

# Stabiliteit taludbekleding van Hillblock 2.0, Drainageblock en Grassblock



Grootschalig modelonderzoek in Deltagoot



# **Stabiliteit taludbekleding van Hillblock 2.0, Drainageblock en Grassblock**

Grootschalig modelonderzoek in Deltagoot

P. van Steeg

1220668-000



**Titel**

Stabiliteit taludbekleding van Hillblock 2.0, Drainageblock en Grassblock

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Hillblock B.V.	1220668-000	1220668-000-HYE-0008	43

**Trefwoorden**

Steenzetting, Hillblock, Drainageblock, Grassblock, stabiliteit, golfbelasting, golfverslag

**Samenvatting**

Hillblock B.V. heeft Deltares gevraagd om vier typen zetstenen te beproeven in de Deltagoot (Delft). Dit betreft de volgende typen zetstenen:

- Hillblock 2.0 van het type Basis (golfklapzone)
- Hillblock 2.0 van het type Slim (golfklapzone)
- Drainageblock (golfoploopzone)
- Grassblock (golfoploopzone, kruin en binnentalud).

Dit rapport beschrijft de uitgevoerde testen met betrekking tot de golfklapzone en golfoploopzone en de bijbehorende analyse. De proeven met de Grassblocks op de kruin en het binnentalud van een lage dijk tijdens golfverslag zijn beschreven in een apart rapport (Van Steeg 2016).

De hier geteste Hillblock 2.0 wijken af van eerder geteste Hillblocks. Zo is er onder andere een groef in de voet van de Hillblocks gemaakt. Het doel van deze aanpassing is dat het inwasmateriaal beter blijft zitten, waardoor de samenhang in de toplaag (klemming) beter behouden blijft tijdens golfbelasting. De verwachting is dat de stabiliteit daardoor hoger is.

De Hillblock 2.0 hadden een zuilhoogte van 18 cm en waren geplaatst op een filter van steenslag met daaronder een geotextiel. De Hillblocks 2.0 zijn in drie testseries beproefd:

- Test Serie 1: korte duur (circa 1000 golven) met een golfsteilheid van 2%
- Test Serie 2: korte duur (circa 1000 golven) met een golfsteilheid van 4%
- Test Serie 3: lange duur met een golfsteilheid van 4%

De proeven zijn uitgevoerd op schaal 2, wat betekent dat de blokjes zowel qua lengte, breedte als hoogte tweemaal zo klein zijn als in werkelijkheid. Dit geldt ook voor de golfhoogte.

Op basis van de resultaten en een analyse met behulp van Steentoets is de stabiliteitsfactor afgeleid voor Hillblocks 2.0 met een hoogte van 0,36 m op ware grootte:

- Hillblock 2.0 van het type Basis met een hoogte van 0,36 cm:  $f_{\text{stabiliteit}} = 1,35$
- Hillblock 2.0 van het type Slim met een hoogte van 0,36 cm:  $f_{\text{stabiliteit}} = 1,35$

De Grassblocks en de Drainageblocks in de golfoploopzone op het buitentalud zijn slechts getest met een beperkt proevenprogramma. De Drainageblocks en Grassblocks waren aan de testopstelling toegevoegd om een ondergrens van de stabiliteit te bepalen. Zodra aan één van deze bekledingen schade zou ontstaan, zouden de andere typen zetstenen niet verder beproefd kunnen worden met hogere golven. Doordat tijdens de eerste proevenserie de Grassblocks waren bezweken, met veel vervolgschade aan de Drainageblocks, zijn deze twee typen bekledingen uit de opstelling verwijderd. Daardoor kon er geen bezwijk golfhoogte van de Drainageblocks worden bepaald. Omdat er slechts één proevenserie met Grassblocks

**Titel**




Stabiliteit taludbekleding van Hillblock 2.0,  
Drainageblock en Grassblock

<b>Opdrachtgever</b> Hillblock B.V.	<b>Project</b> 1220668-000	<b>Kenmerk</b> 1220668-000-HYE-0008	<b>Pagina's</b> 43
--	-------------------------------	--	-----------------------

is uitgevoerd kan er geen stabiliteitsfactor worden afgeleid. Wel geeft het testresultaat aan dat de stabiliteit van Grassblocks vrij groot is ten opzichte van de stabiliteit zoals deze is berekend met Steentoets.

**Referenties**

Opdrachtbevestiging Hillblock B.V. d.d. 14 december 2014

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v1.0	jun. 2016	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		ir. W.M.K. Tilmans	
V2.0	jun.2016	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		Dr. M.R.A. van Gent	
V3.0	jul. 2016	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		Dr. M.R.A. van Gent	

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel van het onderzoek	2
1.3	Projectorganisatie	2
<b>2</b>	<b>Modelopstelling</b>	<b>3</b>
2.1	Faciliteit	3
2.2	Schaling en ontwerp toplaag en filter	3
2.2.1	Waterbeweging: Froude schaling	3
2.2.2	Stroming in het filter: het Reynolds getal	4
2.2.3	Dikte van de toplaag en belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ .	4
2.2.4	Detailtering van het filter	5
2.3	Beschrijving testsecties	6
2.3.1	Algemeen	6
2.3.2	Testsectie met Hillblock 2.0	7
2.3.3	Testsectie met Drainageblock	9
2.3.4	Testsectie met Grassblock	9
2.3.5	Afwerking van de modelranden	10
2.3.6	Overige taluddelen	11
2.4	Uitgevoerde metingen	11
2.4.1	Golfhoogtemetingen	11
2.4.2	Profielmetingen	12
2.4.3	Uitspoeling inwasmateriaal	12
2.5	Proevenprogramma	13
2.5.1	Korteduurproeven (Test Serie 1 en Test Serie 2)	13
2.5.2	Langeduurproeven (Test Serie 3)	14
<b>3</b>	<b>Proefresultaten en beschrijving van testen</b>	<b>15</b>
3.1	Indeling in schadecategorieën	15
3.2	Test Serie 1: korteduurproeven, $s_{op} = 0,02$	16
3.2.1	Test P01 ( $H_{m0} = 0,87$ m)	16
3.2.2	Test P02 ( $H_{m0} = 1,18$ m)	17
3.2.3	Test P03 ( $H_{m0} = 1,36$ m)	17
3.2.4	Test P04 <sub>cum</sub> ( $H_{m0} = 1,55$ m)	19
3.2.5	Test P05 ( $H_{m0} = 1,72$ m)	21
3.2.6	Test P06 <sub>cum</sub> ( $H_{m0} = 1,93$ m)	21
3.3	Test Serie 2: korteduurproeven, $s_{op} = 0,04$	22
3.3.1	Test P07 ( $H_{m0} = 1,32$ m)	22
3.3.2	Test P08 ( $H_{m0} = 1,48$ m)	23
3.3.3	Test P09 ( $H_{m0} = 1,75$ m)	24
3.3.4	Test P10 ( $H_{m0} = 1,92$ m)	26
3.4	Test Serie 3: langeduurproeven, $H_{m0} = 1,92$ m, $s_{op} = 0,04$	27
3.4.1	Test P11 <sub>cum</sub>	27
3.4.2	Test P12	28
<b>4</b>	<b>Analyse en discussie</b>	<b>31</b>
4.1	Hillblock 2.0 in golfklapzone	31

4.1.1	Stabiliteit	31
4.1.2	Uitspoeling inwasmateriaal	33
4.1.3	Bepaling stabiliteitsfactor	34
4.2	Drainageblocks in golfoploopzone	38
4.2.1	Stabiliteit	38
4.2.2	Uitspoeling inwasmateriaal	39
4.3	Grassblocks in golfoploopzone	39
4.3.1	Stabiliteit	39
4.3.2	Uitspoeling inwasmateriaal.	40
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>41</b>
5.1	Algemeen	41
5.2	Hillblock 2.0	41
5.3	Drainageblock in golfoploopzone	42
5.4	Grassblock in golfoploopzone	42
<b>6</b>	<b>Literatuur</b>	<b>43</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Foto's</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Figuren</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Tabellen</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Golfhoogte overschrijdingskrommen en spectra</b>	<b>D-1</b>
<b>E</b>	<b>Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor</b>	<b>E-1</b>
E.1	Inleiding	E-1
E.2	Interpretatie van de proeven	E-1
E.3	Bepaling stabiliteitsfactor	E-2
<b>F</b>	<b>Proeven optellen</b>	<b>F-1</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Hillblock B.V. heeft een aantal typen zetstenen ontwikkeld welke kunnen worden toegepast om dijken en oevers te beschermen tegen golfaanval en stromingsbelasting. In het voorjaar van 2016 zijn een viertal producten van Hillblock B.V. getest in de Deltagoot van Deltares. Dit betreft de vier volgende typen zetstenen:

- Hillblock 2.0 van het type Basis
- Hillblock 2.0 van het type Slim
- Grassblock
- Drainageblock

Een impressie van de zetstenen is weergegeven in Figuur 1.1 (zie ook Bijlage B).



Figuur 1.1 V.l.n.r. Indruk van Hillblock 2.0 van het type Basis, Hillblock 2.0 van het type Slim, Drainageblock, Grassblock

Aangezien de stabiliteit van steenbekledingen onder golfaanval wordt bepaald door de vorm en afmetingen van de bekledingselementen, de vorm en afmetingen van de open ruimte tussen de bekledingselementen en de interactie tussen de bekledingselementen is het voor dergelijke typen steenzetting noodzakelijk dat de stabiliteit in een grootschalige golfgoot wordt vastgesteld alvorens het op dijken kan worden toegepast. De Deltagoot in Delft is bij uitstek geschikt om dit soort steenzettingen te beproeven, omdat hierin een dijk op bijna ware grootte (schaal circa 1:2) kan worden ingebouwd en kan worden belast met grote golven. Door de grootte van deze golfgoot zijn er geen ongewenste schaaffecten te verwachten.

Een eerder type Hillblock is al in een eerder onderzoek getest (Van Steeg, 2012, 2015a, 2015b en Van Steeg et al, 2016). Hieruit bleek al een relatief hoge stabiliteit van de Hillblocks. Om de stabiliteit nog hoger te maken heeft Hillblock B.V. een aantal aanpassingen gemaakt aan het oorspronkelijke Hillblock. Deze aanpassingen betreffen onder andere het aanbrengen van een groef in de voet van het Hillblock. Deze maatregel leidt naar verwachting tot het beter vasthouden van het inwasmateriaal tussen de voeten van de Hillblocks wat weer leidt tot een betere samenhang (klemming) en dus een betere stabiliteit. Daarnaast is de voet van het Hillblock in verhouding tot de kop iets smaller gemaakt. Hierdoor staan de voeten van de Hillblocks in de richting haaks op de dijkas een klein beetje verder uit elkaar. Als gevolg hiervan is het grondvlak van de Hillblocks meer open wat volgens de leklengtetheorie ook leidt tot een iets hogere stabiliteit.

De Drainageblocks en de Grassblocks zijn nieuwe producten van Hillblock B.V. De basisgedachte van Drainageblocks is dat, door de dichtere kop, er nieuwe toepassingsmogelijkheden zijn (bijvoorbeeld als bermbekleding welke toegankelijk is voor bijvoorbeeld fietsverkeer). De basisgedachte van de Grassblocks is dat deze onder een graszode worden geplaatst en als verborgen bekleding fungeren. Bij een storm slaat het gras van de Grassblocks af en vervolgens wordt de dijk beschermd door de Grassblocks. De beoogde zone waar Grassblocks en de Drainageblocks worden toegepast is de golfploopzone van een dijk. Een andere mogelijke beoogde zone van de Grassblocks is de kruin en het binnentalud van een dijk. Dit is ook in 2016 getest in de Deltagoot, maar is in een separaat rapport beschreven (Van Steeg 2016).

In de nabije toekomst wil Rijkswaterstaat het mogelijk maken om het onderscheid tussen de typen steenzettingen tot uiting te laten komen in het rekenmodel Steentoets. Daarvoor wordt een specifieke stabiliteitsfactor geïntroduceerd die voor elk type steenzetting verschillend is. Deze stabiliteitsfactor is afhankelijk van de prestaties van de steenzetting bij zware golfaanval in een grootschalige onderzoeksfaciliteit, ten opzichte van de verwachtingen op grond van berekeningen met Steentoets (met stabiliteitsfactor = 1). Naarmate de steenzetting beter presteert ten opzichte van Steentoets, krijgt deze een hogere stabiliteitsfactor toebedeeld. Die stabiliteitsfactor wordt vervolgens gebruikt om het resultaat van Steentoets aan te passen zodat de hiermee berekende stabiliteit beter overeenkomt met de gemeten stabiliteit. Deze stabiliteitsfactor is de verhouding tussen de benodigde toplaagdikte die volgt uit de resultaten van het experimentele onderzoek en de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (met stabiliteitsfactor = 1), rekening houdend met een veiligheidsmarge.

## 1.2 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderhavige onderzoek is drieledig:

- het vaststellen van de stabiliteit en de stabiliteitsfactor van Hillblock 2.0.
- het verkrijgen van een indruk van de stabiliteit van Grassblocks en Drainageblocks in de golfploopzone.
- Het vaststellen van de stabiliteit van Grassblocks op de kruin en het binnentalud

Dit rapport beschrijft de uitgevoerde proeven en analyses met betrekking tot de Hillblocks 2.0 en de Grassblocks en Drainageblocks in de golfploopzone. De stabiliteit van de Grassblocks op de kruin en het binnentalud worden in Van Steeg (2016) beschreven

## 1.3 Projectorganisatie

Het onderzoek werd uitgevoerd in de periode december 2015 – april 2016 door ir. P. van Steeg en Mark Klein Breteler. De analyses en rapportages zijn verzorgd door ir. P. van Steeg. De kwaliteitsborging is verzorgd door ir. M. Klein Breteler.

## 2 Modelopstelling

In dit hoofdstuk is de modelopstelling beschreven. Alle vermelde waarden in dit rapport zijn weergegeven op modelschaal tenzij anders vermeld.

### 2.1 Faciliteit

De proeven zijn uitgevoerd in de Deltagoot (in Delft) van Deltares. Deze golfgoot heeft een lengte van 291 m, een breedte van 5,0 m en een diepte van 9,5 m. De gootwanden zijn lokaal bij de kruin van de dijk nog verhoogd met 2,8 m hoge opzetstukken.

De goot is voorzien van een golfschot waarmee zowel regelmatige als onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. Tevens is het golfschot voorzien van een systeem dat voor gereflecteerde golven compenseert, zodat deze niet opnieuw bij het golfschot vandaan in de richting van de constructie reflecteren.

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken met een significante golfhoogte tot ongeveer  $H_s = 2,0$  m. Met deze golfhoogte is het mogelijk de maximale golfcondities op beschutte locaties in estuaria en binnenwateren op volle schaal te reproduceren. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de maatgevende golven echter tot circa anderhalf maal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een geometrische schaal van 1:2. Bij deze schaling komt de maximale significante golfhoogte die in de Deltagoot kan worden geproduceerd ( $H_s \approx 2,0$  m) overeen met een significante golfhoogte op ware grootte van  $H_s \approx 4,0$  m.

### 2.2 Schaling en ontwerp toplaag en filter

Om de toplaag en het filter in het model zo natuurgetrouw mogelijk te maken is een degelijke beschouwing van de schaling noodzakelijk. Deze beschouwing is in de onderstaande paragrafen weergegeven. Op basis daarvan wordt vervolgens de toplaag en de filterlaag ontworpen.

#### 2.2.1 Waterbeweging: Froude schaling

Over het algemeen wordt voor het schalen van waterbouwkundige constructies de zogenaamde Froude schaling toegepast. Deze schaling geldt voor processen waarin traagheid en zwaartekracht een dominante rol spelen. Dit is tevens het geval in dit model. De schaling schrijft voor dat het Froude getal hetzelfde is in het model en in de werkelijkheid. Het Froude getal wordt als volgt berekend:

$$Fr^2 = \frac{u^2}{gL} \quad (2.1)$$

Met:

$u$	=	snelheid	(m/s)
$g$	=	versnelling als gevolg van de zwaartekracht	(m/s <sup>2</sup> )
$L$	=	lengte	(m)

In deze paragraaf wordt de schaling verder uitgewerkt voor het geval dat de lengteschaal ( $n_L$ )

=  $L_{\text{prototype}} / L_{\text{model}}$ ) in dit model gelijk is aan 2. Uit de bovenstaande schaalregel zijn dan de volgende verbanden te leggen:

- Tijdschaal :  $n_t = \sqrt{n_L}$  in dit geval dus  $\sqrt{2} \approx 1,41$
- Golfhoogte :  $n_H = n_L$  in dit geval dus 2

De Froude schaling is gebruikt om de hydraulische randvoorwaarden te bepalen.

## 2.2.2 Stroming in het filter: het Reynolds getal

Behalve de waterbeweging op het talud, waarvoor het Froude getal wordt gebruikt, is ook de stroming in het filter van belang voor de stabiliteit. Daarvoor dient het Reynolds getal in prototype en model hetzelfde te zijn. Het Reynolds getal wordt als volgt gedefinieerd:

$$Re = \frac{Lu}{\nu} \quad (2.2)$$

Met

$Re$	=	Reynolds getal	(-)
$L$	=	lengte	(m)
$u$	=	snelheid of doorlatendheid	(m/s)
$\nu$	=	kinematische viscositeit (circa $1,2 \cdot 10^{-6}$ )	( $m^2/s$ )

Het gelijktijdig voldoen aan de Reynoldsschaal en de Froudeschaal is in een kleinschalig model niet mogelijk. Daarom dient het onderzoek op een zo groot mogelijke schaal te worden uitgevoerd. Tot  $n_L = 3$  (Bezuijen, Burger en Klein Breteler, 1990) is de invloed van schaaffecten verwaarloosbaar. Het huidige onderzoek voldoet hier dus ruimschoots aan.

## 2.2.3 Dikte van de toplaag en belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ .

De dikte van de toplaag is geschat op basis van eerder grootschalig fysisch modelonderzoek met een taludbekleding bestaande uit Hillblocks (Van Steeg, 2012). De Hillblocks (zowel Basisblocks als Slimblocks) in dat onderzoek waren 20 cm hoog en hadden een dichtheid van  $2372 \text{ kg/m}^3$ . Ook toen is het onderzoek uitgevoerd op schaal 1:2. Tijdens dat experiment zijn twee series korteduurproeven met oplopende golfhoogte (tot  $H_s = 1,49 \text{ m}$ ) en een serie langeduurproeven ( $H_s = 1,42 \text{ m}$ ) uitgevoerd. Tijdens de genoemde proeven is geen schade en geen begin van schade vastgesteld. Op basis van dit resultaat en het feit dat de maximaal mogelijke golfhoogte in het nieuwe onderzoek groter is, is de dikte van de steenzetting met de Hillblocks 2.0 bepaald.

De dikte van het Grassblock en het Drainageblock is bepaald op basis van expert judgement.

De dikte van een steenzetting is gedefinieerd als de afstand tussen het bovenzvlak en het ondervlak van de steenzetting.

De keuze van de dikte van de toplaag heeft een directe invloed op de belastingparameter, welke bij golfbelasting is gedefinieerd als  $H_s/(\Delta D)$ . De belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  kan worden gezien als de verhouding tussen de belasting (de golfhoogte  $H_s$ ) en de sterkte (relatieve soortelijke massa  $\Delta$  en toplaagdikte  $D$ ). In de belastingparameter wordt gebruik gemaakt van de volgende symbolen:

$H_s$	=	significante golfhoogte	(m)
-------	---	-------------------------	-----

$\Delta$	=	relatieve soortelijke massa van blokken ten opzichte van het water ( $\rho_{\text{zetsteen}} - \rho_{\text{water}}) / \rho_{\text{water}}$	(-)
$D$	=	dikte van de toplaag van de zetsteen gedefinieerd als de afstand tussen de bovenzijde en de onderzijde	(m)
$\rho$	=	soortelijke massa van het beton	(kg/m <sup>3</sup> )

De belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  in prototype dient gelijk te zijn aan de belastingparameter in het model.

De schaling van 1:2 is voor alle beoogde lengte-eenheden van het Hillblock 2.0, Drainageblock en Grassblock op de werkelijke grootte toegepast.

#### 2.2.4 Detaillering van het filter

Voor de schaling van het filter (uitvullaag) dient gekeken te worden naar de leklengte:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \quad (2.3)$$

Met:

$\Lambda$	=	leklengte	(m)
$b$	=	dikte van de filterlaag (uitvullaag)	(m)
$k$	=	gelineariseerde doorlatendheid van de filterlaag	(m/s)
$D$	=	effectieve dikte van de toplaag	(m)
$k'$	=	gelineariseerde doorlatendheid van de toplaag	(m/s)

De leklengte heeft de dimensie 'm' en schaalt met de lengteschaal:  $n_\Lambda = n_L = 2$ . Met het rekenmodel STEENTOETS (Klein Breteler, 2014) is de leklengte voor Hillblocks 2.0 op ware grootte en in het model berekend. Uit de berekeningen is gebleken dat een filter met een korrelgrootte  $D_{f15} = 11,5$  mm en een laagdikte  $b = 7$  cm goed overeenkomt op schaal 1:2 met gebruikelijke steenzettingen in de werkelijkheid. Omdat in de werkelijkheid diverse soorten filtermateriaal met diverse diktes worden toegepast, hadden in het schaalmodel binnen bepaalde grenzen ook andere waarden gebruikt kunnen worden. De verschillende waarden van  $\Lambda$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $D$  en  $k'$  zijn weergegeven in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Waarden van de verschillende parameters in het model en in werkelijkheid (golflapzone, Hillblock 2.0)

Parameter	symbool	model	werkelijkheid
Laagdikte filter	$b$ (m)	0,07	0,135
Representatieve filterdiameter	$D_{f15}$ (mm)	11,5	24
Doorlatendheid van de filterlaag	$k$ (mm/s)	154	228
Effectieve dikte van de toplaag	$D$ (m)	0,18	0,36
Doorlatendheid van de toplaag	$k'$ (mm/s)	37	53
Representatieve diameter inwasmateriaal	$D_{115}$ (mm)	4	8
Leklengte	$\Lambda$ (m)	0,23	0,46

Tabel 2.2 Waarden van de verschillende parameters in het model en in werkelijkheid (golfoploopzone, Drainageblocks)

Parameter	symbool	model	werkelijkheid
Laagdikte filter	$b$ (m)	0,07	0,13
Representatieve filterdiameter	$D_{f15}$ (mm)	11,5	23
Doorlatendheid van de filterlaag	$k$ (mm/s)	154	228
Effectieve dikte van de toplaag	$D$ (m)	0,12	0,24
Doorlatendheid van de toplaag	$k'$ (mm/s)	35	49
Representatieve diameter inwasmateriaal	$D_{i15}$ (mm)	3,5	7
Leklengte	$\Lambda$ (m)	0,19	0,38

Bij de Grassblocks is geen filter toegepast.

## 2.3 Beschrijving testsecties

### 2.3.1 Algemeen

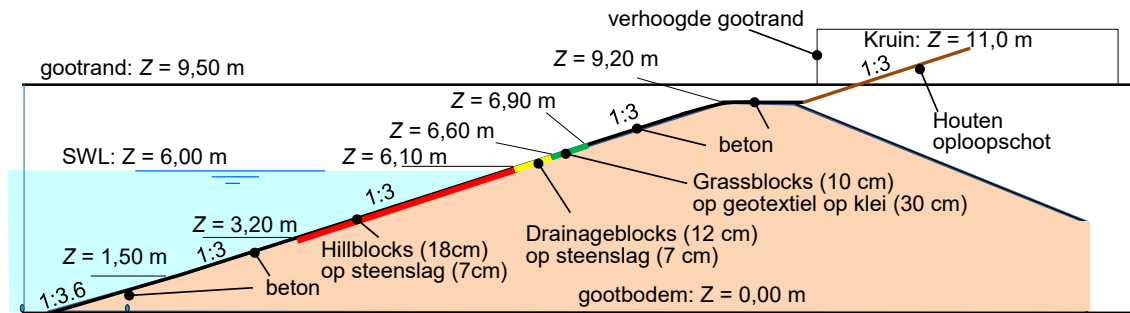
In de Deltagoot is een dijk opgebouwd met een drietal testsecties te weten:

- Testsectie 1: Hillblock 2.0 (type Basis en type Slim)
- Testsectie 2: Drainageblock
- Testsectie 3: Grassblock

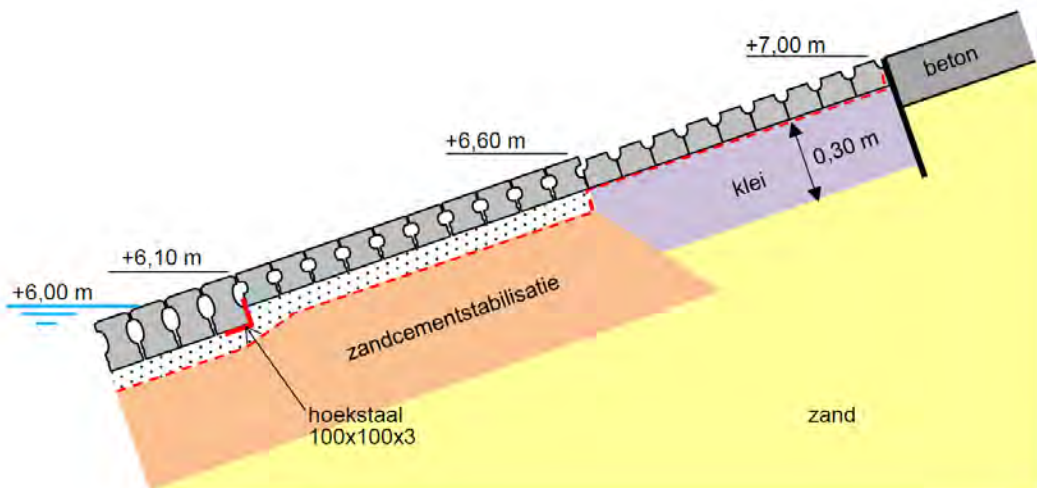
Gedurende het proevenprogramma (na Test P004) zijn de Drainageblocks en Grassblocks verwijderd. De Drainageblocks zijn toen vervangen door Hillblocks 2.0 en de Grassblocks zijn vervangen door een glad betonnen talud.

De opzet van het onderzoek was primair gericht op het vaststellen van de stabiliteitsfactor voor de Hillblocks 2.0. De Drainageblocks en Grassblocks waren aan de testopstelling toegevoegd om een ondergrens van de stabiliteit te bepalen. Zodra aan één van de bekledingen schade zou ontstaan, zouden de andere typen niet verder beproefd kunnen worden met hogere golven. Doordat tijdens Test P04 de Grassblocks waren bezweken, met veel vervolgschade aan de Drainageblocks, zijn deze twee typen bekledingen uit de opstelling verwijderd. Daardoor kon de bezwijkgolffoogte van de Drainageblocks niet bepaald worden.

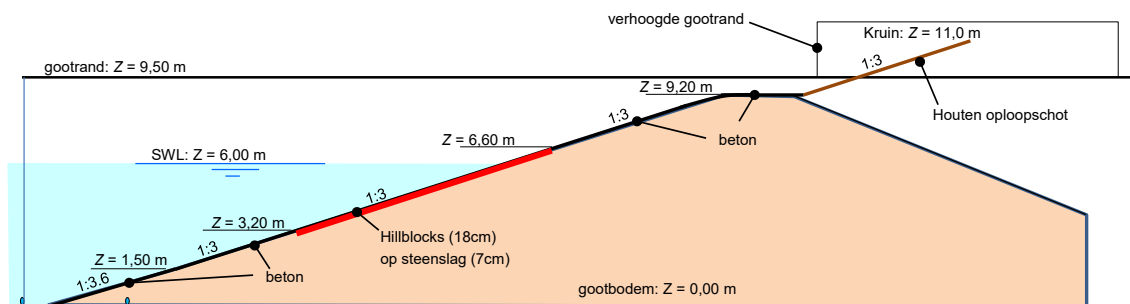
De drie testsecties zijn op het buitentalud geplaatst. De Hillblocks 2.0 en de Drainageblocks zijn op een laagje steenslag geplaatst zoals dat ook op een werkelijke dijk gebouwd zou worden. De Grassblocks zijn op een geotextiel op een kleilaag geplaatst zoals dit ook is beoogd voor een werkelijke situatie. De afmetingen van de dijk en de dijkbekleding zijn aangepast; de geometrische schaal van de modelopstelling is 1:2 (zie ook Paragraaf 2.2). Alle vermelde waarden in dit rapport zijn de waarden zoals deze in het model zijn aangebracht. De taludhelling is gelijk aan de taludhelling in werkelijkheid en is 1:3 ( $\cot\alpha = 3$ ). Opgemerkt wordt dat de proefresultaten ook toegepast kunnen worden voor dijken met een andere taludhelling. Een schematische doorsnede van de modelopstelling is weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Schematische doorsnede van de modelopstelling (Test P01-P04)



Figuur 2.2 Detaillering golfoploopzone (Test P001 - P004)



Figuur 2.3 Schematische doorsnede van de modelopstelling (Test P04a-P12)

De opstelling wordt verder beschreven per testsectie.

### 2.3.2 Testsectie met Hillblock 2.0

De Hillblocks 2.0 zijn initieel op het talud aangelegd van  $Z = 3,2$  m tot  $Z = 6,1$  m boven de gootbodem. Na Test P04 is de opstelling zodanig verbouwd dat de Hillblocks 2.0 zijn geplaatst van  $Z = 3,2$  m tot  $Z = 6,6$  m.

De kleilaag onder de Hillblock 2.0 is gesimuleerd met een laag zand-cement stabilisatie.

Bovenop de stabilisatielaag is een geotextiel (zie Figuur B.12 voor specificaties) toegepast.

Op het geotextiel is een filter (Noors graniet) toegepast met een dikte van 7 cm, een  $D_{f15}$  van 11,5 mm en een  $D_{f90}$  van 31 mm. Een zeefkromme van het filter is weergegeven in Figuur B.5.

