

Opdrachtgever:

RWS Zeeland, Projectbureau Zeeweringen

Stabiliteit van steenzetting met blokken op hun kant

Grootschalig onderzoek in Deltagoot

Rapport

oktober 2007

Opdrachtgever:

RWS Zeeland, Projectbureau Zeeweringen

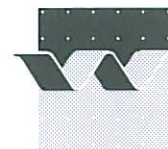
Stabiliteit van steenzetting met blokken op hun kant

Grootschalig onderzoek in Deltagoot

G. Wolters & M. Klein Breteler

Rapport

oktober 2007



OPDRACHTGEVER:		Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau Zeeweringen					
TITEL:		Stabiliteit van steenzetting met blokken op hun kant					
SAMENVATTING:		<p>Bij de renovatie van de steenzettingen in Zeeland komen veel betonblokken van 50 x 50 cm² met diktes van 15 tot 30 cm beschikbaar. Het is zeer wenselijk om deze betonblokken te hergebruiken als op hun kant geplaatste blokken met een toplaagdikte van 50 cm. De toepasbaarheid van de blokken op hun kant is echter beperkt door de vrij conservatieve rekenregels die thans gehanteerd worden.</p> <p>Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau Zeeweringen, heeft WL Delft Hydraulics opdracht gegeven de stabiliteit van blokken op hun kant in de Deltagoot op prototypeschaal te beproeven, teneinde tot scherpere ontwerpregels te komen. Het is de verwachting dat daardoor het toepassingsgebied van de blokken op hun kant aanzienlijk verruimd kan worden.</p> <p>Voor deze proeven zijn blokken van 50 x 50 x 25 cm³ gebruikt om in de Deltagoot van WL Delft Hydraulics een steenzetting met schaal 1:1 en met een helling van 1:3 op te bouwen.</p> <p>Dit rapport beschrijft de opzet van de proeven in de Deltagoot, de uitvoering van het proevenprogramma en de resultaten van het onderzoek.</p>					
REFERENTIES:		Contract ZLDO 3,070541 Contactpersoon opdrachtgever: Y. Provoost					
VER	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING		
0	G. Wolters M. Klein Breteler	1 augustus 2007		B. Hofland	W.M.K. Tilmans		
1	G. Wolters M. Klein Breteler	9 oktober 2007		B. Hofland	M.R.A van Gent		
PROJECTNUMMER:		H4941					
TREFWOORDEN:		steenzetting, klemming, taludbekledingen					
AANTAL BLADZIJDEN:		115					
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

1	Inleiding	1
2	Modelopstelling Deltagoot	3
	2.1 Meetlocatie Deltagoot	3
	2.2 Opzet van de proeven	3
	2.3 Drukmetingen	5
	2.4 Krachtopnemers bij de teen	7
	2.5 Golfhoogte	8
3	Proevenprogramma	11
4	Resultaten	15
	4.1 Spleetbreedten	15
	4.2 Profielen van taludoppervlak	16
	4.3 Observaties	18
5	Analyse	21
	5.1 Proeven uit het verleden op schaal 2,5	21
	5.2 Stabiliteitsparameter F	22
	5.2.1 Proeven uit het verleden op schaal 2,5	22
	5.2.2 Huidige proeven	23
	5.3 Vergelijking met rekenmodellen	24
	5.4 Leklengte bepaald uit de stijghoogtemetingen	28
	5.5 Spleetbreedte berekend uit de leklengte	29
6	Aanbeveling voor de praktijk	31
7	Conclusies	33
	Referenties	35

Bijlagen

A Tabellen

B Figuren

C Profielen van taludoppervlak

C.1 Gemiddelde taludoppervlak ten opzichte van begin 3

C.2 Gemiddelde taludoppervlak ten opzichte van vorige proef..... 7

C.3 Taludoppervlak voor elke raai t.o.v. vorige proef..... 11

D Leklengte uit drukmetingen

D.1 Inleiding 3

D.2 Modelopstelling..... 3

D.3 Berekeningmethode 4

D.3.1 Massabalans..... 4

D.3.2 Gemiddelde stijghoogte op de toplaag en in het filter..... 6

D.3.3 Leklengte 10

D.4 Alternatieve modelopstelling 10

D.5 Keuze t.a.v. onderlinge afstand drukopnemers 12

D.6 Locatie van de drukopnemers..... 15

D.6.1 Verwachte stijghoogteverloop op de toplaag 16

D.6.2 Locatie van de drukopnemers 20

Referenties 20

E Foto's

F Matlab programma

Symbolenlijst

Symbol	Eenheid	Betekenis
B	(m)	Blokbreedte
D	(m)	Dikte van de toplaag
D_n	(m)	Nominale diameter van granulair materiaal
D_f	(m)	Zeefdiameter van granulair materiaal
$E(f)$	(m ² /s)	Energiedichtheid als functie van f
F	(-)	Stabiliteitsparameter ($\xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$)
H_{m0}	(m)	Significante golfhoogte, bepaald uit het spectrum.
H_{max}	(m)	Maximale golfhoogte
H_s	(m)	Significante golfhoogte, gemiddelde golfhoogte van de 1/3 hoogste golven
H_{sA}	(m)	Maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens ANAMOS zonder rekening te houden met de 6-ksi-regel
H_{sN}	(m)	Significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven
L	(m)	Bloklengte
N	(-)	Aantal golven tijdens een proef
Q	(m ³ /s)	Debiet door de toplaag
Q_i	(m ³ /s)	Debiet in het filter door rand i
S_f	(m ² /Hz)	Spectrale dichtheid
$T_{m-1,0}$	(s)	Spectrale golfperiode
T_p	(s)	Periode bij de piek van het golfspectrum
b	(m)	Dikte van de filterlaag
f	(Hz)	Golffrequentie
f_b	(-)	Invloedsfactor met betrekking tot belasting
f_s	(-)	Invloedsfactor met betrekking tot sterkte
g	(m/s ²)	Gravitatie versnelling
h	(m)	Waterdiepte
i	(-)	Stijghoogtegradiënt
k	(m/s)	Doorlatendheid van de filterlaag
k'	(m/s)	Doorlatendheid van de toplaag
m_0	(m ²)	Nulde moment van de energiedichtheid ($\int E(f) df$)
n	(-)	Aantal proeven
q_f	(m/s)	Specifiek debiet in filter
q'	(m/s)	Specifiek debiet door toplaag
s_{op}	(-)	Golfsteilheid op basis van de diepwater golf lengte

Symbool	Eenheid	Betekenis
α	(°)	Taludhelling
α_{bodem}	(°)	Bodemhelling voor de constructie
Δ	(-)	Relatieve soortelijke massa van de toplaagelementen $((\rho_s - \rho)/\rho)$
Λ	(m)	Leklengte
ϕ	(m)	Stijghoogte
ϕ	(m)	Gemiddelde stijghoogte in de filterlaag
ϕ_i	(m)	Stijghoogte in de filterlaag op locatie i
ϕ'	(m)	Gemiddelde stijghoogte op de toplaag
ϕ'_i	(m)	Stijghoogte op de toplaag op locatie i
ρ_s	(kg/m ³)	Soortelijke massa van toplaagelementen
ξ_{op}	(-)	Brekerparameter ($\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$)

I Inleiding

Bij de renovatie van de steenzettingen in Zeeland komen veel betonblokken van $50 \times 50 \text{ cm}^2$ met diktes van 15 tot 30 cm beschikbaar. Het is zeer wenselijk om deze betonblokken te hergebruiken als op hun kant geplaatste blokken met een toplaagdikte van 50 cm. De toepasbaarheid van de blokken op hun kant is echter beperkt door de vrij conservatieve rekenregels die thans gehanteerd worden.

In het verleden is de stabiliteit van blokken op hun kant in de Deltagoot met proeven op schaal 1:2,5 bepaald (Klein Breteler, 2000 en Klein Breteler en Eysink, 2005). Bij het vertalen van deze resultaten naar prototypeschaal is men gedwongen om aan de veilige kant te blijven. Door de onzekerheid omtrent de spleetbreedte in het schaalmodel ten opzichte van de werkelijkheid, heeft dit geleid tot vrij conservatieve rekenregels.

Rijkswaterstaat Zeeland, Projectbureau Zeeweringen, heeft WL | Delft Hydraulics opdracht gegeven de stabiliteit van blokken op hun kant in de Deltagoot op prototypeschaal te beproeven, teneinde tot scherpere ontwerpregels te komen. Het is de verwachting dat daardoor het toepassingsgebied van de blokken op hun kant aanzienlijk verruimd kan worden.



Blokken op hun kant in Zeeland

Voor deze proeven zijn blokken van $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ gebruikt om in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics een steenzetting met schaal 1:1 en met een helling van 1:3 op te bouwen.

Dit rapport beschrijft de opzet van de proeven in de Deltagoot, de uitvoering van het proevenprogramma en de resultaten van het onderzoek.

Het onderzoek is uitgevoerd o.l.v. ir. M. Klein Breteler en dr. G. Wolters, in opdracht van Rijkswaterstaat Zeeland, projectbureau Zeeweringen. Het project is inhoudelijk begeleid door ir R. 't Hart van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat.

2 Modelopstelling Deltagoot

2.1 Meetlocatie Deltagoot

De locatie van de proeven was de 240 m lange Deltagoot van WL | Delft Hydraulics. De goot is 5 m breed en 7 m diep. In deze faciliteit kunnen constructies beproefd worden op grote schaal bij een waterdiepte van 1 tot 5,5 m. De maximale golfcondities zijn golfhoogtes tot $H_s \approx 1,6$ m (onregelmatige golven) en golfperiodes van 1 tot 12 s. De maximale capaciteit is afhankelijk van de waterdiepte en de modelopstelling.

Voor de golfschotsturing kan er gebruikgemaakt worden van eerste orde en tweede orde sturing. Voor relatief korte golven op ondiepwater zorgt de tweede orde golfschotsturing ervoor dat er minder stoorgolven ontstaan in de goot omdat deze golfschotsturing beter aansluit op de relatief korte golf toppen en lange golfdalen die normaal zijn bij dit soort condities. Het golfschot is verder uitgerust met een actief reflectiecompensatiesysteem (ARC), zodat de golfenergie die reflecteert op de constructie, niet opnieuw reflecteert op het golfschot en waardoor voorkomen wordt dat deze de golfcondities beïnvloedt.



Figuur 1 Deltagoot van WL | Delft Hydraulics in de Voorst (Marknesse)

2.2 Opzet van de proeven

De modelopstelling is weergegeven in Figuur B1 en B2 in de bijlage B. Een dijkprofiel met een taludhelling van 1:3 met een kruinhoogte van 8,3 m ten opzichte van de gootbodem is voor het onderzoek gebruikt. De blokken zijn ingebouwd vanaf een hoogte van +2,24 m tot een hoogte van +5,45 m.

De kern van de dijk bestaat uit zand, met daarop een 0,3 m dikke laag zandcementstabilisatie, wat een goede weergave is van de kleilaag die normaal in de werkelijkheid wordt toegepast. Dit voorkomt grondmechanische instabiliteit tijdens de golfaanval. Op de laag zandcementstabilisatie is een geotextiel aangebracht en daarop een laagje steenslag. Deze filterlaag van steenslag is 11,5 cm dik met een korrelgrootte van 4–20 mm (D_{n10} – D_{n90}), zoals dat veel in Zeeland wordt toegepast onder blokken op hun kant. Een zeefkromme van het filtermateriaal is gegeven in Figuur B5 in bijlage B.

Op het laagje steenslag zijn de blokken op hun kant gezet (50 x 50 x 25 cm), die door de opdrachtgever beschikbaar zijn gesteld. De blokken zijn koud tegen elkaar geplaatst in halfsteensverband zonder afstandhouders.



Figuur 2 Hergebruikte betonblokken uit Zeeland

Door kleine maatafwijkingen in de blokken ontstaan er grotere en kleinere spleten tussen de blokken. Meer dan 150 spleten zijn nauwkeurig voor proef 11 en na proef 17 en 26 opgemeten. De resultaten hiervan zijn gegeven in tabel A3, A4 en A5.

Er zijn 54 spleten rond de drukopnemers, en 108 spleten verdeeld over het hele talud opgemeten, zie Figuur B4 voor de posities. De gemiddelde spleetbreedte over het hele talud bij het begin van de proeven was 2,2 mm (zie ook paragraaf 4.1). Later is nog tweemaal de spleetbreedte bepaald. Het gemiddelde van alle metingen kwam uit op 2,4 mm.



Figuur 3 Plaatsen van blokken

Van 4 blokken is de soortelijke massa bepaald: 2282,5, 2286,6, 2282,0 en 2273,9 kg/m³. De gemiddelde soortelijke massa was derhalve $\rho_s = 2281$ kg/m³.

In de modelopstelling zijn verder krachtopnemers tussen stalen balken onderaan het blokkentalud ingebouwd (zie paragraaf 2.4) en drukopnemers in de blokken voor het meten van de lokale stijghoogte op de toplaag en in het filter (zie paragraaf 2.3).

Samenvattend zijn de afmetingen van de constructie (zie figuur B1-B3, bijlage B):

- hoogte van de dijk ten opzichte van de bodem van de goot: 8,3 m
- taludhelling van 1:3
- blokken van +2,24 m boven de gootbodem tot +5,45 m boven de gootbodem van 50x50x25 cm³ die een toplaag met dikte van 50 cm vormen
- soortelijke massa van de betonblokken: 2281 kg/m³

- gemiddelde spleetbreedte tussen de blokken: 2,4 mm
- Een filterlaag van steenslag van 11,5 cm dik en $D_{f15} = 4,5$ mm
- Een dummy bekleding van beton van de gootbodem tot een hoogte van +1,90 m
- Stalen balken en krachtopnemers tussen +1,90 m en +2,24 m
- Een dummy bekleding van beton vanaf +5,45 m boven de gootbodem tot de kruin van de dijk

De proeven zijn uitgevoerd bij waterstanden van 4,34 tot 5,00 m boven de gootbodem.

Tussen de gootwand en de bekleding is een strook rubber aangebracht met een dikte van 2,4 cm, zoals dat gebruikelijk is bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klemwigt tussen de starre gootwanden en een overschatting van de stabiliteit verkregen wordt.

Elke rij blokken die ingebouwd is in de modelopstelling is voorzien van een nummer of letter. De bovenste rij is rij A, en de onderste rij boven de krachtopnemers is rij 14. Onder de krachtopnemers is ook nog een rij aanwezig: nr. 15. De onderste drukopnemer zat in rij X, de middelste in rij V en de bovenste in rij T. De kabels van de drukopnemers liepen over rij Z naar de gootwand. Het niveau van alle rijen (hart van het steenoppervlak) is gegeven in tabel A.2.



Figuur 4 Opzet in de Deltagoot

2.3 Drukmetingen

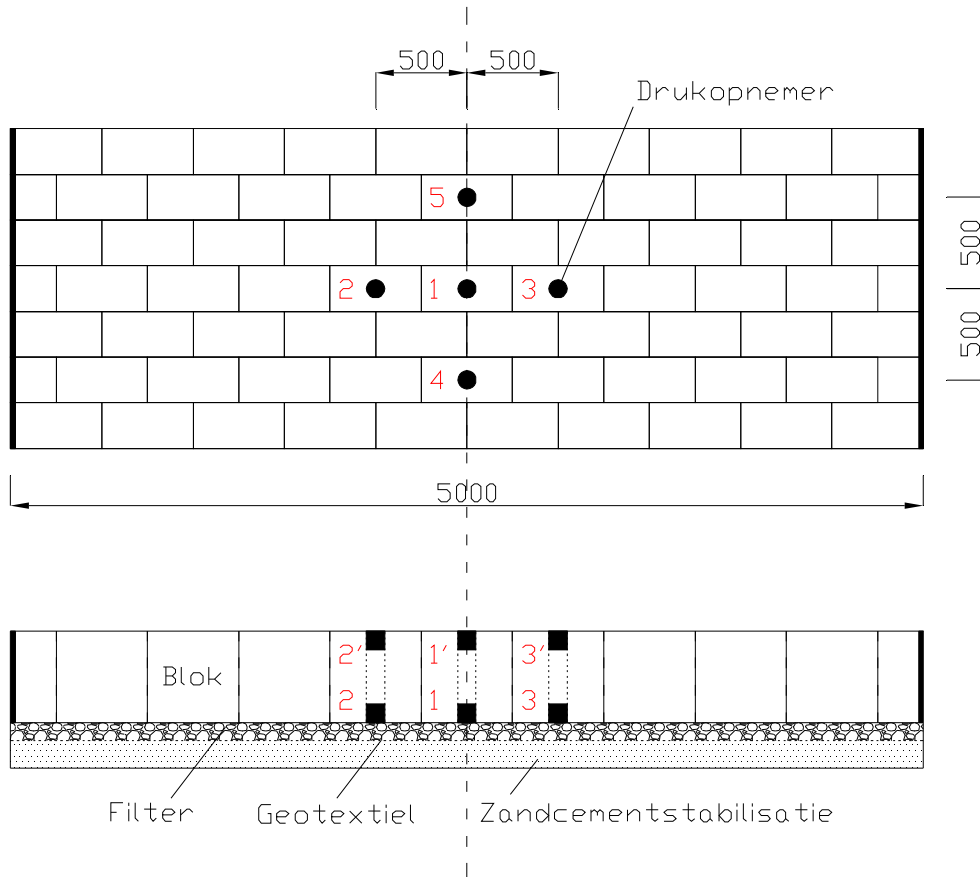
Een belangrijk probleem bij eerdere proeven met blokken op hun kant was het feit dat de bekleding op schaal 1:2,5 was ingebouwd. Het werken met kleine blokjes heeft tot gevolg gehad dat ook de spleetbreedte kleiner was dan in het prototype. Mogelijk is dit echter niet precies op schaal gerealiseerd.

Teneinde in het huidige onderzoek precies te weten welke spleetbreedte is gerealiseerd, is de spleetbreedte op twee manieren bepaald. Ten eerste d.m.v. het direct opmeten van de spleten (zie tabellen in bijlagen A3-A5), en ten tweede op een indirecte wijze via het meten van drukken op de toplaag en in het filter.

Door het lokale stijghoogteverschil over de toplaag, en de verandering van de gradiënt (verhang) in het filter als functie van de locatie te meten, is het mogelijk de leklengte te

berekenen. Vervolgens kan met de doorlatendheidsformules de bijbehorende spleetbreedte berekend worden. Dit is nader uitgewerkt in bijlage D.

Dit maakt het interpreteren van de resultaten en het vertalen van resultaten naar de praktijk beter mogelijk.



Figuur 5 Schematische opzet van drukopnemers (bovenaanzicht en dwarsdoorsnede)

Ten behoeve van het bepalen van de lek lengte zijn er 10 drukopnemers in de toplaag opgenomen, waarvan 5 aan de onderzijde (aangegeven met nummers zonder accent) van de toplaag en 5 aan de bovenzijde (aangegeven met nummers met accent), zie figuur 5. De onderste drukopnemers zaten in rij X, de middelste in rij V en de bovenste in rij T. De locatie van de drukopnemers ten opzichte van de gootbodem en rechter gootwand (meetcabinezijde) is gegeven in tabel 1.

In bijlage D is beargumenteerd dat het meten van de drukken in een diep stijghoogtefront, ter plaatse van het grootste stijghoogteverschil, uiteindelijk de nauwkeurigste lek lengte oplevert. Daarom zijn de drukopnemers op een zodanig niveau op het talud geplaatst, dat de middelste drukopnemer midden in de zone zit waar de voet van de hoge stijghoogtefronten zich bevindt. Daar treden ook de grootste stijghoogteverschillen op. Dit is nader uitgewerkt in bijlage D.

Tijdens de proeven is gebleken dat de voet van het stijghoogtefront doorgaans iets lager zit dan verwacht was op basis van oude proeven met een flauwer talud. Daarom is in de loop van de proevenprogramma de waterdiepte iets verhoogd, zodat de drukopnemers iets dieper onder water zitten.

DRO (rapport)	DRO (meetverslag)	rij	onder/op toplaag	hoogte boven de gootbodem (m)	afstand tot gootwand (m)
1'	3	V	op	3,706	2,272
1	4	V	onder	3,232	2,272
2'	7	V	op	3,709	2,770
2	8	V	onder	3,235	2,770
3'	9	V	op	3,710	1,765
3	10	V	onder	3,236	1,765
4'	1	X	op	3,546	2,269
4	2	X	onder	3,072	2,269
5'	5	T	op	3,872	2,260
5	6	T	onder	3,400	2,260

Tabel 1 Locatie van de drukopnemers; gootwand = meetcabinezijde

In bijlage D is ook aandacht besteed aan de nauwkeurigheid waarmee de leklengte op basis van de stijghoogtemetingen kan worden bepaald. Dit heeft ook de keuze beïnvloed om de drukopnemers op een onderlinge afstand van 0,5 m te plaatsen.

Uit de berekeningen blijkt dat een realistische bovengrens van de mogelijke fout in de stijghoogtemetingen een fout van 30% in de leklengte en 35% in de toplaagdoorlatendheid geeft. Als echter de Λ op meerdere momenten bepaald wordt, en vervolgens de resultaten gemiddeld worden, is een aanzienlijke reductie van de fout te verwachten. Geconcludeerd wordt dat met de stijghoogtemetingen de spleetbreedte met een maximale fout van 20% kan worden bepaald. Het levert daardoor belangrijke extra informatie ten opzichte van de direct gemeten spleetbreedte met een meetlatje en voeler.

De drukopnemers zijn ingebouwd in een metalen buis die in een uitgeboord gat in het centrum van de testblok gestopt is. De drukopnemers hebben een meetbereik van 1 bar (10 m water kolom) en zijn met 200 Hz bemonsterd.

De goede werking van de drukopnemers is gecontroleerd door de waterstand stap voor stap te verhogen en steeds de stijghoogte te meten.

2.4 Krachtopnemers bij de teen

Ten behoeve van een ander onderzoek, gericht op het meten van de normaalkracht in het vlak van de steenzetting (opdracht van directie Zeeland, ZLDO 35070541), zijn onderin het blokkentalud twee horizontale stalen balken geplaatst met daartussen twee krachtopnemers (zie figuur 6). Hiermee is het mogelijk om de normaalkracht in het vlak van de steenzetting te meten. Dit is de kracht die de stenen uitoefenen op de teen van de dijkbekleding.

De normaalkracht in een steenzetting is relevant voor de grootte van de klemming tussen de stenen. Naarmate de normaalkracht groter is, zal het meer kracht kosten om een afzonderlijke steen uit de steenzetting te trekken, mits deze steen niet volledig los in de steenzetting zit. Deze metingen leveren belangrijke gegevens toe aan het onderzoek naar de invloed van klemming op stabiliteit van steenzettingen (Peters, 2007).

Tekeningen van de stalen balken en krachtopnemers zijn gegeven in figuur B2 en B2a in bijlage B.



a) Links: krachtopnemer (15 ton bereik), Rechts: inbouw van krachtopnemer



b) Ingebouwde teenconstructie

Figuur 6 Krachtmetingen op teenconstructie

2.5 Golfhoogte

De golfhoogte werd gemeten door middel van 3 golfhoogtemeters. De eerste golfhoogtemeter werd geïnstalleerd op 80 m vanaf de golfschot. De afstanden tussen de golfhoogtemeters (GHM) zijn bepaald door de techniek van Mansard & Funke (1980). Met deze methodiek kunnen de inkomende en gereflecteerde golven bepaald worden. De calibratie van de GHMs is gecontroleerd door middel van verplaatsbare golfhoogtemeters van het type “oppervlaktevolger”.

Door middel van de signalen zijn de volgende parameters bepaald: spectrale dichtheid $S(f)$ (m^2/Hz), piekperiode T_p (s) van het spectrum, golfhoogte-overschrijdingskrommen,

inkomende en gereflecteerde significante golfhoogte op basis van energie ($H_{m0,i}$ (m) en $H_{m0,r}$ (m)). De gerapporteerde H_s is in dit rapport gelijk aan $H_{m0,i}$. Voorbeelden van de overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra zijn gepresenteerd in figuren B.6-B.18, bijlage B.

3 Proevenprogramma

Het proevenprogramma is uitgevoerd in twee series proeven, namelijk proef 11 t/m 17 in de eerste serie en proef 21 t/m 26 in de tweede serie. De eerste serie is uitgevoerd met een golfsteilheid $s_{op} \approx 0,035$ en de tweede serie met relatief lange golven met $s_{op} \approx 0,020$. De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz spectrum omdat dit een goede benadering is voor de zeeegang langs de Nederlandse kust.

Vanwege de duur van de proeven, en het soms optreden van problemen met de golfschotsturing, zijn een aantal proeven in verschillende delen uitgevoerd. De golfcondities van elke proefdeel zijn weergegeven in tabel A1 in bijlage A. Voorbeelden van de golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra zijn gepresenteerd in figuren B.6-B.18, bijlage B.

In tabel 2 zijn de golfcondities gegeven per proef, die zijn samengesteld uit de proefdelen. In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

h	=	waterdiepte (m)
H_s	=	significante golfhoogte (m)
H_{max}	=	grootste gemeten inkomen golfhoogte (m)
s_{op}	=	golfsteilheid op basis van diepwater golfenlengte (-)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode (s)
F	=	$\xi_{op}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$ = stabiliteitsparameter (-)
s_{op}	=	$H_s / (1,56 T_p^2)$ = golfsteilheid (-)
ξ_{op}	=	$\tan \alpha / \sqrt{H_s / (1,56 T_p^2)}$ = brekerparameter (-)
N	=	aantal golven tijdens de proef (-)
α	=	taludhelling ($^\circ$)
Δ	=	$(\rho_s - \rho) / \rho$ = relatieve ondergedompelde soortelijke massa van de stenen (-)
D	=	dikte van de toplaag (m)

proef	h (m)	H_s (m)	H_{max} (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	duur (uur)	N (-)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$H_s / (\Delta D)$ (-)	F (-)
T11	4,340	1,20	1,79	4,76	4,38	1,18	1125	0,034	1,81	1,87	2,78
T12	4,450	1,39	1,82	5,14	4,85	1,28	1146	0,034	1,82	2,16	3,22
T13	4,530	1,50	1,95	5,44	5,13	1,35	1134	0,032	1,85	2,34	3,53
T14	4,430	1,50	1,99	5,51	5,17	3,00	2523	0,032	1,87	2,34	3,56
T15	4,700	1,53	2,15	5,45	5,15	4,58	3850	0,033	1,84	2,38	3,57
T16	4,630	1,55	2,10	5,54	5,23	7,64	6387	0,033	1,85	2,43	3,66
T17	4,819	1,57	2,17	5,14	5,19	10,25	8398	0,038	1,71	2,45	3,50
T21	4,900	1,49	2,08	6,56	6,12	1,69	1214	0,022	2,24	2,33	3,98
T22	4,985	1,58	2,21	7,08	6,41	1,78	1252	0,020	2,35	2,46	4,35
T23	4,900	1,56	2,33	7,15	6,36	3,13	2144	0,020	2,39	2,43	4,34
T24	4,789	1,56	2,23	6,88	6,34	5,00	3561	0,021	2,29	2,44	4,24
T25	4,887	1,57	2,39	7,03	6,38	8,00	5669	0,020	2,33	2,46	4,32
T26	4,985	1,59	2,27	7,10	6,36	8,25	5646	0,020	2,35	2,48	4,37

Tabel 2 Proevenprogramma met gerealiseerde waarden

Het berekenen van de golfcondities van de samengestelde proefdelen is gedaan op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven):

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i m_{-1i})}{\sum_{i=1}^n (N_i m_{0i})}$$

$$T_p / T_{m-1,0} \approx \text{constant}$$

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

$$T_{pN} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{pi})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i}$$

met:

H_{sN} = significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)

T_{pN} = 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 = golffrequentie = $1/T$ (Hz)

Op dezelfde wijze kunnen de uitgevoerde proeven met de hoogste golfcondities samengesteld worden. Het resultaat hiervan is gegeven in tabel 3.

proef	h (m)	H_s (m)	H_{max} (m)	T_p (s)	$T_{m-1,0}$ (s)	duur (uur)	N (-)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	F (-)
T13-17	4,686	1,55	2,17	5,36	5,19	26,82	22292	0,035	1,79	2,41	3,57
T22-26	4,906	1,57	2,39	7,04	6,36	26,16	18272	0,020	2,34	2,46	4,33

Tabel 3 Samengestelde golfcondities van de proeven met hoogste golven

Tijdens proef 17A waren er problemen met de golfschotsturing, waardoor deze proef is uitgevoerd met een iets afwijkende golfconditie, namelijk $H_s = 1,61$ m en $T_p = 4,64$ s (zie tabel A1 in bijlage A). Omdat dit slechts een klein deel was van de totale belastingduur bij

deze golfcondities (3,5 uur van 26,82 uur) hebben deze afwijkingen een verwaarloosbare invloed op het resultaat. Tijdens deze proef is ook geen blokbeweging geconstateerd.

Na elke proef is de hoogte van het taludoppervlak ingemeten met de 'profilier', zie paragraaf 4.2. Na elke 3 à 4 proeven is de waterstand verlaagd om het talud ook visueel te inspecteren.

Tijdens de proeven zijn opnamen gemaakt met een digitale home-camcorder.

4 Resultaten

4.1 Spleetbreedten

Op drie momenten in het proevenprogramma zijn vele spleten tussen de blokken opgemeten, namelijk na proef 11, 17 en 26. Er zijn spleten opgemeten rondom 16 blokken verdeeld over het hele talud, en rondom alle blokken bij de drukopnemers. De locaties van de blokken waarvan de spleten zijn opgemeten zijn gegeven in figuur B.4. De resultaten staan in tabel A3 t/m A5 in bijlage A, waarbij steeds de spleten rondom de blokken met drukopnemers in de bovenste tabel staan, en de spleten verdeeld over het hele talud (behalve rondom de drukopnemers) in de onderste tabel.

Na proef 11 was de gemiddelde spleetbreedte 2,2 mm. Na proef 17 en 26 is een iets grotere spleetbreedte gemeten, namelijk respectievelijk 2,4 mm en 2,5 mm. Deze verschillen zijn echter zo klein dat ze niet significant genoemd kunnen worden. Het is waarschijnlijk veroorzaakt door de beperkte nauwkeurigheid van het meetresultaat. De gemiddelde spleetbreedte van de 3 momenten waarop dit gemeten is, was 2,4 mm.

Rondom de drukopnemers was de spleetbreedte na proef 11 ongeveer 2,3 mm. Na proef 17 was dit toegenomen tot 2,9 mm en is het ook gebleven tot na proef 26. De vergroting van de gemiddelde spleetbreedte rondom de drukopnemers is waarschijnlijk veroorzaakt door de zware golfaanval in dit gebied, waarbij blokken wat gaan verschuiven. Elders zijn de spleten kleiner geworden.

De maximale spleetbreedtevergroting op een specifieke locatie tijdens de proeven was 7,9 mm (in rij R-S) en de maximale spleetbreedtevermindering was 9 mm (in rij S-T). In het gebied van de drukopnemers was de maximale spleetbreedtevergroting 4,6 mm (rij V-W) en de maximale spleetbreedtevermindering 8,4 mm (rij V).



Figuur 7 Waterbeweging uit spleten

Verder is uit de metingen gebleken dat de spleten aan de rechterzijde groter zijn dan aan de linkerzijde (kijkend vanaf het golfschot naar het talud). Aan de meetcabinezijde (rechterzijde) was de spleetbreedte ongeveer anderhalve mm groter dan aan de andere zijde, zie tabel 4. Tijdens de proeven was ook duidelijk zichtbaar dat aan de rechterzijde er meer water uit het talud stroomt tijdens de golfneerloop, dan aan de linkerzijde (zie Figuur 7). Aan de hand van foto's is duidelijk komen vast te staan dat het schuimende/bruisende water aan de rechterzijde van het talud uit de spleten omhoog komt, en niet veroorzaakt wordt door het langs het talud omlaag stromende water.

Gemiddelde spleetbreedte rijen FG-MN		
	Halzijde	Meetcabinezijde
Proef 11	1.45	3.07
Proef 17	1.03	2.35
Proef 26	1.01	2.84

Tabel 4 Gemiddelde spleetbreedten voor rijen FG-MN

Tijdens de proeven is een spleet van 10 à 20 mm aan de bovenkant van het blokkentalud ontstaan, tussen de blokken en het erboven gelegen betontalud, zie Figuur 11. Deze spleet kan veroorzaakt zijn zowel door de indrukking van de krachtopnemers op de teen van de bloklaag als door het zetten van de bloklaag met de tijd. Die tweede reden kan alleen geldig zijn als de gemiddelde spleetbreedte over het hele talud afneemt met de tijd, maar dat bleek niet zo te zijn. Bij het uitbreken van de constructie zal gekeken worden of de afstand tussen de stalen balken (onder erboven de krachtopnemers) verder uit elkaar zitten als de normaalkracht door het verwijderen van de blokken is verdwenen.

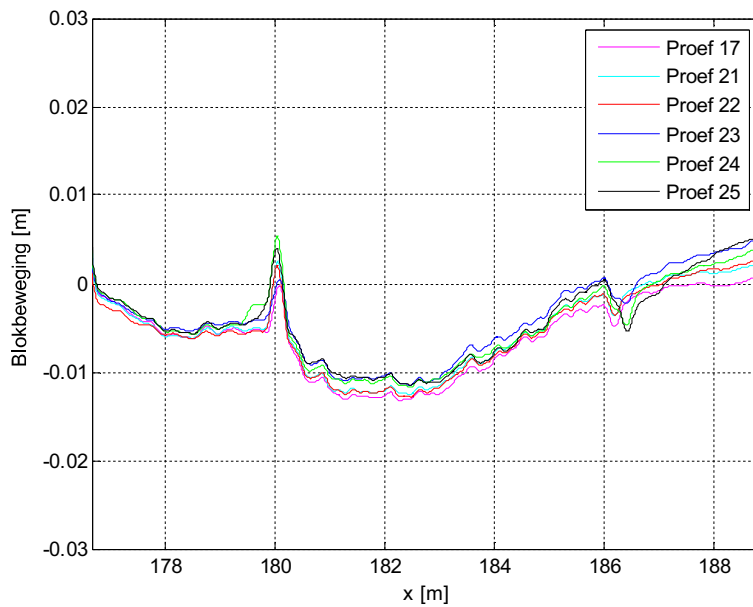
4.2 Profielen van taludoppervlak

Het niveau van het taludoppervlak is na elke proef langs 9 raaien gemeten met een profielvolger. Dit apparaat bestaat uit een wieltje dat over het taludoppervlak rijdt, terwijl het niveau van het wieltje wordt vastgelegd in de computer (zie Figuur 8). Dit levert een nauwkeurig profiel op van de bekleding.

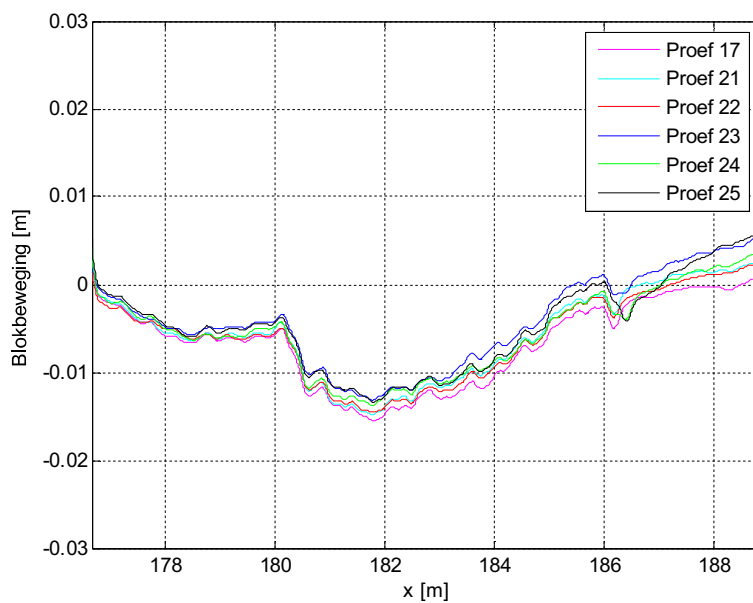
De posities van de profielmetingen zijn gegeven in Figuur B.4 en Tabel A.2b.



Figuur 8 Links: inmeten van taludoppervlak, rechts: blokbeweging na proef 17a (blokrij Y)



Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen, inclusief de profielen met bekabeling bij $X \approx 180$ m.



Gemiddelde niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 5-9, waarin geen kabel in het profiel voorkomt.

Figuur 9 gemeten niveau van het taludoppervlak ten opzichte van het begin van de serie.

Het gemiddelde van deze 9 raaien, ten opzichte van het niveau aan het begin van de proeven, is gegeven in figuur 9 en C1 t/m C3 in bijlage C1. De relatieve beweging van het taludoppervlak ten opzichte van het voorgaande proef is gegeven in figuur C4 t/m C6 in bijlage C2. Steeds is de bovenste figuur een weergave van het gemiddelde van alle raaien,

terwijl de onderste figuur het gemiddelde geeft van raai 5 tot en met 9. Deze laatste zijn niet beïnvloed door de kabel op het talud.

In figuur C7 t/m C20 in bijlage C3 is voor elke raai afzonderlijk het niveau van het taludoppervlak gegeven ten opzichte van de voorgaande proef. In raaien 1 tot en met 4 is duidelijk een bult of kuil te zien ter hoogte van $x = 180$ m (blokrij Z-Y) als gevolg van de draad van de drukopnemers die niet altijd precies op dezelfde plek lag. Deze piek duidt niet op blokbeweging.

De andere piek omlaag is op de gootpositie 186,0 à 186,5 m te zien. Dit was de bovenkant van de ingebouwde bloklaag. Hier is het later gestorte beton tussen de blokken en het dummy-talud van beton een paar mm gekanteld.

De maximale opwaartse blokverplaatsing ten opzichte van naast liggende blokken was gevonden in blokrij Z-X (180,2 -180,6 m) op het niveau van de onderste drukopnemer. Figuur 8 en foto's 13 en 19 in bijlage E geven een indruk van deze opwaartse verplaatsing. De maximale gemeten individuele opwaartse blokbeweging was gemiddeld over het hele blok 15 mm. Doordat het blok een beetje scheef zat, stak het plaatselijk ca. 30 mm omhoog, zie Figuur 8.

Deze opwaartse verplaatsing is klein ten opzichte van de toplaagdikte en kan daarom niet gezien worden als (begin van) schade.

In vergelijking met het uitgangstalud was de maximale cumulatieve verzakking (haaks op het talud omlaag) 19 mm, namelijk in blokrij S, dwarsprofiel 9 (positie 182,2 m). Dit is in Figuur 9 niet te zien, omdat daar het gemiddelde over de 9 raaien is getekend.

4.3 Observaties

Tijdens de proeven zijn foto's van de schadeontwikkeling en golfbelasting gemaakt en observaties genoteerd. Golfhoogtes, drukken en krachten zijn tijdens de proeven gecontroleerd om eventueel bezwijken van het talud of de meetapparatuur zo snel als mogelijk te herkennen.



Figuur 10 Golfbelasting tijdens de proeven

Al tijdens de eerste paar proeven is aan de halzijde in rij Y een blok iets omhoog gekomen. Later is vastgesteld dat dit blok volledig los in de bekleding zat. Na de eerste beweging van ca 15 mm, is dit blok niet meer verder uit de bekleding gekomen.

Proef 11 ($H_s = 1,2 \text{ m}$, $T_p = 4,76 \text{ s}$, $h = 4,34 \text{ m}$, $t = 1,18 \text{ h}$)

Tijdens het golfneerloop was veel waterbeweging uit de blokspleten geobserveerd. Op de rechter kant (meetcabinezijde) was deze waterbeweging altijd groter. Desondanks was geen beweging van de blokken te zien.

Na ~5 minuten golven is de krachtopnemer aan de linkerkant (halzijde) kapot gegaan. Er was besloten met één werkende krachtopnemer verder te golven (krachtmeting op één kant, meetcabinezijde) omdat op korte termijn geen nieuwe krachtopnemer beschikbaar was en de moeite voor het vervangen onredelijk hoog bleek.

Proef 12 ($H_s = 1,39 \text{ m}$, $T_p = 5,14 \text{ s}$, $h = 4,45 \text{ m}$, $t = 1,28 \text{ h}$)

Het was geobserveerd dat de meeste golven precies op het midden van het kruis van drukopnemers (rij V) breken (niveau van golfneerloop). De geobserveerde variatie van het breekpunt was vanaf rij X tot rij O/P. Er werd vastgesteld dat de golfhoogte iets aan de lage kant was. Dus was de golfhoogte aangepast in de volgende proeven. Ook in deze proef was geen beweging van de blokken te zien.

Proef 13 ($H_s = 1,5 \text{ m}$, $T_p = 5,44 \text{ s}$, $h = 4,53 \text{ m}$, $t = 1,35 \text{ h}$)

In blokrij Y (halzijde) is een blok ca. 10 mm uit de bekleding omhoog gekomen. Verder is geen significante blokbeweging geobserveerd.

Proef 14 ($H_s = 1,5 \text{ m}$, $T_p = 5,51 \text{ s}$, $h = 4,43 \text{ m}$, $t = 3 \text{ h}$)

Er is vastgesteld dat een spleet aan de bovenkant van de blokken (aansluiting met beton) ontstond met een breedte van ca. 5 à 10 mm.



Figuur 11 Spleet aan bovenkant van bloklaag (links: na proef 16b, rechts: na proef 23)

Proef 15 ($H_s = 1,53 \text{ m}$, $T_p = 5,45 \text{ s}$, $h = 4,7 \text{ m}$, $t = 4,58 \text{ h}$)

Voor deze proef was de waterstand verhoogd op $h = 4,7 \text{ m}$ omdat de geobserveerde maximale stijghoogte sommige blokrijen lager dan de onderste drukopnemer was. Een

verdere verhoging naar $h_{\max} = 4,99$ m is uitgevoerd in de volgende proeven om de invloed van een hogere waterstand te bekijken.

Proef 16 ($H_s = 1,55$ m, $T_p = 5,54$ s, $h = 4,63$ m, $t = 7,64$ h)

Het zakken van de blokken aan de bovenkant van het talud (aansluiting met beton) bleek te stoppen tijdens deze proef bij een spleetbreedte van ca. 10 à 20 mm, zie Figuur 8.

Proef 17 ($H_s = 1,57$ m, $T_p = 5,14$ s, $h = 4,82$ m, $t = 10,25$ h)

Na deze proef is de waterstand verlaagd en zijn de spleten opgemeten rond de drukopnemers en langs het talud, zie hoofdstuk 4.1. De gemiddelde spleetbreedte na proef 17 was 2,4 mm. Tijdens deze proef (T17a) zijn problemen met de voeding van het golfschotschot ontstaan waardoor de golfcondities niet helemaal zo waren als bedoeld. Een deel (2 uur) van de proef is herhaald.

Proef 21 ($H_s = 1,49$ m, $T_p = 6,56$ s, $h = 4,9$ m, $t = 1,69$ h)

Geen bijzondere voorvallen.

Proef 22 ($H_s = 1,58$ m, $T_p = 7,08$ s, $h = 4,99$ m, $t = 1,78$ h)

Geen bijzondere voorvallen.

Proef 23 ($H_s = 1,56$ m, $T_p = 7,15$ s, $h = 4,9$ m, $t = 3,13$ h)

Ook tijdens deze proef zijn problemen met de golfschotsturing opgetreden en een deel van de proef is daarom herhaald. Verder raakte de kabel van de krachtopnemers los tijdens proef T23a (zie tabel A1 in bijlage A). De proeven zijn gestopt, de waterstand verlaagd en het kabel gerepareerd.

Proef 24 - 26

Geen bijzondere voorvallen. Na proef 26 is de waterstand verlaagd en zijn de spleten opgemeten rond de drukopnemers en langs het talud. De gemiddelde spleetbreedte over het hele talud na proef 26 was 2,5 mm.

5 Analyse

De resultaten uit hoofdstuk 4 tonen aan dat de bloklaag zijn stabiliteitsgrens in deze proeven niet bereikt had omdat de belasting in de Deltagoot niet zo hoog kon worden opgevoerd dat er instabiliteit optrad. Om de stabiliteit van de bloklaag in te schatten is dus in de volgende hoofdstukken een vergelijking gedaan met de stabiliteitsgrenzen van steenzettingen uit eerdere onderzoeken. Berekeningen met Anamos zijn gebruikt om de stabiliteitsgrens van de beproefde steenzetting te bepalen.

