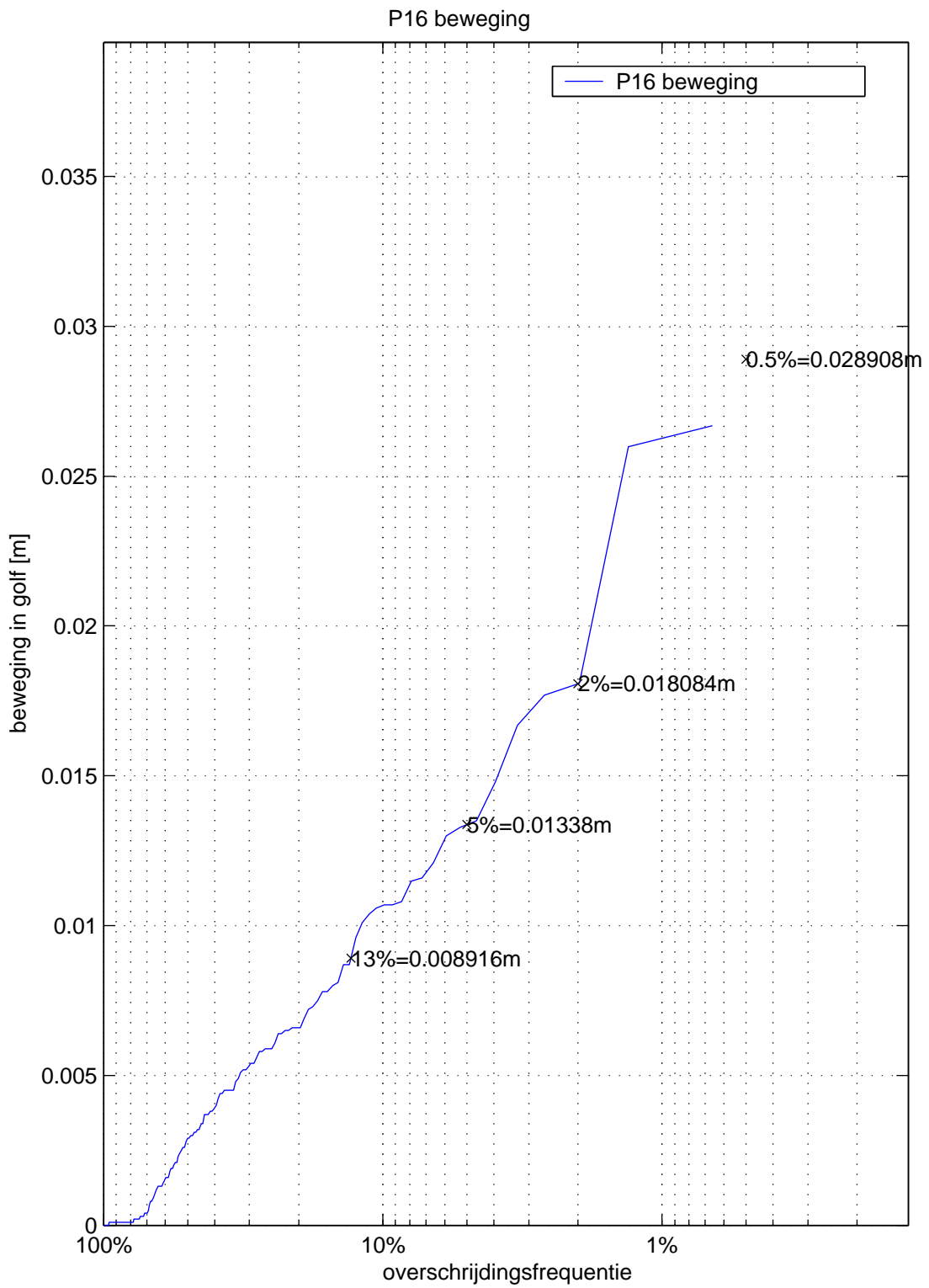
P01



Beweging tijdens afzonderlijke proeven tijdens P04	P04	
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4635	Fig. D.6.2



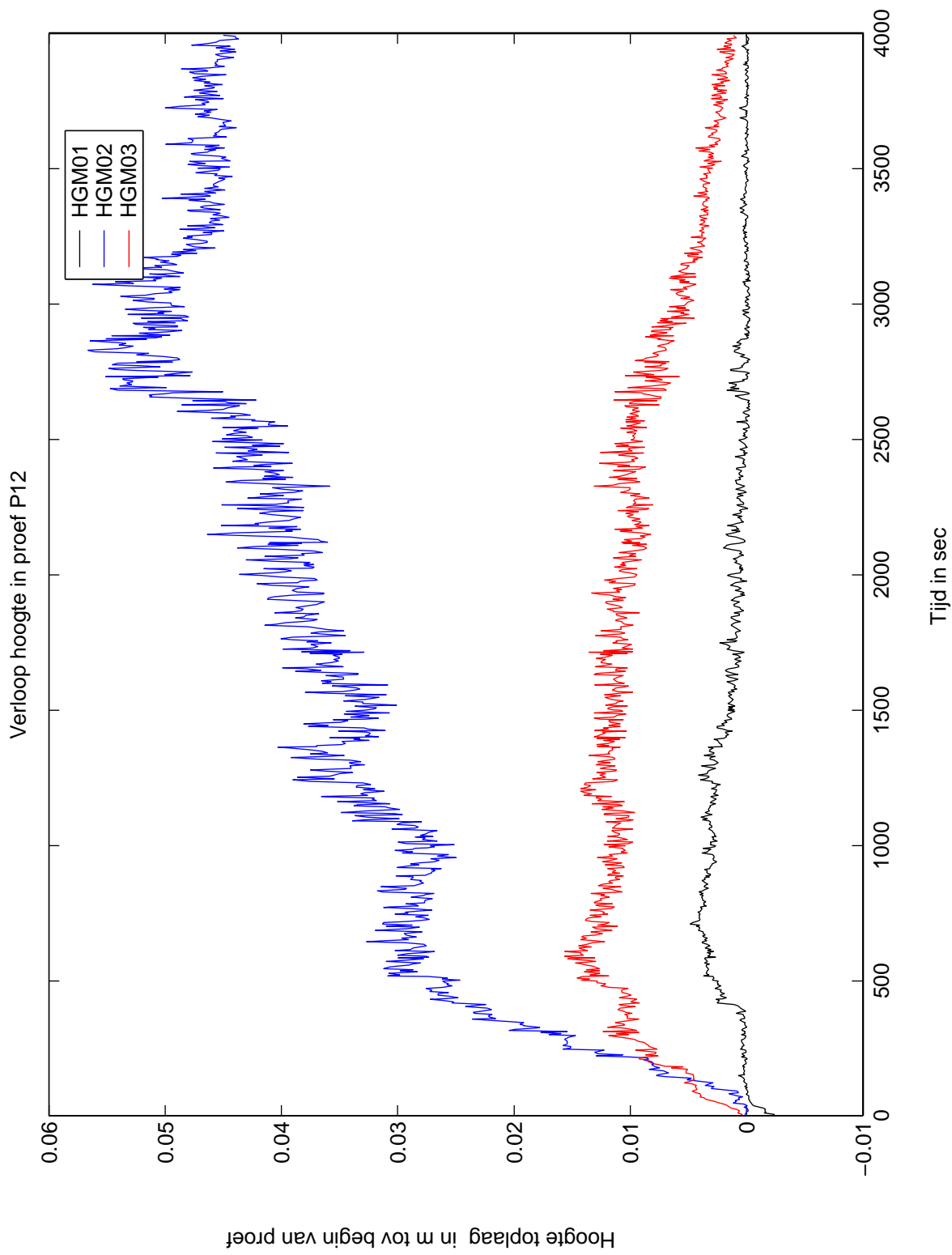
Beweging tijdens afzonderlijke golven in P11b	P11b	
<b>WL   DELFT HYDRAULICS</b>	H4635	Fig. D.6.3



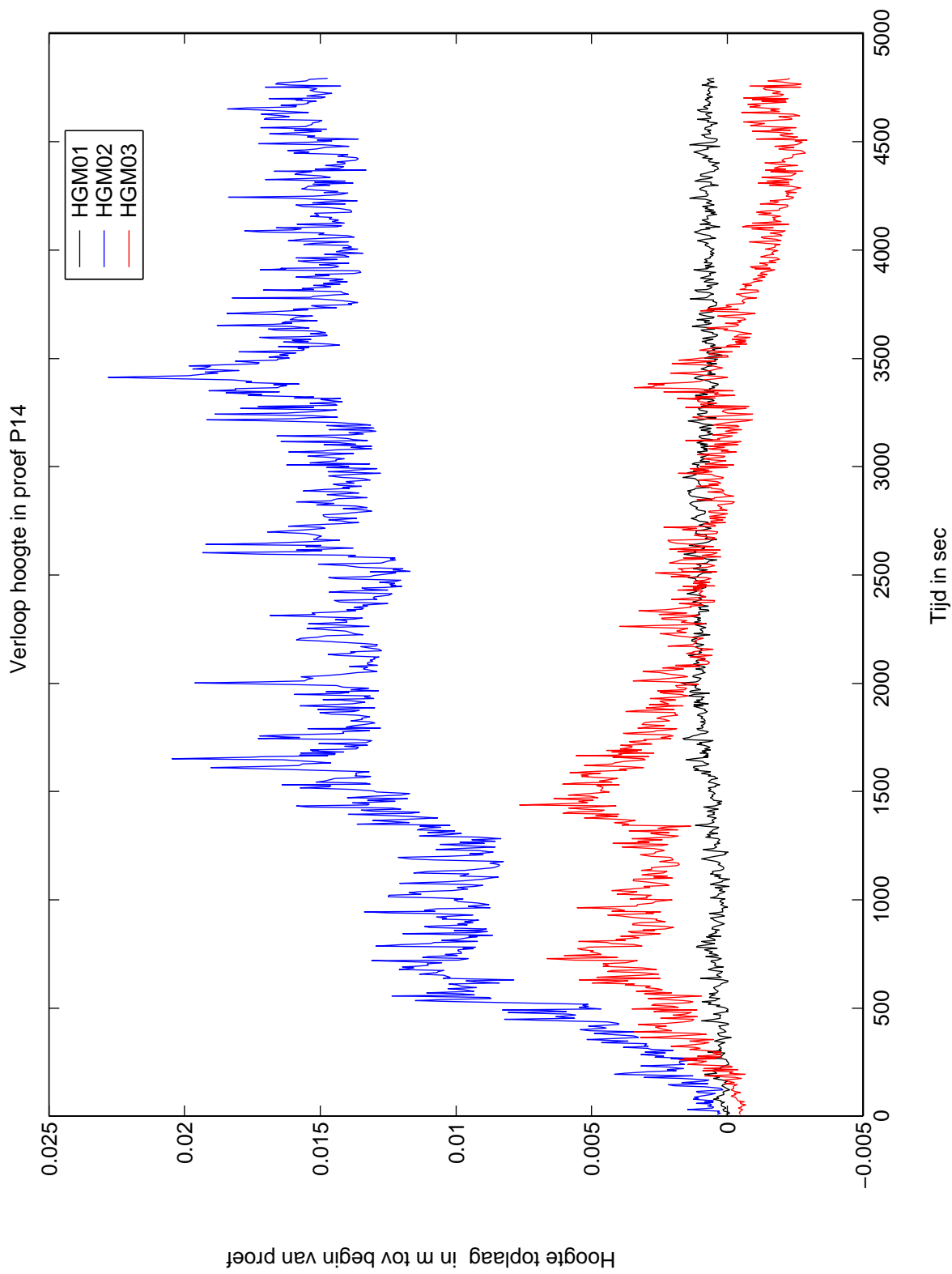
Beweging tijdens afzonderlijke golven P16

