

# **Stabiliteit van steenzetting met Testblokken bij golfaanval**

**Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken**





# **Stabiliteit van steenzetting met Testblokken bij golfaanval**

**Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken**

ir. P. van Steeg

1208618-009



**Titel**

Stabiliteit van steenzetting met Testblokken bij golfaanval

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat WVL / Hillblock BV	1208618-009	1208618-009-HYE-0018	37

**Trefwoorden**

Steenzetting, Testblok, Hillblock, dijken, zetsteen, stabiliteit, golfoploop

**Samenvatting**

Het "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" is aan Deltares opgedragen door Rijkswaterstaat WVL, namens het Projectbureau Zeeweringen, het Project Afsluitdijk, het Corporate innovatieprogramma van RWS, de drie noordelijke waterschappen (Wetterskip Fryslân, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Hunze en Aa's, in het kader van een Projectoverstijgende Verkenning Waddenzeedijken van HWBP) en een vijftal marktpartijen. Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de stabiliteit bij golfaanval van een aantal moderne type steenzettingen voor toepassing op primaire waterkeringen in Nederland. Daarnaast wordt van enkele typen steenzettingen ook de golfoploopremmende werking gemeten.

Het in dit rapport beschreven deel van het onderzoek betreft de stabiliteit van zetstenen van het type Testblok. Ten behoeve van het bepalen van de golfoploopreductie van deze steenzetting zijn tevens testen uitgevoerd welke in dit rapport zijn beschreven, maar de analyse ervan is te vinden in Van Steeg (2015). Het Testblok lijkt op het Hillblock maar heeft een kleine geometrische afwijking. Hillblock B.V. participeert als marktpartij in het onderzoek.

Om de stabiliteit bij golfaanval van Testblokken te bepalen is er grootschalig onderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. De schaal van dit onderzoek was 1:2. Alle maten die in dit rapport zijn gerapporteerd betreffen de waarden op modelschaal, dus zoals ze aanwezig waren in de Deltagoot.

De beproefde steenzetting had een toplaagdikte van 0,15 m. Onder de Testblokken was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder geotextiel.

De constructie is beproefd met vier proefseries. Er is gestart met Test Serie 4, waarbij de taludbekleding bestond uit Testblokken boven de waterlijn en een relatief gladde bekleding onder de waterlijn. Het doel van deze proefserie was om de golfoploopreductiecoëfficiënt te bepalen voor een situatie waarbij Testblokken alleen boven de waterlijn zijn geplaatst. Bij deze serie werden simultaan Testblokken van het type Basis en Testblokken van het type Slim getest. Bij de tweede daaropvolgende proefseries, namelijk Test Serie 1 en 2, bestond het grootste gedeelte van het talud uit Testblokken van het type Basis. Alleen op het rechter deel van de oploopzone vanaf 0,8 m boven de waterlijn waren Testblokken van het type Slim aanwezig. In zowel Test Serie 1 als Test Serie 2, de zogenaamde korteduurproeven, is de brekerparameter constant gehouden. De golfhoogte is bij deze series na iedere proef (circa 1000 golven) verhoogd totdat schade optrad. Bij deze series is tevens de golfoploop gemeten. De laatste serie (Test Serie 3) bestond uit een langeduurproef met gelijkblijvende golfcondities.

Na iedere proef is de vervorming en eventuele schade aan het talud geregistreerd.

De proefresultaten laten een lagere stabiliteit zien dan de proefresultaten uit een eerder onderzoek met Hillblocks (deze blokken hadden een hoogte van 40 cm op ware grootte). Dit kan waarschijnlijk worden verklaard door de relatief lage voet van het Testblok met een

**Titel**

Stabiliteit van steenzetting met Testblokken bij golfaanval

<b>Opdrachtgever</b> Rijkswaterstaat WVL / Hillblock BV	<b>Project</b> 1208618-009	<b>Kenmerk</b> 1208618-009-HYE-0018	<b>Pagina's</b> 37
---	-------------------------------	--	-----------------------

hoogte van 30 cm op ware grootte. Hierdoor kan het inwasmateriaal eenvoudig uitspoelen, waardoor er minder klemming is en bezwijken eerder zal optreden. Voor zowel de proeven in het onderhavige rapport (Testblokken met een hoogte van 30 cm op ware grootte) als de eerder uitgevoerde proeven (Hillblocks met een hoogte van 40 cm op ware grootte) is de stabiliteitsfactor afgeleid:




- Testblok met een hoogte van 30 cm (huidig onderzoek):  $f_{\text{stabiliteit}} = 0,85$
- Hillblock (Basisblock en Slimblock) met een hoogte van 40 cm (eerder onderzoek):  $f_{\text{stabiliteit}} = 1,19$

Deze factor voor Hillblocks is opgenomen in Steentoets2015.

**Referenties**

RWS opdracht voor het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", zaak 31087167, 29.11.2013.

Hillblock B.V. Akkoord offerte voor het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", 16-1-2014, Referentie 1912132

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v 1.0	dec. 2014	ir. P. van Steeg		Ir. M. Klein Breteler		Ir. W.M.K. Tilmans	
v 2.1	feb. 2015	ir. P. van Steeg		Ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	
v 2.2	juni 2015	ir. P. van Steeg		Ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	
v 3	okt. 2015	ir. P. van Steeg		Ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	
v 4	okt. 2015	ir. P. van Steeg		Ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	
v 5	mrt. 2016	ir. P. van Steeg		Ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Vergelijkend onderzoek zetsteen voor dijkbekledingen	1
1.2 Hillblocks en Testblokken	2
1.3 Opdracht	3
<b>2 Schaling</b>	<b>5</b>
2.1 Faciliteit	5
2.2 Schaling	5
<b>3 Modelopstelling</b>	<b>9</b>
3.1 Algemeen	9
3.1.1 Proefopstelling 1 (golfplooppoeven)	10
3.1.2 Proefopstelling 2 (stabiliteit en golfplooppoeven)	11
3.1.3 Plaatsing toplaagelement Testblokken	12
3.1.4 Wrijvingscoëfficiënt	12
3.1.5 Inwasmateriaal	12
3.1.6 Afwerking van de modelranden	13
3.2 Meetinstrumenten	14
3.2.1 Golfhoogtemetingen	14
3.2.2 Profielmetingen	14
3.2.3 Uitspoeling inwasmateriaal	15
3.2.4 Golfplooppmetingen	15
3.2.5 Drukmetingen	15
3.3 Proevenprogramma	15
<b>4 Proefresultaten en beschrijving van testen</b>	<b>19</b>
4.1 Indeling in schadecategorieën	19
4.2 Test Serie 1: korteduurproeven, $s_{op} = 0,02$	20
4.3 Test Serie 2: korteduurproeven, $s_{op} = 0,04$	21
4.4 Test Serie 3: langeduurproeven, $H_s = 0,7$ m, $s_{op} = 0,04$	23
<b>5 Analyse van de proefresultaten</b>	<b>27</b>
5.1 Stabiliteit	27
5.2 Uitspoeling inwasmateriaal	28
5.3 Bepaling stabiliteitsfactor	30
5.3.1 Bepaling stabiliteitsfactor Testblokken (30 cm hoog op ware grootte)	30
5.3.2 Bepaling stabiliteitsfactor Hillblock (40 cm hoog op ware grootte)	33
<b>6 Conclusies</b>	<b>35</b>
<b>Literatuur</b>	<b>37</b>