In paragraaf 5.1 zijn de stabiliteitsonderzoeken uit het verleden gepresenteerd. In hoofdstuk 5.2 zijn de berekende stabiliteitsgetallen van de toenmalige onderzoeken en de huidige proeven onderzocht. In paragraaf 5.3 worden de resultaten in detail vergeleken. In paragraaf 5.4 en 5.5 worden de gemeten drukken gebruikt om de leklengten en spleetbreedten voor de huidige proeven te berekenen. Deze leklengten verklaren de grote gemeten stabiliteit voor een groot deel.

5.1 Proeven uit het verleden op schaal 2,5

In het verleden is tweemaal onderzoek in de Deltagoot uitgevoerd naar de stabiliteit van blokken op hun kant. Deze onderzoeken werden gedaan op schaal 2,5. Deze proeven zijn toen uitgevoerd met blokjes van 20x20x10 cm³.

onderzoek	proef	H _s (m)	T _p (s)	N (-)	duur (uur)	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	H _s /ΔD (-)	F (-)	schade
KB '00	12ao4	1,23	4,30	1000	1,09	0,043	1,38	4,67	5,80	0 cm beweging
KB '00	12ao5	1,40	4,70	1000	1,19	0,041	1,42	5,32	6,71	12 cm beweging
KB '00	12ao8	1,00	4,90	1000	1,24	0,027	1,75	3,80	5,51	2 cm beweging
KB '00	12ao9	1,27	5,50	500	0,69	0,027	1,74	4,82	6,98	1 blok eruit
KB '00	12ao10	0,73	5,20	1000	1,31	0,017	2,17	2,77	4,65	2 cm beweging
KB '00	12ao11	0,84	5,50	1000	1,62	0,018	2,14	3,19	5,30	5 cm beweging
KB '00	12ao13	1,24	6,60	1000	1,67	0,018	2,12	4,71	7,76	8 cm beweging
KB&E '05	serie 1	0,82	4,38	3466	3,62	0,027	1,73	3,10	4,47	1 blok eruit
KB&E '05	serie 2	0,64	3,84	7712	6,37	0,028	1,71	2,44	3,49	1 blok eruit
KB&E '05	serie 3	0,53	3,44	46757	40,00	0,028	1,70	2,00	2,84	9 cm beweging

Tabel 5 Golfcondities en opgetreden schade bij enkele proeven uit het verleden

Enkele eigenschappen van de bekledingen met koud tegen elkaar geplaatste blokjes zijn (maten op modelschaal):

- Klein Breteler (2000), serie 12a:
 - talud van 1:3,5 met 5 m brede berm op +5,00 m ten opzichte van de gootbodem
 - blokjes van 20x20x10 cm³
 - soortelijke massa van de blokken: 2317 kg/m³
 - spleetbreedte: ca. 0,5 à 1,0 mm
 - filterlaagdikte: 5 cm

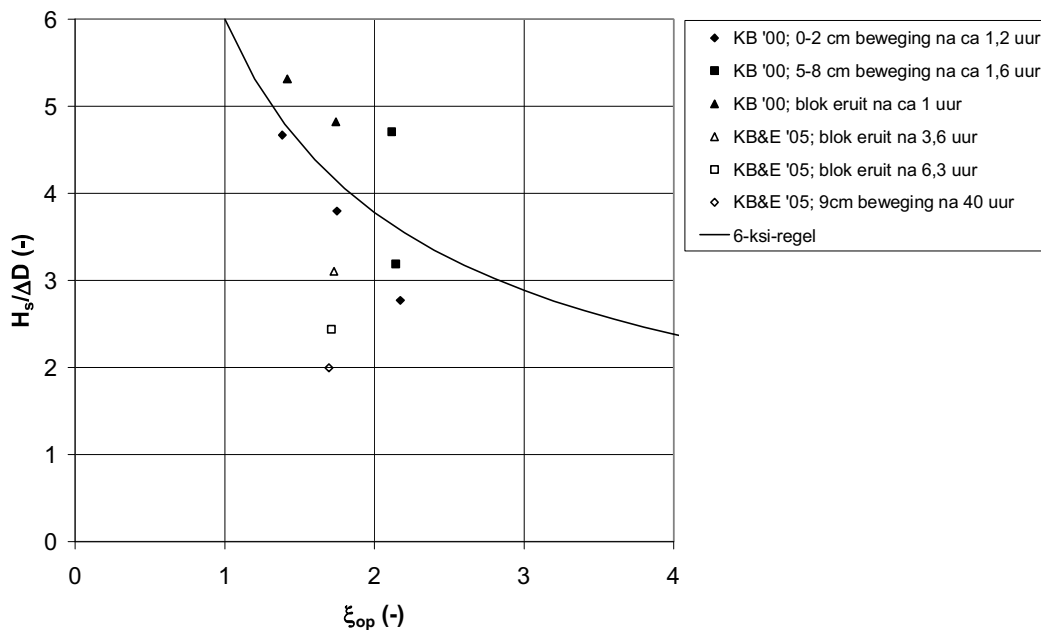
- karakteristieke korrelgrootte van het filter: $D_{f15} = 7,2$ mm
- Klein Breteler en Eysink (2005), langeduurproeven:
 - talud van 1:3,5 zonder berm
 - blokjes van $20 \times 20 \times 10$ cm³
 - soortelijke massa van de blokken: 2317 kg/m³
 - spleetbreedte: ca. 0,4 à 0,8 mm
 - filterlaagdikte: 5 cm
 - karakteristieke korrelgrootte van het filter: $D_{f15} = 6,5$ mm

De meest relevante proeven zijn weergegeven in tabel 5.

5.2 Stabiliteitsparameter F

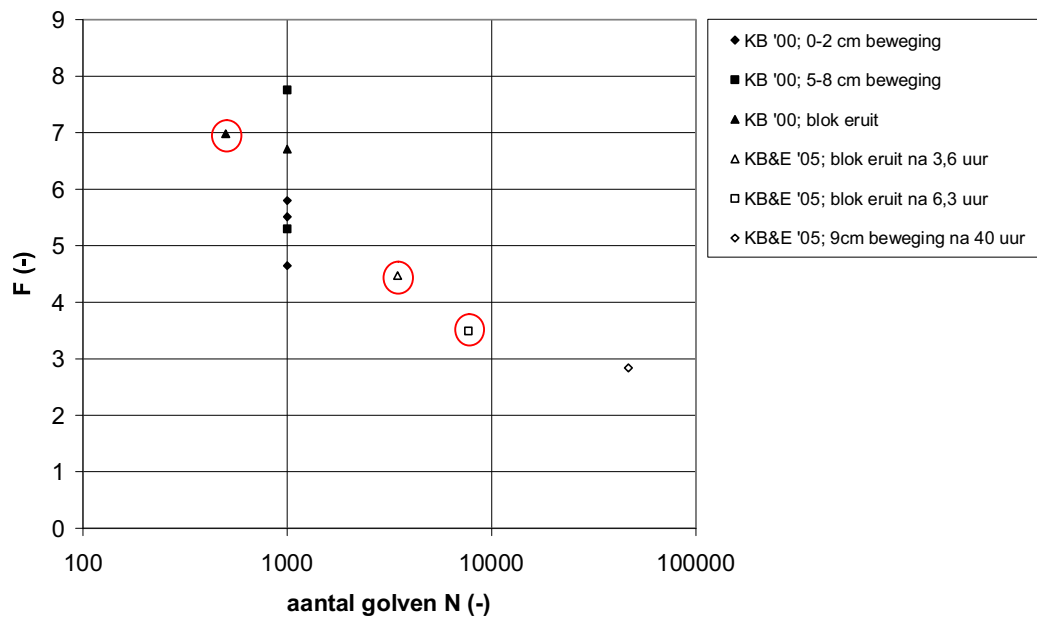
5.2.1 Proeven uit het verleden op schaal 2,5

In Figuur 12 en Figuur 13 zijn de proefresultaten grafisch weergegeven. In Figuur 13 geven de omcirkelde punten de proeven aan waar eenzelfde schade (blok eruit) is gemeten. Hieraan is te zien dat de stabiliteit afneemt naarmate de belasting langer duurt.



Figuur 12 Resultaten van de meest relevante proeven uit het verleden in Black box figuur

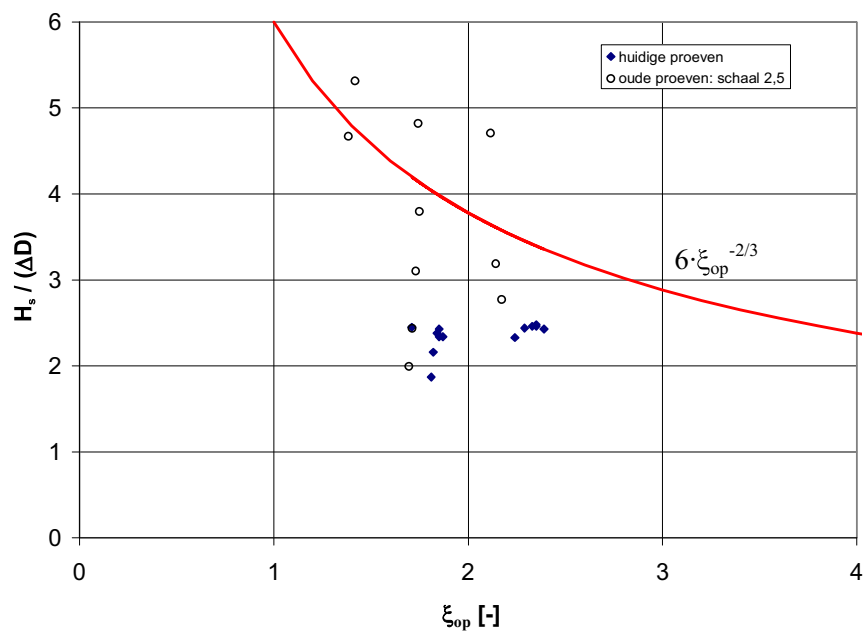
Op basis van deze meetresultaten, en vergelijkbare resultaten met andere bekledingssystemen, zijn formules afgeleid voor het berekenen van de invloed van de belastingduur op de stabiliteit (Klein Breteler en Eysink, 2005). Deze formules zijn ook gebruikt in paragraaf 5.3.



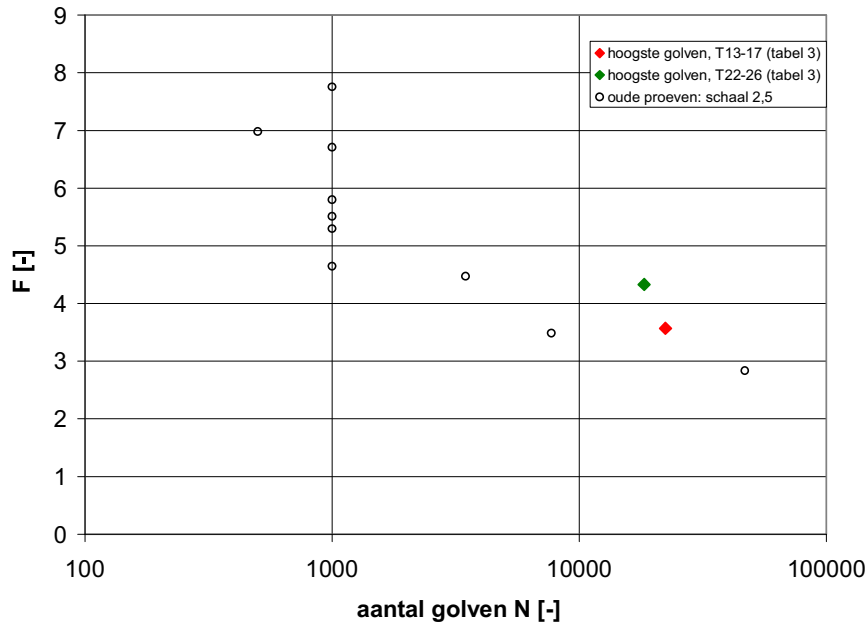
Figuur 13 Stabiliteitsparameter van de meest relevante proeven uit het verleden als functie van het aantal golven (belastingduur)

5.2.2 Huidige proeven

De huidige proeven zijn op prototype schaal uitgevoerd met een toplaagdikte van $D = 0,5$ m. Vanwege de capaciteit van de Deltagoot kon daardoor de belasting ten opzichte van de sterkte niet zo hoog worden: $H_s/\Delta D \approx 2,5$ en $F \approx 4$. De proefresultaten zijn grafisch weergegeven in de figuren 14 en 15. Bij geen van de huidige proeven is er schade ontstaan.



Figuur 14 Resultaten van de huidige proeven, alsmede de punten uit de oude proeven, die ook in Figuur 12 waren weergegeven.



Figuur 15 Stabiliteitsparameter van de huidige proeven als functie van het aantal golven (belastingduur), alsmede de punten uit de oude proeven, die ook in Figuur 13 waren weergegeven.

Ter vergelijking zijn ook de proeven uit paragraaf 5.1 in de figuren getekend. In Figuur 15 valt op dat de punten van de huidige proeven hoger liggen (grotere belasting) dan de oude proeven, terwijl er nu geen schade is ontstaan en dat wel het geval was tijdens de oude proeven. Dit verschil is nader geanalyseerd in de volgende paragraaf.

5.3 Vergelijking met rekenmodellen

Omdat de bloklaag zijn stabiliteitsgrens niet bereikt had is in dit hoofdstuk een vergelijking gedaan met de stabiliteitsgrenzen van steenzettingen uit eerdere onderzoeken met blokken op hun kant. Berekeningen met ANAMOS zijn gebruikt om de stabiliteitsgrens van de beproefde steenzetting te bepalen.

De huidige rekenmodellen die thans in gebruik zijn voor het toetsen van steenzettingen zijn ANAMOS 2.21 en Steentoets 4.03. Momenteel wordt er gewerkt aan de ontwikkeling van Steentoets2007, waarin onder andere betere formules zijn opgenomen voor de doorlatendheid van de topklaag, de invloed van de belastingduur en een verfijnde berekening van de belasting op de bekleding. Vooral ten aanzien van dit laatste is nog een validatie en bijstelling nodig om dit nieuwe rekenmodel betrouwbaar te doen zijn. Daarom zijn de proefresultaten geanalyseerd met de oude rekenmodellen, aangevuld met de nieuwe doorlatendheidsformules voor de topklaag en de invloed van de belastingduur.

Topklaagdoorlatendheid en lek lengte

Op basis van de gemeten spleetbreedte, de afmetingen van de blokken, en de karakteristieke korrelgrootte van het filter kan met ANAMOS 2.21 en met de nieuwe formules van Klein Breteler (2007) de topklaagdoorlatendheid en lek lengte berekend worden van de bekledingen die tot nu toe in de Deltagoot zijn onderzocht (maten op modelschaal), zie Tabel 6.

	BxLxD	s	b	D _{fl5}	k' (mm/s)		Λ (m)	Λ (m)	Λ (m)
	(cm)	mm	cm	mm	berekend	gemeten	berekend	uit DRO's	Anamos
Smith & Klein Breteler (2000)	50x50x20	2,1	nvt	6,0	25,7	24,0	nvt	nvt	nvt
Klein Breteler (2000)	20x20x10	0,8	5,0	7,2	11,0	-	0,29	0,35 - 0,45	0,47
Klein Breteler & Eysink (2005)	20x20x10	0,6	5,0	6,5	6,7	-	0,36	-	0,64
Huidige proeven (2007)	50x50x25	2,4	11,5	4,5	28,0	-	0,35	0,22 - 0,38	0,58
Schatting voor bijlage D	50x50x25	1,7	12	6	18,0	-	0,65	-	-

Tabel 6 berekende en gemeten doorlatendheid van de toplaag en lek lengte (k'-berekend = met nieuwe formules berekende toplaagdoorlatendheid; k'-gemeten = in speciale testopstelling gemeten; Λ-berekend = berekende lek lengte op basis van k'-berekend; Λ-uit DRO's = uit het stijghoogteverloop op de toplaag bepaalde lek lengte; Λ-Anamos = berekend met oude k'-formules uit ANAMOS)

In deze tabel zijn de resultaten gegeven van Smith & Klein Breteler (2000), die in een speciale modelopstelling de doorlatendheid van de toplaag nauwkeurig hebben gemeten. Verder zijn de resultaten van de proeven van Klein Breteler (2000) en Klein Breteler & Eysink (2005) vermeld, die beide met kleine blokjes (schaal 1:2,5 ten opzichte van het prototype) in de Deltagoot zijn uitgevoerd. Tenslotte staan de resultaten van de huidige proeven en de voor bijlage D geschatte waarden in de tabel.

Voor het bepalen van de lek lengte en doorlatendheid van de huidige proeven zijn de gemeten geometrische parameters (zie Tabel 6) van het model gebruikt. Deze tonen een significant verschil met de geschatte parameters (doorlatendheid en spleetbreedte) die gebruikt zijn in bijlage D. Deze waarden zijn geschat vóór het opbouwen van de modelopstelling, ten behoeve van het bepalen van de drukopnemerafstand en -locatie in de modelopzet. De verwachte lek lengte voor de beoogde opzet was ongeveer 0,65 m (met een doorlatendheid van de toplaag van 18 mm/s bij stootvoegen van 2 mm en langsvoegen van 1,5 mm). De spleetbreedte in de modelopstelling bleek echter veel groter te zijn, namelijk gemiddeld 2,4 mm, waardoor ook de doorlatendheid van de toplaag veel groter is geworden dan aangenomen. Bovendien was de korrelgrootte van het filter kleiner dan geschat.

De lek lengte op basis van de gerealiseerde geometrie-afmetingen was daardoor veel kleiner: 0,35 m (zie Tabel 6).

De spleetbreedte is relatief groot geworden vanwege de maatafwijkingen in de blokken. Dit zal ook in dezelfde mate, of wellicht zelfs meer, in de praktijk optreden. Dit maakt dat de huidige modelopstelling representatief is voor het prototype, of wellicht iets conservatief (veilige resultaten) omdat in de werkelijkheid de spleten wellicht nog iets groter zijn.

De doorlatendheid van de bekleding met blokjes van 20x20x10 cm³ is ook bepaald met de bakkenmethode op het talud in de Deltagoot, waarbij er water in twee concentrische bakken op het talud is gezet (Klein Breteler 1999). De zaksnelheid in de middelste bak, in combinatie met de gemeten stijghoogte op de toplaag en in het filter, levert een schatting op van de aanwezige doorlatendheid. De zo gemeten doorlatendheid was 10 mm/s, hetgeen goed overeenkomt met bovenstaande berekende waarde voor de kleine blokjes.

De oude formules in ANAMOS leveren overigens een veel kleinere waarde voor de toplaagdoorlatendheid, waardoor de lek lengte veel groter wordt. Voor de geometrie van

Klein Breteler (2000) was de toplaagdoorlatendheid volgens ANAMOS namelijk $k' = 4,4$ mm/s en de leklenge $\Lambda = 0,47$ m, terwijl de leklenge volgens de huidige formules uitkomt op 0,29 m.

De doorlatendheid van grote blokken op hun kant is in het verleden in een speciale testopstelling gemeten door Smith en Klein Breteler (2000). De proef die het dichtst bij de huidige proeven komt is die met blokken van $50 \times 50 \times 20$ cm³ op hun kant met spleten van 2,1 mm op een filter met korrelgrootte van $D_{15} = 6$ mm. Dit leverde een gemeten toplaagdoorlatendheid van 24 mm/s. Dit resultaat is vrijwel gelijk aan de berekende waarde.

Stabiliteit van de toplaag

Uit de rekenresultaten blijkt dat de leklenge van de huidige proeven ongeveer gelijk is aan die van de langeduurproeven van Klein Breteler en Eysink (2005). Daardoor is het de verwachting dat de stijghoogteverschillen bij gegeven golfcondities ongeveer gelijk zullen zijn. Doordat de toplaag in de huidige proeven 2,5 maal zo dik is, is de stabiliteit van de thans onderzochte bekleding dus aanzienlijk groter. In onderstaande tabel is de stabiliteit volgens ANAMOS weergegeven, waar dat ook uit blijkt.

Onderzoek	Korteduurbelasting (1000 golven)		
	Grens van stabiliteit volgens ANAMOS met oude k'	Grens van stabiliteit volgens ANAMOS met nieuwe k'	Gemeten grens van stabiliteit
Klein Breteler (2000), serie 12a	F = 4,4	F = 6,4	F = 6 à 6,5
Klein Breteler en Eysink (2005), langeduurproeven	F = 2,8	F = 5,6	F \approx 6 (lineaire extrapolatie naar 1000 golven)
Huidige proeven	F = 7,3	F = 9	F \gg 4,5

Tabel 7 Vergelijking berekende en gemeten stabiliteit bij belasting met korte duur (1000 golven)

Tabel 7 laat zien dat de berekende stabiliteit volgens ANAMOS met de oude k' -formules voor de geometrie van de proeven van 2000 en 2005 (blokken op kant met schaal 1:2,5) vrij laag was: F = 2,8 en 4,4. De berekende stabiliteit met de nieuwe k' -formules, daarentegen, is vrijwel gelijk aan de gemeten stabiliteit. De toen gemeten gemiddelde spleetbreedten waren 0,8 mm en 0,6 mm.

Met deze spleetbreedte (0,8 mm) zou voor de huidige opzet een stabiliteitsparameter van F = 4,4 berekend worden. Voor deze waarde zou die toplaag dus instabiel worden. Met de gemeten spleetbreedten voor de huidige opzet (gemiddeld 2,4 mm) wordt echter met de oude k' een grenswaarde van F = 7,3 berekend. De stabiliteit is dus aanzienlijk hoger dan verwacht. Als gerekend wordt met de nieuwe formules voor de toplaagdoorlatendheid, wordt de grens van de stabiliteit nog hoger, namelijk F = 9.

Inschatting stabiliteitsgrens van de beproefde steenzetting

Een vergelijking van berekende en gemeten stabiliteit voor de huidige proeven is dus moeilijk te maken, omdat de belasting in de Deltagoot niet zo hoog kon worden opgevoerd dat er instabiliteit optrad. Wel kan er een globale inschatting gemaakt worden van de korteduursterkte op basis van de constatering dat nog geen schade ontstond bij $F = 4,33$ gedurende een belasting van 26 uur (18272 golven).

Voor het terugrekenen van de stabiliteit bij 1000 golven wordt er gebruikgemaakt van de formules van Klein Breteler en Eysink (2005), waarbij we de 6-ksi-regel achterwege laten:

$$\left[\frac{H_s}{\Delta D} \right]_{\text{toelaatbaar bij } N \text{ golven}} = f_B f_S \frac{H_{sA}}{\Delta D}$$

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

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

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

- 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_{sA} = maximaal toelaatbare significante golfhoogte volgens ANAMOS echter zonder rekening te houden met de 6-ksi-regel (de waarde van $F_{1000} = \xi_{\text{op}}^{2/3} \cdot H_s / (\Delta D)$ mag dus groter zijn dan 6) (m)
- f_B = invloedsfactor m.b.t. de belasting (-)
- f_S = invloedsfactor m.b.t. de sterkte (-)
- α_{bodem} = bodemhelling voor de constructie ($^\circ$)
- h = waterdiepte (m)

De waarde van $H_s / \Delta D$ bij 1000 golven volgens ANAMOS (met de nieuwe k') is $H_s / \Delta D = 5,7$ en $H_{sA} = 3,7$ m bij $\xi_{\text{op}} = 2$. Met $\tan \alpha_{\text{bodem}} = 0$ en $h = 4,9$ m levert dit met bovenstaande formules: $c_H = 1,06$ (onafhankelijk van de waterdiepte tot $h / H_s = 2$), $f_B = 0,91$ en $f_S = 0,65$. Vervolgens kan een berekende waarde van de maximaal toelaatbare golfhoogte bij een belasting gedurende 18272 golven bepaald worden: $H_{s, 18272} = f_B \cdot f_S \cdot H_{s, 1000} = 2,2$ m ($H_s / \Delta D = 3,4$). Dit komt overeen met een stabiliteitsparameter van $F = 5,5$ bij een belasting gedurende 18272 golven.

Tijdens de proeven is vastgesteld dat bij $F = 4,33$ er niets gebeurde gedurende een belasting met 18272 golven, en dat komt overeen met deze rekenresultaten.

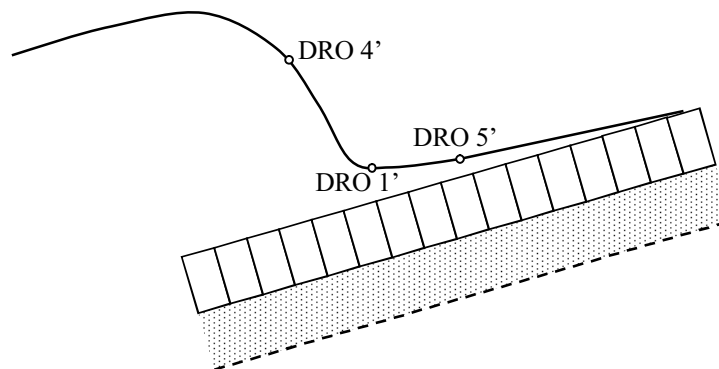
Doordat de leklengte ten opzichte van de blokdikte in de huidige modelopstelling vrij klein was, is de invloed van golfklappen groter (Klein Breteler 2000). Ook bij basalt, Basalton en Hydroblocks is de invloed van golfklappen veel groter dan die van het stijghoogtefront. Op grond hiervan zou overwogen kunnen worden om de waarde van c_1 en c_2 voor blokken op hun kant wat aan te passen in de richting van die van basalt, Basalton en Hydroblocks.

Omdat echter de stabiliteit ook erg afhankelijk is van de klemming, die bij blokken op hun kant veel kleiner is dan bij basalt, Basalton en Hydroblocks, wordt aanbevolen de waarde van c_1 en c_2 nog niet aan te passen. De informatie uit de huidige proevenserie is daarvoor te beperkt.

5.4 Leklengte bepaald uit de stijghoogtemetingen

De berekening van de leklengte is uitgevoerd op basis van de methodiek uitgelegd in bijlage D (groot oppervlak).

Voor het uitwerken van de metingen zijn de momenten geselecteerd met een groot stijghoogtefront, dat met de voet in de buurt van drukopnemer 1' zit. Dit is niet eenvoudig, omdat er slechts op 3 locaties in het dwarsprofiel drukken op het talud zijn gemeten.



Figuur 16 Schematische doorsnede van de steenzetting met voorbeeld van stijghoogteverloop op de toplaag

Voor het bepalen van de juiste momenten in de golven (grote ronde golffronten met groot stijghoogteverschil) zijn de volgende eisen gesteld:

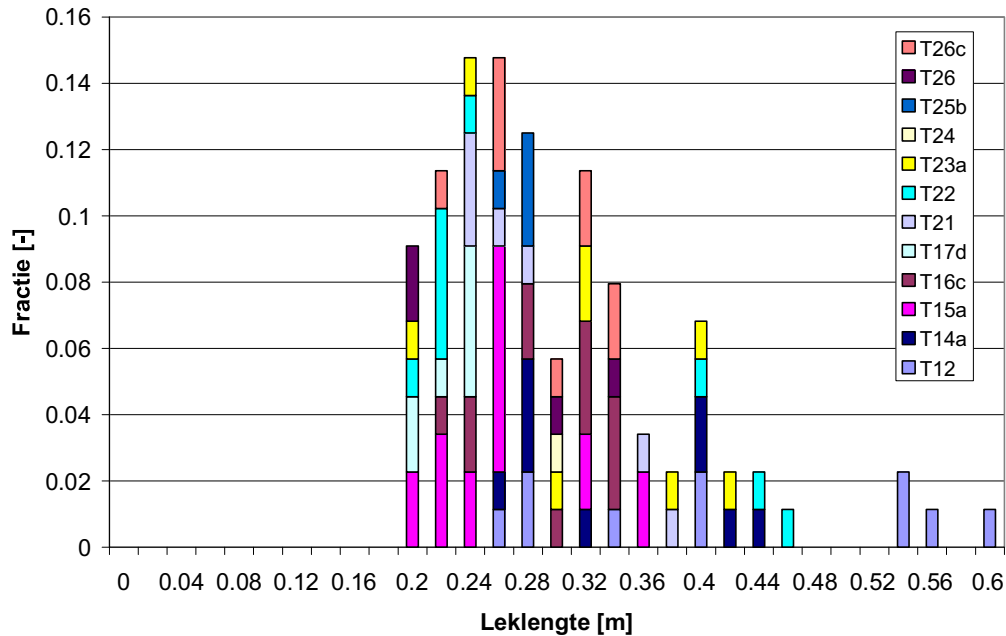
- Het stijghoogteverschil over de toplaag bij drukopnemerpaar 1 moet groter zijn dan 0,4 m ($\Delta\phi_1 > 0,4\text{m}$). Kleinere stijghoogteverschillen zijn niet beschouwd.
- Stijghoogtegrenzen (zie Figuur 16):
 - De stijghoogte van drukopnemer 4 moet groter zijn dan voor drukopnemer 1: $\phi_4' > \phi_1'$
 - De stijghoogte voor drukopnemer 4 is groter dan voor drukopnemer 5: $\phi_4' > \phi_5'$
 - De verschil van de stijghoogte in drukopnemer 5 en in 1 is positief en minder dan 0,2: $\phi_5' - \phi_1' < 0,2$.

Hierdoor wordt voorkomen dat momenten tijdens golfklappen worden geselecteerd.

- De gevoeligheid voor kleine fouten in de gemeten stijghoogte moet klein zijn. De verandering in de leklengte bij een verandering van 0,5 cm in één van de drukopnemers moet minder dan 20% zijn. Dit criterium moet gelden voor elke drukopnemer.

Met deze eisen zijn de druksignalen uitgewerkt. De gebruikte Matlab code is gegeven in bijlage F. Een controle van de resultaten heeft aangetoond dat de grootste stijghoogtefronten geregistreerd werden. De leklengten zijn uitgewerkt voor een aantal proeven in tijdreeksen van 150 seconden. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 17.

De gemiddelde lek lengte voor de onderzochte proeven was 0,30 m met een standaardafwijking van 0,08 m (Totaal aantal metingen: 97). De maximale gemeten lek lengte was 0,6 m en de minimale lek lengte 0,19 m. De lek lengte is dus kleiner dan verwacht op basis van de berekeningen ($\Lambda = 0,35$ m), zie paragraaf 5.3. In de loop van het proevenprogramma is de lek lengte niet significant veranderd.



Figuur 17 Gemeten lek lengten; voor een tijdreeks van 150 seconden in proeven T12 tot T26

5.5 Spleetbreedte berekend uit de lek lengte

Met de formules voor de toplaagdoorlatendheid, die opgenomen zijn in Steentoets2007, is het mogelijk om de spleetbreedte te bepalen uit de gemeten lek lengte. Er geldt:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \Rightarrow k' = \frac{kbD}{\Lambda^2} = \frac{59 \cdot 10^{-3} \cdot 0,115 \cdot 0,5}{0,30^2} = 0,038 \text{ m/s}$$

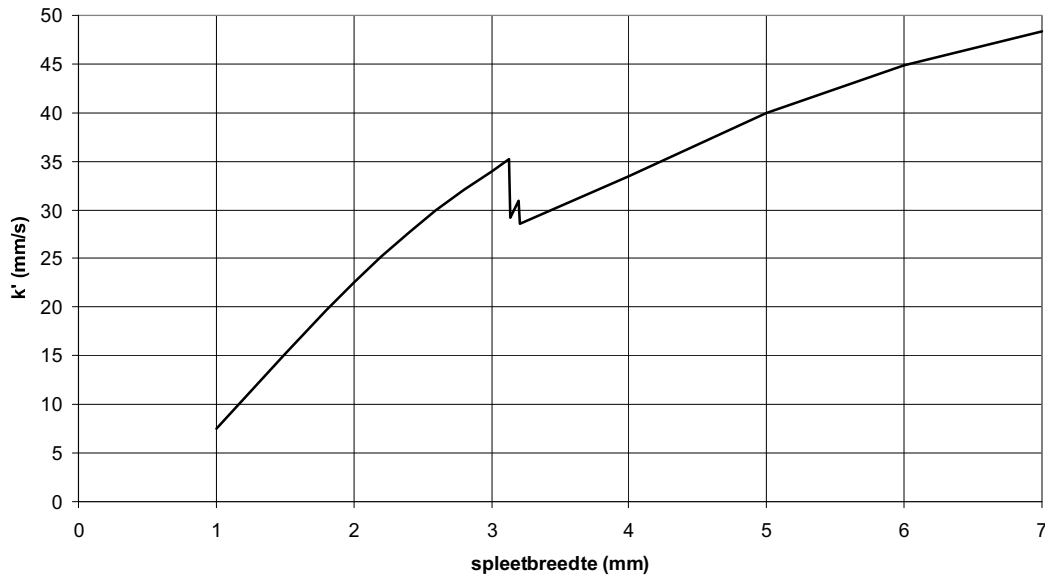
Met de formules uit Steentoets 2007 is het verband tussen de spleetbreedte en de toplaagdoorlatendheid getekend in Figuur 18.

In de Figuur is te zien dat er een duidelijke discontinuïteit in het verloop zit bij een spleetbreedte van $s = 3,1$ à $3,2$ mm. Bij deze spleetbreedte zit net de overgang van laminaire stroming naar turbulente stroming in de spleten. De formules voor de stromingsweerstand voor deze typen stroming sluiten niet op elkaar aan.

De gemeten spleetbreedte over het hele talud was ongeveer 2,4 mm. Bij de drukopnemers was de spleetbreedte echter in het grootste gedeelte van het onderzoek wat groter, namelijk 2,9 mm. Als echter de toplaagdoorlatendheid beschouwd wordt die bepaald is uit de gemeten lek lengte, namelijk 38 mm/s, dan hoort daar een spleetbreedte bij van maar liefst 4,8 mm.

Hieruit blijkt dat de doorlatendheid van de toplaag onverwacht hoog is, maar het kan ook zijn dat dit voor een deel veroorzaakt wordt door een wat lagere doorlatendheid van het

filter. Als namelijk gerekend wordt met een 20% lagere filterdoorlatendheid, wat gezien de nauwkeurigheid van dergelijke formules heel realistisch is, dan hoort bij de gemeten lek lengte een toplaagdoorlatendheid van 33 mm/s. Volgens Figuur 18 sluit dat precies aan bij een spleetbreedte van 2,9 mm (voor het geval van laminaire stroming).



Figuur 18 Doorlatendheid van de toplaag (k') als functie van de spleetbreedte volgens Steentoets2007

De onzekerheid omtrent de doorlatendheid van het filter in combinatie met de discontinuïteit in het verband tussen de spleetbreedte en de toplaagdoorlatendheid, maken het moeilijk om conclusies te trekken. Het lijkt erop dat de werkelijke doorlatendheid van de toplaag in de Deltagoot wat groter is dan berekend wordt met de formules. Als de toplaagdoorlatendheid altijd wat onderschat wordt door de formules, levert dat conservatieve rekenresultaten (veilig).

6 Aanbeveling voor de praktijk

In het modelonderzoek is vastgesteld dat een steenzetting met blokken op hun kant een vrij grote stabiliteit heeft. Bij een golfhoogte van $H_s = 1,6$ m is zelfs na langdurige golfbelasting (totaal 53 uur) geen schade of begin van schade geconstateerd.

Verder is gebleken dat de spleetbreedte tussen de blokken veel groter is dan verwacht, als gevolg van maatafwijkingen die kennelijk bij dit type blokken voorkomen. Dergelijke maatafwijkingen zijn ook in de praktijk te verwachten, waardoor het huidige modelonderzoek representatief is voor de werkelijkheid. De grote stabiliteit van de steenzetting is te verklaren uit de relatief grote spleetbreedte.

In het modelonderzoek is een gemiddelde spleetbreedte van 2,4 mm gemeten. Om voor de praktijk aan de veilige kant blijven, wordt geadviseerd te rekenen met een spleetbreedte van 2,0 mm in combinatie met de nieuwe formules voor de toplaagdoorlatendheid. Gezien het feit dat in de praktijk nog gewerkt wordt met de oude doorlatendheidsformules, moet voorlopig gewerkt worden met een rekenwaarde voor de spleetbreedte. Deze rekenwaarde, in combinatie met de oude doorlatendheidsformules in ANAMOS en Steentoets 4.0, moet dan de zelfde toplaagdoorlatendheid opleveren als $s = 2,0$ mm met de nieuwe formules.

De rekenwaarde van de spleetbreedte is bepaald door eerst de toplaagdoorlatendheid te berekenen met de nieuwe formules en een spleetbreedte van 2,4 mm. Dit is gedaan voor een filterlaag met $D_{f15} = 4,5$ mm (zoals in het huidige onderzoek) en $D_{f15} = 7$ mm (vrij grote waarde die mogelijk in de praktijk wel eens zou kunnen voorkomen). Vervolgens is met de oude formules een zodanige spleetbreedte ingevoerd dat dezelfde toplaagdoorlatendheid werd verkregen. Dit is het geval als bij $D_{f15} = 4,5$ mm de spleetbreedte $s = 6,8$ mm en voor $D_{f15} = 7$ mm de spleetbreedte 5,8 mm wordt gekozen. Vervolgens is voor $D_{f15} = 7$ mm de invloed van de blokafmetingen berekend. Deze invloed bleek maar klein te zijn: bij blokken van 50x50x20 is de laagste rekenwaarde voor de spleetbreedte verkregen: 5,7 mm.

Om aan de veilige kant te blijven wordt aanbevolen een rekenwaarde voor de spleetbreedte te hanteren van 5,0 mm in combinatie met ANAMOS en Steentoets 4.0.

Met deze rekenwaarde van 5 mm voor de spleetbreedte kunnen rechthoekige blokken van 50 cm op hun kant ontworpen worden met ANAMOS en Steentoets 4.0.

7 Conclusies

In opdracht van Rijkswaterstaat Zeeland, projectbureau Zeeweringen, heeft WL | Delft Hydraulics de stabiliteit van blokken op hun kant in de Deltagoot op prototypeschaal beproefd. Voor deze proeven zijn blokken van $50 \times 50 \times 25 \text{ cm}^3$ gebruikt die in de Deltagoot op schaal 1:1 en met een helling van 1:3 ingebouwd zijn.

Uit het onderzoek blijkt dat op hun kant geplaatste blokken een hoge stabiliteit hebben ($F \gg 4,4$). Een belasting van 57 uur met golfhoogtes tussen $H_s = 1,2 \text{ m}$ en $1,6 \text{ m}$ heeft geen noemenswaardige schade aan de toplaag opgeleverd.

Uit de uitgevoerde drukmetingen is een gemiddelde lek lengte van 0,30 m bepaald. Deze lek lengte is beduidend lager dan voor het onderzoek verwacht werd op basis van berekeningen en een schatting van de spleetbreedte. Dit verklaart de hoge stabiliteit.

De spleetbreedte bleek aanzienlijk groter te zijn dan verwacht als gevolg van maatafwijkingen in de blokken. Gezien het feit dat ook in werkelijkheid dergelijke maatafwijkingen heel gewoon zijn, kan gesteld worden dat het model representatief was voor de werkelijkheid. De gemeten spleetbreedte was 2,4 mm.

In vergelijking tot eerdere onderzoek in de Deltagoot met kleine blokjes op hun kant (Klein Breteler 2000 en Klein Breteler & Eysink 2005) is de spleetbreedte nu relatief groot. Die kleine blokjes waren speciaal voor het onderzoek gemaakt en hadden onrealistisch kleine maatafwijkingen. Daardoor was de spleetbreedte toen vrij klein en werd ook een vrij kleine stabiliteit van de toplaag gemeten.

De gemeten lek lengte kan ook gebruikt worden om met de formules voor de toplaag-doorlatendheid een spleetbreedte terug te rekenen. De onzekerheid omtrent de doorlatendheid van het filter in combinatie met de discontinuïteit in het verband tussen de spleetbreedte en de toplaagdoorlatendheid, maken het echter moeilijk om conclusies te trekken. Het lijkt erop dat de werkelijke doorlatendheid van de toplaag in de Deltagoot wat groter is dan berekend wordt met de formules. Als de toplaagdoorlatendheid altijd wat onderschat wordt door de formules, levert dat conservatieve rekenresultaten (veilig).

De resultaten van het onderzoek laten zien dat het hergebruiken van op hun kant geplaatste blokken met een toplaagdikte van 50 cm een reële optie in de renovatie van de steenzettingen in Zeeland is. Het onderzoek toont verder aan dat de bestaande relatief conservatieve rekenregels voor steenzettingen met blokken op hun kant aangepast moeten worden om de relatief grotere stabiliteit van blokken weer te geven.

Aanbevolen wordt om steenzettingen van rechthoekige blokken van 50 cm op hun kant te ontwerpen met een rekenwaarde voor de spleetbreedte van 5,0 mm, in combinatie met ANAMOS of Steentoets 4.0. Door te werken met deze rekenwaarde voor de spleetbreedte wordt een fout in de doorlatendheidsformules in die rekenmodellen op de juiste wijze verdisconteerd.