P16

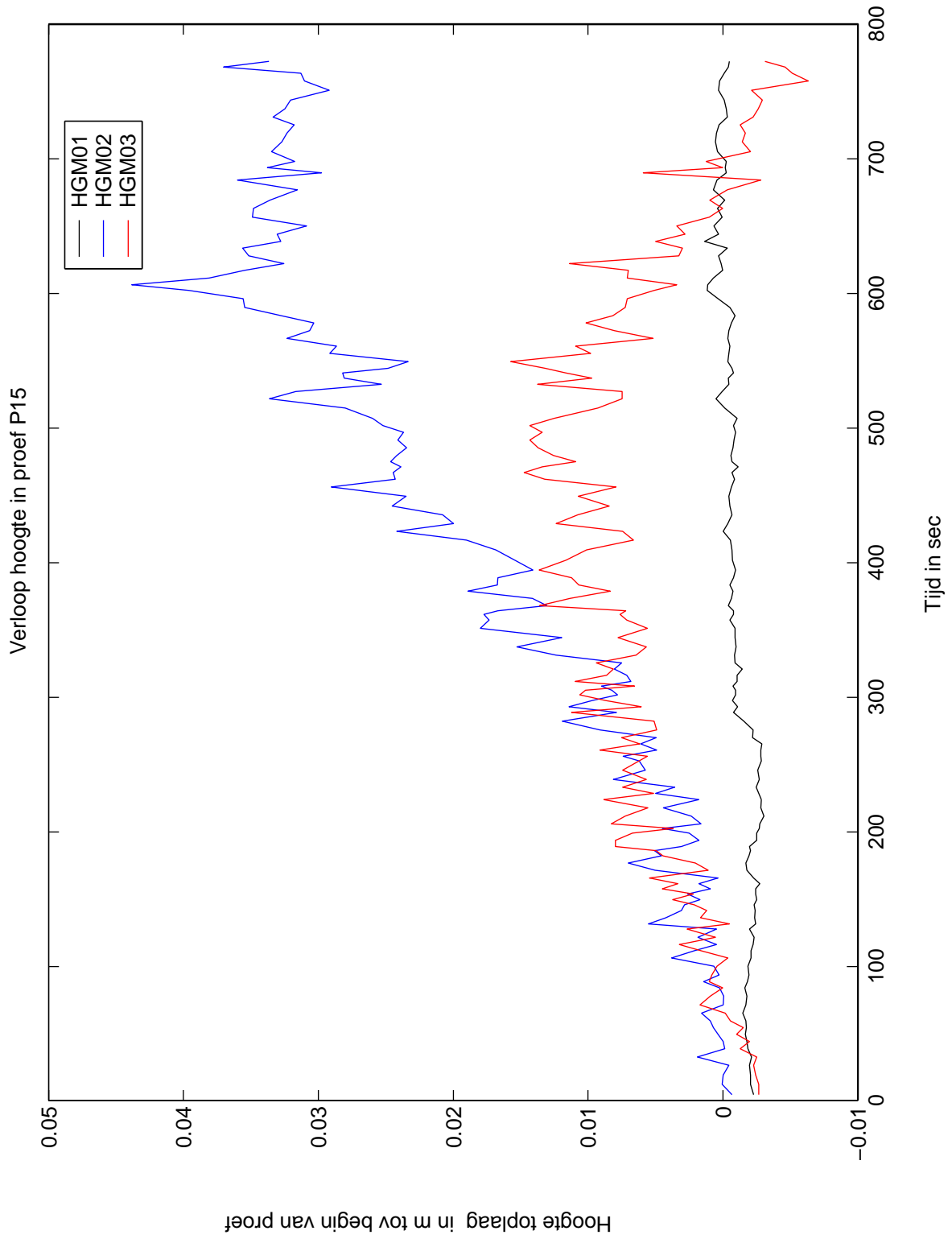




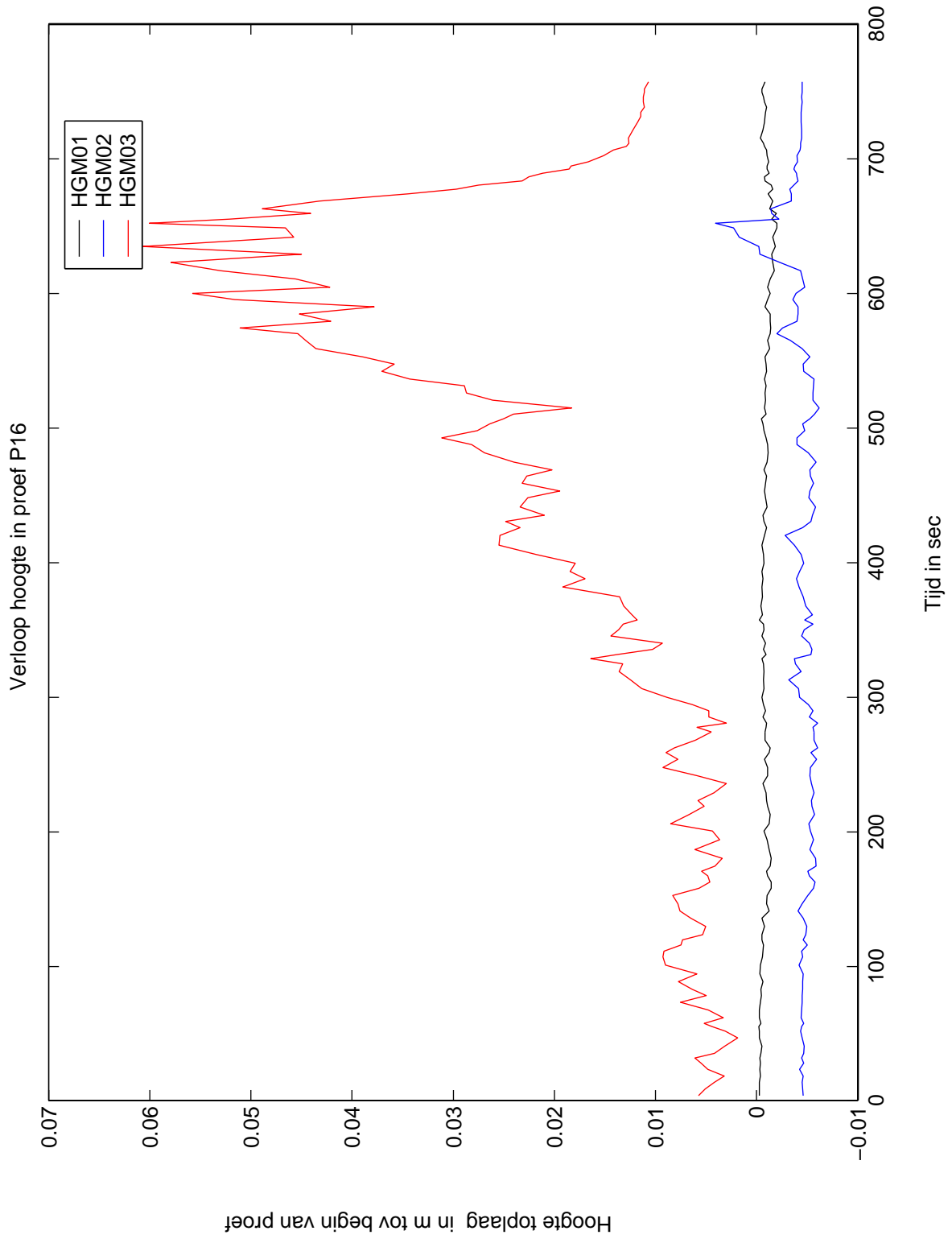
Tijdsree HGMs tijdens P12	P12	
WL   DELFT HYDRAULICS	H4635	D.7.1



Tijdsere HGMs tijdens P14	P14	
WL   DELFT HYDRAULICS	H4635	D.7.2



Tijdserie HGMs tijdens P15	P15	
WL   DELFT HYDRAULICS	H4635	D.7.3



Tijdserie HGMs tijdens P16	P16	
WL   DELFT HYDRAULICS	H4635	D.7.4

E Relatie tussen beweging en stijghoogte op  
toplaag en in filter



## **E Relatie tussen beweging en stijghoogte op toplaag en in filter**

### **E.1 Inleiding**

Om de relatie tussen de stijghoogteverschillen en de verplaatsingen van de toplaag te onderzoeken, zijn er een aantal momenten gekozen om te analyseren. De momenten zijn zoveel mogelijk gekozen in de eerste en laatste proeven van de verschillende meetseries. Deze proeven zijn gekozen omdat aan het begin van de serie het talud nog helemaal intact was. Aan het einde van de serie was er een stuk minder samenhang in de bekleding en deze keuze maakt het mogelijk om het verschil te zien tussen het begin en het eind van de series.

Voor serie 1 zijn de proeven P01 en P04 gekozen. P01 is geselecteerd omdat dit de eerste proef was met een meetfrequentie van 200 Hz en P04 is gekozen omdat er tijdens P05 geen drukopnemers meer aanwezig waren.

In serie 2 is er gekozen voor P11b en P16. P11b is eigenlijk een verlenging van proef P11 en kan daarom gezien worden als keuze voor een tijdstip later in proef P11. P16 is wederom een keuze voor de laatste proef in serie 2 waarin alle drukopnemers nog aanwezig waren. De latere proeven hebben minder drukopnemers in de belaste zone van het talud en vanaf P21 waren er helemaal geen drukopnemers meer aanwezig.

In deze analyse is er ook gebruikgemaakt van de virtuele drukopnemers die verkregen zijn door het interpoleren van de druk in het filter tussen de drukopnemers. Dit is gedaan om een vollediger beeld te krijgen van de stijghoogteverdeling.

In elke proef zijn er twee momenten geselecteerd voor de analyse. Het eerste tijdstip is gekozen op het moment dat het stijghoogteverschil gelijk is aan  $\phi_w 2\%$ . Als tweede is de golf gekozen die de grootste verplaatsing veroorzaakt.

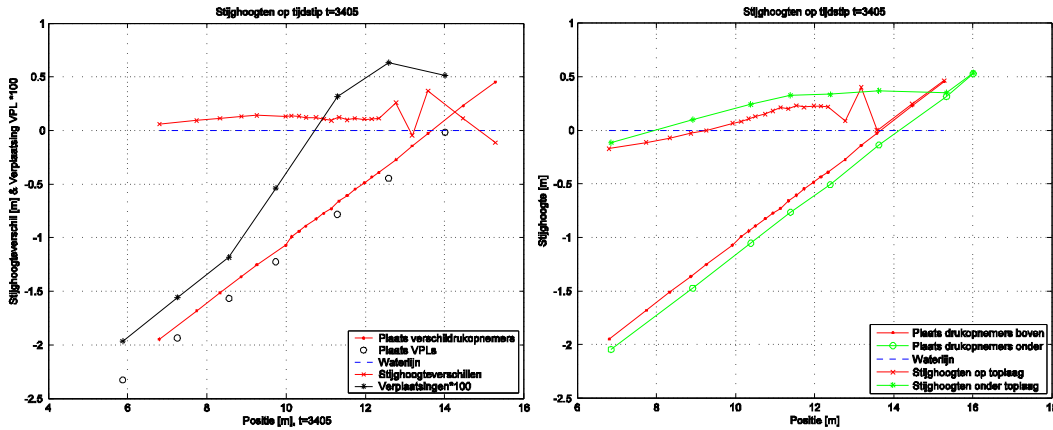
In de figuren in deze bijlage is de totale verplaatsing weergegeven vermenigvuldigt met 100 zodat de verplaatsingen goed zichtbaar worden op de schaal die nodig is om het gehele talud te overzien. Verder zijn de verplaatsingsopnemers die in de betreffende proef buiten het meetbereik gekomen zijn, weggelaten uit de figuren.

### **E.2 Proef P01**

Voor het analyseren van het bezwijkmechanisme zijn een aantal markante momenten tijdens de gekozen golven geselecteerd en is daarvan het stijghoogteverloop op de toplaag en in het filter, het verloop van de stijghoogteverschillen en de verplaatsing van de toplaag weergegeven.

#### **E.2.1 Golf met maximale verplaatsing**

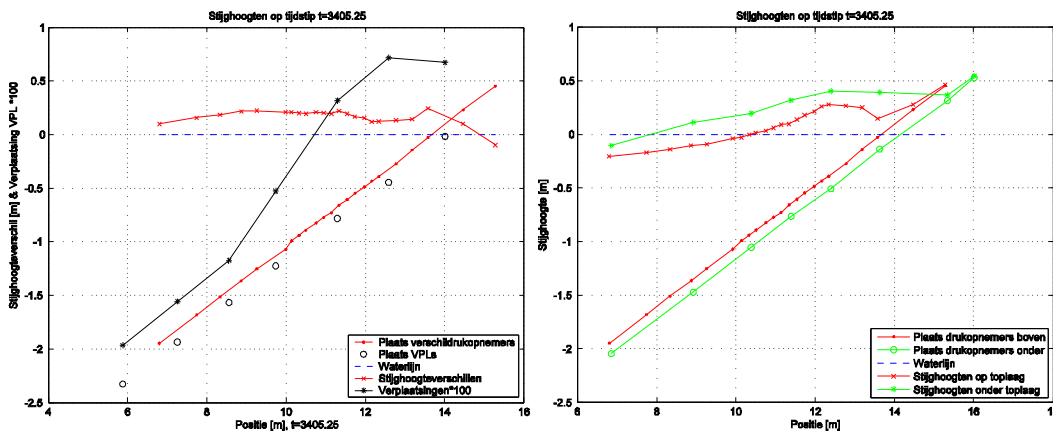
De tijd waarin zich dit afspeelt is tussen  $t = 3405,0$  en  $t = 3409,9$  s.



Figuur E.2-1, Beweging en stijghoogten in P01 op t = 3405,0 s.

In Figuur E.2-1 is links het stijghoogteverschil en de verplaatsing van de toplaag gegeven op het moment t = 3405,00 s. In de rechter figuur staat de stijghoogte op het talud en in het filter. In beide gevallen gaat het om een momentopname van het gefilterde stijghoogteverloop. Het stijghoogteverschil op basis van de rechter figuur (verschil tussen de gefilterde stijghoogte op de toplaag en in het filter) kan iets afwijken van het stijghoogteverschil in de linker figuur. Dit komt omdat er een verschil zit tussen eerst filteren en dan het verschil bepalen, of eerst het verschil bepalen en dan filteren.

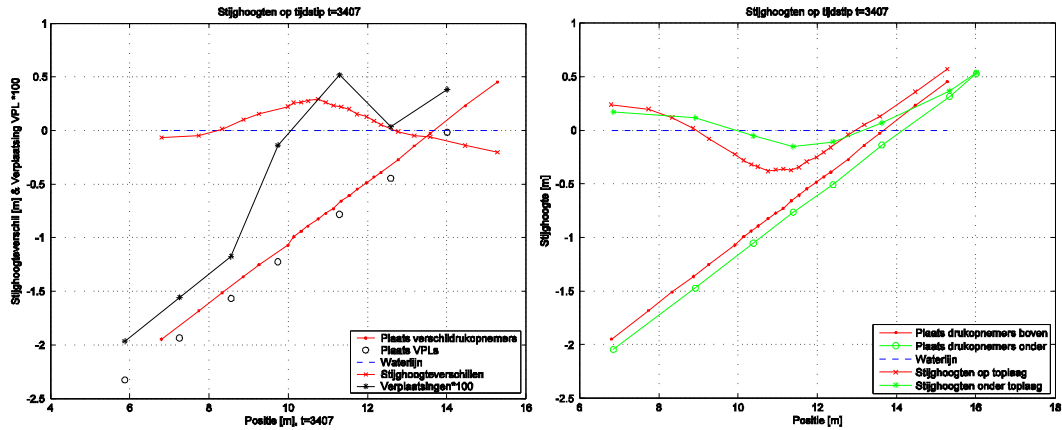
In Figuur E.2-1 is het begin van de golfoploop te zien, met wat restanten van de golfklap. De freatische lijn in het filter is opmerkelijk hoog, namelijk zo'n 30 à 40 cm hoger dan de buitenwaterstand. Op x = 12,5 m en x = 14 m laten de VPL's een opwaartse beweging zien waarbij de laatste omhoog beweegt.



Figuur E.2-2, Beweging en stijghoogten in P01 op t = 3405,25 s.

Een moment later is in Figuur E.2-2 te zien dat het water op het talud verder oploopt. Tevens is te zien dat de stijghoogte in het filter overal hoger is dan de stijghoogte op de toplaag. Hierdoor is er een stijghoogteverschil van zo'n 20 cm. Dit is nog niet genoeg om de toplaag op te lichten, omdat het eigengewicht van de toplaag  $\Delta D \cos \alpha = 0,24 \text{ m}$ . In de zone  $7 < x < 12 \text{ m}$  is er een gradiënt van de stijghoogte in het filter die duidt op een stroming richting de teen.

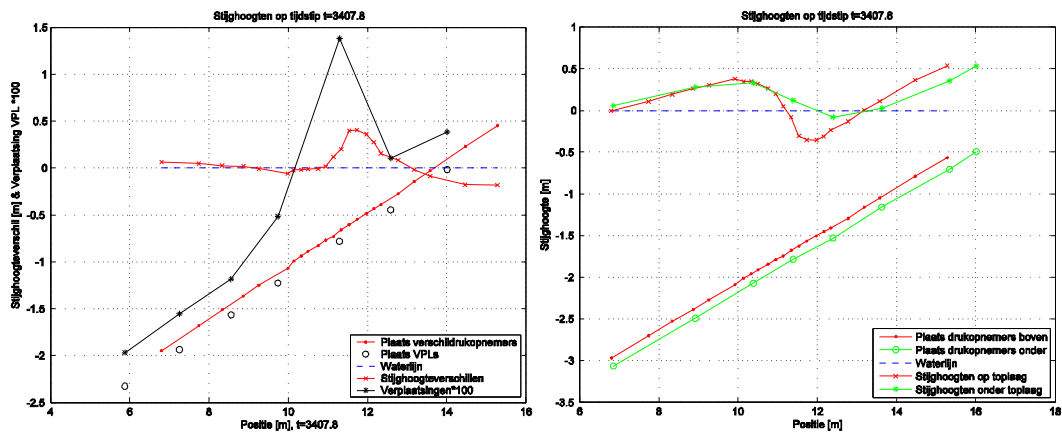




Figuur E.2-3, Beweging en stijghoogten in P01 op t = 3407,0 s.

Op het moment  $t = 3407,0$  s in Figuur E.2-3 is goed te zien dat de golf eraan komt. Het golffront begint zich op te bouwen en waar de stijghoogte op de toplaag een minimum heeft, is er sprake van een groot stijghoogteverschil dat groter is dan het eigengewicht. De toplaag op  $x = 11,2$  m gaat op dit moment net omhoog en zal aan snelheid winnen zolang de golf er overheen loopt. In de tijd tussen deze figuur en Figuur E.2-2 is de verplaatsing op  $x = 9,7$  m en  $x = 11,2$  m toegenomen en op  $x = 12,5$  m afgenomen. Het lijkt alsof het water onder de toplaag ter plaatse van  $x = 12,5$  m verplaatst is naar de zone  $9,7 < x < 11,2$  m. Als op de ene locatie de toplaag omlaag gaat en op de andere tegelijkertijd omhoog, dan wordt de beweging niet gehinderd door de verhinderde toestroming. Het proces van de verhinderde toestroming is toegelicht in paragraaf 5.3.1 bij figuur 5.14.

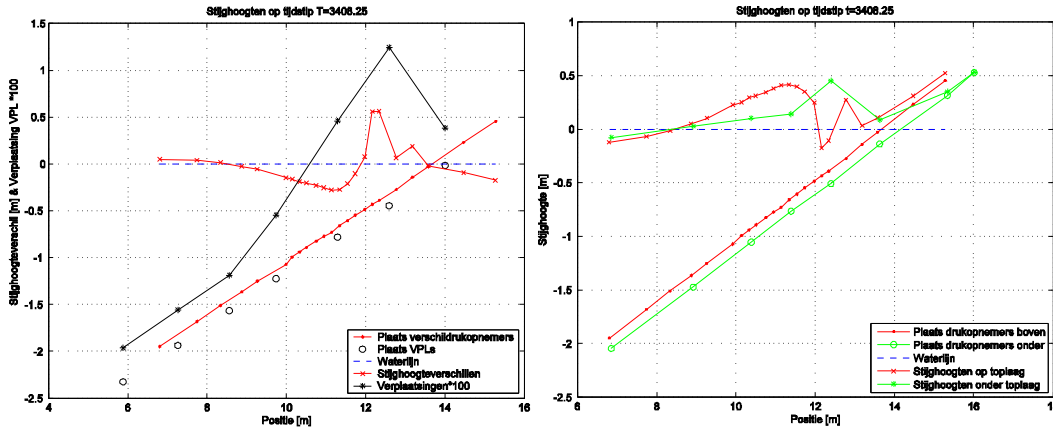
In Figuur E.2-4 is het golffront (rechteraafbeelding) veel steiler geworden en is het grote stijghoogteverschil net over de VPL op  $x = 11,2$  m gegaan. Dit heeft de grootste verplaatsing op deze locatie tot gevolg gehad. Goed is te zien dat het stijghoogteverschil over het hoogtepunt heen is ter plaatse van de betreffende VPL. Zoals te verwachten is, gaat de toplaag daarnaast (op  $x = 12,5$  m) hierna omhoog en de toplaag op  $x = 11,2$  m omlaag.