Op het filter zijn de Hillblocks 2.0 geplaatst. Hierbij is het talud in twee secties opgesplitst. Aan de zuidzijde van het talud (meetcabinezijde) zijn Hillblocks 2.0 van het type Basisblock aangebracht. De gemiddelde dikte van de Hillblocks 2.0 van het type Basis was gelijk aan  $D = 17,8$  cm. Aan de noordzijde van het talud (halzijde) zijn Hillblocks 2.0 van het type Slimblock toegepast. De gemiddelde dikte van de Hillblocks van het type Slim was gelijk aan  $D = 17,9$  m. De Hillblocks 2.0 zijn in de Deltagoot geplaatst door personeel van Deltares en zijn per rij geplaatst. De 'naad' tussen twee aansluitende Hillblocks is verticaal gekozen. De ligging van de Hillblocks 2.0 is verduidelijkt door het markeren van verschillende rijen. Dit vergemakkelijkt het identificeren en benoemen van rijen waar eventuele bijzonderheden optreden. Technische tekeningen van de gebruikte Hillblocks 2.0 zijn weergegeven in Figuur B.1 (Basisblocks) en Figuur B.2 (Slimblocks). De Hillblocks 2.0 hadden een wrijvingscoëfficiënt van 0,55 a 0,60 (zie ook Tabel C.2 en Tabel C.3), wat vergelijkbaar is met het beton in steenzettingen op dijken.

Inklemming van het Hillblock 2.0 is alleen mogelijk aan de kop of aan het voetstuk. Het voetstuk is om deze reden ingewassen met inwasmateriaal (hoekig). Het inwasmateriaal is initieel aangebracht ter hoogte van de voet van de Hillblocks 2.0 en circa 1/3 van de hoogte van de hals. De zeefkromme van het gebruikte inwasmateriaal is weergegeven in Figuur B.6. Het inwasmateriaal bestond uit Noors graniet en had een  $D_{15}$  van 4 mm en een  $D_{90}$  van 14 mm. Na het initiële inwassen is het talud met Hillblocks aangetrild met een trilplaat.

De testsectie met Hillblocks 2.0 heeft de specificaties zoals weergegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Samenvatting testsectie met Hillblocks (modelwaarden)

		details
positie Hillblocks 2.0	Z = 3,2 m – 6,1 m (P01-P04)	Foto A.2, Foto A.5
	Z = 3,2 m – 6,6 m (P04a-P012)	Foto A.10, Foto A.11
taludhelling	1:3	
opbouw	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabilisatielaag</li> <li>• geotextiel</li> <li>• filter</li> <li>• Hillblock met inwasmateriaal (Type Slim en type Basis)</li> </ul>	Figuur B.12 Foto A.2
filterlaag	Noors graniet Dikte 7 cm $D_{f15} = 11,5$ mm, $D_{f50} = 20$ mm $D_{f90} = 31$ mm	Figuur B.5: Zeefkromme
Hillblock 2.0 type Basis	$D = 0,178$ m $\rho = 2307$ kg / m <sup>3</sup> $f_w = 0,59$	Figuur B.1: Technische tekening Tabel C.2: wrijvingscoëfficiënt
Hillblock 2.0 type Slim	$D = 0,179$ m $\rho = 2295$ kg / m <sup>3</sup> $f_w = 0,55$	Figuur B.2 Tabel C.3: Wrijvingscoëfficiënt
inwasmateriaal	Noors graniet $D_{15} = 4$ mm $D_{90} = 14$ mm	Figuur B.6: Zeefkromme



### 2.3.3 Testsectie met Drainageblock

De Drainageblocks zijn initieel aangelegd van  $Z = 6,1$  m tot  $Z = 6,6$  m boven de gootbodern. Na Test P04 zijn de Drainageblocks uit het model verwijderd.

De kleilaag onder de Drainageblocks is gesimuleerd met een laag zand-cement stabilisatie.

Bovenop de stabilisatielaag is een geotextiel (zie Figuur B.12 voor specificaties) toegepast.

Op het geotextiel is een filter (Noors graniet) toegepast met een dikte van 7 cm, een  $D_{f15}$  van 11,5 mm en een  $D_{f90}$  van 31 mm. Een zeefkromme van het filter is weergegeven in Figuur B.5.

Op het filter zijn de Drainageblocks met een dikte van 11,8 cm geplaatst. De Drainageblocks zijn in de Deltagoot geplaatst door personeel van Deltares en zijn per rij geplaatst. De 'naad' tussen twee aansluitende Drainageblocks is verticaal gekozen. Technische tekeningen van de gebruikte Drainageblocks zijn weergegeven in Figuur B.3. De Drainageblocks hadden een wrijvingscoëfficiënt van 0,53 (zie ook Tabel C.4).

Inklemming van het Drainageblock is alleen mogelijk aan de kop of aan het voetstuk. Het voetstuk is om deze reden ingewassen met inwasmateriaal (hoekig). Het inwasmateriaal is initieel aangebracht ter hoogte van de voet van de Drainageblocks. De zeefkromme van het gebruikte inwasmateriaal is weergegeven in Figuur B.7. Het inwasmateriaal bestond uit Noors graniet en had een  $D_{15}$  van 3 mm en een  $D_{90}$  van 8 mm. Na het initiële inwassen is het talud met Drainageblocks aangetrild met een trilplaat.

De testsectie met de Drainageblocks heeft de specificaties zoals weergegeven in Tabel 2.5.

Tabel 2.4 Samenvatting testsectie met Drainageblock

		details
positie Drainageblocks	$Z = 6,1$ m – $6,6$ m (P01-P04)	Foto A.3, Foto A.5
taludhelling	1:3	
opbouw	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabilisatielaag</li> <li>• geotextiel</li> <li>• filter</li> <li>• Drainageblock met inwasmateriaal</li> </ul>	Figuur B.12 Foto A.3
filterlaag	Noors graniet Dikte 7 cm $D_{f15} = 11,5$ mm, $D_{f50} = 20$ mm $D_{f90} = 31$ mm	Figuur B.5: Zeefkromme
Drainageblock	$D = 0,118$ m $\rho = 2297$ kg / m <sup>3</sup> $f = 0,53$	Figuur B.3: Technische tekening Tabel C.4: wrijvingscoëfficiënt
inwasmateriaal	Noors graniet $D_{15} = 3,5$ mm $D_{90} = 8$ mm	Figuur B.7: Zeefkromme

### 2.3.4 Testsectie met Grassblock

De Grassblocks zijn initieel aangelegd van  $Z = 6,6$  m tot  $Z = 7,0$  m boven de gootbodern. Na Test P04 zijn de Grassblocks uit het model verwijderd.

De kleilaag onder de Grassblocks is gesimuleerd met stevige kleilaag met een dikte van 40 cm.

Bovenop de kleilaag is een geotextiel (zie Figuur B.12 voor specificaties) toegepast.

Op het geotextiel zijn de Grassblocks met een gemiddelde hoogte van 9,6 cm geplaatst. De Grassblocks zijn in de Deltagoot geplaatst door personeel van Deltares en zijn per rij geplaatst. Technische tekeningen van de gebruikte Grassblocks zijn weergegeven in Figuur B.4.

De Grassblocks zijn ingewassen met hoekig inwasmateriaal. De zeefkromme van het gebruikte inwasmateriaal is weergegeven in Figuur B.6. Het inwasmateriaal bestond uit Noors graniet en had een  $D_{15}$  van 4 mm en een  $D_{90}$  van 14 mm.

De testsectie met de Grassblocks heeft de specificaties zoals weergegeven in Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Samenvatting testsectie met Grassblock

		details
positie Grassblocks	Z = 6,6 m – 7,0 m (P01-P04)	Foto A.3, Foto A.5
taludhelling	1:3	
opbouw	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stevige klei</li> <li>• geotextiel</li> <li>• Grassblock met inwas materiaal</li> </ul>	Figuur B.12 Foto A.3
Grassblock	$D = 0,096$ m $\rho = 2281$ kg / m <sup>3</sup>	Figuur B.4: Technische tekening
inwasmateriaal	Noors graniet $D_{15} = 4$ mm $D_{90} = 14$ mm	Figuur B.6: Zeefkromme

## 2.3.5 Afwerking van de modelranden

### Horizontale overgangen

De onderste rij Hillblocks 2.0 (Z = 3,2 m) zijn 'koud' tegen de onderliggende houten plaat geplaatst welke het lager gelegen betonnen talud opsluit. De bovenste rij Hillblocks 2.0 sluit aan op de onderste rij Drainageblocks (Z = 6,1 m) door middel van een hoekstaal zoals schematisch is weergegeven in Figuur 2.2. De Hillblocks 2.0 en de Drainageblocks zijn aan dit hoekstaal vastgelijmd. De bovenste rij Drainageblocks (Z = 6,6 m) sluit 'koud' aan tegen de onderste rij Grassblocks. De bovenste rij Grassblocks (Z = 7,0 m) is ingegoten met beton.

Tabel 2.6 Overzicht horizontale overgangen

Positie	Van	Naar	Detailering
Z = 3,2 m	Betonnen dummy talud	Hillblock 2.0	Hillblocks 2.0 'koud' tegen houten schot geplaatst
Z = 6,1 m	Hillblock 2.0	Drainageblock	Vastgelijmd aan hoekstaal (zie ook Figuur 2.2)
Z = 6,6 m	Drainageblock	Grassblock	'Koud' tegen elkaar aan geplaatst
Z = 7,0 m	Grassblock	Betonnen dummy talud	Ingegoten met beton

### Verticale overgangen

Tussen de gootwand en de zetstenen is een strook celrubber aangebracht zoals dat gebruikelijk is bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klem wigt tussen de starre gootwand waardoor een overschatting van de stabiliteit zou worden verkregen. Tevens zijn langs de gootwanden hoekstalen aangebracht die ervoor zorgen dat er geen schade optreedt langs de wanden als gevolg van de overgang van de zetstenen naar het rubber en van het rubber naar de gootwand.

Bij de overgang tussen de Slimblocks en de Basisblocks zijn geen additionele maatregelen getroffen. Deze Hillblocks 2.0 zijn tegen elkaar aan geplaatst.

### 2.3.6 Overige taluddelen

Alle taluddelen welke niet zijn beschreven in Paragraaf 2.3.2, Paragraaf 2.3.3 en Paragraaf 2.3.4 zijn zogenaamde 'dummy' taluddelen en bestaan uit glad beton of uit hout. Deze taluddelen zijn samengevat in Tabel 2.7 en Tabel 2.8.

Tabel 2.7 Overzicht overige taluddelen (Test P01-P04)

	taludhelling	Materiaal
Z = 0,0 m – 1,5 m	1:3,6	Glad beton
Z = 1,5 m – 3,2 m	1:3	Glad beton
Z = 3,2 m – 7,0 m	1:3	Testsectie
Z = 7,0 m – 9,2 m	1:3	Glad beton
Z = 9,2 m	Horizontaal (1,5 m)	Glad beton
Z = 9,2 m – 9,3 m	1:25	Glad hout
Z = 9,3m - 11,0 m	1:3	Glad hout

Tabel 2.8 Overzicht overige taluddelen (Test P04a – P12)

	taludhelling	Materiaal
Z = 0,0 m – 1,5 m	1:3,6	Glad beton
Z = 1,5 m – 3,2 m	1:3	Glad beton
Z = 3,2 m – 6,6 m	1:3	Testsectie
Z = 7,0 m – 9,2 m	1:3	Glad beton
Z = 9,2 m	Horizontaal (1,5 m)	Glad beton
Z = 9,2 m – 9,3 m	1:25	Glad hout
Z = 9,3 m – 11,0 m	1:3	Glad hout

## 2.4 Uitgevoerde metingen

Gedurende het project zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Golfhoogtemetingen
- Profielmetingen
- Uitspoeling inwasmateriaal

Bovengenoemde metingen worden in onderstaande paragrafen toegelicht.

### 2.4.1 Golfhoogtemetingen

De golven zijn gemeten met drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit twee parallel aan elkaar, verticaal gespannen draden, waarvan de onderlinge weerstand verandert met de oppervlakte-uitwijking van de waterspiegel. De golfhoogtemeters hingen op respectievelijk 108,5 m, 114,5 m en 117,5 m van het golfschot. Door het toepassen

van drie golfhoogtemeters op bepaalde afstanden van elkaar kunnen de inkomende en de door de constructie gereflecteerde golven worden bepaald met de methode van Mansard en Funke (1980). Dit gebeurt met het standaard Deltares software pakket voor golfanalyse: AUKE-PC. Deze uitwerking geeft vervolgens aan welke golfcondities tijdens de proef zijn bereikt.

De overschrijdingskrommen van de inkomende golven zijn bepaald door de gemiddelde waarden van de totale overschrijdingskromme per golfhoogtemeter te nemen en deze te corrigeren met de gemeten reflectiecoëfficiënt  $C_r$ :

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1+C_r^2}} \quad (2.4)$$

Waarbij

$H_i$	=	inkomende golfhoogte (m)
$H_t$	=	totale golfhoogte (m)
$C_r$	=	reflectiecoëfficiënt (-)

#### 2.4.2 Profielmetingen

Het niveau van het taludoppervlak is gemeten met een 3D laserscanner. Met behulp van de 3D laserscanner wordt een compleet 3D beeld van het talud gemaakt. De resulterende figuur is een verzameling van miljoenen ingemeten punten welke een digitale reproductie van het werkelijke taludoppervlak vormen. De scanner projecteert een laserstraal vanuit een draaiende spiegel richting het in te meten oppervlakte. De laserstraal wordt, door het object wat wordt gescand, gereflecteerd naar de scanner. De afstand tot dit object en de relatieve verticale en horizontale hoeken kunnen vervolgens worden berekend. Deze data wordt vastgelegd ten behoeve van het genereren van een 3D profiel.

#### 2.4.3 Uitspoeling inwasmateriaal

De uitspoeling en ophoping van het inwasmateriaal is na iedere test visueel beoordeeld. Deze beoordeling is als volgt uitgevoerd: het talud is in verschillende denkbeeldige rechthoekige vlakken opgedeeld. Ieder vlak had een breedte van 1,25 m en een lengte (evenwijdig aan het talud) van 1,2 m (Test P04b - Test P12) of een lengte van 0,6 m (Test P01 – P04). Per ingemeten niveau zijn dus vier waarnemingen uitgevoerd; twee waarnemingen voor Hillblocks 2.0 van het type Basis en twee waarnemingen voor Hillblocks 2.0 van het type Slim. Vervolgens is ieder vlak, op basis van de visuele waarneming, ingedeeld in 1 van de volgende categorieën:

- Categorie 1: Voet volledig uitgespoeld (filter zichtbaar)
- Categorie 2: Voet deels uitgespoeld
- Categorie 3: Hals volledig uitgespoeld, voet volledig gevuld
- Categorie 4: Hals circa 1/3 gevuld
- Categorie 5: Hals circa 2/3 gevuld
- Categorie 6: Hals volledig gevuld

Het gemiddelde van de twee waarnemingen per hoogtemaat per type Hillblock 2.0 is weergegeven in Figuur B.8 tot en met Figuur B.11.

## 2.5 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestaat uit drie testseries welke als volgt zijn samengevat:

- Test Serie 1: korteduurproef,  $s_{op} = 0,02$
- Test Serie 2: korteduurproef,  $s_{op} = 0,04$
- Test Serie 3: langeduurproef,  $s_{op} = 0,04$

### 2.5.1 Korteduurproeven (Test Serie 1 en Test Serie 2)

Test Serie 1 en Test Serie 2 (de zogenaamde korteduurproeven) zijn uitgevoerd om de stabiliteit te bepalen van Hillblock 2.0, Grassblocks en Drainageblocks. Test Serie 1 is uitgevoerd met een golfsteilheid van  $s_{op} = 0,02$ , Test Serie 2 is uitgevoerd met een golfsteilheid van  $s_{op} = 0,04$ . Beide test series zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. De individuele testen duurden circa 1000 golven. Na Test P01, P02 en P03 is het uitgespoelde inwasmateriaal opnieuw aangebracht zodat de afzonderlijke proeven als onafhankelijk van elkaar kunnen worden beschouwd. De hoeveelheid aangebracht inwasmateriaal bij de Hillblocks 2.0 en de Drainageblocks na de genoemde testen was minimaal. Bij de Grassblocks was een aanzienlijke hoeveelheid inwasmateriaal na iedere test opnieuw aangebracht. Na Test P04 was er na de individuele testen geen nieuw inwasmateriaal meer aangebracht.

Tijdens Test Serie 1 en Test Serie 2 is een waterstand aangehouden van 6,00 m boven de bodem van de goot. De enige uitzondering hierop was Test P04, P04a en P04b waar de waterstand 5,8 m bedroeg. Hiervoor was gekozen gezien de schade welke bij Test P03 aan het Grassblock ontstond.

Vervormingen van het taludoppervlak zijn niet hersteld. Na Test P03 is de schade aan de Grassblocks hersteld. Na Test P04 zijn de Grassblocks vervangen door beton en zijn de Drainageblocks vervangen door Hillblock 2.0.

Een samenvatting van het proevenprogramma van Test Serie 1 en Test Serie 2 is weergegeven in respectievelijk Tabel 2.9 en Tabel 2.10. Een compleet overzicht is weergegeven in Tabel C.1.

Tabel 2.9 Samenvatting Test Series 1 (gemeten waarden)

	$h$ (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	$s_{op}$ (-)	$N$ (-)	Opmerking
P01	6,00	0,87	5,35	0,020	425	
P02	6,00	1,18	5,89	0,022	976	
P03	6,00	1,36	6,61	0,020	1012	Schade aan Grassblock
P04 <sub>cum</sub>	5,80	1,55	6,99	0,020	862	Schade aan Grassblock
P05	6,00	1,72	7,49	0,020	1033	
P06 <sub>cum</sub>	6,00	1,93	7,93	0,020	1005	

Tabel 2.10 Samenvatting Test Series 2 (gemeten waarden)

	$h$ (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	$s_{op}$ (-)	$N$ (-)
P07	6,00	1,32	4,72	0,038	1092
P08	6,00	1,48	4,96	0,039	1089
P09	6,00	1,75	5,28	0,040	1077
P10	6,00	1,92	5,56	0,040	981

## 2.5.2 Langeduurproeven (Test Serie 3)

Test Serie 3 (de zogenaamde langeduurproeven) is uitgevoerd om inzicht te krijgen in de langeduursterkte van de bekleding. Deze testserie is in verschillende delen uitgevoerd zodat tussentijds het talud kon worden geïnspecteerd. Test Serie 3 is uitgevoerd met een golfsteilheid van  $s_{op} = 0,04$  en met een Jonswap spectrum. Het berekenen van de golfcondities van de samengestelde proefdelen is gedaan op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven).

Voorafgaande aan de testen en na de testen is er geen inwasmateriaal opnieuw aangebracht. Tijdens Test Serie 3 is een waterstand aangehouden van 6,00 m boven de bodem van de goot.

Vervormingen van het taludoppervlak zijn gedurende Test Serie 3 niet hersteld.

Een samenvatting van het proevenprogramma van Test Serie 3 is weergegeven in Tabel 2.11. Een compleet overzicht is weergegeven in Tabel C.1.

Tabel 2.11 Samenvatting Test Series 3 (gemeten waarden)

	<b><i>h</i></b> <b>(m)</b>	<b><i>H</i><sub>m0</sub></b> <b>(m)</b>	<b><i>T</i><sub>p</sub></b> <b>(s)</b>	<b><i>s</i><sub>op</sub></b> <b>(-)</b>	<b><i>N</i></b> <b>(-)</b>
P11	6,00	1,87	5,74	0,036	96
P11a	6,00	1,88	5,61	0,038	1600
P11b	6,00	1,89	5,61	0,038	1529
P12	6,00	1,98	5,61	0,040	1789

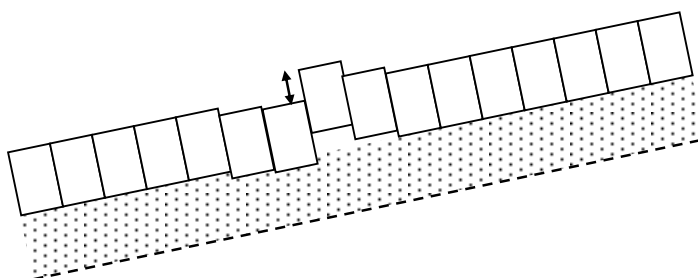
### 3 Proefresultaten en beschrijving van testen

#### 3.1 Indeling in schadecategorieën

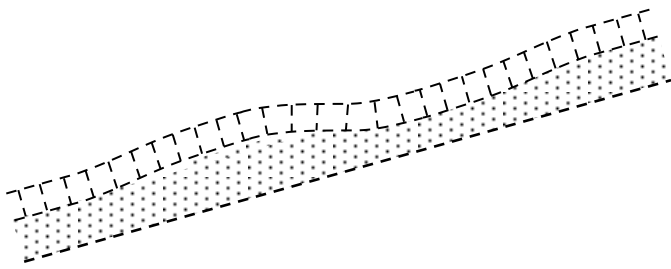
In de volgende paragrafen worden de proefresultaten besproken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de volgende schade-categorieën.

- a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag ( $0,1 \cdot D$ , met  $D$  = toplaagdikte) (zie Figuur 3.1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 3.2) is kleiner dan 20% van de toplaagdikte. In de praktijk is dan doorgaans nog geen waarneembare schade aanwezig.
- b) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is tussen 10% en 20% van de dikte van de toplaag, of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is 20% à 30% van de toplaagdikte.
- c) Aan één van de volgende voorwaarden is voldaan:
  - de verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is tussen 20% en 50% van de dikte van de toplaag, of
  - de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is 30% à 50% van de toplaagdikte, of
  - er is zoveel filtermateriaal gemigreerd dat de toplaag over een lengte langs het talud van  $8 \cdot D$  tot  $15 \cdot D$  (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of
  - er is een zetsteen gebroken (mits de betonkwaliteit goed op schaal is).
- d) Aan één van de volgende voorwaarden is voldaan:
  - de verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is meer dan 50% van de dikte van de toplaag, of
  - de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is meer dan 50% van de toplaagdikte, of
  - er is zoveel filtermateriaal gemigreerd dat de toplaag over een lengte langs het talud van ten minste  $15D$  (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of
  - er zijn meerdere zetstenen gebroken (mits de betonkwaliteit goed op schaal is).
 Meestal zijn dan één of meer zetstenen geheel en al uit de steenzetting verdwenen.

De steenzetting heet bezweken te zijn als schade van de categorie c of d is opgetreden.



Figuur 3.1 Verplaatsing van zetsteen ten opzichte van naastliggende zetsteen



Figuur 3.2 Vervorming tot S-profiel

Vervorming tot S-profiel

### 3.2 Test Serie 1: korteduurproeven, $s_{op} = 0,02$

Test Serie 1 bestond uit een reeks korteduurproeven. Hierbij is de golfsteilheid steeds constant gehouden ( $s_{op} = 0,02$ ). De duur van iedere proef was circa 1000 golven. Test Serie 1 bestond uit zes proeven (P01 tot en met P06<sub>cum</sub>). Proef P04<sub>cum</sub> en P06<sub>cum</sub> zijn uitgevoerd in meerdere sub-testen. Tijdens Test Serie 1 zijn Hillblocks 2.0 van het type Basis, Hillblocks 2.0 van het type Slim, Grassblocks en Drainageblocks getest.

#### 3.2.1 Test P01 ( $H_{m0} = 0,87$ m)

Tijdens Test P01 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0, Grassblocks of Drainageblocks (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen en geen kattenrug waargenomen.

Het inwasmateriaal voorafgaande aan de proef was zodanig aangebracht dat de voet en 1/3 van de hoogte van de hals van de Hillblock 2.0 was gevuld. Na de test bleek het inwasmateriaal er nog goed bij te liggen. Het inwasmateriaal tussen de voeten van de Hillblocks was nog overal aanwezig en bij het grootste deel van het oppervlak was ook de hals nog deels ingewassen. Zie Figuur B.8 en Figuur B.9 voor de resultaten van de metingen met betrekking tot het inwasmateriaal.

De voet van de Grassblocks was tijdens de proef deels uitgespoeld. Het inwasmateriaal dat los op de Grassblocks lag was volledig weggespoeld.

Het inwasmateriaal van de Drainageblocks was lastig te beoordelen. Daar waar dit zichtbaar was leek de voet goed ingewassen te zijn. Tevens zaten er kleine steentjes klem tussen de koppen van de Drainageblocks.

Tijdens de testen was het duidelijk zichtbaar dat inwasmateriaal langs het talud omhoog en omlaag spoelde. Dit zichtbaar losse split is grotendeels afkomstig van het losliggende materiaal tussen de halzen van de Hillblocks en het losliggende materiaal op de Grassblocks.

Na de test zijn de Grassblocks en Drainageblocks opnieuw ingewassen. De Hillblocks zijn op een enkele locatie aangevuld totdat 1/3 van de hoogte van de hals was gevuld.





Foto 3.1 Links: Impressie Grassblocks na inwassen voorafgaande aan Test P01. Rechts: tijdens Test P01

### 3.2.2 Test P02 ( $H_{m0} = 1,18$ m)

Tijdens Test P02 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0, Grassblocks of Drainageblocks (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen en geen kattenrug waargenomen.

De status van het inwasmateriaal van de vier typen zetstenen was vergelijkbaar met de status van het inwasmateriaal na Test P01. Zie Figuur B.8 en Figuur B.9 voor de resultaten van de metingen met betrekking tot het inwasmateriaal bij de Hillblocks 2.0.

Na de test zijn de Grassblocks en Drainageblocks opnieuw ingewassen. De Hillblocks zijn op een enkele locatie aangevuld totdat 1/3 van de hoogte van de hals was gevuld.

### 3.2.3 Test P03 ( $H_{m0} = 1,36$ m)

Tijdens Test P03 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 en Drainageblocks (Schadecategorie a). Er zijn daar geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen en geen kattenrug waargenomen.

Eén Grassblock was, na 52 minuten golven, volledig uit het talud gelicht (Schadecategorie d). Deze schade heeft zich in de resterende 38 minuten van de proef niet verder uitgebreid. Een impressie van de schade is weergegeven in Foto 3.2.

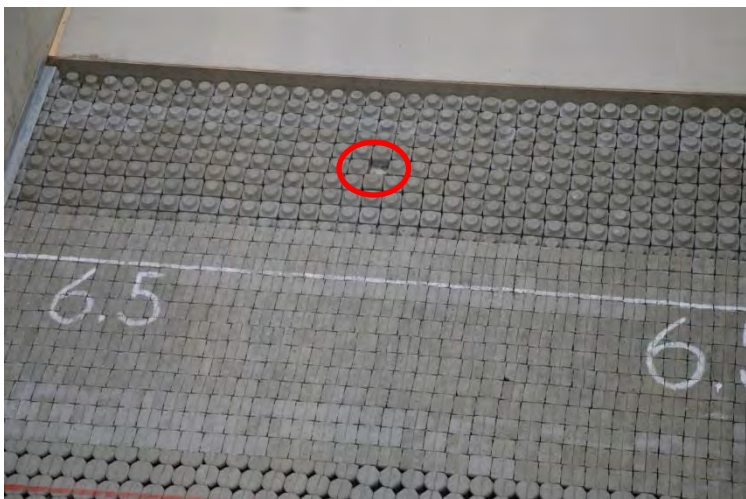


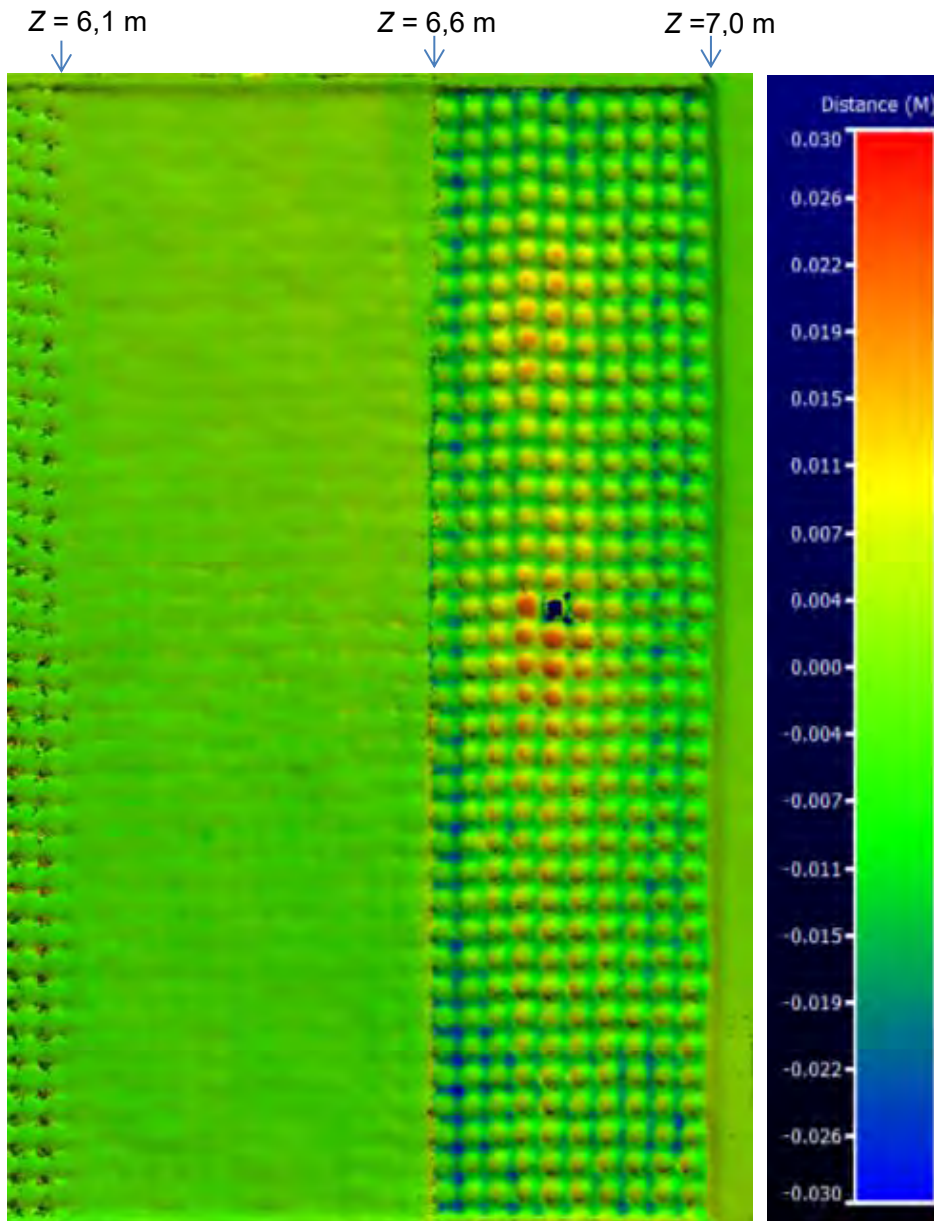
Foto 3.2 Impressie van schade aan Grassblocks na Test P03

Op basis van de laserscan meting blijkt dat er enige vervorming van het talud bestaande uit Grassblocks is ontstaan. Dit is weergegeven in Figuur 3.3.