Referenties

Klein Breteler, M. (2000)

Grootschalig modelonderzoek naar stabiliteit van taludbekledingen

Analyse van resultaten van Deltagootproeven

WL | Delft Hydraulics, verslag H3272, mei 2000

Klein Breteler, M., en W. Eysink (2005)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Langeduursterkte van steenzettingen

WL | Delft Hydraulics, verslag H4475, november 2005

Klein Breteler, M. (2007)

Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen

Documentatie van Steentoets2007

WL | Delft Hydraulics, verslag H 4846, april 2007

Peters, D.J. (2007)

Kennisontwikkeling ten behoeve van Steentoets

Verzamelde memo's betreffende de implementatie-gereedmaken van het klemmingsonderzoek

Royal Haskoning, maart 2007

Smith, G.M. en M. Klein Breteler (2000)

Doorlatendheid van gezette blokken op hun kant

WL | Delft Hydraulics, verslag H 3564, maart 2000

A Tabellen

proef	h (m)	H _s (m)	H _{max} (m)	T _p (s)	T _{m-1,0} (s)	duur (s)	N (-)	s _{op} (-)	ξ _{op} (-)	H _s /(ΔD) (-)	F (-)
T11	4,340	1,20	1,79	4,76	4,38	4250	1125	0,034	1,81	1,87	2,78
T12	4,450	1,39	1,82	5,14	4,85	4608	1146	0,034	1,82	2,16	3,22
T13	4,530	1,50	1,95	5,44	5,13	4860	1134	0,032	1,85	2,34	3,53
T14	4,430	1,52	1,99	5,49	5,18	4400	1006	0,032	1,86	2,37	3,57
T14A	4,430	1,49	1,94	5,53	5,16	6400	1517	0,031	1,89	2,33	3,55
T15	4,700	1,52	2,07	5,32	5,15	6200	1445	0,034	1,80	2,37	3,50
T15A	4,700	1,53	2,15	5,53	5,16	10300	2405	0,032	1,86	2,39	3,62
T16	4,630	1,55	2,01	5,59	5,22	7200	1666	0,032	1,87	2,43	3,68
T16A	4,630	1,55	2,10	5,40	5,23	7200	1674	0,034	1,81	2,42	3,59
T16B	4,630	1,55	2,04	5,59	5,24	7200	1674	0,032	1,87	2,42	3,68
T16C	4,630	1,56	2,05	5,57	5,22	5900	1373	0,032	1,85	2,44	3,68
T17	4,830	1,55	2,10	5,40	5,13	16200	3776	0,034	1,81	2,42	3,59
T17A	4,800	1,61	2,14	4,64	5,26	12600	2884	0,048	1,52	2,51	3,33
T17B	4,820	1,53	1,95	5,61	5,17	1800	403	0,031	1,89	2,39	3,65
T17C	4,800	1,55	2,17	5,41	5,20	5400	1128	0,034	1,81	2,42	3,59
T17D	5,000	1,60	2,02	5,48	5,24	900	207	0,034	1,80	2,50	3,71
T21	4,900	1,49	2,08	6,56	6,12	6084	1214	0,022	2,24	2,33	3,98
T22	4,985	1,58	2,21	7,08	6,41	6408	1252	0,020	2,35	2,46	4,35
T23	4,900	1,61	2,12	7,21	6,33	2483	397	0,020	2,37	2,51	4,46
T23A	4,900	1,55	2,33	7,16	6,41	6000	1180	0,019	2,39	2,42	4,34
T23B	4,900	1,52	2,19	7,09	6,26	2800	567	0,019	2,39	2,38	4,26
T24	4,800	1,57	2,01	6,78	6,51	1220	231	0,022	2,25	2,45	4,21
T24A	4,790	1,56	2,23	6,87	6,34	9980	1980	0,021	2,29	2,44	4,24
T24B	4,785	1,56	2,05	6,91	6,33	6800	1350	0,021	2,30	2,44	4,25
T25	4,890	1,59	2,39	7,09	6,39	10400	2054	0,020	2,34	2,47	4,37
T25A	4,890	1,51	1,97	6,54	6,37	1200	231	0,023	2,22	2,35	4,00
T25B	4,885	1,58	2,18	7,04	6,39	14850	2926	0,020	2,33	2,47	4,34
T25C	4,885	1,51	2,22	6,96	6,21	2350	458	0,020	2,36	2,36	4,18
T26	4,980	1,61	2,27	7,17	6,43	5400	1022	0,020	2,36	2,51	4,44
T26A	4,985	1,58	2,27	7,02	6,32	7200	1438	0,021	2,33	2,47	4,33
T26B	4,990	1,60	2,16	7,35	6,34	2100	407	0,019	2,42	2,49	4,49
T26C	4,990	1,60	2,16	7,36	6,35	2100	413	0,019	2,42	2,50	4,50
T26D	4,990	1,60	2,12	7,35	6,34	2100	411	0,019	2,42	2,49	4,50
T26E	4,985	1,57	2,20	6,96	6,35	10800	1955	0,021	2,31	2,46	4,29

Tabel A.1 Proevenprogramma

rij	z*	x**
A	5.45	186.29
B	5.37	186.04
C	5.28	185.80
D	5.20	185.55
E	5.12	185.31
F	5.03	185.06
G	4.95	184.82
H	4.87	184.57
I	4.78	184.32
J	4.70	184.08
K	4.62	183.83
L	4.54	183.59
M	4.45	183.34
N	4.37	183.09
O	4.29	182.85
P	4.20	182.60
Q	4.12	182.36
R	4.04	182.11
S	3.95	181.87
T	3.87	181.62
U	3.79	181.37
V	3.71	181.13
W	3.63	180.88
X	3.55	180.64
Y	3.46	180.39
Z	3.38	180.15
1	3.30	179.90
2	3.22	179.65
3	3.14	179.41
4	3.06	179.16
5	2.98	178.92
6	2.89	178.67
7	2.81	178.42
8	2.73	178.18
9	2.65	177.93
10	2.57	177.69
11	2.49	177.44
12	2.40	177.20
13	2.32	176.95
14	2.24	176.70

*niveau t.o.v. gootbodern

**vanaf golfschot

Tabel A.2a Posities van blokrijen

Dwarsprofiel	y [m]
1	0.75
2	0.89
3	1.39
4	1.96
5	2.48
6	2.96
7	3.40
8	3.90
9	4.40

Tabel A.2b Locatie van dwarsprofielmetingen (gemeten vanaf gootwand halzijde)

rij	Spleetbreedte voor proef 11 bij DRO's (mm)					
ST	2,0	0,0	6,5	4,2	0,6	2,4
T		0,5	1,7	0,5	1,7	
TU	2,1	0	0,7	2,2	0,6	3,8
U		3,2	0,9	2,6		
UV	7,1	8,1	0,9	3,5	10,0	2,2
V		1,0	0,0	1,0	1,8	
VW	8,1	1,1	0,0	0,7	2,5	4,6
W		3,0	3,1	0,8		
WX	0,7	2,4	1,9	0,0	1,4	0,7
X		0,0	0,4	0,5	2,5	
XY	2,4	4,2	0,0	1,3	2,7	5,2

gemiddelde spleetbreedte: 2,26 mm
standaardafwijking: 2,28 mm
minimum spleetbreedte: 0,00 mm
maximum spleetbreedte: 10,00 mm
aantal >5 mm: 6 (11%)
totaal aantal metingen: 54

rij	Spleetbreedte voor proef 11, rest van talud (mm)						Gemiddelde
FG	0,90	1,50	0,00	2,60	4,10	5,00	2,35
G	1,20	2,50	0,25	2,45	5,10	3,60	2,52
GH	5,00	0,90	1,50	0,00	4,45	4,45	2,72
LM	1,50	2,20	0,25	0,50	0,50	1,10	1,01
M	0,40	2,75	0,50	0,6	3,00	2,10	1,56
MN	0,90	0,80	3,00	2,65	4,20	8,80	3,39
RS	0,80	1,10	8,00	0,00	0,20	0,10	1,70
S	0,30	3,00	3,25	0,30	3,60	1,65	2,02
ST	5,70	1,10	0,00	5,10	0,30	1,10	2,22
XY	1,35	0,7	0,60	0,50	2,40	2,00	1,26
Y	6,50	0,00	1,80	0,80	3,50	0,90	2,25
YZ	5,00	1,10	4,20	5,30	1,10	5,00	3,62
4-5	1,95	1,70	1,70	2,40	8,00	7,00	3,79
5	0,90	3,00	2,40	1,60	1,20	0,50	1,60
5-6	1,00	0,70	2,45	1,60	0,90	0,40	1,18
10-11	10,00	0,90	2,50	1,30	3,30	3,20	3,53
11	0,70	1,70	2,30	0,90	0,60	3,00	1,53
11-12	0,90	1,30	0,50	2,50	0,7	2,40	1,38

gemiddelde spleetbreedte:
2,20 mm
standaardafwijking:
2,05 mm
minimum spleetbreedte:
0,00 mm
maximum spleetbreedte:
10,00 mm
aantal >5 mm: 10 (9%)
totaal aantal metingen: 108

Tabel A3, gemeten spleetbreedte voor proef 11

Voor het hele talud geldt (alle spleetbreedten samengevat):

gemiddelde spleetbreedte: 2,22 mm
standaardafwijking: 2,12 mm
minimum spleetbreedte: 0,00 mm
maximum spleetbreedte: 10,00 mm
aantal >5 mm: 16
totaal aantal metingen: 162

rij	Spleetbreedte na proef 17 bij DRO's (mm)					
ST	1,1	0,0	6,0	1,7	0,4	3,0
T		0,7	0,9	2,8	1,3	
TU	6,0	0,8	0,7	3,9	0,0	2,9
U		10,1	1,7	6,9		
UV	7,1	9,9	0,0	1,9	6,5	2,4
V		2,4	1,1	1,9	10,2	
VW	4,2	1,1	0,0	0,6	1,5	2,1
W		9,5	5,6	3,7		
WX	0,2	1,8	1,3	1,6	0,0	0,1
X		1,3	0,7	1,1	7,1	
XY	4,2	5,2	0,3	0,2	2,7	5,0

gemiddelde spleetbreedte: 2,88 mm
standaardafwijking: 2,88 mm
minimum spleetbreedte: 0,00 mm
maximum spleetbreedte: 10,20 mm
aantal >5 mm: 12 (22%)
totaal aantal metingen: 54

rij	Spleetbreedte na proef 17, rest van talud (mm)						Gemiddelde
FG	1,90	2,50	0,00	1,60	3,30	4,20	2,25
G	1,50	2,20	0,20	3,00	5,60	3,00	2,58
GH	2,40	0,40	0,10	0,00	5,10	3,70	1,95
LM	0,90	0,80	0,10	0,00	0,70	0,30	0,47
M	0,80	0,15	1,00	1,15	6,00	0,20	1,55
MN	0,20	0,30	3,00	0,80	0,60	3,00	1,32
RS	0,30	0,00	0,15	0,10	0,30	0,00	0,14
S	0,20	3,00	10,10	0,00	5,10	1,50	3,32
ST	5,10	0,70	0,10	6,00	0,70	0,50	2,18
XY	1,70	0,25	1,50	0,30	1,10	3,00	1,31
Y	5,00	0,80	3,00	1,10	6,10	0,90	2,82
YZ	3,90	0,70	3,20	6,00	1,00	5,50	3,38
4-5	2,40	3,50	2,10	2,40	7,00	6,00	3,90
5	0,70	3,50	3,90	2,40	1,50	0,90	2,15
5-6	1,30	0,50	3,50	1,70	0,90	0,40	1,38
10-11	9,80	3,30	3,00	1,50	2,40	1,70	3,62
11	0,60	2,30	2,40	0,50	0,80	3,00	1,60
11-12	1,20	1,00	5,00	0,40	0,65	2,40	1,78

gemiddelde spleetbreedte:
2,09 mm
standaardafwijking:
2,08 mm
minimum spleetbreedte:
0,00 mm
maximum spleetbreedte:
10,10 mm
aantal >5 mm: 13 (12%)
totaal aantal metingen: 108

Tabel A4, gemeten spleetbreedte na proef 17

Voor het hele talud geldt (alle spleetbreedten samengevat):

gemiddelde spleetbreedte: 2,36 mm
standaardafwijking: 2,40 mm
minimum spleetbreedte: 0,00 mm
maximum spleetbreedte: 10,20 mm
aantal >5 mm: 25
totaal aantal metingen: 162

rij	Spleetbreedte na proef 26 bij DRO's (mm)					
ST	2,30	0,05	6,50	1,50	0,50	3,20
T		1,30	0,10	2,40	1,70	
TU	7,00	0,90	0,90	4,80	0,10	3,00
U		10,1*	1,7*	8,00		
UV	8,00	9,50	0,15	1,70	6,00	4,00
V		2,70	1,70	1,80	1,35	
VW	3,50	0,80	0,10	0,55	1,80	1,90
W		9,50	6,50	2,90		
WX	0,25	1,70	1,90	0,00	0,00	0,00
X		1,80	0,80	1,45	6,90	
XY	3,00	5,50	0,25	0,10	4,00	5,50

gemiddelde spleetbreedte: 2,85 mm
 standaardafwijking: 2,80 mm
 minimum spleetbreedte: 0,00 mm
 maximum spleetbreedte: 10,10 mm
 aantal >5 mm: 12 (22%)
 totaal aantal metingen: 54

rij	Spleetbreedte na proef 26, rest van talud (mm)						Gemiddelde
FG	1,50	4,00	0,00	1,80	5,50	3,90	2,78
G	0,90	2,10	0,25	5,20	7,00	2,90	3,06
GH	1,70	0,80	0,00	0,00	4,00	4,80	1,88
LM	1,00	0,90	0,00	0,95	0,60	0,60	0,68
M	0,90	0,25	1,10	1,00	5,00	0,20	1,41
MN	0,15	0,15	2,40	2,40	0,50	4,70	1,72
RS	0,20	0,00	6,00	0,00	0,15	0,20	1,09
S	0,30	3,10	10,10	0,15	5,50	1,00	3,36
ST	7,00	1,30	9,00	0,90	0,95	0,40	3,26
XY	1,50	0,00	1,70	0,40	5,00	5,10	2,28
Y	4,50	0,50	2,80	1,50	6,00	0,30	2,60
YZ	5,00	0,60	4,50	6,50	0,90	5,00	3,75
4-5	2,20	3,00	0,90	2,90	8,00	6,50	3,92
5	0,90	3,50	3,90	2,20	1,30	1,10	2,15
5-6	0,90	0,40	3,20	1,70	0,40	0,30	1,15
10-11	7,00	4,00	1,70	0,90	4,50	1,50	3,27
11	0,60	2,40	2,30	0,50	0,80	2,40	1,50
11-12	1,60	0,80	6,00	0,00	0,90	3,20	2,08

gemiddelde spleetbreedte:
 2,33 mm
 standaardafwijking:
 2,30 mm
 minimum spleetbreedte:
 0,00 mm
 maximum spleetbreedte:
 10,10 mm
 aantal >5 mm: 19 (18%)
 totaal aantal metingen: 108

Tabel A5, gemeten spleetbreedte na proef 26 (*niet gemeten, overgenomen van na proef 17)

Voor het hele talud geldt (alle spleetbreedten samengevat):

gemiddelde spleetbreedte: 2,50 mm

standaardafwijking: 2,48 mm

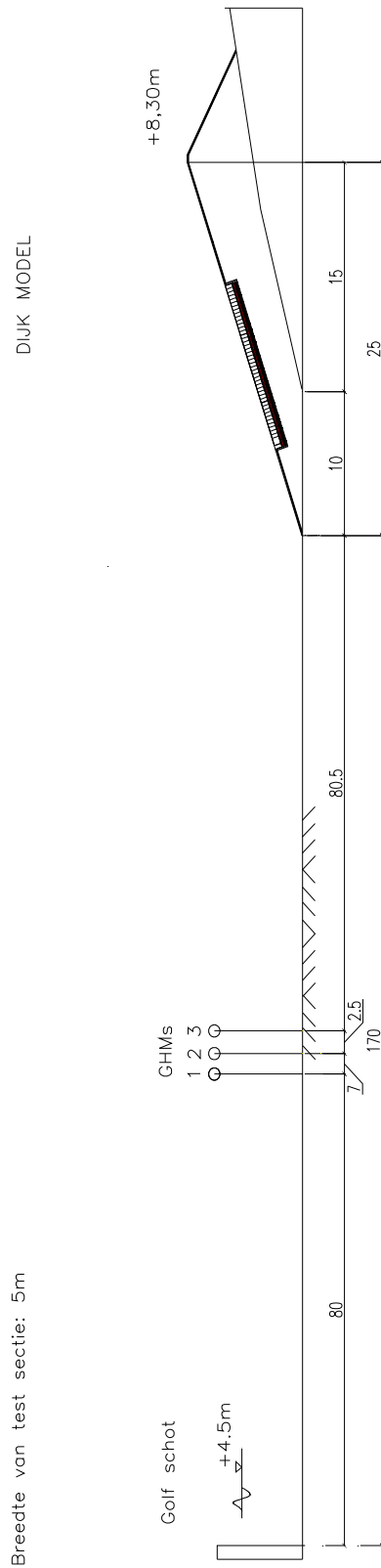
minimum spleetbreedte: 0,00 mm

maximum spleetbreedte: 10,10 mm

aantal >5 mm: 27

totaal aantal metingen: 162

B Figuren



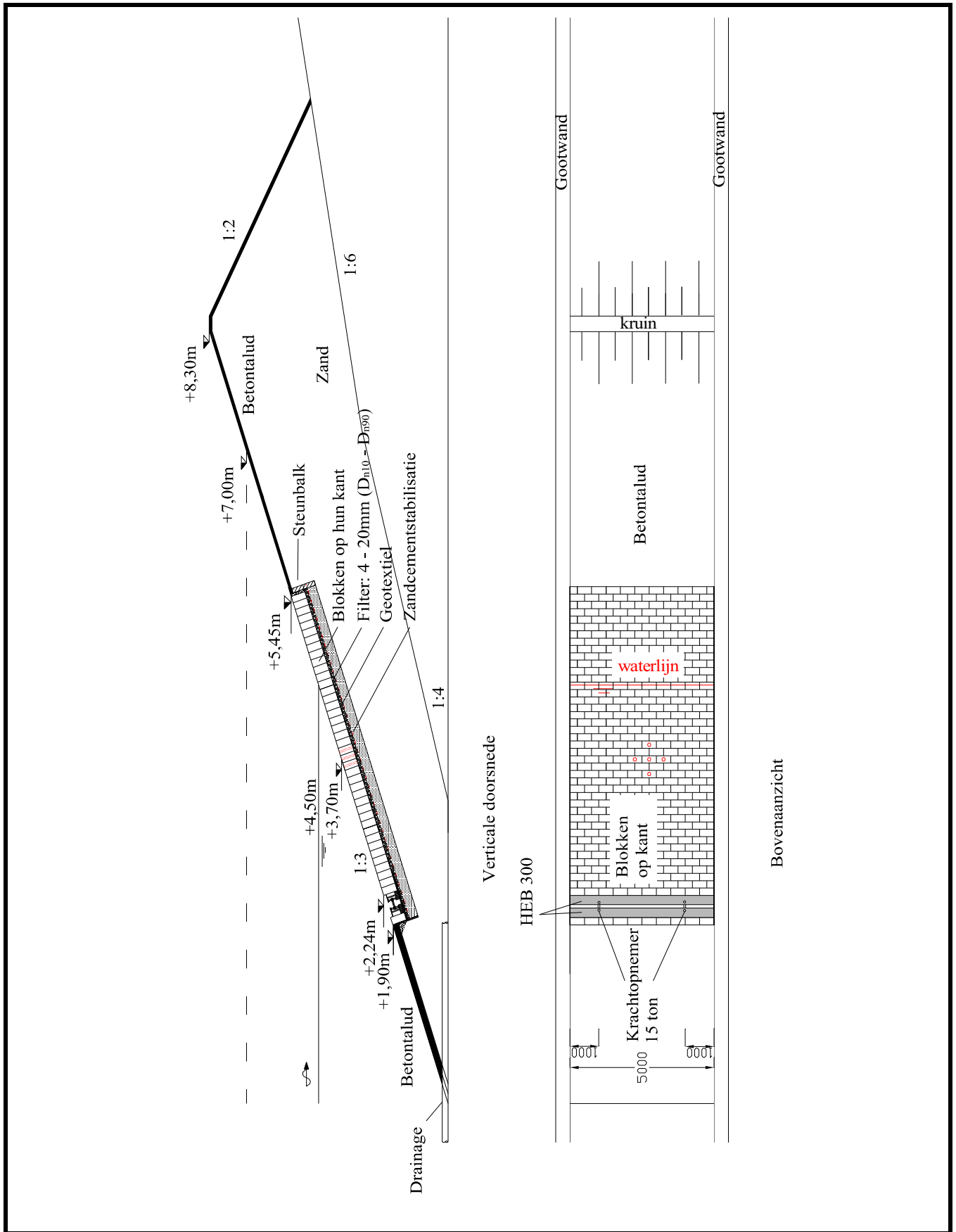
Deltagootproeven met blokken op hun kant

Posities van golfhoogtemeters (GHMs)

WL | Delft Hydraulics

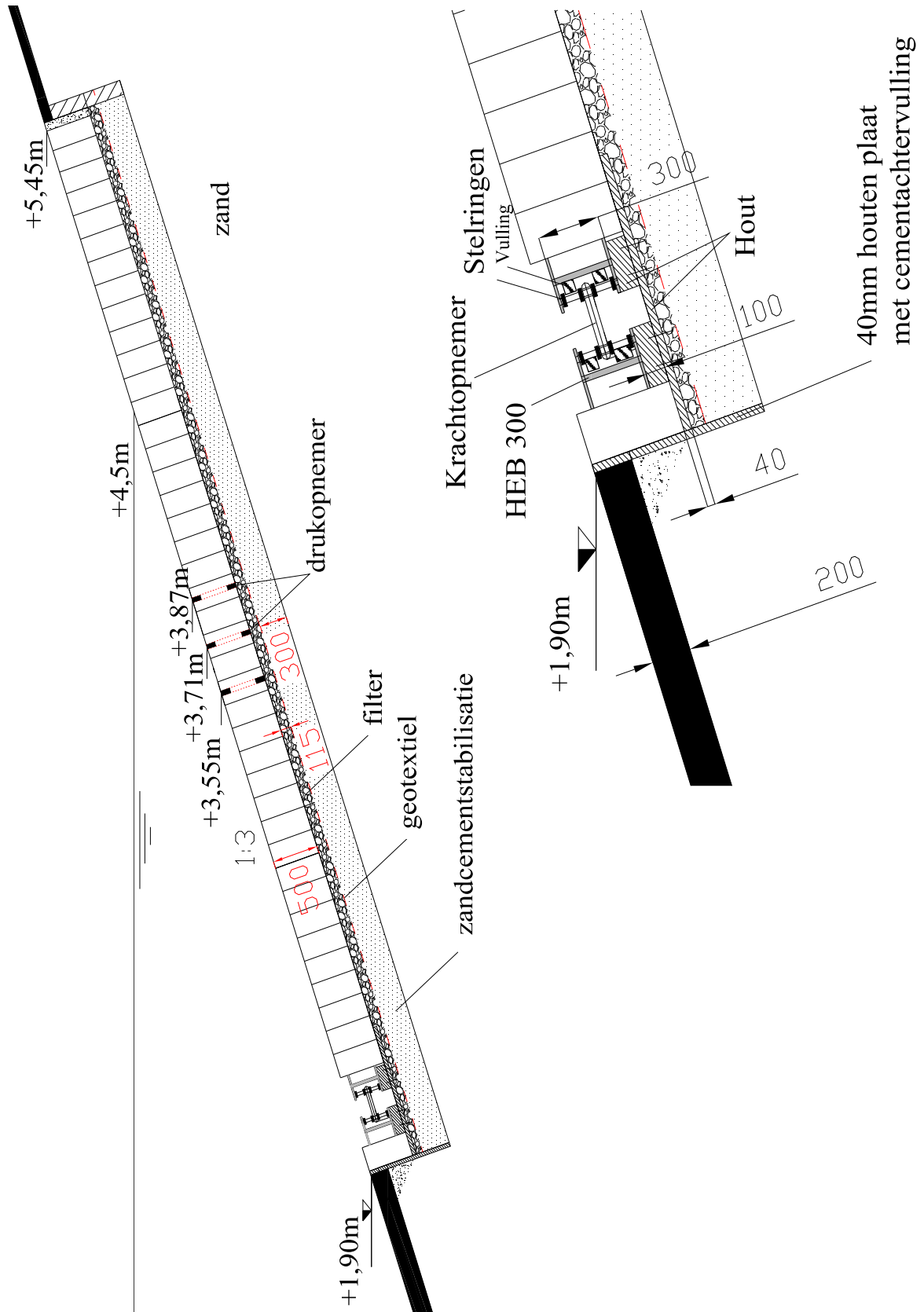
H494 I

Fig. B. I



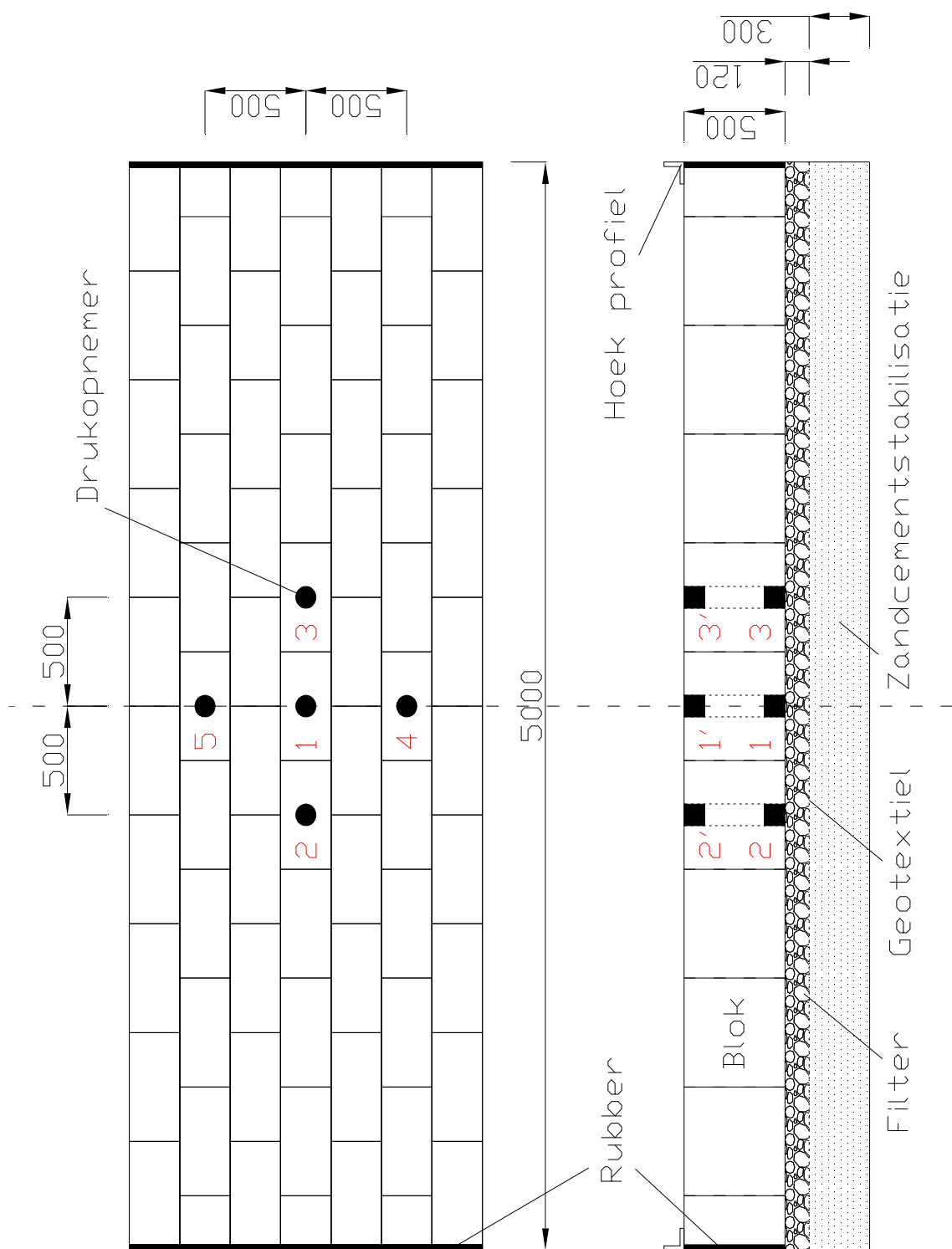
Deltagootproeven met blokken op hun kant

Opzet in de Deltagoot (Langsdoorsnede en bovenaanzicht)



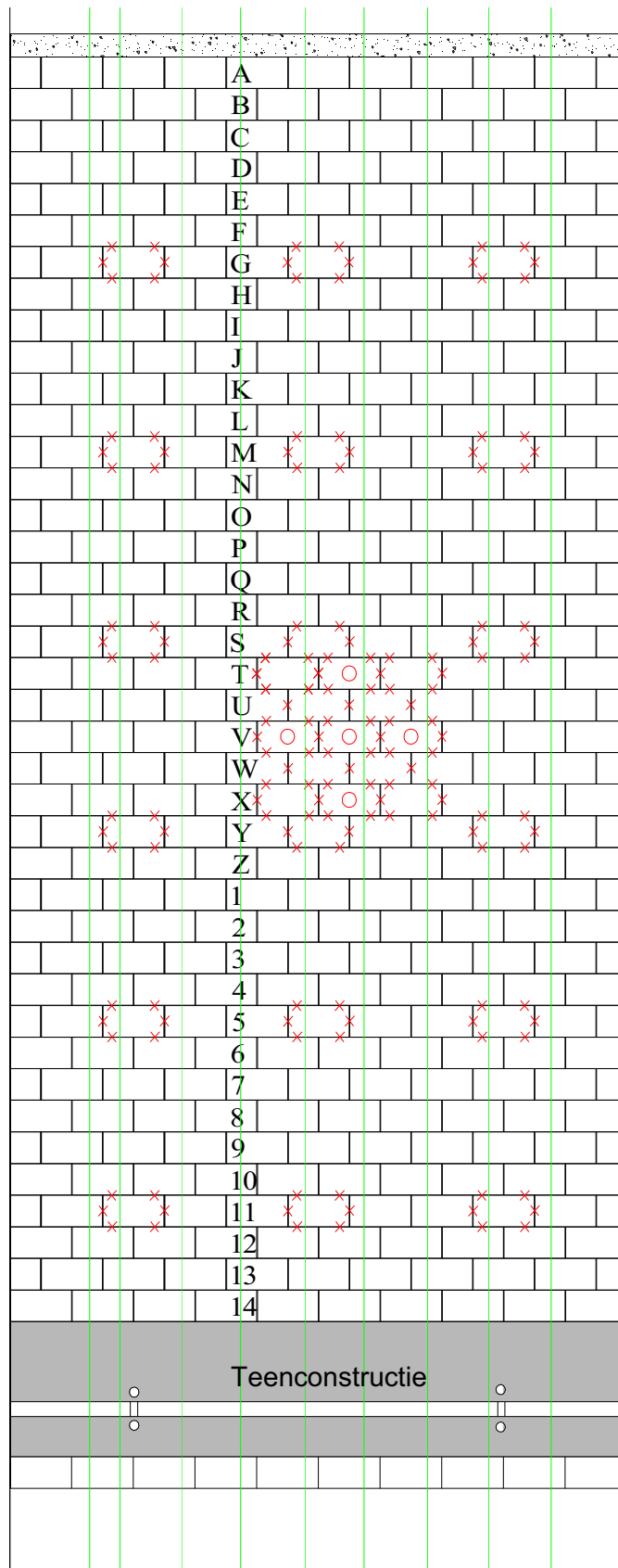
Deltagootproeven met blokken op hun kant

Opzet in de Deltagoot (Detaildoorsnede)



Deltagootproeven met blokken op hun kant

Opzet in de Deltagoot (Drukmetingen)

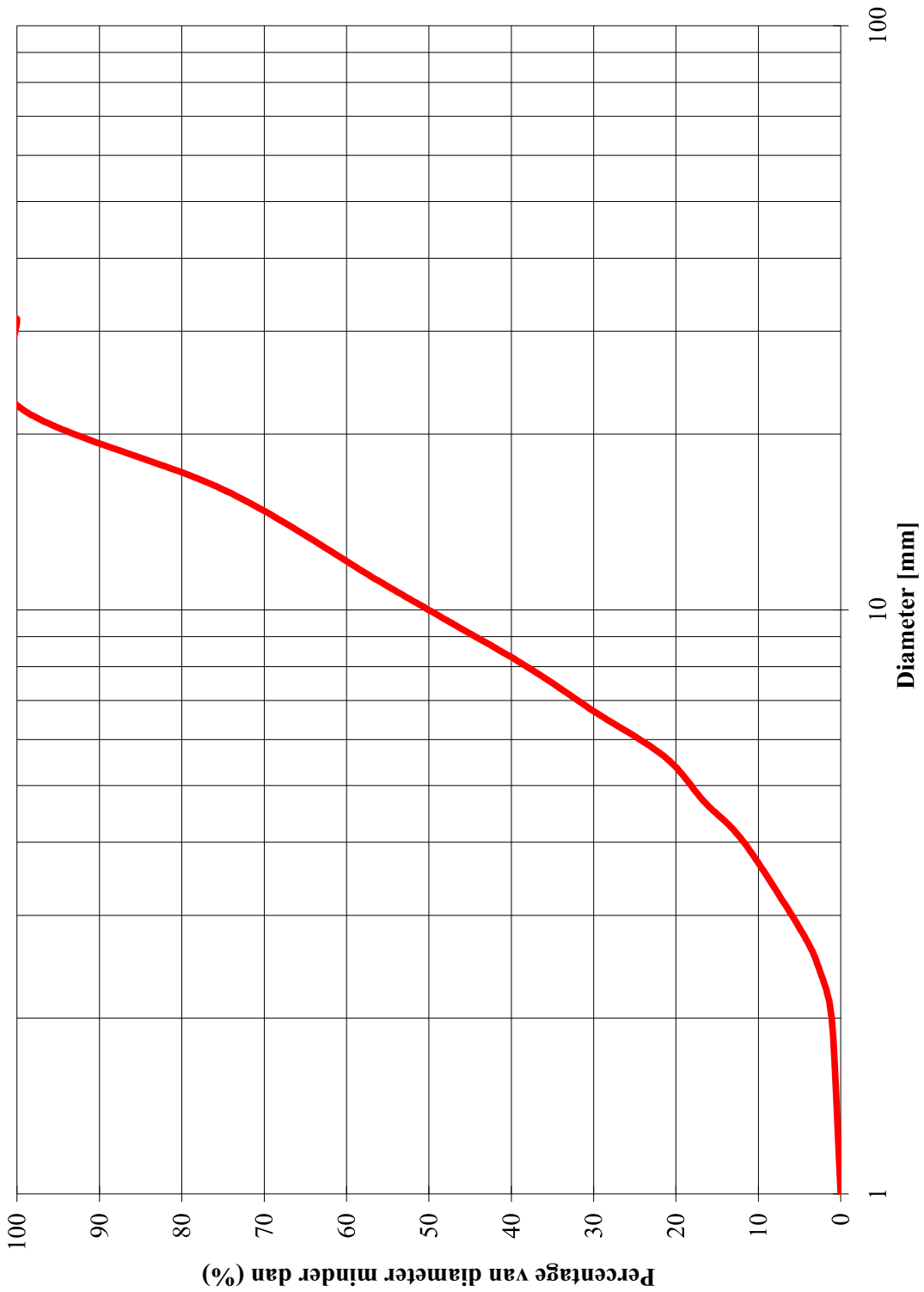


- Profielmeetpositie
- × Meetpositie
- Drukopnemer

Deltagootproeven met blokken op hun kant

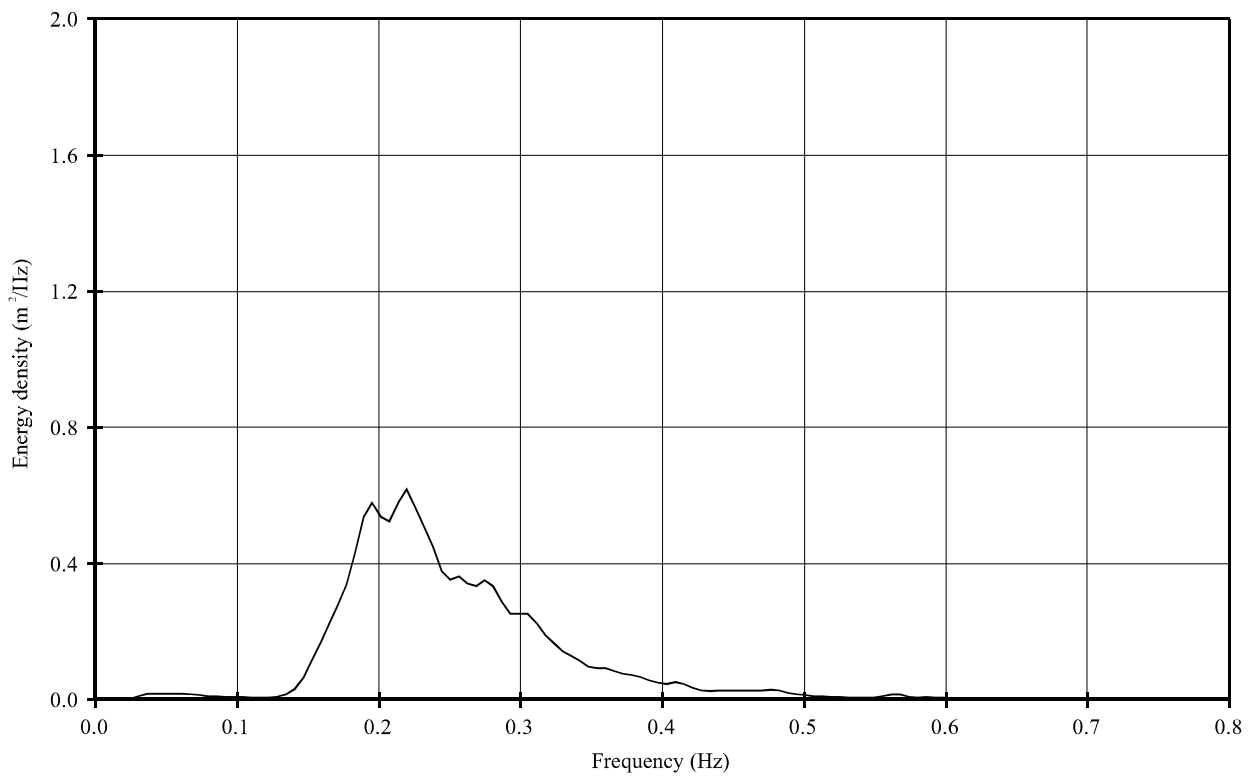
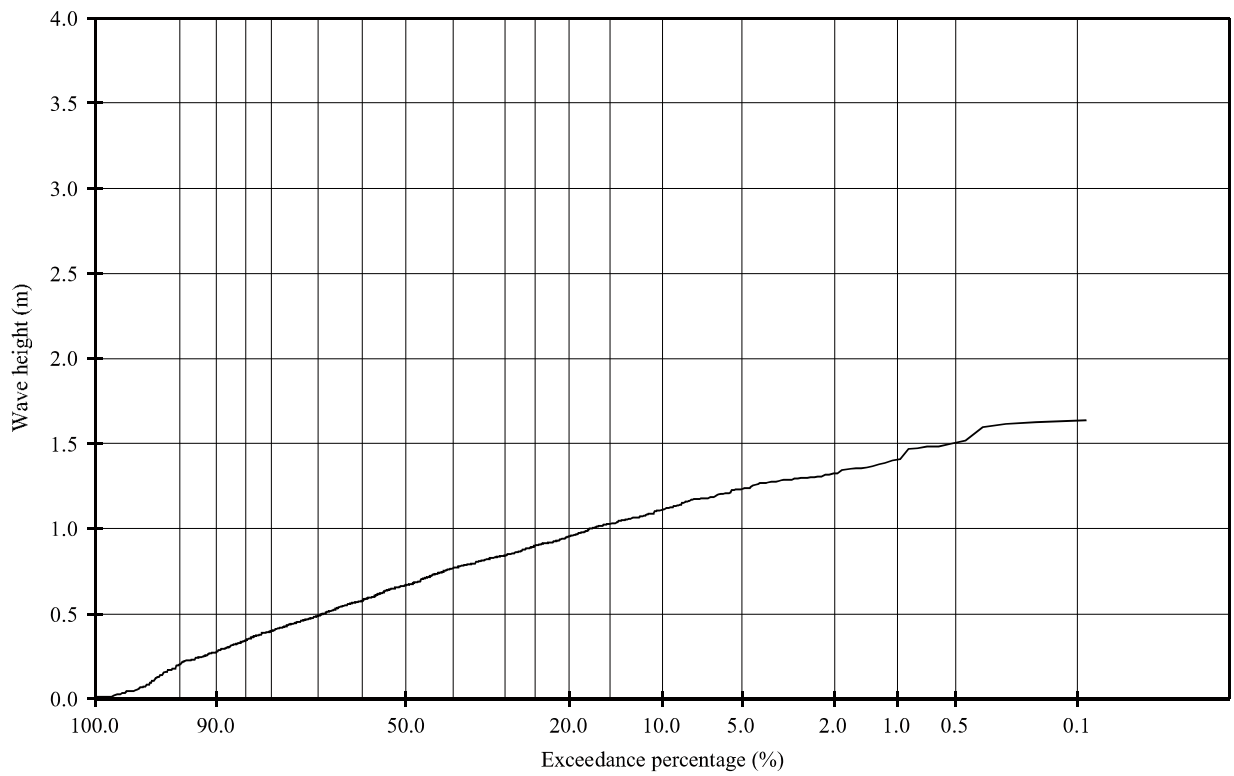
Posities van spleetmetingen

Korrelverdeling volgens NEN5104



Deltagootproeven met blokken op hun kant

Zeefkromme



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

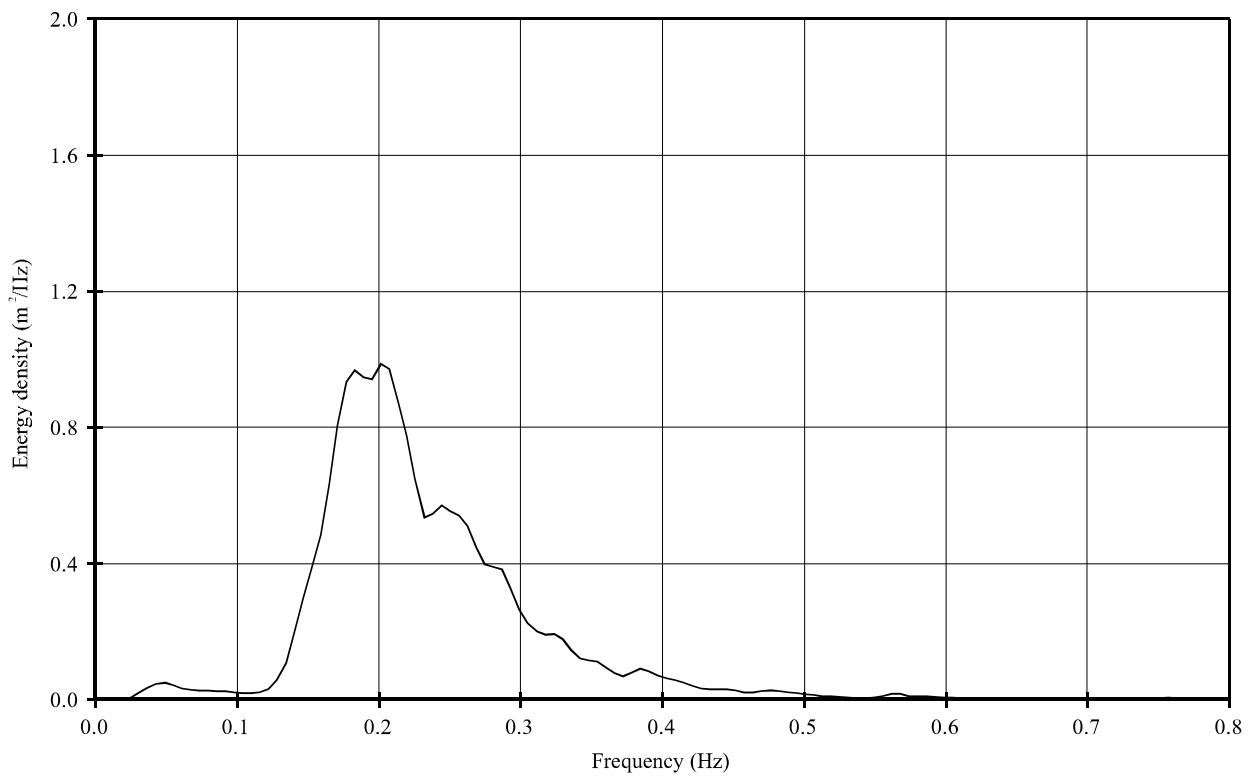
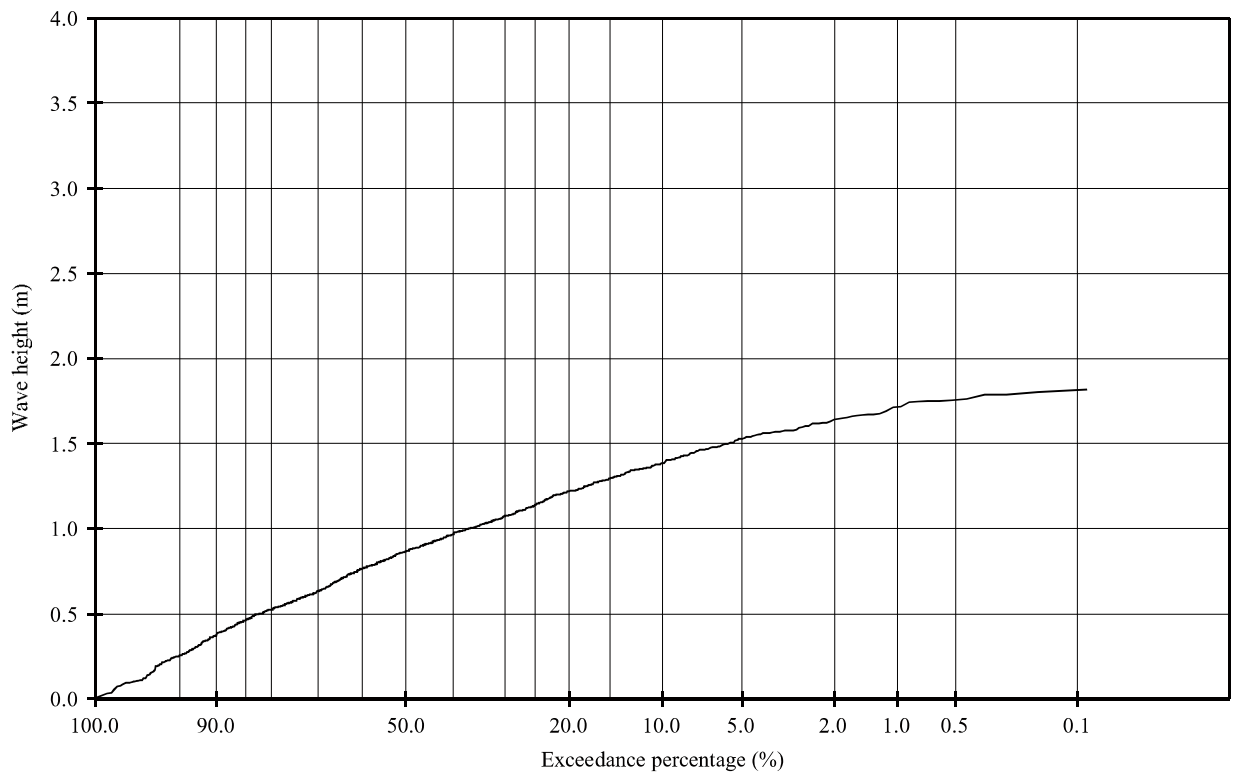
T11