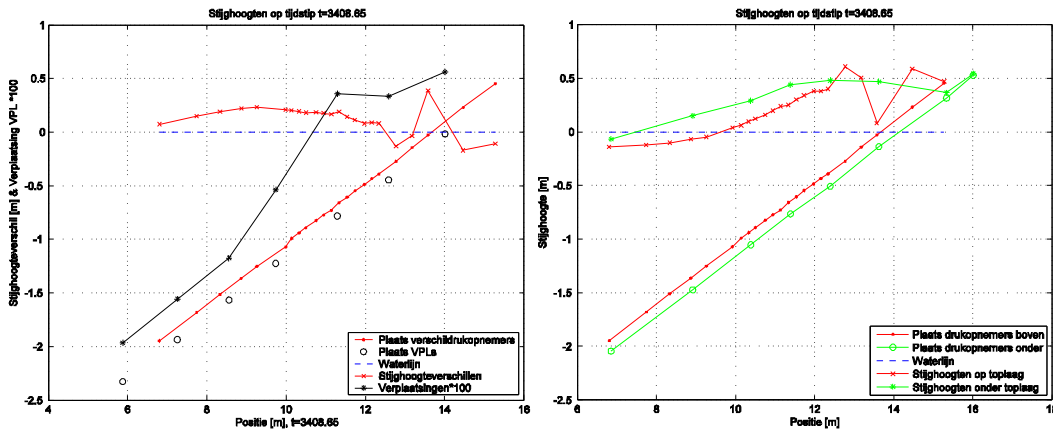
Figuur E.2-4, Beweging en stijghoogten in P01 op t = 3407,80 s.

In Figuur E.2-5 lijkt de toplaag op  $x = 11,3$  m tijdelijk op een vaste punt te zitten. Het stijghoogteverschil is hier overduidelijk negatief, maar toch blijft de betreffende VPL tijdelijk aangeven dat er geen verplaatsing meer naar beneden is. De toplaag bij de VPL daarboven, op  $x = 12,5$  m blijft hangen tot  $t = 3408,40$  s en gaat daarna pas weer naar

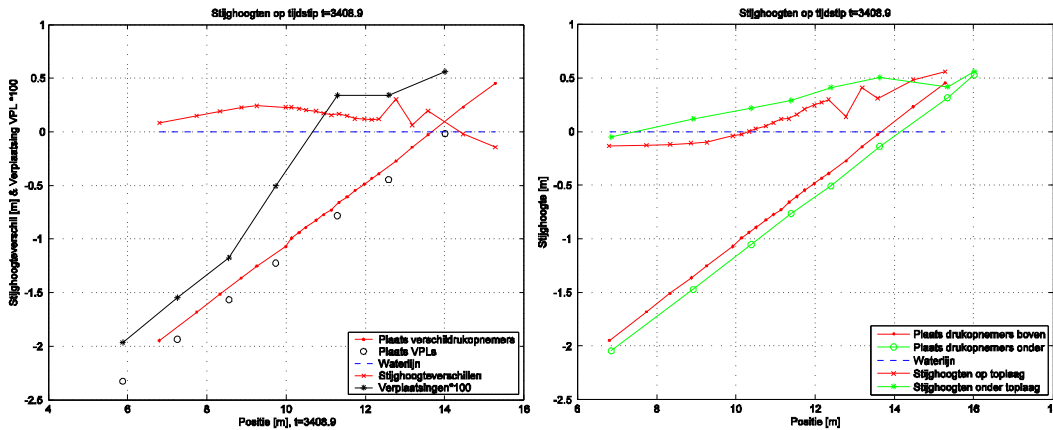
beneden. Later gaat ook de top laag op  $x = 11,3$  m nog wat naar beneden. Wellicht was er eerst nog wat migratie van filtermateriaal nodig voordat deze beweging kon plaatsvinden. Direct nadat het golffront over is gekomen verandert het stijghoogteverschil van teken en wordt de top laag weer naar beneden gedruwd. Hierdoor zal ter plaatse van de voet van het golffront de top laag omhoog kunnen bewegen en tegelijkertijd onder de top van het golffront omlaag, zodat de beweging niet gehinderd wordt door de verhinderde toestroming.



Figuur E.2-5, Beweging en stijghoogten in P01 op  $t = 3408,25$  s.



Figuur E.2-6, Beweging en stijghoogten in P01 op  $t = 3408,65$  s.



Figuur E.2-7, Beweging en stijghoogten in P01 op  $t = 3408,90$  s.

Rondom het moment dat weergegeven is in Figuur E.2-6 staan de stijghoogten op de toplaag en in het filter vrij behoorlijk op en neer te slingeren. Hierbij blijft het stijghoogteverschil ongeveer constant en gaat de toplaag hard op en neer. Er wordt hier een maximale snelheid bereikt van ongeveer 0,023 m/s. Verder kan gemeld worden dat de golfklap op dit tijdstip net geweest is, het precieze tijdstip daarvan is 3408,33 s.

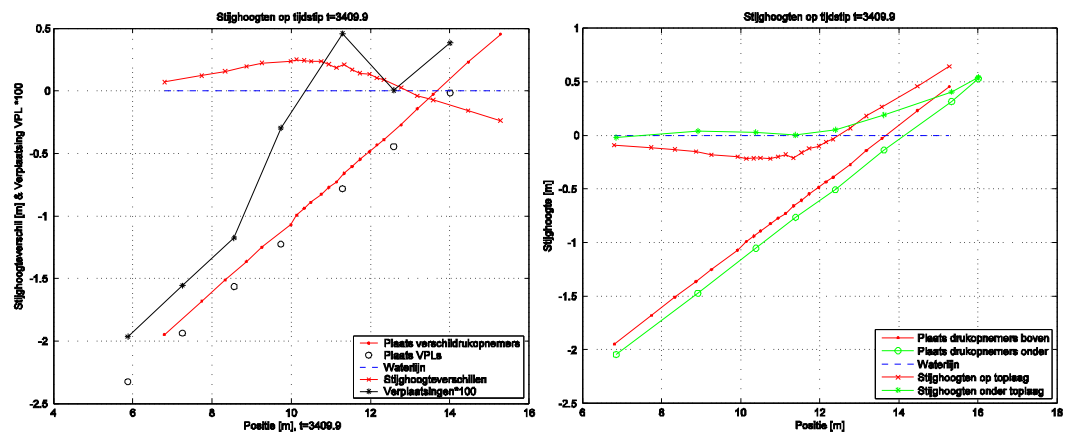
In Figuur E.2-7 is zien dat het stijghoogteverschil in de zone  $9 < x < 10$  m gelijk is aan het eigengewicht. Het is denkbaar dat de toplaag hier drijft op een waterlaagje.

Verder is er van  $x = 7$  tot  $x = 12$  m sprake van een gradiënt in het filter die duidt op een stroming naar beneden. De freatische lijn is zelfs nog hoger dan aan het begin van deze golf, namelijk ca 40 à 50 cm boven de stilwaterlijn in de goot. Kennelijk heeft de beweging van de toplaag (omhoog onder de voet van het golf front en omlaag onder de top) water naarboven getransporteerd.

De toplaag komt volgens de VPL op  $x = 12,5$  m naar beneden, zoals ook duidelijker te zien is in Figuur E.2-8. Op die locatie is het stijghoogteverschil ook geheel verdwenen.

Verder is het grote stijghoogteverschil bij  $9 < x < 10$  m nu verplaatst naar  $10 < x < 11$  m.

Aan de hand van het stijghoogteverloop op de toplaag is te zien dat de volgende golf alweer in aantocht is. De gradiënt van de stijghoogte in het filter in de zone  $12 < x < 16$  m verraadt een stroming vanaf de freatische lijn richting de teen.



Figuur E.2-8, Beweging en stijghoogten in P01 op  $t = 3409,90$  s.

## E.2.2 Golf met $\phi_w$ gelijk aan $\phi_{w2\%}$

Deze golf is reeds besproken in paragraaf 5.1.

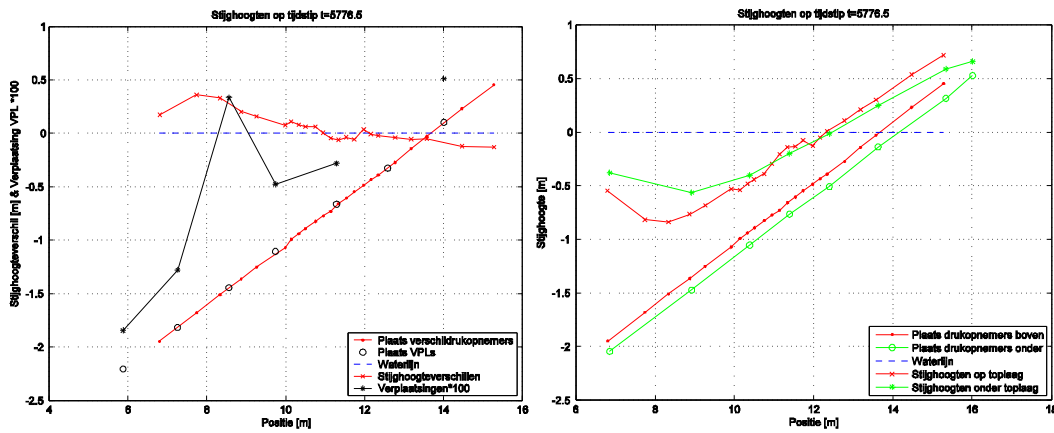
## E.3 Proef P04

Proef P04 is de op één na laatste proef van de eerste meetserie. Tijdens deze proef waren alle drukopnemers nog in het talud aanwezig. Tijdens proef P05 was dit niet meer het geval.

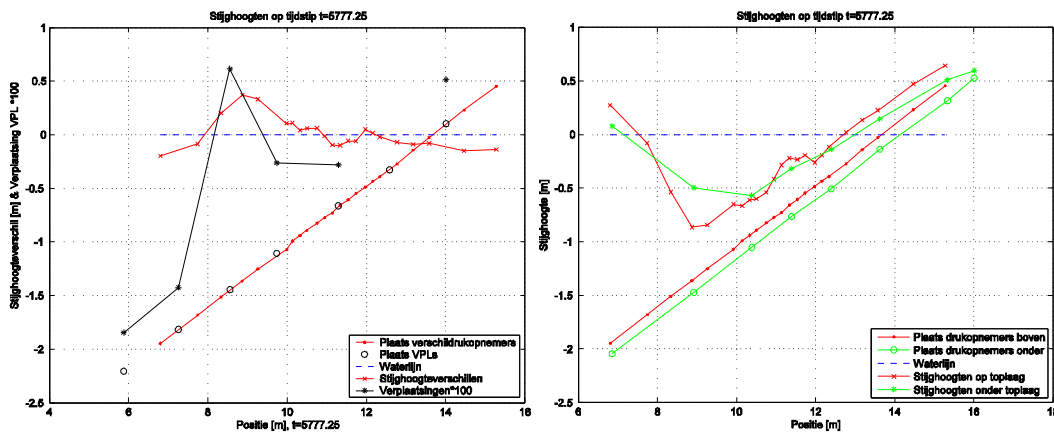
### E.3.1 Golf met maximale verplaatsing

Het gaat hier om de golf vanaf het tijdstip  $t = 5776,5$  s.

In Figuur E.3-1 is de beginsituatie te zien met een aankomend golffront in de rechterafbeelding. Ook is het stijghoogteverschil bij  $x = 8$  m al toe aan het nemen en is hier al groter dan het eigengewicht ( $\Delta D \cos \alpha = 0,24$  m).



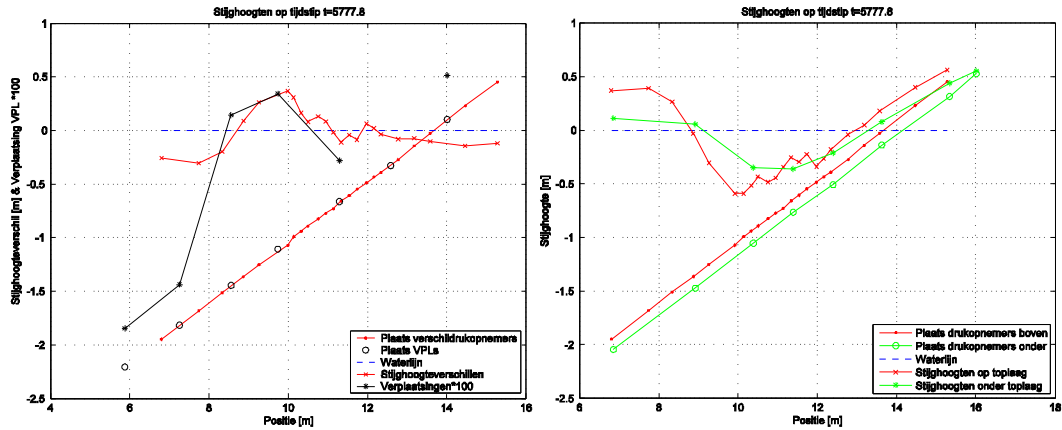
Figuur E.3-1, Beweging en stijghoogten in P04 op  $t = 5776,5$  s.



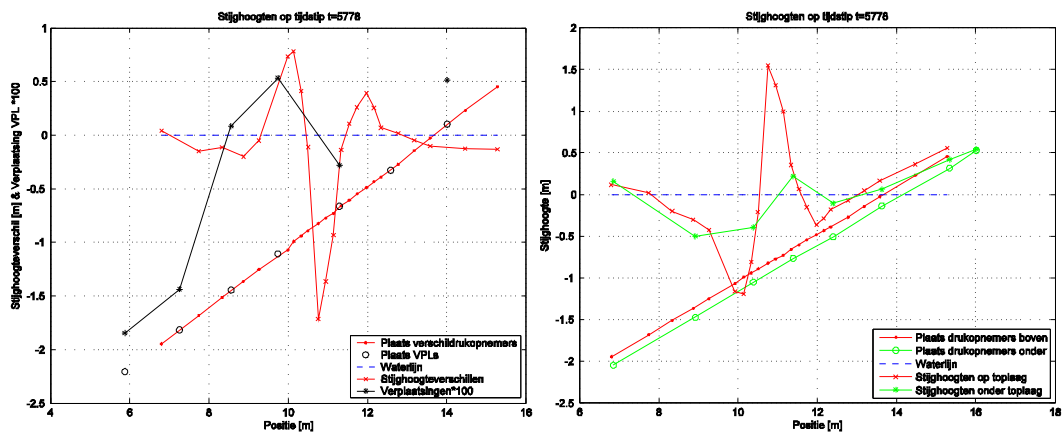
Figuur E.3-2, Beweging en stijghoogten in P04 op  $t = 5777,25$  s.

In Figuur E.3-2 is het golffront in het geïstrumenteerde gebied aangekomen. Het maximale stijghoogteverschil is nu verschoven naar  $x \approx 9$  m maar blijft nog op een waarde van ongeveer 0,4 m zitten. De verplaatsing bij de VPL op  $x = 8,5$  m is nu maximaal. Het golffront is hier net voorbij gegaan dus gaat de toplaag hierna weer naar beneden. Zodra de toplaag bij de VPL op  $x = 8,5$  m omlaag gaat, gaat de toplaag bij de volgende VPL (op  $x = 9,7$  m) omhoog. Dit betekent dat de beweging van de toplaag het water in de waterlaag tussen toplaag en filter omhoog stuwt. Als de toplaag op de ene plaats omlaag gaat en daarnaast omhoog, kan de beweging plaatsvinden zonder verhinderde toestroming. Het proces van de verhinderde toestroming is uitgelegd in paragraaf 5.3.1 (Figuur 5.14).

In Figuur E.3-3 wordt het vermoeden bevestigd wat bij de vorige figuur beschreven werd. Als het positieve stijghoogteverschil zich over de toplaag verplaatst, gaan de bewegingen mee. De toplaag op  $x = 9,7$  m is inderdaad omhoog gegaan en op  $x = 8,5$  m is inderdaad een beweging naar beneden te zien. Iets voor het golffront is al het begin van de golfklap te zien. De volgende figuur laat de situatie zien als de golfklap verder ontwikkeld is, 0,2 s later.



Figuur E.3-3, Beweging en stijghoogten in P04 op t = 5777,80 s.