De status van het inwasmateriaal van de vier typen zetstenen was vergelijkbaar met de status van het inwasmateriaal na Test P01 en na Test P02. Uitzondering hierop is het inwasmateriaal bij de Hillblocks dieper onder water ( $Z =$  circa 3,5 tot 5 m) waar meer inwasmateriaal aanwezig was (zie ook Figuur B.8 en Figuur B.9). Dit kan worden verklaard doordat inwasmateriaal, wat na Test P01 en Test P02 bij de Grassblocks opnieuw is aangebracht, tussen de Grassblocks vandaan is gespoeld en tussen de halzen van de lager gelegen Hillblocks is komen te zitten.

Na Test P03 is het beschadigde gedeelte van de Grassblocks hersteld door een aantal Grassblocks te verwijderen en opnieuw aan te brengen.

Na de test zijn de Grassblocks en Drainageblocks opnieuw ingewassen. De Hillblocks zijn op een enkele locatie aangevuld totdat 1/3 van de hoogte van de hals was gevuld.



Figuur 3.3 Verschilplot Drainageblocks en Grassblocks op basis van de meting met de laserscan (Voor Test P01 en na Test P03)

#### 3.2.4 Test P04<sub>cum</sub> ( $H_{m0} = 1,55$ m)

Test P04<sub>cum</sub> is twee keer onderbroken en bestaat daarom uit drie sub-testen (P04, P04a en P04b). Sub-test P04 is na dertien minuten afgebroken doordat de Grassblocks bezweken (Schadecategorie d). Als gevolg daarvan kwamen de Drainageblocks vrij te liggen en bezweken deze ook. Het schadeverloop is weergegeven in Foto 3.3. Allereerst werd één Grassblock uit het talud gelicht. Snel daarna bezweek binnen enkele golven het grootste deel van de Grassblocks en de Drainageblocks. De Drainageblocks bezweken als gevolg van het bezwijken van de Grassblocks.

Tijdens Sub-test P04 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen en geen kattenrug waargenomen.



Foto 3.3 Schadeverloop Grassblocks tijdens Sub-test P04 (links: enkele Grassblocks zijn uit het talud gelicht. Midden: een groot deel van de Grassblocks bezwijkt. De Drainageblocks komen vrij te liggen. Rechts: De Drainageblocks zijn bezweken doordat de Grassblocks zijn bezweken.



Foto 3.4 Links: na Sub-test P04. Rechts: voor Sub-test P04a (hersteld talud waarbij Grassblocks en Drainageblocks zijn verwijderd)

Na Sub-test P04 zijn de Grassblocks en de Drainageblocks uit het talud verwijderd. Op de oorspronkelijke locatie van de Drainageblocks zijn Hillblocks 2.0 aangebracht. Het inwasmateriaal tussen de nieuw aangelegde Hillblocks 2.0 was zodanig aangevuld dat de hals voor circa 1/3 van de hoogte was gevuld. Op de oorspronkelijke locatie van de Grassblocks is een betonnen dummysectie aangebracht (zie ook Paragraaf 2.3).

Doordat de Drainageblocks waren bezweken, was ook het filter onder de Drainageblocks volledig weggeslagen. Een deel van dit filter is terecht gekomen tussen de halzen van de

lagergelegen Hillblocks 2.0 van het type Basis. Een groot deel van de Hillblocks 2.0 van het type Basis bleek volledig te zijn gevuld met dit filtermateriaal (zie ook Figuur B.8).

Vervolgens is Test P04<sub>cum</sub> verder afgerond door het uitvoeren van de Sub-test P04a en Sub-test P04b.

Tijdens Test P04<sub>cum</sub> is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 (Schadecategorie a). Er zijn ook geen hoogteverschillen en geen kattenrug waargenomen. Na de test bleek dat de halzen van de Hillblock 2.0 voor circa 2/3 gevuld waren (zie ook Figuur B.8 en Figuur B.9). Daarom is vanaf deze proef het inwasmateriaal niet meer aangevuld.

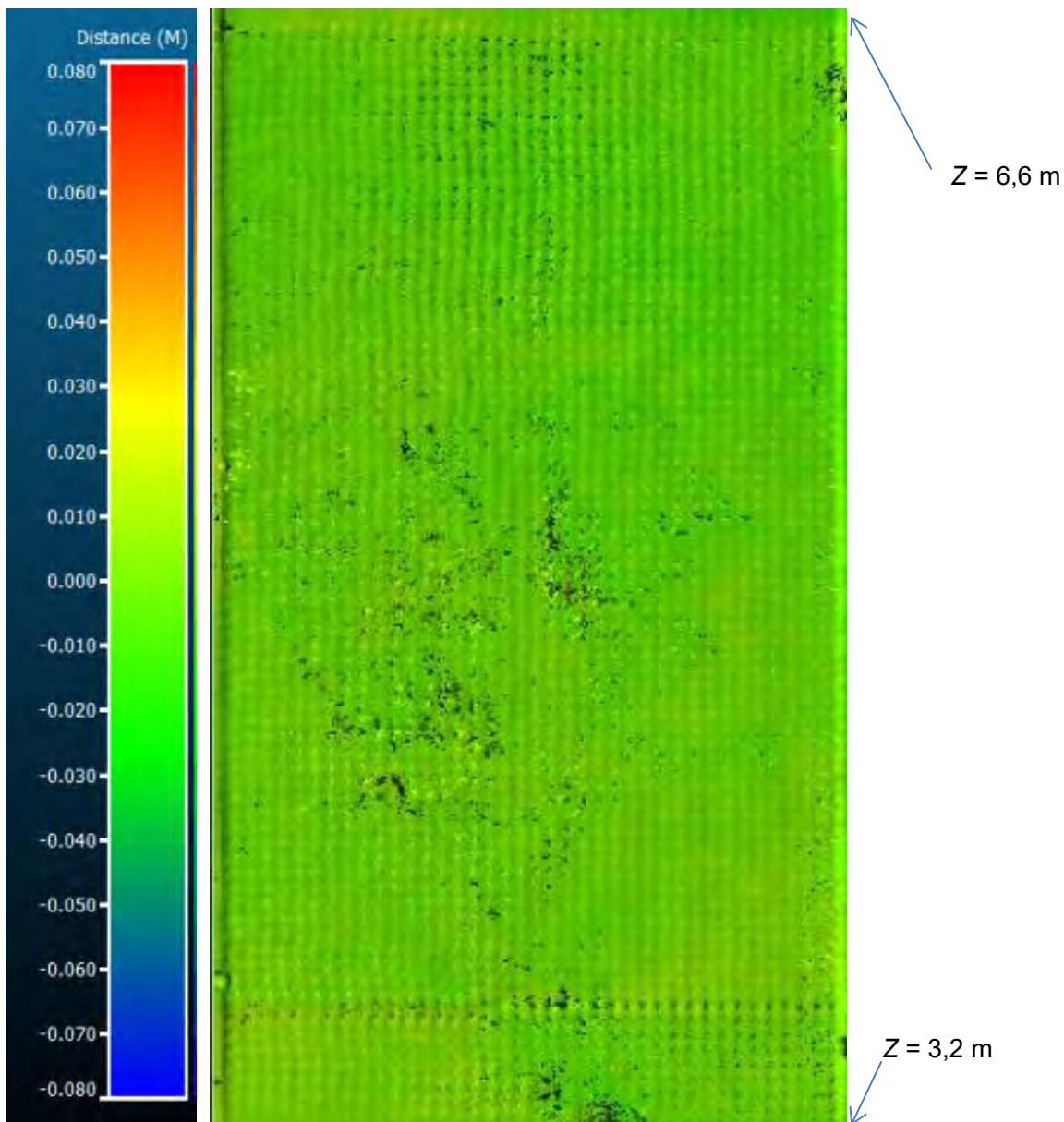
### 3.2.5 Test P05 ( $H_{m0} = 1,72$ m)

Tijdens Test P05 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen en geen kattenrug waargenomen. Het inwasmateriaal was vergelijkbaar met de status van het inwasmateriaal na Test P04<sub>cum</sub>.

### 3.2.6 Test P06<sub>cum</sub> ( $H_{m0} = 1,93$ m)

Test P06<sub>cum</sub> is, vanwege technische redenen met betrekking tot het golfschot, in vier delen uitgevoerd (P06, P06a, P06b en P06c). Tijdens Test P06<sub>cum</sub> is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen en geen kattenrug waargenomen. Het inwasmateriaal was vergelijkbaar met de status van het inwasmateriaal na Test P04<sub>cum</sub>. Uit de meting van de laserscans bleek dat het maximale hoogteverschil tussen de situatie voor Test P01 en na Test P06<sub>cum</sub> maximaal 1 cm bedroeg (zie ook Figuur 3.4).

Na Test P06<sub>cum</sub> was de voet van de Hillblock 2.0 goed ingewassen. Doorgaans was het inwasmateriaal aanwezig tot een hoogte van 1/3 a 2/3 van de hals van het Hillblock 2.0 (zie ook Figuur B.8 en Figuur B.9).



Figuur 3.4 Verschilplot op basis van de meting met de laserscan (Voor Test P01 en na Test P06). Er valt te zien dat er geen noemenswaardige vervorming is opgetreden tijdens Test Serie 1.

### 3.3 Test Serie 2: korteduurproeven, $s_{op} = 0,04$

Test Serie 2 bestond uit een reeks korteduurproeven. Hierbij is de golfsteilheid steeds constant gehouden ( $s_{op} = 0,04$ ). De duur van iedere proef was circa 1000 golven. Test Serie 2 bestond uit vier proeven (P07 tot en met P10). Tijdens Test Serie 2 zijn Hillblocks 2.0 van het type Basis en Hillblocks 2.0 van het type Slim getest.

#### 3.3.1 Test P07 ( $H_{m0} = 1,32$ m)

Tijdens Test P07 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen en geen kattenrug waargenomen. Na circa 1 uur golven bleek dat de kop van 1 blok was afgebroken (zie Foto 3.5). Hoewel de sterkte van deze blokken niet is opgemeten wordt aangenomen dat de sterkte in verhouding kleiner is dan de blokken in de praktijk. Het breken van dit blok wordt daarom gezien als een modeffect.

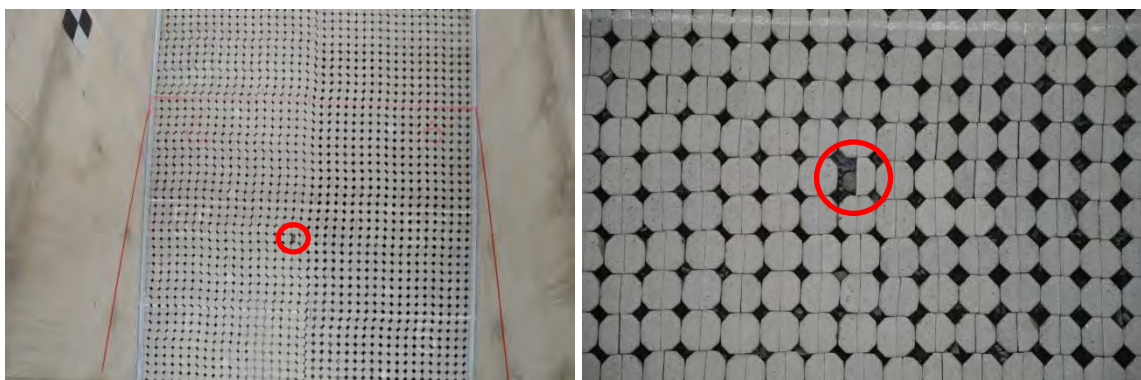


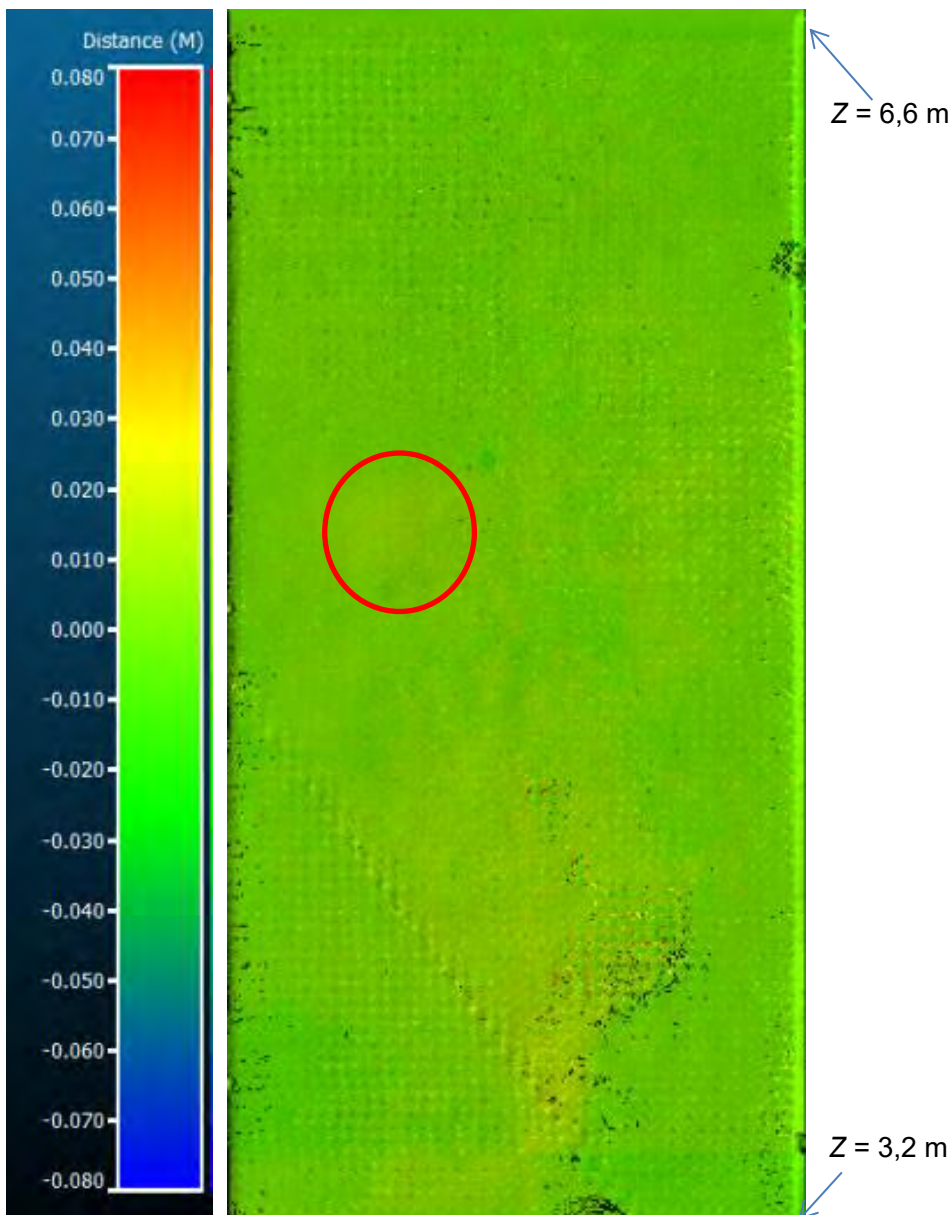
Foto 3.5 Positie van gebroken blok tijdens Test P07

Het inwasmateriaal was voor Test P07 niet opnieuw ingewassen. Voor de test was de voet overal volledig gevuld. Veelal was de hals voor 2/3 gevuld. Na de test was de voet overal gevuld. Wel was er duidelijk inwasmateriaal uit de hals gemigreerd naar een lager gedeelte op het talud (zie Figuur B.10).

### 3.3.2 Test P08 ( $H_{m0} = 1,48$ m)

Tijdens Test P08 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen waargenomen. Op basis van de laserscans leek er een zeer lichte kattenrug te ontstaan waarbij het talud circa 1,5 cm omhoog is gekomen ten opzichte van de situatie voor Test P07 (zie Figuur 3.5).

Na de test was de voet overal nog goed ingewassen (zie ook Figuur B.10).



Figuur 3.5 Verschilplot op basis van de meting met de laserscan (Voor Test P07 en na Test P08). Te zien valt een miniem hoogteverschil (circa 0,015 m; aangeduid met de rode cirkel)

### 3.3.3 Test P09 ( $H_{m0} = 1,75$ m)

Tijdens Test P09 is geen schade waargenomen aan de Hillblocks 2.0 (Schadecategorie a). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen waargenomen. Op basis van de laserscans leek er een zeer lichte kattenrug te ontstaan waarbij het talud circa 2,5 cm omhoog is gekomen ten opzichte van de situatie voor Test P07 (zie Figuur 3.6).

Na circa 12 minuten golven bleek dat de kop van 1 blok was afgebroken (zie Foto 3.5). Hoewel de sterkte van deze blokken niet is opgemeten wordt aangenomen dat de sterkte in verhouding kleiner is dan de blokken in de praktijk. Het breken van dit blok wordt daarom gezien als een modeffect. Ondanks het afbreken van de kop was de steenzetting nog steeds heel goed in staat om deze golfbelasting te weerstaan. Het afbreken van een kop lijkt weinig invloed te hebben op de stabiliteit. De voet zat nog goed ingeklemd tussen de omringende blokken.



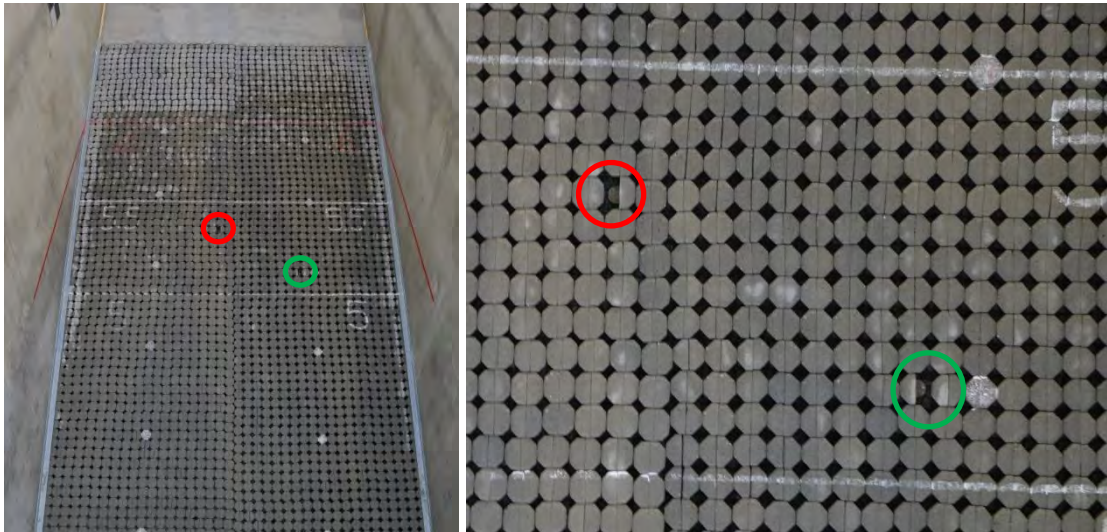
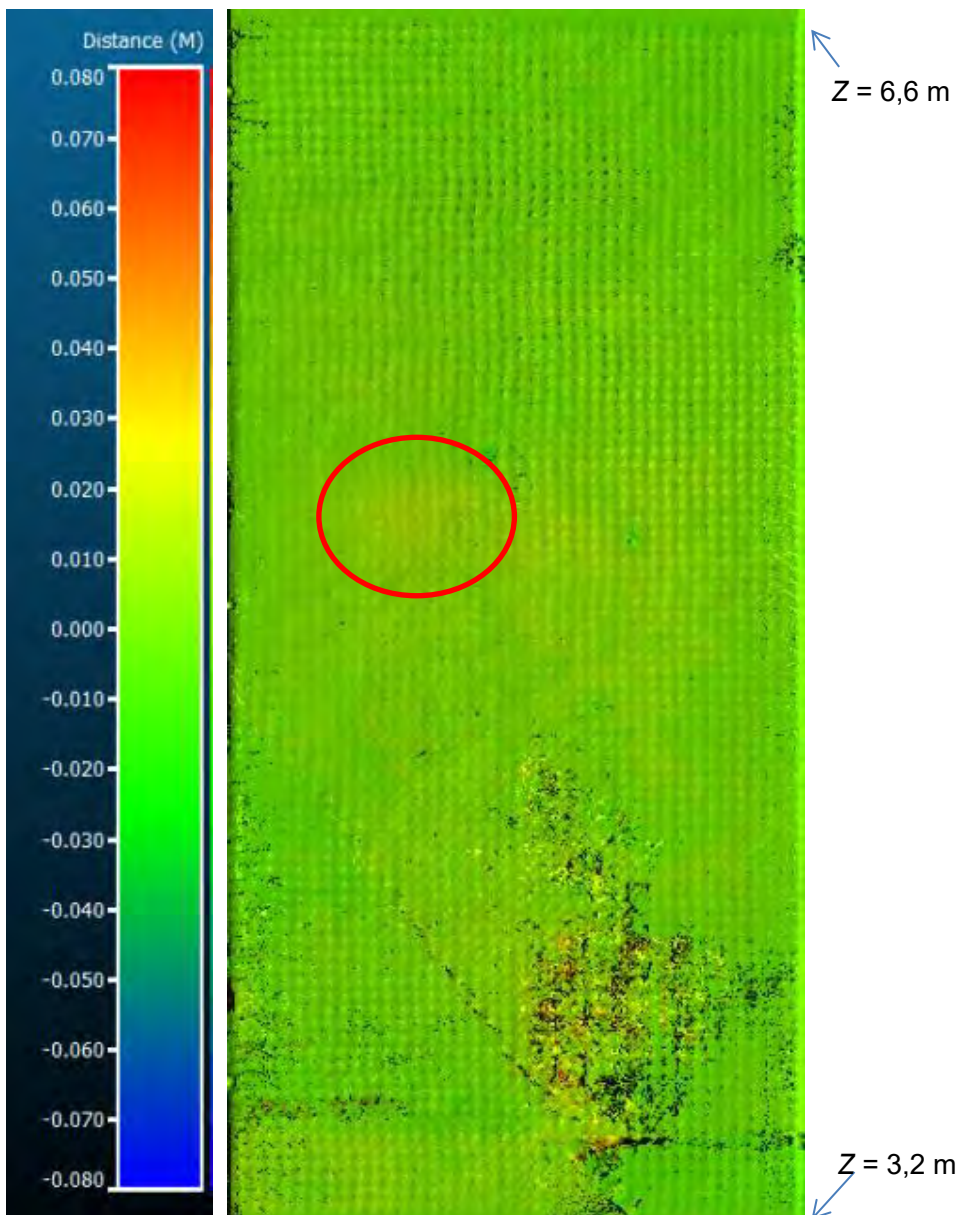


Foto 3.6 Positie van gebroken blok tijdens Test P07 (rood) en tijdens Test P09 (groen)

Na de test was de voet overal nog goed ingewassen (zie ook Figuur B.10). De blokken met afgebroken kop zijn niet vervangen.

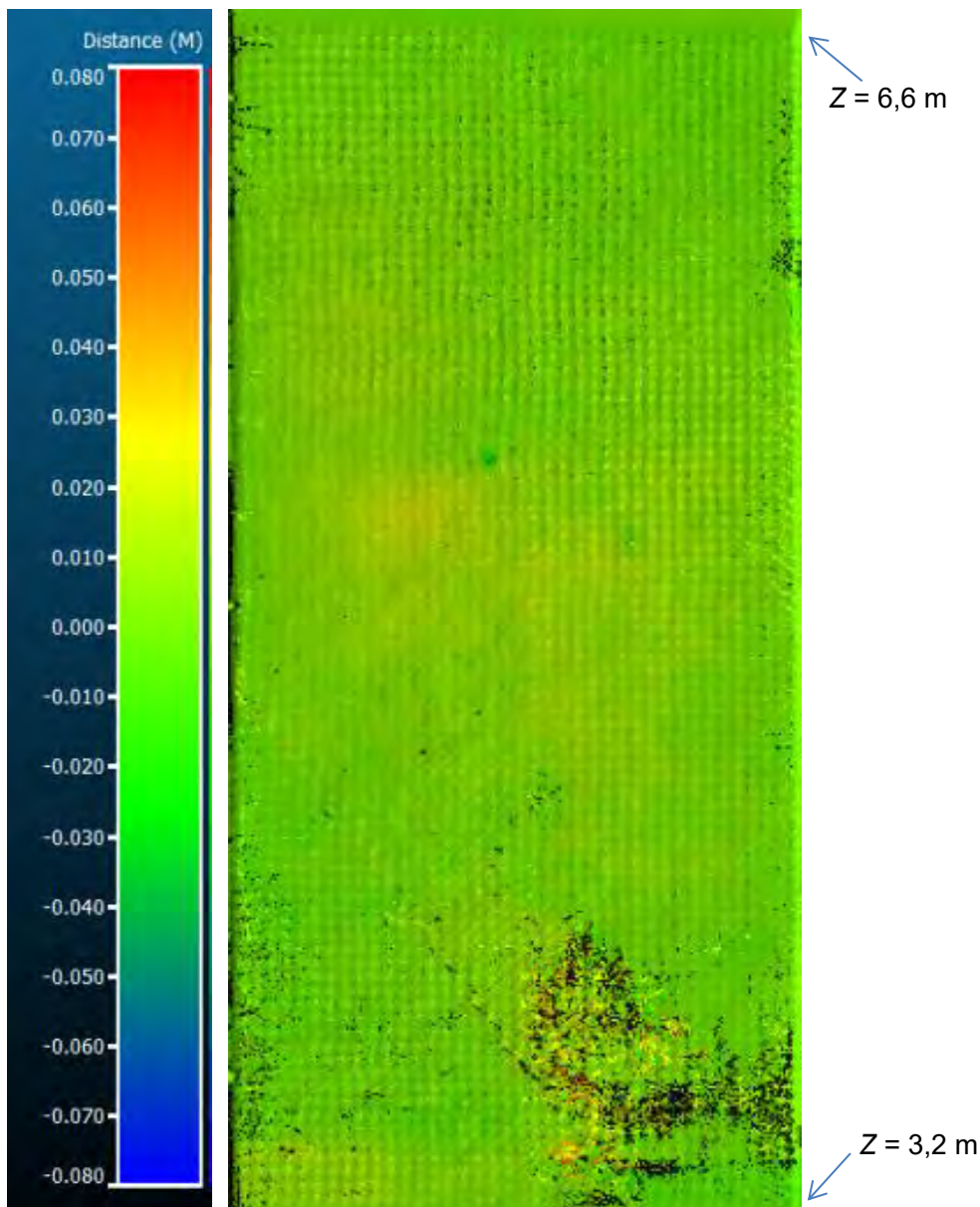


Figuur 3.6 Verschilplot op basis van de meting met de laserscan (Voor Test P07 en na Test P09)

#### 3.3.4 Test P10 ( $H_{m0} = 1,92$ m)

Tijdens Test P10 zijn er geen hoogteverschillen tussen de individuele zetstenen waargenomen. Op basis van de laserscans bleek er bij de Hillblocks 2.0 van het type Basis een kattenrug te zijn ontstaan waarbij het talud circa 4 cm omhoog is gekomen ten opzichte van de situatie voor Test P07 (zie Figuur 3.7). Bij de Hillblocks 2.0 van het type Basis en van het type Slim was er sprake van Schadecategorie a.

Na de test was de voet van de Hillblocks 2.0 overall nog goed ingewassen (zie ook Figuur B.10).



Figuur 3.7 Verschilplot op basis van de meting met de laserscan (Voor Test P07 en na Test P10)

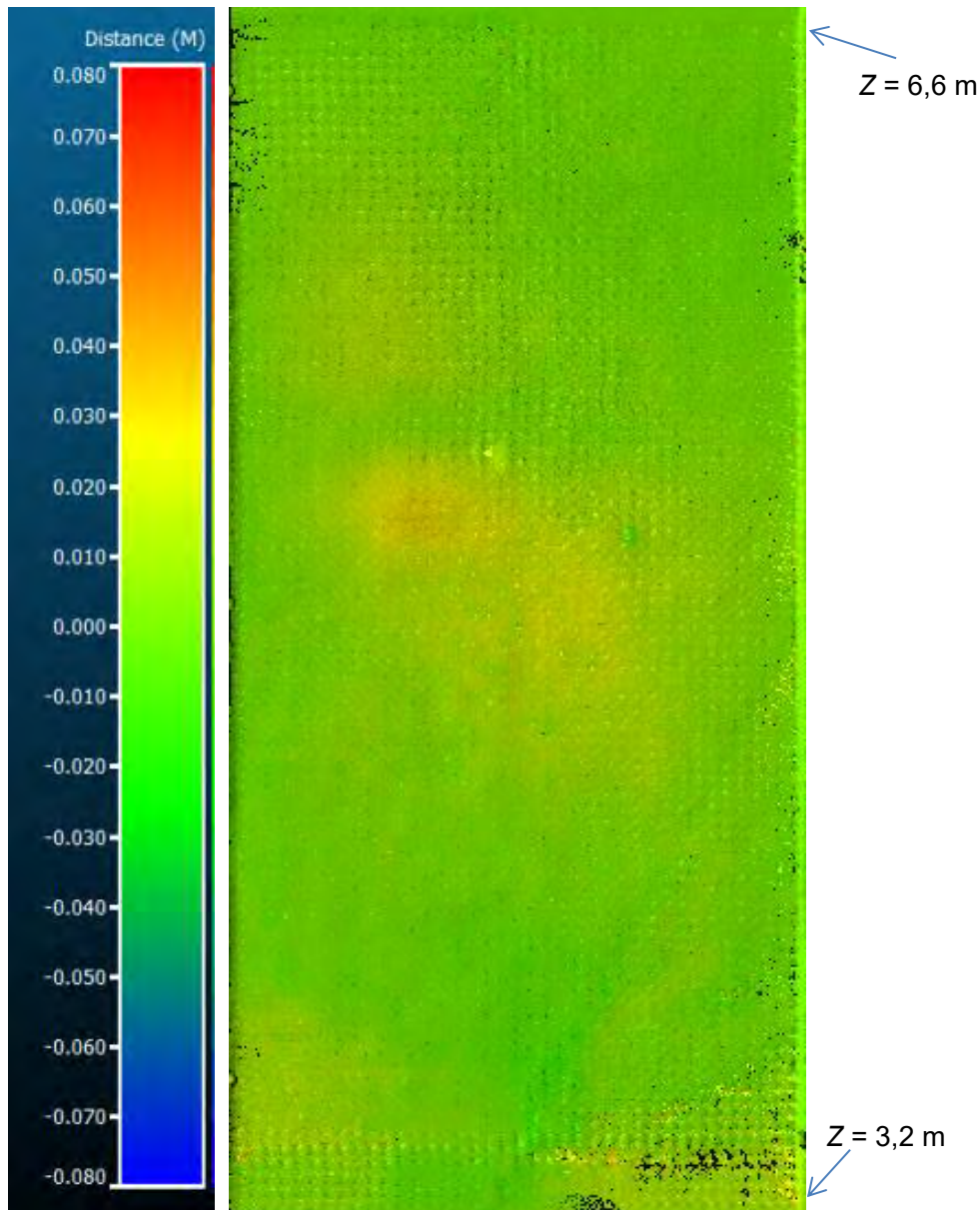
### 3.4 Test Serie 3: langeduurproeven, $H_{m0} = 1,92$ m, $s_{op} = 0,04$

Test Serie 3 bestaat uit Test P09, Test P10, Test P11<sub>cum</sub> en Test P12. Test P09 en Test P10 zijn zowel onderdeel van Test Serie 2 als Test Serie 3 en zijn beschreven in Paragraaf 3.3. Test P11<sub>cum</sub> en Test P12 zijn hieronder beschreven.