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.6



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

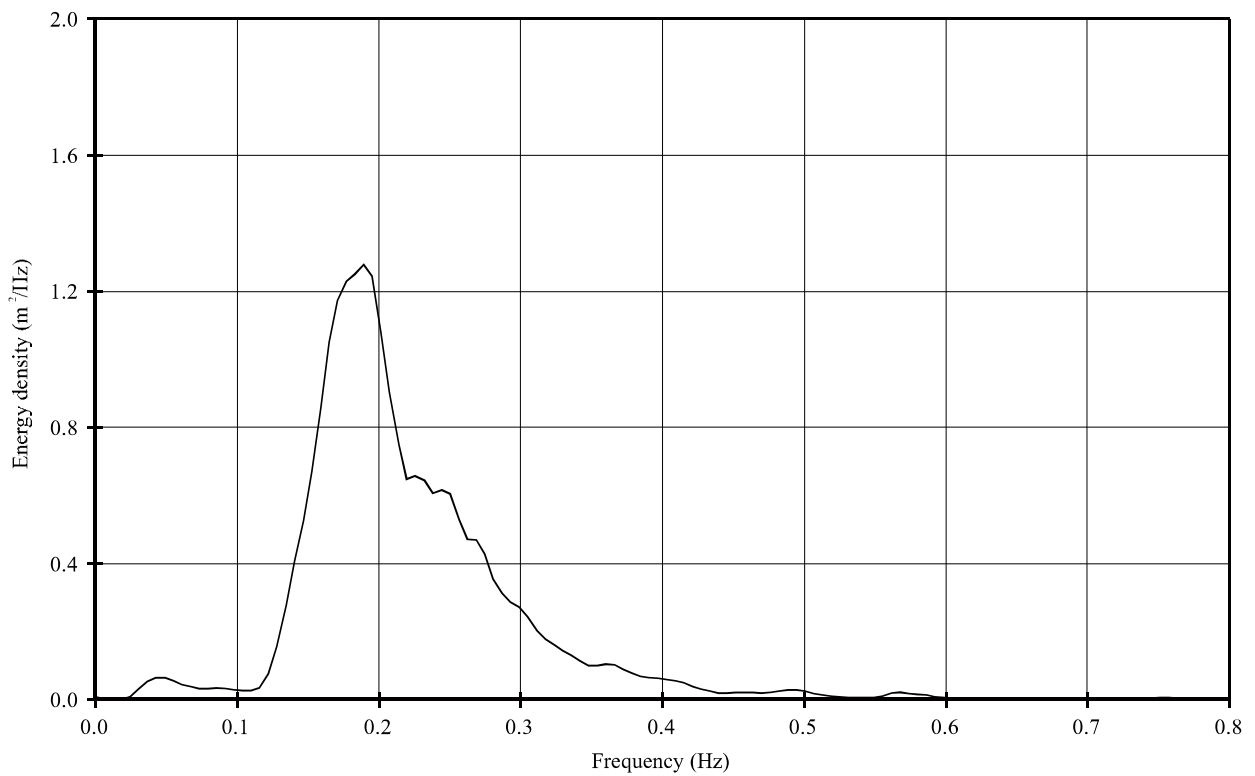
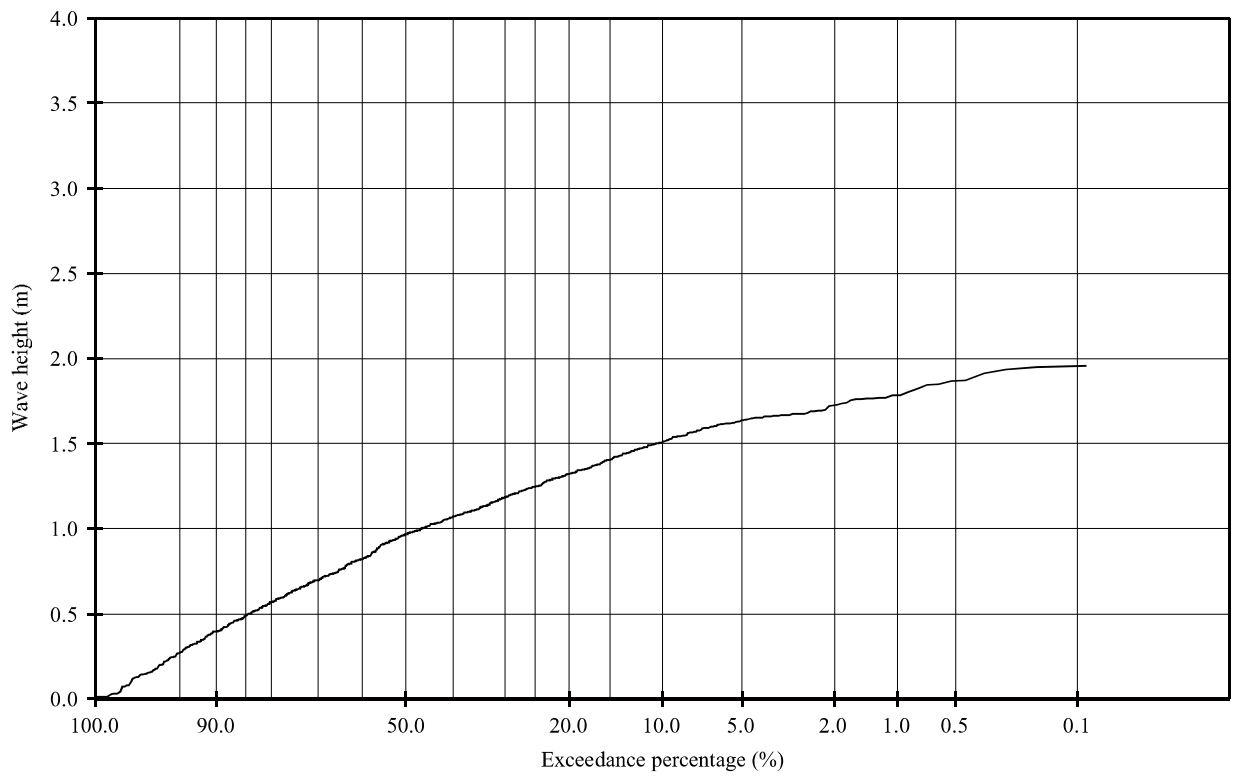
T12

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.7



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

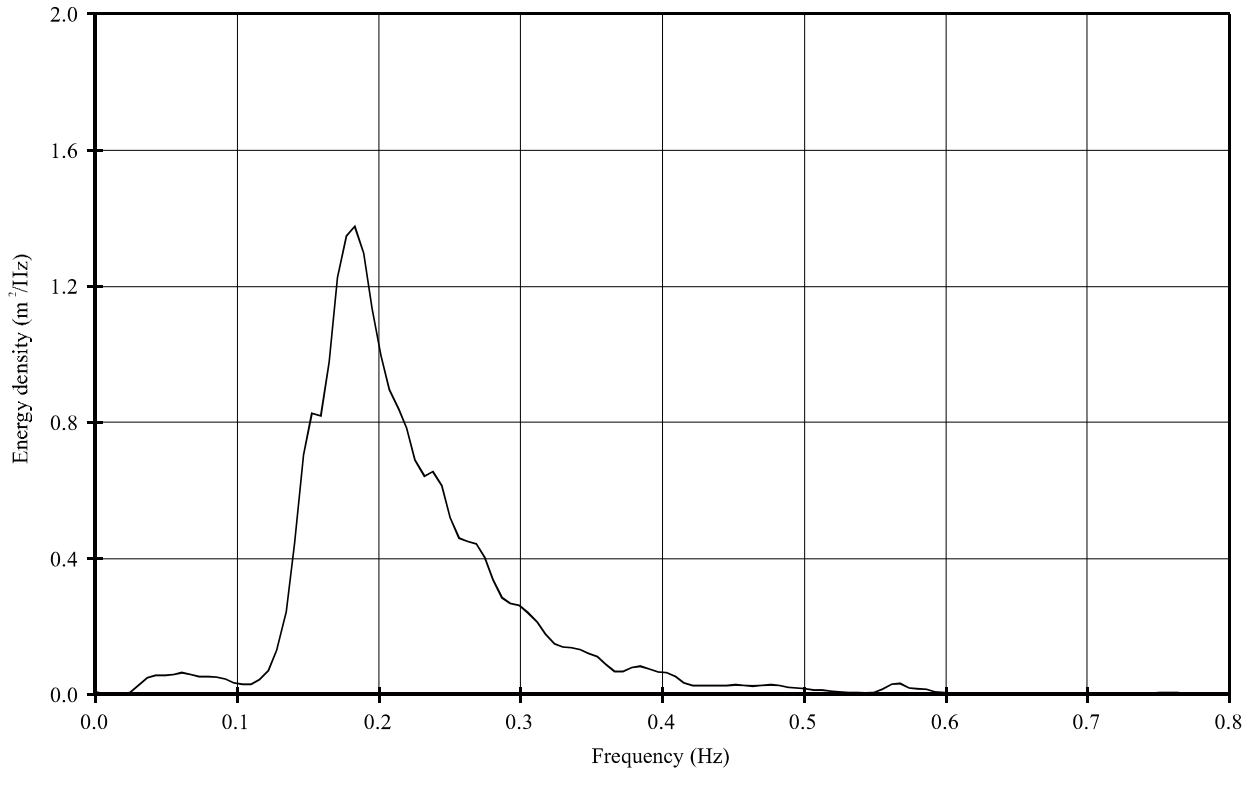
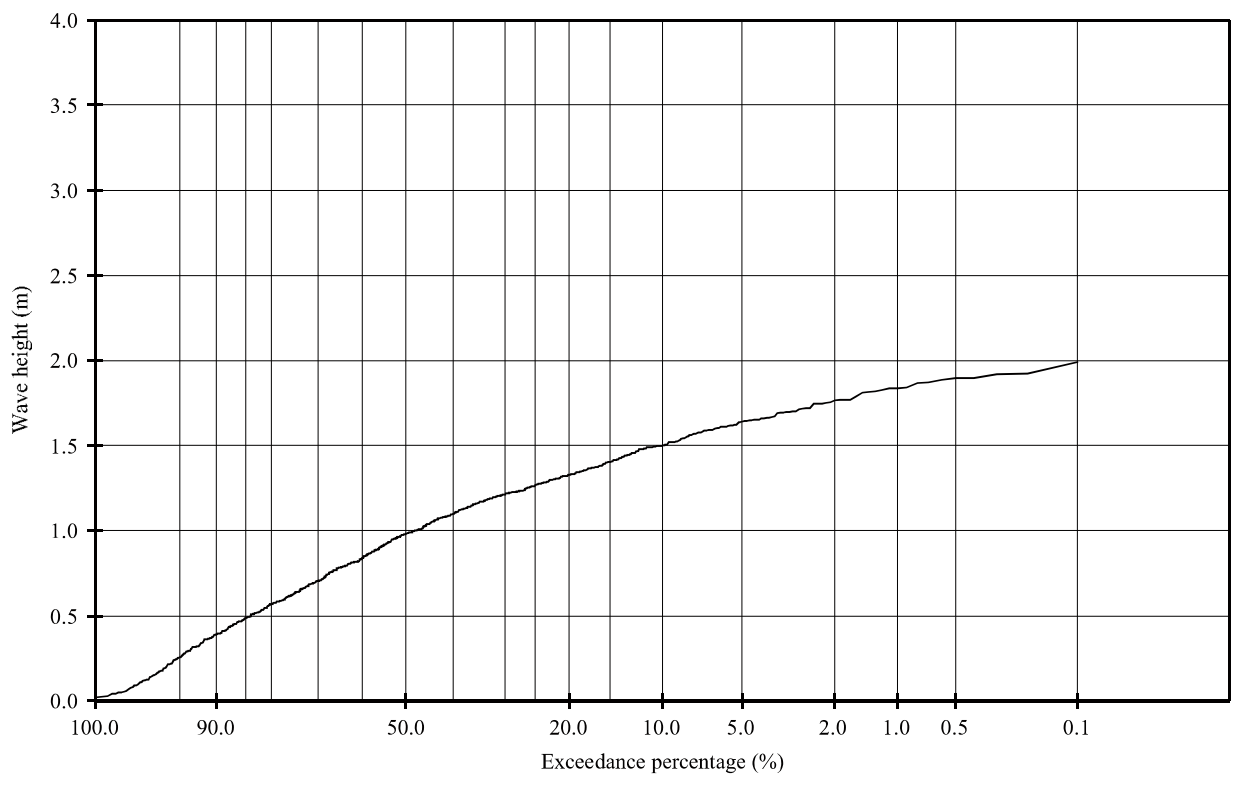
T13

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.8



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

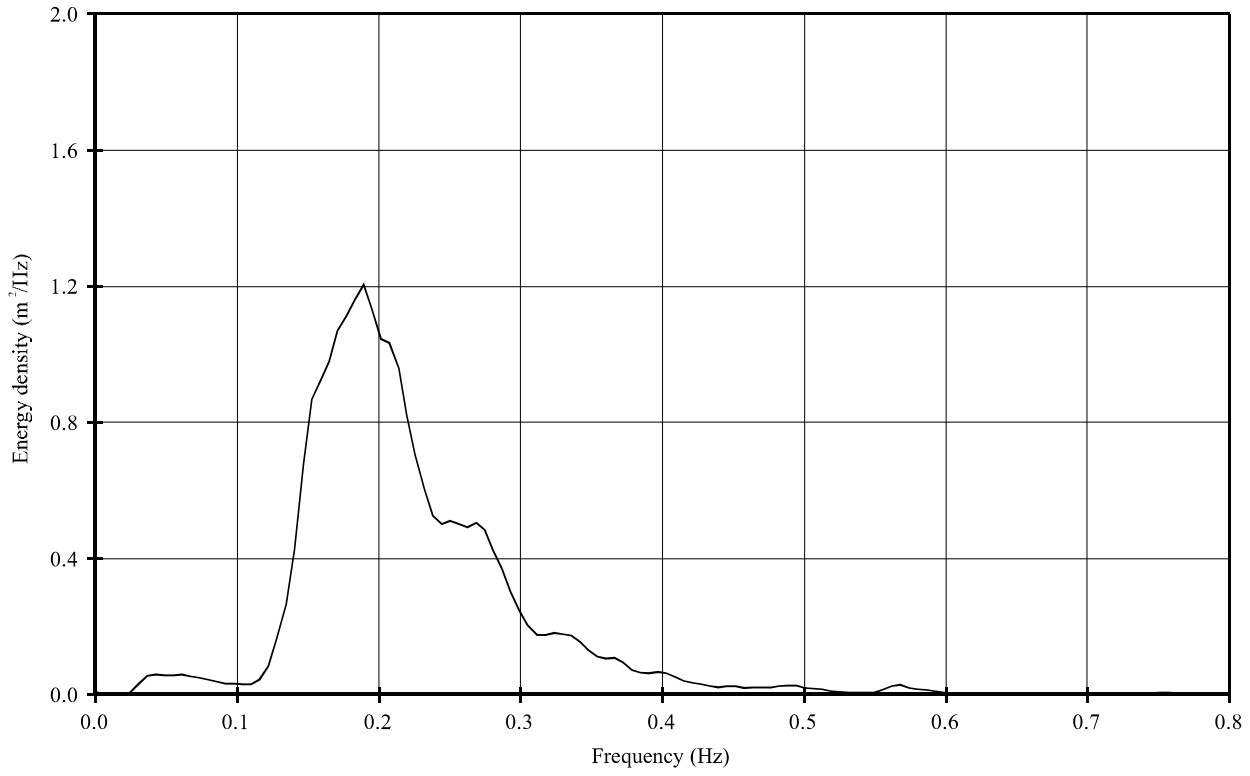
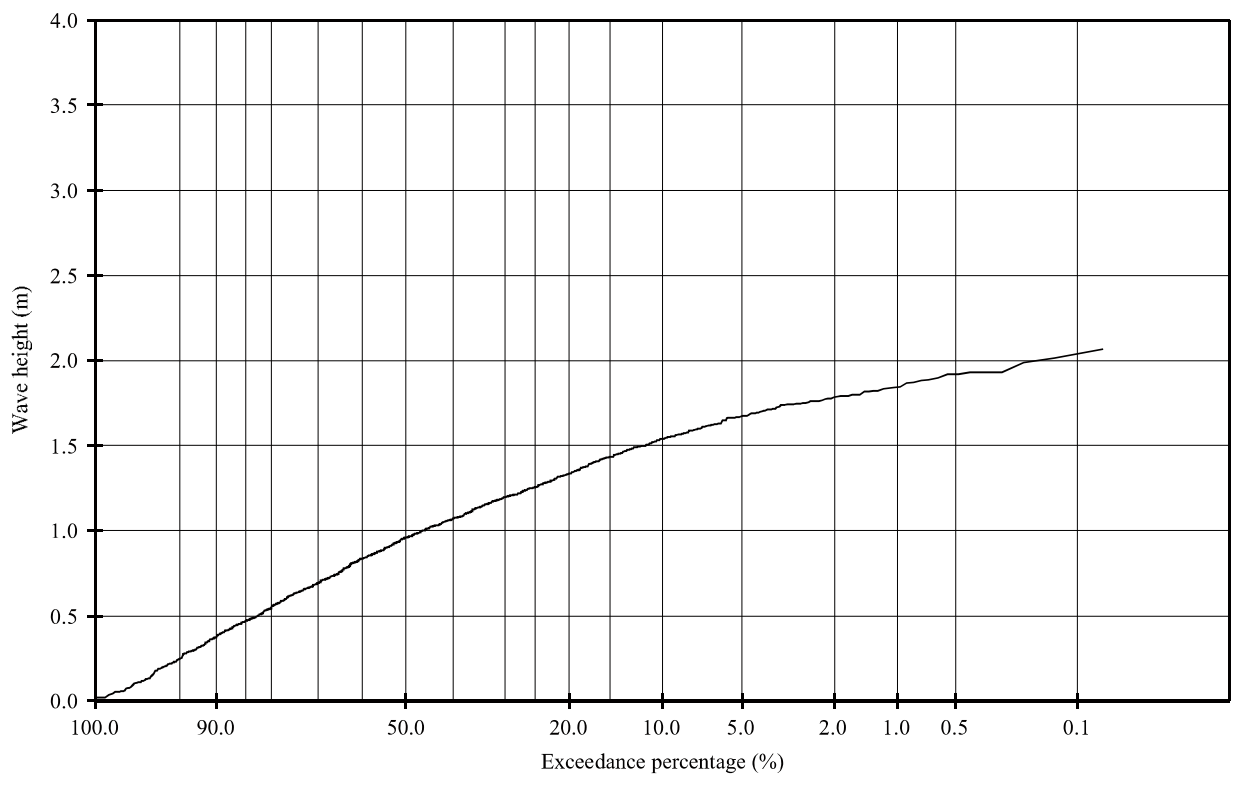
T14

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.9



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

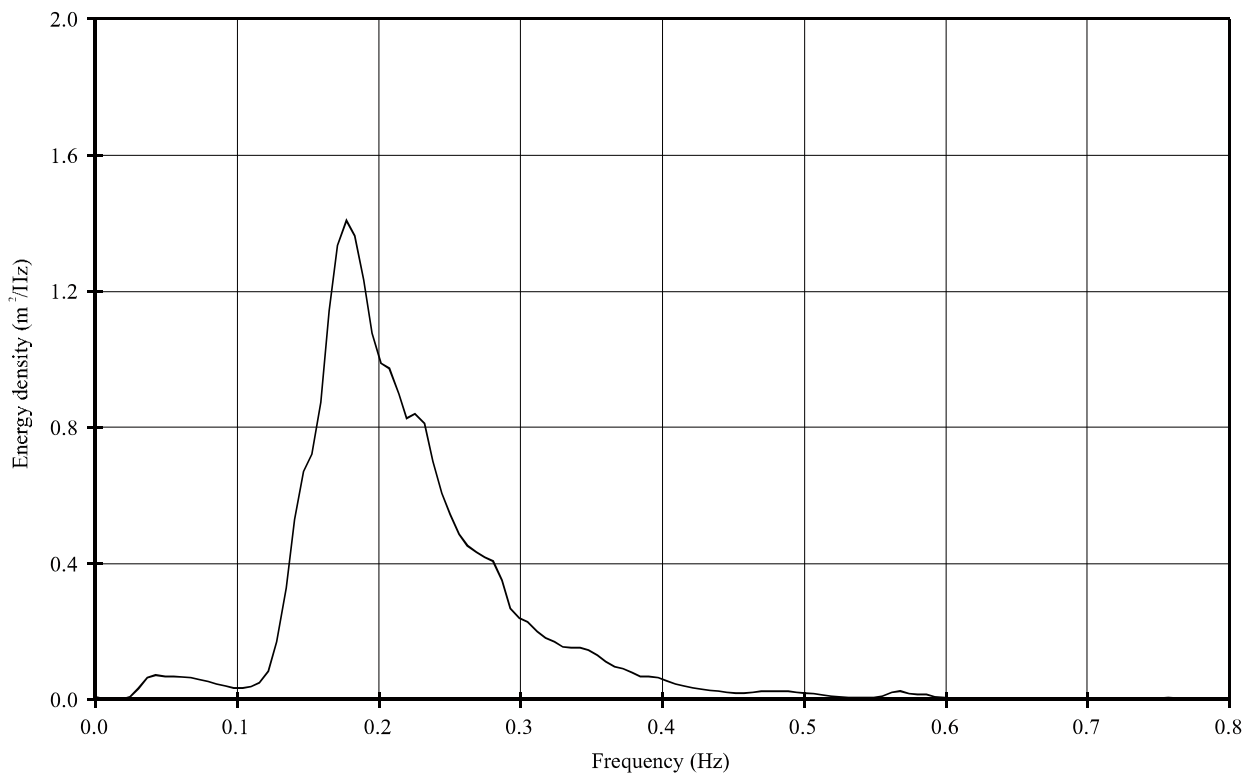
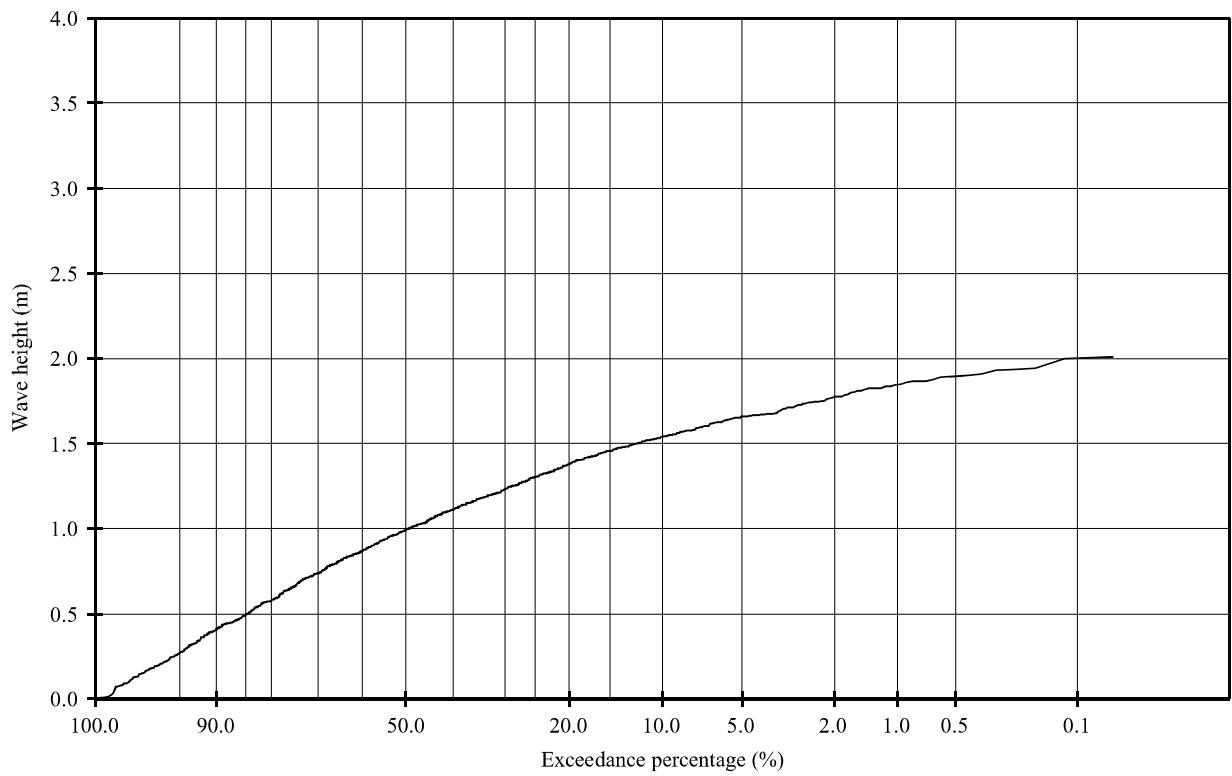
T15

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.10



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

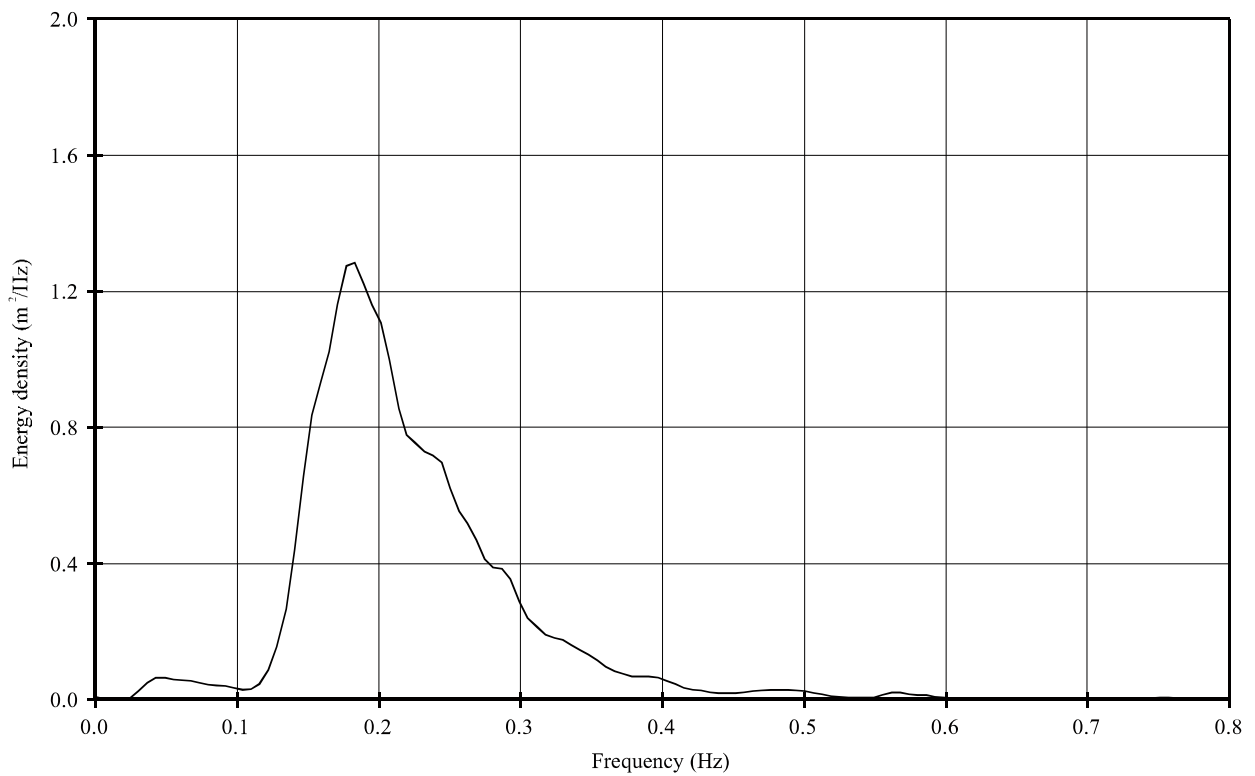
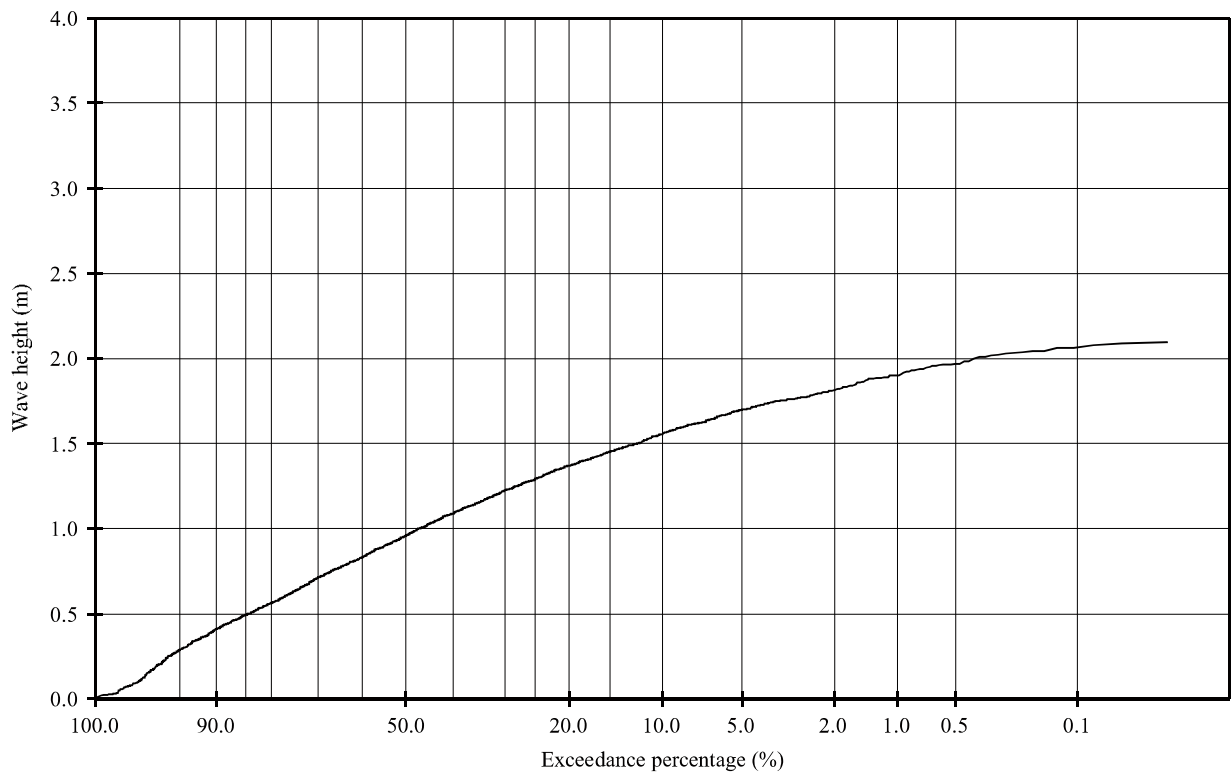
T16

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.11



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

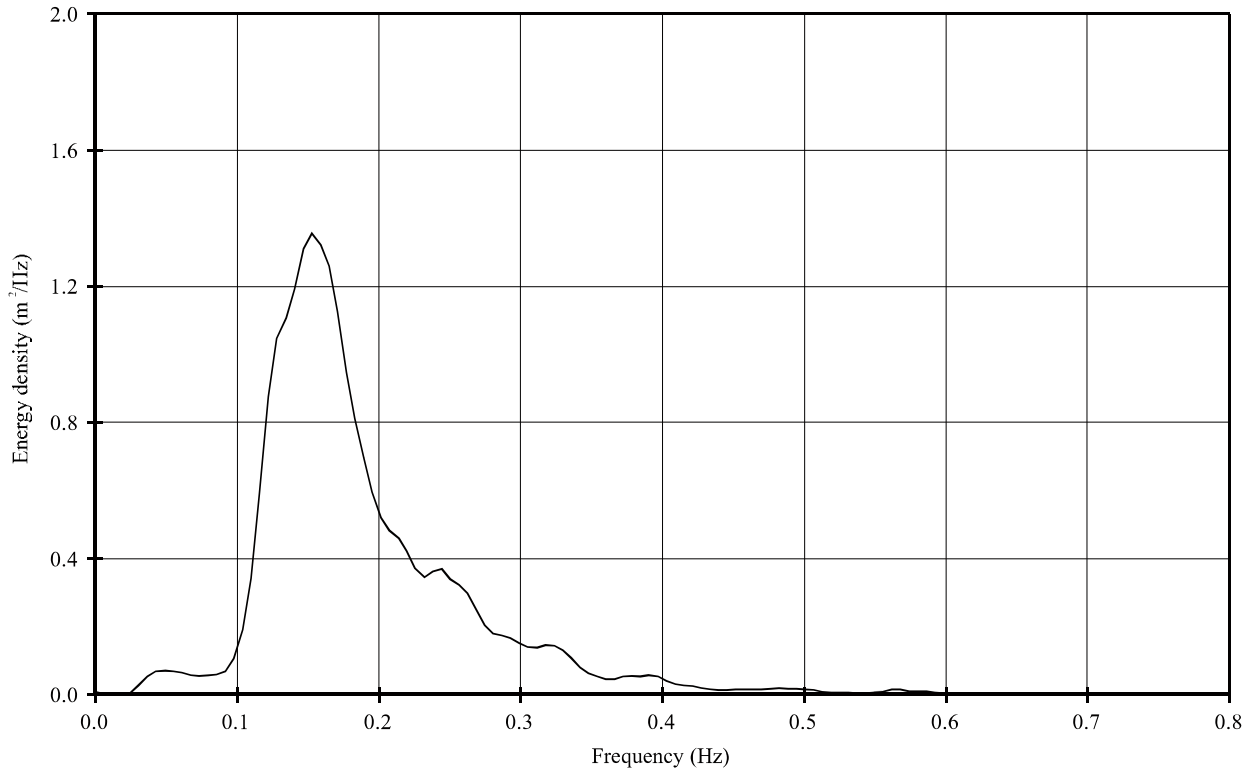
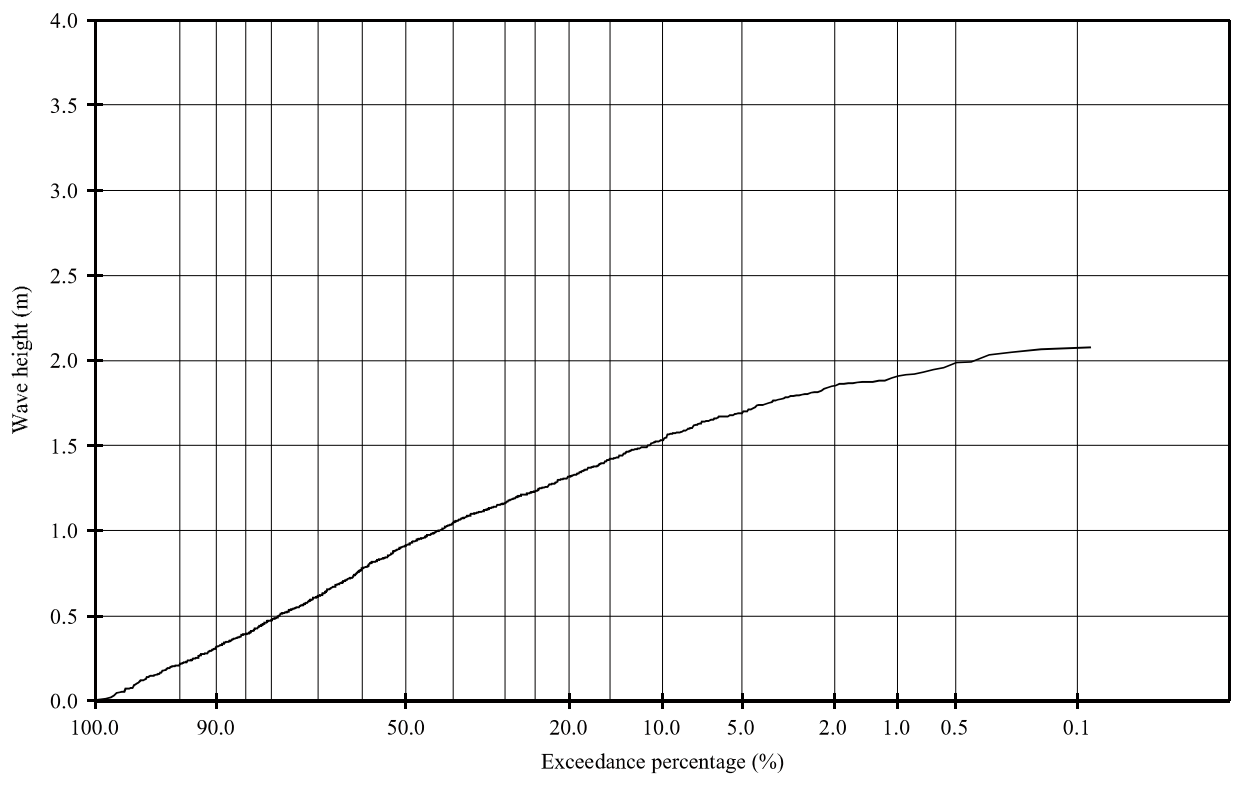
T17

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.12



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

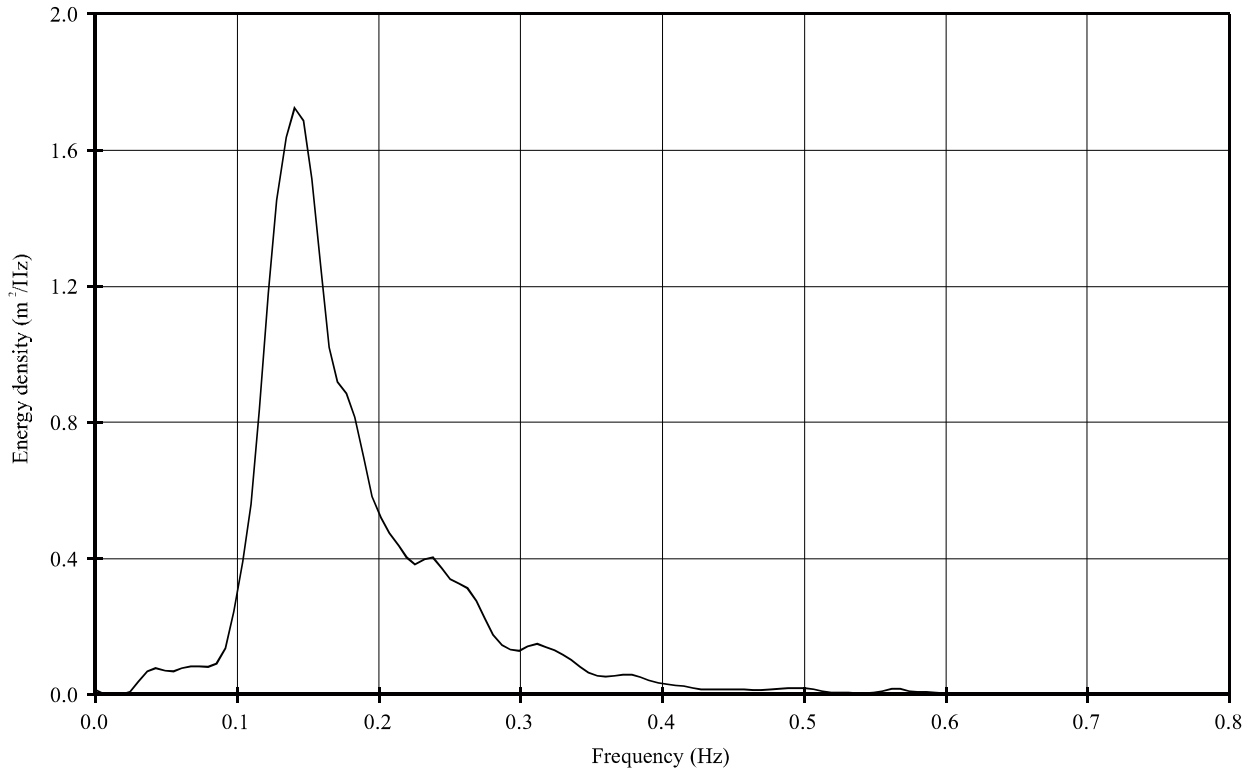
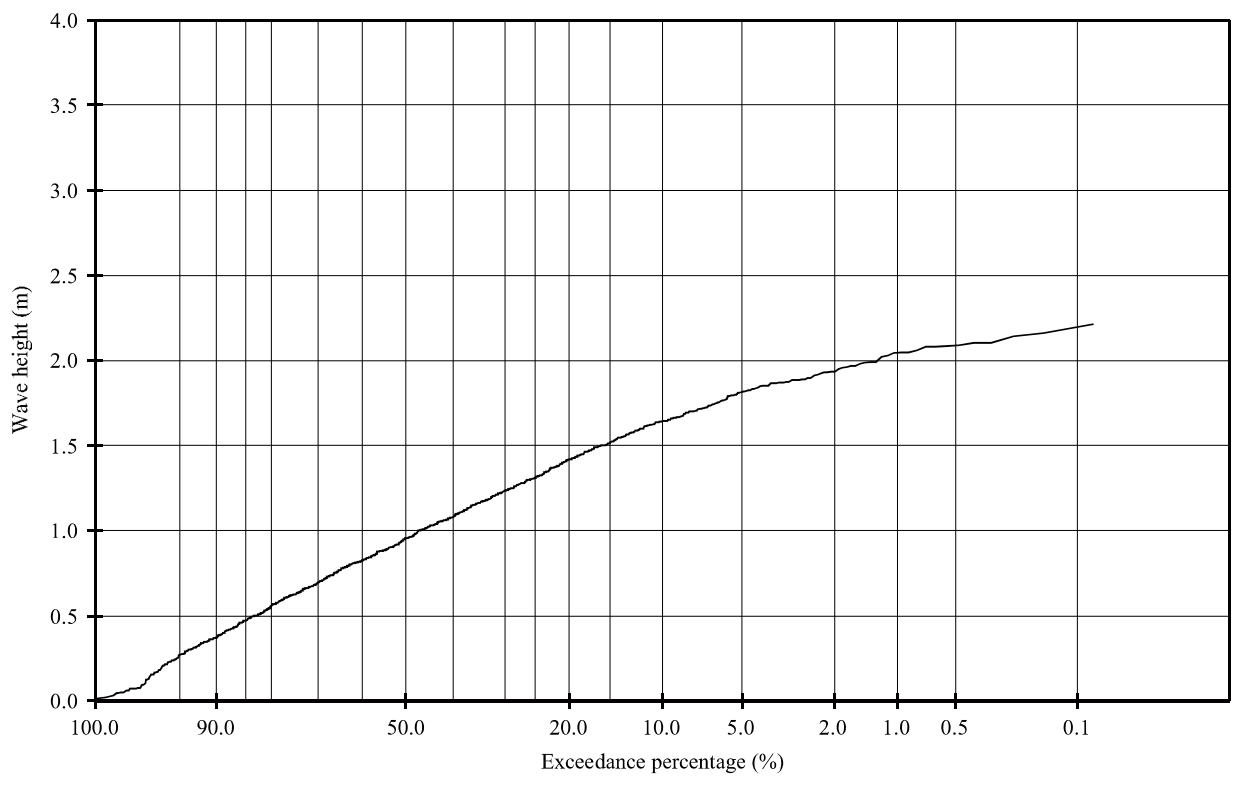
T21