## **Bijlagen**

<b>A Foto's</b>	<b>A-1</b>
<b>B Figuren</b>	<b>B-1</b>
<b>C Tabellen</b>	<b>C-1</b>
<b>D Golfhoogte overschrijdingskrommen en golfspectra</b>	<b>D-1</b>
<b>E 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



# 1 Inleiding

## 1.1 Vergelijkend onderzoek zetsteen voor dijkbekledingen

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” onderzoeken Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning Waddenzeedijken van het Hoogwaterbeschermingsprogramma HWBP) en enkele marktpartijen of zetstenen slimmer ingezet kunnen worden bij dijkversterkingen. Er zijn verschillende soorten zetstenen op de markt, waarvan uit eerder onderzoek is gebleken dat ze voldoen aan alle (veiligheids)eisen. Doordat de zetstenen verschillen in vorm, hebben ze ieder specifieke kwaliteiten. Ze zijn bijvoorbeeld extra stabiel of remmen de golfloop goed. Er is echter nog te weinig kennis over hun unieke eigenschappen om de stenen optimaal te benutten en te vergelijken. Daarom is Deltares gevraagd dit te onderzoeken.

Het onderzoek richt zich op twee eigenschappen van zetstenen: de stabiliteit bij hoge golven en van enkele typen ook de golfloopremming. Deltares onderzoekt deze kenmerken met behulp van proeven in de Deltagoot. De zetstenen worden hiervoor op schaal getest.

Dit rapport beschrijft de proeven met Testblokken met een hoogte van 30 cm (werkelijke waarde). Het Testblok lijkt op het Hillblock maar heeft een kleine geometrische afwijking, dit is verder toegelicht in Paragraaf 1.2. Deze proeven zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit in golfaanval en op het bepalen van de reducerende werking met betrekking tot golfloop. De golfloopmetingen zijn in dit rapport wel beschreven maar de analyse is apart gerapporteerd door Van Steeg (2015).

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 hij 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.

De stabiliteitsfactor kan niet gebaseerd worden op kleinschalige modelproeven (kleiner dan schaal 1:3) omdat bij steenzettingen er sprake is van strijdige schaalregels. De stabiliteit op kleine schaal kan daardoor niet goed omgerekend worden naar de overeenkomstige stabiliteit op grote schaal. Daarom zijn de huidige proeven op grote schaal (schaal 1:2 ten opzichte van de werkelijkheid) uitgevoerd. De Deltagoot is bij uitstek geschikt om de stabiliteit van steenzettingen te beproeven, omdat hierin een dijk op bijna prototype-schaal kan worden ingebouwd en belast kan worden door grote golven. Door de grootte van deze golfgoot zijn er geen ongewenste schaaffecten te verwachten.

Het onderzoek is in maart - mei 2014 uitgevoerd onder leiding van ir. M. Klein Breteler en ir. P. van Steeg.

## 1.2 Hillblocks en Testblokken

Hillblock is een nieuw type steenzetting dat op een filterlaag kan worden toegepast om dijken en oevers te beschermen tegen golfaanval en stromingsbelasting (zie Figuur 1.1). Om de effectiviteit van Hillblocks te onderzoeken is in 2011 een onderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. Dit is gerapporteerd in Van Steeg (2012). De Hillblocks (zowel Basisblocks als Slimblocks) in dat onderzoek waren 20 cm hoog (modelwaarde; ware grootte: 40 cm) en hadden een dichtheid van  $2372 \text{ kg/m}^3$ . Ook toen is het onderzoek op schaal 1:2 uitgevoerd. 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, zelfs niet met de hoogst mogelijke golven in de Deltagoot (bij de condities in het genoemde project was de hoogste mogelijke significante golf gelijk aan  $H_s = 1,49 \text{ m}$ ).



Figuur 1.1 Aanleg Hillblocks op dijk

Teneinde een verbeterd inzicht te krijgen in de werking van het Hillblock is een alternatieve versie ontwikkeld: het Testblok. Het Testblok is 15 cm (modelwaarde) hoog en is daarmee lager dan het Hillblock welke is getest in 2011. Daarnaast heeft het Testblok een relatief dunne voet. In het voorjaar van 2014 zijn twee varianten van het Testblok getest in de Deltagoot van Deltares en beschreven in dit rapport: Het Testblok van het type Basis is zowel getest op stabiliteit als op het remmend vermogen op de golfploophoogte. Het Testblok van het type Slim is alleen getest op het remmend vermogen op de golfploophoogte. Figuur 1.2 geeft een indruk van de vorm van de Testblokken en het uiterlijk op een dijk.



Figuur 1.2 Testblok van het type Slim (links), Testblok van het type Basis (midden), en rechts een situatie in de Deltagoot met daarin Testblok van het type Basis (links) en Testblok van het type Slim (rechts) in hun verband.

In dit rapport is een blok (Testblok of Hillblock) gedefinieerd als een vast element en niet als twee halve elementen. De karakteristieke vorm van het Testblok en van het Hillblock wordt conform deze definitie dus gevormd door twee blokken.

### **1.3 Opdracht**

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving en Hillblock B.V. hebben Deltares verzocht onderzoek te doen naar de stabiliteit en golfoploopreductie. Deze opdracht is vastgelegd in een overeenkomst tussen Rijkswaterstaat en Deltares (29 november 2013 met kenmerk RWS-2013-59441, zaaknummer 31087167) en een overeenkomst tussen Hillblock B.V. en Deltares (16 januari 2014, referentie 1912132).



## 2 Schaling

In dit hoofdstuk is de faciliteit en de daaruit resulterende modelschaling beschreven. De beschrijving van de modelopstelling zelf is gegeven in Hoofdstuk 3.

Het model in de Deltagoot (Noordoostpolder) is ingebouwd met als uitgangspunt een geometrische schaal van 1:2. In het schaalmodel is gebruik gemaakt van Testblokken met een toplaagdikte van 15 cm, en horizontale afmetingen van 12,5 cm x 6,25 cm. Gegeven deze schaal komt dat dus overeen met Testblokken met een toplaagdikte van 30 cm, en de gebruikelijke horizontale afmetingen van 25 cm x 12,5 cm. De Testblokken zijn in meer detail beschreven in Hoofdstuk 3. Technische tekeningen van de Testblokken, zoals deze door Deltares zijn opgemeten, zijn weergegeven in Figuur B.1.

Alle vermelde waarden in dit rapport zijn weergegeven op modelschaal tenzij anders vermeld.

### 2.1 Faciliteit

De proeven zijn uitgevoerd in de Deltagoot (Noordoostpolder) van Deltares. De Deltagoot heeft een lengte van 230 m, een breedte van 5 m en een diepte van 7 m. 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 gereflecteerde golven compenseert zodat deze niet opnieuw bij het golfschot in de richting van de constructie reflecteren.