#### 3.4.1 Test P11<sub>cum</sub>

Test P11<sub>cum</sub> is in drie delen uitgevoerd (P11, P11a en P11b). Er waren geen hoogteverschillen tussen de individuele blokken waargenomen (Schadecategorie a). Op basis van de laserscans bleek er bij de Hillblocks 2.0 van het type Basis een kattenrug te zijn ontstaan waarbij het talud circa 4 cm omhoog is gekomen ten opzichte van de situatie voor Test P09 (zie Figuur 3.8). Bij de Hillblocks 2.0 van het type Basis en van het type Slim was er sprake van schadecategorie a.

Na de test was de voet van de Hillblock 2.0 overal nog goed ingewassen (zie ook Figuur B.11).



Figuur 3.8 Verschilplot op basis van de meting met de laserscan (Voor Test P09 en na Test P11)

### 3.4.2 Test P12

Tijdens Test P12 zijn er na circa 2 uur en 17 minuten golven zes zuilen uit het talud (Hillblock 2.0 van het type Basis) gelicht (Schadecategorie d). Er was duidelijk een kattenrug aanwezig. Op basis van de laserscans bleek er een kattenrug te zijn ontstaan waarbij het talud circa 5,5 cm omhoog is gekomen ten opzichte van de situatie voor Test P09 (zie Figuur 3.9). Aan de zijde van de Hillblocks 2.0 van het type Slim was er geen schade ontstaan. Aan deze zijde was een geringe kattenrug waarneembaar (Schadecategorie a). Het talud was hier circa 2,5 cm omhoog gekomen ten opzichte van de situatie voor Test P09.

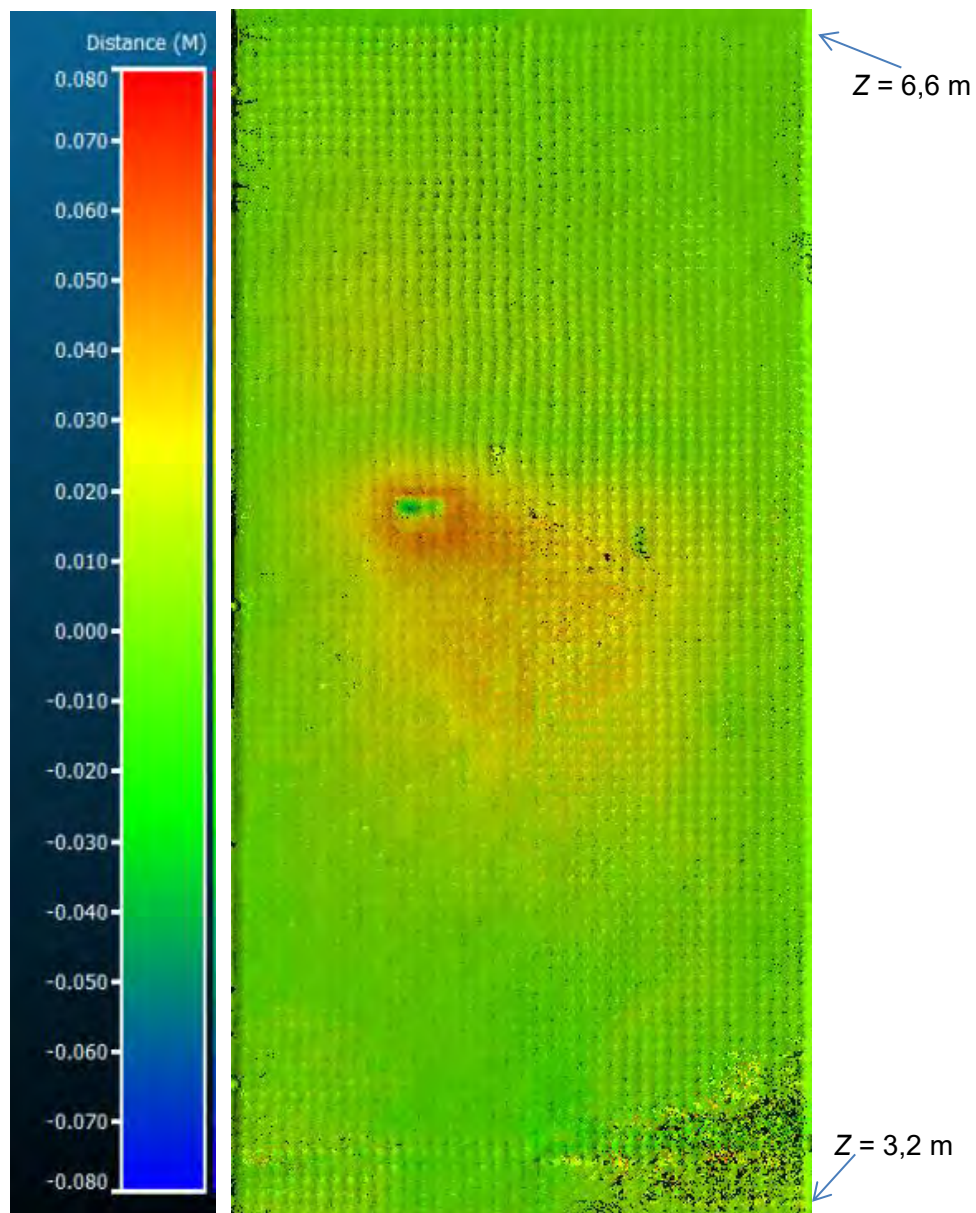
Over het gehele talud bleek het inwasmateriaal nog goed ingewassen. Alleen in de zone  $Z = 5,5 - 6,6$  m is er enig inwasmateriaal uit de voet van het Hillblock 2.0 (zowel type Basis als

type Slim) verdwenen (zie ook Figuur B.11) maar dit kan nog steeds worden beschouwd als voldoende ingewassen. In deze zone was er sprake van een goede inklemming.

De filterlaag bleek niet te zijn uitgespoeld.



Foto 3.7 Impressie van schade na Test P012



Figuur 3.9 Verschilplot op basis van de meting met de laserscan (Voor Test P09 en na Test P12)



## 4 Analyse en discussie

### 4.1 Hillblocks 2.0 in golfklapzone

#### 4.1.1 Stabiliteit

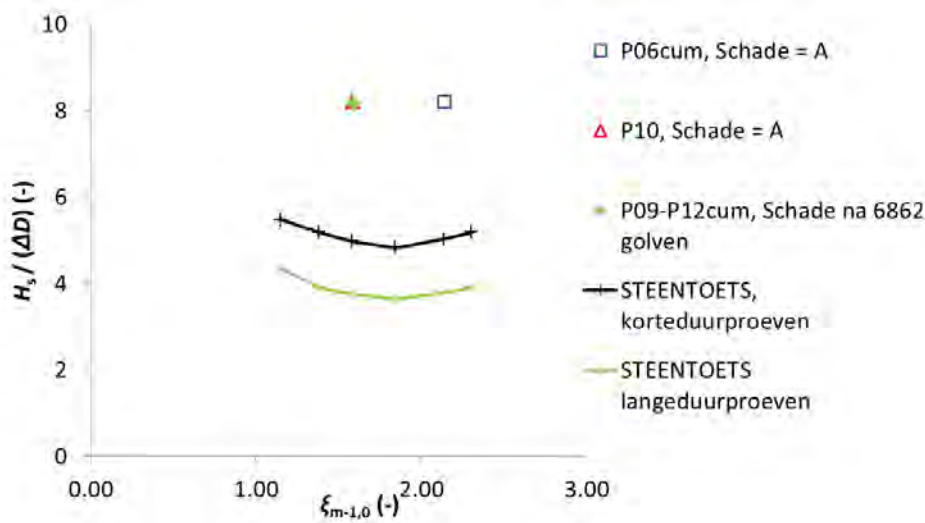
De Hillblock 2.0 van het type Basis en de Hillblock 2.0 van het type Slim zijn bij Test Serie 1 en Test Serie 2 niet bezweken. Bij Test Serie 3 zijn de Hillblocks 2.0 van het type Basis wel bezweken door het uitlichten van afzonderlijke zetstenen uit de bekleding. De Hillblocks 2.0 van het type Slim zijn tijdens Test Serie 3 niet bezweken. Een overzicht van alle testen is weergegeven in Tabel C.1. Een overzicht van de belangrijkste testen is weergegeven in Tabel 4.1 (Hillblock 2.0 van het type Basis) en Tabel 4.2 (Hillblock 2.0 van het type Slim). In dit overzicht zijn de testen met de hoogste golven en waarbij geen schade is opgetreden en de testen met de laagste golfhoogte waarbij wel schade is opgetreden weergegeven. In de tabellen zijn ook de waarden van de belastingparameter  $H_s/\Delta D$  gegeven zoals deze is gemeten en zoals deze met Steentoets is bepaald. De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 4.1 en Figuur 4.2.

Tabel 4.1 Overzicht resultaten met schade (en laagste golfhoogte) en zonder schade (met hoogste golfhoogte) voor Hillblocks 2.0 van het type Basis

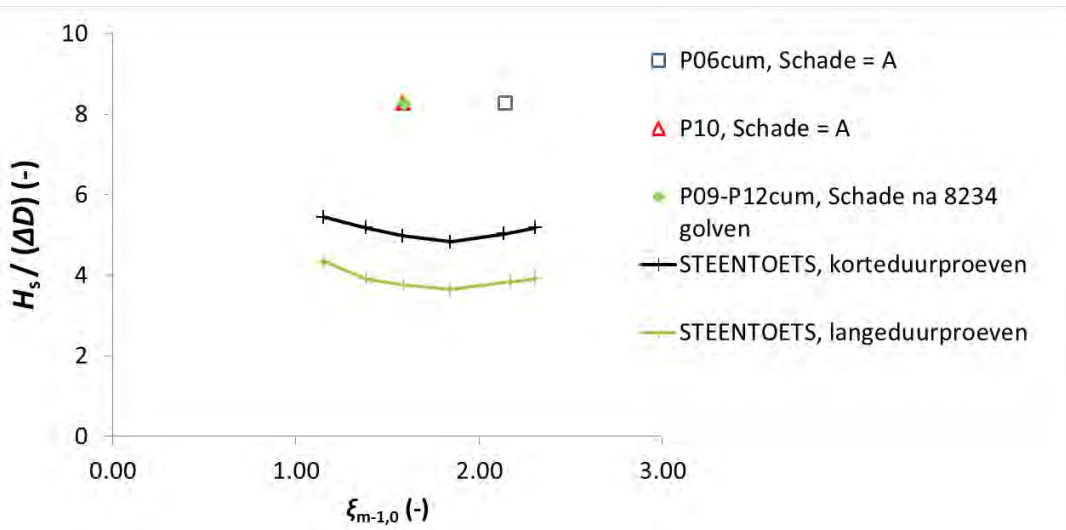
Serie	Test	$H_{s,catA/B}$ (m)	$H_{s,catC/D}$ (m)	N (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	$H_s/(\Delta D)$ Steentoets
1	P06 <sub>cum</sub>	1.93			8.20	5.02
2	P10	1.93			8.20	4.97
3	P09-P12 <sub>cum</sub>		1.92	6862 = schade	8.16	3.76

Tabel 4.2 Overzicht resultaten met schade (en laagste golfhoogte) en zonder schade (met hoogste golfhoogte) voor Hillblocks 2.0 van het type Slim

Serie	Test	$H_{s,catA/B}$ (m)	$H_{s,catC/D}$ (m)	N (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	$H_s/(\Delta D)$ Steentoets
1	P06 <sub>cum</sub>	1.93			8.28	5.02
2	P10	1.93			8.28	4.97
3	P09-P12 <sub>cum</sub>	1.92		6862 = geen schade	8.24	3.76



Figuur 4.1 Resultaten van de relevante proeven, toegevoegde fictieve proeven en berekeningen met STEENTOETS voor Hillblocks 2.0 van het type Basis



Figuur 4.2 Resultaten van de relevante proeven, toegevoegde fictieve proeven en berekeningen met STEENTOETS voor Hillblocks 2.0 van het type Slim

Op de horizontale assen van Figuur 4.1 en Figuur 4.2 is de brekerparameter  $\xi_{m-1,0}$  weergegeven. Deze parameter is gebaseerd op de spectrale periodemaat  $T_{m-1,0}$ :

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{m-1,0}}} \quad (4.1)$$

Met

$$s_{m-1,0} = \frac{2\pi H_{m0}}{gT_{m-1,0}^2} \quad (4.2)$$

Waarbij  $s_{m-1,0}$  de golfsteilheid is,  $T_{m-1,0}$  de spectrale golfperiode,  $\alpha$  de taludhelling,  $g$  de versnelling als gevolg van de zwaartekracht,  $H_{m0}$  de spectrale significante golfhoogte en  $\xi_{m-1,0}$  de brekerparameter.



Op de verticale as staat de belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  op basis van de gemiddelde soortelijke massa van het beton.

Uit elke serie is het resultaat van de proef met de grootste golfhoogte waarbij de steenzetting niet is bezweken en het resultaat van de proef (of fictieve proef) met de kleinste golfhoogte waarbij bezwijken wel is geconstateerd gegeven. De meetpunten met de open symbolen betreffen proeven waarbij de steenzetting niet is bezweken (schadecategorie a of b) terwijl voor de dichte symbolen dat wel het geval is (schadecategorie c of d). De lijnen representeren de resultaten volgend uit de berekeningen met Steentoets.

Voor de berekeningen is uitgegaan van de maten en eigenschappen zoals toegepast in de Deltagoot. Er is geen rekening gehouden met het feit dat de Hillblock 2.0 voor een deel uit kanalen bestaan. Er is gerekend met een toplaagdikte van 18 cm en een soortelijke massa van het beton van  $2307 \text{ kg/m}^3$  (Basis) en  $2295 \text{ kg/m}^3$  (type Slim).

In de figuren valt te zien dat bij alle testseries de steenzetting stabiel is bij een golfhoogte welke hoger is dan de golfhoogte zoals deze is berekend met Steentoets.

In vergelijking met eerder onderzoek naar de stabiliteit van Hillblocks (Van Steeg, 2012) is de stabiliteit hoger dan de stabiliteit die destijds kon worden vastgesteld. Hierbij wordt overigens wel opgemerkt dat er in het eerdere project geen bezwijken optrad waardoor het niet mogelijk was om hogere waarden van de stabiliteit vast te stellen.

Tot slot wordt opgemerkt dat er gedurende het testprogramma twee koppen van de Hillblocks 2.0 zijn afgebroken (zie Paragraaf 3.3.1 en Paragraaf 3.3.3). Vervolgens is hier nog vele uren overheen gegolfd met de maximale golfbelasting en trad hier geen schade op. Dit is een indicatie dat het systeem een robuust systeem is.

#### 4.1.2 Uitspoeling inwasmateriaal

Tijdens de testen bleek het inwasmateriaal goed tussen de voeten van de Hillblocks 2.0 te blijven zitten. Dit kan waarschijnlijk worden verklaard doordat de voet iets taps toeloopt waardoor het inwasmateriaal zich goed klem kan wigen. Ook was de voet voorzien van een groef wat mogelijk bijdraagt aan de fixatie van het inwasmateriaal. Zelfs na de langeduurproef was de voet nog grotendeels gevuld en was er sprake van een goede klemwerking. Een impressie van de eerdere onderzoeken met dergelijke zetstenen is weergegeven in Tabel 4.3, Figuur 4.3 en Figuur 4.4.

Tabel 4.3 Vergelijking van geteste zetstenen met betrekking tot uitspoeling

	Hoogte blok	Hoogte voet	Type beton	Bijzonderheden
2011 Hillblock	0,20 m	0,075 m	Gietbeton (glad)	
2014 Testblok	0,15 m	0,050 m	Gietbeton (glad)	
2016 Hillblock 2.0	0,18 m	0,065 m (Basis) 0,060 m (Slim)	Aardvochtig beton (ruw)	Voorzien van groef



Figuur 4.3 Impressie van eerder geteste zetstenen (links: Testblok, rechts Hillblock zoals getest in 2014)



Figuur 4.4 Impressie van Hillblock 2.0 van het type Basis zoals deze in 2016 is getest

#### 4.1.3 Bepaling stabiliteitsfactor

Op basis van de uitgevoerde proevenseries is voor de Hillblock 2.0 een stabiliteitsfactor berekend, waarmee het resultaat van Steentoetsberekeningen zodanig zal worden gecorrigeerd dat het overeenkomt met de proefresultaten uit de Deltagoot, rekening houdend met een veiligheidsfactor. Deze stabiliteitsfactor is voor elk type steenzetting anders en wordt voor de gebruiker onzichtbaar opgenomen in de code van Steentoets. De benodigde toplaagdikte volgens Steentoets zal in het programma gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor, om zo rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting. Door toepassing van de stabiliteitsfactor zal een type steenzetting met een hoge stabiliteitsfactor (die goed scoorde tijdens de Deltagootproeven) in een concreet ontwerp een kleinere toplaagdikte nodig hebben dan een type steenzetting met een lage stabiliteitsfactor. De met Rijkswaterstaat afgesproken procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in Bijlage E. In de onderhavige paragraaf is dit uitgewerkt voor de geteste Hillblock 2.0 van het type Basis en de Hillblock 2.0 van het type Slim.

De eerste stap bij het bepalen van de stabiliteitsfactor is het per serie vaststellen van de belasting waarbij de steenzetting is bezweken. Voor Test Serie 1 en Test Serie 2 (korteduurproeven met ongeveer hetzelfde aantal golven per proef) is daarvoor de significante golfhoogte waarbij de steenzetting bezwijkt van belang: de bezwijkgolffhoogte  $H_{s,bezwijk}$ . Voor Test Serie 3 (langeduurproef met constante significante golfhoogte) is het aantal golven tot bezwijken van belang.

- Test Serie 1 en Test Serie 2

Wanneer tijdens een proevenserie met korteduurproeven geen schade ontstaat (zoals hier het geval was), is conform de procedure uit Bijlage E aangehouden dat  $H_{s,bezwijk}$  gelijk is aan het gemiddelde van de volgende twee proeven:

- De golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b). Tijdens Test Serie 1 en Test Serie 2 was geen schade opgetreden aan de Hillblocks 2.0. In dit geval wordt dus de golfhoogte van de zwaarste proef genomen (P06<sub>cum</sub>:  $H_{m0} = 1,93$  m en P10:  $H_{m0} = 1,92$  m)
- De golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d). Aangezien bezwijken niet is opgetreden wordt er een fictieve proef toegevoegd waarbij de golfhoogte 15% hoger is (Test P0X bij Test Serie 1:  $H_{m0} = 2,22$  m en Test P0Y bij Test Serie 2:  $H_{m0} = 2,21$  m). Er wordt conform de gevolgde procedure aangenomen dat er bij deze fictieve proeven schade zou zijn opgetreden.

Bovenstaande aanpak resulteert voor zowel Test Serie 1 als Test Serie 2 in een bezwijkgolffhoogte  $H_{s,bezwijk} = 2,07$  m.

#### • Test Serie 3

Voor de langeduurproef geldt naast de significante golfhoogte en de golfperiode van de proef het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef. Test P09 wordt deels en Test P10 wordt geheel meegerekend bij de langeduurtesten conform de procedure welke is beschreven in Bijlage F. Hierbij is als uitgangspunt een equivalente significante golfhoogte van  $H_{s,eq} = 1,92$  m aangehouden. Deze procedure is ook toegepast op Test P11 en Test P12. Het aantal equivalente golven van proef P09 tot en met P12 zijn gesommeerd.

De Hillblocks 2.0 van het type Basis bezweken bij een golfhoogte van  $H_{s,bezwijk} = 1,92$  m,  $T_p = 5,60$  s en  $N = 6862$ .

De Hillblocks 2.0 van het type Slim zijn niet bezweken. Conform de procedure zoals beschreven in Bijlage E dient aangenomen te worden dat er schade aan het talud zou zijn ontstaan als de proef 20% langer had geduurd:  $H_{s,bezwijk} = 1,92$  m,  $T_p = 5,60$  s en  $N = 8234$ .

Zoals genoemd, is de stabiliteitsfactor een correctiefactor op de benodigde toplaagdikte die volgens Steentoets benodigd is. Voor het berekenen van de stabiliteitsfactor zijn conform de procedure uit Bijlage E per serie de volgende waarden nodig:

- $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht, dus zonder klemming en rekening houdend met de gewichtsreductie door de kanalen), bij de bezwijkgolffhoogte van de betreffende serie (m)
- $D_{Steentoets}$  = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc.), bij de bezwijkgolffhoogte van de betreffende serie (m)
- $D_{in \text{ modelproeven}}$  = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (m), dus  $D_{in \text{ modelproeven}} = 0,18$  m

De benodigde toplaagdiktes  $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  en  $D_{Steentoets}$  volgen uit Steentoetsberekeningen. Hiervoor is gebruikgemaakt van Steentoets2015 versie v15.1.5.1 (Klein Breteler, 2015). In de berekeningen zijn de tijdens het Deltagootonderzoek geconstateerde bezwijkgolffhoogtes (zie hierboven voor de waardes hiervan) als uitgangspunt genomen. Voor elke proevenserie is met Steentoets (rekenend met de geconstateerde bezwijkgolffhoogte en met stabiliteitsfactor = 1) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets bij de geconstateerde bezwijkgolffhoogte nog net voldoende is. Voor het berekenen van  $D_{Steentoets}$  is gerekend mét klemming en voor het berekenen van  $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  is gerekend zónder klemming en het werkelijke gewicht van de Hillblocks 2.0. De Steentoetsberekeningen zijn uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er is gerekend met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van het beton, de gemeten karakteristieke korrelgrootte  $D_{f15}$

van het filter ( $D_{f15}$  = korrelgrootte die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden), de gemeten dikte van de filterlaag, de gemeten golfcondities, de gemeten taludhelling, et cetera. Voor de dikte van de steenzetting is de hoogte van de zetstenen aangehouden.

Voor deze berekeningen is het werkelijke volume van de Hillblocks 2.0,  $V$ , en het volume van een massief blok (zonder kanalen) met hetzelfde grondvlak en hoogte als de Hillblocks 2.0 nodig,  $V_{\text{massief}}$ . Er is daarbij gebruik gemaakt van het volume van de blokken zoals dat gemeten is tijdens het bepalen van de soortelijke massa van het beton. Uit die metingen is gebleken dat het werkelijke volume van de Hillblocks 2.0 van het type basis gelijk is aan  $V = 0,901$  liter. De Hillblocks 2.0 van het type Slim hadden een volume van  $V = 0,885$  liter. Het volume  $V_{\text{massief}}$  van een massief blok met hetzelfde grondvlak en hoogte is als volgt berekend:

$$V_{\text{massief}} = L \cdot B \cdot D \cdot (1 - \Omega) = 0.125 \cdot 0.0625 \cdot 0.18 \cdot (1 - 0.102) = 1.26 \text{ liter} \quad (4.3)$$

Met

$V_{\text{massief}}$  = het volume van een massief blok zonder kanalen met hetzelfde grondvlak en hoogte als de Hillblock 2.0 ( $\text{m}^3$  of liter)

$D$  = hoogte van het blok (m)

$B$  = lengte van het blok (m)

$\Omega$  = relatief open oppervlak (bij het grondvlak) (-)

Een massief blok met hetzelfde grondvlak en hoogte als het Hillblock 2.0 van het type Basis, maar met soortgelijke massa van  $1952 \text{ kg/m}^3$  geeft onder water dezelfde kracht op de ondergrond als een Hillblock 2.0 van het type Basis. In het geval van een Hillblock 2.0 van het type Slim is deze waarde gelijk aan  $1927 \text{ kg/m}^3$ . Dit is in de Steentoets berekeningen gebruikt voor het bepalen van de stabiliteit met alleen het eigen gewicht van de blokken (zonder klemming etc.:  $D_{\text{ST eigen gewicht}}$ ).

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor vervolgens voor elke serie afzonderlijk bepaald met de volgende formule:

$$f_{\text{stab}} = \left( \frac{D_{\text{steentoets}}}{D_{\text{in modelproeven}}} - \frac{D_{\text{steentoets}}}{D_{\text{ST eigen gewicht}}} \right) / \gamma + \frac{D_{\text{Steentoets}}}{D_{\text{ST eigen gewicht}}} \quad (4.4)$$

Met:

$f_{\text{stab}}$  = stabiliteitsfactor voor een bepaald type steenzetting (de benodigde topaagdikte volgens Steentoets moet gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting) (-)

$\gamma$  = veiligheidsfactor (-)

De waarde van de veiligheidsfactor  $\gamma$  wordt bepaald op basis van de standaardafwijking in de proefresultaten (berekend met  $D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{in modelproeven}}$ ). Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt:

$$\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma \quad (4.5)$$

Met:

$\sigma$  = standaardafwijking in de proefresultaten ( $D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{in modelproeven}}$ ) (-)

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 4.4 tot en met Tabel 4.7.

Tabel 4.4 Geschatte  $H_s/(\Delta D)$  bij begin van bezwijken conform de procedure uit Bijlage E, de beproefde toplaagdikte en de resultaten van berekeningen met Steentoets (Hillblock 2.0 van het type Basis)

Proevenserie	$N_{\text{langeduur}}$ (-)	$H_{s,\text{bezwijk}}$ (m)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	$D_{\text{in modelproeven}}$ (m)	$D_{\text{Steentoets}}$ (m)	$D_{\text{ST eigen gewicht}}$ (m)
Serie 1, $s_{\text{op}} = 0,02$	n.v.t.	2,07	8,80	0,18	0,278	0,538
Serie 2, $s_{\text{op}} = 0,04$	n.v.t.	2,07	8,80	0,18	0,272	0,490
Serie 3, $s_{\text{op}} = 0,04$	6862	1,92	8,16	0,18	0,305	0,542

Tabel 4.5 Geschatte  $H_s/(\Delta D)$  bij begin van bezwijken conform de procedure uit Bijlage E, de beproefde toplaagdikte en de resultaten van berekeningen met Steentoets (Hillblock 2.0 van het type Slim)

Proevenserie	$N_{\text{langeduur}}$ (-)	$H_{s,\text{bezwijk}}$ (m)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	$D_{\text{in modelproeven}}$ (m)	$D_{\text{Steentoets}}$ (m)	$D_{\text{ST eigen gewicht}}$ (m)
Serie 1, $s_{\text{op}} = 0,02$	n.v.t.	2,07	8,88	0,18	0,280	0,547
Serie 2, $s_{\text{op}} = 0,04$	n.v.t.	2,07	8,88	0,18	0,275	0,497
Serie 3, $s_{\text{op}} = 0,04$	8234	1,92	8,24	0,18	0,313	0,562

Tabel 4.6 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten voor Hillblock 2.0 van het type Basis ( $\mu$  = gemiddelde,  $\sigma$  = standaardafwijking)

Proevenserie	$D_{\text{Steentoets}} / D_{\text{in modelproeven}}$ (-)			$D_{\text{Steentoets}} / D_{\text{ST eigen gewicht}}$ (-)	$f_{\text{stab}}$ (-)
	Serie 1, $s_{\text{op}} = 0,02$	1,54			0,52
Serie 2, $s_{\text{op}} = 0,04$	1,51			0,56	1,30
Serie 3, $s_{\text{op}} = 0,04$	1,69			0,56	1,44
Serie 1 t/m 3	$\mu$	$\sigma$	$\gamma$		$\mu$
	1,58	0,10	1,28		1,35

Tabel 4.7 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten voor Hillblock 2.0 van het type Slim ( $\mu$  = gemiddelde,  $\sigma$  = standaardafwijking)

Proevenserie	$D_{\text{Steentoets}} / D_{\text{in modelproeven}}$ (-)			$D_{\text{Steentoets}} / D_{\text{ST eigen gewicht}}$ (-)	$f_{\text{stab}}$ (-)
	/Serie 1, $s_{\text{op}} = 0,02$	1,56			0,51
Serie 2, $s_{\text{op}} = 0,04$	1,53			0,55	1,29
Serie 3, $s_{\text{op}} = 0,04$	1,74			0,56	1,45
Serie 1 t/m 3	$\mu$	$\sigma$	$\gamma$		$\mu$
	1,61	0,11	1,32		1,35

Conform de procedure in Bijlage E resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactoren:

- Hillblock 2.0 van het type Basis:  $f_{\text{stab}} = 1,35$
- Hillblock 2.0 van het type Slim:  $f_{\text{stab}} = 1,35$

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Hillblocks 2.0 van 36 cm hoog (op schaal 1:2, dus 18 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 20 cm tot 70 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte.

De stabiliteitsfactor voor Hillblock 2.0 is hoog ten opzichte van andere steenzettingen. Deze hoge stabiliteitsfactor betekent dat dit een hightech systeem is, dat zijn stabiliteit onder andere ontleent aan een optimale samenwerking tussen de betonnen elementen en het inwasmateriaal. Uit Tabel 4.6 en Tabel 4.7 blijkt dat de gevonden verhouding tussen de werkelijke dikte van de Hillblock en de benodigde dikte volgens Steentoets gelijk is aan circa 1,6. In de stabiliteitsfactor is echter een veiligheidsfactor meegenomen voor dit hightech systeem wat heeft geresulteerd in de uiteindelijke stabiliteitsfactor. Verdere uitleg over de bepaling van de stabiliteitsfactor is vermeld in Bijlage E.