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.13



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

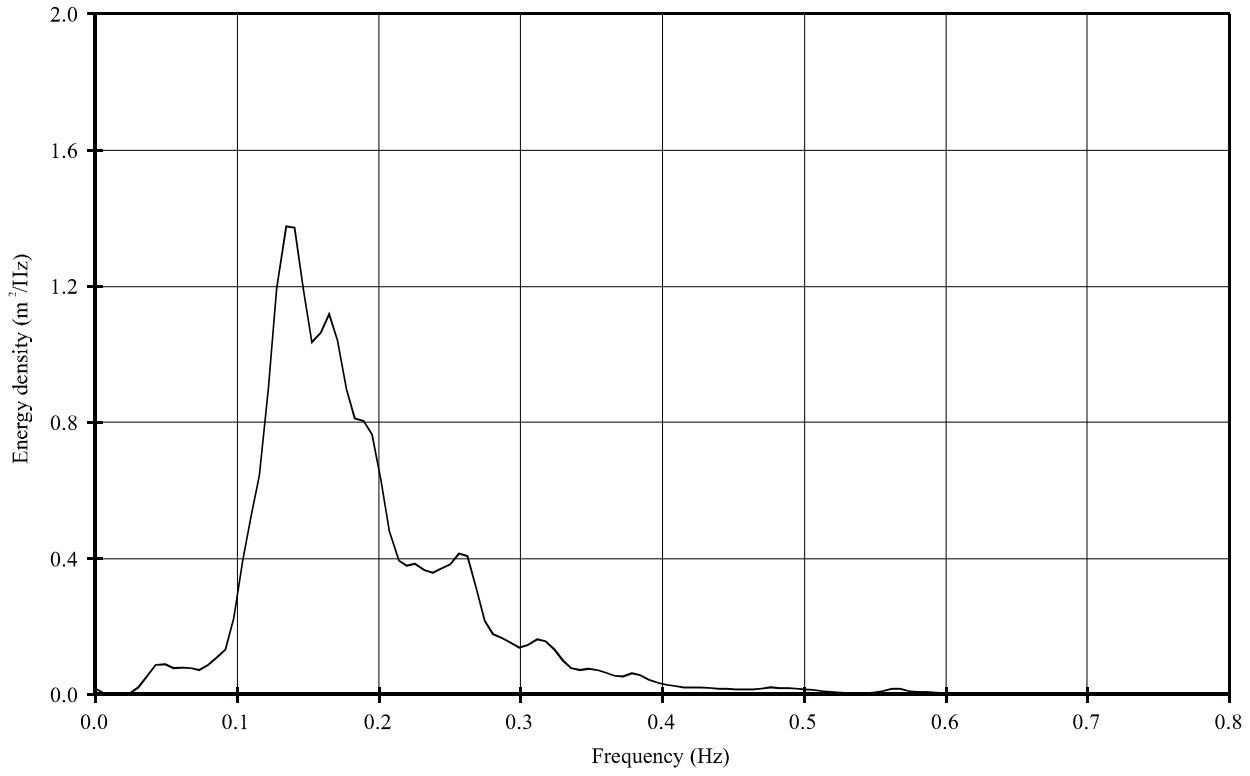
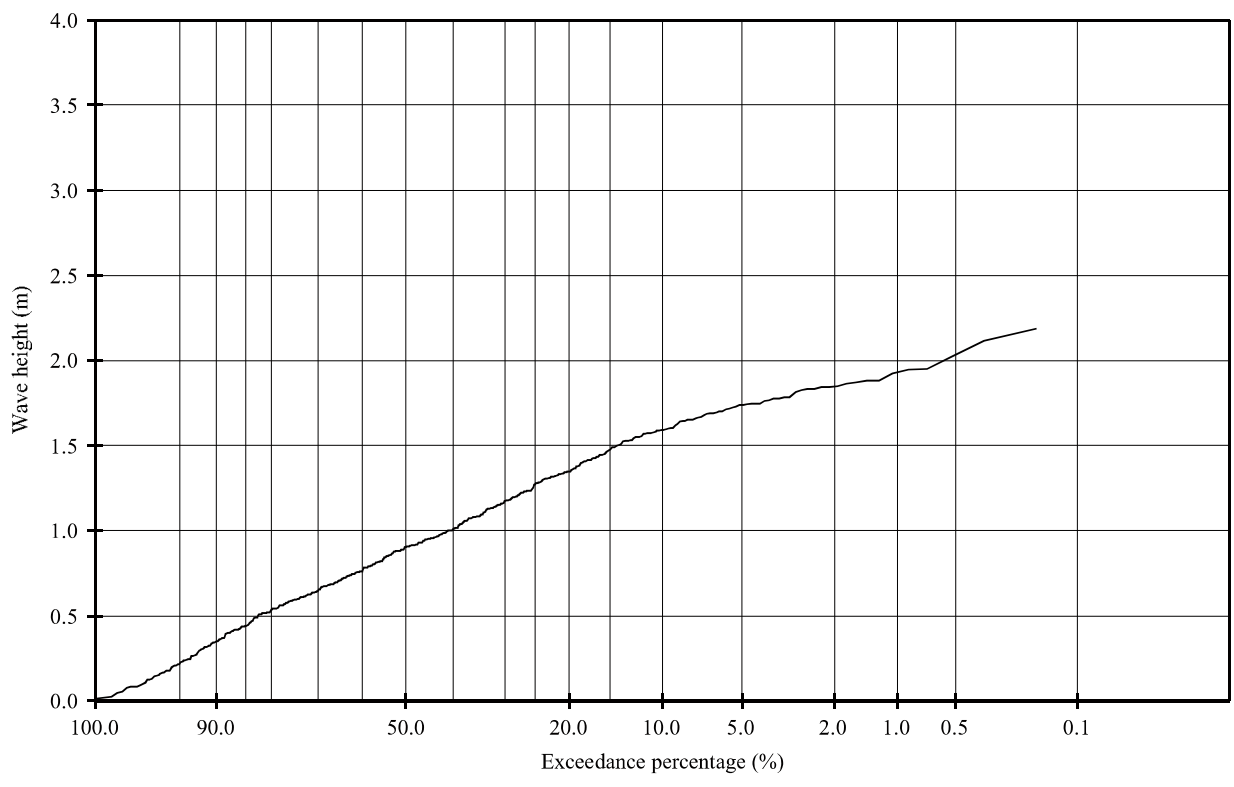
T22

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.14



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

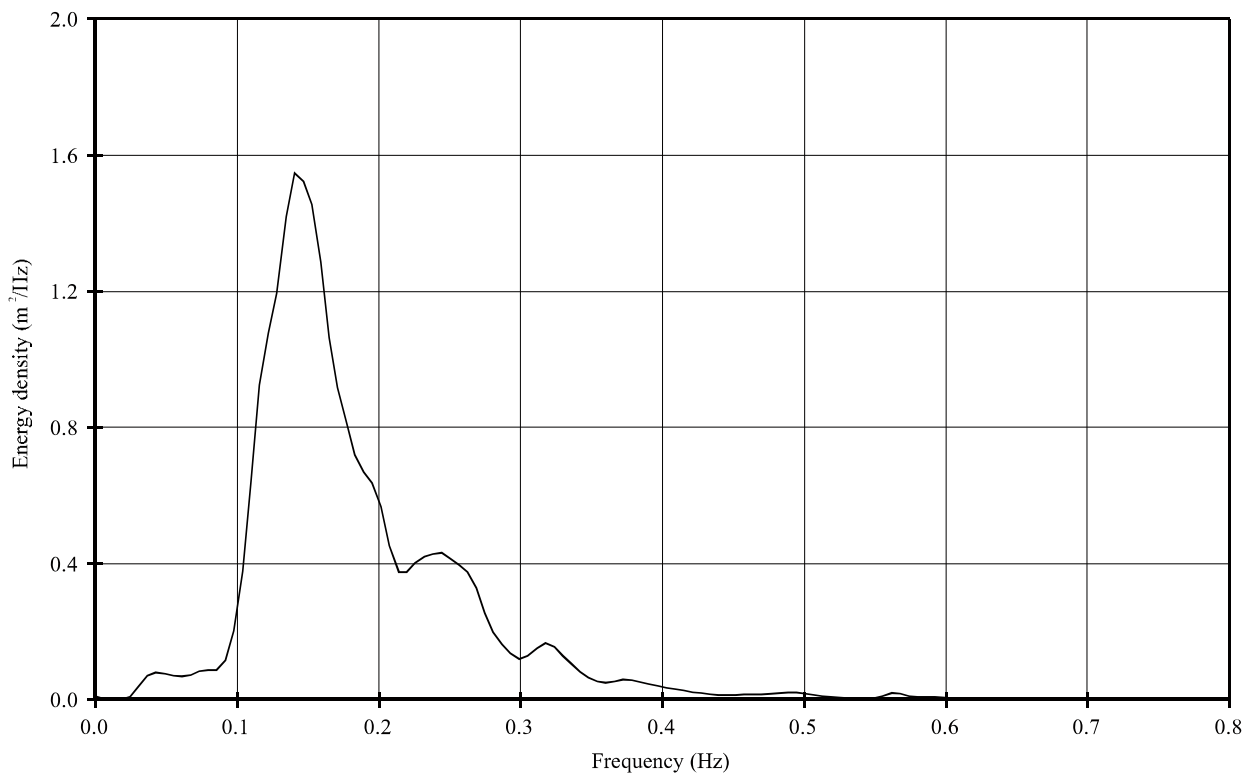
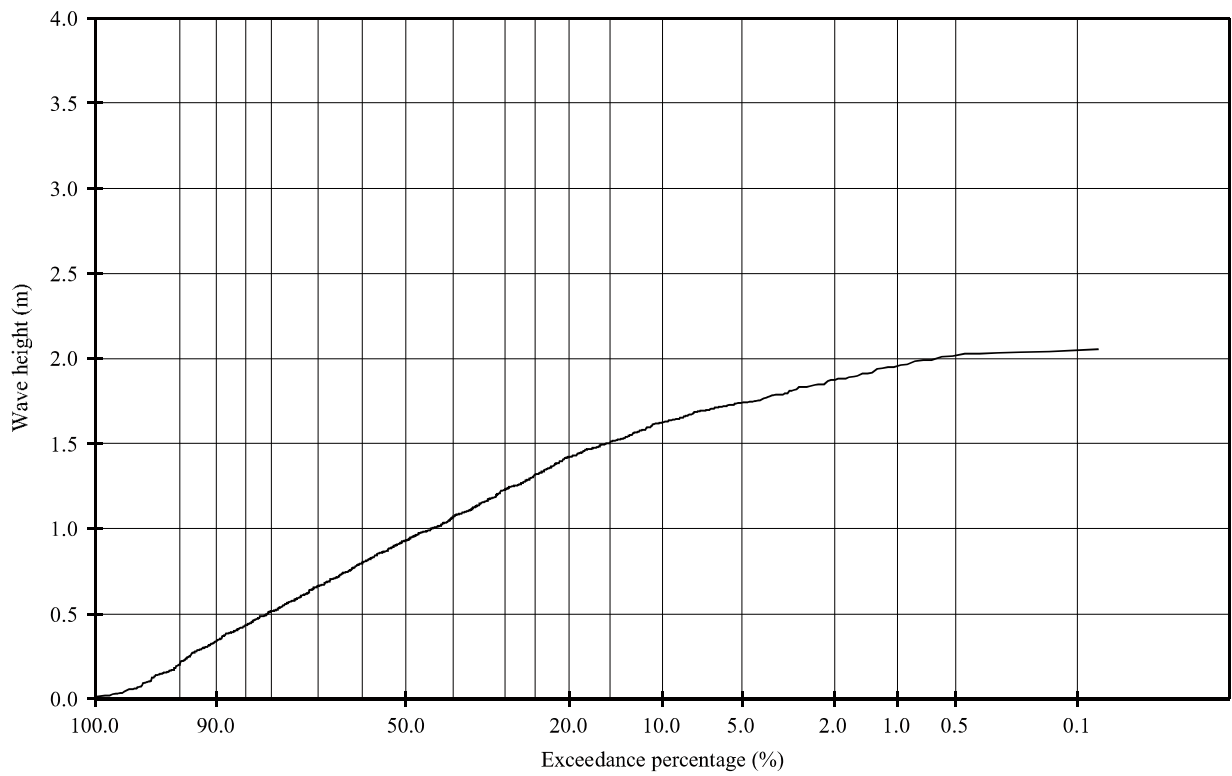
T23b

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.15



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

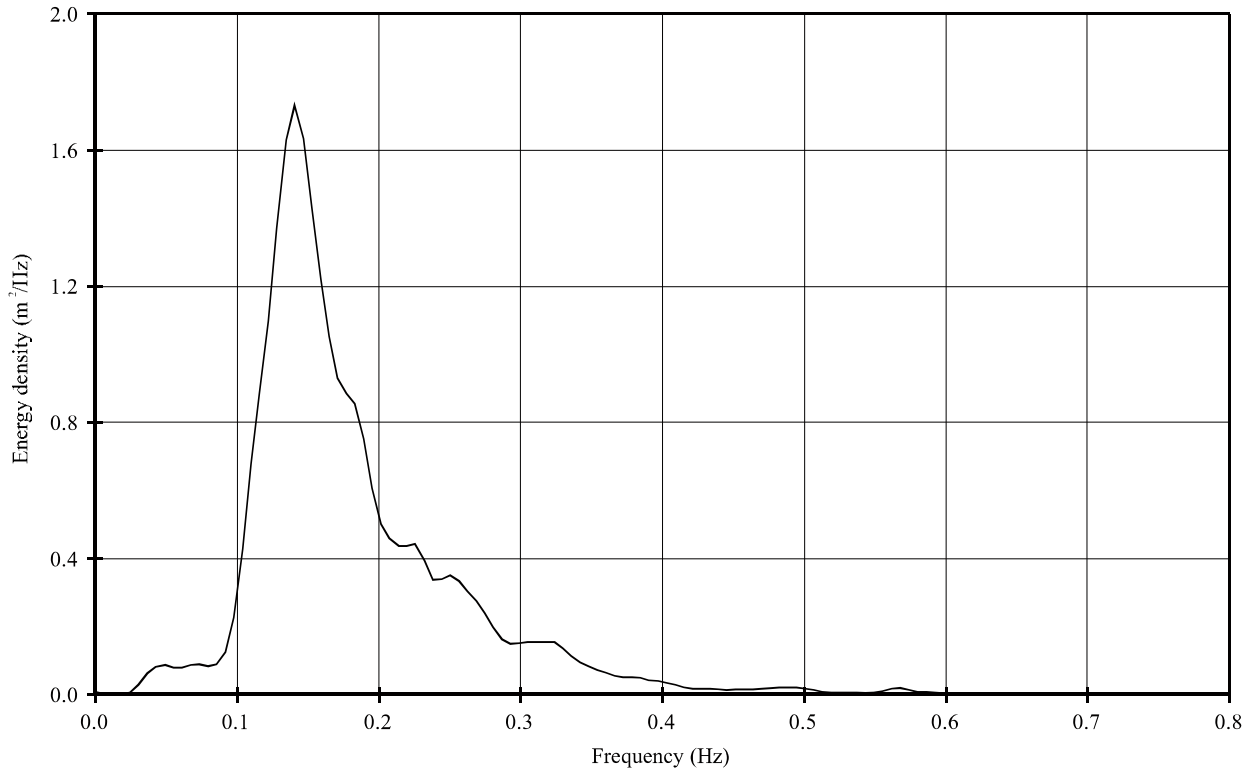
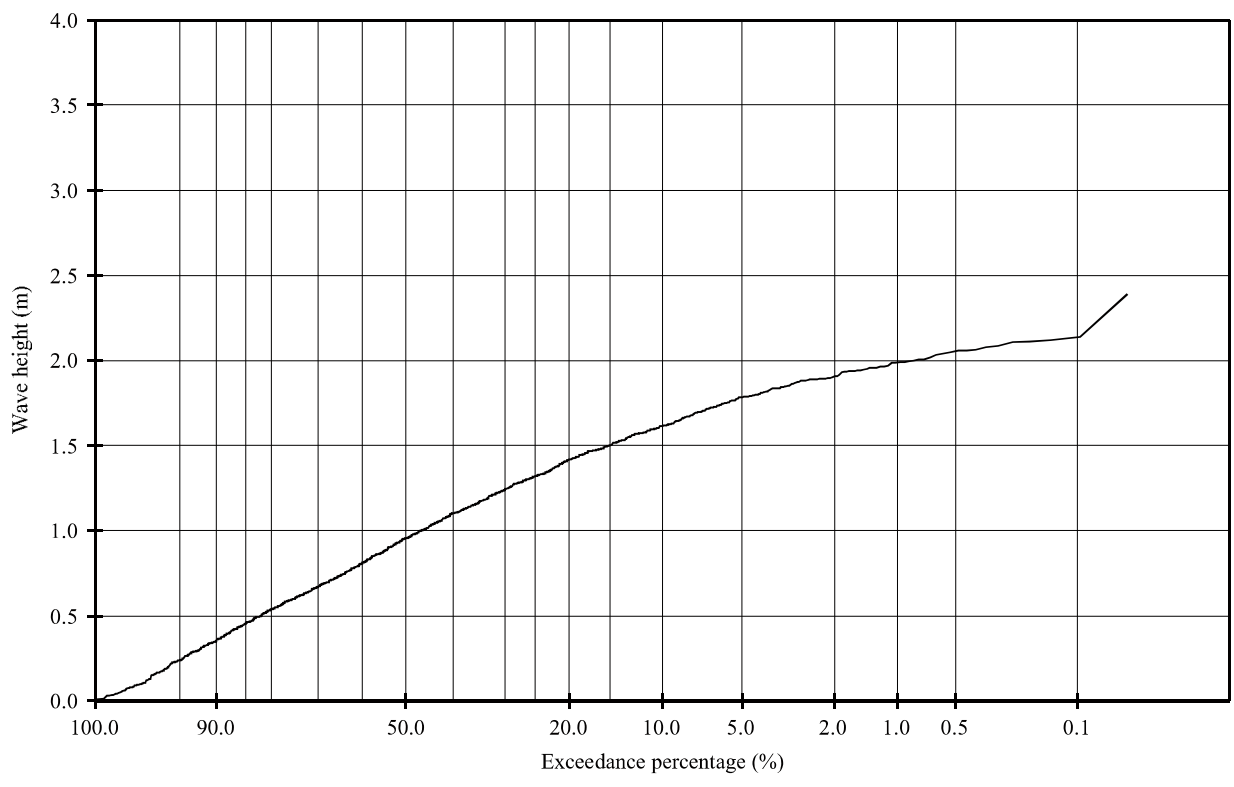
T24b

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.16



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

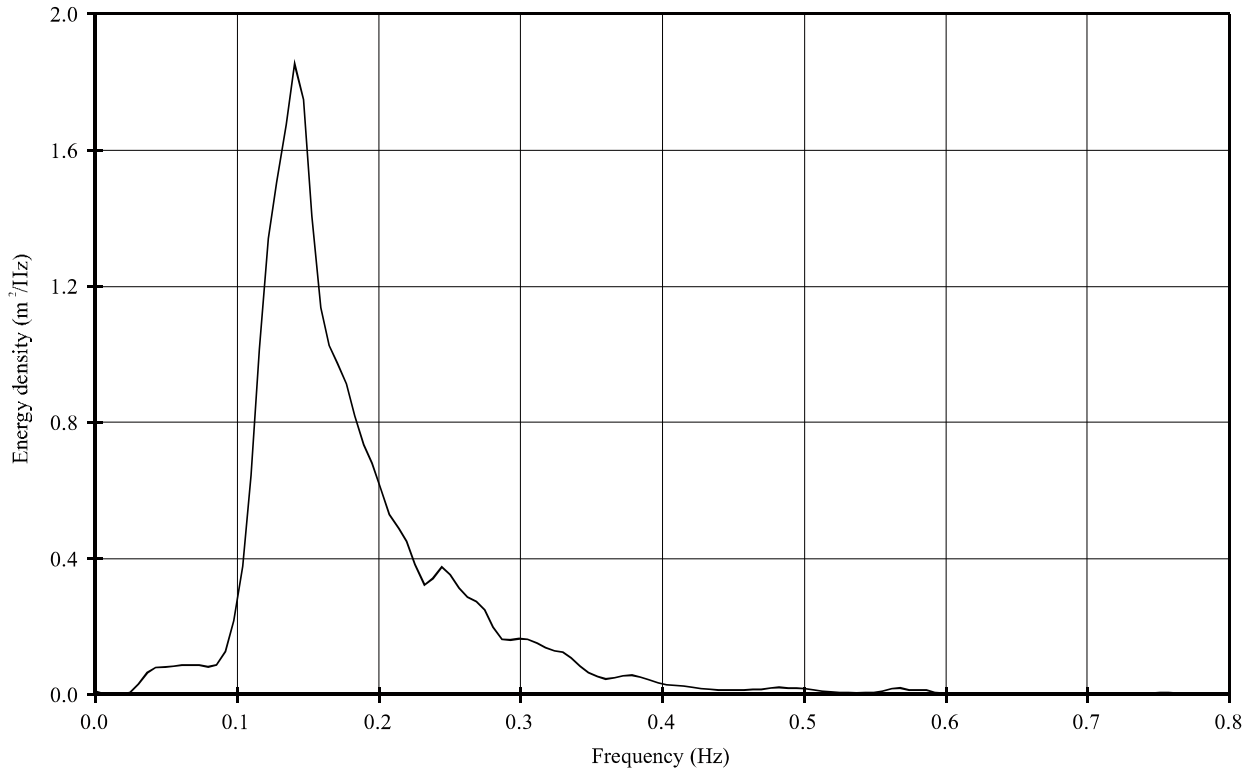
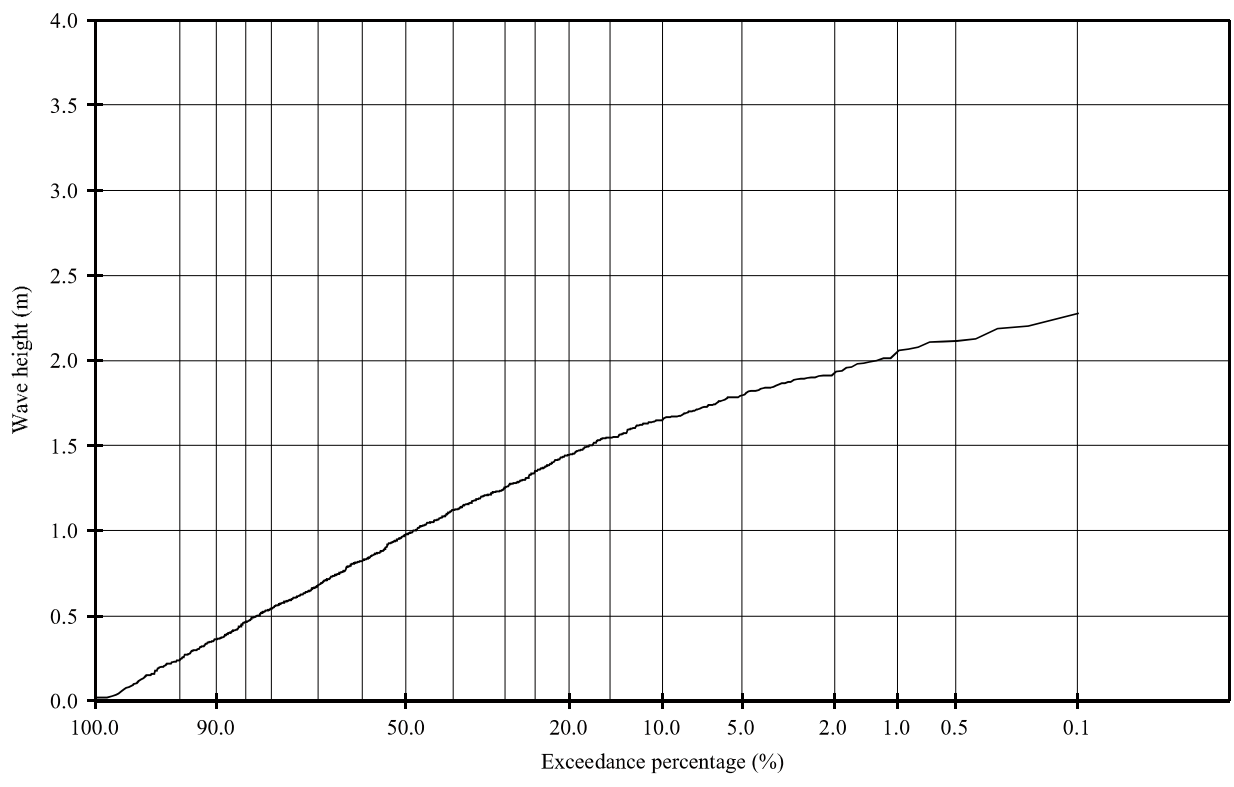
T25

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

H4941

FIG. B.17



Golfhoogte overschrijdingskromme en spectrum

T26

Inkomend

WL | Delft Hydraulics

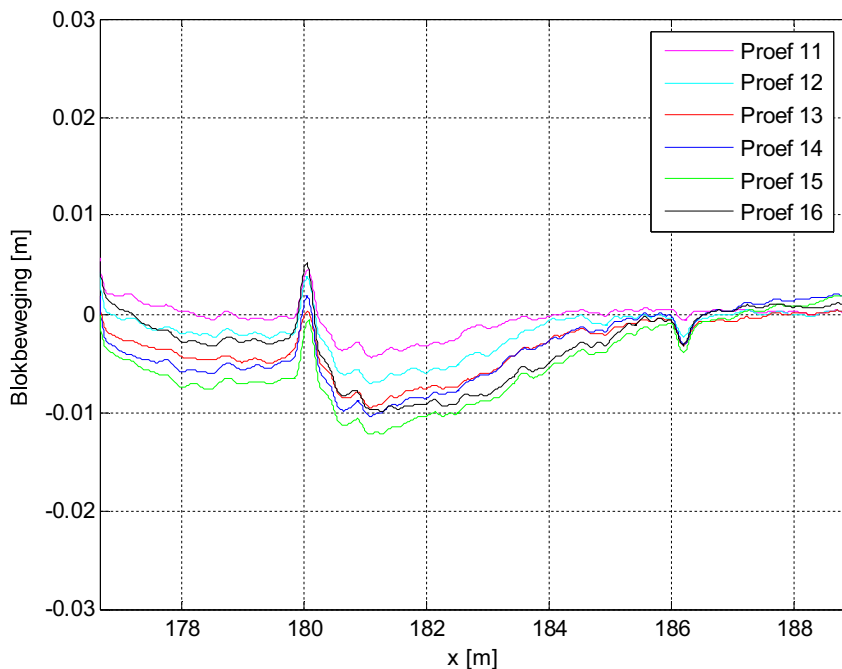
H4941

FIG. B.18

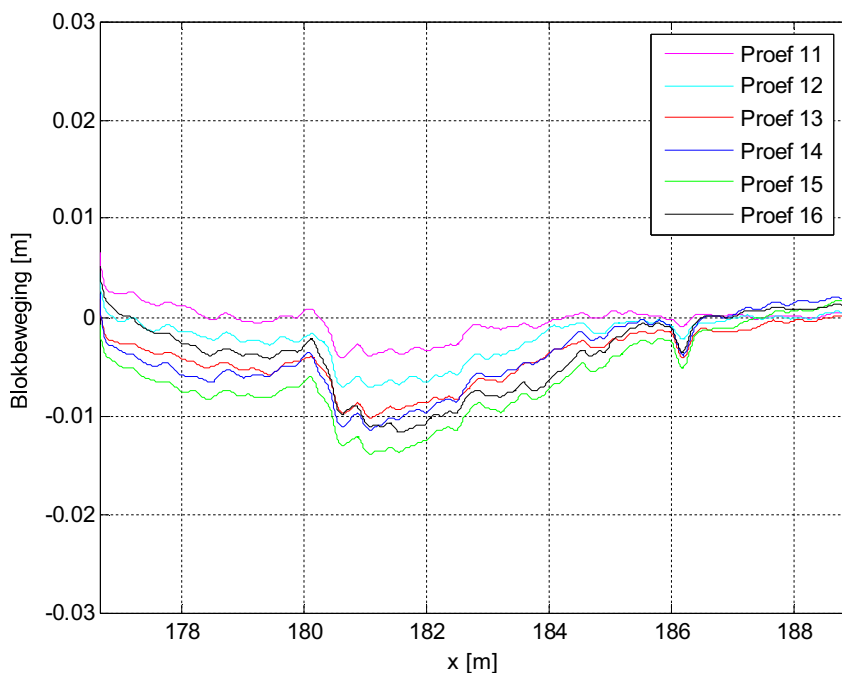
C Profielen van taludoppervlak

C.1 Gemiddelde taludoppervlak ten opzichte van begin

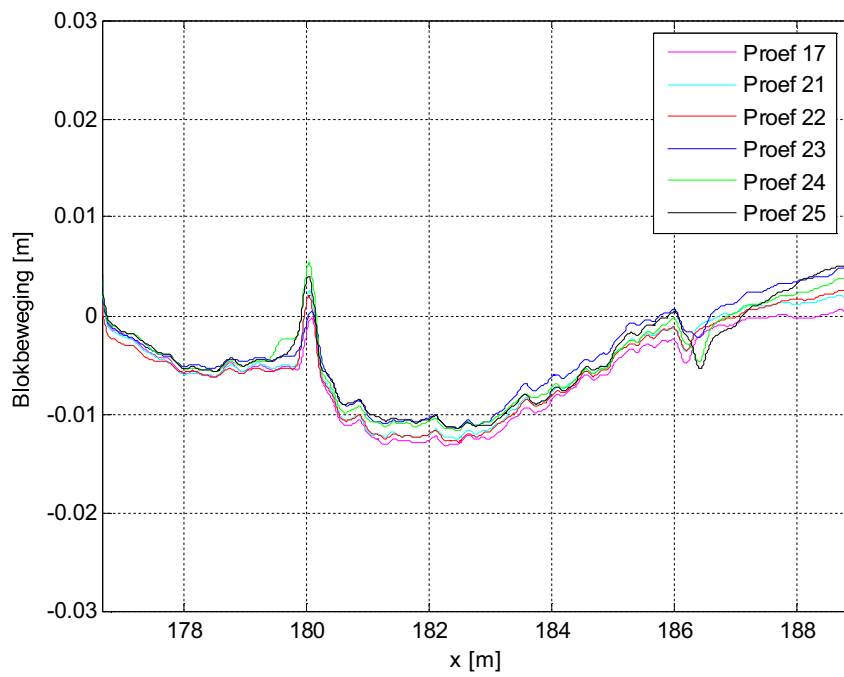
Het gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen t.o.v. het talud vóór de beproeving is gegeven in de volgende figuren waarbij gemiddeld is over de 9 gemeten raaien:



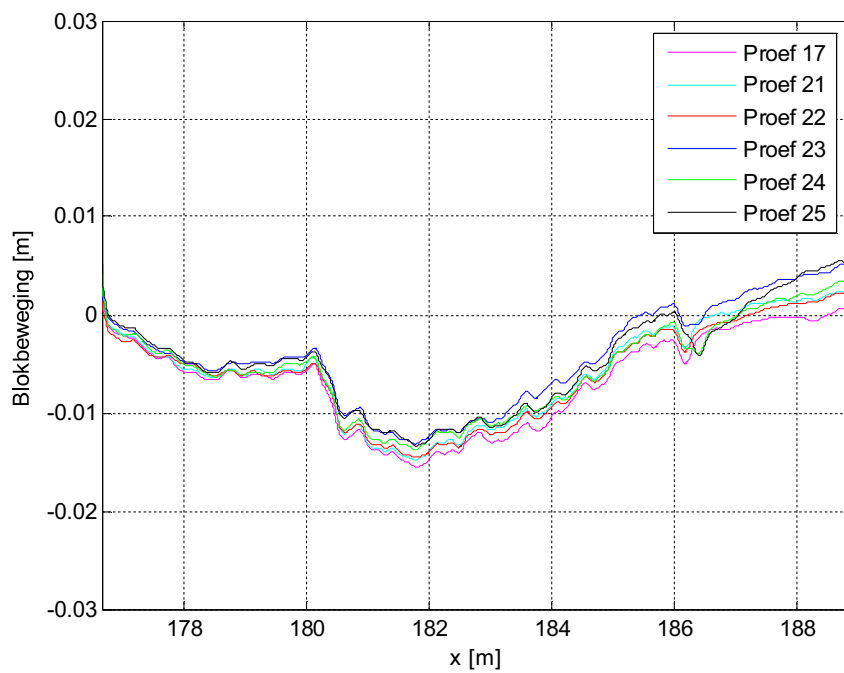
Figuur C.1 Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen (Proef 11-16)



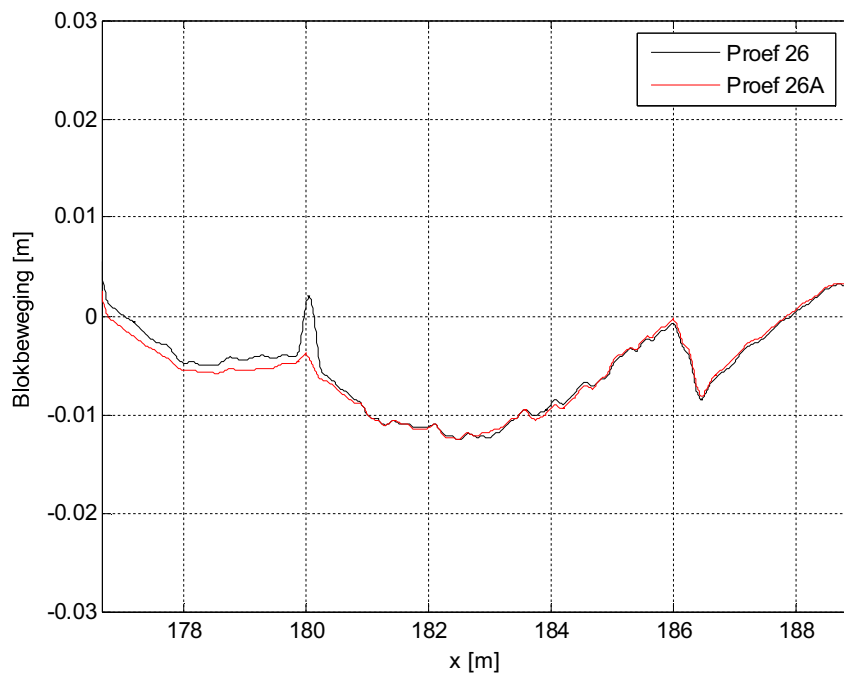
Figuur C.1a Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 5-9, zonder verstoring door de kabel op blokrij Z (Proef 11-16)



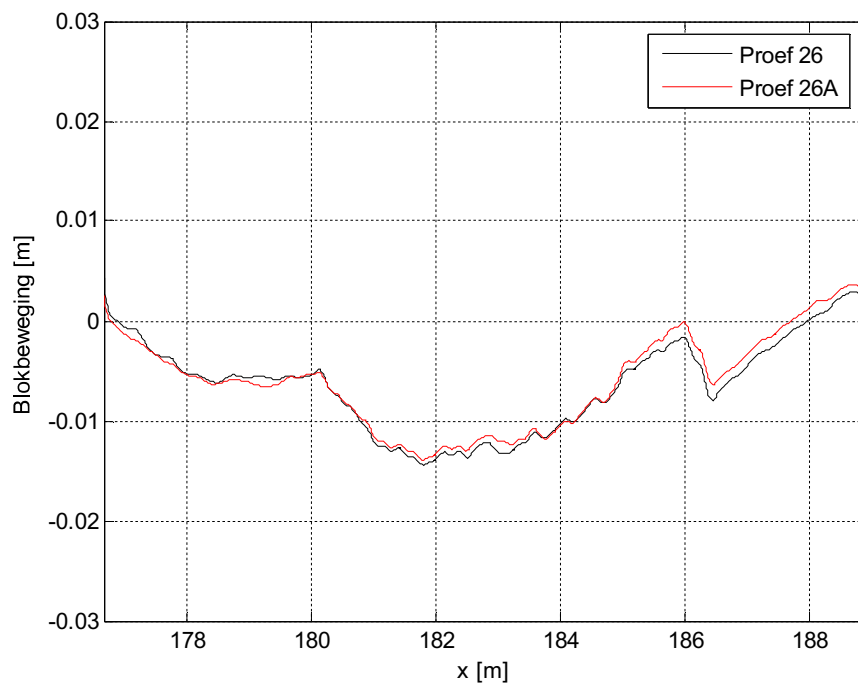
Figuur C.2 Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen (Proef 17-25)



Figuur C.2a Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 5-9, zonder verstoring door de kabel op blok Z (Proef 17-25)



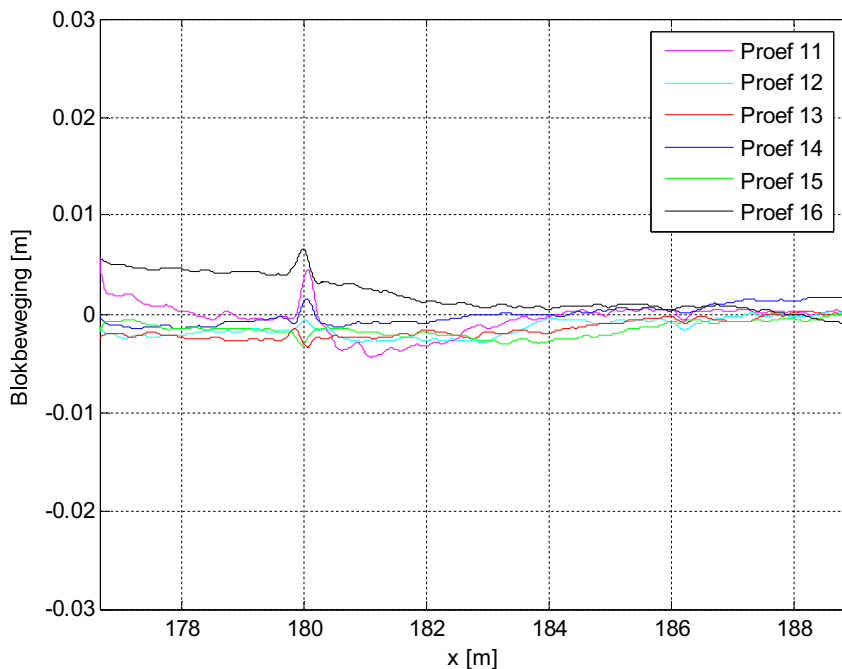
Figuur C.3 Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen (Proef 26)



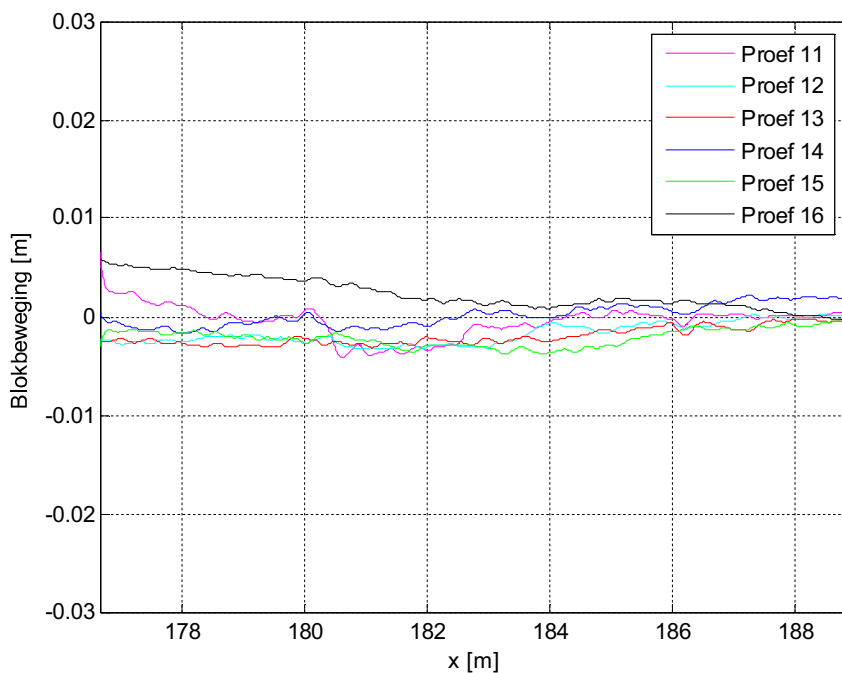
Figuur C.3a Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 5-9, zonder versterking door de kabel op blokrij Z (Proef 26)

C.2 Gemiddelde taludoppervlak ten opzichte van vorige proef

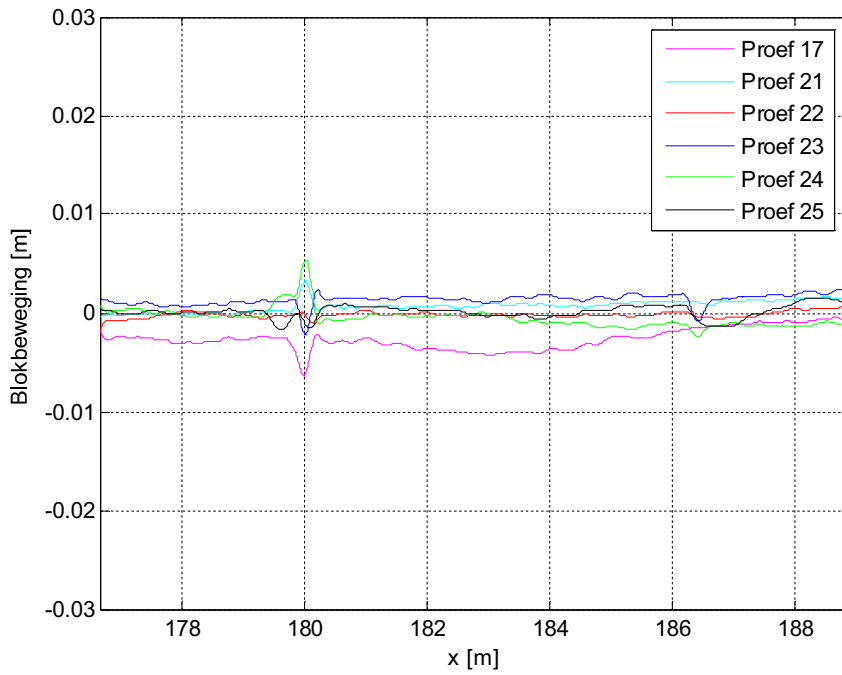
Het gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle raaien, ten opzichte van het voorgaande proef, is gegeven in de volgende figuren:



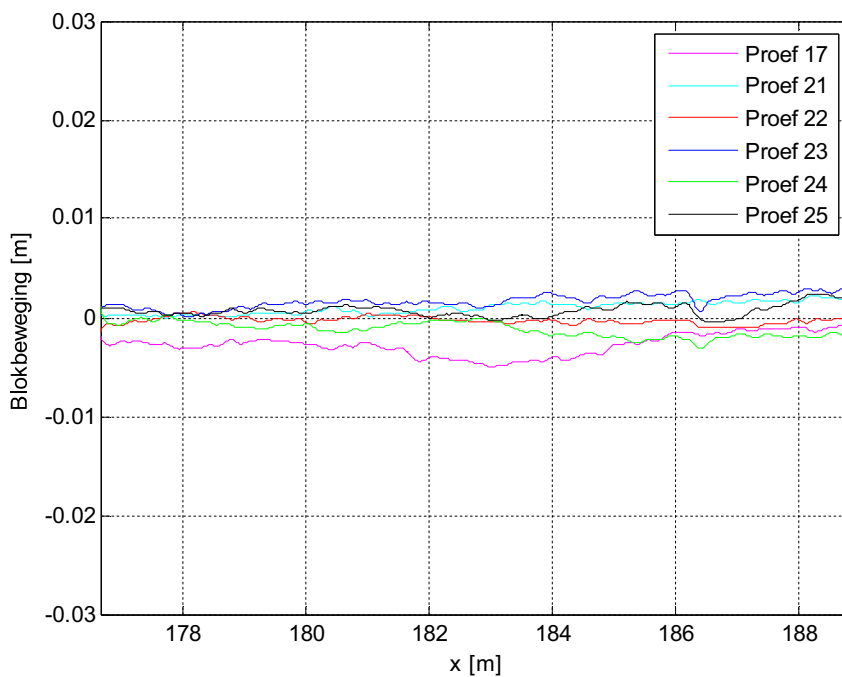
Figuur C.4 Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen (Proef 11-16)