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken tot ongeveer  $H_s = 1,4$  à  $1,6$  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 wel tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een geometrische schaal van 1:2. Bij deze schaling is de maximale significante golfhoogte die kan worden geproduceerd op prototype schaal gelijk aan circa  $H_s = 3.2$  m.

### 2.2 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.

De dikte van de toplaag is ingeschat 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 is besloten om de dikte van de steenzetting met Testblokken te reduceren naar 15 cm. De dikte is gedefinieerd als de afstand tussen het bovenvlak en het ondervlak van een Testblok.

De keuze van de dikte van de toplaag heeft een directe invloed op de belastingparameter, welke 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 Testblokken ten opzichte van het water (-) $(\rho_{\text{Testblok}} - \rho_{\text{water}}) / \rho_{\text{water}}$	
$D$	=	dikte van de Testblok toplaag gedefinieerd als de afstand tussen de bovenzijde en de onderzijde	(m)
$\rho$	=	soortelijke massa	( $\text{kg/m}^3$ )

De belastingparameter 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 Testblok op de werkelijke grootte toegepast.

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:

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

Met

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

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 schaafeffecten verwaarloosbaar. Het huidige onderzoek voldoet hier dus ruimschoots aan.

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

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

Met:

$\Lambda$	=	leklengte	(m)
$b$	=	dikte van de filterlaag	(m)
$k$	=	doorlatendheid van de filterlaag	(m/s)
$D$	=	effectieve dikte van de toplaag	(m)
$k'$	=	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 Testblokken op ware grootte en in het model berekend. Uit de berekeningen is gebleken dat een filter met een korrelgrootte  $D_{f15} = 10\text{-}13$  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

Parameter	symbool	model	werkelijkheid
Laagdikte filter	$b$ (m)	0,073	0,150
Representatieve filterdiameter	$D_{f15}$ (mm)	11,5	18
Doorlatendheid van de filterlaag	$k$ (mm/s)	154	200
Effectieve dikte van de toplaag	$D$ (m)	0,15	0,30
Doorlatendheid van de toplaag	$k'$ (mm/s)	32	43
Representatieve diameter inwas-materiaal	$D_{i15}$ (mm)	4,5	8
Leklengte	$\Lambda$ (m)	0,23	0,46



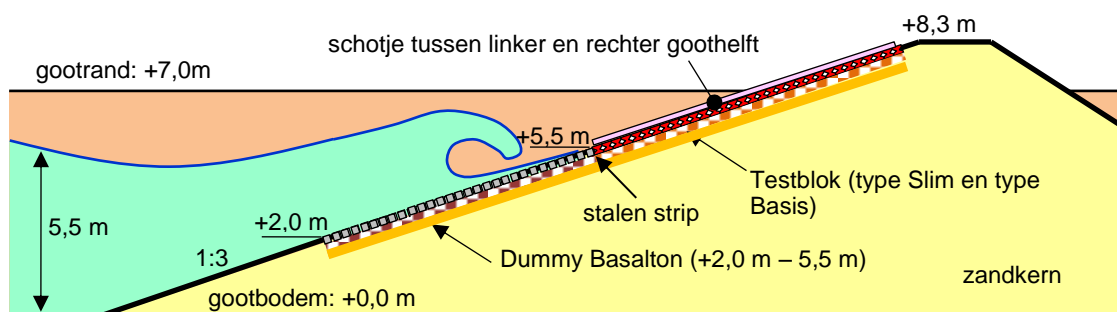


### 3 Modelopstelling

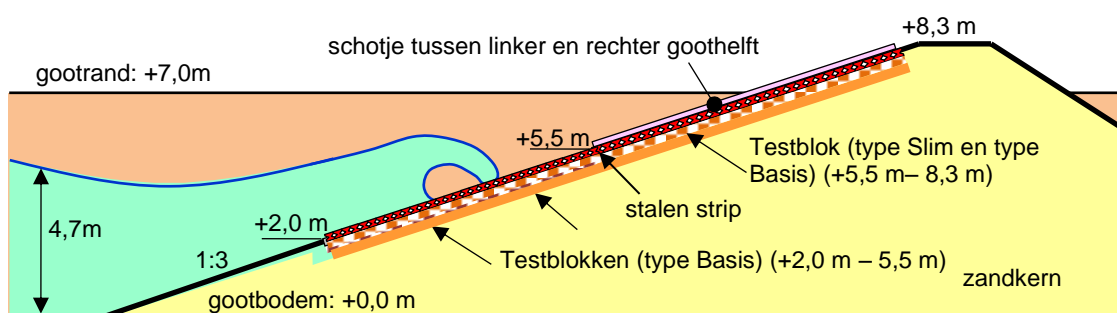
#### 3.1 Algemeen

In de Deltagoot is een dijk opgebouwd met een steenzetting van Testblokken op een laagje steenslag, zoals dat ook op een werkelijke dijk in het prototype gebouwd zou worden. De afmetingen van de dijk en de dijkbekleding zijn echter aangepast (zie ook Hoofdstuk 2) aangezien de Deltagoot een beperkte capaciteit heeft met betrekking tot de golfcondities. Daarom is een schaalmodel gebouwd waarbij alle afmetingen zijn gehalveerd. Dit betekent dat de afmetingen van de Testblokken en de golfhoogte en golflengte zijn gehalveerd. De taludhelling is gelijk aan de taludhelling in werkelijkheid.

Er zijn twee verschillende opstellingen getest. Beide opstellingen zijn weergegeven in Figuur 3.1 en Figuur 3.2.



Figuur 3.1 Schematische doorsnede van Proefopstelling 1 (t.b.v. Test Series 4: golfplooppoeven)



Figuur 3.2 Schematische doorsnede van Proefopstelling 2 (t.b.v. Test Series 1, 2 en 3: stabiliteits- en golfplooppoeven)

Het uitgangspunt van Proefopstelling 1 is om de remmende werking van Testblokken met betrekking tot de golfploophoogte te meten. Hierbij wordt gesimuleerd dat de Testblokken alleen zijn aangebracht boven de waterlijn. Bij deze proefopstelling zijn zowel Testblokken van het type Slim als Testblokken van het type Basis simultaan getest door het talud in twee gelijke delen op te delen.

Het uitgangspunt van Proefopstelling 2 is om de stabiliteit van Testblokken te testen en om de remmende werking met betrekking tot de golfploophoogte te meten. Hierbij zijn de Testblokken over het gehele talud aangebracht.