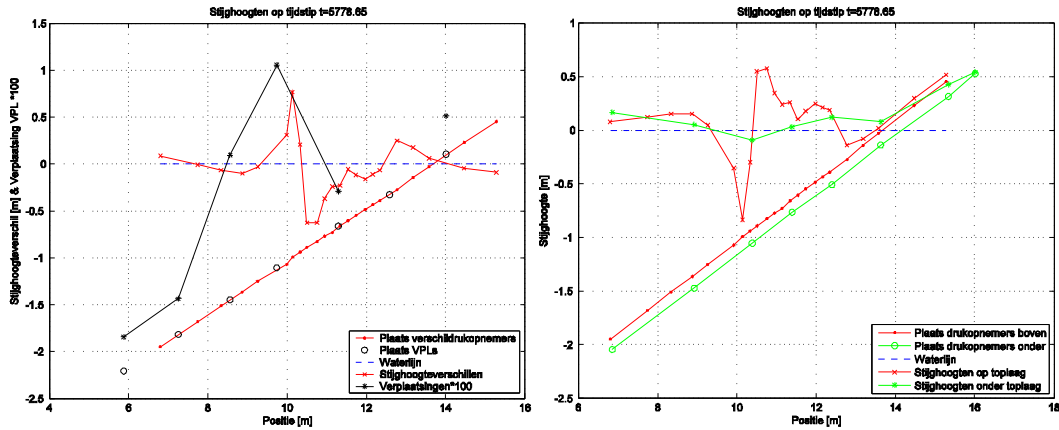
Figuur E.3-4, Beweging en stijghoogten in P04 op t = 5778,00 s.

Op het moment getoond in Figuur E.3-4 vindt de golfklap plaats zoals ook zeer goed te zien in de rechterafbeelding. Dit uit zich in een groot negatief stijghoogteverschil. Recht onder de golfklap is er een neerwaarts stijghoogteverschil, maar aan beide zijden ernaast is een groot opwaarts stijghoogteverschil.

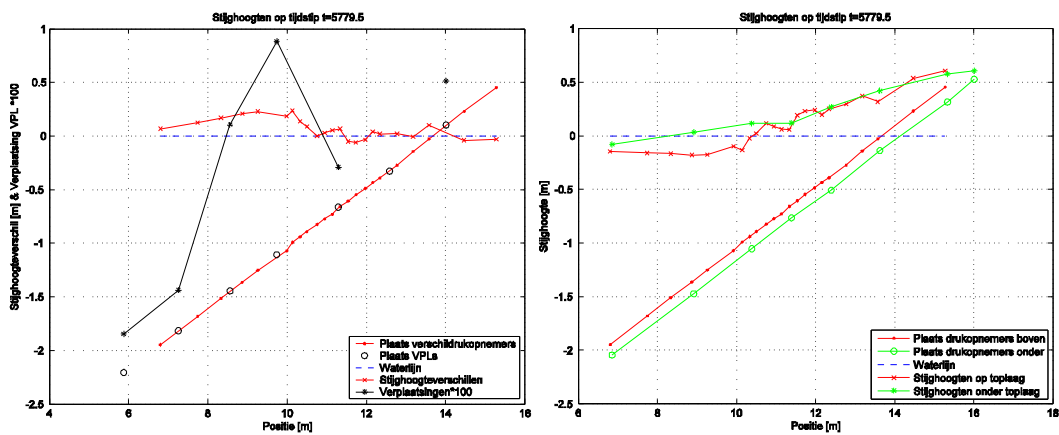
De toplaag rond de  $x = 9,7$  m gaat omhoog, echter het is bepaald niet zeker dat dit veroorzaakt wordt door alleen de golfklap. De stijghoogte in het filter die hiervan de oorzaak is was namelijk ook al in het vorige moment aanwezig. De verplaatsingsopnemer op  $x = 11,3$  m zit vlak onder de golfklap. Deze beweegt echter helemaal niet, ook niet naar beneden, dus deze was nog niet opgetild door een stijghoogteverschil.

De toplaag op de locatie  $x = 9,7$  m komt na het moment weergegeven in Figuur E.3-5 weer vrij snel naar beneden. Het stijghoogteverschil is op deze locatie dan ook net gepasseerd en laat een moment later een veel lager stijghoogteverschil achter, de toplaag wordt daarna dus naar beneden geduwd. De golfklap is ondertussen al afgezwakt.

De verplaatsingsopnemer op  $x = 9,7$  m is in deze figuur (Figuur E.3-6) net weer langzaam omlaag aan het gaan, terwijl het stijghoogteverschil net iets kleiner is dan het eigengewicht. Zo te zien aan de rechterafbeelding is er in het filter een stroming naar beneden en is de golf aan de golfoploop begonnen. Deze blijft het filter echter nog vullen.

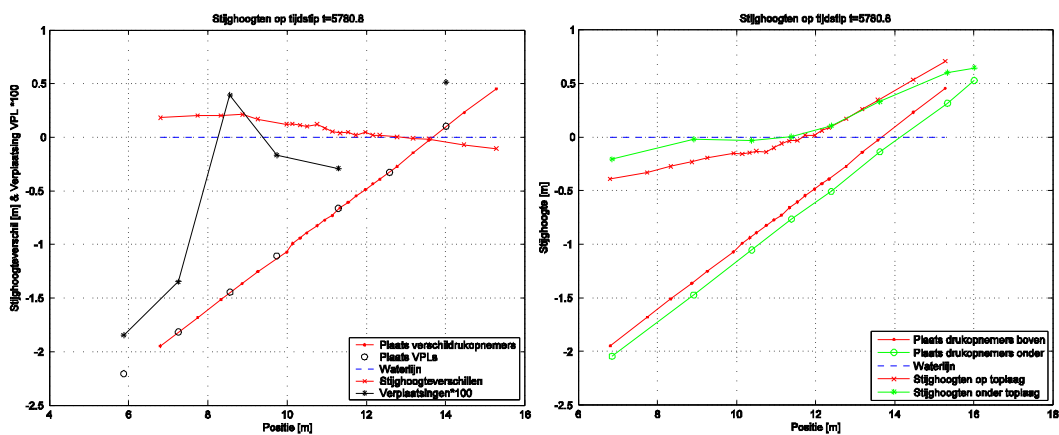


Figuur E.3-5, Beweging en stijghoogten in P04 op t = 5778,65 s.



Figuur E.3-6, Beweging en stijghoogten in P04 op t = 5779,50 s.

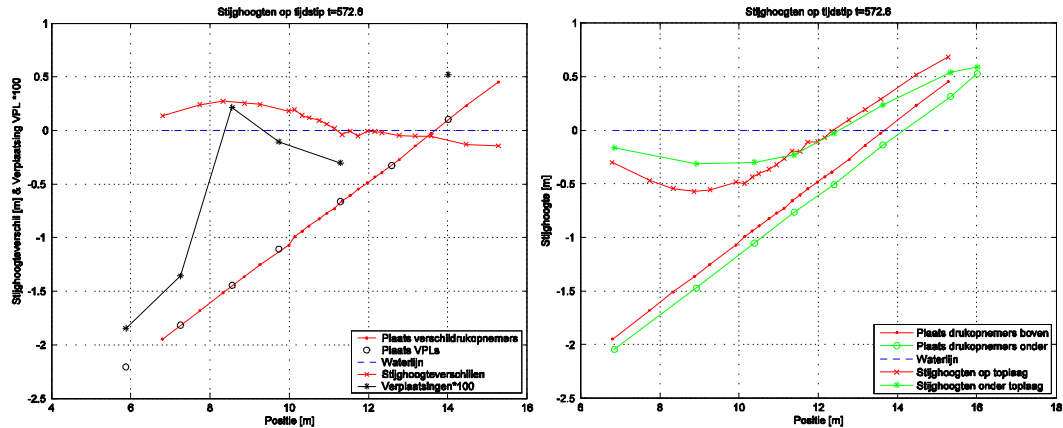
In het volgende moment (Figuur E.3-7) is te zien dat de freatische lijn nog hoger staat dan aan het begin van de golf, namelijk op ca. 60 cm boven de buitenwaterstand. Uit het stijghoogteverloop in het filter blijkt dat er een stroming naar beneden is. De toplaag op x = 9,7 m is inmiddels verder naar beneden gegaan.



Figuur E.3-7, Beweging en stijghoogten in P04 op t = 5780,80 s.

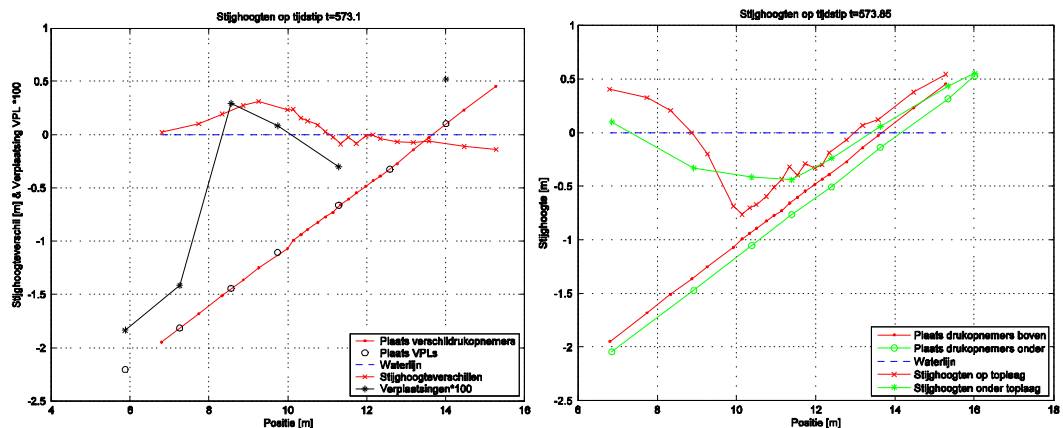
### E.3.2 Golf met $\phi_w$ gelijk aan $\phi_{w2\%}$

Deze golf heeft in proef 04 plaatsgevonden vanaf  $t = 572,6$  tot  $t = 577,4$  seconden.



Figuur E.3-8, Beweging en stijghoogten in P04 op  $t = 572,6$  s.

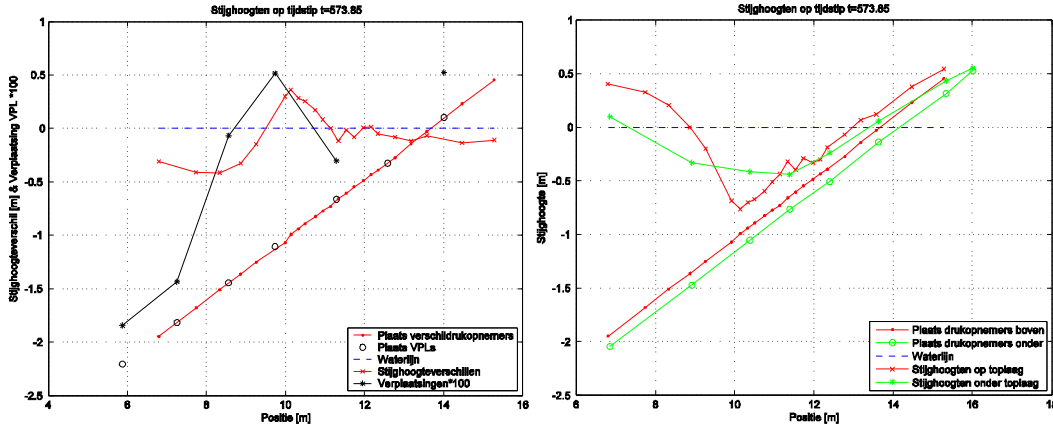
In Figuur E.3-8 is de beginsituatie te zien van waaruit de golf geanalyseerd zal worden. Op de rechterafbeelding is goed te zien hoe het golffront aankomt en een stijghoogteverschil veroorzaakt bij de linkerafbeelding dat net iets groter is dan het eigengewicht. Hier is ook te zien dat de verplaatsingsopnemers op de locaties  $x = 8,5$  m en  $x = 9,7$  m een beweging omhoog meten.



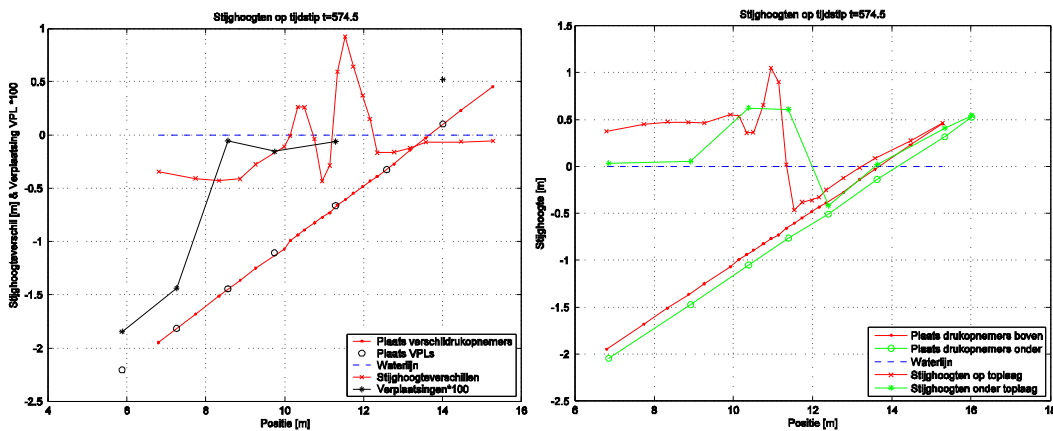
Figuur E.3-9, Beweging en stijghoogten in P04 op  $t = 573,1$  s.

In Figuur E.3-9 is te zien dat het golffront inmiddels verder gevorderd is en het grootste stijghoogteverschil daarmee over de VPL op  $x = 8,5$  m getrokken is. De toplaag staat dan nu ook op het hoogste punt en zal hierna naar beneden gaan. De toplaag bij de VPL daarnaast is echter nog wel naar boven aan het bewegen.

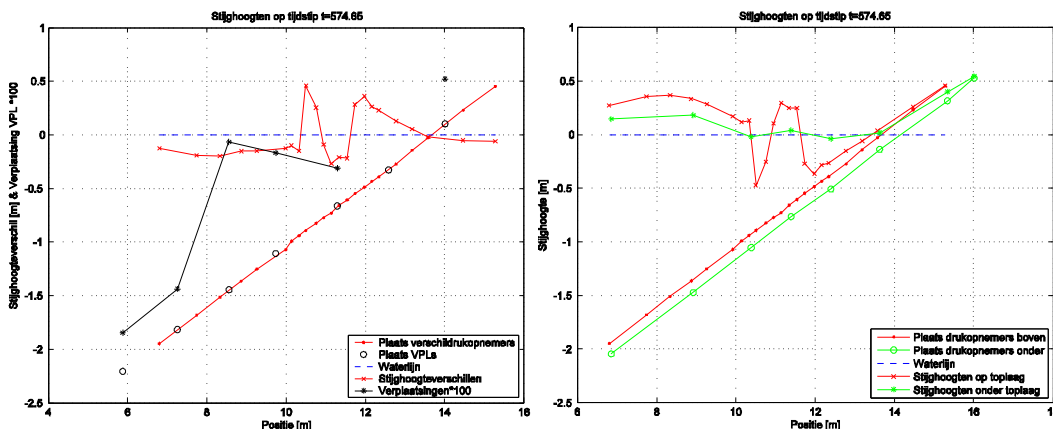
De VPL op  $x = 9,7$  m in Figuur E.3-10 heeft nu zijn maximale waarde bereikt. Het hoogtepunt van het stijghoogteverschil is nu over de betreffende VPL heen verder het talud opgetrokken, zodat het stijghoogteverschil hier snel afneemt.



Figuur E.3-10, Beweging en stijghoogten tijdens in P04 op t = 573,85 s.



Figuur E.3-11, Beweging en stijghoogten in P04 op t = 574,5 s.