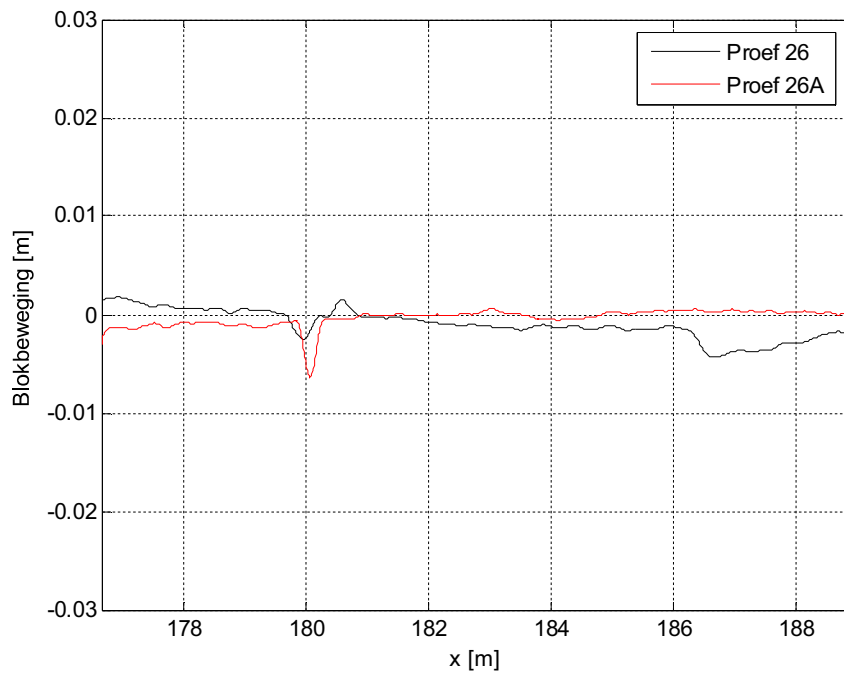
Figuur C.4a Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 5-9, zonder verstoring door de kabel op blokrij Z (Proef 11-16)



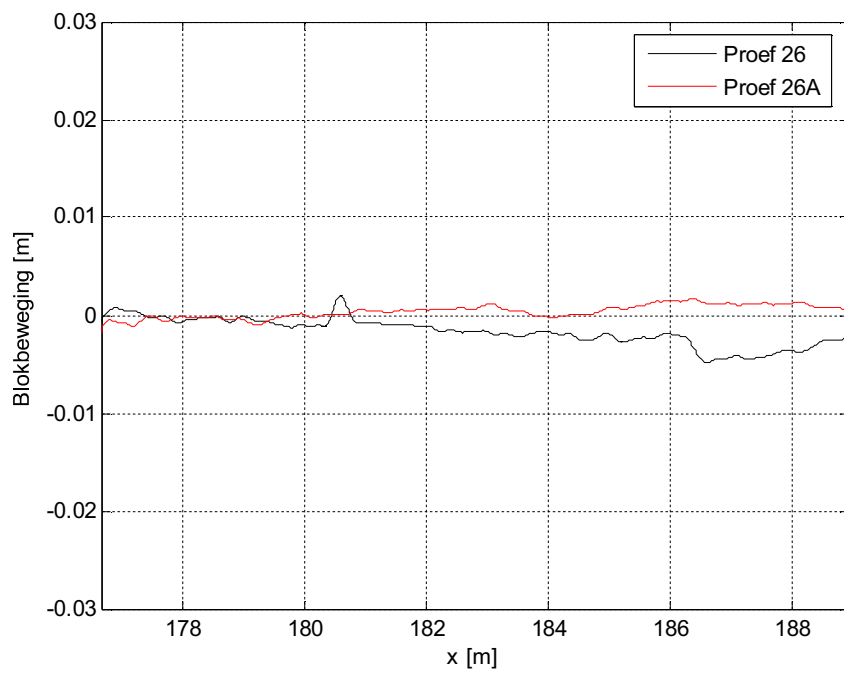
Figuur C.5 Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen (Proef 17-25)



Figuur C.5a Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 5-9, zonder verstoring door de kabel op blokrij Z (Proef 17-25)



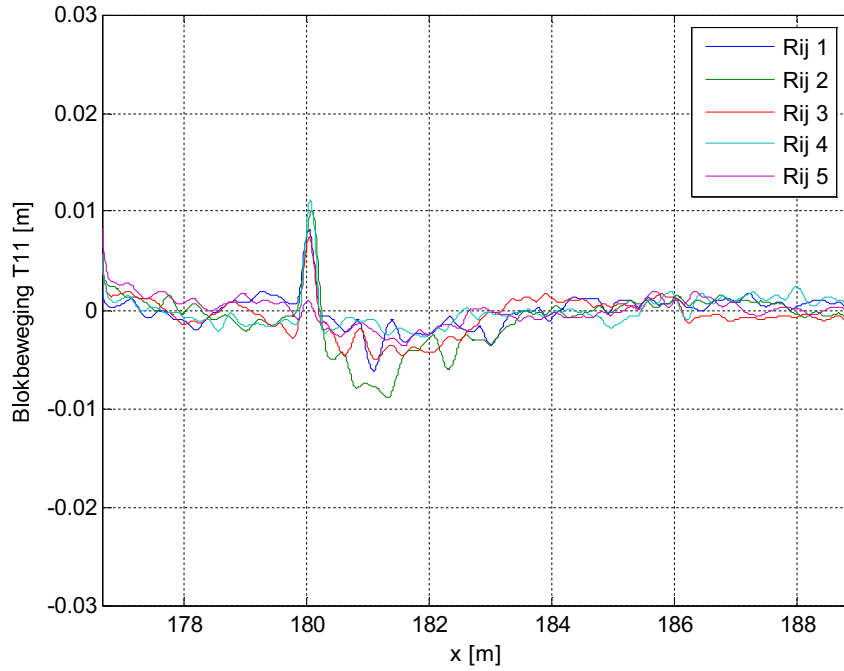
Figuur C.6 Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over alle dwarsprofielen (Proef 26)



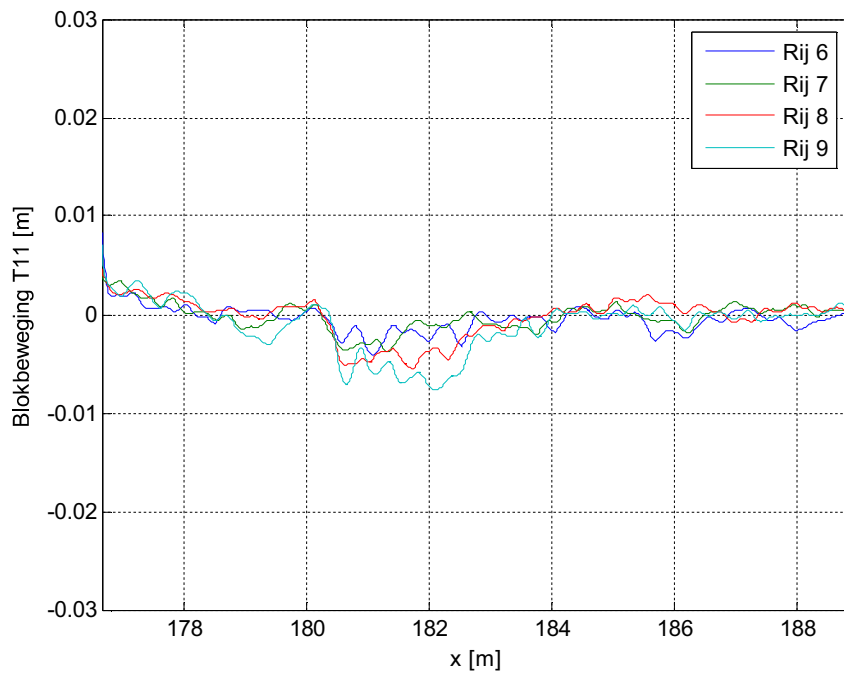
Figuur C.6a Gemiddeld niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 5-9, zonder versterking door de kabel op blokrij Z (Proef 26)

C.3 Taludoppervlak voor elke raai t.o.v. vorige proef

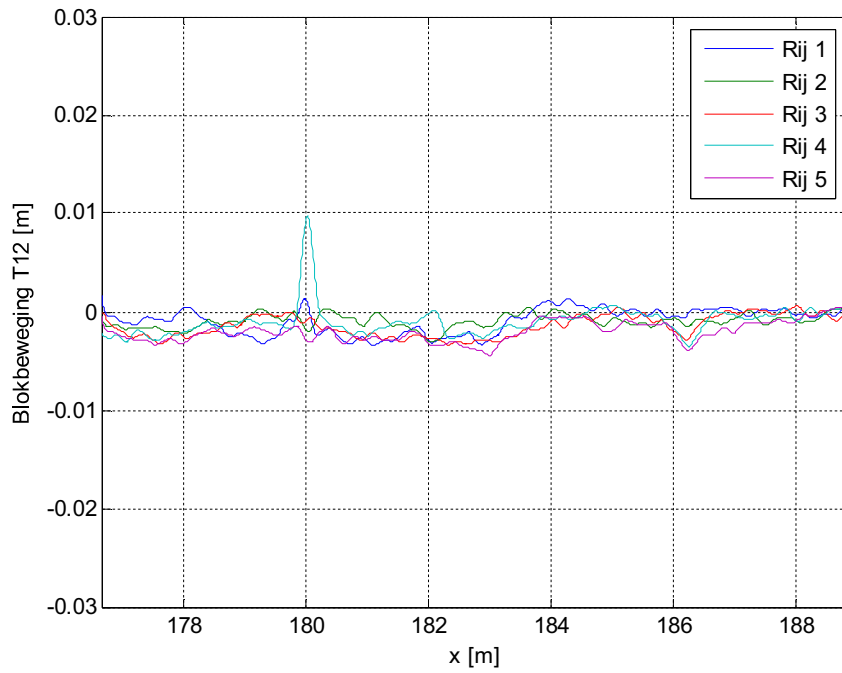
De relatieve verandering van het niveau van het taludoppervlak voor elke raai afzonderlijk, ten opzichte van het voorgaande proef, is gegeven in de volgende figuren:



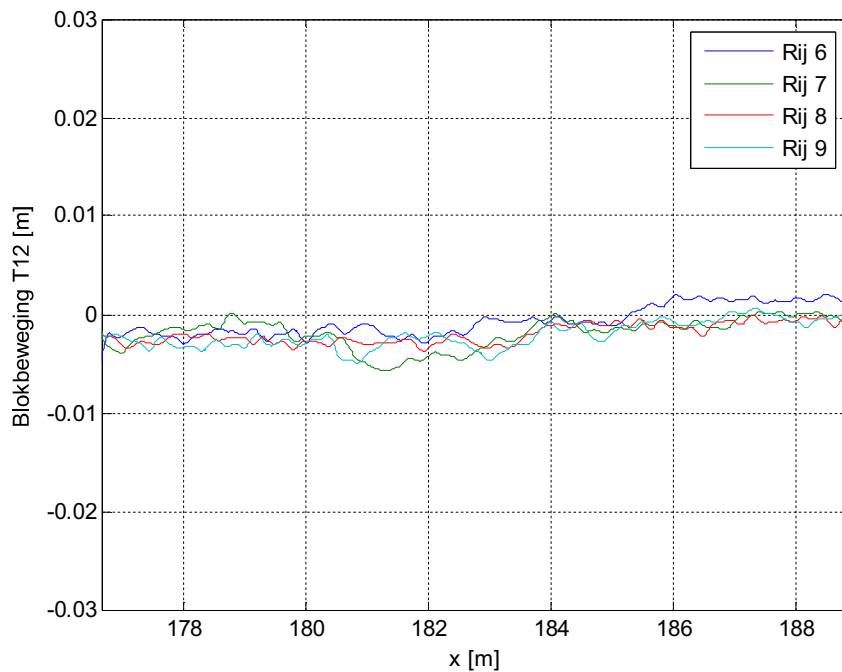
Figuur C.7a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 11)



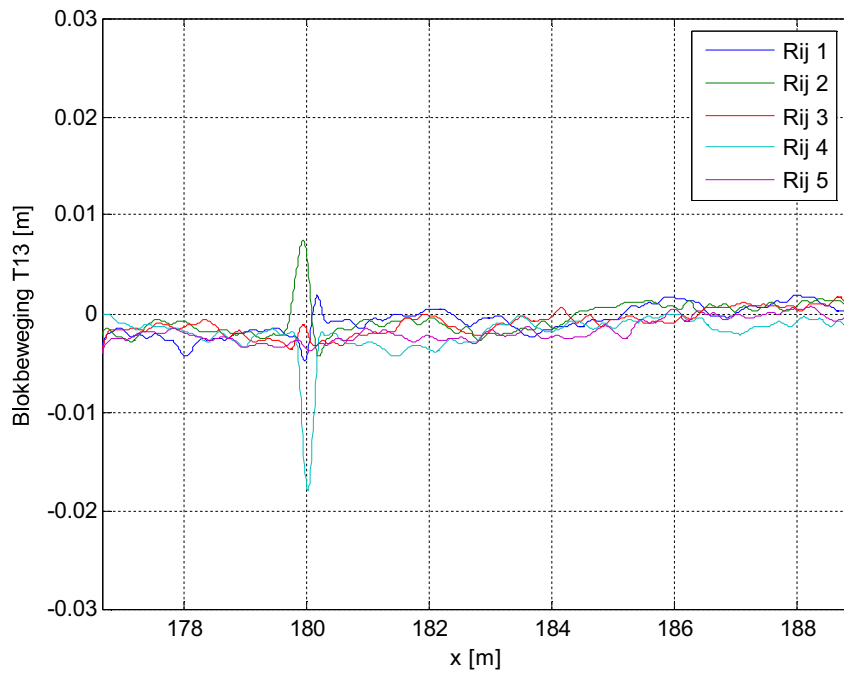
Figuur C.7b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 11)



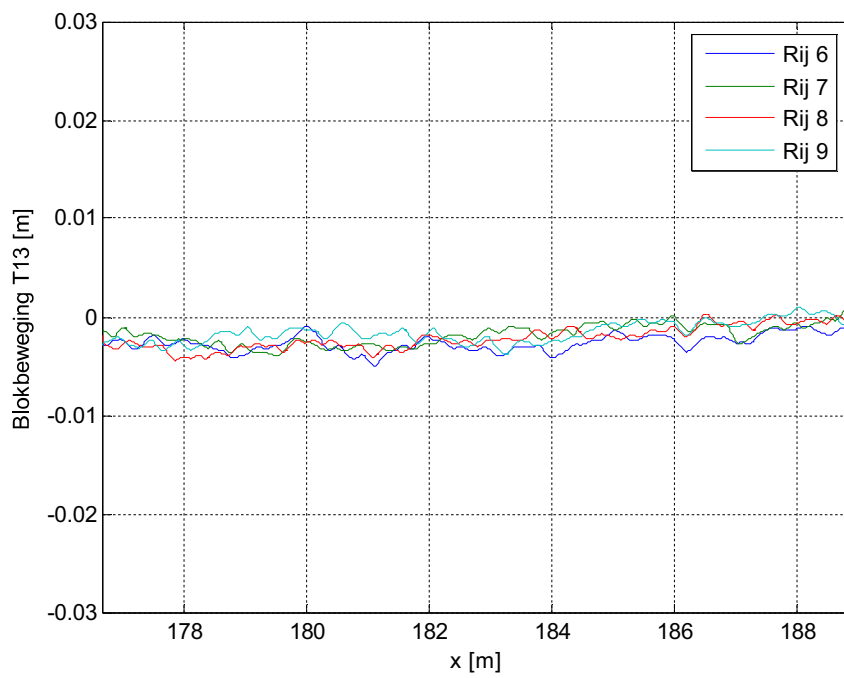
Figuur C.8a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 12)



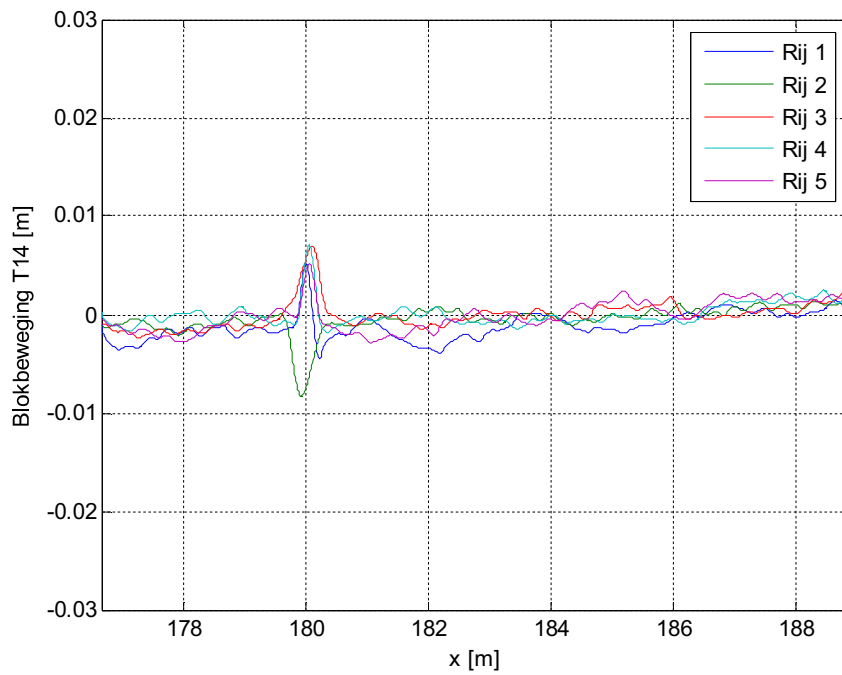
Figuur C.8b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 12)



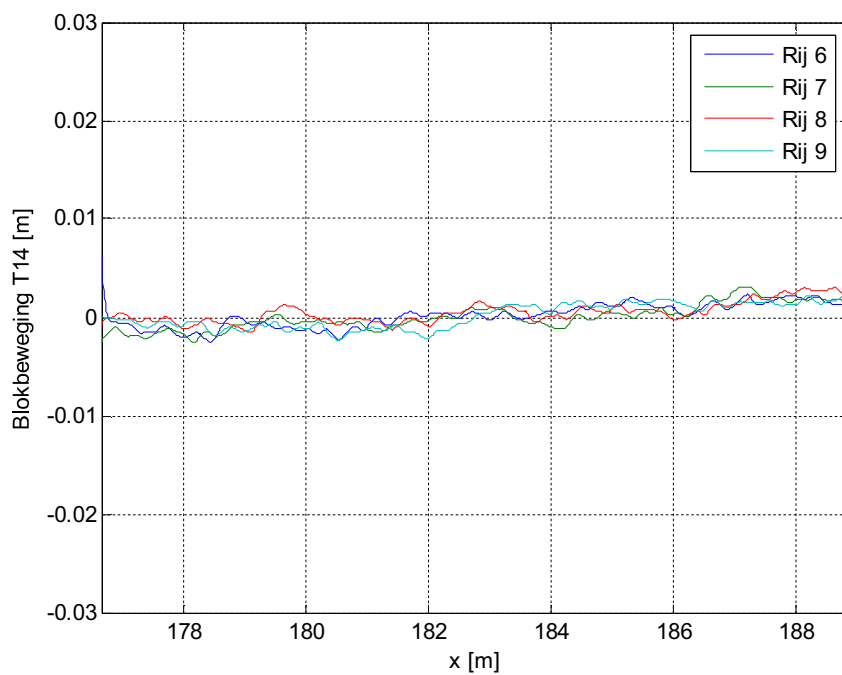
Figuur C.9a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 13)



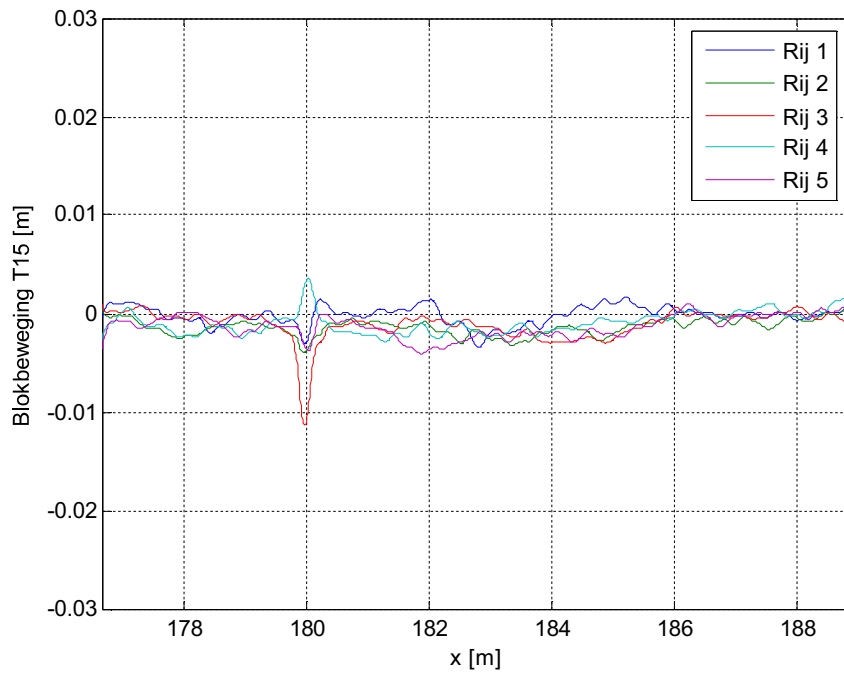
Figuur C.9b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 13)



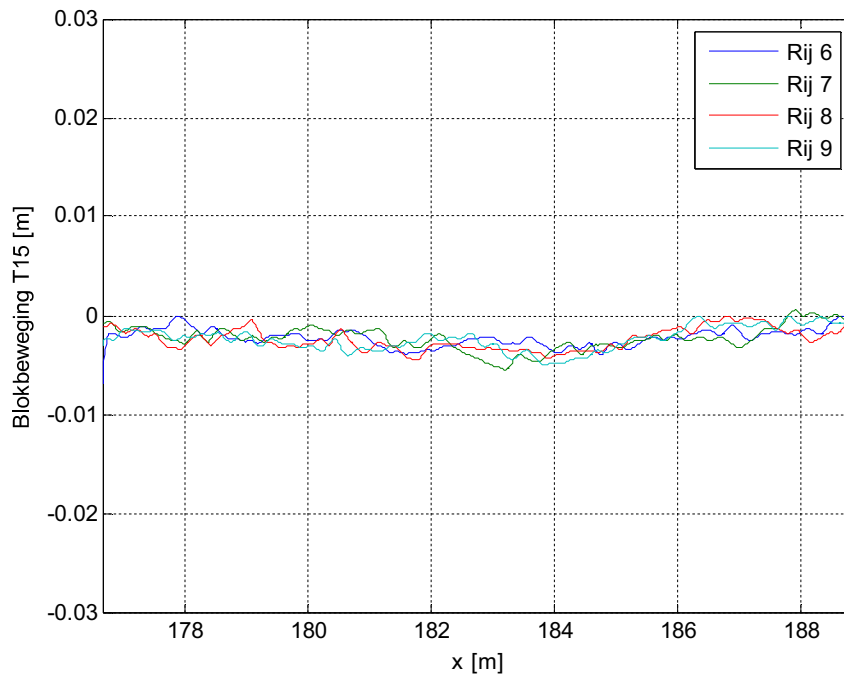
Figuur C.10a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 14)



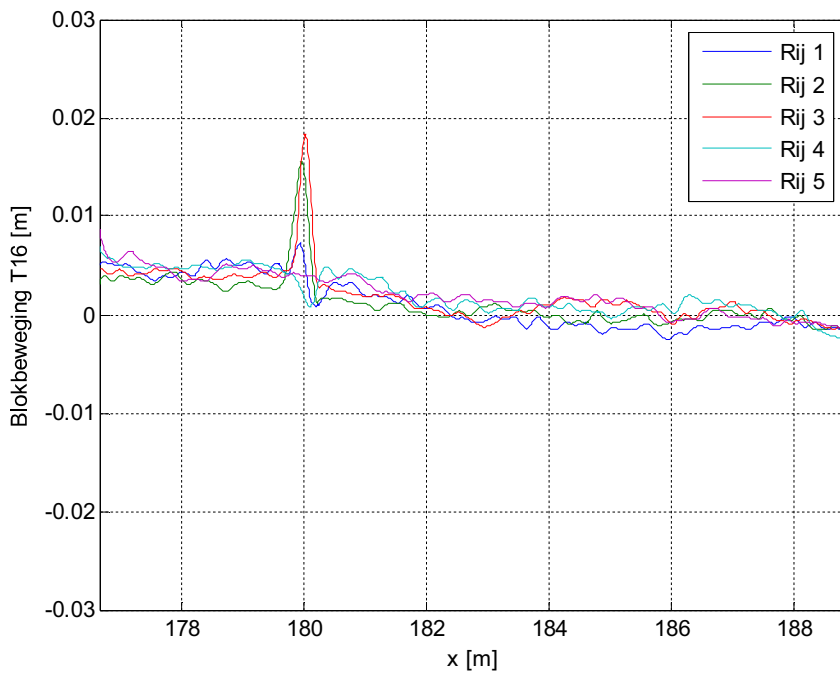
Figuur C.10b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 14)



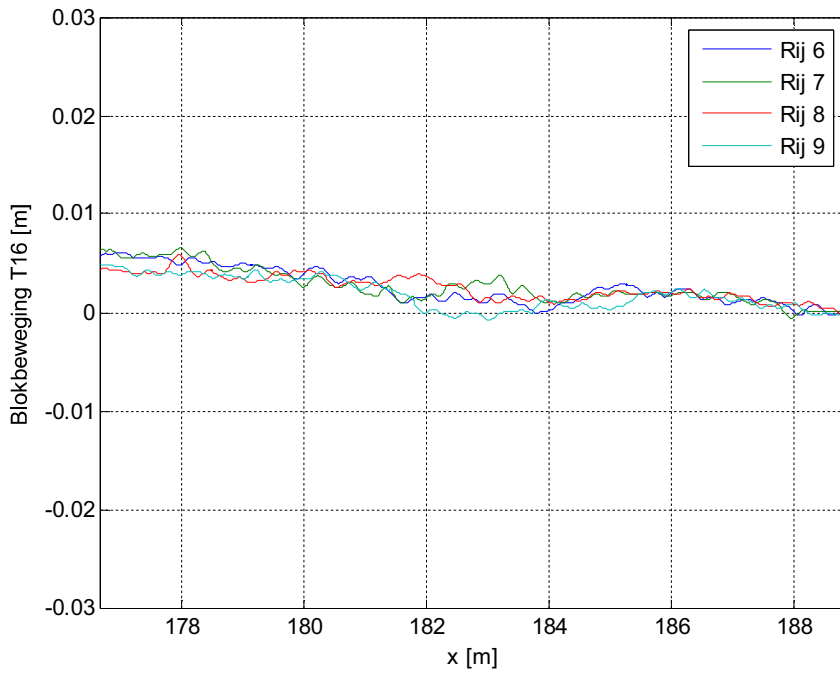
Figuur C.11a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 15)



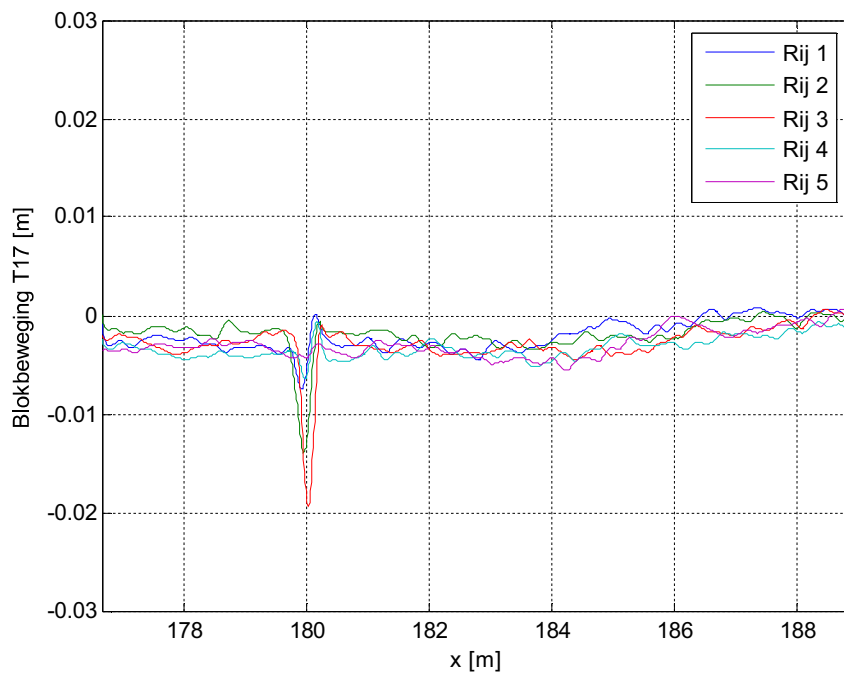
Figuur C.11b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 15)



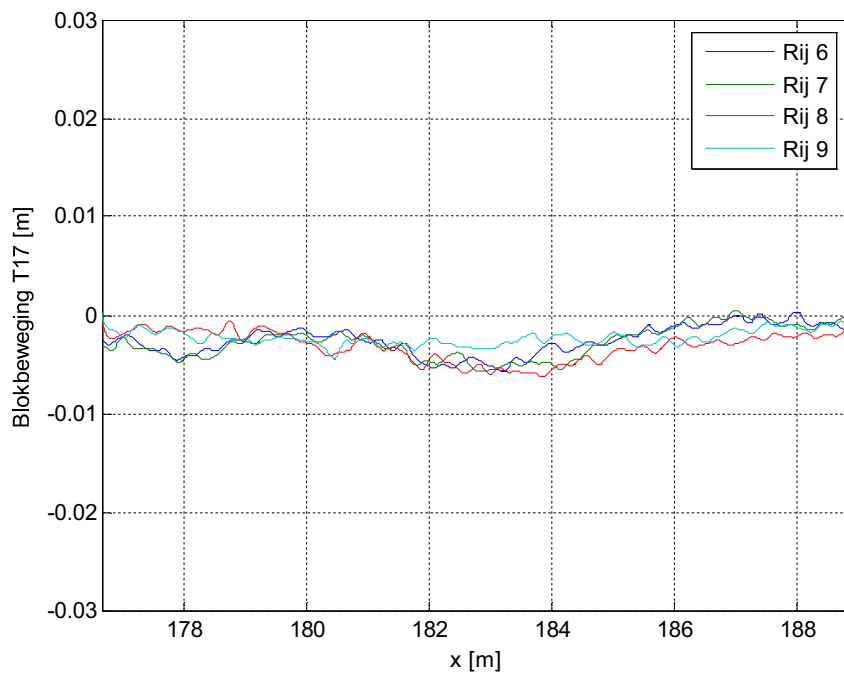
Figuur C.12a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 16)



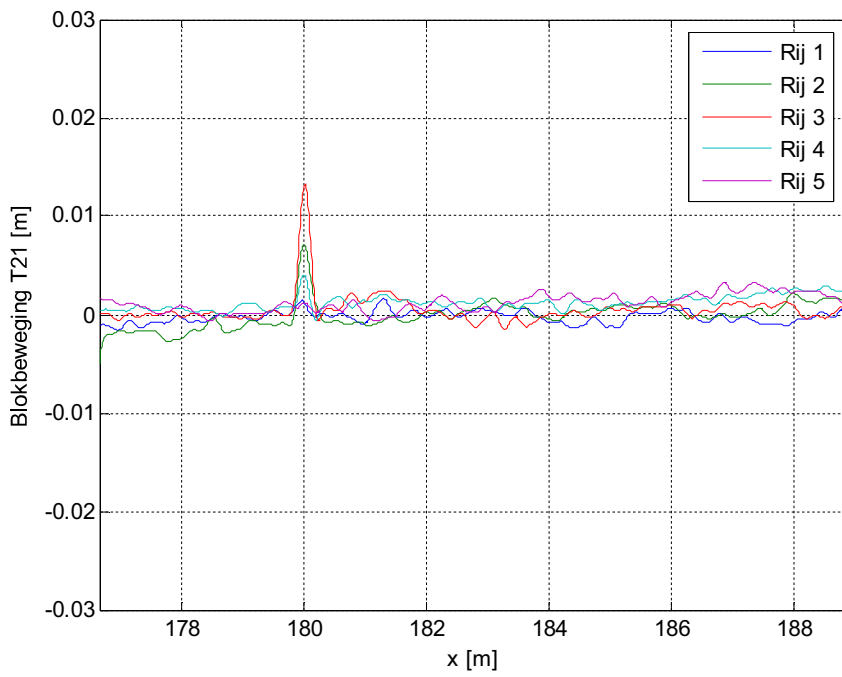
Figuur C.12b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 16)



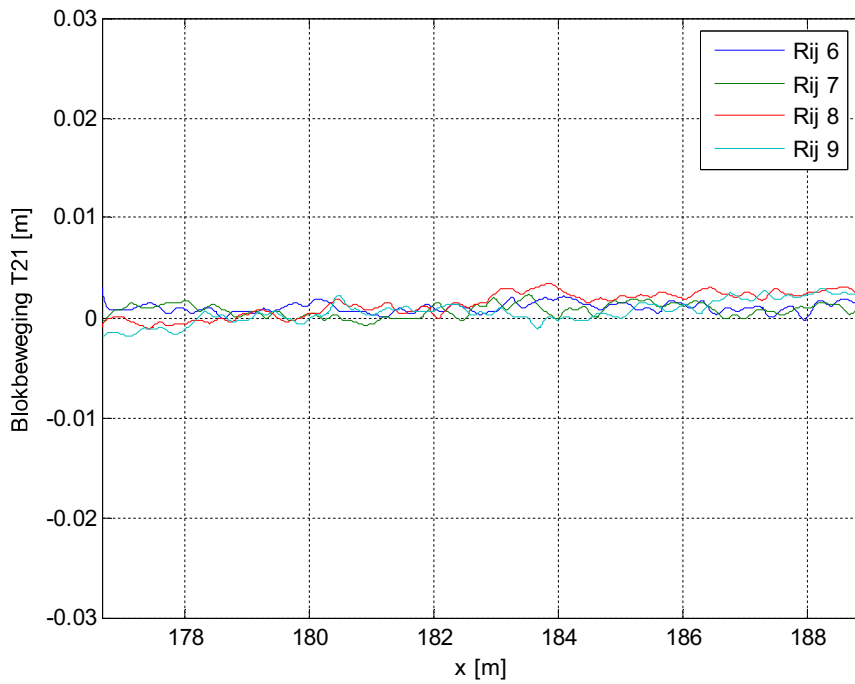
Figuur C.13a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 17)



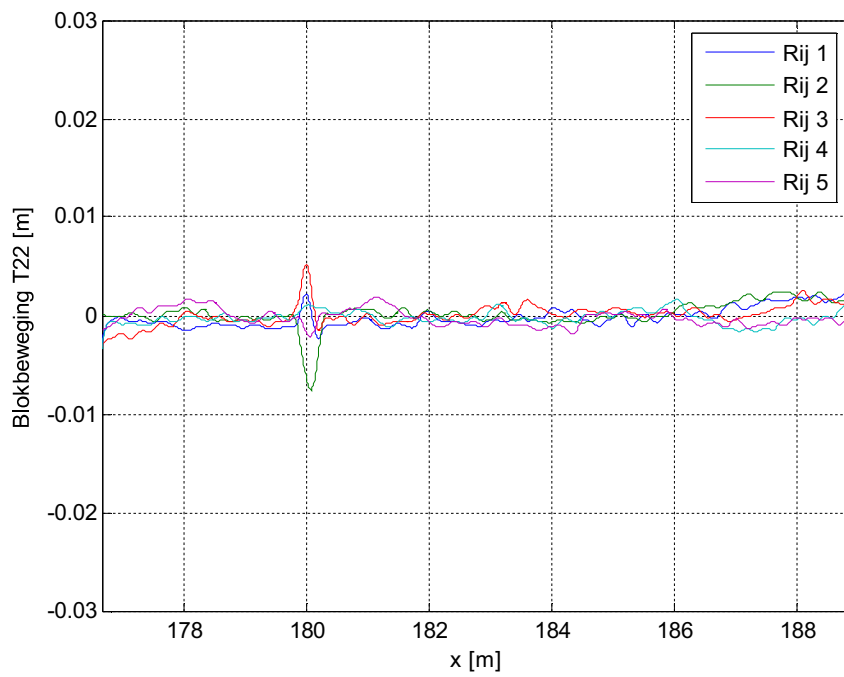
Figuur C.13b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 17)



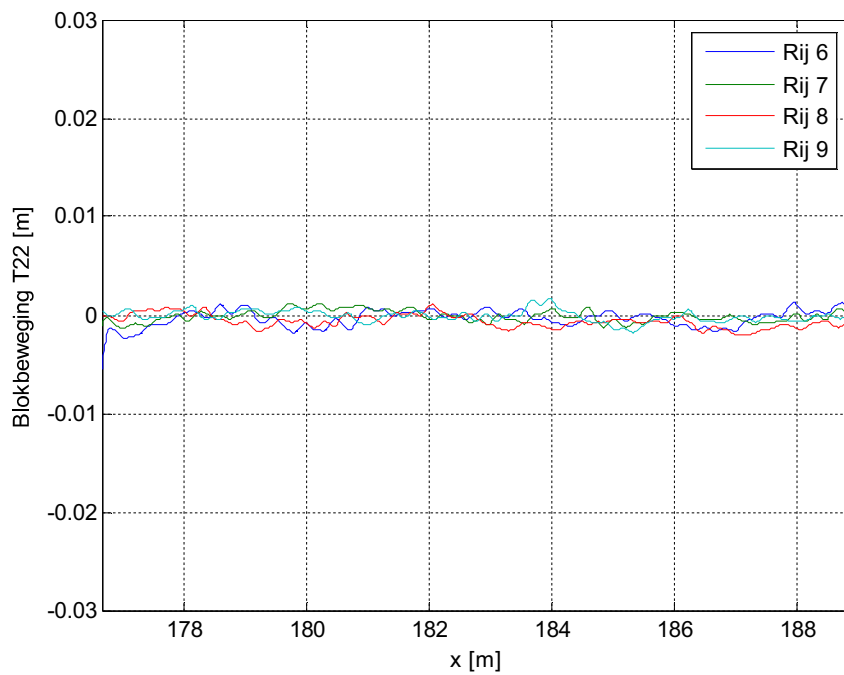
Figuur C.14a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 21)



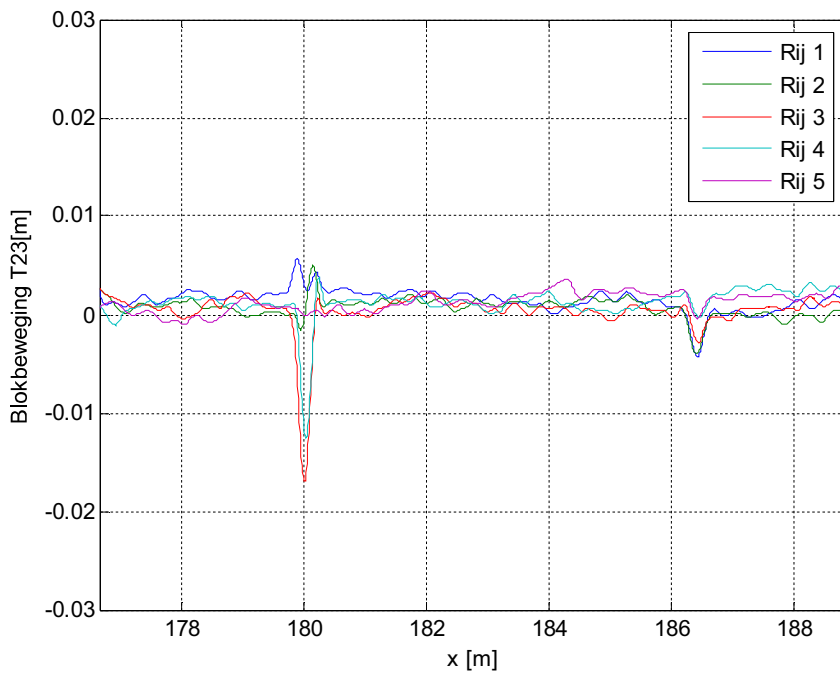
Figuur C.14b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 21)



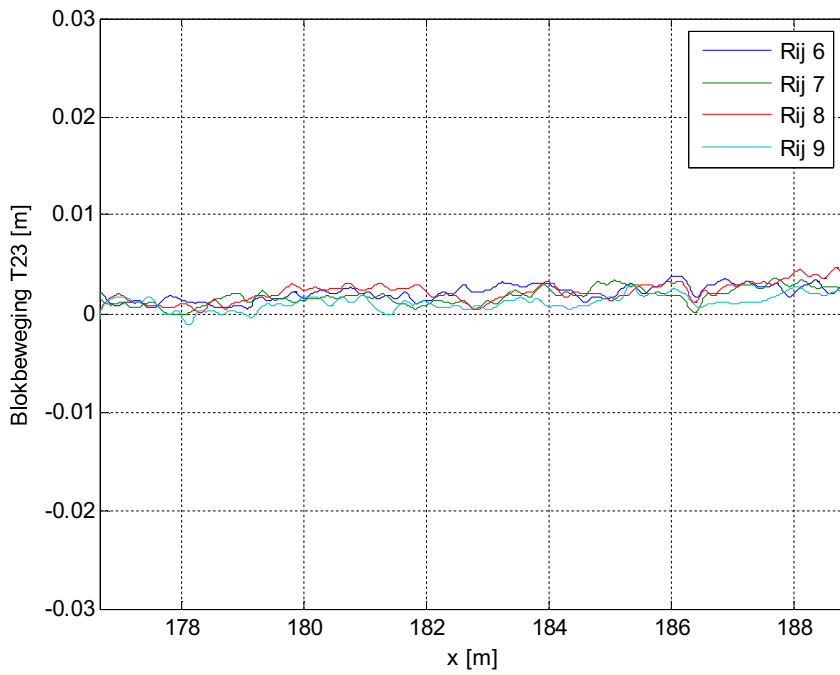
Figuur C.15a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 22)



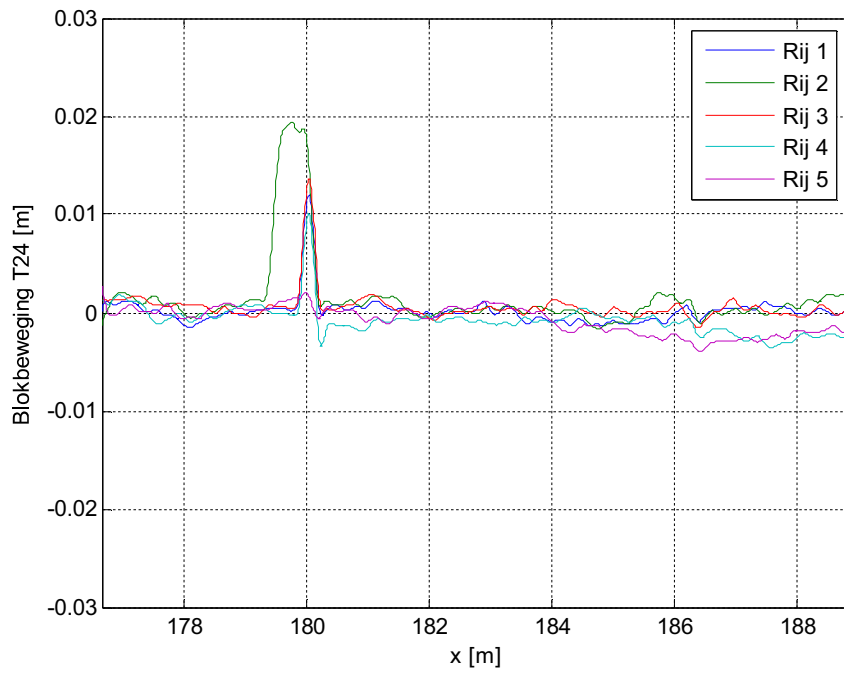
Figuur C.15b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 22)