In dit rapport is de locatie op het talud weergegeven met de horizontale coördinaat X ten opzichte van de middenstand van het golfschot en de verticale coördinaat ten opzichte van de gootbodem. Het taludoppervlak in de meetsectie had de volgende relatie tussen X en Z:

$$Z = \frac{X - 174,855}{2,996} \quad (3.1)$$

Met:

Z = verticale afstand tot de gootbodem (m)

X = horizontale afstand tot het golfschot (m)

### 3.1.1 Proefopstelling 1 (golfoplooppoeven)

Proefopstelling 1 (Figuur 1.2) bestaat uit een dijklichaam van zand. Op dit 1:3 talud zijn vier verschillende secties aangelegd:

- Z = 0,0 m – 2,0 m: dummy sectie bestaande uit beton.
- Z = 2,0 m – 3,5 m: dummy sectie bestaande uit Basalton (dikte 15 cm).
- Z = 3,5 m – 5,5 m: dummy sectie bestaande uit Basalton (dikte 20 cm).
- Z = 5,5 m – 8,3 m: sectie bestaande uit Testblokken (dikte 15 cm).

Waarbij Z de verticale afstand is tot de bodem van de goot.

De sectie bestaande uit Basalton bestaat uit Basalton met een dikte van 15 cm (van Z = 2.0 m tot Z = 3.5 m) en Basalton met een dikte van 20 cm (van Z = 3.5 m tot Z = 5.5 m). De filterlagen onder deze sectie zijn respectievelijk 7 cm en 2 cm dik en hebben een diameter van  $D_{f15} = 11.5$  mm. De Basalton is ingewassen tot een hoogte van 10 cm. Er is voor deze dummysectie gekozen aangezien deze al grotendeels aanwezig was na afloop van het voorafgaande project.

Tijdens Test 23-J in Test Serie 4 (zie Paragraaf 3.3 voor het proevenprogramma) bleek de dummy sectie (Basalton) te bezwijken. Vermoedelijk bezweek eerst de Basalton met een dikte van 15 cm. Als gevolg hiervan is ook een gedeelte van de Basalton met een dikte van 20 cm bezweken. Om deze reden is besloten om dit te herstellen. De herstelde situatie is versterkt door een gaas over de Basalton te spannen. Dit gaas is vastgezet met stalen strippen. Deze voorziening heeft de golfoplopen niet beïnvloedt.

De sectie bestaande uit Testblokken is in twee delen opgedeeld. De linkerzijde (westzijde, dit is de halzijde tegenover de meetcabine) is opgebouwd uit Testblokken van het type Basis. De rechterzijde is opgebouwd uit Testblokken van het type Slim. Op de onderliggende zandlaag is een zandcementstabilisatie en een geotextiel aangebracht. Hierop is een filter met een dikte van 7 cm en een korreldiameter van  $D_{f15} = 11,5$  mm en  $D_{f90} = 30$  mm aangebracht. Op het filter zijn de Testblokken geplaatst. De Testblokken zijn ingewassen met gebroken steenslag (hoekig):  $D_{15} = 4,4$  mm,  $D_{90} = 10,5$  mm. Het inwasmateriaal is, conform de aanbeveling van de leverancier, alleen aangebracht ter hoogte van de voet van de Testblokken. Hierbij wordt aangenomen dat dit in werkelijkheid ook het geval zal zijn.

De onderste rij testblokken zijn gestabiliseerd met een stalen strip zodat deze tijdens de opbouw niet konden verplaatsen of kantelen.

Samengevat heeft Proefopstelling 1 de volgende specificaties:

- Hoogte van de dijk t.o.v. de bodem van de goot : 8,3 m
- Taludhelling : 1:3
- Filterlaag van steenslag onder de Testblokken : 7,3 cm,  $D_{f15} = 11,5$  mm
- Hoogte Testblokken : 15,0 cm
- Open oppervlak in de toplaag : 8,4 % (kleinste doorsnede voet)
- Soortelijke massa Testblokken : 2390 kg/m<sup>3</sup>
- Locatie dummy bekleding (beton) : Z = 0,0 m – 2,0 m
- Locatie dummy bekleding (Basalton) : Z = 2,0 m – 5,5 m
- Locatie Testblokken : Z = 5,5 m – 8,3 m
- Locatie Testblokken van het type Basis : linkerzijde (Halzijde) goot
- Locatie Testblokken van het type Slim : rechterzijde (zijde meetcabine) goot
- Waterstand : Z = 5,5 m

Tussen de Testblokken van het type Basis en de Testblokken van het type Slim is een scheidingsschot geplaatst (Foto A.1 en Foto A.2). Dit schot onderbreekt zowel de Testblokken als het filter zodat er geen zijdelingse stromingen kunnen ontstaan tussen deze twee testsecties. Een overzicht van de modelopstelling is weergegeven in Foto A.2.

### 3.1.2 Proefopstelling 2 (stabiliteit en golfoploopprouwen)

Proefopstelling 2 bestaat uit een dijklichaam van zand. Op het 1:3 talud zijn drie verschillende secties aangelegd:

- Z = 0.0 m – 2.0 m: dummy sectie bestaande uit beton.
- Z = 2.0 m – 5.5 m: testsectie bestaande uit Testblokken van het type Basis
- Z = 5.5 m – 8.3 m: testsectie bestaande uit Testblokken. Aan de linkerzijde (halzijde) lagen Testblokken van het type Basis. Aan de rechterzijde (zijde meetcabine) lagen Testblokken van het type Slim.

Op de onderliggende zandlaag is een zandcementstabilisatie en een geotextiel aangebracht. Hierop is een filter met een gemiddelde dikte van 7,3 cm en een korreldiameter van  $D_{f15} = 11,5$  mm en  $D_{f90} = 30$  mm aangebracht. Op het filter zijn de Testblokken geplaatst. De Testblokken zijn ingewassen met gebroken steenslag (hoekig Noors graniet). Het inwasmateriaal is alleen aangebracht ter hoogte van de voet van de Testblokken. Hierbij wordt aangenomen dat dit in werkelijkheid ook het geval zal zijn. De samenstelling van het inwasmateriaal is gedurende de proeven een aantal keer aangepast omdat dit materiaal vaak uitspoelde. Vanwege de verwachte kwetsbaarheid van de Testblokken is er niet met een trilplaat over de bekleding gegaan om het inwasmateriaal beter in de spleten te laten dringen, zoals dat wel gebruikelijk is bij andere steenzettingen. De stalen strip, welke ten behoeve van Testopstelling 1 is gebruikt, was ook tijdens Testopstelling 2 aanwezig. Hierdoor was er in de golfaanvalzone geen extra inklemming als gevolg van de normaalkracht door de blokken welke hoger dan Z = 5,5 m waren geplaatst.

Een indruk van de opbouw van Proefopstelling 2 is weergegeven in Foto A.7, Foto A.8 en Foto A.9:

- Hoogte van de dijk t.o.v. de bodem goot : 8.3 m
- Taludhelling : 1:3
- Filterlaag van steenslag onder Testblokken : 7,3 cm,  $D_{f15} = 11,5$  mm
- Hoogte Testblokken : 15,0 cm
- Soortelijke massa Testblokken : 2390 kg/m<sup>3</sup>
- Locatie dummy bekleding (beton) : Z = 0,0 m – 2,0 m
- Locatie Testblokken : Z = 2,0 m – 8,3 m

- Locatie Testblokken van type Basis : Z = 2,0 – 5,5 m  
Z = 5,5 m - 8,3 m linkerzijde (Halzijde)
- Locatie Testblokken van type Slim : Z = 5,5 m -8,3 m rechterzijde (zijde meetcabine)
- Waterstand : Z = 4,7 m (bij ingolfproef: Z = 4,55 m)

### 3.1.3 Plaatsing toplaagelement Testblokken

De onderstaande beschrijving is van toepassing voor zowel Proefopstelling 1 als Proefopstelling 2.