Om deze hoge stabiliteitsfactor ook in de praktijk te kunnen toepassen, moet ook in de praktijk ervoor gezorgd worden dat deze optimale samenwerking gerealiseerd wordt. Dat vereist heldere instructies voor de aannemer en gedegen toezicht tijdens de aanleg van deze steenzetting. Daarnaast moet bij het beheer en onderhoud van zetstenen erop gelet worden dat het inwasmateriaal altijd in voldoende mate aanwezig is.

## 4.2 Drainageblock in golfploopzone

### 4.2.1 Stabiliteit

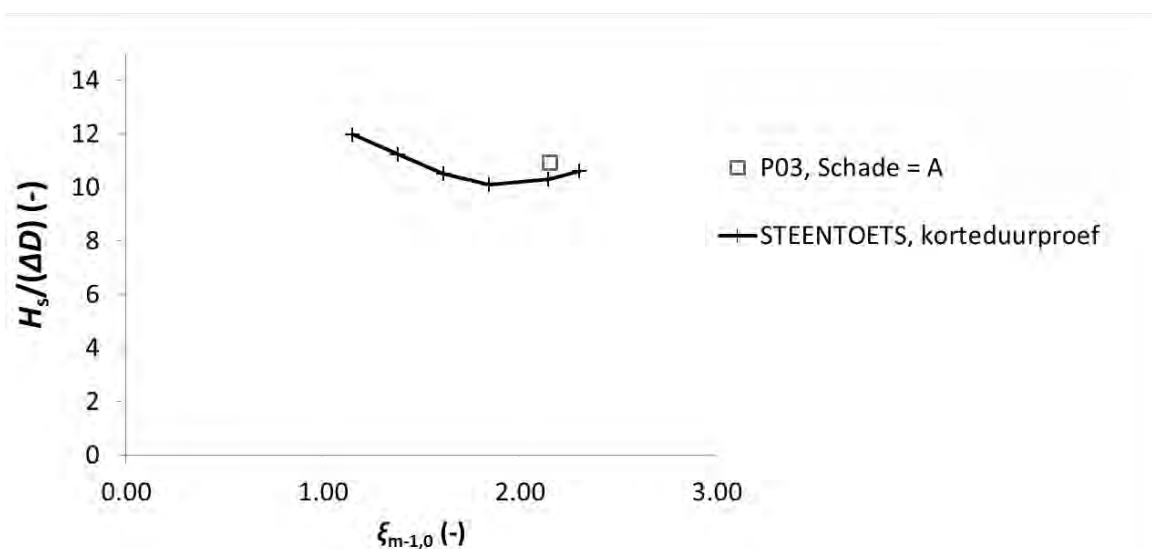
De Drainageblocks zijn alleen in Test Serie 1 tijdens Test P01, P02 en P03 getest. Tijdens Test Serie 1 is geen schade aan de Drainageblocks opgetreden (Feitelijk was er wel schade opgetreden maar dit was als gevolg van bezwijken van de Grassblocks en wordt niet als een op zichzelf staande schadepunt gezien). Vervolgens zijn in Test Serie 1 geen testen meer uitgevoerd met Drainageblocks. Ook tijdens Test Serie 2 en Test Serie 3 zijn geen Drainageblocks getest. Een overzicht van de belangrijkste test met Drainageblocks is gegeven in Tabel 4.8 en Figuur 4.5.

De opzet van het onderzoek was primair gericht op het vaststellen van de stabiliteitsfactor voor de Hillblock 2.0. De Drainageblocks en Grassblocks waren aan de testopstelling toegevoegd om een ondergrens van de stabiliteit te bepalen. Zodra aan één van de bekledingen schade zou ontstaan, zouden de andere typen zetstenen niet verder beproefd kunnen worden met hogere golven. Doordat tijdens proef P04 de Grassblocks waren bezweken, met veel vervolgschade aan de Drainageblocks, zijn deze twee typen bekledingen uit de opstelling verwijderd. Daardoor kon de bezwijkgolffhoogte van de Drainageblocks niet worden bepaald.

Tabel 4.8 Overzicht resultaten zonder schade (met hoogste golffhoogte) voor Drainageblocks in de oloploopzone.

*Er is geen test uitgevoerd waarbij schade optrad.*

Serie	Test	$H_{s,catA/B}$	$H_s/(\Delta D)$	$H_s/(\Delta D)_{Steentoets}$
1	P03	1,36	10,92	10,30



Figuur 4.5 Resultaten van de relevante proeven en berekeningen met Steentoets voor Drainageblocks in de golfploopzone

Een uitleg van Figuur 4.5 is gegeven in Paragraaf 4.1.1.

Voor de berekeningen is uitgegaan van de maten en eigenschappen zoals toegepast in de Deltagoot. Er is rekening gehouden met de vorm van de Drainageblocks conform de NEN7024-1:2015. Er is gerekend met een stabiliteitsfactor gelijk aan 1, een rekendikte van de toplaag van 9,6 cm en een soortelijke massa van  $2297 \text{ kg/m}^3$ .

Hoewel tijdens het ontstaan van de schade aan de Grassblocks in proef P04 de Drainageblocks er nog perfect bij lagen, kan op basis hiervan de bezwijkgolffhoogte niet worden vastgesteld.

#### 4.2.2 Uitspoeling inwasmateriaal

Tijdens de uitgevoerde testen bleek het inwasmateriaal nauwelijks uit te spoelen. Hierbij wordt echter wel benadrukt dat er relatief lage golven zijn getest en dat de maximale testduur circa 1000 golven per test betrof.

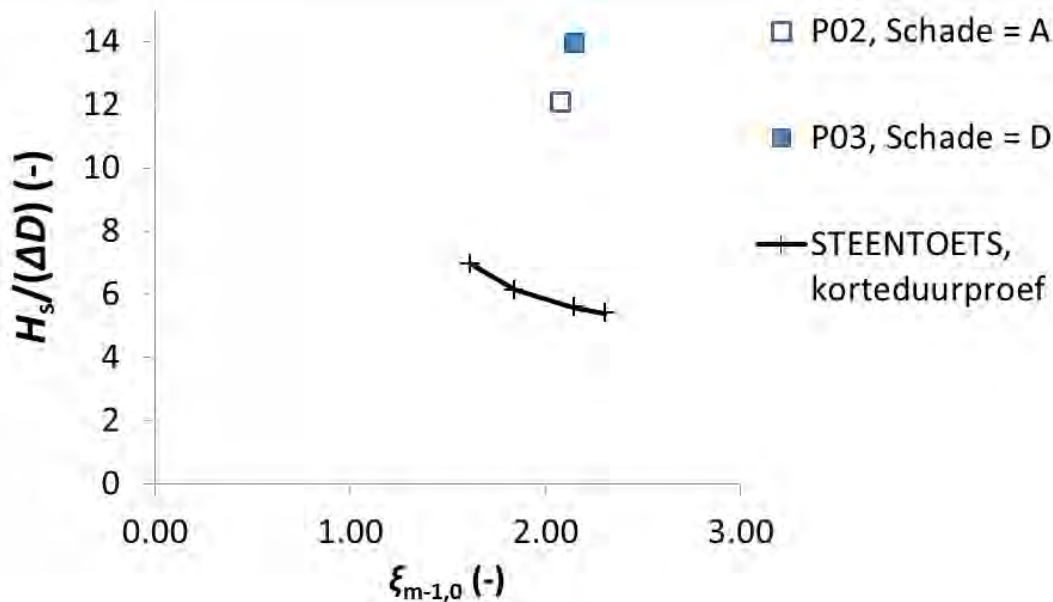
### 4.3 Grassblock in golfploopzone

#### 4.3.1 Stabiliteit

De Grassblocks zijn tijdens Test Serie 1 in Test P03 bezweken. Tijdens Test Serie 2 en Test Serie 3 zijn deze niet beproefd. Een overzicht van alle testen is weergegeven in Tabel C.1. Een overzicht van de belangrijkste testen is weergegeven in Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Overzicht resultaten met schade (en laagste golffhoogte) en zonder schade (met hoogste golffhoogte) voor Grassblocks in de oploopzone

Serie	Test	$H_{s,catA/B}$	$H_{scatC/D}$	$H_s/(\Delta D)$	$H_s/(\Delta D)_{Steentoets}$
1	P02	1,18		12,12	5,58
	P03		1,36	13,97	



Figuur 4.6 Resultaten van de relevante proeven en berekeningen met Steentoets voor Grassblocks in de golfoploopzone

Een uitleg van de hierboven gegeven figuur is weergegeven in Paragraaf 4.1.1.

Voor de berekeningen met Steentoets is uitgegaan van de maten en eigenschappen zoals toegepast in de Deltagoot. Er is rekening gehouden met de vorm van de Grassblocks conform de NEN7024-1:2015. Er is gerekend met een stabiliteitsfactor gelijk aan 1, een rekendikte van de toplaagdikte van 7,6 cm en een soortelijke massa van  $2281 \text{ kg/m}^3$ .

De stabiliteit volgens Steentoets is betrekkelijk laag ten opzichte van de proefresultaten. Dat komt omdat het een steenzetting is zonder filterlaag. Dergelijke steenzettingen komen in Nederland weinig voor op primaire waterkeringen en daarom is hier betrekkelijk weinig onderzoek aan verricht en zijn de formules vrij conservatief gekozen.

De stabiliteit van de Grassblocks is aanzienlijk hoger dan berekend met Steentoets. Uit dit resultaat kan echter geen stabiliteitsfactor worden afgeleid, omdat er slechts één proevenserie is uitgevoerd. Het geeft echter wel aan dat de stabiliteit vrij groot is ten opzichte van Steentoets.

#### 4.3.2 Uitspoeling inwasmateriaal.

Het inwasmateriaal tussen de Grassblocks bleek fors uit te spoelen. Desondanks bleef er wel wat inwasmateriaal achter en bleef de steenzetting ook aan het eind van de proef nog goed geklemd te liggen.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

### 5.1 Algemeen

Om de stabiliteit van Hillblock 2.0 van het type Basis, Hillblock 2.0 van het type Slim, Grassblock en Drainageblock te bepalen zijn er in de Deltagoot van Deltares fysieke modelproeven uitgevoerd op een dijklichaam waarop deze zetstenen zijn aangebracht. Een samenvatting van de eigenschappen van de modelopstelling is weergegeven in Tabel 5.1 en Tabel 5.2.

Tabel 5.1 Overzicht modelopstelling

Faciliteit	Deltagoot (Delft)
Geometrische schaal	1:2
Geteste zetstenen	Hillblock 2.0, type Basis (golfklapzone) Hillblock 2.0, type Slim (golfklapzone) Drainageblock (golfoploopzone) Grassblock (golfoploopzone)
Taludhelling	1:3
Waterstand	Z = 6,00 m

Tabel 5.2 Kenmerkende parameters per type zetsteen

Type zetsteen	Hillblock 2.0 Type Basis	Hillblock 2.0 Type Slim	Drainage-block	Grass-block
Testseries	TS1, TS2, TS3	TS1, TS2, TS3	TS1 (deels)	TS1
Positie op talud, Z	3,2 m - 6,6 m	3,2 m - 6,6 m	6,1 m – 6,6 m	6,6 m – 7,0 m
Dikte toplaag, D	0,178m	0,179 m	0,118 m	0,096 m
Dikte filterlaag	7 cm	7 cm	7 cm	Geen filter
Soortelijke massa	2307 kg/m <sup>3</sup>	2295 kg/m <sup>3</sup>	2297 kg/m <sup>3</sup>	2281 kg/m <sup>3</sup>
Open oppervlakte	10,2 %	10,2 %	10,2 %	8,4 %
Karakteristiek korreldiameter filter, $D_{f15}$	11,5 mm	11,5 mm	11,5 mm	n.v.t.
Karakteristiek korreldiameter inwas $D_{15}$	4 mm	4 mm	3,5 mm	4 mm

### 5.2 Hillblock 2.0

Bij de korteduurproeven is geen bezwijken opgetreden ondanks de hoogst mogelijke golfcondities die uitgevoerd kunnen worden in de Deltagoot. Bij de langeduurproeven ( $H_s = 1,92$  m en  $s_{op} = 0,04$ ) zijn de Hillblocks 2.0 van het type Basis na 6862 golven (ruim 8,5 uur) bezweken. De Hillblocks 2.0 van het type Slim zijn bij die belasting niet bezweken.

Bij de Hillblock 2.0 bleek bezwijken later op te treden dan berekend met Steentoets. Op basis van de proefresultaten is de stabiliteitsfactor bepaald (blokmaten op ware grootte):

- Hillblock 2.0 van het type Basis,  $D = 0,36$  m  $f_{\text{stabiliteit}} = 1,35$
- Hillblock 2.0 van het type Slim,  $D = 0,36$  m  $f_{\text{stabiliteit}} = 1,35$

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Hillblocks 2.0 van 36 cm hoog (op schaal 1:2, dus 18 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van

zuilhoogtes, namelijk van 20 cm tot 70 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte.

Een essentiële voorwaarde voor toepassing van de conclusie op basis van de 36 cm Hillblock 2.0 naar andere topaagdiktes, is dat de vorm en eigenschappen van de Hillblocks 2.0 goed vergelijkbaar moeten zijn. Hierbij dient onder andere te worden gedacht aan het feit dat de kop van de Hillblock 2.0 iets groter is dan de voet, de groef in de voet, de hoogte van de voet, de tapsheid van de voet et cetera.

De stabiliteitsfactor voor Hillblock 2.0 is hoog ten opzichte van andere steenzettingen. Deze hoge stabiliteitsfactor betekent dat dit een hightech systeem is, dat zijn stabiliteit onder andere ontleent aan een optimale samenwerking tussen de betonnen elementen en het inwasmateriaal.

Om deze hoge stabiliteitsfactor ook in de praktijk te kunnen toepassen, moet ook in de praktijk ervoor gezorgd worden dat deze optimale samenwerking gerealiseerd wordt. Dat vereist heldere instructies voor de aannemer en gedegen toezicht tijdens de aanleg van deze steenzetting. Daarnaast moet bij het beheer en onderhoud van zetstenen erop gelet worden dat het inwasmateriaal altijd in voldoende mate aanwezig is.

### 5.3 Drainageblock in golfoploopzone

De Drainageblocks waren in dit onderzoek aanwezig tot test P04, toen grote schade ontstond aan de Grassblocks. Tijdens alle proeven met Drainageblocks is er geen schade ontstaan aan deze bekleding. De zwaarste golfcondities die gedurende een volledige proef zijn weerstaan, waren  $H_{m0}/(\Delta D) = 10,92$  bij een golfsteilheid van 2%.

Hoewel tijdens het ontstaan van de schade aan de Grassblocks in proef P04 de Drainageblocks er nog perfect bij lagen, kan op basis hiervan de bezwijkgolffhoogte van Drainageblocks niet worden vastgesteld.

Voor een voorlopig ontwerp van een dijkbekleding in de golfoploopzone bestaande uit Drainageblocks kan vooralsnog worden volstaan door een Steentoets analyse uit te voeren met  $f_{stab} = 1,0$ . Voor een definitief ontwerp wordt aanbevolen om aanvullende testen uit te voeren omdat daarmee wellicht aangetoond kan worden dat een hogere stabiliteitsfactor kan worden toegepast.

### 5.4 Grassblock in golfoploopzone

De Grassblocks in de golfoploopzone zijn tijdens de eerste proevenserie met golfsteilheid van 2% pas bezweken bij een golffhoogte die beduidend hoger is dan volgens Steentoets. Schade is ontstaan bij  $H_{m0}/(\Delta D) = 13,97$ .

Uit dit resultaat kan echter geen stabiliteitsfactor worden afgeleid, omdat er slechts één proevenserie is uitgevoerd. Het geeft echter wel aan dat de stabiliteit vrij groot is ten opzichte van Steentoets.

Voor een voorlopig ontwerp van een dijkbekleding in de golfoploopzone bestaande uit Grassblocks kan vooralsnog worden volstaan door een Steentoets analyse uit te voeren waarbij een conservatie ontwerp verkregen wordt met  $f_{stab} = 1,0$ . Voor een definitief ontwerp wordt aanbevolen om aanvullende testen uit te voeren omdat daarmee waarschijnlijk aangetoond kan worden dat een hogere stabiliteitsfactor kan worden toegepast.

## 6 Literatuur

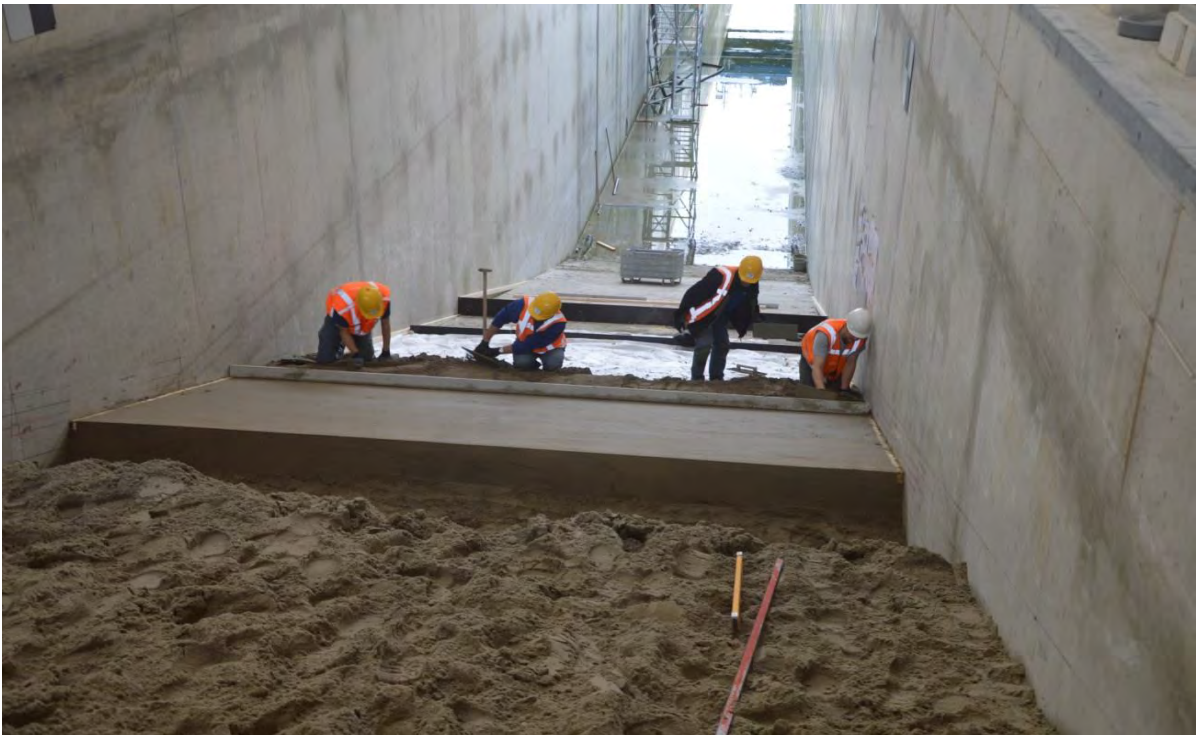
- Bezuijen, A., Burger, A.M. en M. Klein Breteler, 1990. *Taludbekledingen van gezette steen*. ISBN: 90-9003232-0
- Klein Breteler, M. (2015), *Documentatie Steentoets2015, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*, rapport 1209832-006-HYE-0010, versie 15.1.4.1, Deltares, dec. 2015
- Mansard, E., en E. Funke, 1980, *The measurement of incident and reflected spectra using a least-square method*. Proc. ICCE'80, ASCE pp154-172 Sydney
- TAW, 2002, *Technisch Rapport Golfploop en Golfoverslag op Dijken*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, mei 2002
- Van Steeg, P., 2012, *Stabiliteit van taludbekleding met Hillblocks bij golfaanval*, Deltares rapport 1202901-000-HYE-0014
- Van Steeg, P., 2015a, *Stabiliteit van steenzetting met Testblokken bij golfaanval. Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken*, Deltares rapport 1208618-009-HYE-0018, mrt 2016
- Van Steeg, P., 2015b, *Analyse golfploopreductie Hillblock taludbescherming; Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken*, Deltares rapport 1208618-009-HYE-0017, november 2015
- Van Steeg, P., Klein Breteler, M., Provoost, Y., 2016, *Large-scale physical model tests to determine influence factor of roughness for wave run-up of channel shaped blocks revetments*, Proceeding Coastlab 2016, Ottawa, Canada, May 10-13 2016
- Van Steeg, P., 2016, *Stabiliteit van Grassblocks op de kruin en het binnentalud van een dijk (werktitel)*. Deltares rapport in wording.



## A Foto's

- Foto A.1 Aanbrengen van het zand. Aanbrengen van de zand-cement stabilisatie*
- Foto A.2 Aanbrengen van het filter. Plaatsen van de Hillblocks 2.0*
- Foto A.3 Plaatsen van de Drainageblocks. Plaatsen van de Grassblocks*
- Foto A.4 Plaatsen van houten oploopschot*
- Foto A.5 Overzicht modelopstelling voor aanvang testen*
- Foto A.6 Impressie golfbelasting tijdens testen (1)*
- Foto A.7 Impressie golfbelasting tijdens testen (2)*
- Foto A.8 Impressie golfbelasting tijdens testen (3)*
- Foto A.9 Schade aan Grassblocks na Test P04*
- Foto A.10 Hersteld talud na Test P04 (1)*
- Foto A.11 Hersteld talud na Test P04 (2)*
- Foto A.12 Schade aan bekleding na Test P012 (1)*
- Foto A.13 Schade aan bekleding na Test P012 (2)*





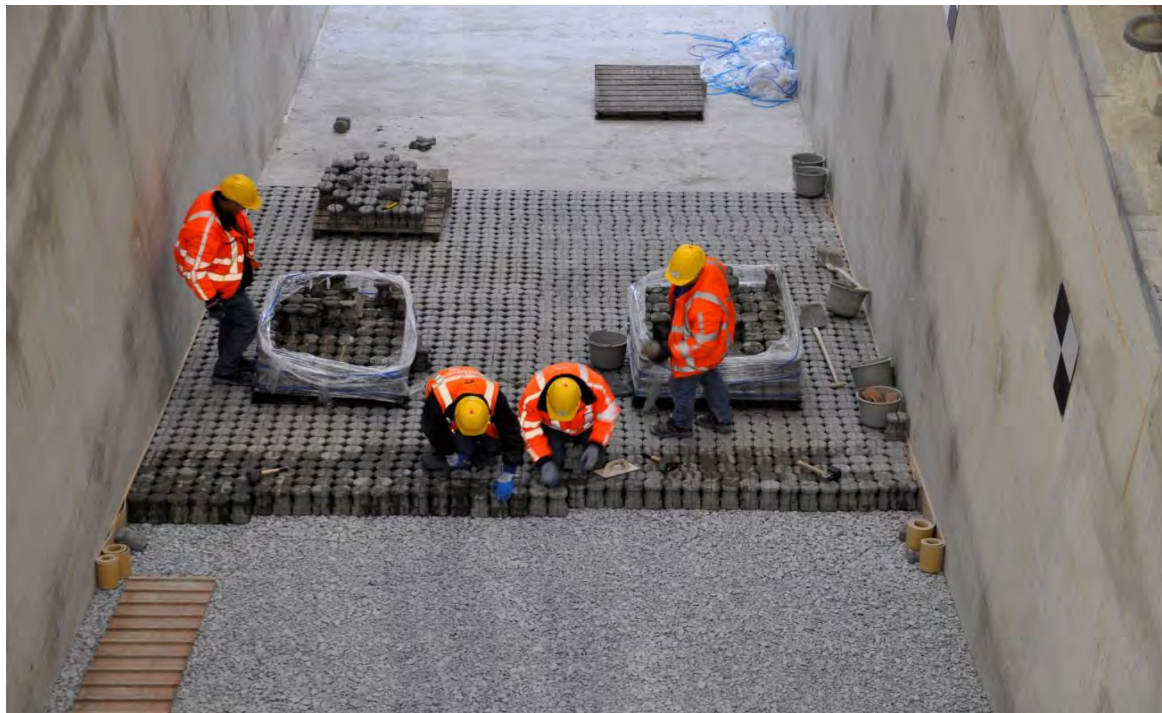
Aanbrengen van het zand

Aanbrengen van de zand cement stabilisatie

1220668

**Deltares**

Fig. A.1



Aanbrengen van het filter

Plaatsen van de Hillblocks

1220668

**Deltares**

Fig. A.2





Plaatsen van de Drainageblocks

Plaatsen van de Grassblocks

1220668

**Deltares**

Fig. A.3

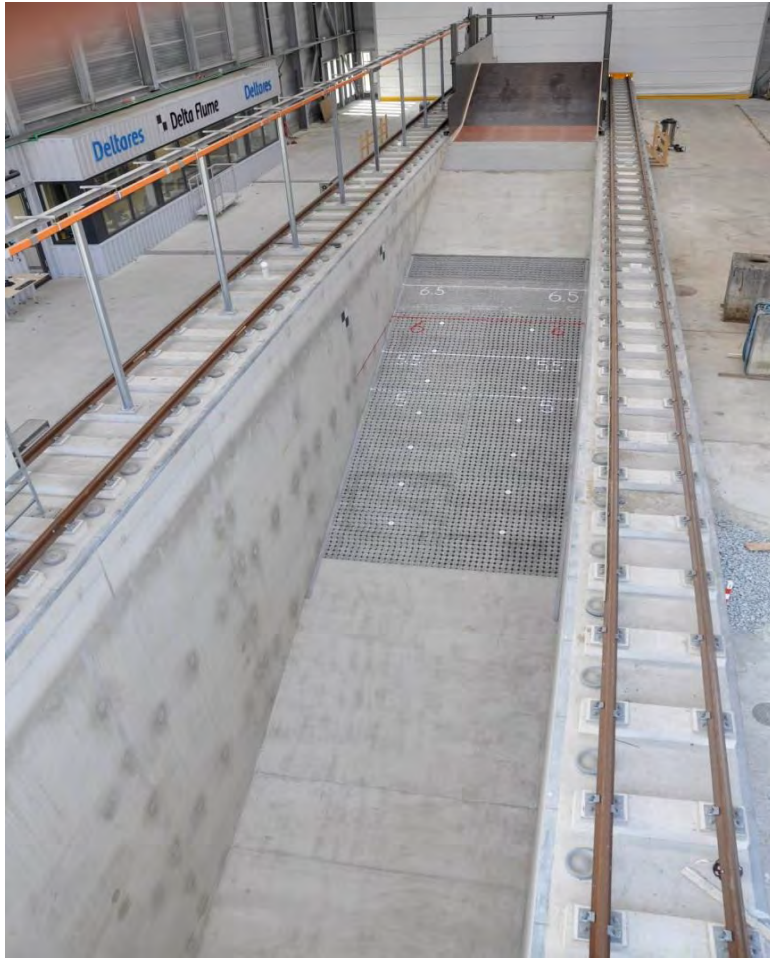


Plaatsen van houten oploopschot

1220668

**Deltares**

Fig. A.4



Overzicht modelopstelling voor aanvang testen

1220668

**Deltares**

Fig. A.5

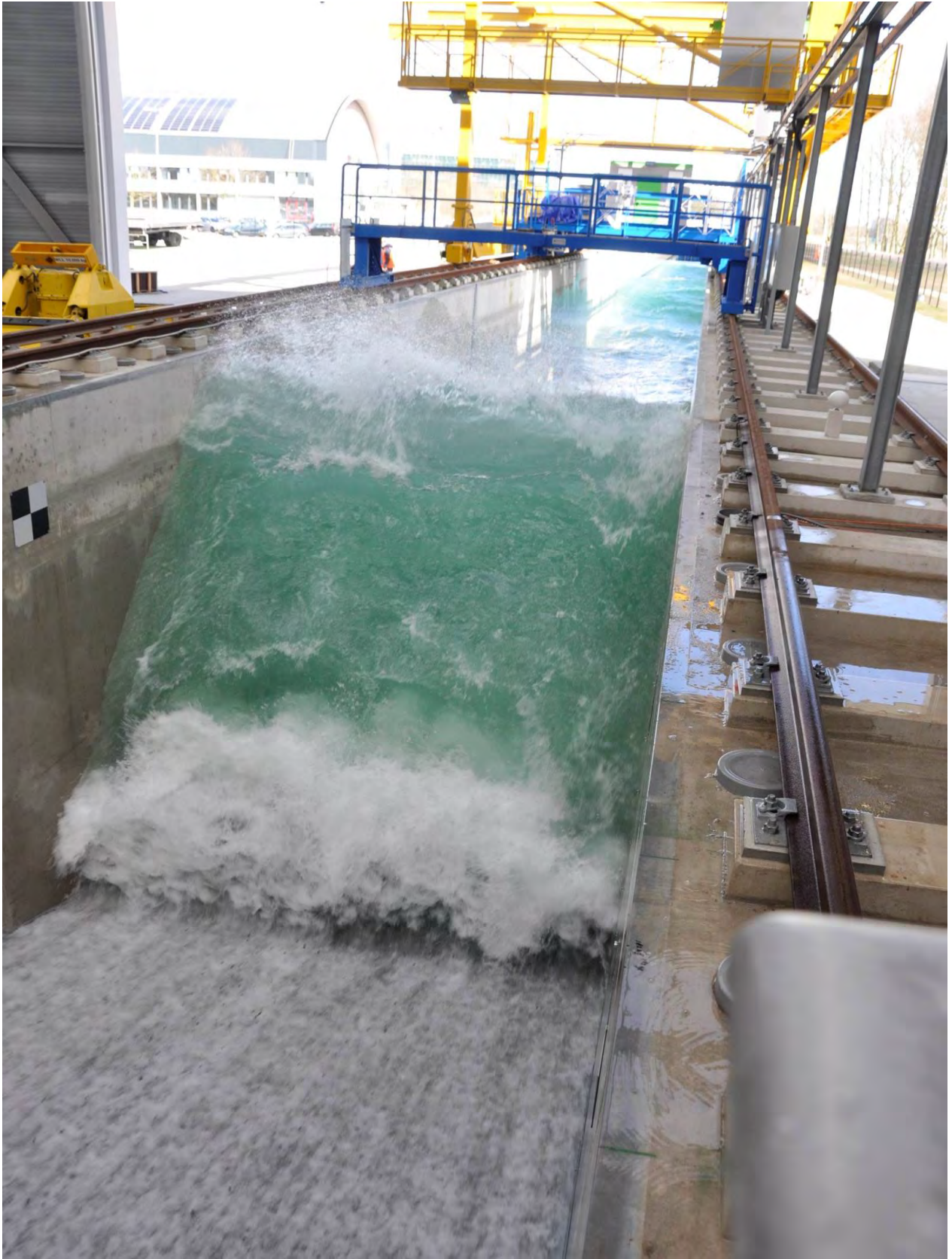


Impressie golfbelasting tijdens testen (1)