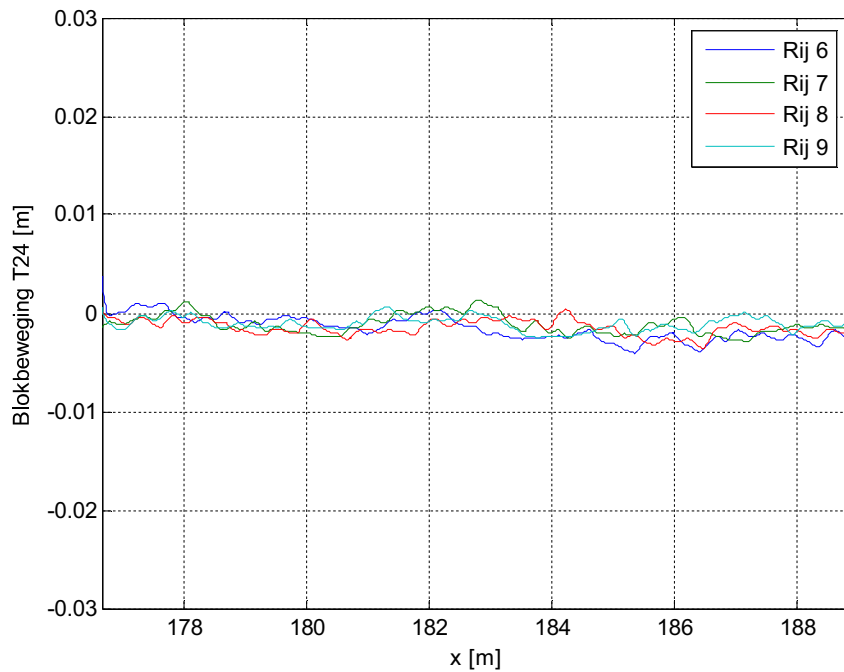
Figuur C.16a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 23)



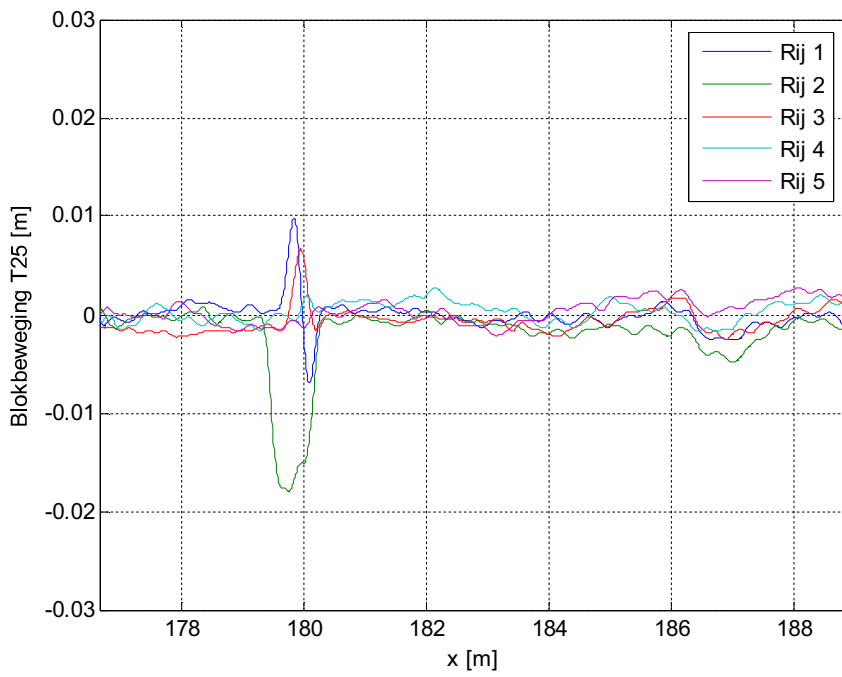
Figuur C.16b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 23)



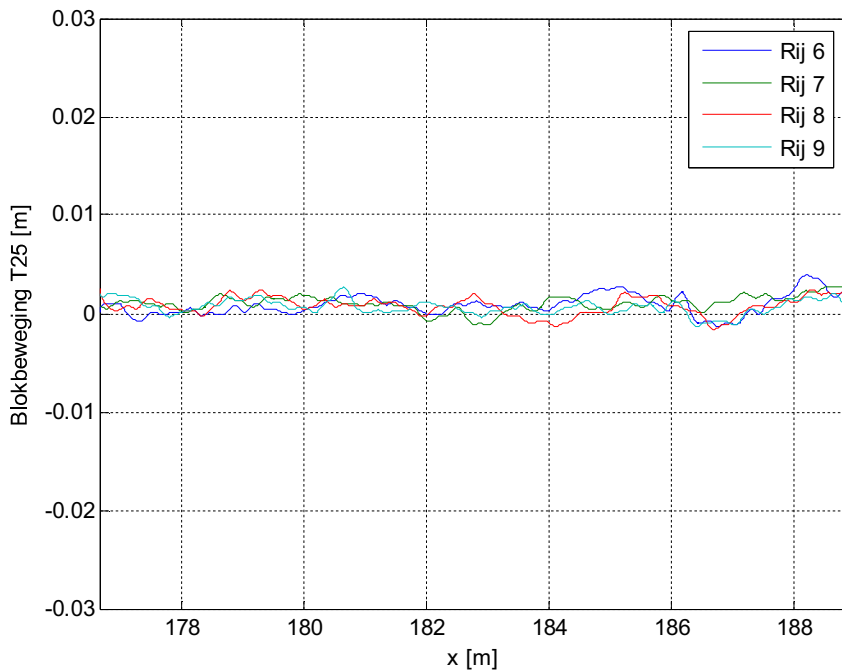
Figuur C.17a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 24)



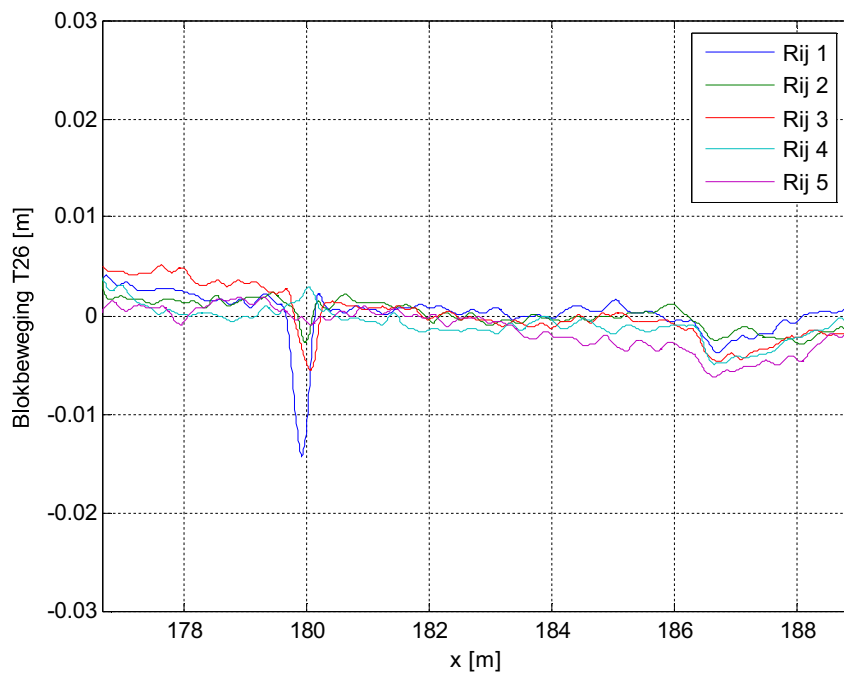
Figuur C.17b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 24)



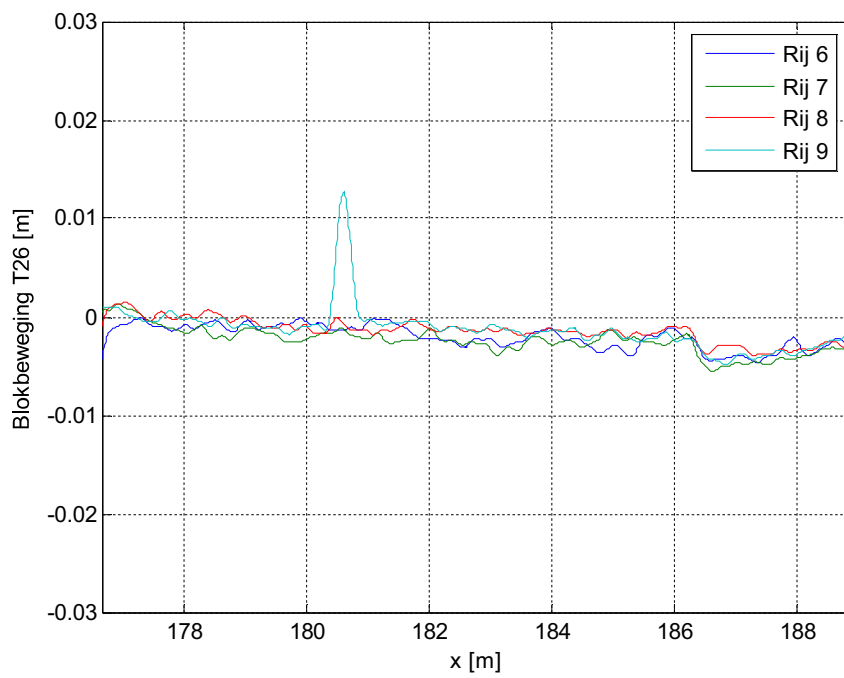
Figuur C.18a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 25)



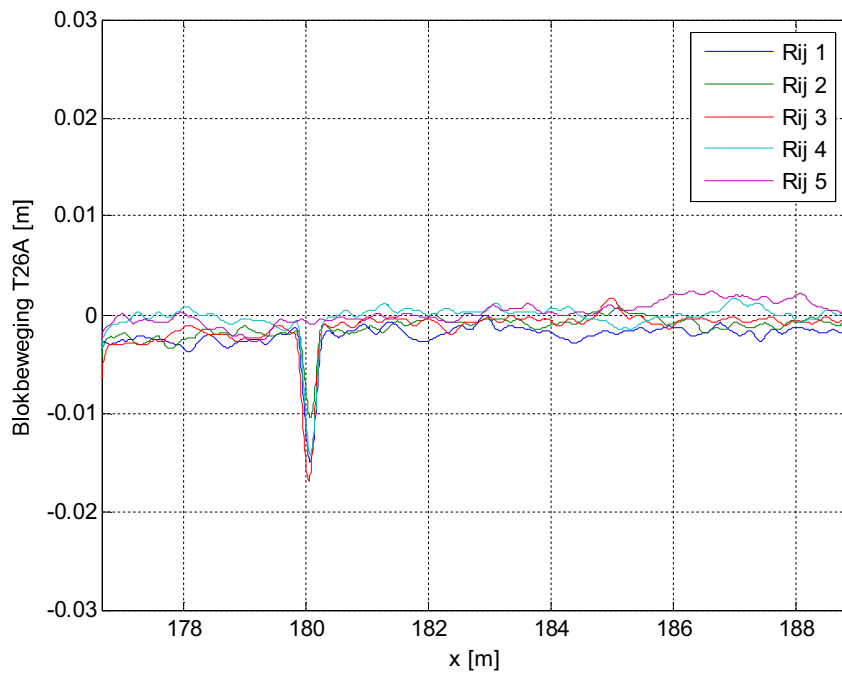
Figuur C.18b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 25)



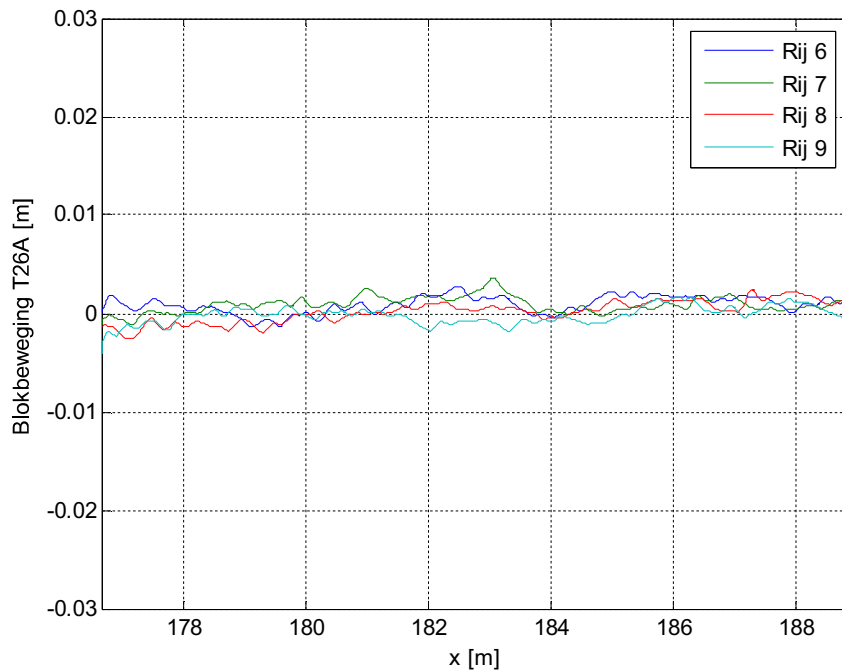
Figuur C.19a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 26)



Figuur C.19b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 26)



Figuur C.20a Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-5 (Proef 26A)



Figuur C.20b Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 6-9 (Proef 26A)

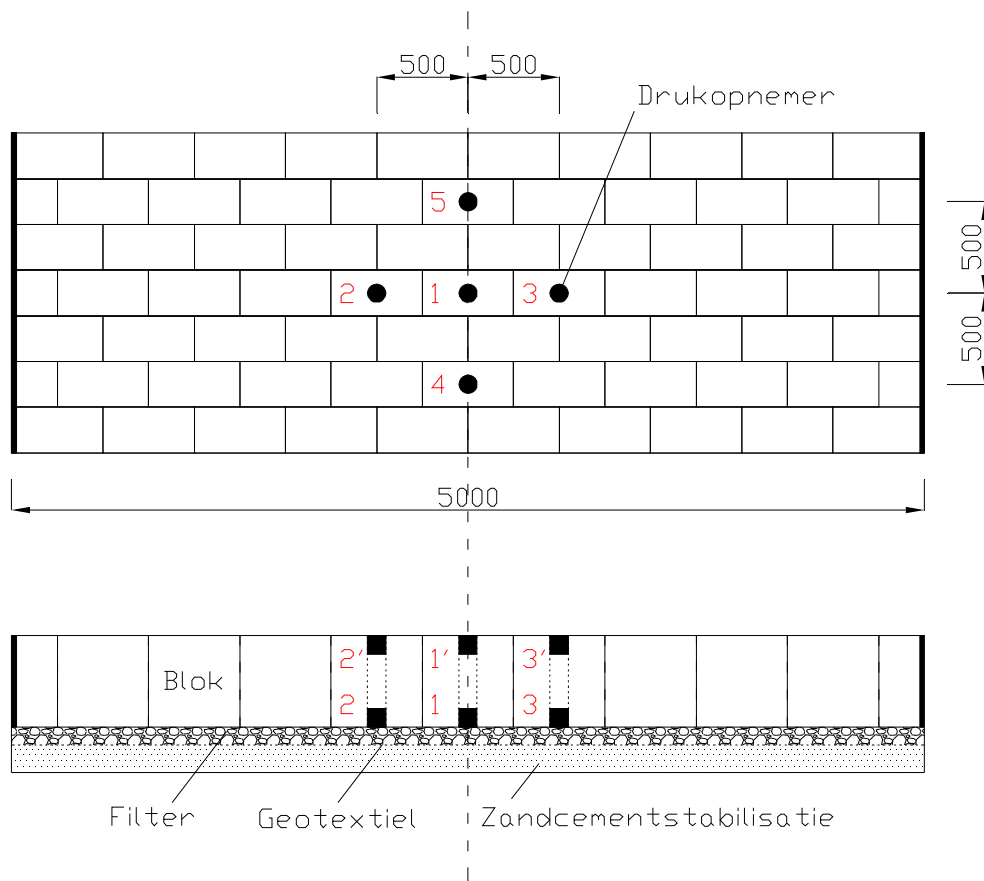
D Leklengte uit drukmetingen

D.1 Inleiding

Op basis van stijghoogtemetingen op de toplaag en in het filter is het mogelijk om de leklengte en doorlatendheid van de toplaag te bepalen. Dit is relevant voor het vaststellen van de effectieve spleetbreedte en grootte van de openingen in de toplaag. Dit maakt het interpreteren van de resultaten en het vertalen van resultaten naar de praktijk beter mogelijk.

In deze bijlage zijn een aantal aspecten met betrekking tot de drukopnemers in de modelopstelling uitgewerkt. De volgende onderwerpen komen aan bod:

- formule voor het berekenen van de leklengte uit de gemeten stijghoogte
- onderlinge afstand tussen de drukopnemers in relatie tot de nauwkeurigheid van het resultaat
- gevoeligheid van de berekende leklengte ten aanzien van meetfouten
- locatie van de drukopnemers ten opzichte van de stilwaterlijn



Figuur D1 Schematische opzet van drukopnemers (boven- en zijaanzicht)

D.2 Modelopstelling

De modelopstelling is weergegeven in Figuur B.1 en B.2 (bijlage B). Een dijk met een taludhelling van 1:3 met een hoogte van 8,3 m ten opzichte van de gootbodem is voor het onderzoek gebruikt.

In de top laag zijn op vijf locaties drukopnemers aangebracht, die een kruispatroon vormen, zie figuur D1. Drukmetingen worden uitgevoerd op elke locatie aan de boven- en onderkant van het blok. De drukopnemers zijn ingebouwd in een metalen buis die in een uitgeboord gat in het centrum van de testblok gestopt is. Die drukopnemers hebben een meetbereik van 1 bar (10 m water kolom) en worden met 200 Hz bemonsterd.

Steeds geldt dat de drukopnemers op de top laag een nummer met een accent hebben (bv 1'), en in het filter en nummer zonder accent. Zo ook wordt de stijghoogte op de top laag weergegeven met het symbool ϕ' , en in het filter met ϕ . De afmetingen van de blokken zijn als volgt:

- lengte (evenwijdig aan de waterlijn): $L = 0,50$ m
- breedte (haaks op de waterlijn, langs het talud): $B = 0,25$ m
- dikte van de top laag: $D = 0,50$ m

Met behulp van de metingen worden de stijghoogteverschillen over de top laag ($\phi - \phi'$) en de stijghoogtegradiënten in het filter bepaald (bv. $i = (\phi_1 - \phi_4)/(2B)$). Hiermee kan de lek lengte berekend worden en met de blok- en filtergegevens ook de doorlatendheid van de top laag.

Voorafgaand aan de bouw van de modelopstelling is een schatting gemaakt van de grootte van de lek lengte. Daarbij is geschat dat de spleetbreedte van de stootvoegen 2,0 mm is en de langsvoegen 1,5 mm. De korrelgrootte van het filter was geschat op $D_{f15} = 6$ mm. Vervolgens is de lek lengte berekend: $\Lambda = 0,65$ m. Na het inbouwen van de modelopstelling bleek de spleetbreedte aanzienlijk groter en de korrelgrootte van het filter kleiner te zijn. Daardoor is de werkelijke lek lengte veel kleiner geweest dan vóór het onderzoek geschat is. Deze bijlage is voor het onderzoek gemaakt en is dus gebaseerd op $\Lambda = 0,65$ m.

D.3 Berekeningmethode

D.3.1 Massabalans

Op basis van een massabalans is een formule afgeleid waarmee de lek lengte op basis van de metingen bepaald kan worden. Daartoe wordt een volume filtermateriaal beschouwd (zie Figuur D2). De hoeveelheid water die door de randen van dit volume naar binnen stroomt is gelijk aan de hoeveelheid dat naar buiten stroomt. Dit leidt tot de volgende balansvergelijking:

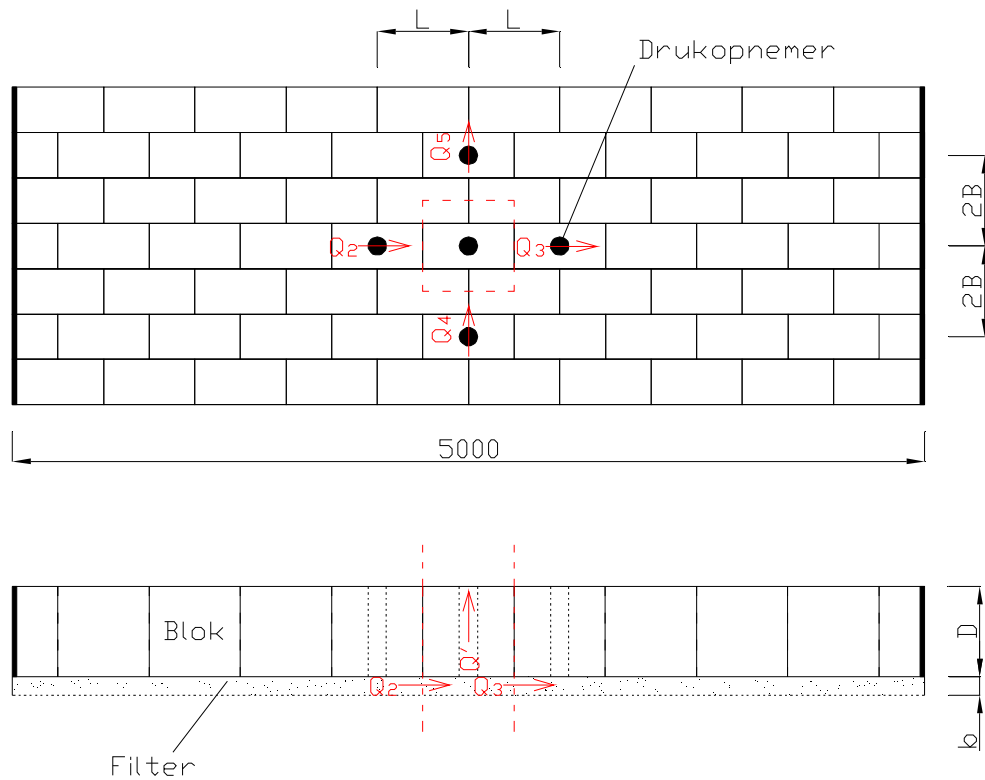
$$Q_2 + Q_4 = Q_3 + Q_5 + Q'$$

met

Q_i = debiet in het filter door rand i (m^3/s)

Q' = debiet door de top laag (m^3/s)

Het oppervlak van de randen in het filter is respectievelijk bL en bB , en in de top laag $2BL$.



Figuur D2 Massabalans

Uitwerken van de balansvergelijking levert:

$$q_{f2} \cdot b \cdot 2B + q_{f4} \cdot b \cdot L = q_{f3} \cdot b \cdot 2B + q_{f5} \cdot b \cdot L + q' \cdot L \cdot 2B$$

met

q_f = specifiek debiet in filter (m/s)

q' = specifiek debiet door toplaag (m/s)

L = bloklengte (m)

B = blokbreedte (m)

b = dikte van de filterlaag (m)

Er wordt vervolgens gebruik gemaakt van de doorlatendheidsrelaties, bijvoorbeeld:

$$q_{f2} = k \cdot i = k \cdot \frac{\phi_2 - \phi_1}{L}$$

$$q' = k' \cdot i' = k' \cdot \frac{\phi - \phi'}{D}$$

met

D = blokdikte (m)

i = stijghoogtegradiënt (-)

k = gelineariseerde doorlatendheid van het filter (m/s)

k' = gelineariseerde doorlatendheid van de toplaag (m/s)

- ϕ_i = stijghoogte in de filterlaag op locatie i (m)
 ϕ_i' = stijghoogte op de top laag op locatie i (m)
 ϕ' = gemiddelde stijghoogte op de top laag (m)
 ϕ = gemiddelde stijghoogte in het filter (m)

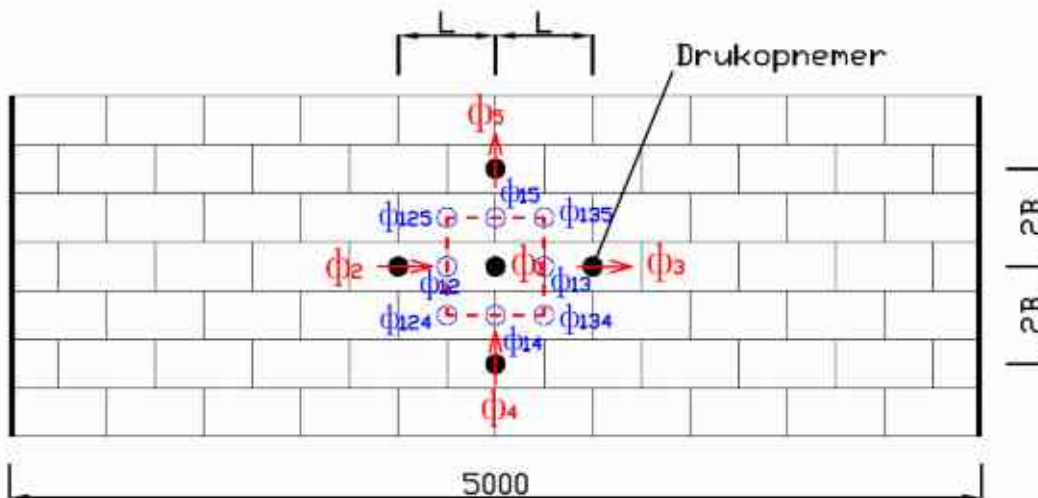
Substitutie van deze formules levert:

$$k \cdot \frac{\phi_2 - \phi_1}{L} \cdot b \cdot 2B + k \cdot \frac{\phi_4 - \phi_1}{2B} \cdot b \cdot L = k \cdot \frac{\phi_1 - \phi_3}{L} \cdot b \cdot 2B + k \cdot \frac{\phi_1 - \phi_5}{2B} \cdot b \cdot L + k \cdot \frac{\phi - \phi'}{D} \cdot L \cdot 2B$$

Om deze formule verder uit te werken is een uitdrukking nodig voor de gemiddelde stijghoogte op de top laag en de gemiddelde stijghoogte in het filter. Deze wordt bepaald aan de hand van de vijf metingen op de top laag en in het filter. Dit is nader uitgewerkt in de volgende paragraaf.

D.3.2 Gemiddelde stijghoogte op de top laag en in het filter

Het bovenaanzicht van de modelopstelling met het balansgebied is gegeven in Figuur D3.



Figuur D3 Meetposities en rekenpunten

Voor het berekenen van de gemiddelde stijghoogte in het balansgebied is de stijghoogte op de locaties 124, 125, 135 en 134 bepaald op basis van de gradiënt in de dwarsrichting van de goot. Deze gradiënt volgt uit $\phi_1 - \phi_2$ en $\phi_3 - \phi_1$. Dezelfde gradiënt is aangenomen om de stijghoogte op de genoemde locaties te berekenen:

$$\phi_{15} = (\phi_1 + \phi_5) / 2$$

$$\phi_{12} = (\phi_1 + \phi_2) / 2$$

$$\phi_{13} = (\phi_1 + \phi_3) / 2$$

$$\phi_{14} = (\phi_1 + \phi_4) / 2$$

Voor het oppervlak dat beschouwd wordt in de massabalans geldt:

$$\phi_{125} = \phi_{15} + (\phi_2 - \phi_1) / 2 = (\phi_2 + \phi_5) / 2$$

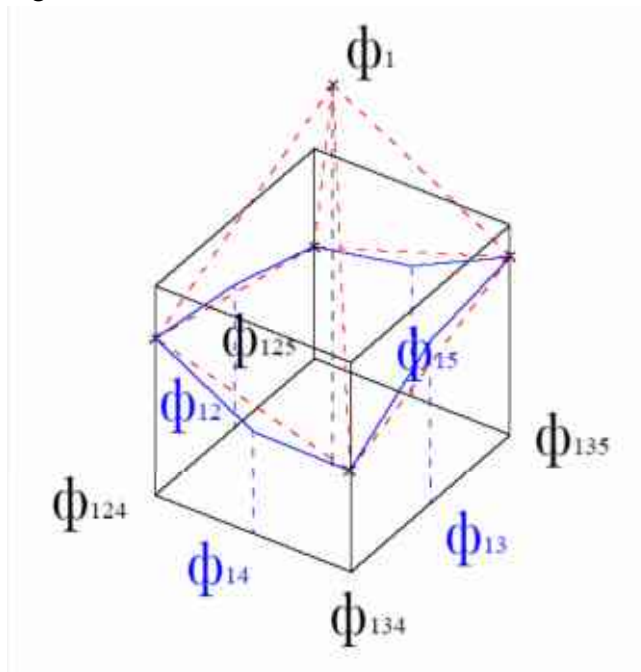
$$\phi_{124} = \phi_{14} + (\phi_2 - \phi_1) / 2 = (\phi_2 + \phi_4) / 2$$

$$\phi_{134} = \phi_{14} + (\phi_3 - \phi_1) / 2 = (\phi_4 + \phi_3) / 2$$

$$\phi_{135} = \phi_{15} + (\phi_3 - \phi_1) / 2 = (\phi_5 + \phi_3) / 2$$

Hetzelfde principe is geldig voor bovenkant (op toplaag) en onderkant (in filterlaag) van de blokken.

De stijghoogteverdeling tussen de punten 124, 125, 134 en 135 kan voorgesteld worden als een driedimensionale pyramidische stijghoogteverdeling. Een voorbeeld is gegeven in Figuur D4.



Figuur D4 Mogelijke stijghoogteverdeling

In de analytische berekening van de gemiddelde stijghoogte wordt de integraal bepaald van het opgespannen oppervlak tussen de punten ϕ_{125} , ϕ_{124} , ϕ_{134} , ϕ_{135} en ϕ_1 , bestaande uit 4 segmenten.

De stijghoogte over een opgespannen oppervlak is:

$$\phi = ax + by + c$$

Met de randvoorwaarden volgt:

$$x = y = 0: \quad c = \phi_{124}$$

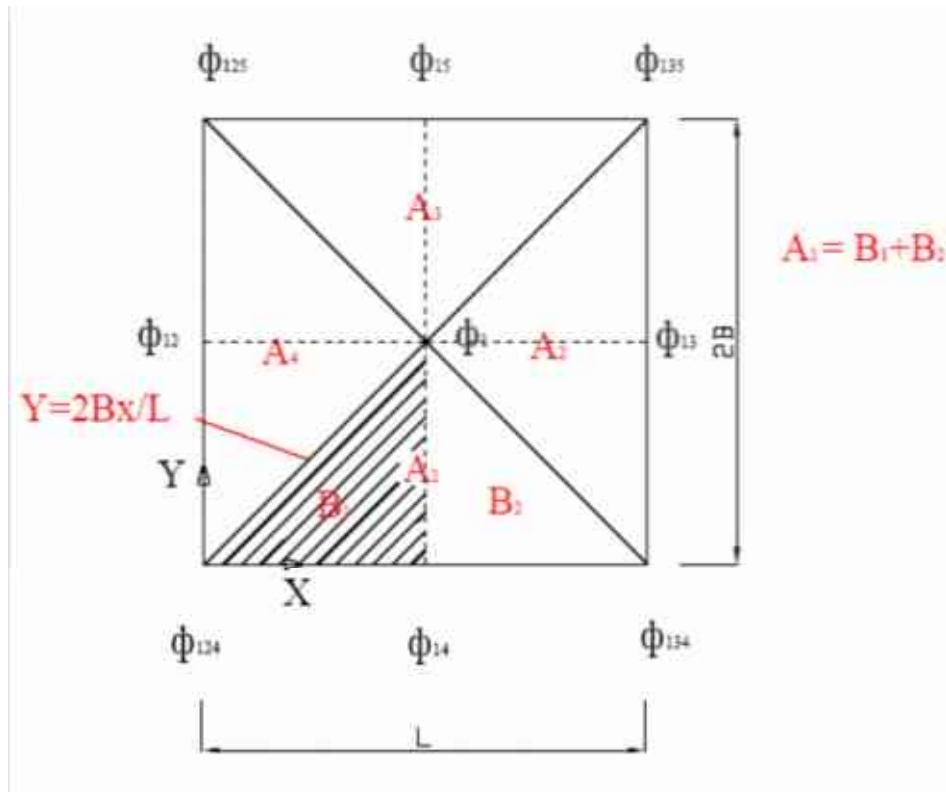
$$x = L/2, y = 0: \quad \phi_{14} = \frac{L}{2} \cdot a + \phi_{124} \quad \text{en} \quad a = (\phi_{14} - \phi_{124}) \frac{2}{L}$$

$x = L/2, y = B: \phi_1 = a \cdot L/2 + b \cdot B + \phi_{124}$ en

$$b = \frac{\phi_1 - \phi_{14}}{B}$$

De stijghoogte is dus:

$$\phi = (\phi_{14} - \phi_{124}) \frac{2x}{L} + (\phi_1 - \phi_{14}) \frac{y}{B} + \phi_{124}$$



Figuur D5 Model voor oppervlak berekening

De integraal van de stijghoogte over het oppervlak B_1 is dan:

$$\begin{aligned} B_1 \cdot \bar{\phi}_{B_1} &= \int_0^{L/2} \int_0^{2Bx/L} \phi \cdot dy dx \\ &= \int_0^{L/2} \int_0^{2Bx/L} \left((\phi_{14} - \phi_{124}) \frac{2x}{L} + (\phi_1 - \phi_{14}) \frac{y}{B} + \phi_{124} \right) \cdot dy dx \\ &= \int_0^{L/2} \left((\phi_{14} - \phi_{124}) \frac{2xy}{L} + (\phi_1 - \phi_{14}) \frac{y^2}{2B} + \phi_{124} y \right) \Bigg|_0^{2Bx/L} \cdot dx \\ &= \int_0^{L/2} \left((\phi_{14} - \phi_{124}) \frac{4Bx^2}{L^2} + (\phi_1 - \phi_{14}) \frac{2Bx^2}{L^2} + \phi_{124} \frac{2Bx}{L} \right) \cdot dx \end{aligned}$$

$$= \left((\phi_{14} - \phi_{124}) \frac{4Bx^3}{3L^2} + (\phi_1 - \phi_{14}) \frac{2Bx^3}{3L^2} + \phi_{124} \frac{Bx^2}{L} \right) \Big|_0^{L/2}$$

$$= L \cdot B \cdot \left(\frac{1}{6}(\phi_{14} - \phi_{124}) + \frac{1}{12}(\phi_1 - \phi_{14}) + \frac{1}{4}\phi_{124} \right)$$

Hieruit volgt met $B_1 = \frac{1}{4}L \cdot B$:

$$\bar{\phi}_{B1} = \frac{1}{3}(\phi_{14} + \phi_{124} + \phi_1)$$

Voor het oppervlak A_1 volgt:

$$\bar{\phi}_{B2} = \frac{1}{3}(\phi_{14} + \phi_{134} + \phi_1)$$

$$\bar{\phi}_{A1} = \frac{\bar{\phi}_{B1} + \bar{\phi}_{B2}}{2} = \frac{1}{6}(\phi_{124} + \phi_{134} + 2\phi_{14} + 2\phi_1)$$

en voor de andere oppervlakken:

$$\bar{\phi}_{A2} = \frac{1}{6}(\phi_{134} + \phi_{135} + 2\phi_{13} + 2\phi_1)$$

$$\bar{\phi}_{A3} = \frac{1}{6}(\phi_{125} + \phi_{135} + 2\phi_{15} + 2\phi_1)$$

$$\bar{\phi}_{A4} = \frac{1}{6}(\phi_{125} + \phi_{124} + 2\phi_{12} + 2\phi_1)$$

Voor het hele oppervlak van het opgespannen vierkant volgt:

$$\bar{\phi} = \frac{\sum \phi_{Ai}}{4} = \frac{1}{12}(\phi_{124} + \phi_{125} + \phi_{134} + \phi_{135} + \phi_{12} + \phi_{13} + \phi_{14} + \phi_{15} + 4\phi_1)$$

$$= \frac{1}{8}(4\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5)$$

Dezelfde rekenmethodiek wordt gebruikt voor de alternatieve modelopstelling met de drukopnemers op een kleinere afstand (ϕ_{125a} , ϕ_{124a} , ϕ_{134a} , ϕ_{135a} en ϕ_1 , zie paragraaf D.4).

Het resultaat van bovenstaande analytische bepaling van de gemiddelde stijghoogte is gecontroleerd met een numerieke methode. Met MATLAB kan een interpolatie voor een willekeurige net van punten op het oppervlak gemaakt worden. Hier wordt de interpolatie tussen de punten ϕ_{125} , ϕ_{124} , ϕ_{134} , ϕ_{135} en ϕ_1 uitgevoerd (klein oppervlak van par. D.4: ϕ_{125a} ,

ϕ_{124a} , ϕ_{134a} , ϕ_{135a} en ϕ_1). Met behulp van deze geïnterpoleerde waarden is de gemiddelde stijghoogte als volgt berekend:

$$\bar{\phi} = \sum \phi_i / N, \text{ met } N = \text{aantal punten}$$

Dit levert hetzelfde resultaat als de analytische methode met een grid lengte van $\ll 0.05\text{m}$.

D.3.3 Leklengte

Op basis van de massabalansvergelijking uit paragraaf D.3.1 en de gemiddelde stijghoogte op de toplaag en in het filter uit paragraaf D.3.2 kan de leklengte berekend worden:

$$\begin{aligned} k \cdot \frac{\phi_2 - \phi_1}{L} \cdot b \cdot 2B + k \cdot \frac{\phi_4 - \phi_1}{2B} \cdot b \cdot L &= \\ k \cdot \frac{\phi_1 - \phi_3}{L} \cdot b \cdot 2B + k \cdot \frac{\phi_1 - \phi_5}{2B} \cdot b \cdot L + k' \cdot \frac{\phi - \phi'}{D} \cdot L \cdot 2B &\Rightarrow \\ \frac{\phi - \phi'}{D} &= \frac{1}{k' \cdot L \cdot 2B} \\ &\cdot \left[k \cdot \frac{\phi_2 - \phi_1}{L} \cdot b \cdot 2B + k \cdot \frac{\phi_4 - \phi_1}{2B} \cdot b \cdot L - k \cdot \frac{\phi_1 - \phi_3}{L} \cdot b \cdot 2B - k \cdot \frac{\phi_1 - \phi_5}{2B} \cdot b \cdot L \right] \\ \frac{\phi - \phi'}{D} &= \frac{k \cdot b}{k'} \left[\frac{\phi_2 - \phi_1}{L^2} + \frac{\phi_4 - \phi_1}{(2B)^2} - \frac{\phi_1 - \phi_3}{L^2} - \frac{\phi_1 - \phi_5}{(2B)^2} \right] \end{aligned}$$

Met de leklengte $\Lambda = \sqrt{D \cdot b \cdot k / k'}$ volgt:

$$\begin{aligned} \frac{\phi - \phi'}{D} &= \frac{\Lambda^2}{D} \left[\frac{\phi_2 - \phi_1}{L^2} + \frac{\phi_4 - \phi_1}{(2B)^2} - \frac{\phi_1 - \phi_3}{L^2} - \frac{\phi_1 - \phi_5}{(2B)^2} \right] \Rightarrow \\ \Lambda &= \sqrt{\frac{\phi - \phi'}{\frac{\phi_2 - \phi_1}{L^2} + \frac{\phi_4 - \phi_1}{(2B)^2} - \frac{\phi_1 - \phi_3}{L^2} - \frac{\phi_1 - \phi_5}{(2B)^2}}} \Rightarrow \\ \Lambda &= \sqrt{\frac{\phi - \phi'}{\frac{\phi_2 - 2\phi_1 + \phi_3}{L^2} + \frac{\phi_4 - 2\phi_1 + \phi_5}{(2B)^2}}} \end{aligned}$$

met:

$$\phi = \frac{1}{8} (4\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5)$$

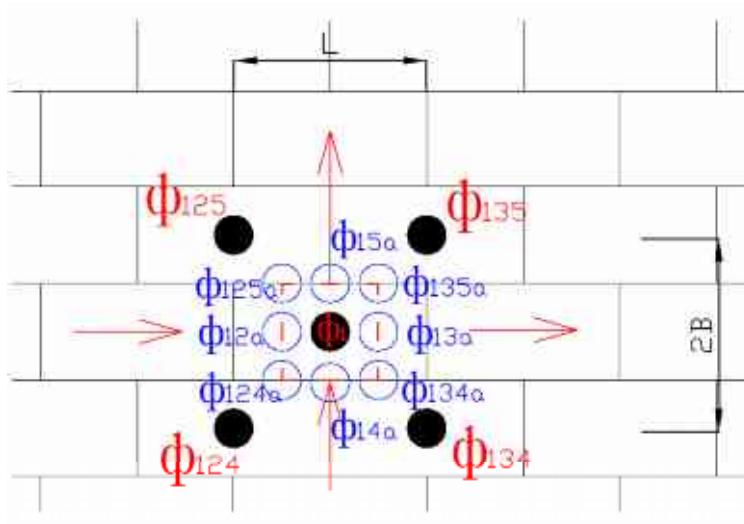
$$\phi' = \frac{1}{8} (4\phi'_1 + \phi'_2 + \phi'_3 + \phi'_4 + \phi'_5)$$

D.4 Alternatieve modelopstelling

In de vorige paragraaf is uitgegaan van een onderlinge afstand tussen de drukopnemers van $L = 2B = 0,5 \text{ m}$. Als alternatief is bekeken of een onderlinge afstand van $0,25 \text{ m}$ betere

resultaten oplevert. Het gaat daarbij om de gevoeligheid voor meetfouten en de nauwkeurigheid waarmee het lokale stijghoogteverloop wordt weergegeven door de drukopnemers.

De plaatsing van de drukopnemers en het balans gebied zijn weergegeven in Figuur D6.



Figuur D6 Meetposities en rekenpunten (Klein oppervlak)

De gemiddelde stijghoogte in het balansgebied is voor het kleine oppervlak bepaald op een vergelijkbare manier als in paragraaf D.3.2 met behulp van Figuur D6 en de onderstaande formules. De volgende stijghoogten zijn met lineaire interpolatie bepaald:

$$\phi_{15a} = \frac{1}{2}\phi_1 + \frac{1}{4}\phi_{125} + \frac{1}{4}\phi_{135}$$

$$\phi_{12a} = \frac{1}{2}\phi_1 + \frac{1}{4}\phi_{125} + \frac{1}{4}\phi_{124}$$

$$\phi_{13a} = \frac{1}{2}\phi_1 + \frac{1}{4}\phi_{135} + \frac{1}{4}\phi_{134}$$

$$\phi_{14a} = \frac{1}{2}\phi_1 + \frac{1}{4}\phi_{124} + \frac{1}{4}\phi_{134}$$

De stijghoogten op de hoeken van het balansgebied zijn weer bepaald met lineaire interpolatie:

$$\phi_{125a} = (\phi_{125} + \phi_1) / 2$$

$$\phi_{124a} = (\phi_{124} + \phi_1) / 2$$

$$\phi_{134a} = (\phi_1 + \phi_{134}) / 2$$

$$\phi_{135a} = (\phi_1 + \phi_{135}) / 2$$

Vervolgens verloopt de berekening van de gemiddelde stijghoogte hetzelfde als in paragraaf D.3.2.

Voor de berekening met het klein oppervlak wordt ϕ_{2a} , ϕ_{3a} , ϕ_{4a} , ϕ_{5a} in de massabalans gebruikt in plaats van ϕ_2 , ϕ_3 , ϕ_4 , ϕ_5 :

$$\phi_{5a} = (\phi_{125} + \phi_{135}) / 2$$

$$\phi_{4a} = (\phi_{124} + \phi_{134}) / 2$$

Voor de stijghoogte naast drukopnemer 1 is weer gebruikgemaakt van de gemeten gemiddelde gradiënt in de dwarsrichting van de goot:

$$\phi_{2a} = \left([\phi_1 - (\phi_{5a} - \phi_{125})] + [\phi_1 - (\phi_{4a} - \phi_{124})] \right) / 2$$

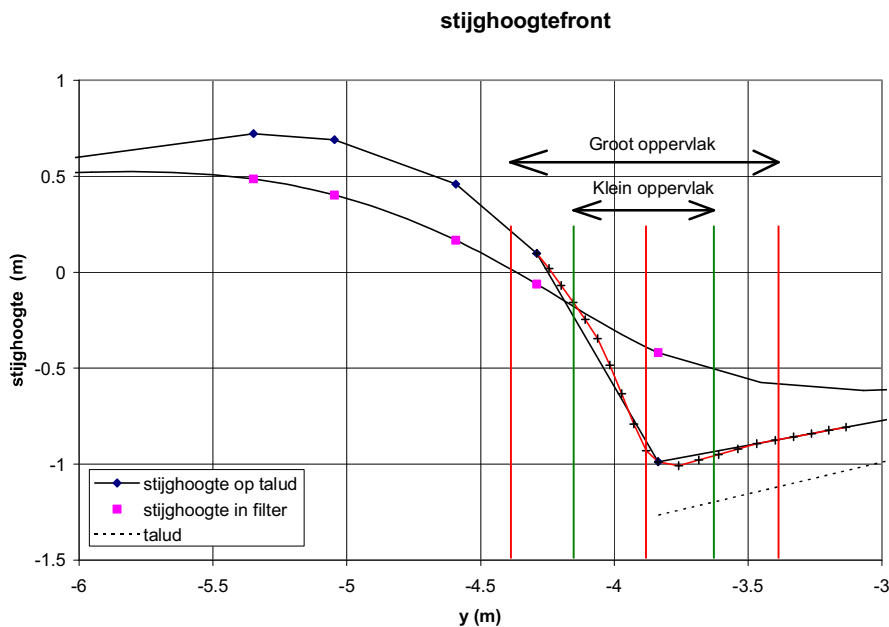
$$\phi_{3a} = \left([\phi_1 + (\phi_{135} - \phi_{5a})] + [\phi_1 + (\phi_{134} - \phi_{4a})] \right) / 2$$

Uiteindelijk resulteert de volgende formule voor het bepalen van de lek lengte voor het kleine oppervlak:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\phi - \phi'}{\frac{\phi_{2a} - 2\phi_1 + \phi_{3a} + \phi_{4a} - 2\phi_1 + \phi_{5a}}{(2L)^2} + \frac{\phi_{4a} - 2\phi_1 + \phi_{5a}}{B^2}}}$$

D.5 Keuze t.a.v. onderlinge afstand drukopnemers

De onderlinge afstand van de drukopnemers heeft een grote invloed op de gevoeligheid voor meetfouten. Anderzijds heeft het ook invloed op de mogelijke afwijking van het werkelijke stijghoogteverloop ten opzichte van de lineair geïnterpoleerde stijghoogteverlopen.