De Testblokken zijn in de Deltagoot geplaatst door personeel van Deltares. De Testblokken zijn per rij geplaatst. Hierbij is de 'naad' tussen twee aansluitende Testblokken verticaal gekozen. In Foto A.8, Foto A.9, Foto A.10 is een indruk gegeven van het talud tijdens en direct na de opbouw.

Na het plaatsen van de Testblokken zijn markeringen aangebracht (strepen en nummers). Dit vergemakkelijkt het identificeren en benoemen van rijen waar eventuele schade optreedt.

### 3.1.4 Wrijvingscoëfficiënt

De zuilen zijn vervaardigd van een betonsoort die wat afwijkt van het beton in de zuilen voor werkelijke dijken. Om deze reden is een wrijvingscoëfficiënt van de geteste blokken bepaald. Dit is gedaan door proeven uit te voeren waarbij een zuil op een plank is vastgemaakt. Op deze zuil is een andere zuil geplaatst. Vervolgens is de plank zo schuin gehouden totdat de bovenste zuil van de onderste zuil afschoof. De hoek van de plank is genoteerd. De tangens van deze hoek is de wrijvingscoëfficiënt. Alle proeven zijn uitgevoerd met natte zuilen.

Deze test is drie keer herhaald. Hierbij zijn steeds verschillende zuilen gebruikt. Dit is uitgevoerd voor een situatie waarbij er geen extra gewicht op de zuil is geplaatst en voor een situatie waarbij een extra gewicht van 10 kg op de zuilen is geplaatst. Ook is dit uitgevoerd voor de 'vlakke' zijde van het Testblok en voor de 'gekromde' zijde van het Testblok. In totaal zijn er dus 2 (extra gewicht en geen extra gewicht) x 2 (gekromde zijde en vlakke zijde) x 3 (herhalingstesten) = 12 testen uitgevoerd. De resultaten zijn weergegeven in Tabel C.3.

Uit de resultaten blijkt dat de wrijvingscoëfficiënt duidelijk hoger is dan normaal beton in zuilen op dijken. De gemeten waarde is gemiddeld 0,7, terwijl normale betonzuilen een wrijvingscoëfficiënt van 0,55 à 0,60 hebben.

### 3.1.5 Inwasmateriaal

Inklemming van de Testblokken is alleen mogelijk aan de kop of aan het voetstuk. Het voetstuk is om deze reden ingewassen met inwasmateriaal. De hoogte van het inwasmateriaal is circa 5 cm (type Basis) of 4 cm (type Slim). Dit is gelijk aan de hoogte van de voet van de Testblokken. Het inwassen is zodanig gedaan dat het gedeelte boven het voetstuk van de Testblokken bij aanvang van een testserie niet is gevuld met inwasmateriaal.

Gedurende het proevenprogramma zijn de specificaties van het inwasmateriaal aangepast. Dit is gedaan omdat het inwasmateriaal uit bleek te spoelen, terwijl dat in de praktijk wellicht niet gebeurt. Door de gradering wat aan te passen was het mogelijk om vast te stellen of dit aan de toevallige samenstelling van het inwasmateriaal lag, of dat er een structureel probleem is met de vorm van de blokken. Tijdens de grootschalige modelproeven met Hillblocks, welke in 2011 zijn uitgevoerd (zie Van Steeg, 2012), spoelde het inwasmateriaal

niet uit, zelfs niet na tientallen uren golven met  $H_s = 1,4$  m. Deze blokken hadden een iets andere vorm.

Als dit zou leiden tot een veel hogere stabiliteit dan in Test Serie 1, zou dat resultaat alleen gebruikt kunnen worden als ook in de praktijk met breed gegradeerd materiaal gaat worden ingewassen.

Een overzicht van de specificaties van het inwasmateriaal is weergegeven in Tabel 3.1. Het inwasmateriaal is na iedere proef opnieuw aangevuld. Gedurende de langeduurproef (Test S09) is het inwasmateriaal niet aangevuld. De aanpassingen van het inwasmateriaal bleken weinig of geen effect op het uitspoelen ervan te hebben. Er wordt daarbij aangenomen dat dit daarom ook geen significant verschil heeft gehad op de inklemming. Hierbij dient vermeld te worden dat de kleine fracties (0 - 4 mm) van het type 'Inwas 2' en het type 'Inwas 3' niet bijzonder hoekig was. Mogelijk dat de uitspoeling van dit materiaal iets minder zou zijn geweest indien dit materiaal een hoekiger vorm zou hebben gehad.

Tabel 3.1 Overzicht gebruikt inwasmateriaal (steenslag: Noors graniet)

Inwasmateriaal	Beschrijving	Proef	$D_{f15}$	$D_{f50}$	$D_{f90}$
Inwas 1	-	Geheel Serie 1, S01, S02 Geheel Serie 4	4,5	7	10,5
Inwas 2	Aangepast mengsel	S03, S04	0,7	4,5	14
Inwas 3	Conform Inwas 2 maar eerst wat grote stenen en daarna de gradatie	S05, S06, S07	-	-	-

Voor de berekeningen met Steentoets (zie Hoofdstuk 5) is ervoor gekozen om steeds met  $D_{f15} = 4,5$  mm te rekenen. Dat is gedaan omdat verwacht wordt dat de fijne fractie als eerste uitspoelt, waarna materiaal overblijft met een wat grotere  $D_{f15}$ . Gezien de onzekerheid over de exacte waarde van de  $D_{f15}$  is gekozen om te rekenen met een waarde aan de hoge kant. Als namelijk de  $D_{f15}$  in de berekeningen kleiner is dan in werkelijkheid, wordt een te grote stabiliteitsfactor berekend. Op deze wijze wordt een conservatief (veilig) onderzoeksresultaat verkregen.

### 3.1.6 Afwerking van de modelranden

De onderstaande beschrijving is van toepassing voor zowel Proefopstelling 1 als Proefopstelling 2.

Tussen de gootwand en de bekleding en tussen het scheidingschot (tussen Slimblocks en Basisblocks) en de bekleding is een strook celrubber aangebracht zoals dat gebruikelijk is bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klemwigt 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 Testblokken naar het rubber en van het rubber naar de gootwand.

Bij Proefopstelling 1 is aan de onderzijde van de onderste Testblokken een kleine stalen hoekprofiel aangebracht (op  $Z = 5,5$  m boven de gootbodem). Dit is gedaan om te garanderen dat, tijdens het ombouwen naar Proefopstelling 2, de al geplaatste Testblokken niet zouden verschuiven of kantelen. Dit heeft geen invloed op de proefresultaten (het

beïnvloedt de golflopen niet en het is ver boven de golfaanvalzone zodat dit ook niet de stabiliteitsproeven kan beïnvloeden).