1220668

Deltares

Fig. A.6



Impressie golfbelasting tijdens testen (2)

1220668

**Deltares**

Fig. A.7



Impressie golfbelasting tijdens testen (3)

1220668

**Deltares**

Fig. A.8



Schade aan Grassblocks na Proef P04

1220668

Deltares

Fig. A.9



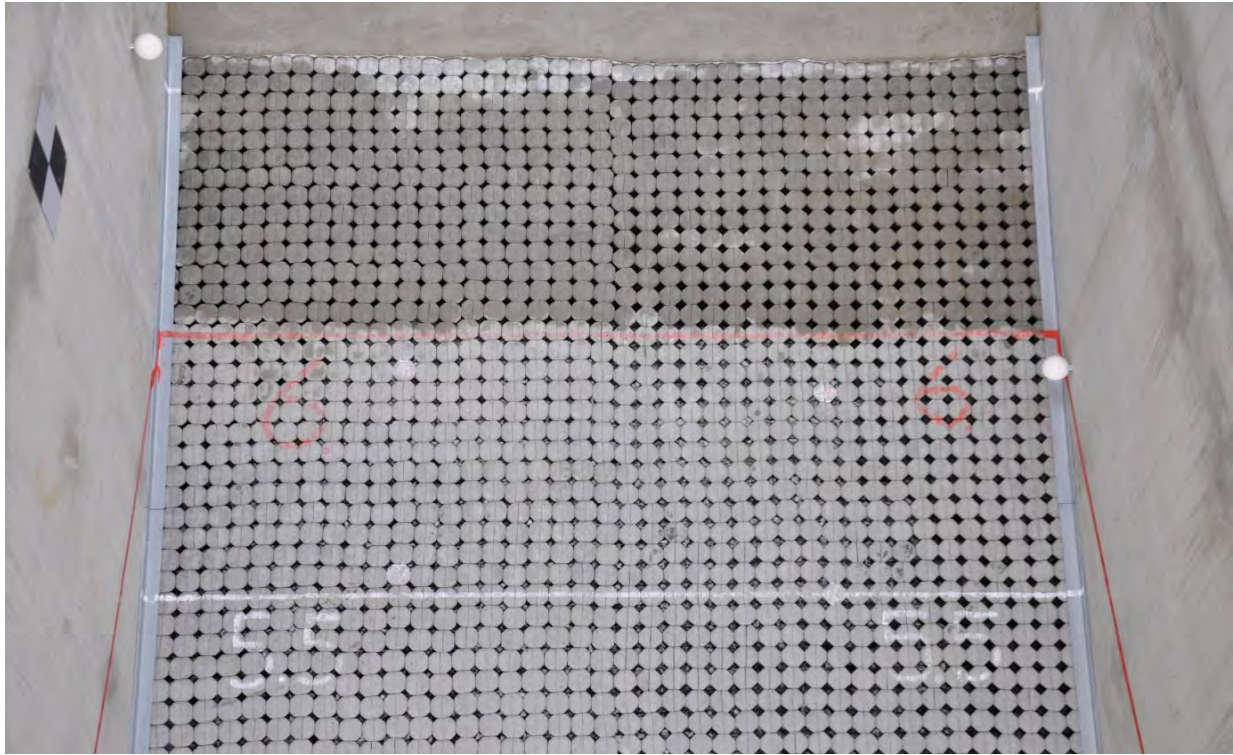
Hersteld talud voor Proef P05 (1)

1220668

**Deltares**

Fig. A.10



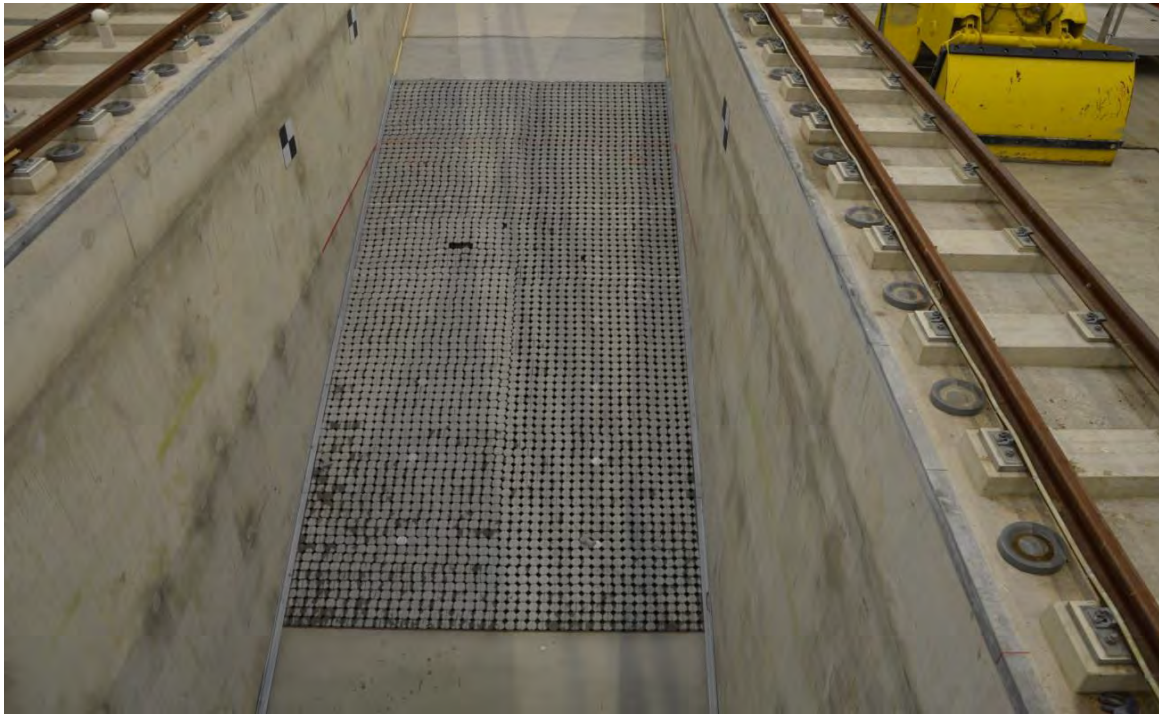


Hersteld talud voor Proef P05 (2)

1220668

**Deltares**

Fig. A.11



Schade aan bekleding na Proef P012 (1)

1220668

**Deltares**

Fig. A.12



Schade aan bekleding na Proef P012 (2)

1220668

**Deltares**

Fig. A.13



## B Figuren

*Figuur B.1 Korrelverdeling filter Hillblock 2.0 en Drainageblock*

*Figuur B.2 Korrelverdeling inwasmateriaal Hillblock 2.0 en Grassblock*

*Figuur B.3 Korrelverdeling inwasmateriaal Drainageblock*

*Figuur B.4 Uitspoeling inwasmateriaal. Serie 1, Hillblock 2.0 van het type Basis*

*Figuur B.5 Uitspoeling inwasmateriaal. Serie 1, Hillblock 2.0 van het type Slim*

*Figuur B.6 Uitspoeling inwasmateriaal. Serie 2, Hillblock 2.0 (type Basis en Slim)*

*Figuur B.7 Uitspoeling inwasmateriaal. Serie 3, Hillblock 2.0 (type Basis en Slim)*

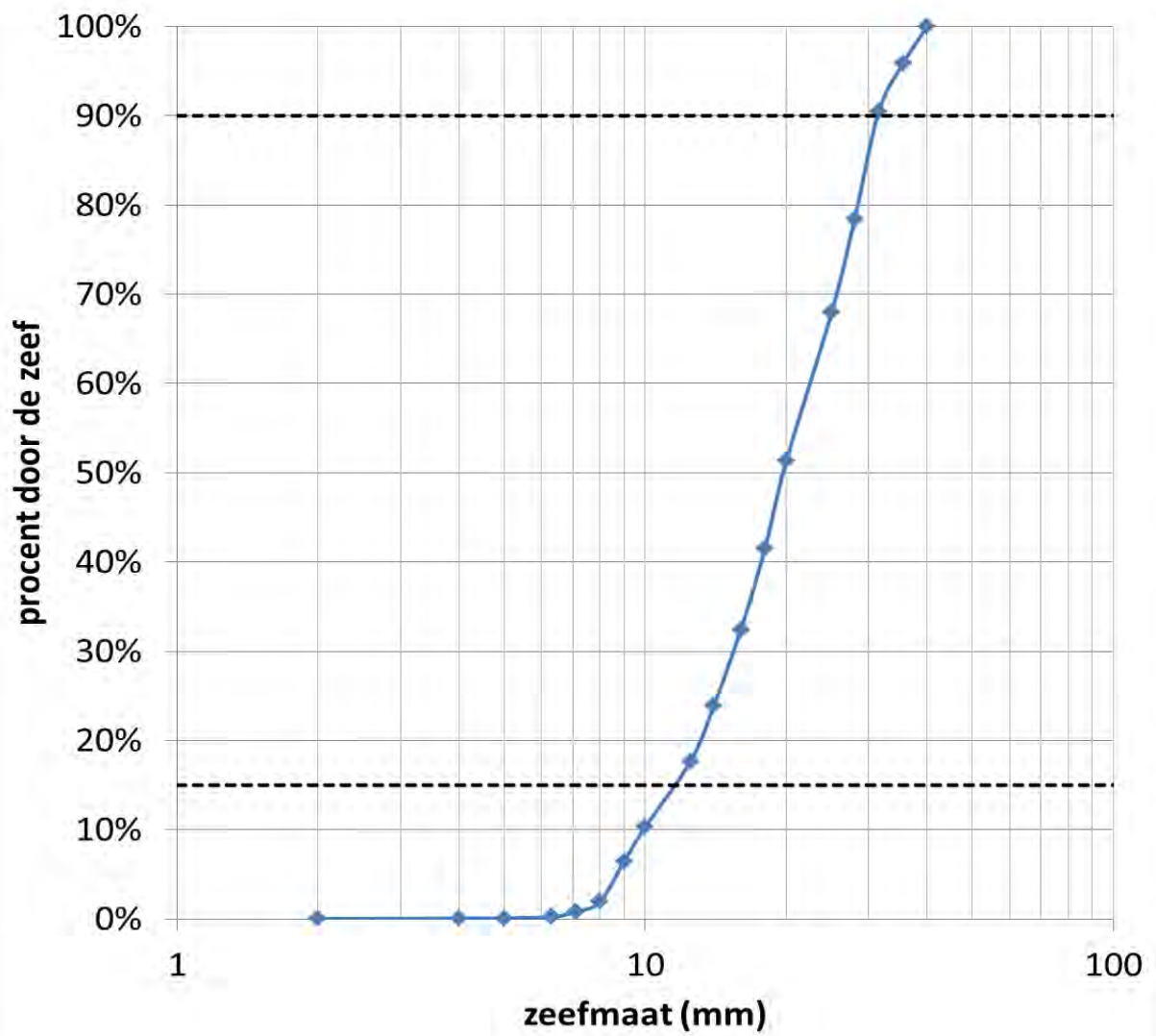
*Figuur B.8 Specificaties geotextiel*

*Figuur B.9 Impressie Hillblock van het type Basis*

*Figuur B.10 Impressie Hillblock van het type Slim*

*Figuur B.11 Impressie Drainageblock*

*Figuur B.12 Impressie Grassblock*



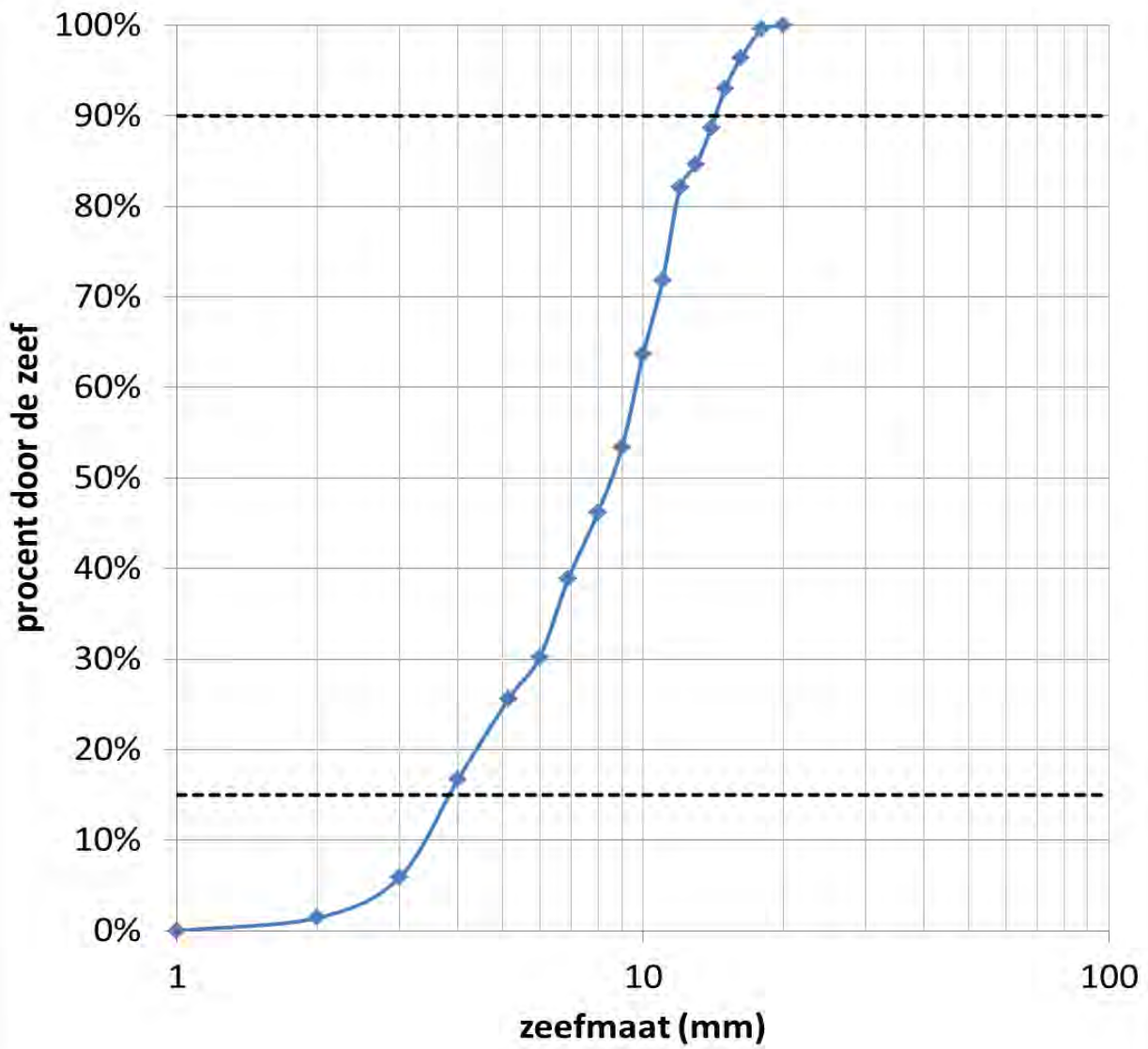
korrelverdeling filter

Hillblock en Drainageblock

1220668

**Deltares**

Fig. B.1



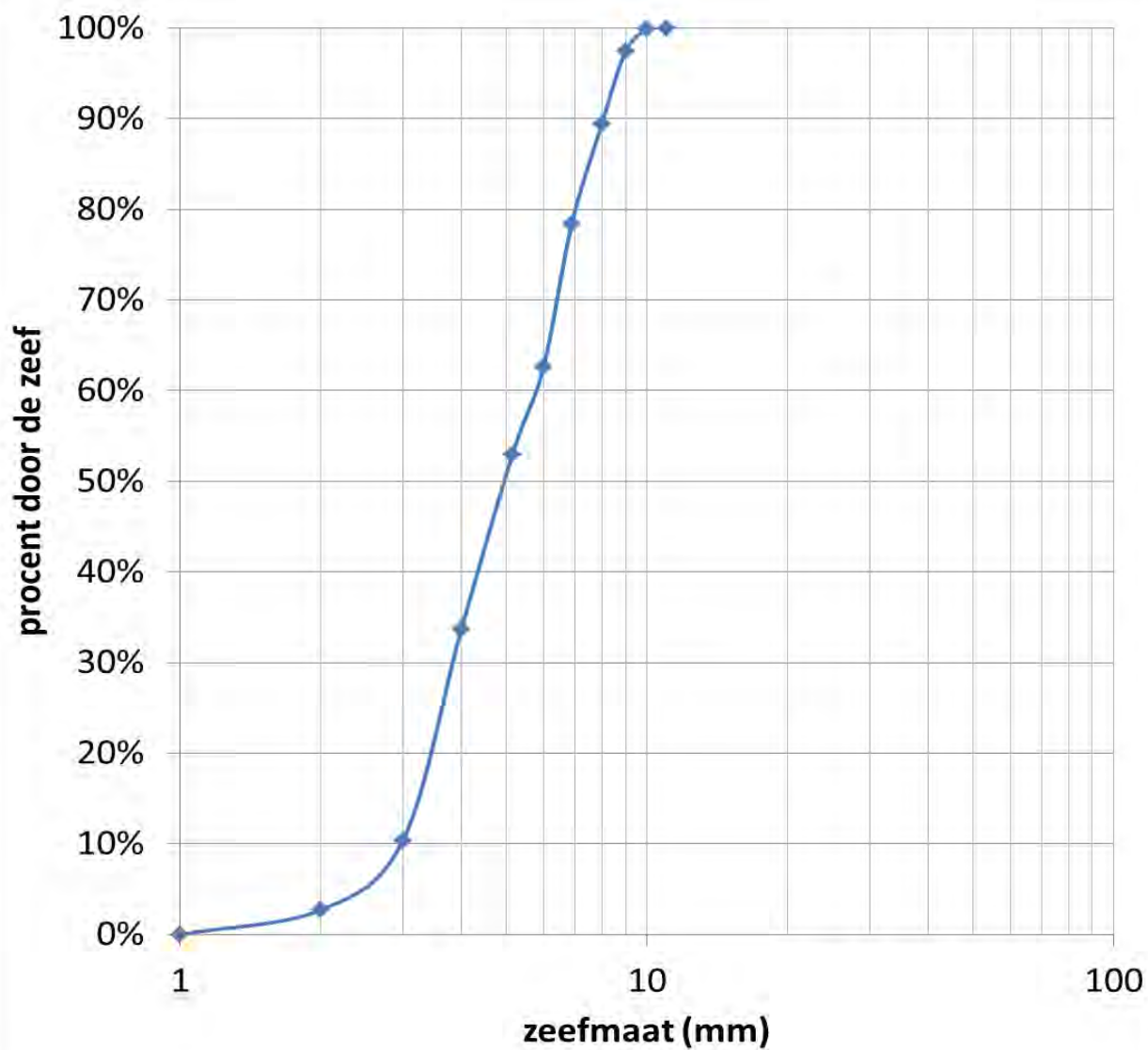
korrelverdeling inwasmateriaal

Hillblock en Grassblock

1220668

**Deltares**

Fig. B.2



korrelverdeling inwasmateriaal

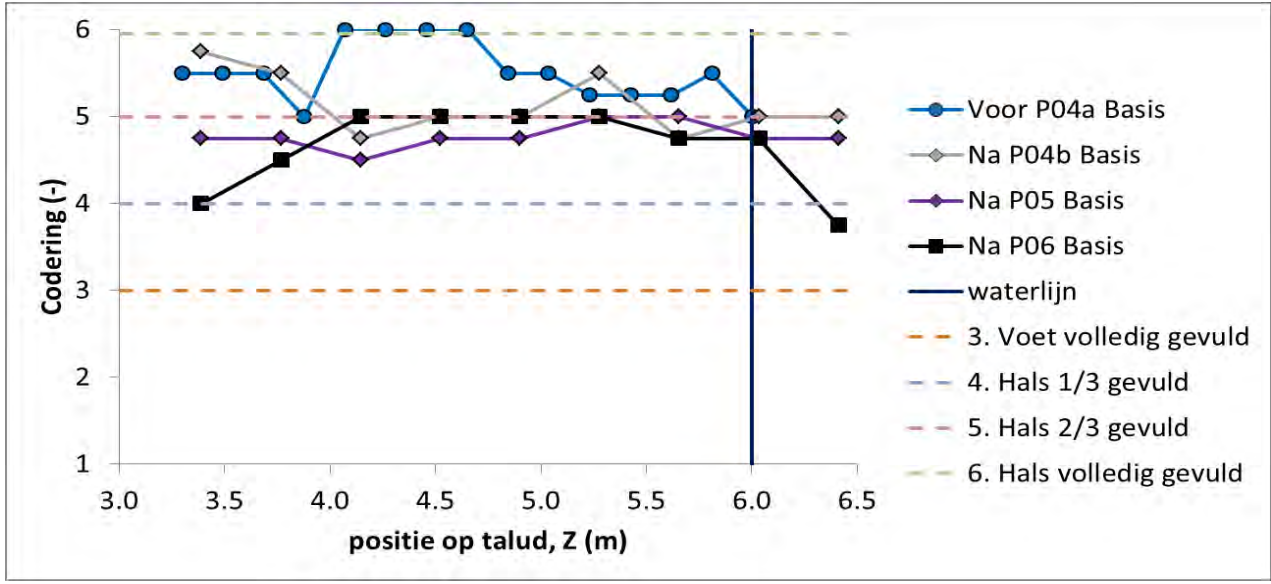
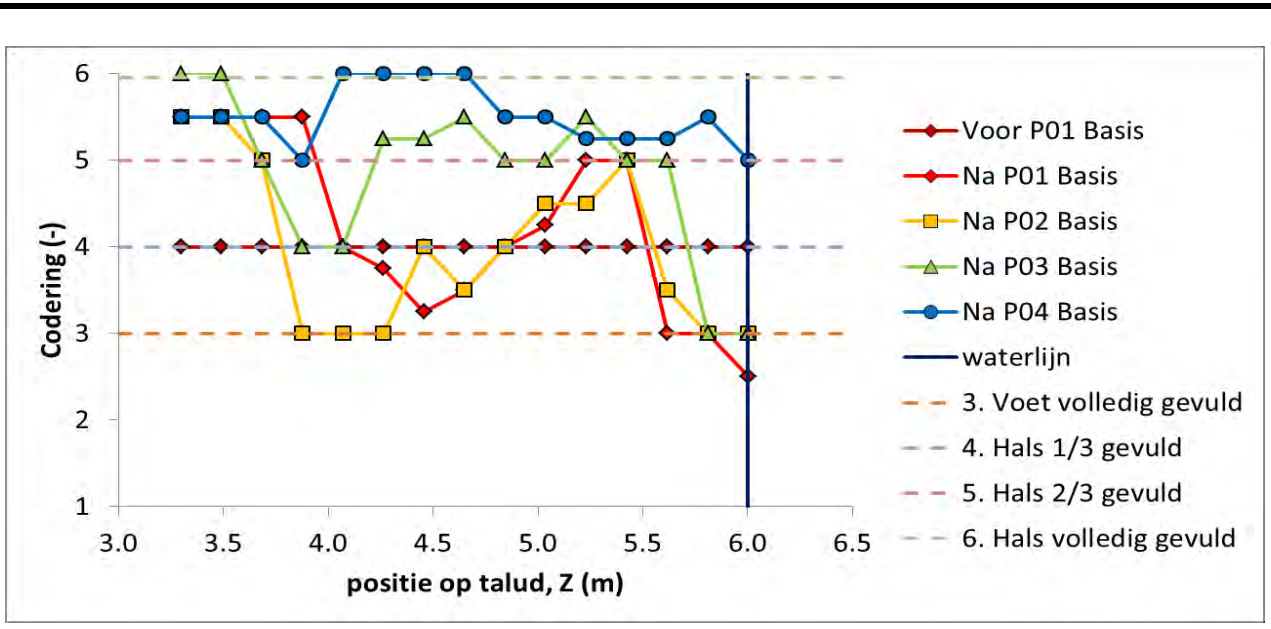
Drainageblock

1220668

**Deltares**

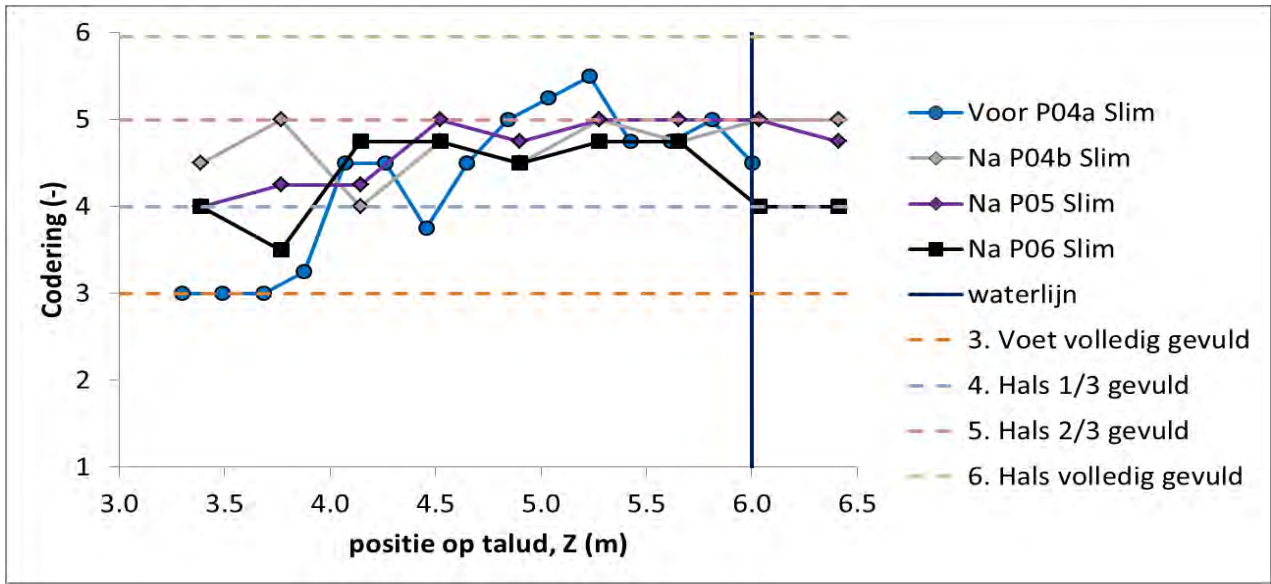
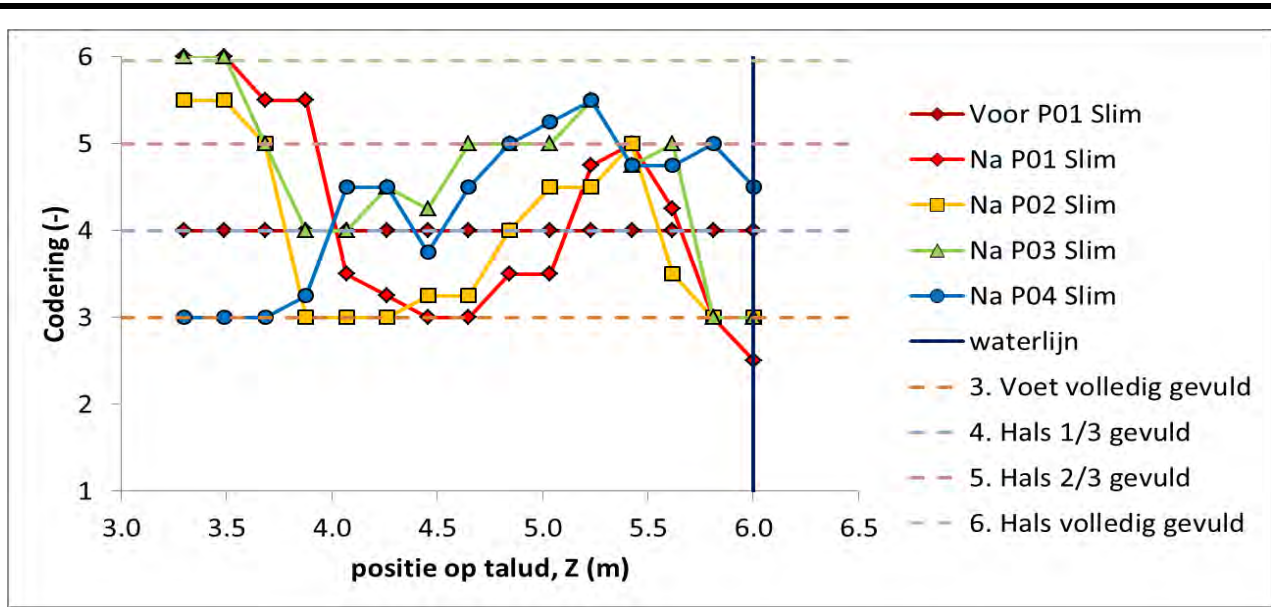
Fig. B.3