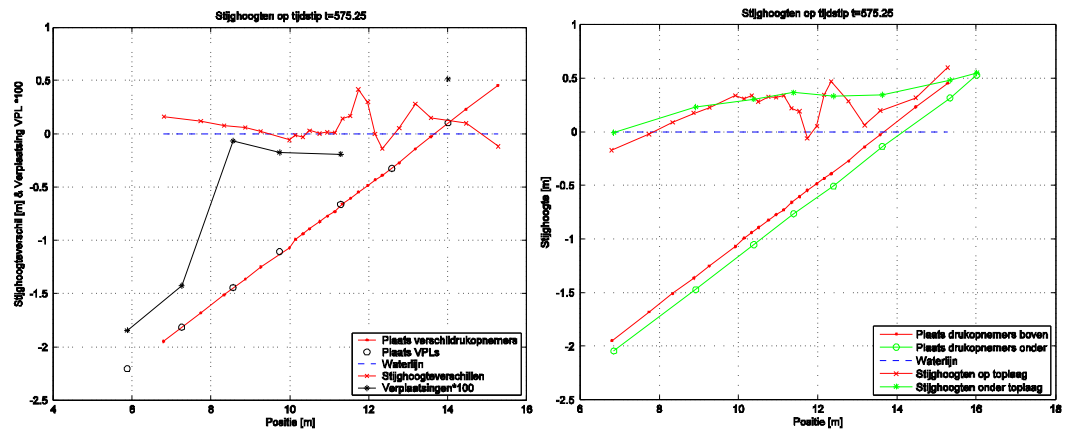
Figuur E.3-12, Beweging en stijghoogten in P04 op t = 574,65 s.

In Figuur E.3-11 is het moment te zien dat de golfklap plaatsvindt. Ook is te zien dat de stijghoogte in het filter dit redelijk kan volgen waaruit blijkt dat de lek lengte in deze zone vrij klein is (gescheurde toplaag). De stijghoogten rondom de golfklap laten zien dat het water wordt weggeduwd van de golfklap. De toplaag op locatie  $x = 11,2$  m is vanaf  $t = 574,05$  s omhoog gegaan tot op dit moment. De golfklap komt bovenop de VPL terecht waardoor de toplaag hier hard naar beneden geduwd wordt. De grootste snelheid hierbij bedraagt iets meer dan  $0,03$  m/s. Het grote opwaartse stijghoogteverschil op  $m = 11,0$  en  $x =$



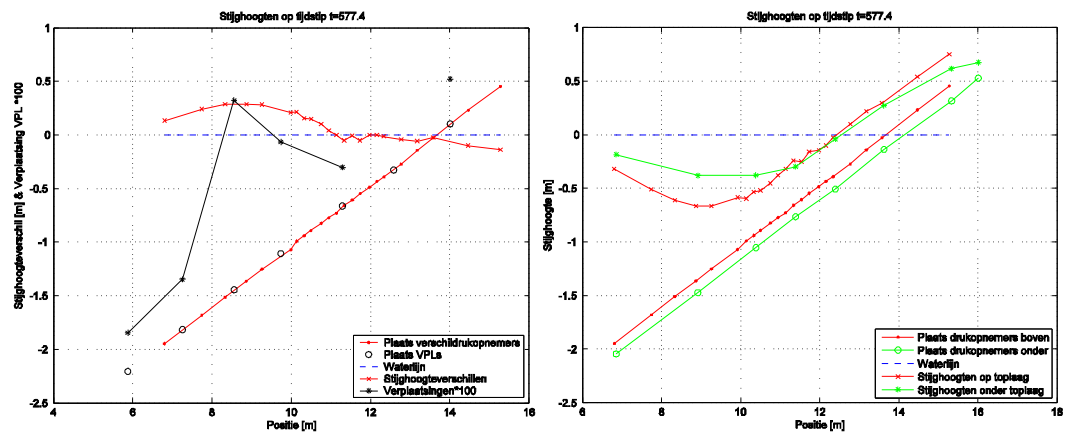
11,7 m, met daartussen een neerwaartse stijghoogteverschil, is een gevolg van de golfklap en de daarmee samenhangende neerwaartse beweging van de toplaag. De toplaag probeert het water weg te duwen zoals ook te zien is aan de stijghoogten in het filter in de rechterafbeelding. Dit proces is nader uitgelegd in paragraaf 5.1 en figuur 5.6.

In Figuur E.3-12 is de toplaag op  $x = 11,2$  m helemaal naar beneden geduwd door een golfklap. Hierna zijn er nog een aantal momenten waarop de toplaag hier naar boven komt of naar beneden gaat door een positief of negatief stijghoogteverschil. Het einde van die periode is op  $t = 575,45$  s. Het stijghoogteverschil fluctueert dan niet meer zodanig dat dergelijke bewegingen mogelijk zijn.



Figuur E.3-13, Beweging en stijghoogten in P04 op  $t = 575,25$  s.

In Figuur E.3-13 is het tijdstip te zien waarop de golfklap nog een beetje aan het uitdeinen is.



Figuur E.3-14, Beweging en stijghoogten in P04 op  $t = 577,4$  s.

In de Figuur E.3-14 is te zien dat het volgende golffront aan komt rollen. De verplaatsingsopnemer op  $x = 8,5$  m laat dan ook direct een reactie zien.

## E.4 Proef P11b

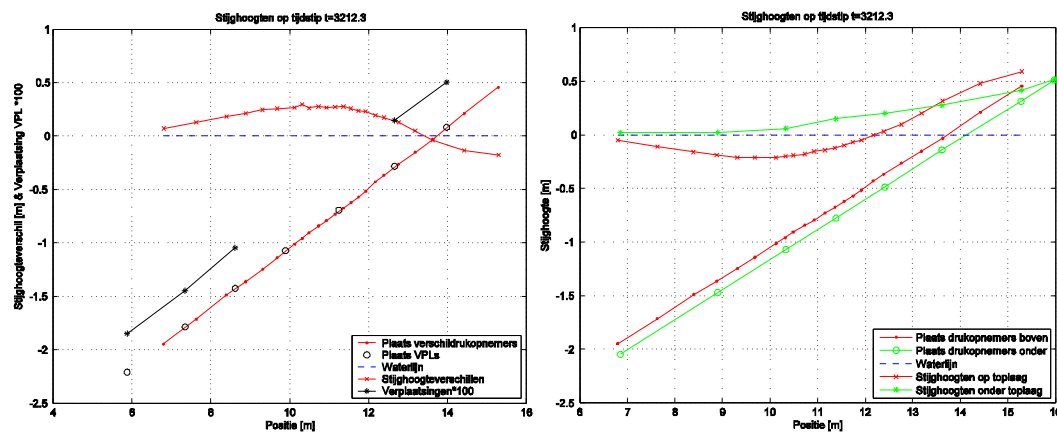
Tijdens proef P11 en P11b was de bekleding nog in perfecte staat. Proef P11b is gekozen omdat deze als voortzetting kan worden gezien van proef P11. Dit betekent dat er dezelfde condities zijn maar dat de bekleding iets minder nieuw is. Toch zijn de bewegingen in proef

P11b niet groot te noemen. Deze bewegingen kunnen namelijk maar net gemeten worden door de instrumenten. Ook hier zijn weer momenten gekozen waarop de  $\phi_w$  gelijk is aan de  $\phi_{w2\%}$  en de golf die de maximale beweging veroorzaakt.

Bij de figuren in deze paragraaf moet de opmerking gemaakt worden dat de VPLs met de nummers 6 en 7 (resp.  $x = 9,9$  en  $x = 11,2$  m) vastgeplakt waren aan de toplaag. Derhalve zijn deze instrumenten niet weergegeven omdat dit misleidend zou kunnen werken.

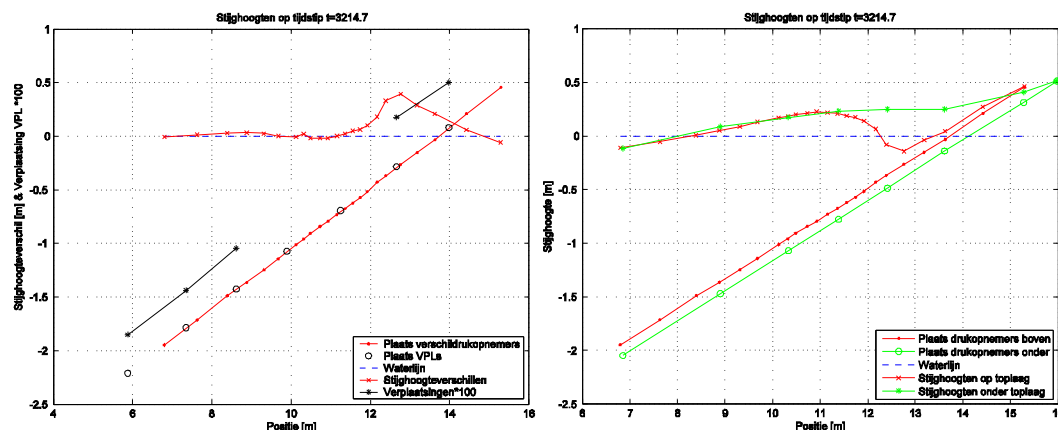
#### E.4.1 Golf met maximale verplaatsing

De golf die voor deze paragraaf is gekozen, vond plaats tussen  $t = 3212,3$  en  $3215,3$  s.



Figuur E.4-1, Beweging en stijgheighten in P11b op  $t = 3212,3$  s.

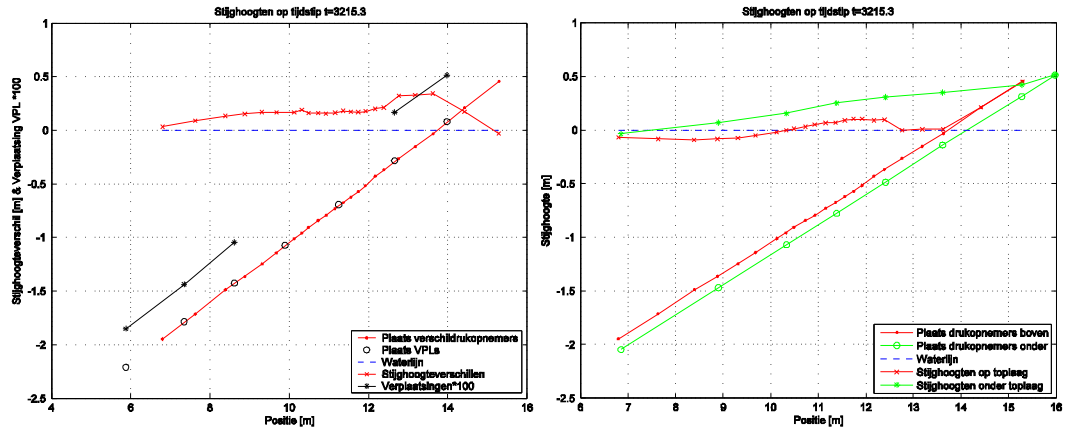
In Figuur E.4-1 is de beginsituatie van de te analyseren golf in proef P11b te zien. Op de rechterafbeelding is te zien dat er in een groot deel van het filter een stroming naar beneden is. Verder komt aan de linkerkant het volgende golf front er alweer aan. Op dit moment zijn er op  $x = 7,3$  m,  $x = 8,6$  m en  $x = 12,7$  m veel bewegingen. Dit zijn echter zeer kleine bewegingen (orde 1 mm) die in deze figuren niet te zien zijn.



Figuur E.4-2, Beweging en stijgheighten in P11b op  $t = 3214,7$  s.

Op het moment dat afgebeeld is in Figuur E.4-2, komt het stijgheightverschil bij de werkende verplaatsingsopnemer bij de bovenkant van het talud aan, bij  $x = 12,7$ . Deze geeft een reactie in de vorm van een zeer kleine beweging omhoog en later weer omlaag. Deze beweging is slechts 1 mm. Het is wel zo dat een dergelijke beweging zich enkele keren herhaalt. Verder blijkt de beweging ook merkbaar te zijn bij  $x = 14,0$  m, terwijl het

stijghoogteverschil daar nog geen aanleiding toe geeft. Kennelijk is de buigstijfheid van de toplaag zodanig dat een beweging ook op een afstand van 1,3 m nog merkbaar is. Het feit dat de toplaag mee omhoog getrokken wordt bij  $x = 14,0$  m door het stijghoogteverschil bij  $x = 12,7$  m heeft een lokale stijghoogteverlaging bij  $x = 14,0$  m als consequentie, als gevolg van de verhinderde toestroming.



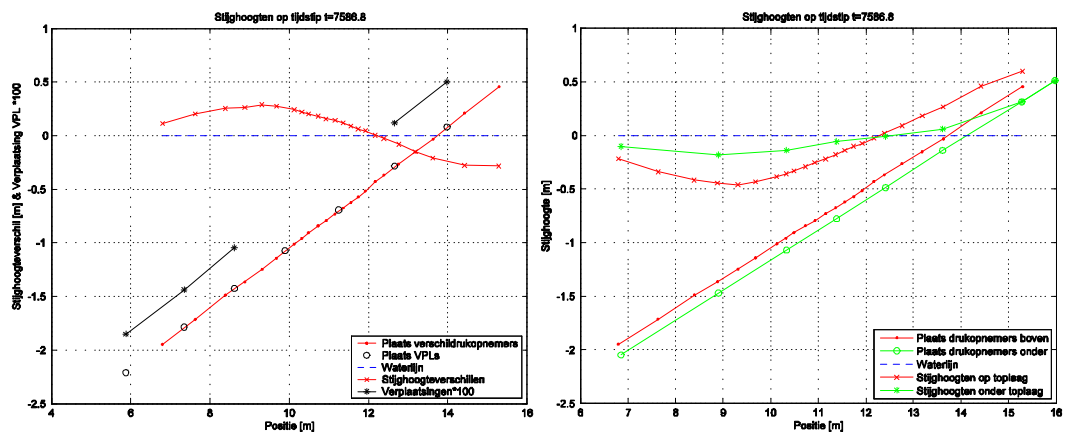
Figuur E.4-3, Bewegingen en stijghoogten in P11b op  $t = 3215,3$  s.

In Figuur E.4-3 is het einde van de golf te zien met een mooi voorbeeld van een afstromend filter. Hoewel er wel een aanzienlijk stijghoogteverschil te zien is in de linker afbeelding laten de verplaatsingsopnemers geen beweging zien. De freatische lijn in het filter staat ca 0,4 m à 0,5 m boven de buitenwaterstand.

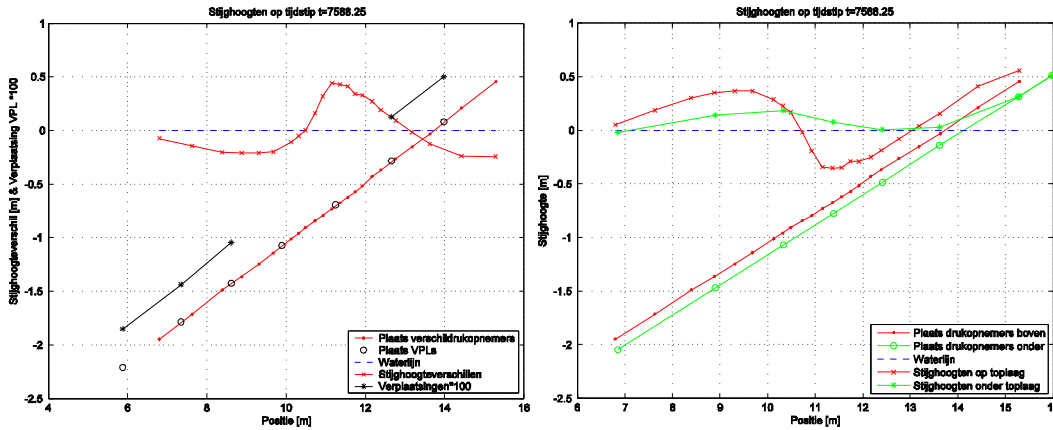
#### E.4.2 Golf met $\phi_w$ gelijk aan $\phi_{w2\%}$

De golf die een stijghoogteverschil geeft met een 2% overschrijdingsfrequentie treedt op van  $t = 7586,8$  tot  $t = 7589,8$  s.

Bij de nadering van de golf in Figuur E.4-4 gaat het talud op vrijwel alle locaties met een werkende VPL meetbaar op en neer. Goed is te zien in de rechter afbeelding dat het golf front op dit moment aankomt. Het stijghoogteverschil is groter dan het eigengewicht.