Om deze opstelling te kunnen bouwen zijn de gootwanden ter plaatse van de kruin wat opgehoogd.

Het dijklichaam is tevens voorzien van drainage zodat eventuele snelle waterstandwisselingen in de goot niet zouden leiden tot het opbarsten van de dichte betonnen teen.

### 3.2 Meetinstrumenten

Gedurende het project zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Golfhoogtemetingen
- Profielmetingen
- Uitspoeling inwasmateriaal
- Golfploopmetingen
- Drukmetingen

Bovengenoemde metingen worden in onderstaande paragrafen toegelicht.

#### 3.2.1 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 80 m, 85 m en 87 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  $C_r$ .

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1+C_r^2}} \quad (3.2)$$

Waarbij

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

#### 3.2.2 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.

### 3.2.3 Uitspoeling inwasmateriaal

De uitspoeling van het inwasmateriaal is gemeten door na verschillende testen met behulp van een duimstok de afstand vanaf de bovenzijde van de Testblokken tot 'de bodem' te meten. Dit is voor verschillende Testblokken gedaan aan zowel de linker als de rechterzijde van de goot. De meting bij een individueel Testblokken is op alle vier de hoekpunten uitgevoerd. De gemiddelde diepte van deze vier metingen is gerapporteerd. Een analyse van de resultaten is weergegeven in Paragraaf 5.2.

### 3.2.4 Golfploopmetingen

Tijdens alle testen zijn er golfploopmetingen uitgevoerd. De oploophoogten voor iedere golfploop is visueel waargenomen en vastgelegd op video. Hiertoe zijn horizontale strepen op het talud aangebracht.

### 3.2.5 Drukmetingen

Bij het aanleggen van Proefopstelling 2 (Test Series 1, 2 en 3) zijn dertien drukopnemers in de filterlaag aangebracht. De drukopnemers waren onderin het filter aan het geotextiel bevestigd op een afstand van gemiddeld 20,6 cm onder het taludoppervlak. Een indruk van de locatie is weergegeven in Foto A.7. De drukopnemers zijn 0,5 m uit de gootwand (halzijde) aangebracht. De verticale locatie van de drukopnemers ten opzichte van de gootbodem is weergegeven in Tabel C.4. Voor de locatie van het taludoppervlak wordt verwezen naar formule (3.1).

De analyse van de drukopnemers zal in een later stadium worden uitgevoerd en vormt derhalve geen onderdeel van dit rapport.

## 3.3 Proevenprogramma

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

- Test Serie 4: golfploopmetingen
- Test Serie 1: stabiliteit en golfploop korteduurproef,  $s_{op} = 0,02$
- Test Serie 2: stabiliteit en golfploop korteduurproef,  $s_{op} = 0,04$
- Test Serie 3: stabiliteit langeduurproef,  $s_{op} = 0,04$

De golfcondities van de proeven worden gekarakteriseerd door de significante golfhoogte ( $H_{m0}$ ) en de golfsteilheid ( $s_{op}$ ). De proeven bij Test Serie 4 zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz spectrum of een Jonswap spectrum. De proeven bij Test Serie 1, 2 en 3 zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum.

Het doel van Test Serie 4 is om golfploophoogten vast te leggen voor een talud waarvan het gedeelte boven de stilwaterlijn is bekleed met Testblokken. Bij Test Serie 4 zijn de golfhoogte ( $H_s = 0,6$  m, 0,9 m; 1,2 m), de golfsteilheid ( $s_{op} = 0,01$ ; 0,03 en 0,05) en het golfspectrum (Jonswap; Pierson-Moscowitz) gevarieerd. De waterstand bij Test Serie 4 was 5,48 m boven de bodem van de goot. Dit is hetzelfde niveau als de overgang tussen de Basalton en de Testblokken.

Tabel 3.2 Overzicht uitgevoerde proeven Test Serie 4

Spectrum→	$H_s = 0,6 \text{ m}$		$H_s = 0,9 \text{ m}$		$H_s = 1,2 \text{ m}$	
	J	PM	J	PM	J	PM
$s_{op} = 0,01$	P21-J	P21	P22-J	P22	P23-J	n.v.t.
$s_{op} = 0,03$	P24-J	P24	P25-J	P25	P26-J	n.v.t.
$s_{op} = 0,05$	P27-J	P27	P28-J	P28	P29a-J*	n.v.t.

\* P29-J bleek een afwijkende golfhoogte te hebben en is daarom opnieuw uitgevoerd met aangepaste golfcondities. De opnieuw uitgevoerde test is P29a-J

Test Serie 1 en Test Serie 2 (de zogenaamde korteduurproeven) zijn uitgevoerd om de stabiliteit te bepalen en om de golfploophoogte te meten van een talud dat volledig is bekleed met Testblokken. 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 duren circa 1000 golven of totdat de constructie is bezwaken. Na iedere test is het uitgespoelde inwasmateriaal opnieuw aangebracht zodat de afzonderlijke proeven als onafhankelijk van elkaar kunnen worden beschouwd. Vervormingen van het taludoppervlak zijn niet hersteld. Tijdens Test Serie 1, 2 en 3 is een waterstand aangehouden van 4,70 m boven de bodem van de goot (een uitzondering hierop zijn de ingolfproeven waar een waterstand van 4,55 m boven de gootbodem is aangehouden).

Test Serie 3 (de zogenaamde langeduurproef) is uitgevoerd om inzicht te krijgen in de langeduursterkte van de bekleding. Test Serie 3 is uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Tijdens Test Serie 3 is het aanwasmateriaal tussentijds niet aangevuld. Deze testserie is in verschillende delen uitgevoerd zodat tussentijds het talud kon worden geïnspecteerd. Het berekenen van de golfcondities van de samengestelde proefdelen is gedaan op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven).

De gemeten waarden van alle testen zijn weergegeven in Tabel C.1 en Tabel C.2 van Bijlage C. De golfhoogte overschrijdingskrommen en energiedichtheidspectra zijn weergegeven in Bijlage D.