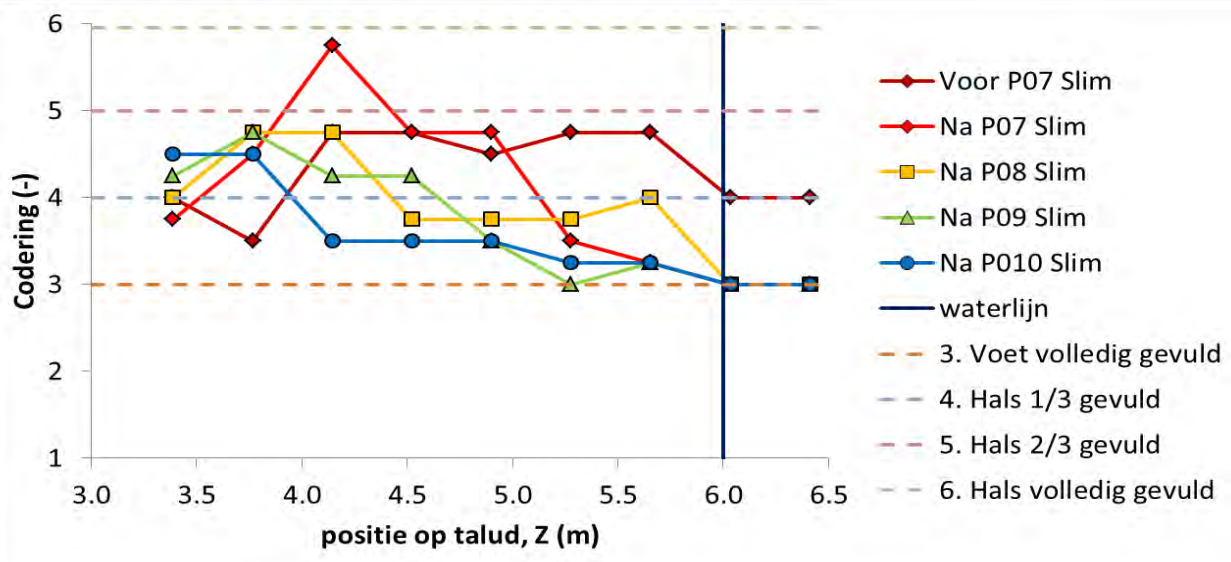
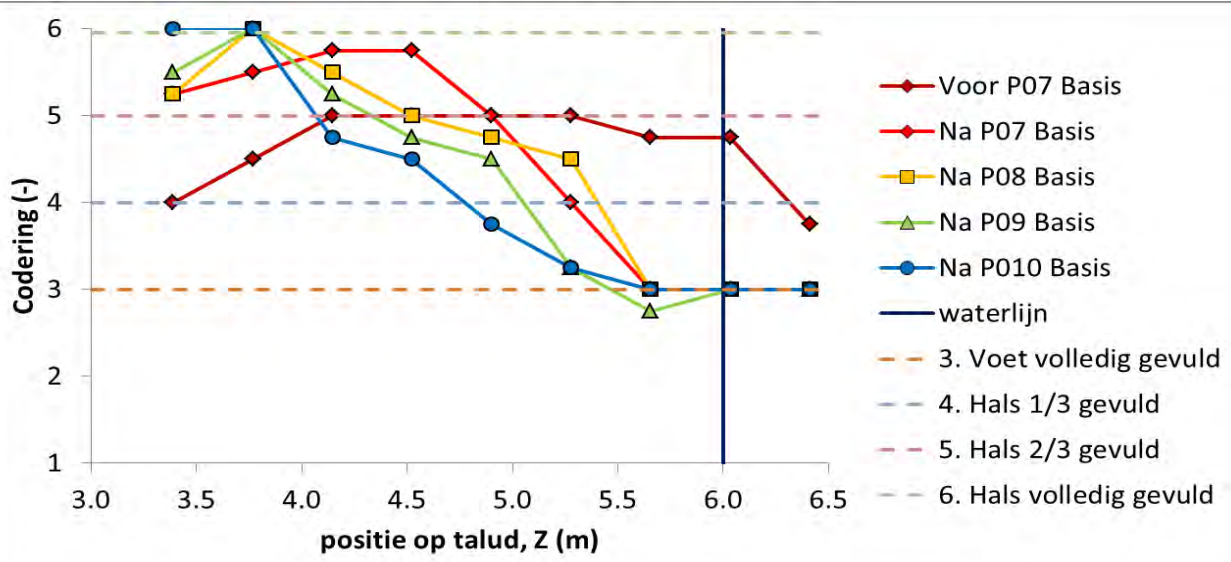
Tijdens P04 trad er schade op aan de Grassblocks en de Drainageblocks. Hierdoor spoelde er filtermateriaal, welke onder de Grassblocks lag, tussen de Hillblocks (voornamelijk de Hillblocks van het type Basis)

Uitspoeling inwasmateriaal		
Serie 1, Hillblock van het type Basis		1220668
Deltares		Fig. B.4



Tijdens P04 trad er schade op aan de Grassblocks en de Drainageblocks. Hierdoor spoelde er filtermateriaal, welke onder de Grassblocks lag, tussen de Hillblocks (voornamelijk de Hillblocks van het type Basis)

Uitspoeling inwasmateriaal		
Serie 1, Hillblock van het type Slim		1220668
<b>Deltares</b>		Fig. B.5



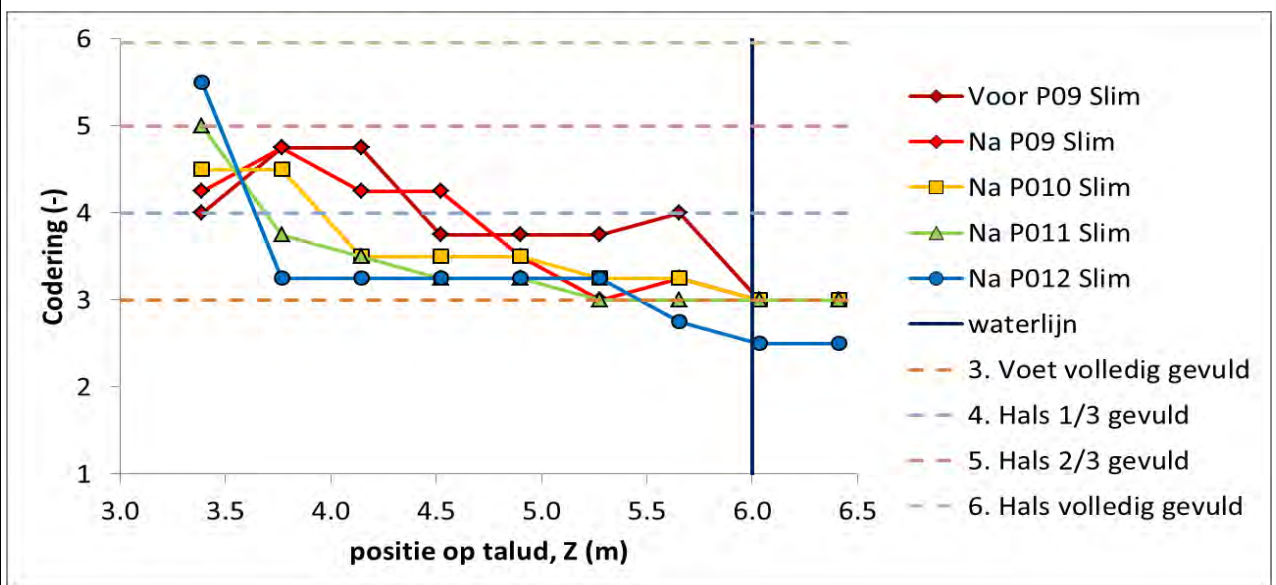
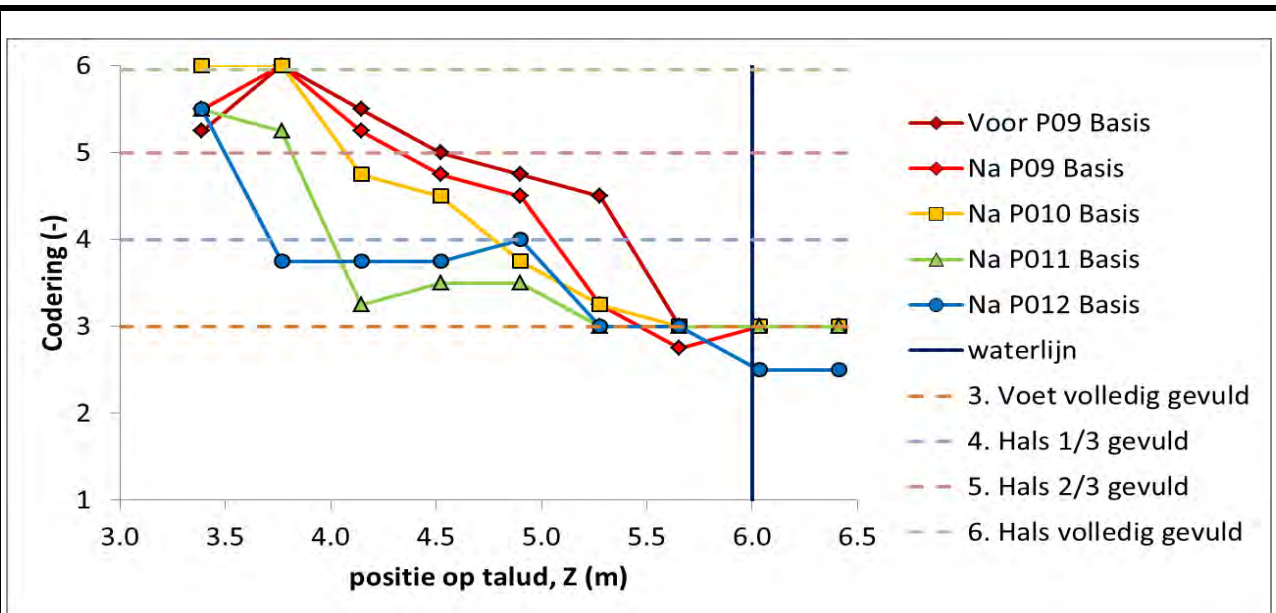
Uitspoeling inwasmateriaal

Serie 2, Hillblock (type Basis en type Slim)

1220668

Deltares

Fig. B.6



Uitspoeling inwasmateriaal

Serie 3, Hillblock (type Basis en type Slim)

1220668

Deltares

Fig. B.7



Certificaat: 0338-CPD-689

test	test methode	eenheid
<b>Materiaal</b>		
Gewicht (Ariëke massa)	EN-965	gram per m <sup>2</sup>
Dikte (2 kN/m <sup>2</sup> )		
Treksterkte machinerichting	EN-ISO 10319	kN/m <sup>1</sup>
dwarsrichting		kN/m <sup>1</sup>
Rek bij breuk machinerichting		%
dwarsrichting		%
C.B.R. Test Doordrukkracht	EN-ISO 12236	kN
Kegelvalproef gatdiameter	EN 918	mm
Zanddichtheid O 90 (natte zeeftest)	EN ISO 12 956	µg
Waterdoorlaatbaarheid V-Index (20°C) debiet bij 5 cm waterkolom	EN ISO 11 058	m/s
Permittiviteit		l/m <sup>2</sup> .sec sec <sup>-1</sup>

Geopex NW 270 (S22NW) Type 1		Tolerantie
genaaldprikt/ thermisch gebonden PP vlies		
270		±20
1,8		0,3
22		±2,5
22		±2,5
55		±10
55		±10
3,8		±0,4
16		±4
0,07		±10
0,07		
70		±20
1,4		

Weerstand tegen verouderen	ENV 13438	
De reststerkte (RV) na 56 dagen beproeving in % van de aanvangsterkte.	ENV 13438	%
Low Leach stabilisatoren		

Verwachte levensduur > 50 jaar in natuurlijke grond met 4 < pH < 9 pH en een grondtemperatuur van < 25°C
> 90
Hals stabilisatoren

Rollbreedte		cm
Rollengte		m

540
100

**Toepassing en gebruik niet geweven geotextielen**

EN 13249	EN 13250	EN 13251	EN 13252	EN 13253	EN 13254	EN 13255	EN 13257	EN 13265
F	F	F	F	F	F	F	F	F
R	R	R	D	R	R	R	R	R
F+S	F+S	F+S	F+S	F+S	F+S	F+S	F+S	F+R
R+S	R+S	R+S	F+D	R+S	R+S	R+S	R+S	
F+R	F+R	F+R	F+S+D	F+R	F+R	F+R	F+R	
F+R+S	F+R+S	F+R+S		F+R+S	F+R+S	F+R+S	F+R+S	

Alle Geopex PP geotextielen worden extern gecontroleerd en dragen het CE keurmerk. De productie van de Geopex NW geotextielen is geïntificeerd volgens ISO 9001:2000. Bovengenoemde waarden zijn gemiddelde waarden, verkregen met behulp van standaard testmethoden

**GEOPEX PRODUCTS (EUROPE) B.V.**  
 Postbus 20, 2830 AA GOUDERAK  
 Middelblok 164, 2831 BR GOUDERAK  
 Tel: (0182) 377 327  
 Fax: (0182) 377 329  
 E-mail: europe@geopex.com  
 Internet: www.geopex.com

Geotextiel		
	1220668	
Deltares		Fig. B.8

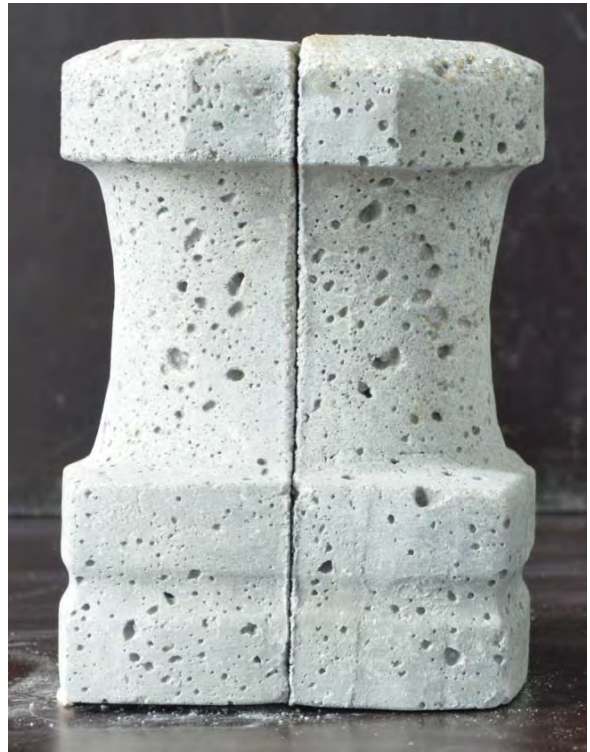


Impressie Hillblock van het type Basis

1220668

**Deltares**

Fig. B.9



Impressie Hillblock van het type Slim

1220668

**Deltares**

Fig. B.10



Impressie Drainageblock

1220668

**Deltares**

Fig. B.11





Impressie Grassblock

1220668

**Deltares**

Fig. B.12





## C Tabellen

*Tabel C.1 Proevenprogramma*

*Tabel C.2 Wrijvingscoëfficiënt Hillblock 2.0 van het type Basis*

*Tabel C.3 Wrijvingscoëfficiënt Hillblock 2.0 van het type Slim*

*Tabel C.4 Wrijvingscoëfficiënt Drainageblock*

Tabel C.1 Proevenprogramma

	Proef	h	$H_{m0}$	$T_p$	$T_{m-1.0}$	$T_m$	$s_{op}$	$\xi_{op}$	$N$	$t$	$t$	$t_{cum}$	$H_{m0,eq}$	$N_{equi}$	$t_{equi}$	$t_{equi,cum}$	Opmerking
		(m)	(m)	(s)	(s)	(s)	(-)	(-)	(-)	(s)	(uur)	(uur)	(m)	(-)	(uur)	(uur)	
Serie 1	P01	6.00	0.87	5.35	4.92	4.08	0.020	2.39	425	1734	0.5	-					
	P02	6.00	1.18	5.89	5.42	4.54	0.022	2.26	976	4432	1.2	-					
	P03	6.00	1.36	6.61	6.02	5.12	0.020	2.36	1012	5179	1.4	-					Schade aan Grassblock
	P04	5.80	1.57	7.05	6.58	5.59	0.020	2.34	132	737	0.2	-					Schade aan Grassblock
	P04a	5.80	1.60	6.92	6.38	5.34	0.021	2.28	119	636	0.2	-					
	P04b	5.80	1.54	7.00	6.43	5.16	0.020	2.35	611	3155	0.9	-					
	P04_cum	5.80	1.55	6.99	6.45	5.26	0.020	2.34	862	4531	1.3	-					
	P05	6.00	1.72	7.49	6.81	5.53	0.020	2.38	1033	5717	1.6	-					
	P06	6.00	2.01	7.95	7.21	6.01	0.020	2.34	229	1377	0.4	-					
	P06a	6.00	2.05	7.93	7.17	5.89	0.021	2.31	219	1290	0.4	-					
	P06b	6.00	1.84	7.93	7.09	5.54	0.019	2.44	391	2167	0.6	-					
P06c	6.00	1.89	7.93	7.04	5.70	0.019	2.40	166	946	0.3	-						
P06_cum	6.00	1.93	7.93	7.13	5.77	0.020	2.38	1005	5796	1.6	-						
Serie 2	P07	6.00	1.32	4.72	4.40	3.84	0.038	1.71	1092	4198	1.2	-					
	P08	6.00	1.48	4.96	4.57	4.02	0.039	1.70	1089	4376	1.2	-					
	P09	6.00	1.75	5.28	4.99	4.34	0.040	1.66	1077	4677	1.3	-	1.92	896	1.1	1.1	
	P10	6.00	1.92	5.56	5.27	4.63	0.040	1.67	981	4541	1.3	1.3	1.92	976	1.2	2.4	
Serie 3	P11	6.00	1.87	5.74	5.33	4.51	0.036	1.75	96	433	0.1	1.4	1.92	91	0.1	2.5	
	P11a	6.00	1.88	5.61	5.30	4.55	0.038	1.71	1600	7274	2.0	3.4	1.92	1528	1.9	4.4	
	P11b	6.00	1.89	5.61	5.26	4.53	0.038	1.70	1529	6929	1.9	5.3	1.92	1477	1.9	6.3	
	P12	6.00	1.98	5.61	5.35	4.60	0.040	1.66	1789	8231	2.3	7.6	1.92	1895	2.4	8.7	Schade aan Hillblock, Basis
	P09-P12_cum	6.00	1.92	5.60	5.30	4.57	0.039	1.69	5995	27416	7.6	-	1.92	6862	8.7	-	

- $H_{m0}$  significante golfhoogte (m)
- $T_p$  piekperiode (s)
- $T_{m-1.0}$  spectrale periode (s)
- $T_m$  gemiddelde periode (s)
- $s_{op}$  golfsteilheid gebaseerd op de piekperiode (-)
- $\xi_{op}$  breker parameter (-)
- $t$  duur van de proef (s, uur)
- $t_{cum}$  cumulatieve proefduur (s, uur)
- $H_{m0,eq}$  equivalente golfhoogte (m)
- $N_{equi}$  equivalent aantal golven (-)
- $t_{equi}$  equivalente tijdsduur (uur)
- $t_{equi,cum}$  equivalente cumulatieve proefduur (uur)

Tabel C.2 *Wrijvingscoëfficiënt Hillblock 2.0 van het type Basis*

	Meting 1	Meting 2	Meting 3	gemiddeld
vlakke zijde met gewicht (10 kg)	0.60	0.57	0.54	0.57
vlakke zijde zonder gewicht	0.61	0.60	0.60	0.60
gekromde zijde met gewicht (10 kg)	0.54	0.59	0.58	0.57
gekromde zijde zonder gewicht	0.59	0.61	0.61	0.60
gemiddeld				0.59

Tabel C.3 *Wrijvingscoëfficiënt Hillblock 2.0 van het type Slim*

Hillblock Slim	Meting 1	Meting 2	Meting 3	gemiddeld
vlakke zijde met gewicht (10 kg)	0.55	0.55	0.48	0.53
vlakke zijde zonder gewicht	0.46	0.53	0.52	0.50
gekromde zijde met gewicht (10 kg)	0.60	0.58	0.57	0.58
gekromde zijde zonder gewicht	0.54	0.59	0.60	0.58
gemiddeld				0.55

Tabel C.4 *Wrijvingscoëfficiënt Drainageblock*

Drainageblock	Meting 1	Meting 2	Meting 3	gemiddeld
vlakke zijde met gewicht (10 kg)	0.51	0.48	0.45	0.48
vlakke zijde zonder gewicht	0.56	0.55	0.54	0.55
gekromde zijde met gewicht (10 kg)	0.52	0.51	0.52	0.52
gekromde zijde zonder gewicht	0.55	0.59	0.61	0.58
gemiddeld				0.53



## **D Golfhoogte overschrijdingskrommen en spectra**

*Figuur D.1 Serie 1 (P01, P02, P03)*

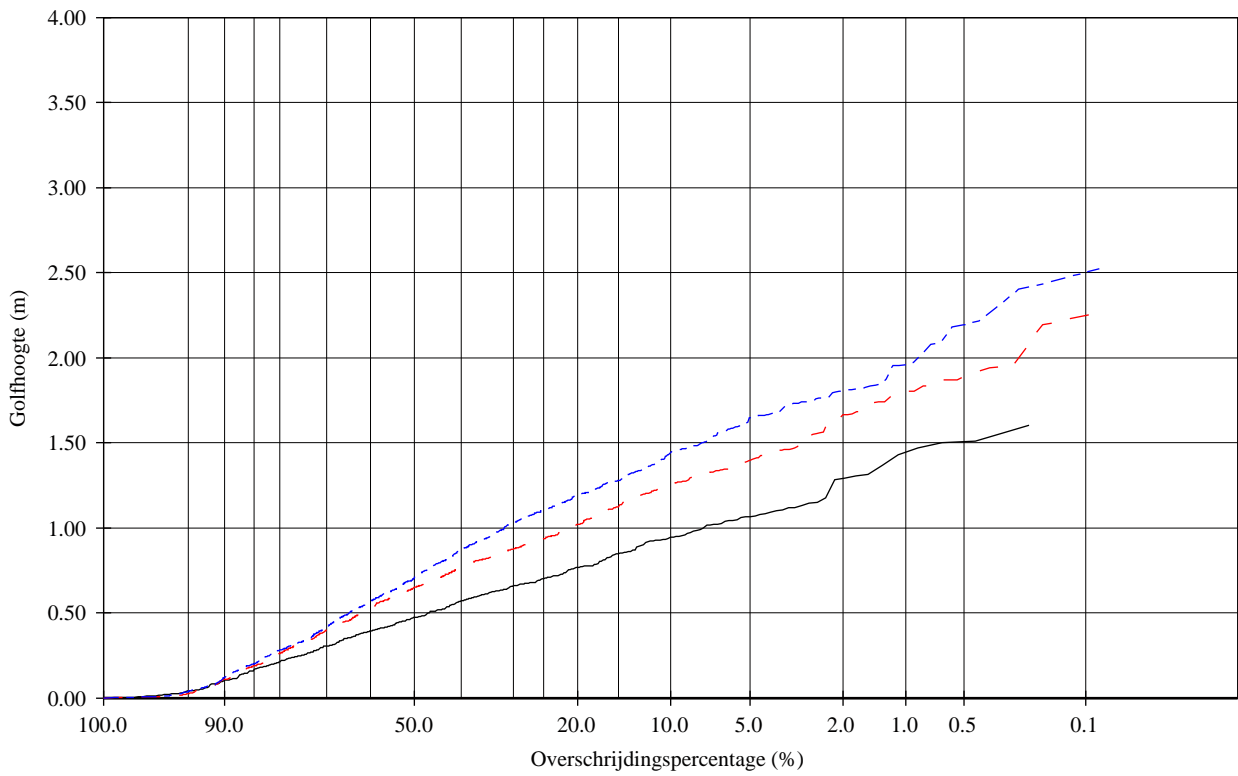
*Figuur D.2 Serie 1 (P04b, P05, P06b)*

*Figuur D.3 Serie 2 (P07, P08, P09, P10)*

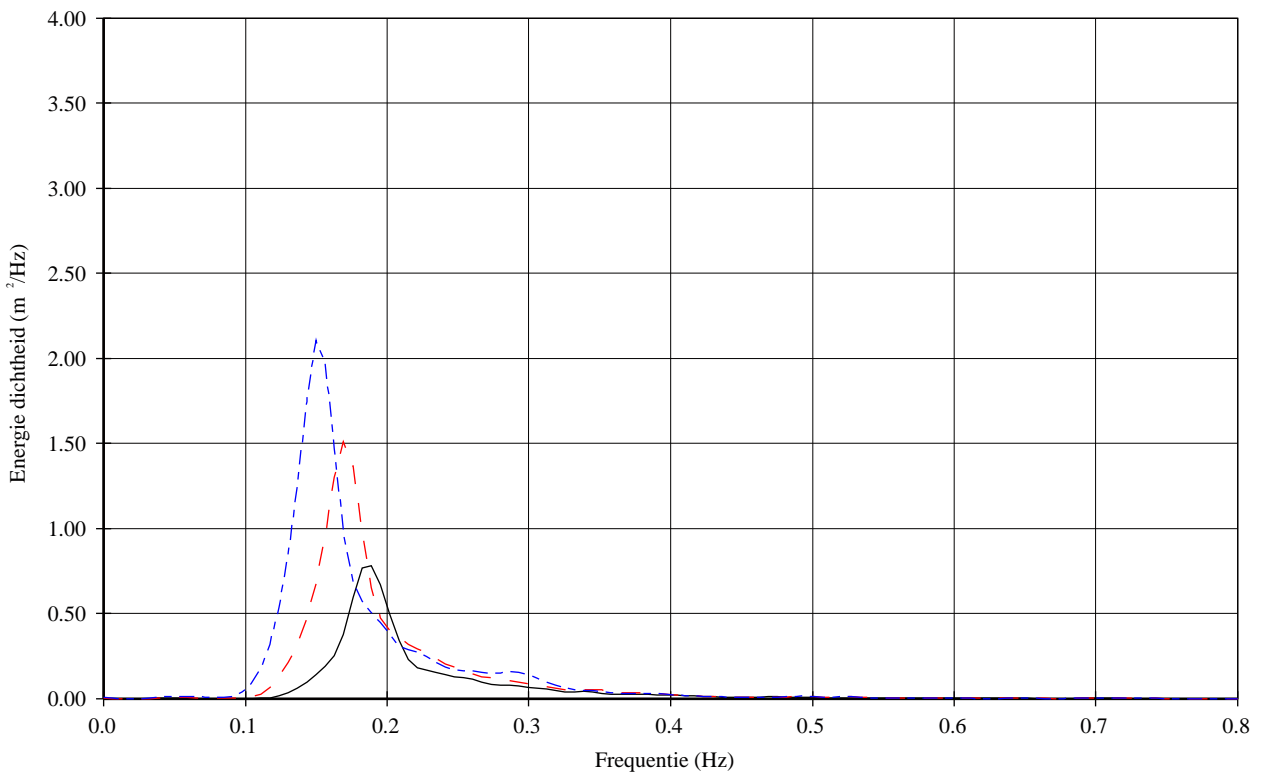
*Figuur D.4 Serie 3 (P12)*







- Serie 1 P001 ( $H_{m0} = 0,87$  m) ( $T_p = 5,35$  s) ( $h = 5,80$  m)
- - - Serie 1 P002A ( $H_{m0} = 1,18$  m) ( $T_p = 5,89$  s) ( $h = 6,00$  m)
- - - Serie 1 P003 ( $H_{m0} = 1,36$  m) ( $T_p = 6,61$  s) ( $h = 6,00$  m)



Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

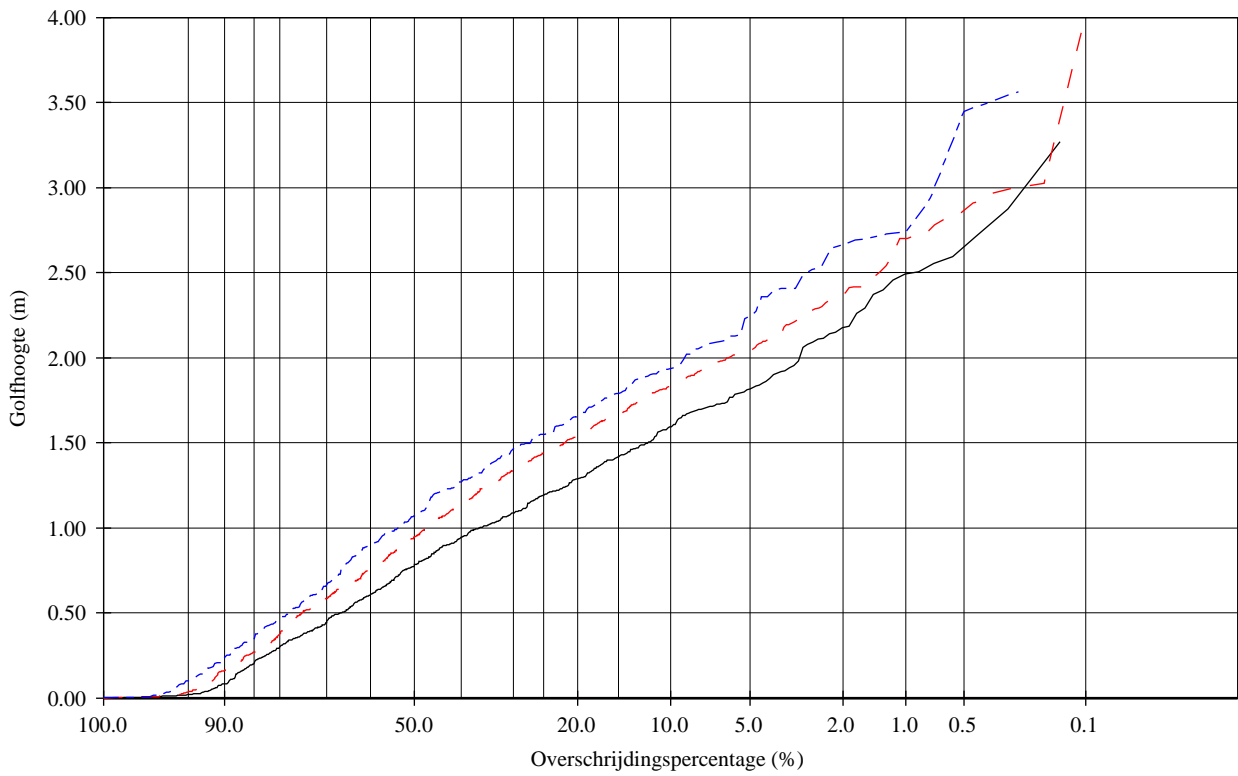
Serie 1 (proeven P001, P002A, P003)