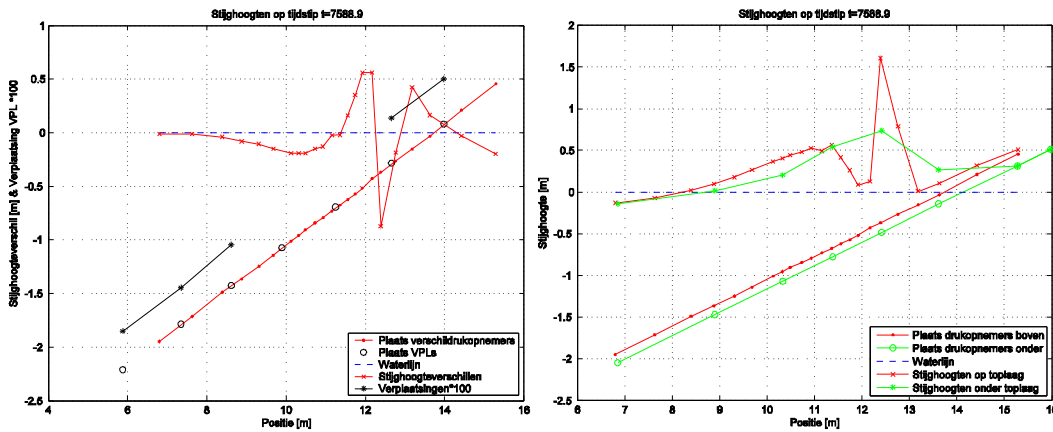


Figuur E.4-4, Bewegingen en stijghoogten in P11b op  $t = 7586,8$  s.

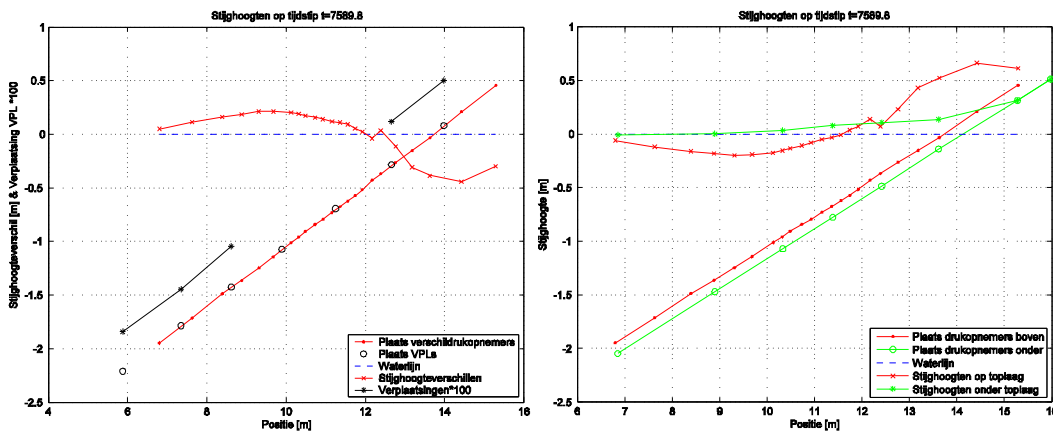


Figuur E.4-5, Bewegingen en stijghoogten in P11b op t = 7588,25 s.

Het moment weergegeven in Figuur E.4-5 is het moment dat de toplaag op  $x = 12,6$  m omhoog gaat bewegen, ondanks dat het stijghoogteverschil hier nog lager is dan het eigengewicht. Kennelijk wordt de toplaag hier mee omhoog getrokken door de beweging in het gebied met grote stijghoogteverschillen ( $11 < x < 12$  m).



Figuur E.4-6, Bewegingen en stijghoogten in P11b op t = 7588,9 s.



Figuur E.4-7, Bewegingen en stijghoogten in P11b op t = 7589,8 s.

Op de rechterafbeelding van Figuur E.4-6 is te zien dat de golfklap op de VPL bij  $x = 12,6$  m terechtkomt. Ook is zeer goed te zien dat dit vrijwel direct een grote stroming in het filter teweeg brengt, weg van de plaats van de golfklap en weg van de neerwaartse beweging.

Recht onder de golfklap is er een neerwaarts stijghoogteverschil, maar aan beide zijden ernaast is een groot opwaarts stijghoogteverschil.

In Figuur E.4-7 zijn de laatste metingen van de golf weergegeven. In de hele golf was er een beweging met een snelheid van maximaal 0,002 m/s. Dit zijn dus zeer kleine snelheden in vergelijking met de 0,02 à 0,03 m/s uit serie 1.

Verder moet opgemerkt worden dat de toplaag zijn omhoog gerichte beweging al stopt voordat het maximale stijghoogteverschil is opgetreden. Ook dit duidt op de invloed van de naastgelegen locaties door de hoge buigstijfheid van de toplaag.

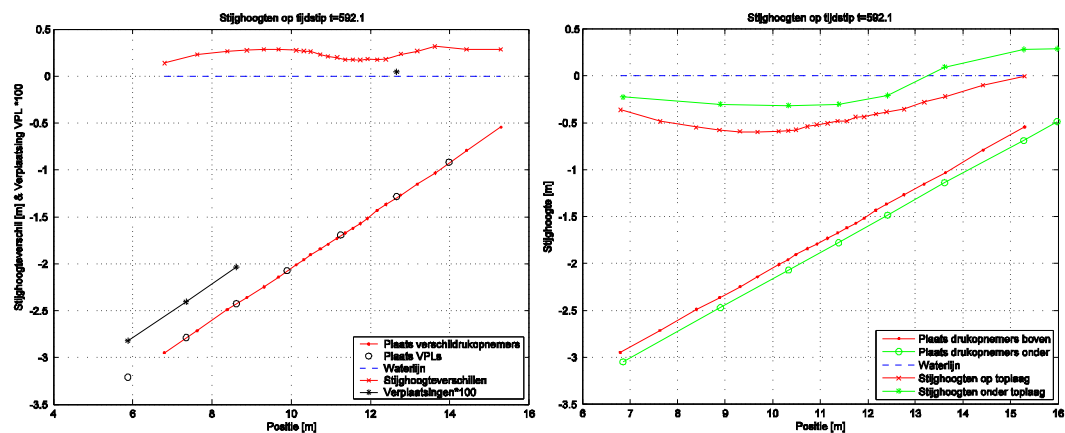
## E.5 Proef P16

Proef 16 is uitgekozen om verder te analyseren, omdat deze proef als laatste in de tweede serie alle instrumenten nog in het talud had. Verder was er al een aanzienlijke degeneratie van de toplaag die tot uiting zou kunnen komen in de resultaten.

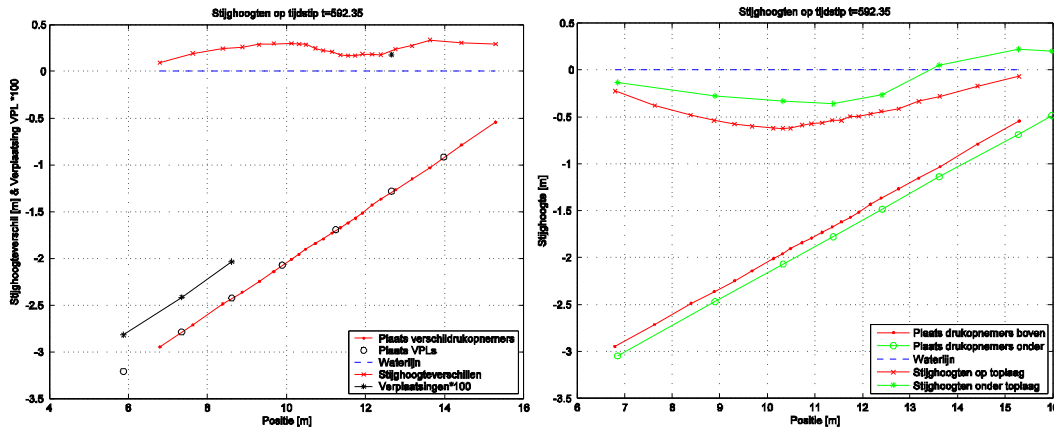
### E.5.1 Golf met maximale verplaatsing

In de onderstaande figuren zijn een aantal de verplaatsingsopnemers weggelaten. Deze waren ofwel buiten bereik (VPL op  $x = 14,0$  m), ofwel zaten vastgeplakt aan de toplaag (VPLs op de locaties  $x = 9,9$  m en  $11,2$  m).

In Figuur E.5-1 zijn de bewegingen en de stijghoogten te zien aan het begin van de te analyseren golf. Op dit moment geeft de verplaatsingsopnemer op  $x = 12,7$  m aan dat er een beweging omhoog is van de toplaag. De andere nog werkende verplaatsingsopnemers bewegen niet noemenswaardig. In de rechterfiguur is weer te zien dat de golf eraan komt. Er is sprake van een hoge freatische lijn van ongeveer 30 cm boven de buitenwaterstand. Tevens valt op dat er over het hele meetbereik een opwaarts stijghoogteverschil is, dat plaatselijk hoger is dan het eigengewicht. Het is denkbaar dat de toplaag drijft op een waterlaagje, maar dat is helaas niet goed meer te meten door het grote aantal verplaatsingsopnemers dat inmiddels is uitgevallen.

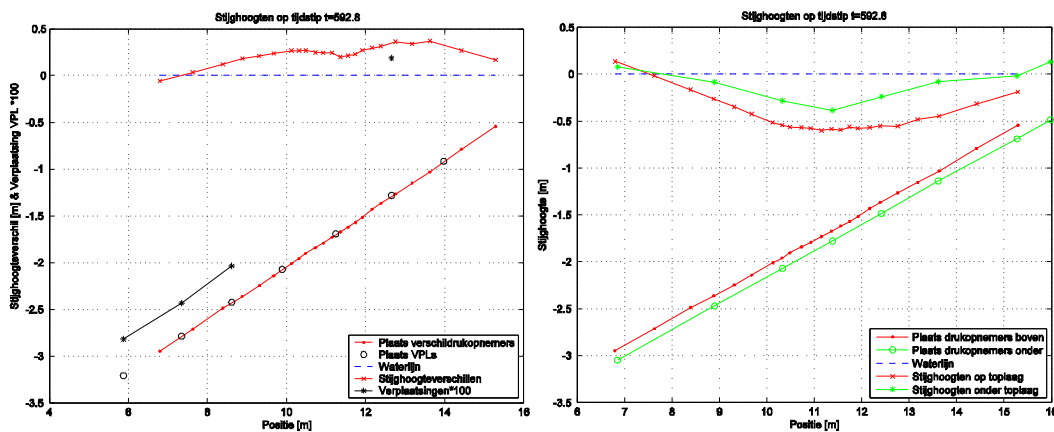


Figuur E.5-1, Bewegingen en stijghoogten in P16 op  $t = 592,1$  s.

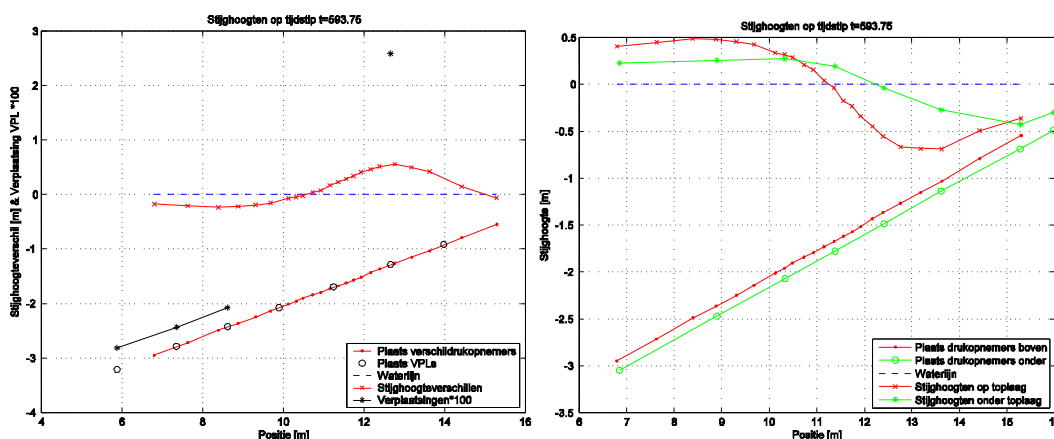


Figuur E.5-2, Bewegingen en stijghoogten in P16 op t = 592,35 s.

Op het moment getoond in Figuur E.5-2 bereikt de beweging van de toplaag een tijdelijk maximum bij  $x = 12,7$  m. Aan de hand van de stijghoogteverschillen wordt vermoed dat de beweging in een breed gebied plaatsvindt:  $9 < x < 14,5$  m. Dit stijghoogteverschil wordt even later weer groter en is de toplaag weer verder naar boven gaan bewegen.



Figuur E.5-3, Beweging en stijghoogten in P16 op t = 592,8 s.

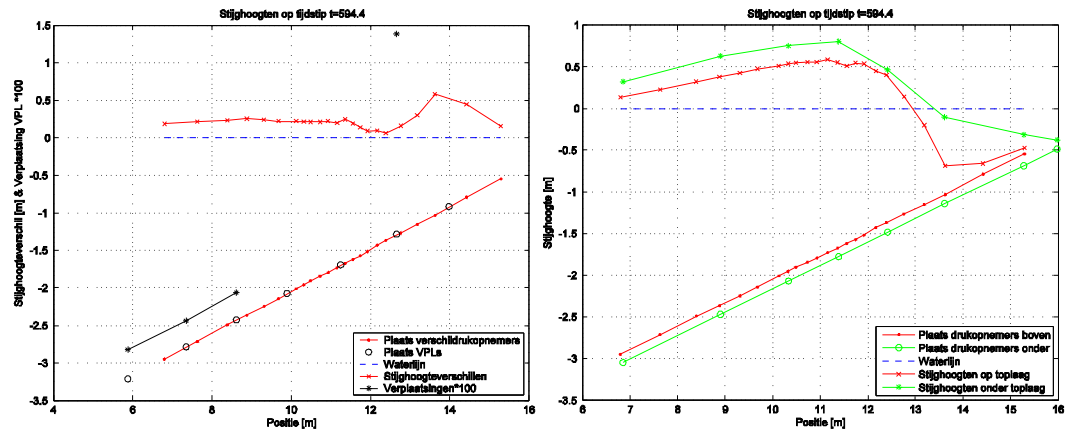


Figuur E.5-4. Beweging en stijghoogten op t = 593,75 s.

Op het in Figuur E.5-3 getoonde moment is het stijghoogtefront nog nauwelijks opgeschoven en is er dus nog steeds een groot stijghoogteverschil in een brede zone op het

talud. Kennelijk houdt deze belasting behoorlijk lang aan. Na dit moment gaat de toplaag op  $x = 12,7$  m nog weer verder omhoog bewegen.

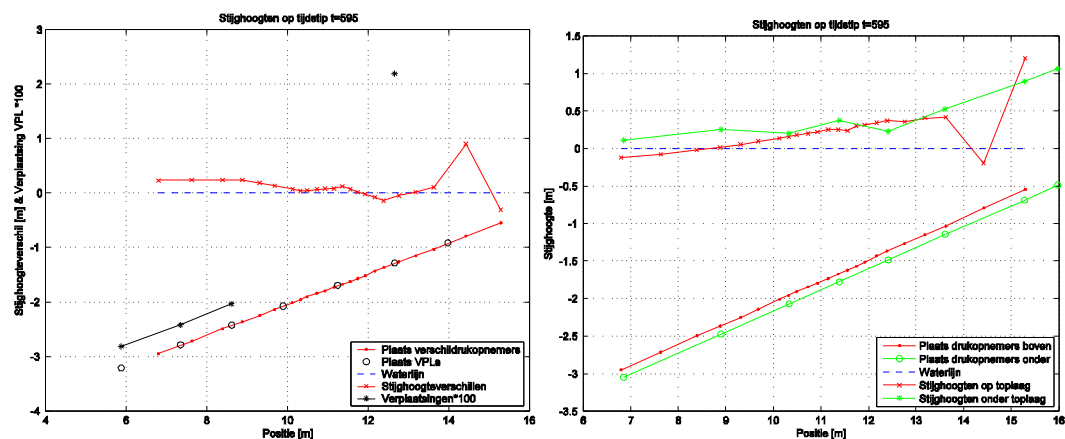
Zoals in de rechter afbeelding van Figuur E.5-4 goed te zien is, is het stijghoogtefront verder het talud op gekropen, en is het stijghoogteverschil volgens de linker figuur bij  $x = 12,7$  m erg hoog geworden:  $\phi_w = 0,55$  m. Als gevolg hiervan gaat de toplaag verder omhoog op  $x = 12,7$  m tot een maximale hoogte van 27 mm.



Figuur E.5-5, Beweging en stijghoogten op  $t = 594,4$  s.