Hierbij zijn de volgende parameters gebruikt:

$D$	=	dikte van de toplaag	(m)
$E(f)$	=	energiedichtheid als functie van $f$	( $\text{m}^2\text{s}$ )
$f$	=	golffrequentie = $1/T$	(Hz)
$h$	=	waterdiepte	(m)
$H_{m0}$	=	significante inkomende golfhoogte	(m)
$H_{max}$	=	grootste gemeten golfhoogte	(m)
$H_s/(\Delta D)$	=	belastingparameter	(-)
$H_s$	=	inkomende significante golfhoogte. In dit rapport gedefinieerd als $H_{m0}$	(m)
$L_{op}$	=	golflengte op diep water ( $gT_p^2/(2\pi)$ )	(m)
$m_0$	=	nulde moment van de energiedichtheid = $\int E(f)df$	( $\text{m}^2$ )
$N$	=	aantal golven tijdens de proef	(-)
$s_{op}$	=	golfsteilheid op basis van de piekperiode ( $H_{m0}/(1,56T_p^2)$ )	(-)
$s_{om}$	=	golfsteilheid op basis van de spectrale periode ( $H_{m0}/(1,56T_{m-1.0}^2)$ )	(-)
$T_p$	=	golfperiode bij de piek van het spectrum	(s)
$T_{m-1.0}$	=	spectrale periodemaat	(s)
$\alpha$	=	taludhelling	( $^\circ$ )



$\Delta$	=	relatieve soortelijke massa van de steenzetting $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$	(-)
$\xi_{op}$	=	brekerparameter $(\tan(\alpha) / \sqrt{s_{op}})$	(-)
$\xi_{om}$	=	brekerparameter $(\tan(\alpha) / \sqrt{s_{om}})$	(-)
$\rho_s$	=	soortelijke massa van beton	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_w$	=	soortelijke massa van water	(kg/m <sup>3</sup> )

Vanwege de duur van de proeven zijn een aantal proeven in Test Serie 3 in verschillende delen uitgevoerd. Het berekenen van de golfcondities van de samengestelde proefdelen is gedaan op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven):

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

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

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

De genoemde waarden in de gegeven tabellen zijn op schaal 2 in de Deltagoot. De totale overeenkomstige belastingduur van Test Serie 3 (langeduurproeven) is in werkelijkheid  $\sqrt{2}$  groter.



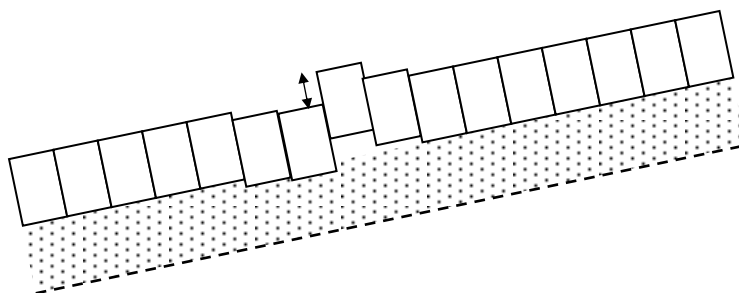
## 4 Proefresultaten en beschrijving van testen

### 4.1 Indeling in schadecategorieën

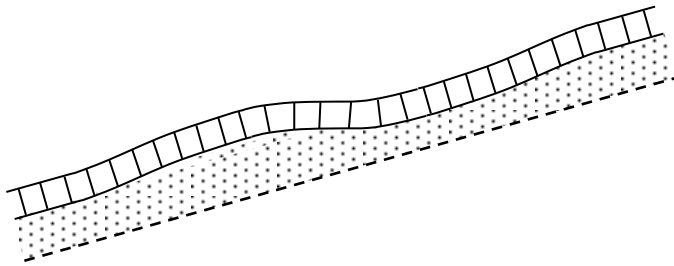
In de volgende paragrafen worden de proefresultaten besproken. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de volgende schade-categorieën.

- 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 4.1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 4.2) 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 tenminste  $15D$  (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 4.1 Verplaatsing van zetsteen ten opzichte van naastliggende zetsteen

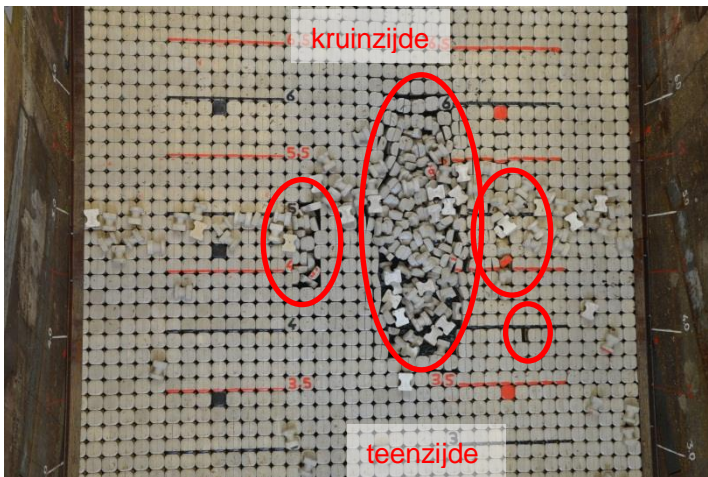


Figuur 4.2 Vervorming tot S-profiel

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

*Proef S01 (ingolfproef,  $H_s = 0,62$  m,  $N = 491$  golven)*

Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (Schadecategorie A). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de zuilen en geen kattenrug waargenomen. Bij deze proef is circa 2 cm van het inwasmateriaal uitgespoeld over een lengte van circa 2 m rondom de waterlijn (zie Figuur B.3 voor de resultaten van de dieptemeting van het inwasmateriaal). Na de proef is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht.

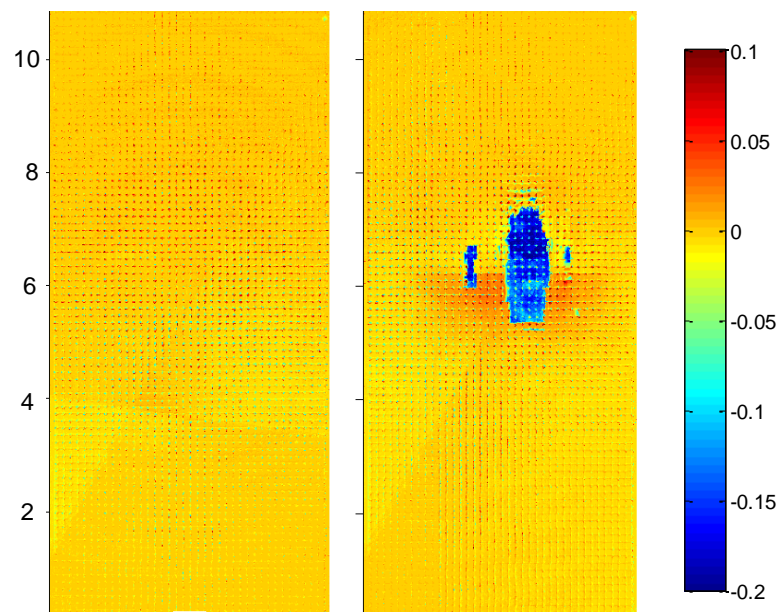


Figuur 4.3 Schade na Proef S02 ( $H_s = 0,93$  m,  $s_{op} = 0,02$ ) (links: situatie direct na de test, rechts: situatie nadat de losse stenen zijn verwijderd)

*Proef S02 ( $H_s = 0,93$  m,  $N = 391$  golven)*

Tijdens deze proef zijn verschillende zuilen uit de steenzetting gelicht (schadecategorie D). De proef is stopgezet nadat na circa een half uur de schade is opgemerkt (1841 seconden). Een indruk van de schade is weergegeven in Figuur 4.3, Foto A.10, Foto A.11 en Foto A.12.