Inkomende golven

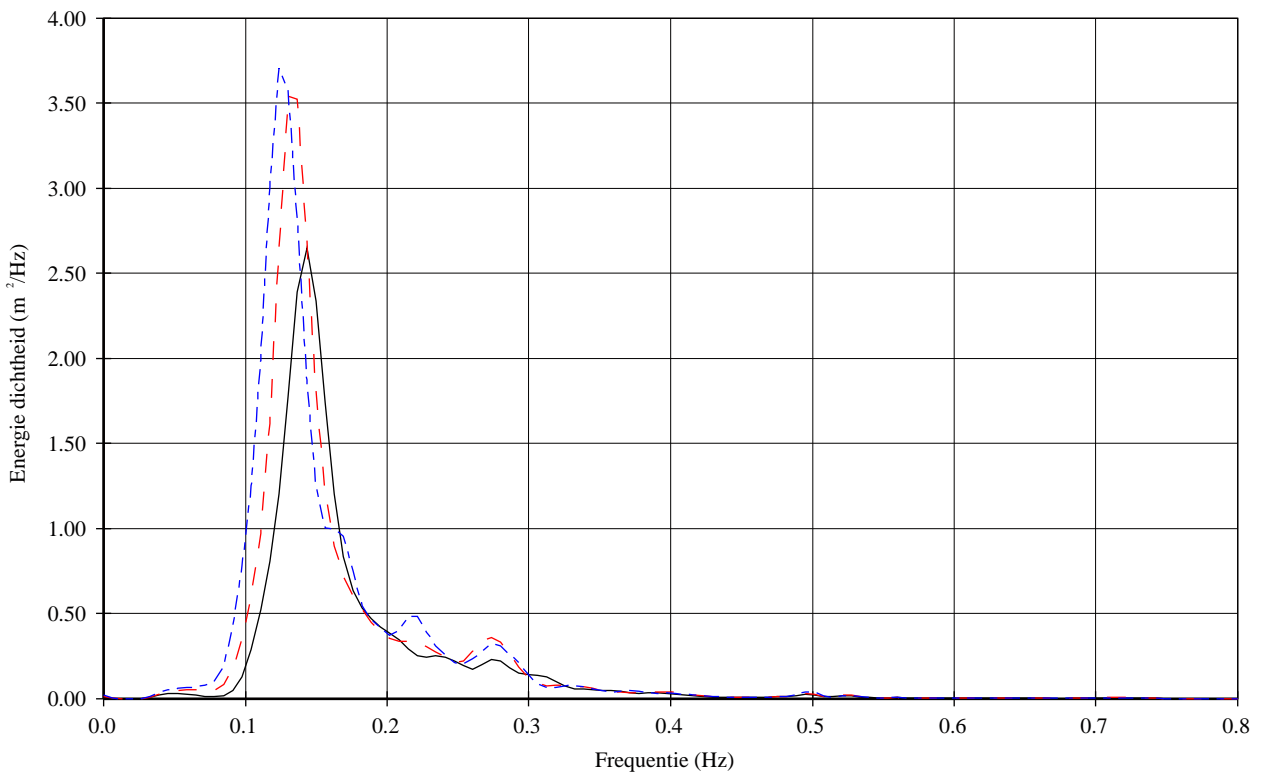
**Deltares**

1220688

Bijlage D.1



- Serie 1 P004B ( $H_{m0} = 1,54$  m) ( $T_p = 7,00$  s) ( $h = 5,80$  m)
- - - Serie 1 P005 ( $H_{m0} = 1,72$  m) ( $T_p = 7,49$  s) ( $h = 6,00$  m)
- - - Serie 1 P006B ( $H_{m0} = 1,84$  m) ( $T_p = 7,93$  s) ( $h = 6,00$  m)



Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

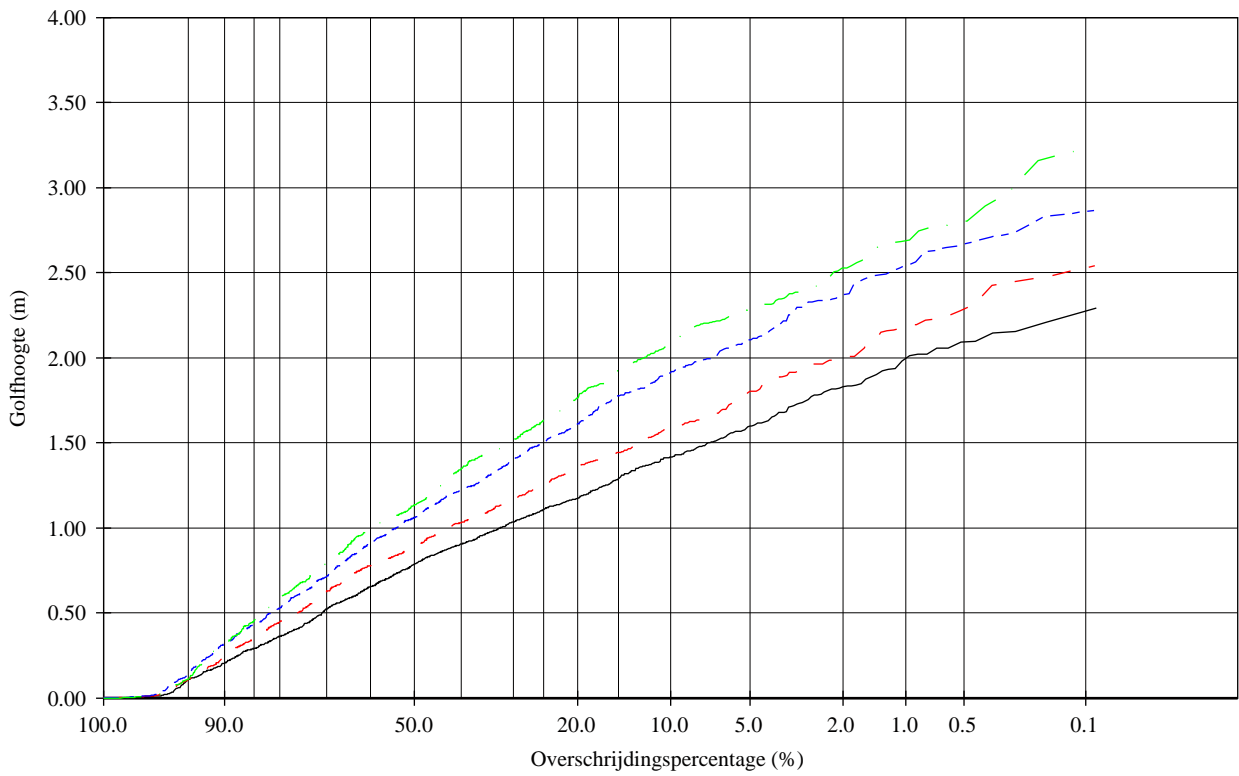
Serie 1 (proeven P004B, P005, P006B)

Inkomende golven

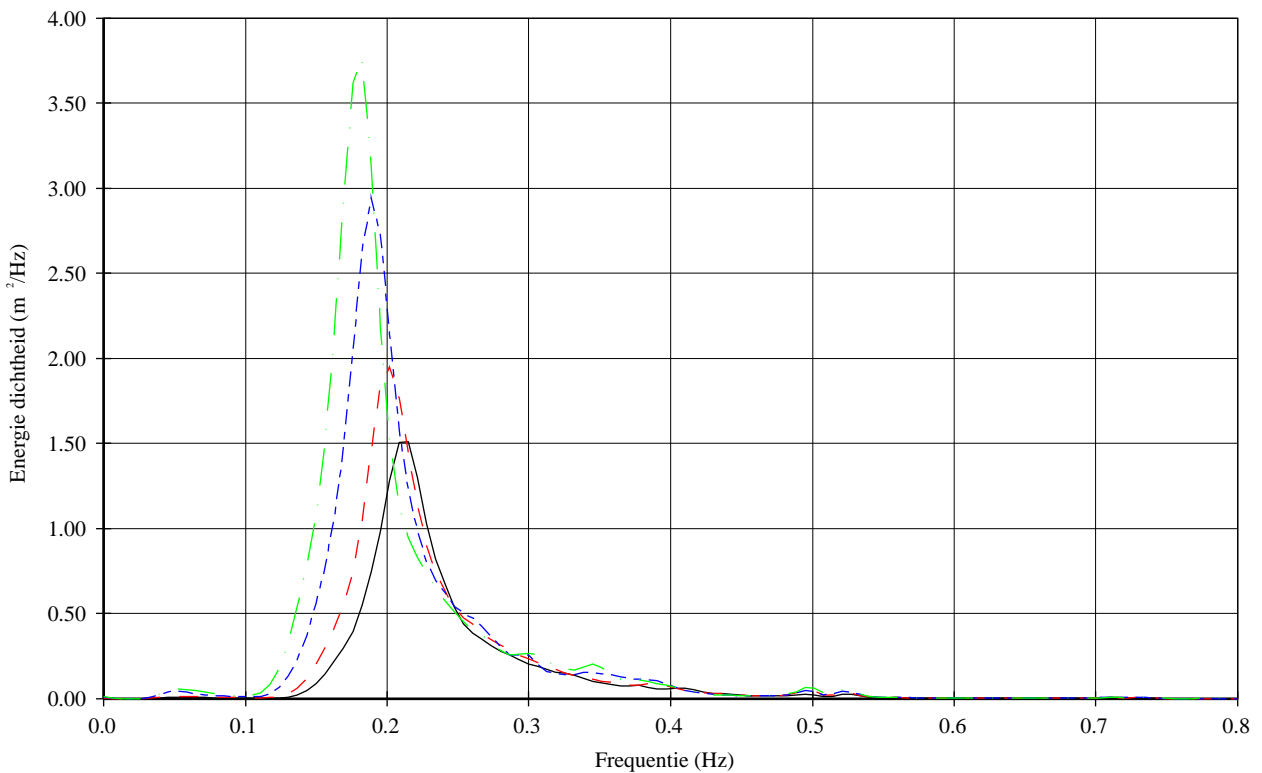
**Deltares**

1220688

Bijlage D.2



- Serie 2 P007 ( $H_{m0} = 1,32$  m) ( $T_p = 4,72$  s) ( $h = 6,00$  m)
- - - Serie 2 P008 ( $H_{m0} = 1,48$  m) ( $T_p = 4,96$  s) ( $h = 6,00$  m)
- - - Serie 2 P009 ( $H_{m0} = 1,75$  m) ( $T_p = 5,28$  s) ( $h = 6,00$  m)
- · - Serie 2 P010 ( $H_{m0} = 1,92$  m) ( $T_p = 5,56$  s) ( $h = 6,00$  m)



Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

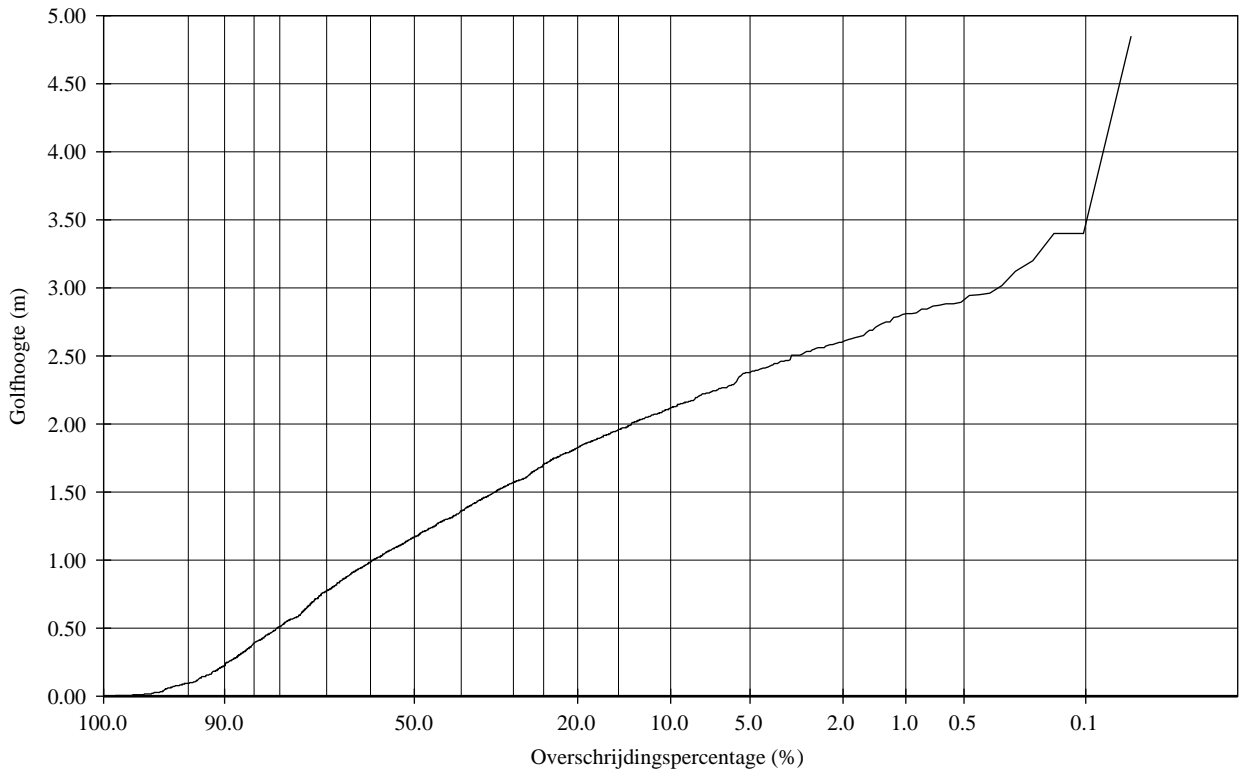
Serie 2 (proeven P007, P008, P009, P010)

Inkomende golven

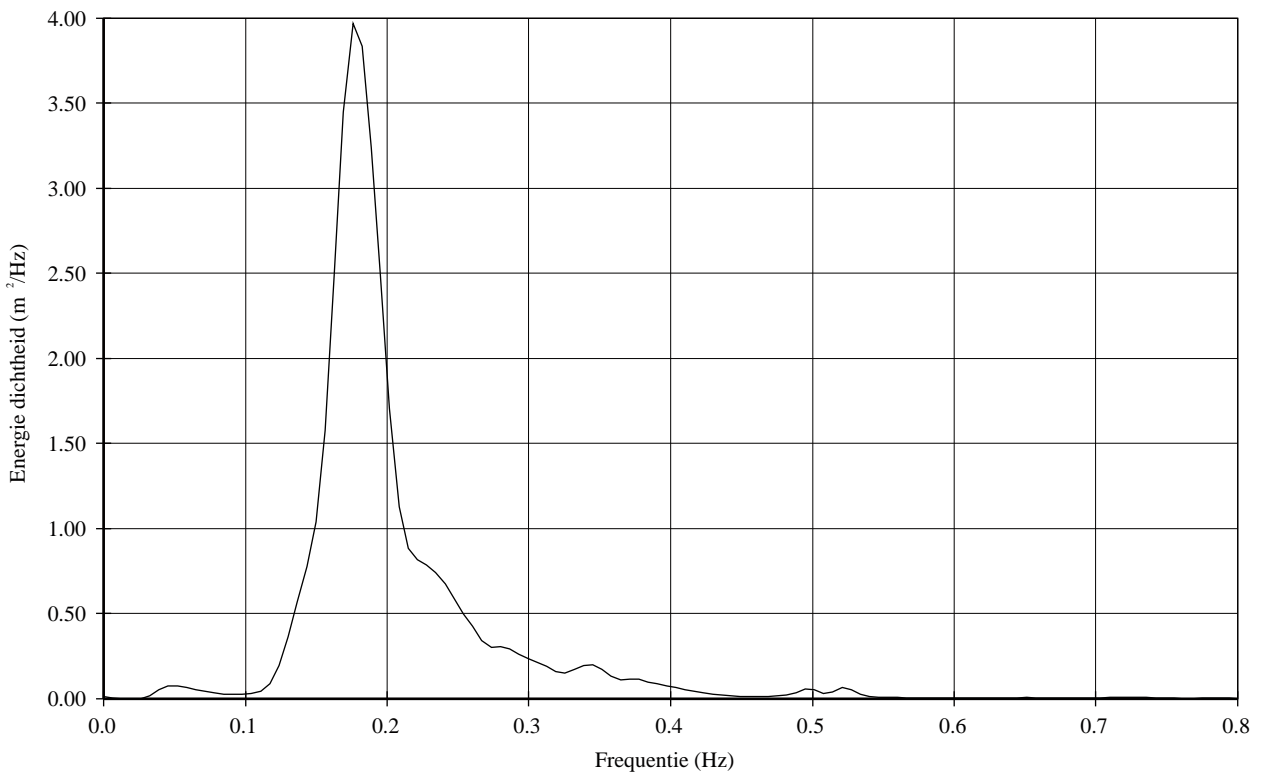
**Deltares**

1220688

Bijlage D.3



— Serie 3 P012 ( $H_{m0} = 1,98$  m) ( $T_p = 5,61$  s) ( $h = 6,00$  m)



Golfhoogte-overschrijdingskromme en energiedichtheidsspectrum

Serie 3 (proef P12)

Inkomende golven

**Deltares**

1220688

Bijlage D.4

## E Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

### E.1 Inleiding

Het "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" is gericht op het vaststellen van een stabiliteitsfactor, waarmee het resultaat van Steentoets-berekeningen zodanig gaat worden gecorrigeerd dat het overeenkomt met de proefresultaten uit de Deltagoot, rekening houdend met een veiligheidsfactor.

De stabiliteitsfactor is voor elk type steenzetting anders en wordt voor de gebruiker onzichtbaar opgenomen in Steentoets. De benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet in het programma gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting. Hierdoor zal een type steenzetting met een hoge stabiliteitsfactor (die goed scoorde in de Deltagootproeven) voor een concreet ontwerp een kleinere toplaagdikte nodig hebben dan een met een lage stabiliteitsfactor.

In deze bijlage is de methode beschreven waarmee de stabiliteitsfactor kan worden bepaald op basis van de Deltagootproeven. De methode bestaat uit het interpreteren van de proefresultaten en het vervolgens berekenen van een stabiliteitsfactor, waarbij rekening gehouden wordt met een veiligheidsmarge.

### E.2 Interpretatie van de proeven

Voor elk type steenzetting zijn de proeven uitgevoerd in 3 series:

- 1 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 2%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.
- 2 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 4%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.
- 3 langeduurproef met constante golfcondities die net zolang is uitgevoerd totdat bezwijken optrad of de maximale proefduur was verstreken (golfsteilheid van 4%).

Ten aanzien van de eerste twee series wordt de bezwijkgolfhoogte gelijkgesteld aan het gemiddelde tussen de  $H_s$  waarbij nog net geen bezwijken optrad en de  $H_s$  waarbij dat wel het geval was. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het optreden van bezwijken, in combinatie met de golfcondities, het uiteindelijke proefresultaat.

Omdat elk van deze series een waardevol proefresultaat heeft opgeleverd, worden alle drie de resultaten meegewogen bij het bepalen van de stabiliteitsfactor. Dit wordt bereikt door het gemiddelde van de drie serie te gebruiken en daarnaast rekening te houden met de spreiding van de drie meetresultaten.

Omdat vanwege de beperkte golfhoogte in de Deltagoot het denkbaar is dat het niet lukt om schade te krijgen aan de steenzetting, is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolfhoogte verder uitgedetailleerd (zie Paragraaf 3.1 voor omschrijving schade categorieën):

- 1 De golfhoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste twee proevenseries met korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte in dezelfde serie (ongeveer dezelfde golfsteilheid) waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
- 2 Voor de langeduurproef wordt de gemiddelde golfhoogte en golfperiode bepaald en geldt het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef.

- 3 Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golfhoogte nog geen schade is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golfhoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golfhoogte-stappen van 15% te werken. Aangenomen wordt dat bij die fictieve proef wel schade zou zijn opgetreden (schadecategorie c of d). Deze fictieve proef wordt op dezelfde wijze geïnterpreteerd als omschreven bij punt 1.  
Dit wordt echter niet gedaan als beide series korteduurproeven niet geleid hebben tot schade en bovendien tijdens de langeduurproef de steenzetting langer dan 15 uur heeft standgehouden bij dezelfde golfcondities. Het doorstaan van de 15 uur golfbelasting tijdens de langeduurproef impliceert dat schade bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities. In dat geval wordt alleen gebruikgemaakt van het resultaat van de langeduurproef.
- 4 Als tijdens de langeduurproef er geen schade ontstaat, wordt aangenomen dat er wel schade zou zijn ontstaan als de proef 20% langer had geduurd.
- 5 Als tijdens geen enkele proevenserie schade is opgetreden, wordt aangenomen dat er wel schade zou zijn opgetreden tijdens de langeduurproef met een proefduur die 20% groter is dan de uitgevoerde proefduur. Dit is dan het enige proefresultaat op basis waarvan de stabiliteitsfactor wordt afgeleid. De fictieve proef van punt 3 wordt dan niet toegevoegd, omdat het doorstaan van de langeduurproef impliceert dat schade bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

### E.3 Bepaling stabiliteitsfactor

Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor wordt zoveel mogelijk kennis en ervaring van steenzettingen benut, om een zo goed mogelijke factor te verkrijgen met de juiste veiligheidsmarge. Dit wordt enerzijds gerealiseerd door gebruik te maken van het rekenmodel Steentoets en anderzijds door te bedenken dat er verschillende sterktecomponenten in een steenzetting zitten.

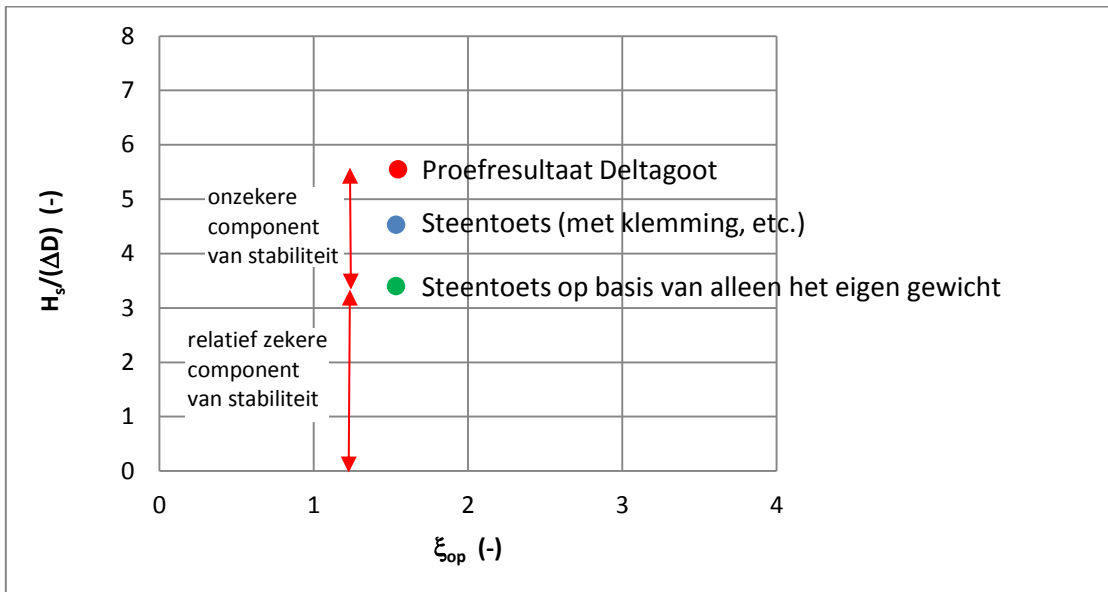
De methode voor het bepalen van de veiligheidsmarge in de stabiliteitsfactor gaat uit van de veronderstelling dat een deel van de stabiliteit heel zeker is (gerelateerd aan het eigengewicht van de steenzetting) en een deel onzeker (gerelateerd aan de bijzondere eigenschappen die leiden tot grote klemming of andere stabiliteit verhogende aspecten). Er is voor gekozen om een veiligheidsfactor toe te passen op het onzekere deel, en niet op het zekere deel.

Bij het stap voor stap groter maken van de golfbelasting zal er namelijk in eerste instantie geen vrees zijn dat de steenzetting gaat bezwijken. Pas als de golfhoogte ten opzichte van de afmetingen van de toplaag groot begint te worden, kan er schade gaan optreden. Aangenomen kan worden dat er schade zou kunnen gaan optreden als de golfhoogte groter is dan de bezwijkhoogte volgens Steentoets als er uitsluitend gerekend wordt met het eigengewicht van de steenzetting: dus rekenen zonder klemming en met gereduceerde soortelijke massa als er kanalen zijn zoals bij Hillblocks. Dit wordt gezien als de minimumstabiliteit van een steenzetting. Het moet wel heel raar lopen wil een steenzetting bij een lagere golfhoogte al bezwijken. Daarom is ervoor gekozen om voor dit deel van de stabiliteit geen veiligheidsfactor toe te passen.

Meestal zal de steenzetting bij een veel grotere golfhoogte bezwijken. Dat is vooral te danken aan de bijzonder goede werking van de klemming, maar kan ook liggen aan andere bijzondere aspecten. Dit kan gezien worden als het 'hightech' deel van het systeem, terwijl de stabiliteit zonder klemming en kanalen gezien kan worden als het 'lowtech' deel. Bij het

bepalen van de stabiliteitsfactor wordt alleen over dit hightech deel een veiligheidsfactor toegepast.

Normaal gesproken is de stabiliteit volgens Steentoets op basis van eigen gewicht het kleinste, die volgens Steentoets met klemming iets groter en die in de modelproeven het grootste. Dit is schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur E.1 De gemeten stabiliteit bestaat uit een relatief zekere component (berekend met Steentoets met alleen eigengewicht) en een component die in de praktijk wat kan tegenvallen.

De stabiliteitsfactor is een correctiefactor op de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets. Voor het berekenen van de stabiliteitsfactor zijn daarom de volgende waarden nodig:

- $D_{ST}$  eigen gewicht = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets, als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht (als blok zonder klemming en met gereduceerde soortelijke massa als er kanalen zijn; met stabiliteitsfactor = 1), bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot (het gemiddelde tussen wel schade en geen schade)
- $D_{Steentoets}$  = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc. en met stabiliteitsfactor = 1) bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot
- $D_{in\ modelproeven}$  = de toplaagdikte (zuilhoogte) die toegepast is in de Deltagoot

Het doel is nu om een veiligheidsfactor toe te passen op het onzekere deel van de stabiliteit, dus het verschil tussen het proefresultaat uit de Deltagoot (rode stip in Figuur E.1) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur E.1). Dit kan op de volgende wijze worden bereikt:

$$f_{stab} = \frac{\left( \frac{H_s}{\Delta D_{in\ modelproeven}} - \frac{H_s}{\Delta D_{STeigengewicht}} \right) / \gamma + \frac{H_s}{\Delta D_{STeigengewicht}}}{\frac{H_s}{\Delta D_{Steentoets}}} \quad (E.1)$$

Met:

$H_s$  = significante golfhoogte bij bezwijken in de Deltagoot (m)



- $f_{stab}$  = stabiliteitsfactor (de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting) (-)
- $\gamma$  = veiligheidsfactor (-)

Dit kan vereenvoudigd worden tot:

$$f_{stab} = \left( \frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{STEigengewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{STEigengewicht}} \quad (E.2)$$

De waarde van de veiligheidsfactor  $\gamma$  wordt bepaald op basis van de standaardafwijking in de proefresultaten. Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

- Drie proevenseries:  $\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$  (E.3)

- Vier proevenseries:  $\gamma = 1,1 + 1,64 \cdot \sigma$  (E.4)

Met:

$\sigma$  = standaardafwijking in de proefresultaten

Op deze wijze wordt  $f_{stab}$  per proevenserie bepaald en vervolgens gemiddeld.

Er is hier gekozen voor een minimumwaarde van 1,1 bij  $\sigma = 0$ , omdat het voor kan komen dat de standaardafwijking bijzonder klein is. Verder kan het voorkomen dat er maar één meetpunt is, omdat er geen schade is opgetreden tijdens de 3 proevenseries, zodat er geen standaardafwijking is. In dat geval wordt er gerekend met een standaardafwijking van 0,05, wat overeenkomt met proeven op steenzettingen waarbij de standaardafwijking klein was.

Het berekenen van de stabiliteitsfactor is met deze methode vrij gecompliceerd, omdat ook de stabiliteit op basis van alleen het eigen gewicht (zonder klemming en zonder eventuele kanalen) moet worden meegewogen. Omdat dit eenmalig moet gebeuren, is dit geen bezwaar.

De stabiliteitsfactor is gerelateerd aan een specifieke Steentoets-versie en wordt hard ingeprogrammeerd in Steentoets. Hij is dus onzichtbaar voor de gewone gebruiker.

## F Proeven optellen

De onderstaande tekst is gebaseerd op Mourik (2015)

De optredende golfenergie in één vierkante meter water met regelmatige sinusvormige golven is gegeven door Vergelijking (F.1):

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (\text{F.1})$$

Met:

$E$  = energie (J/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = soortelijke massa van het water (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = versnelling van de zwaartekracht (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$H$  = golfhoogte (m)

Op basis van Vergelijking (F.1), in combinatie met een maat voor de belastingduur (bijvoorbeeld het aantal golven  $N$ ), kan een proef met golfhoogte  $H$  vertaald worden naar een equivalente proef met golfhoogte  $H_{eq}$ , zodanig dat die ongeveer dezelfde energie heeft. Als maat voor de belastingduur kan gerekend worden met het aantal golven  $N$ . Het vertalen van een werkelijke proef naar een equivalente proef kan met Vergelijking (F.2).

$$NH^2 = N_{eq} H_{eq}^2 \quad (\text{F.2})$$

Met:

$H$  = golfhoogte van de werkelijke proef (m)

$H_{eq}$  = golfhoogte van de equivalente proef (m)

$N$  = aantal golven van de werkelijke proef (-)

$N_{eq}$  = aantal golven van de equivalente proef (-)

Hoewel Vergelijking (F.2) specifiek geldt voor regelmatige sinusvormige golven kan die ook gebruikt worden voor onregelmatige golven. De formule wordt dan:

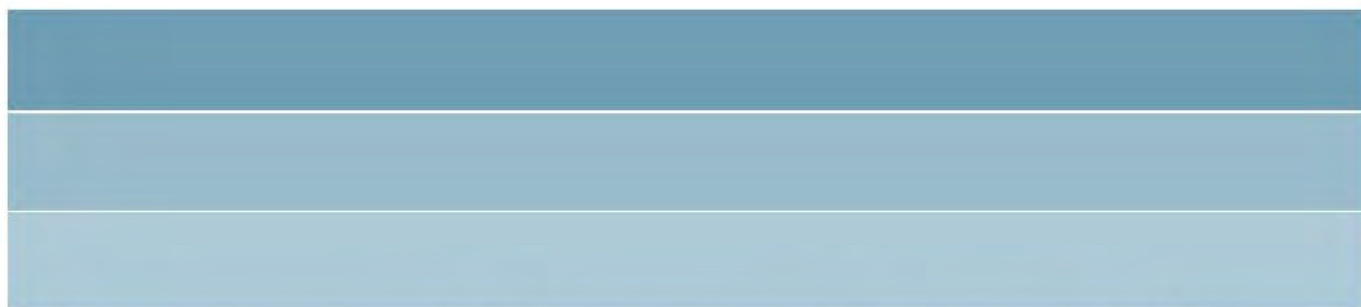
$$NH_s^2 = N_{eq} H_{s,eq}^2 \quad (\text{F.3})$$

Met:

$H_{s,eq}$  = significante golfhoogte van de equivalente proef (m)

Herschrijven van Vergelijking (E.1) geeft:

$$N_{eq} = \frac{NH_s^2}{H_{s,eq}^2} \quad (\text{F.4})$$



**Deltares**