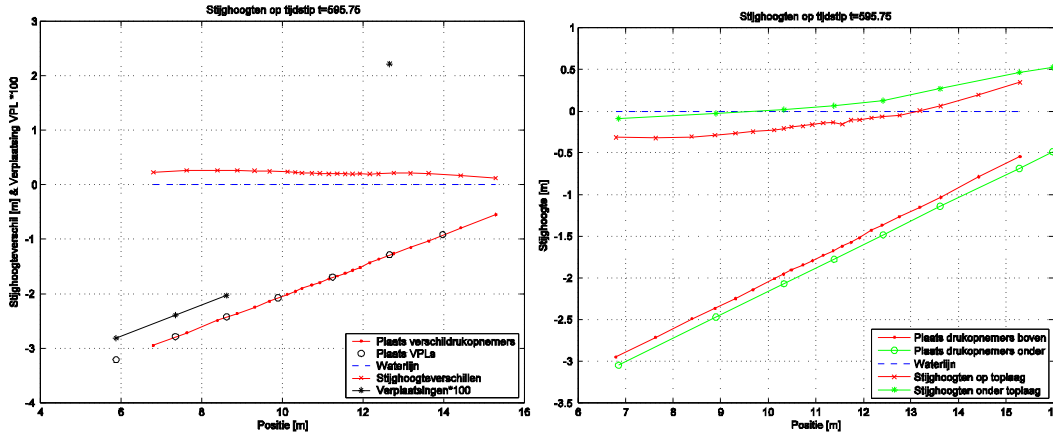
In Figuur E.5-5 is een moment te zien dat de gehele toplaag lijkt te zweven. Er is een stijghoogteverschil over bijna het gehele geïnstrumenteerde deel van de toplaag aanwezig dat ongeveer gelijk is aan het eigengewicht en overal is een op en neer gaande beweging te zien.

Zoals ook te zien is in de rechterafbeelding is de verplaatsing tot nu toe opgetreden zonder dat er een golfklap is geweest.



Figuur E.5-6, Beweging en stijghoogten op  $t = 595,0$  s.

In Figuur E.5-6 is te zien dat de golfklap heel hoog op het talud, net buiten het geïnstrumenteerde deel van het talud, aan het plaatsvinden is. De stijghoogteverschillen zijn afgenomen, behalve vlak naast de golfklap op  $x = 14,4$  m.

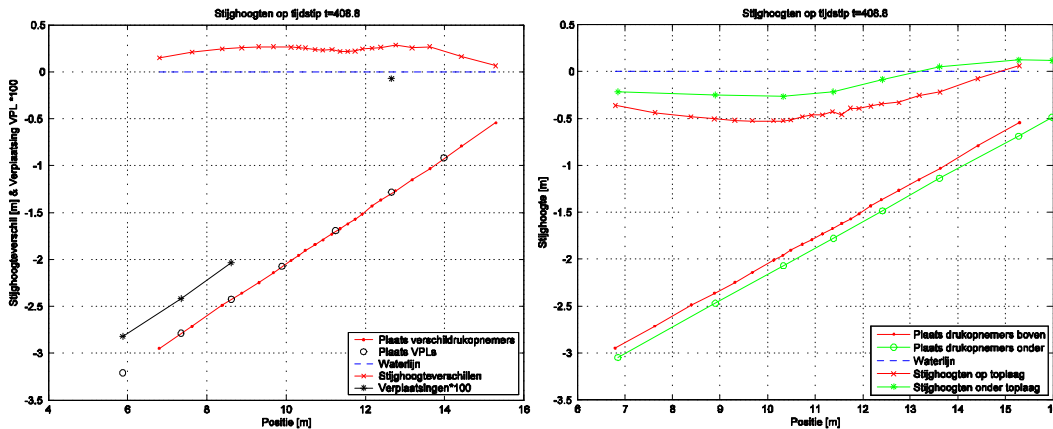


Figuur E.5-7, Beweging en stijghoogten in P16 op t = 595,75 s.

In Figuur E.5-7 is te zien dat er nog een klein stijghoogteverschil overgebleven is. In de linkerafbeelding is te zien dat de toplaag bij de VPL op x = 12,6 m niet meer naar beneden wil. Waarschijnlijk is dit een gevolg van migratie van het filtermateriaal tijdens deze bijzondere golf.

**E.5.2 Golf met  $\phi_w$  gelijk aan  $\phi_w 2\%$**

Ook in dit deel van de proef geldt dat er een aantal verplaatsingsopnemers niet weergegeven worden. Dit zijn de verplaatsingsopnemers op x = 9,9 m, x = 11,3 m en x = 14 m (zie vorige paragraaf).

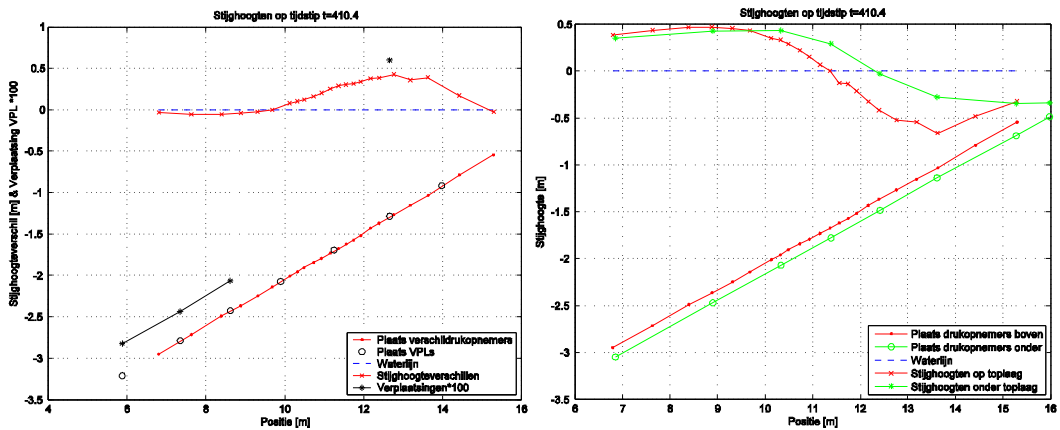


Figuur E.5-8, Beweging en stijghoogten in P16 op t = 408,8 s.

Op de rechterafbeelding van Figuur E.5-8 is te zien dat het golffront eraan zit te komen. In de linker figuur is te zien dat er een stijghoogteverschil ter grootte van het eigengewicht op een groot deel van het talud aanwezig is. Mogelijk is de toplaag al iets opgelicht en is er een dun waterlaagje aanwezig. Ter plaatse van x = 12,7 m zit de toplaag ongeveer 4 mm boven het filter.

Op het in Figuur E.5-9 getoonde moment is de toplaag op x = 7,3 m en 8,6 m omlaag aan het bewegen. Hier is geen stijghoogteverschil meer aanwezig omdat de golftop hier is aangekomen. Verder is er een groot stijghoogteverschil in de zone 11 < x < 14 m dat groter is dan het eigengewicht. Bij x = 12,7 m is de toplaag omhoog bewegen.

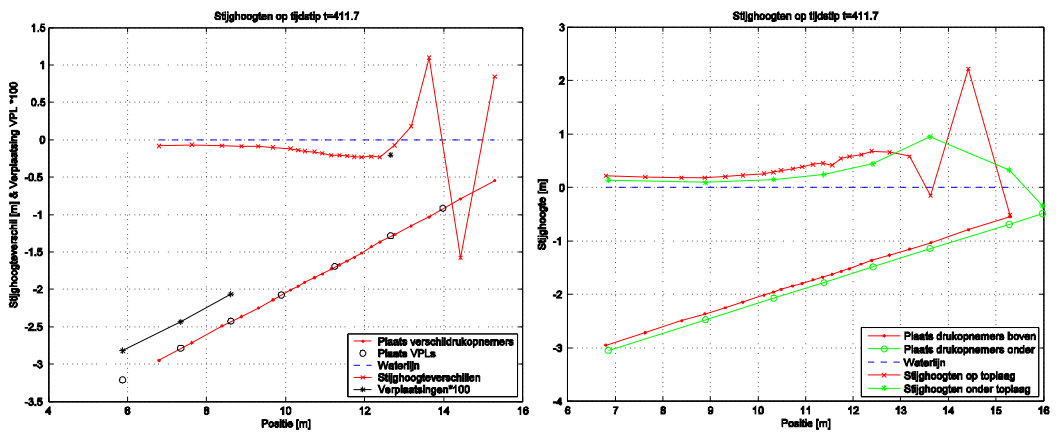




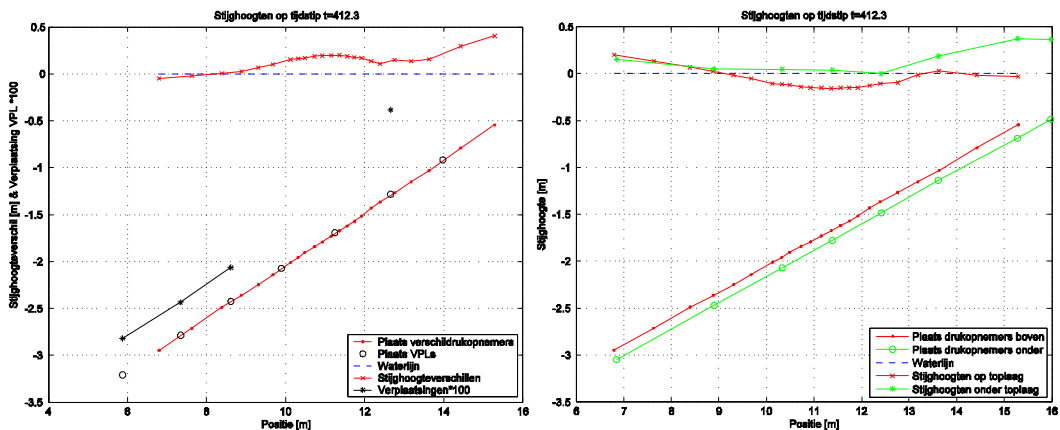
Figuur E.5-9, Beweging en stijghoogten in P16 op t = 410,4 s.

In Figuur E.5-10 is het moment te zien waarop de golfklap optreedt. Dit is ook het moment dat het stijghoogteverschil ongeveer gelijk is aan de 2%-overschrijdingswaarde in deze proef. Onder de golfklap is er een neerwaartse stijghoogteverschil, en links en rechts daarvan een opwaarts stijghoogteverschil.

Te zien is ook dat de verplaatsingsopnemer op x = 12,6 m een eind naar beneden bewogen is.



Figuur E.5-10, Beweging en stijghoogten op t = 411,7 s.

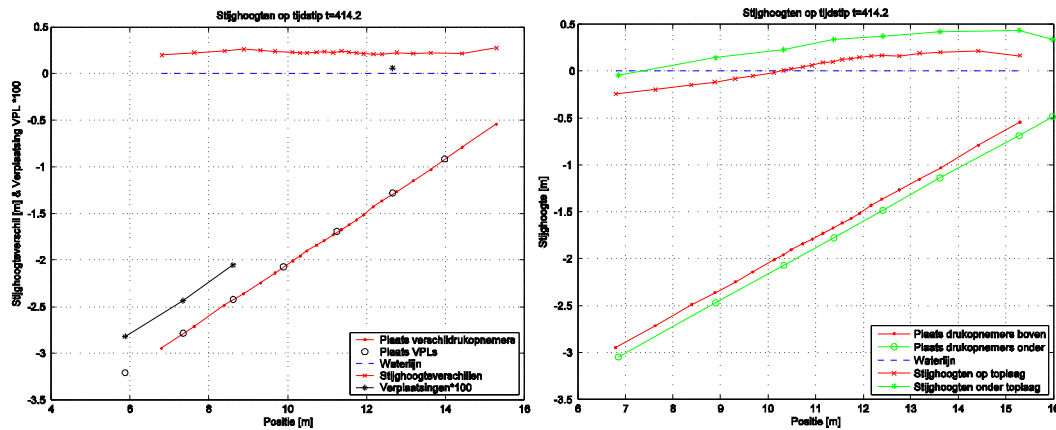


Figuur E.5-11, Beweging en stijghoogten op t = 412,3 s.

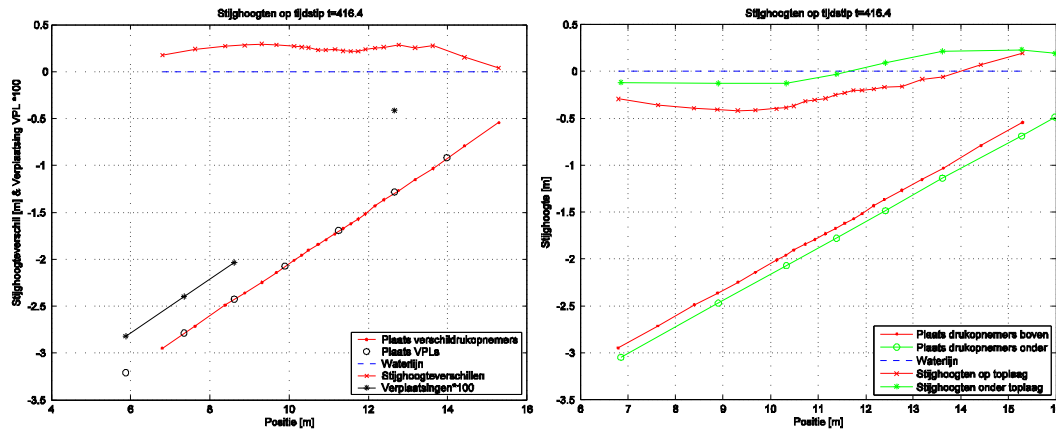
De verplaatsingsopnemer op  $x = 12,6$  m is in Figuur E.5-11 op het laagste punt en is een beetje op en neer aan het bewegen. Het stijghoogteverschil is in de tijd tussen Figuur E.5-10 en Figuur E.5-11 dan ook afwisselend positief en negatief geweest. Maar wellicht is de beweging een gevolg van bewegingen hogerop het talud.

In Figuur E.5-12 is een stijghoogteverschil over het gehele talud te zien dat ongeveer gelijk is aan het eigengewicht. Ter plaatse van  $x = 12,7$  m is de toplaag weer ongeveer 4 mm omhoog gegaan en mogelijk drijft dus weer de hele toplaag op een dun waterlaagje. Ook de toplaag bij  $x = 8,6$  m beweegt nog een beetje.

In de Figuur E.5-13 wordt getoond dat het stijghoogteverschil nog groter is geworden. Ook de bewegingen geven aan dat over het gehele talud nog een stukje omhoog gaat, hoewel dit onderin niet zo veel is als bovenin.



Figuur E.5-12, Beweging en stijghoogten op  $t = 414,2$  s.



Figuur E.5-13, Beweging en stijghoogten in P16 op  $t = 416,4$  s.

F Leklengte



## F Leklengte

### F.1 Inleiding

De leklengte is een belangrijke parameter ten aanzien van de grootte van de stijghoogteverschillen over de toplaag. Een grote leklengte geeft bij golfbelasting een groot stijghoogteverschil. Daarom is deze parameter van groot belang voor de stabiliteit van een steenzetting en wordt de waarde hiervan ook bij dit onderzoek bepaald.

Daarnaast is de verandering van de leklengte een indicatie van veranderingen in de constructie, zoals de degeneratie van de toplaag en migratie van het filter. Hoe meer scheuren er in de toplaag zitten, hoe kleiner de leklengte zal zijn.

De leklengte is als volgt gedefinieerd:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{bkD}{k'}}$$

met

$\Lambda$  = leklengte [m]

$b$  = filterlaagdikte [m]

$D$  = dikte van de toplaag [m]

$k$  = doorlatendheid filter [m/s]

$k'$  = doorlatendheid toplaag [m/s]

Hierbij is uitgegaan van de gelineariseerde doorlatendheid van de toplaag en het filter.

### F.2 Methodiek

De leklengte van een constructie kan worden berekend op basis van gemeten stijghoogten op en onder de toplaag op een bepaald tijdstip.

Met de stijghoogtemetingen op de toplaag kan voor dat tijdstip het stijghoogteverloop onder de toplaag worden berekend. Door het op deze manier berekende stijghoogteverloop onder de toplaag te vergelijken met de gemeten stijghoogten onder de toplaag kan de 'best passende' leklengte worden bepaald. Voor deze 'best fit' leklengte sluit het berekende stijghoogteverloop onder de toplaag zo goed mogelijk aan bij de gemeten stijghoogten onder de toplaag.

De berekeningen zijn uitgevoerd met de analytische formules voor de stijghoogte in het filter onder een steenzetting (Klein Breteler 1990). De methode was in 1990 uitgewerkt voor 5 drukopnemerparen, en was vervolgens in 2000 uitgebreid (Klein Breteler 2000).