Figuur D.7 Karakteristieke golffront met overschrijdingsfrequentie van 2%

Met de formules uit hoofdstukken D.3 en D.4 zijn een aantal berekeningen van de lek lengte en toplaagdoorlatendheid gemaakt om de gevoeligheid te bepalen voor de twee

configuraties van drukopnemers. Er is daarbij gelet op de onderlinge afstand van de drukopnemers, maar er is ook aandacht geschonken aan de fout als gevolg van de linearisering.

Om de meest geschikte onderlinge afstand van de drukopnemers te bepalen is een aanname gemaakt over de verwachte leklengte en stijghoogteverloop, zie Figuur D.7 en paragraaf D.6. In Figuur D.7 is het verwachte stijghoogteverloop getoond voor een karakteristiek golffront met overschrijdingsfrequentie van 2%. Het middelpunt van de drukmetingen is aanvankelijk aangenomen op $y = -3,8\text{m}$.

De verwachte leklengte voor de beoogde opzet is ongeveer 0,65 m (doorlatendheid van de toplaag: 0,018 m/s als de stootvoegen 2 mm en langsvoegen 1,5 mm zijn). Na het inbouwen van de modelopstelling is gebleken dat de spleetbreedte veel groter was dan aanvankelijk aangenomen, en dat de korrelgrootte van het filter kleiner is uitgevallen. Daardoor is de feitelijke leklengte veel kleiner dan in deze bijlage was aangenomen.

Invloed linearisering

De berekeningen zijn eerst gemaakt met het zwarte verloop van de stijghoogte op de toplaag en vervolgens met het meer vloeiend verlopende stijghoogteverloop (rode lijn). Daarnaast zijn er berekeningen gemaakt met drukopnemers ter plaatse van:

- de verticale rode lijnen (groot oppervlak, met onderlinge afstand van 0,5 m) en
- de groene lijnen in combinatie met de middelste rode verticale lijn (klein oppervlak, met onderlinge afstand van 0,25 m).

Enkele resultaten van de berekening op basis van het aangenomen stijghoogteverloop (zoals getoond in Figuur D.7) zijn in Tabel D.1 weergegeven.

	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_{1t}	Φ_{2t}	Φ_{3t}	Φ_{4t}	Φ_{5t}	Λ_1	Λ_2	k_{1t}	k_{12}
Kleine oppervlak	-0.39	-0.39	-0.39	-0.18	-0.54	-0.88	-0.88	-0.88	-0.27	-0.93	0.67	0.67	0.02	0.02
Kleine oppervlak (rond)	-0.39	-0.39	-0.39	-0.18	-0.54	-0.93	-0.93	-0.93	-0.18	-0.96	0.69	0.69	0.02	0.02
Grote oppervlak	-0.39	-0.39	-0.39	0.02	-0.59	-0.88	-0.88	-0.88	0.22	-0.87	0.67	0.67	0.02	0.02
Grote oppervlak (rond)	-0.39	-0.39	-0.39	0.02	-0.59	-0.93	-0.93	-0.93	0.22	-0.87	0.70	0.70	0.02	0.02

Tabel D.1 Verwachte verandering van leklengte en toplaagdoorlatendheid met golfvorm en oppervlakte voor $y = -3.84\text{m}$ voor methode 1 (numeriek) en methode 2 (analytisch)

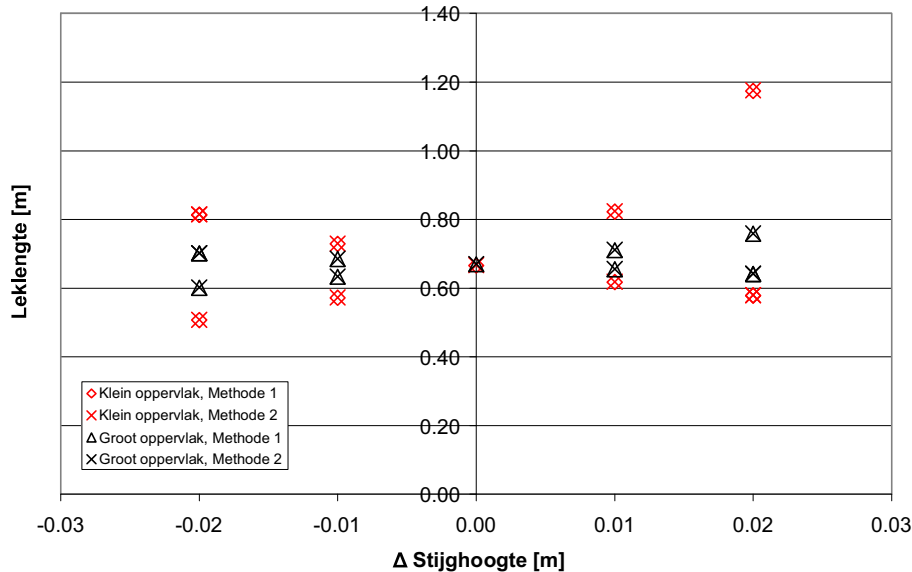
Het blijkt dat er weinig verschil zit tussen de berekeningen met het rechte verloop van de stijghoogte op de toplaag en het ronde verloop. Dit betekent dat de linearisatie, die bij een grote onderlinge afstand tussen de drukopnemers tot grote verschillen zou kunnen leiden, een kleine invloed heeft.

Invloed meetfouten

Vervolgens zijn berekeningen van de leklengte en toplaagdoorlatendheid gemaakt om de gevoeligheid van onnauwkeurigheden in de gemeten stijghoogtes op de Λ en k' in te schatten.

De resultaten zijn in figuur D.8 weergegeven (voor de aangenomen stijghoogteverloop). Elk punt in de grafieken geeft het maximale verschil in lek lengte voor een berekening waarbij in één of meerdere van de metingen een fout is geïntroduceerd.

De verwachte lek lengte voor de beoogde opzet is ongeveer 0,65 m. Het blijkt dat een fout van 1 cm op één of meerdere locaties in het filter een fout van maximaal 0,15 m kan opleveren. Het maximale gevonden verschil voor een fout van 2 cm was 0,46 m in de lek lengte en 0,014 m/s in de toplaagdoorlatendheid.



Figuur D.8 Verwachte verandering van lek lengte van de toplaag als gevolg van meetfouten (drukopnemer afstand: 0,5 m)

Een realistische schatting van de meetfout die zou kunnen optreden is 1 cm op één locatie of 0,5 cm op meerdere locaties. De fout die zou kunnen optreden is daardoor maximaal 30% in de lek lengte en 35% in de toplaagdoorlatendheid. Dit komt overeen met een breedte van de langsvogen van 2 mm in plaats van 1,5 mm (fout van 0,5 mm). Als de Λ bepaald worden op meerdere momenten en vervolgens de resultaten gemiddeld worden, kan deze fout nog aanzienlijk gereduceerd worden. Naar schatting wordt de maximale meetfout in de spleetbreedte dan hooguit 20%.

In figuur D.8 is verder te zien dat kleine meetfouten grote consequenties hebben voor de lek lengte als deze bepaald wordt op basis van de metingen in het kleine oppervlak. De fout in de lek lengte is bij metingen in het groot oppervlak ongeveer half zo groot.

Invloed locatie van stijghoogtefront t.o.v. drukopnemers

In bovenstaande berekeningen is er steeds van uitgegaan dat de middelste drukopnemer vlakbij de voet van het stijghoogtefront zit (minimum van het stijghoogteverloop op de toplaag). De nauwkeurigheid van de berekeningen is dan het grootste. Onderstaand is bepaald wat de invloed is van de locatie van het stijghoogtefront op de uiteindelijk

berekende leklengte. Deze invloed is bepaald door niet het stijghoogtefront te verplaatsen, maar de groep drukopnemers.

In tabel D.2 zijn de resultaten van de berekeningen gegeven. Het blijkt dat de afwijkingen als gevolg van de verplaatsing van het stijghoogtefront veel groter zijn bij het kleine oppervlak dan bij het groot oppervlak. Bij het kleine oppervlak levert dit een fout op tot orde 20%, terwijl bij het groot oppervlak dit minder dan 10% is.

Λ_1	y=-3.95m	y=-3.9m	y=-3.84	y=-3.73m	y=-3.6m
NIET ROND					
Kleine oppervlak	0.55	0.56	0.67	0.76	0.80
Grote oppervlak	0.64	0.64	0.67	0.66	0.65
ROND					
Kleine oppervlak	0.55	0.58	0.69	0.77	0.82
Grote oppervlak	0.64	0.67	0.70	0.67	0.66

Tabel D.2 Verwachte effect van verandering van de locaties van het front ten opzichte van de drukopnemers op de leklengte

Conclusie

Op basis van deze resultaten en het aangenomen stijghoogteverloop (verwachte leklengte van 0,65 m) is gekozen om de drukopnemers te plaatsen in een groot oppervlak met onderlinge afstand van 0,5 m.

Voor de onderlinge afstand tussen de drukopnemers is het van belang dat het verhang in het filter tussen de onderste twee drukopnemers zoveel mogelijk afwijkt van die tussen de bovenste twee drukopnemers. Dit betekent dat de helling van de lijn, die de stijghoogte in het filter weergeeft (Figuur D.7) moet veranderen binnen de range van de drukopnemers. Dit gebeurt vooral aan de zeezijde naast de golfklap en aan de landzijde naast het golffront. Anderzijds moet het verloop van de stijghoogte op het talud niet te sterk plaatsafhankelijk zijn, omdat we het lokale stijghoogteverloop op de toplaag binnen het meetbereik slechts met 3 drukopnemers meten. Dat maakt dat het niet de voorkeur heeft om de leklengte te bepalen tijdens het optreden van golfklappen. Daarom wordt voorgesteld om vooral naar de stijghoogtefronten te kijken.

Uit de berekeningen blijkt dat een realistische bovengrens van de mogelijke fout in de stijghoogtemetingen een fout van 30% in de leklengte en 35% in de toplaagdoorlatendheid geeft. Als echter de Λ op meerdere momenten bepaald wordt, en vervolgens de resultaten gemiddeld worden, is een aanzienlijke reductie van de fout te verwachten. Geconcludeerd wordt dat met de stijghoogtemetingen de spleetbreedte met een maximale fout van ten hoogste 20% kan worden bepaald. Het levert daardoor belangrijke extra informatie ten opzichte van de direct gemeten spleetbreedte met een meetlatje en voeler.

D.6 Locatie van de drukopnemers

Uit het vorige hoofdstuk is gebleken dat het voor de nauwkeurigheid van het resultaat belangrijk is dat de drukopnemers geplaatst worden in een gebied waar er een aanzienlijk

stijghoogteverschil over de toplaag optreedt. In dit hoofdstuk is de keuze van de locatie van de drukopnemers toegelicht.

D.6.1 Verwachte stijghoogteverloop op de toplaag

Op basis van metingen uit het verleden is het mogelijk een schatting te maken van de te verwachten stijghoogte op de toplaag (Klein Breteler 2006). Dit is onder meer afhankelijk van de golfcondities, zoals golfhoogte en golfsteilheid. Hier wordt uitgegaan van een golfhoogte van $H_s = 1,5$ m en een golfsteilheid van respectievelijk $H_s/L_{op} = 0,035$ en $0,020$ ($\xi_{op} = 1,78$ en $2,36$).

In figuur D.9 en D.10 is het verwachte stijghoogteverloop getekend voor een karakteristieke golfklap en golffront met overschrijdingsfrequentie van 2%. Deze stijghoogteverlopen worden ook doorgerekend in Steentoets2007. In onderstaande tabel zijn de locaties gegeven waar het maximale stijghoogteverschil optreedt, uitgedrukt in de horizontale afstand vanaf de waterlijn.

	$s_{op} = 0,035$	$s_{op} = 0,020$
Golfklap	2,54 m	3,70 m
Golffront	3,84 m	4,71 m

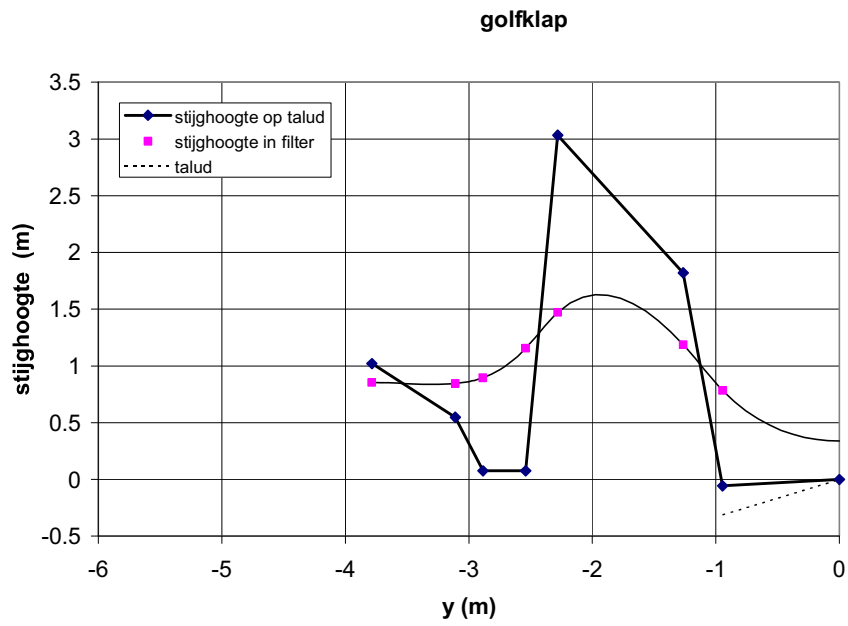
Tabel D.3, locatie van maximaal stijghoogteverschil volgens Steentoets 2007, uitgedrukt als horizontale afstand vanaf de waterlijn.

Uiteraard zullen de verschillende golfklappen en golffronten tijdens een proef op allerlei plaatsen terecht komen, en niet alleen de locaties zoals vermeld in tabel D.3. Figuur D.11 geeft een indruk van de spreiding van de locaties als gekeken wordt naar de 5% van de golven die de grootste belasting geven (grootste stijghoogteverschil over de toplaag). De bovenste figuur geeft de horizontale afstand tot de waterlijn, dimensieloos gemaakt met de golfhoogte, waar het maximale stijghoogteverschil optreedt tijdens de golfklap. In de onderste figuur is de dimensieloze diepte van de voet van het stijghoogtefront gegeven: $x_s \tan \alpha / H_s$. Uit de figuur blijkt dat zelfs bij deze specifieke verzameling grote golven de spreiding al vrij behoorlijk is. In tabel D.4 is dit omgerekend naar de horizontale afstand ten opzichte van de waterlijn voor een golfhoogte van $H_s = 1,5$ m, zodat het vergeleken kan worden met de waarde in tabel D.3.

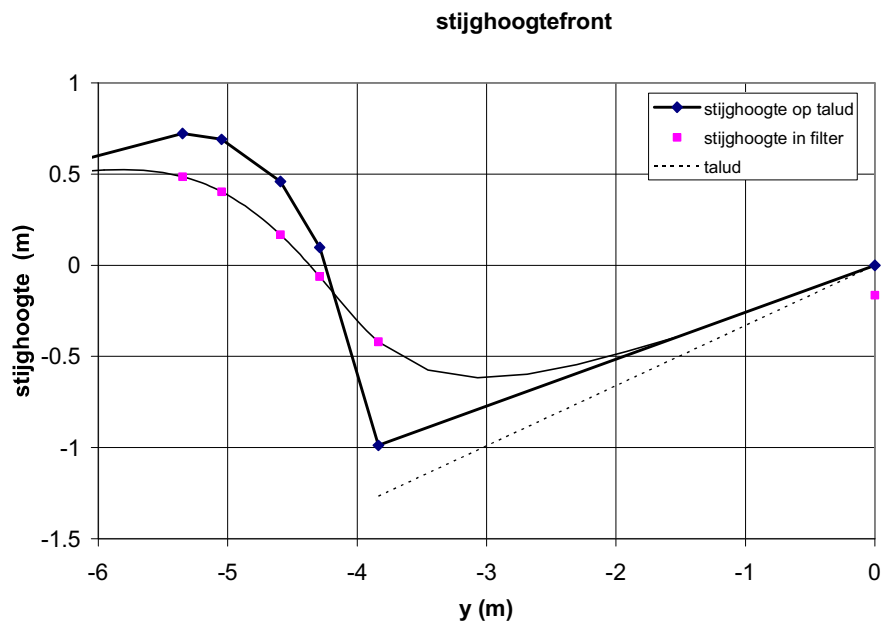
	$s_{op} = 0,035$	$s_{op} = 0,020$
Golfklap	0,6 à 4,0 m	1,0 à 6,0 m
Golffront	1,4 à 4,0 m	1,8 à 4,8 m

Tabel D.4, locatie van maximaal stijghoogteverschil, uitgedrukt als horizontale afstand vanaf de waterlijn.

Hieruit blijkt dat in het interval $1,8 < x < 4,0$ m tijdens alle proeven grote stijghoogteverschillen zowel tijdens het golffront als tijdens de golfklap optreden.

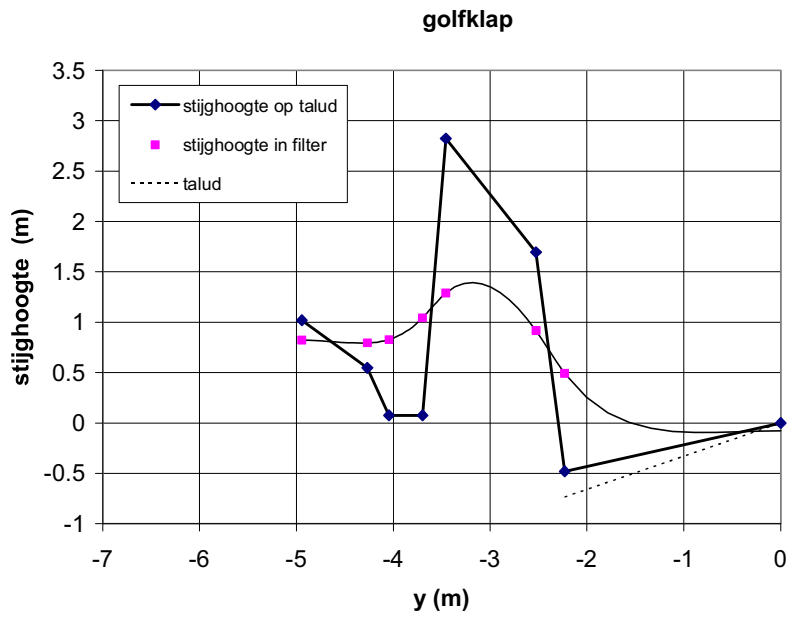


a)

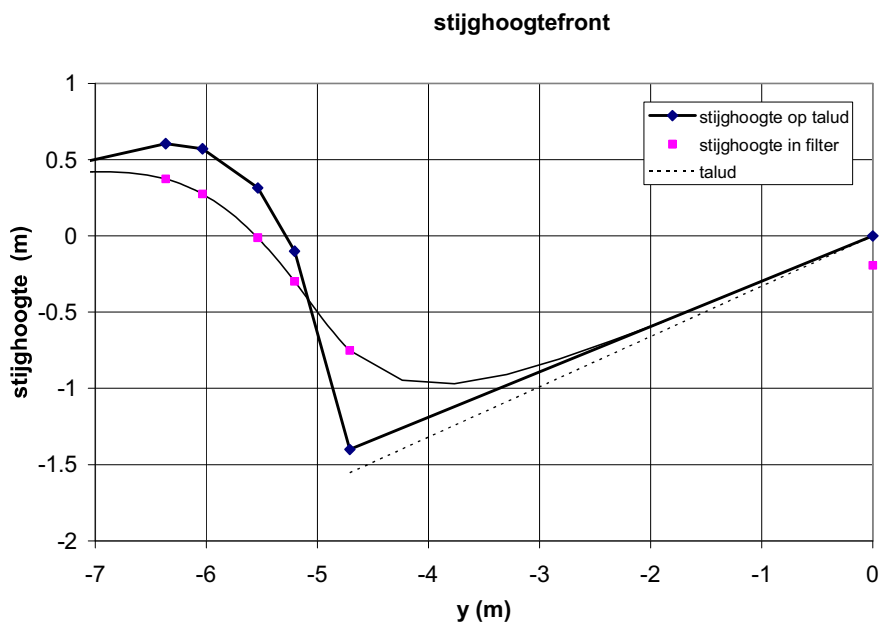


b)

Figuur D.9 Verwachte stijghoogte op toplaag en in filter, $s_{op} = 0,035$, $H_s = 1,5$ m

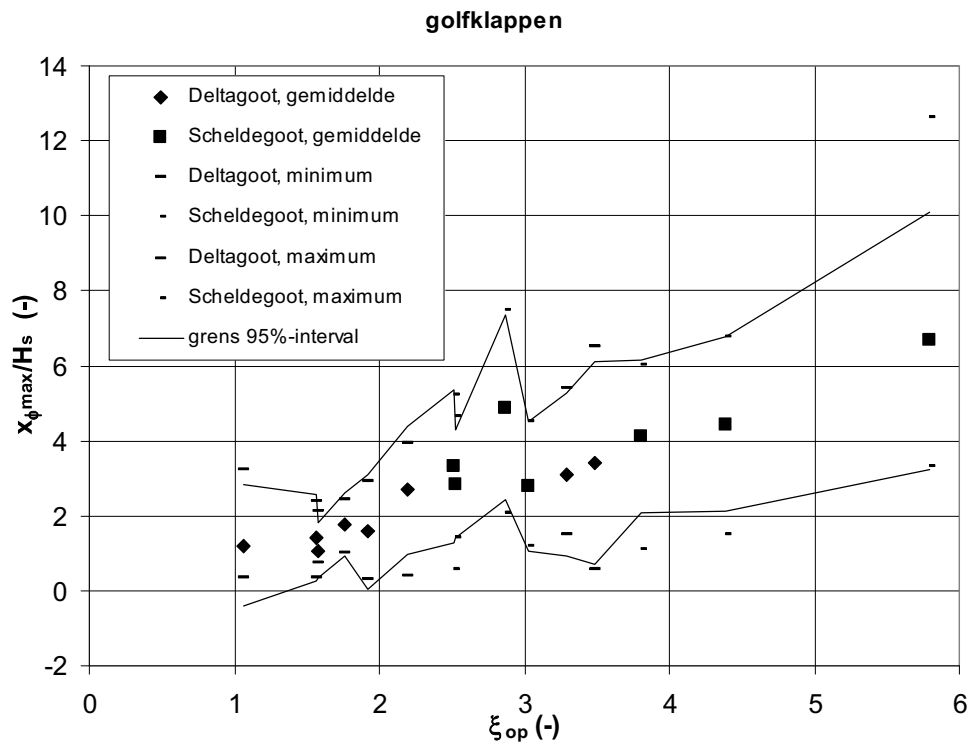


a)

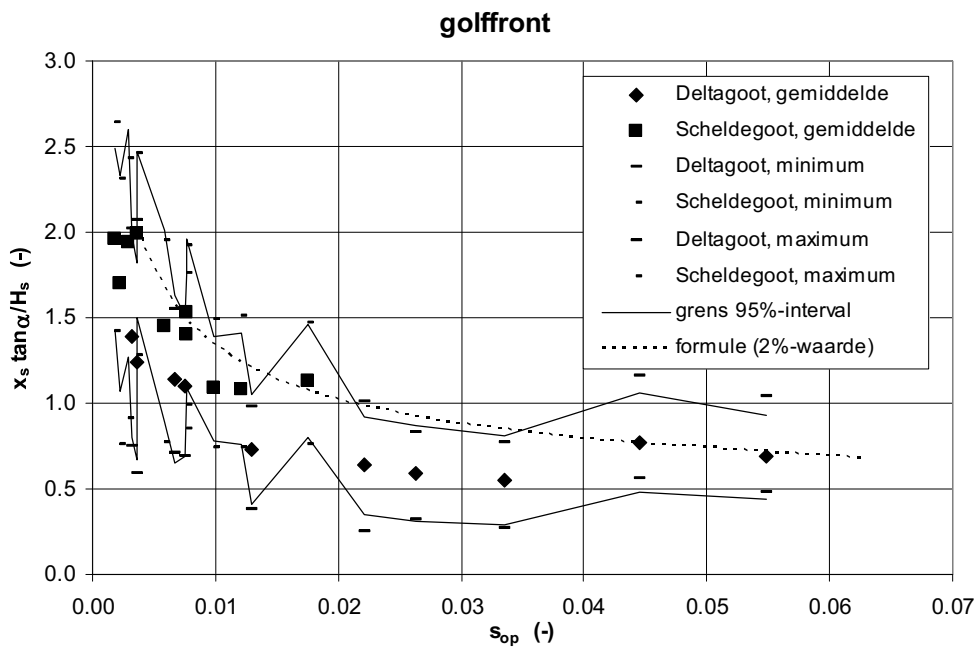


b)

Figuur D.10 Verwachte stijg­hoogte op toplaag en in filter, $s_{op} = 0,020$, $H_s = 1,5$ m



a)



b)

Figuur D.11 Locatie van golfklappen en -fronten

D.6.2 Locatie van de drukopnemers

In paragraaf D.6.1 is de locatie van de grote stijghoogteverschillen uitgedrukt als afstand van de waterlijn. Voor het kiezen van de locatie van de drukopnemers is het handiger om dit om te rekenen naar een diepte onder de stilwaterlijn. Dit is weergegeven in tabel D.5.

	$s_{op} = 0,035$	$s_{op} = 0,020$
Golfklap	0,2 à 1,3 m	0,3 à 2,0 m
Golffront	0,3 à 1,3 m	0,6 à 1,6 m

Tabel D.5, locatie van maximaal stijghoogteverschil, uitgedrukt als diepte onder de stilwaterlijn (punt op het talud).

Het blijkt dat tijdens de proeven met $s_{op} = 0,020$ de grote stijghoogteverschillen een paar decimeter dieper optreden dan tijdens de proeven met $s_{op} = 0,035$. De zone waar tijdens alle proeven zowel grote stijghoogteverschillen door de golfklappen als door de golffronten optreden is: $0,6 < d < 1,3$ m.

Op grond van het bovenstaande is de middelste drukopnemer tijdens de proeven met $s_{op} = 0,035$ aanvankelijk op een diepte $d = 0,8$ m geplaatst, als $H_s = 1,5$ m. Bij een waterstand van +4,5 m boven de gootbodem komt dit neer op een niveau van +3,7 m voor de middelste drukopnemers. Bij het inbouwen bleek dit echter niet precies uit te komen met de positie van de blokken en is de middelste drukopnemer op +3,71 m geplaatst.

Bij afwijkende golfhoogtes is de diepte evenredig aangepast (door de waterstand aan te passen). Vervolgens zijn de proeven met $s_{op} = 0,020$ uitgevoerd met een paar decimeter hogere waterstand.

Tijdens de proeven bleek dat de drukopnemers toch beter wat dieper geplaatst hadden moeten worden. Daarom is na enkele proeven de waterstand wat hoger ingesteld dan aanvankelijk was gepland.

Referenties

Klein Breteler, M. (2006)
Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen
Kennisontwikkeling ten behoeve van Steentoets2006
WL | Delft Hydraulics, verslag H4846, november 2006

E Foto's



a)



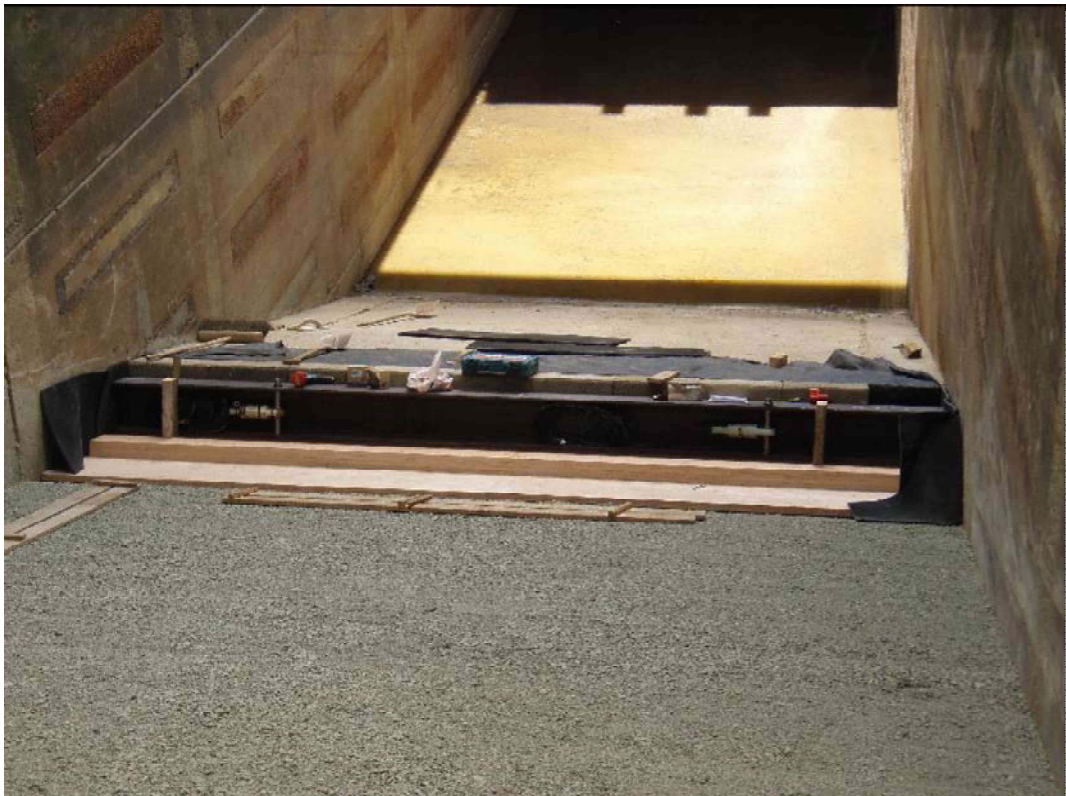
b) Inbouw en verdichten van zandcementstabilisatie

Aanleggen ondergrond in de Deltagoot

WL | DELFT HYDRAULICS

H4941

Foto I



b) Afwerken taludonderkant

Plaatsen van filter in de Deltagoot



b) Overzicht

Krachtenopnemers in de Deltagoot



b) Inbouw bloklaag

Plaatsen van blokken in de Deltagoot



a



b) Inbouw bloklaag

Plaatsen van blokken in de Deltagoot



b) Inbouw bloklaag

Plaatsen van blokken in de Deltagoot



b) Opzet voor proeven

Plaatsen van blokken in de Deltagoot



b) Gezakte bloklaag na Proef 13 (rij X-S, +3,55m tot +3,95m)

Uitvoering van de proeven



b) Tijdens Proef 13

Uitvoering van de proeven



b) Tijdens Proef 14a

Uitvoering van de proeven



b) Na Proef 14a

Omhoog gekomen blokken na Proef 14



a



b) Na Proef 17a

Uitvoering van de proeven



b) Blokbeweging na Proef 17a (rij Y)

Omhoog gekomen blokken na Proef 17



b) Na Proef 17a

Uitvoering van de proeven



b) Blokbeweging na Proef 23 (rij Y)

Omhoog gekomen blokken na Proef 23



b) Na Proef 26e (rij Z)

Uitvoering van de proeven



b) Na Proef 26

Uitvoering van de proeven



b) Na Proef 26 (rij X)

Uitvoering van de proeven



b) Na Proef 26

Uitvoering van de proeven

F Matlab programma


```

% Bepaling van de Leklengte, project H4941: 'Blokken op kant'

% Leklengte parameters:
% b= dikte van de filterlaag (m)
% B= blokbreedte in richting van gootas (m)
% D= blokhoogte (m)
% D15 = grain diameter (m); korrelgrootte 4-20mm (D15-D85)
% delta = leklengte (m)
% g= 9.81 (m/s2), zwaartekracht
% i= verhang (dphi/dx) (-), i=filter, it= toplaag
% k= gelin. doorlatendheid filter (m/s)
% L= bloklengte vericaal op gootas (m)
% n= porositeit van filter (-)
% p=druk (N/m2)
% phi=stijghoogte (m); phi=(p/rho*g)+z phi=filter, phit=toplaag
% q=specifieke debiet in filter (m/s), qf= filter, qt= toplaag
% Q= debiet (m3/s)
% rho=waterdichtheid (kg/m3)
% t= tijd (s)
% nu=1.2*10^-6 (m2/s), kinematische viscositeit van water

clear all

listtests = {'T26c_drukken'};
dir0 = pwd;
addpath(dir0);

i5=1; %Proef
h=0.4; %Limiet delta phi
f=200; %frekwentie

TL1=0
TL2=30000 %Lengte van tijd sectie

A = load([char(listtests(i5))]);
HO=[A(:,1),A(:,2),A(:,4),A(:,6),A(:,8),A(:,10)]; %Tijd, drukken
boven 1,3,5,7,9
HB=[A(:,1),A(:,3),A(:,5),A(:,7),A(:,9),A(:,11)]; %Tijd, drukken
beneden 2,4,6,8,10
HO(:,2:end)=HO(:,2:end)/9.81;
HB(:,2:end)=HB(:,2:end)/9.81;

AA=HO(TL1+1:TL2,:); %boven
BB=HB(TL1+1:TL2,:); %beneden

%-----
% LEKLENGTEN

% vaste input parameters
b=0.115;
B=0.25;
D=0.5;
D15 =0.0045;
g=9.81;
L=0.5;
n=0.35;
rho=1000;
    
```

```

nu=1.2*10^-6;

%-----
%Filter
af=(160.*nu.*(1-n).^2)./(g.*(n.^3).*D15.^2);
bf=2.2./(g.*(n.^2).*D15);
kf=(-af+sqrt(af.^2+1.2.*bf))./(0.6.*bf);
%-----

%BEREKENING

for x1=1:1:length(AA)

%groot oppervlak
phi1o=AA(x1,2);
phi2o=AA(x1,3);
phi3o=AA(x1,4);
phi4o=AA(x1,5);
phi5o=AA(x1,6);

phi1=BB(x1,2);
phi2=BB(x1,3);
phi3=BB(x1,4);
phi4=BB(x1,5);
phi5=BB(x1,6);

%-----

%beneden
phi15=(phi1+phi5)./2;
phi12=(phi1+phi2)./2;
phi13=(phi1+phi3)./2;
phi14=(phi1+phi4)./2;

phi125=(phi2+phi5)./2;
phi124=(phi2+phi4)./2;
phi134=(phi4+phi3)./2;
phi135=(phi5+phi3)./2;

%-----

%boven

phi15o=(phi1o+phi5o)./2;
phi12o=(phi1o+phi2o)./2;
phi13o=(phi1o+phi3o)./2;
phi14o=(phi1o+phi4o)./2;

phi125o=(phi2o+phi5o)./2;
phi124o=(phi2o+phi4o)./2;
phi134o=(phi4o+phi3o)./2;
phi135o=(phi5o+phi3o)./2;

%-----

%Methode 2: stijghoogte (A1: groot oppervlak)
phiM1(x1)=1/12.*(phi124+phi125+phi134+phi135+phi12+phi13+phi14+phi15
+4.*phi1);

```

```

phiMb1(x1)=1/12.*(phi124o+phi125o+phi134o+phi135o+phi12o+phi13o+phi1
4o+phi15o+4.*philo);

%-----

%Methode 2: lek lengte uit massabalans
i2Nb(x1)=(phi2-phi1)./L';
i3Nb(x1)=(phi1-phi3)./L';
i4Nb(x1)=(phi4-phi1)/(2*B)';
i5Nb(x1)=(phi1-phi5)/(2*B)';
itNb(x1)=(phiM1(x1)-phiMb1(x1))./D)';

INb(x1,:)= [phiMb1(x1), phiM1(x1), itNb(x1), i2Nb(x1), i3Nb(x1), i4Nb(x1),
i5Nb(x1)];

deltaNb(x1)=sqrt(abs((itNb(x1).*D)/(i2Nb(x1)./L-
i3Nb(x1)./L+i4Nb(x1)/(2*B)-i5Nb(x1)/(2*B)))));
ktNb(x1)=D.*b.*kf./deltaNb(x1).^2;

EE1(x1,:)= [real(kf)];
EE1Nb(x1,:)= [real(deltaNb(x1))];

end

%disp('Methode2')
%disp('Time      phi1N      phi1N      itN      i2N      i3N
i4N      i5N      kf      deltaN')
EEE=[AA(:,1),INb,EE1,EE1Nb]; %tijd, 7 x phi, kf, deltaNb, (ktNb)

%-----

t2=1:1:length(AA);

%Tijd phi1,3,5 lek lengte, delta phi1,
MX1=[AA(:,1),AA(:, [2,4,6]),deltaNb',itNb'];

%Criteria voor het bepalen van de juiste lek lengte:
disp('Time      Phi1      Phi3      Phi5      Lek lengte      deltaPhi1')
MX1=MX1(t2,:);
MX1=MX1(MX1(:,6)>h,:); %delta phi> h (0.4m),
%CRITERION 1
MX1=MX1(MX1(:,2)>MX1(:,3),:); %phi1>phi3 ?,
%CRITERION 2
MX1=MX1(MX1(:,4)>MX1(:,3),:); %phi5>phi3 ?,
%CRITERION 3
MX1=MX1(MX1(:,4)-MX1(:,3)<0.2,:);

%-----

%BEREKENING: variatie van stijghoogte (0.5cm)
%Effekt van kleine verschil in stijghoogte op lek lengte voor alle
dros

No2=1;
No3=1;

nn(1,:)= [0.05,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
nn(2,:)= [0,0.05,0,0,0,0,0,0,0,0];
    
```

```

nn(3,:)=[0,0,0.05,0,0,0,0,0,0,0];
nn(4,:)=[0,0,0,0.05,0,0,0,0,0,0];
nn(5,:)=[0,0,0,0,0.05,0,0,0,0,0];
nn(6,:)=[0,0,0,0,0,0.05,0,0,0,0];
nn(7,:)=[0,0,0,0,0,0,0.05,0,0,0];
nn(8,:)=[0,0,0,0,0,0,0,0.05,0,0];
nn(9,:)=[0,0,0,0,0,0,0,0,0.05,0];
nn(10,:)=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0.05];

for i=1:10
for x1=1:1:length(MX1(:,1))

%groot oppervlak
xxx=round(MX1(x1,1)*200-TL1);
phi1o=AA(xxx,2)+nn(i,1);
phi2o=AA(xxx,3)+nn(i,2);
phi3o=AA(xxx,4)+nn(i,3);
phi4o=AA(xxx,5)+nn(i,4);
phi5o=AA(xxx,6)+nn(i,5);

phi1=BB(xxx,2)+nn(i,6);
phi2=BB(xxx,3)+nn(i,7);
phi3=BB(xxx,4)+nn(i,8);
phi4=BB(xxx,5)+nn(i,9);
phi5=BB(xxx,6)+nn(i,10);

%-----
%beneden
phi15=(phi1+phi5)./2;
phi12=(phi1+phi2)./2;
phi13=(phi1+phi3)./2;
phi14=(phi1+phi4)./2;

phi125=(phi2+phi5)./2;
phi124=(phi2+phi4)./2;
phi134=(phi4+phi3)./2;
phi135=(phi5+phi3)./2;

%-----
%boven

phi15o=(phi1o+phi5o)./2;
phi12o=(phi1o+phi2o)./2;
phi13o=(phi1o+phi3o)./2;
phi14o=(phi1o+phi4o)./2;

phi125o=(phi2o+phi5o)./2;
phi124o=(phi2o+phi4o)./2;
phi134o=(phi4o+phi3o)./2;
phi135o=(phi5o+phi3o)./2;

%-----

%Methode 2: stijghoogte (A1: grote oppervlakte)
phiM1(x1)=1/12.*(phi124+phi125+phi134+phi135+phi12+phi13+phi14+phi15
+4.*phi1);
phiMb1(x1)=1/12.*(phi124o+phi125o+phi134o+phi135o+phi12o+phi13o+phi1
4o+phi15o+4.*phi1o);

```

```

%-----

%Methode 2: leklengte uit massabalans
i2Nb(x1)=(phi2-phi1)./L';
i3Nb(x1)=(phi1-phi3)./L';
i4Nb(x1)=(phi4-phi1)/(2*B)';
i5Nb(x1)=(phi1-phi5)/(2*B)';
itNb(x1)=(phiM1(x1)-phiMb1(x1))/D';

INb2(x1,:)=[phiMb1(x1),phiM1(x1),itNb(x1),i2Nb(x1),i3Nb(x1),i4Nb(x1),
,i5Nb(x1)];

deltaNb2(x1)=sqrt(abs((itNb(x1).*D)/(i2Nb(x1)./L-
i3Nb(x1)./L+i4Nb(x1)/(2*B)-i5Nb(x1)/(2*B)))));
ktNb2(x1)=D.*b.*kf./deltaNb2(x1).^2;

EE2(x1,:)=[real(kf)];
EE2Nb(x1,:)=[real(deltaNb2(x1))];

end

No3;
EEE2=[MX1(:,1),INb2,EE2,EE2Nb];
ddl(:,No3)=abs([MX1(:,5)/EEE2(:,10)]-1);
%alle impacts: max. variatie in leklengte (elke kolom voor andere
DRO)

Mean(No3)=mean(EEE2(:,10));

No3=No3+1;
mm2(:,No3)=EE2Nb;
%ALL leklengten voor kleine veranderingen in een drukopnemer

end

ddl=[MX1(:,1),ddl];

%-----

disp('dro 1-10, max. verandering (%) in leklengte for individuele
impact voor kleine verandering in stijghoogte')
disp('Tijd, Verandering voor dro1   dro2   dro3   dro4   dro5   dro6
dro7   dro8   dro9   dro10')
ddl

%criterium: kleine verandering in stijghoogte geeft minder dan 20%
%vrschil in leklengte (verandering te groot: golf impact
%aarschijnlijk)

disp('dro 1-10, max. verandering (%) in leklengte voor alle impacts
voor kleine verandering in stijghoogte')
a=max(ddl(:,2:end),[],2);
mm1=ddl(a<0.2,:);
disp('Tijd   Phi1   Phi3   Phi5   Leklengte   deltaPhi1')
MX2=MX1(a<0.2,:) % CRITERIUM 4
    
```

```
figure;
plot(EEE(:,1),EEE(:,10),'k');
hold on
plot(AA(:,1),AA(:,[2,4,6])); % Phi 1,3,5
hold on
plot(MX2(:,1),MX2(:,5),'ob'); % Phi 1,3,5
hold on
grid on;
axis([0 150 -1 5]);
xlabel('Tijd [s]')
ylabel('Leklengte [m]')
legend('Leklengte','Phi1','Phi3','Phi5','Events die aan criteria
voldoen')

%Output
[file, path] = uiputfile('*.*', 'MX2');
filename=[path,file];
fileout=file;
eval(['save ' fileout ' MX2 -ascii;']);
```