Voor een beperkt aantal proeven is steeds met de gemeten stijghoogten aan de bovenkant van de toplaag als invoer het verloop van de stijghoogte onder de toplaag berekend, telkens voor een andere leklengte. Uit zo'n serie berekeningen is steeds die waarde van  $\Lambda$  gekozen,

waarbij het berekende stijghoogteverloop onder de toplaag de meetwaarden onder de toplaag zo goed mogelijk benadert. Er is gebruik gemaakt van de ongefilterde signalen.

De lek lengte is bepaald voor 4 proeven. Per proef is gezocht naar een geschikt moment met met een aantal specifieke eigenschappen. Daarbij is gelet op de beweging van de toplaag en de gradiënt van de stijghoogte.

Beweging van het talud kan de stroming en het stijghoogteverloop onder de toplaag beïnvloeden. Daarom zijn alleen momenten uitgezocht met een minimale beweging. In dit geval is maximaal een beweging van een tiende millimeter toegestaan. Deze voorwaarde moet bovendien ook nog een redelijke tijd aanhouden om de invloed hiervan weg te laten ebben als grote bewegingen net ervoor zijn opgetreden. Zodoende is er een periode van vijf seconden aangehouden waarin de toplaag aan de bewegingseis moet voldoen, en is er in die periodes een geschikt moment gezocht.

Vervolgens zijn momenten gekozen met een zo groot mogelijke gradiënt van de stijghoogte op de toplaag ( $\delta\phi / \delta x$ ), omdat dan de methode de meest betrouwbare resultaten geeft.

Er zijn twee mogelijke redenen waarom de berekende stijghoogte onder de toplaag soms voor geen enkele lek lengte goed aansluit op de metingen:

- De lek lengtetheorie schiet te kort;
- De stijghoogte op het talud is (tijdens de golfklap) niet in elke raai gelijk (raai = lijn op het talud, evenwijdig aan de gootas).

Dit laatste treedt op als de lijnen met gelijke stijghoogte (isobaren) niet steeds horizontaal lopen. De inrichting van de instrumentatie was gebaseerd op de aanname dat de isobaren wel horizontaal lopen. Daarom is er slechts één raai bezet met drukopnemers.

De stijghoogte op een bepaald punt onder de toplaag wordt bepaald door het stijghoogteverloop in de raaien die minder dan een paar lek lengten verwijderd liggen van het beschouwde punt. Als tijdens de golfklap de druk op het talud in de ene raai juist hoog is en in de andere raai laag, dan moet de stijghoogte onder de bekleding met een drie-dimensionale berekening bepaald worden, in plaats van met een 2D-berekening die hier is uitgevoerd. Bovendien moet de stijghoogte op het talud dan in vele naast elkaar gelegen raaien gemeten zijn.

De lek lengte is doorgaans tijdens een golf front wel goed te bepalen.

### F.3 Resultaat

In figuur B1 t/m B4 zijn de gemeten stijghoogten in het filter en op de toplaag alsmede de berekende stijghoogte in het filter met de best passende waarde van de lek lengte getekend.

Het is gebleken dat de volgende waarden van de lek lengte het beste voldoen:

- P01: 1,1 m
- P04: 0,8 m
- P11b: 3,0 m
- P16: 2,4 m

Uit deze resultaten blijkt dat de lek lengte tijdens de eerste serie (proef P00 t/m 05) veel kleiner was dan tijdens de tweede serie. Dit komt overeen met de waarnemingen tijdens de proeven, toen vastgesteld is dat de toplaag tijdens een groot deel van de tweede serie weinig scheuren had, en tijdens de eerste serie er wel al snel allerlei scheuren ontstonden. Zo was

het in de eerste serie ook niet meer mogelijk om een statisch stijghoogteverschil over de toplaag te creëren door de freatische lijn in het filter te verhogen. Daarvoor zou een veel te groot debiet nodig zijn.

Verder is aan de resultaten te zien dat de lek lengte tijdens een serie afneemt. Dit is een gevolg van het ontstaan van scheuren in de toplaag. De ontmenging van het filter zou ertoe leiden dat de filterlaagdikte en de doorlatendheid van het filter toeneemt en dus ook de lek lengte toeneemt. Dit blijkt uit de definitie van de lek lengte:  $\Lambda = \sqrt{(bDk/k')}$ .

	N cum	$\Lambda$	k	k'	spleet-afstand	spleet-breedte	open oppervlak
proef	(-)	(m)	(mm/s)	(mm/s)	(m)	(mm)	(%)
P00	268	1,15	38	0,29	2	0,9	0,09
P01	3087	<b>1,1</b>	38	0,33	2	1,0	0,10
P02	5833	0,94	38	0,45	2	1,2	0,12
P03	8219	0,85	76	1,10	2	2,1	0,21
P04	10586	<b>0,8</b>	152	2,47	2	3,6	0,36
P05	10675	0,75	152	2,76	2	4,0	0,40
P11	2525	3,13	38	0,04	3	0,5	0,03
P11B	5137	<b>3,0</b>	38	0,04	3	0,5	0,03
P12	6221	2,76	76	0,10	3	0,7	0,04
P12B	7214	2,66	76	0,11	3	0,7	0,04
P13	7739	2,60	76	0,11	3	0,7	0,04
P14	8909	2,48	76	0,13	3	0,7	0,05
P14B	9927	2,38	76	0,13	3	0,7	0,05
P15	9589	2,42	76	0,13	3	0,7	0,05
P16	9744	<b>2,4</b>	152	0,27	3	1,0	0,06
P12A	512	3,34	76	0,07	3	0,6	0,04
P17	2638	3,12	38	0,04	3	0,5	0,03
P18	3785	3,00	38	0,04	3	0,5	0,03
P19	5520	2,83	76	0,10	3	0,6	0,04
P20	7270	2,65	152	0,22	3	0,9	0,06
P21	8405	2,54	152	0,24	3	0,9	0,06
P22	10846	2,29	152	0,30	3	1,0	0,07
P23	12058	2,17	152	0,34	3	1,1	0,07
P23A	12311	2,14	152	0,34	3	1,1	0,07

Tabel F.3-1, Lek lengte geïnterpoleerd over het aantal golven op basis van gemeten lek lengtes tijdens proef P01, P04, P11B en P16 (vet gedrukt) en het cumulatief aantal golven (het aantal decimalen is groter dan de nauwkeurigheid rechtvaardigt ten einde onderscheid tussen de verschillende proeven te tonen)

Ook de dikte van de filterlaag is veranderd. Het S-profiel in de toplaag is immers volledig te wijten aan het migreren van filtermateriaal van rond de waterlijn naar een zone 1 à 2 m onder water. In de buurt van de waterlijn is de dikte geleidelijk afgenomen, terwijl bij de bult van het S-profiel de filterlaagdikte is toegenomen. Bij het uitbreken is duidelijk geworden dat de dikke filterlaag bij de bult van het S-profiel was opgebouwd uit een laag zand met daarop een laag filtermateriaal. Het oorspronkelijk ingezande filtermateriaal was dus volledig ontmengd geraakt. Omdat er vrijwel geen stroming in het zand plaatsvindt, kan dit bij het bepalen van de lek lengte buiten beschouwing blijven. Daardoor is de filterlaag die van belang is voor de lek lengte wel wat toegenomen bij de bult van het S-profiel, maar niet zoveel.

In de zone rond de waterlijn is de filterlaagdikte afgenomen, waardoor de lek lengte hier lokaal wat zal zijn afgenomen. Vermoedelijk sluit hier de toplaag niet overal meer perfect aan op het filter, waardoor de gemiddelde doorlatendheid van de filterlaag wat zal zijn toegenomen. Het netto effect van beide invloeden is moeilijk in te schatten.

Het feit dat de lek lengte toch is afgenomen, geeft aan dat de doorlatendheid van de toplaag nog veel meer is toegenomen dan de doorlatendheid en dikte van het filter.

Om een indruk te hebben van de lek lengte tijdens de andere proeven is gebruikgemaakt van een lineaire interpolatie op basis van de proefduur. Daarbij is aangenomen dat het veranderen van de lek lengte een geleidelijk proces is gedurende de proeven en evenredig is met de duur van de proeven. Er is tevens geëxtrapolerd naar de eerste en laatste proef uit elke serie. De resultaten hiervan zijn gegeven in Tabel F.3-1. De vetgedrukte lek lengtes zijn bepaald op basis van de gemeten stijghoogtes. De overige waarden zijn geïnterpoleerd dan wel geëxtrapolerd.

De lek lengte van proef P11B is verondersteld representatief te zijn voor het gehele talud ten tijde van een nog bijna niet aangetaste bekleding, zowel laag op het talud als hoog op het talud. Vervolgens is er een trend met een dalende lek lengte tijdens de proeven ‘hoog op het talud’ en een tijdens de proeven ‘laag op het talud’.

## F.4 Doorlatendheid van het filter en de toplaag

De doorlatendheid van het filter is helaas niet gemeten, en bovendien gedurende de proeven flink veranderd als gevolg van het migrerende filtermateriaal, waarbij ook ontmenging optrad.

Vlak voor P00 is echter wel een infiltratieproef uitgevoerd. Bij een debiet van 1,2 l/s is toen een evenwichtssituatie verkregen met het niveau van de freatische lijn in het filter op 20 cm boven de buitenwaterstand. Op basis van de gemeten stijghoogte in het filter (figuur 2.11 uit Hofland en Klein Breteler 2005) is het verhang in het filter geschat: ongeveer  $i = 0,06$ . Tijdens die infiltratieproef is een specifiek debiet opgetreden van  $q = 3$  mm/s. Met de wet van Darcy levert dat een doorlatendheid op van  $k = q/i = 0,05$  m/s (bij  $i = 0,06$ ).

Normaal wordt de doorlatendheid van het filter in de berekeningen gelineariseerd bij  $i = 0,3$ . Dit kan als volgt omgerekend worden:

- Eerst wordt de korrelgrootte en porositeit geschat die past bij  $q = 3$  mm/s en  $i = 0,06$ . Omdat het filter was ingezand, zal de porositeit vrij laag zijn: bijvoorbeeld  $n = 0,25$ . De korrelgrootte wordt hiermee:  $D_{f15} = 6$  mm
- Vervolgens wordt de gelineariseerde doorlatendheid bepaald bij  $i = 0,3$  met  $D_{f15} = 6$  mm en  $n = 0,25$ :  $k = 0,04$  m/s.

Deze doorlatendheid is opmerkelijk groot en ook de karakteristieke korrelgrootte van het filtermateriaal is erg groot, terwijl het filter vol met zand zat. Kennelijk zijn er al snel kanaaltjes in het filter ontstaan waar een behoorlijk debiet door kon worden afgevoerd.

Voor het berekenen van de doorlatendheid van de toplaag aan de hand van de lek lengte is de doorlatendheid nodig van het filter gedurende de proeven ( $k' = kbD/\Lambda^2$ ). Doordat deze niet constant gebleven is, is een schatting gemaakt van de ontwikkeling van de doorlatendheid



van het filter. Met de bovenstaand berekende doorlatendheid van het filtermateriaal zijn de eerste proeven uit de drie series doorgerekend. Zodra de migratie van het filtermateriaal op gang komt, is de doorlatendheid verdubbeld, en als de migratie grote vormen aanneemt, is het nogmaals verdubbeld. Hierdoor is gerekend met  $k = 0,04$  m/s in proef P00 t/m P02 en P11, P11B, P17 en P18, met  $k = 0,08$  m/s in proef P12 t/m P15 en P19, en met  $k = 0,15$  m/s in proef P16, P20 en P21.

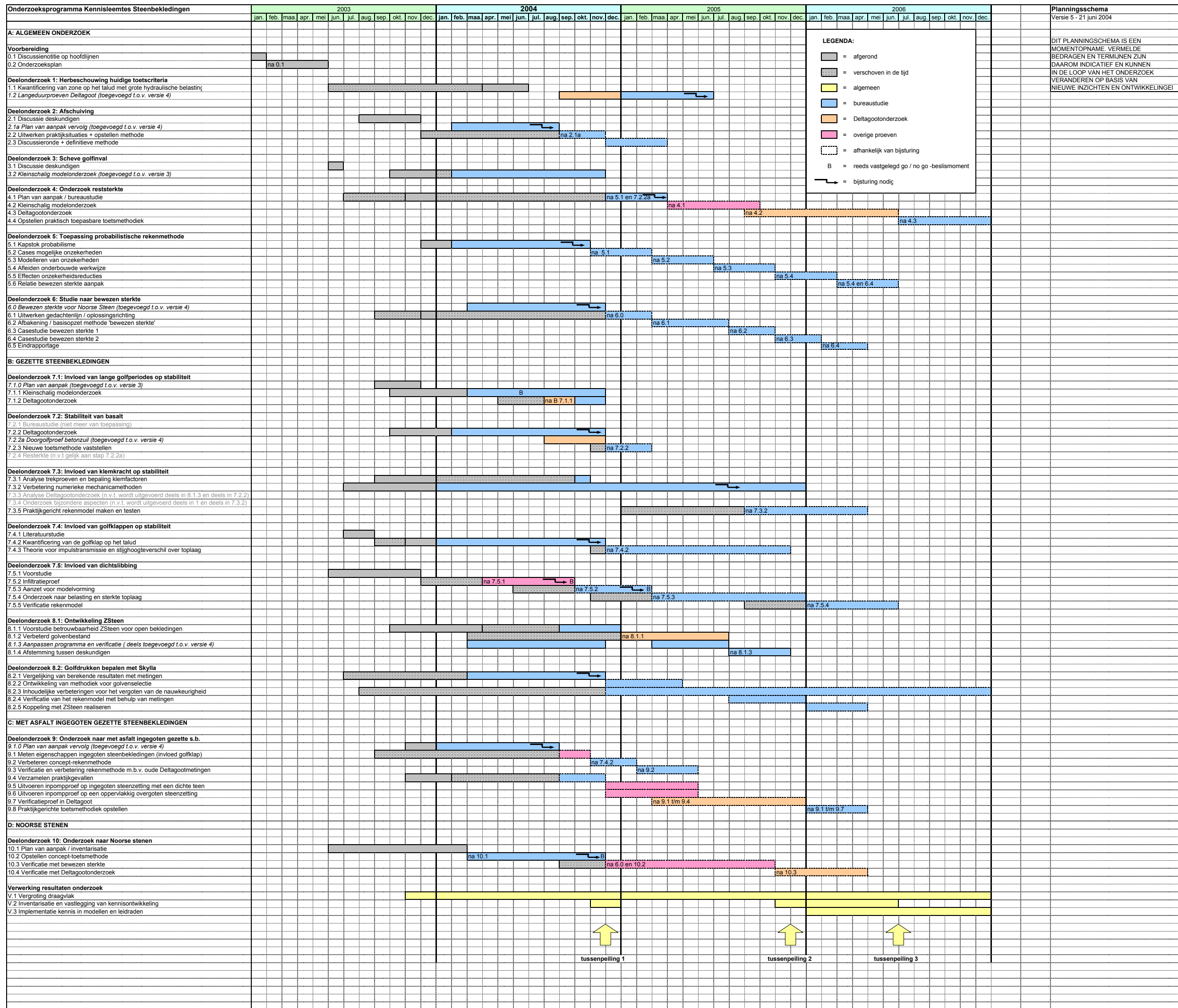
In Tabel F.3-1 is de geschatte doorlatendheid van het filter en de daarmee berekende doorlatendheid van de toplaag gegeven. Ter illustratie is ook een bijbehorende spleetbreedte berekend als deze spleten 2 m uit elkaar zitten in serie 1, en 3 m uit elkaar zitten in serie 2.

De nauwkeurigheid van deze rekenresultaten is door de vele aannamen uiteraard maar beperkt.



# **G Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen**





**LEGENDA:**

- = afgerond
- = verschoven in de tijd
- = algemeen
- = bureaustudie
- = Deltagootonderzoek
- = overige proeven
- = afhankelijk van bijsturing
- B = reeds vastgelegd go / no go -beslismoment
- = bijsturing nodig

DIT PLANNINGSCHEMA IS EEN MOMENTOPNAME. VERMELDE BEDRAGEN EN TERMIJNEN ZIJN DAAROM INDICATIEF EN KUNNEN IN DE LOOP VAN HET ONDERZOEK VERANDEREN OP BASIS VAN NIEUWE INZICHTEN EN ONTWIKKELINGEN!