De ingemeten schade met de laserscanner (verschilplot) is weergegeven in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Verschilplot ten opzichte van de situatie voor test S01. Links: na test S01, rechts: na test S02 (waarbij de losse blokken zijn verwijderd). De eenheid van de kleurschaal is in meters. Verticale as: de afstand vanaf de onderzijde van de meetsectie, langs het talud gemeten

De resultaten van de metingen met betrekking tot het uitspoelen van het inwasmateriaal zijn weergegeven in Figuur B.4. Het inwasmateriaal aan de halzijde bleek nauwelijks uitgespoeld. Het inwasmateriaal aan de zijde van de meetcabine bleek vrijwel geheel uitgespoeld te zijn in de zone tussen  $Z =$  circa 3,5 en 4,5 m (dit is overigens ook de zone waar de schade optrad).

In de onderstaande beschrijving wordt de schade uitgedrukt in het aantal Testblokken dat volledig uit de steenzetting is gelicht. Met een Testblok wordt een enkele zetsteen (12,5 cm parallel aan het talud x 6,25 cm evenwijdig aan de waterlijn) bedoeld. Het grootste gat had een afmeting van circa 16 Testblokken parallel aan het talud x 10 Testblokken evenwijdig aan de waterlijn. Het gat aan de linkerzijde (halzijde) had een afmeting van 6 Testblokken parallel aan het talud x 3 Testblokken evenwijdig aan de waterlijn. Het gat aan de rechterzijde (meetcabinezijde) had een afmeting van 3 Testblokken parallel aan het talud x 2 Testblokken evenwijdig aan de waterlijn. Tevens is er aan de rechterzijde een Testblok uit de steenzetting gelicht.

Naar verwachting is de schade begonnen bij het middelste gat en is vervolgens, door verminderde klemming, schade aan de linker en rechter zijde (kleinere gaten) ontstaan.

Aangezien het inwasmateriaal grotendeels was uitgespoeld is besloten om bij de volgende proevenserie met een ander inwasmateriaal te testen.

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

Voor de tweede serie is de bekleding opnieuw aangebracht met dezelfde testblokken. Gezien de constatering tijdens Test Serie 1 dat het inwasmateriaal gemakkelijk uitspoelt, terwijl dit met een vergelijkbare taludbekleding van Hillblocks (Van Steeg, 2012) zelfs niet gebeurde na tientallen uren golven met  $H_s = 1,4$  m, is de samenstelling van het inwasmateriaal aangepast. Door dit aan te passen, kon vastgesteld worden of het uitspoelen een gevolg is van de toevallige samenstelling van het inwasmateriaal, of dat het meer te maken heeft met de vorm van de Testblokken.

Er is gekozen voor een wat bredere gradering, die ook in de praktijk zou kunnen ontstaan als fijn materiaal inspoelt en zich vastzet in de smalle delen van de spleten. De achterliggende gedachtegang hiervan was dat de fijnere fractie de dunne spleten op zou kunnen vullen en de grotere fractie de grotere gaten. Een korrelverdelingsdiagram van het nieuwe inwasmateriaal is weergegeven in Figuur B.2. Meer achtergrondinformatie over het inwasmateriaal is gegeven in Paragraaf 3.1.5.

Als dit zou leiden tot een veel hogere stabiliteit dan in Test Serie 1, zou dat resultaat alleen gebruikt kunnen worden als ook in de praktijk met breed gegradeerd materiaal gaat worden ingewassen.

*Test S03 (ingolfproef,  $H_s = 0,54$  m,  $s_{op} = 0,04$ )*

Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (Schadecategorie A). Er zijn geen hoogteverschillen tussen de zuilen en geen kattenrug waargenomen. Er bleek een aanzienlijk hoeveelheid inwasmateriaal uitgespoeld te zijn. De metingen met betrekking tot het uitspoelen van het inwasmateriaal zijn weergegeven in Figuur B.5. Na de proef is het inwasmateriaal aangevuld.

*Test S04 ( $H_s = 0,67$  m,  $s_{op} = 0,04$ )*

Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (Schadecategorie A). Wel bleken er twee Testblokken afgebroken te zijn (de locatie is aangegeven in Foto A.13). Hoewel de sterkte van deze blokken niet is opgemeten, is het gezien het productieproces waarschijnlijk dat de sterkte beduidend kleiner is dan de blokken in de praktijk. Het breken van deze blokken is derhalve een modeffect.

Er is een zeer beperkte kattenrug ontstaan (zie Figuur 4.6) van orde 1 cm. Deze kattenrug was zo klein dat het niet de oorzaak kan zijn van spanningen in de blokken die zouden kunnen leiden tot de breuk van blokjes. Daarom is het waarschijnlijker dat er al haarscheurtjes in het gebroken blok aanwezig waren, als gevolg van het productieproces.

Het inwasmateriaal bleek gedeeltelijk uitgespoeld te zijn (Zie Figuur B.6 voor de resultaten van de inwasmetingen). Na de proef is het talud opnieuw ingewassen. Hiervoor is echter een aangepaste procedure gebruikt.

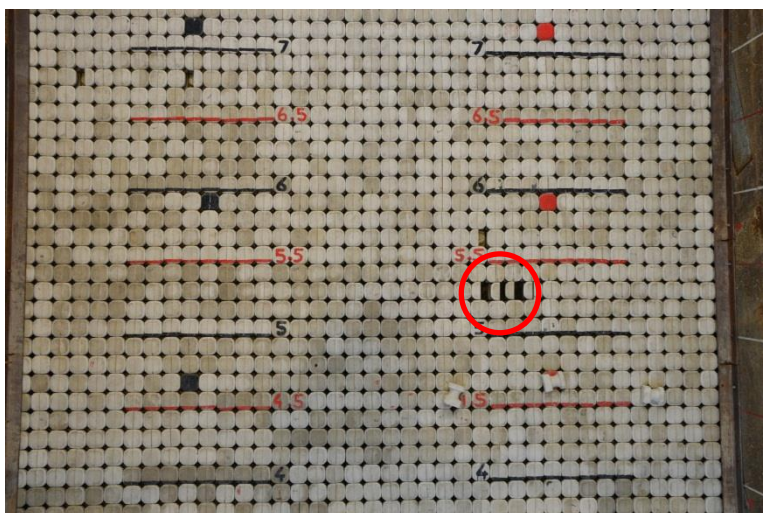
*Test S05 ( $H_s = 0,79$  m,  $s_{op} = 0,04$ )*

Het aanvullen van het inwasmateriaal is, alvorens Test S05 werd uitgevoerd, op een gewijzigde manier uitgevoerd. Deze wijziging leek nodig omdat het inwasmateriaal mogelijk sneller uitspoelt dan in werkelijkheid, hoewel daarover geen zekerheid bestaat. Allereerst zijn grote stenen in de bekleding ingestrooid, die alleen in de grote gaten tussen de Testblokken passen, en daarna is het inwasmateriaal op de gebruikelijke manier aangebracht. Ook bij deze gewijzigde methode is alleen de voet ingewassen.

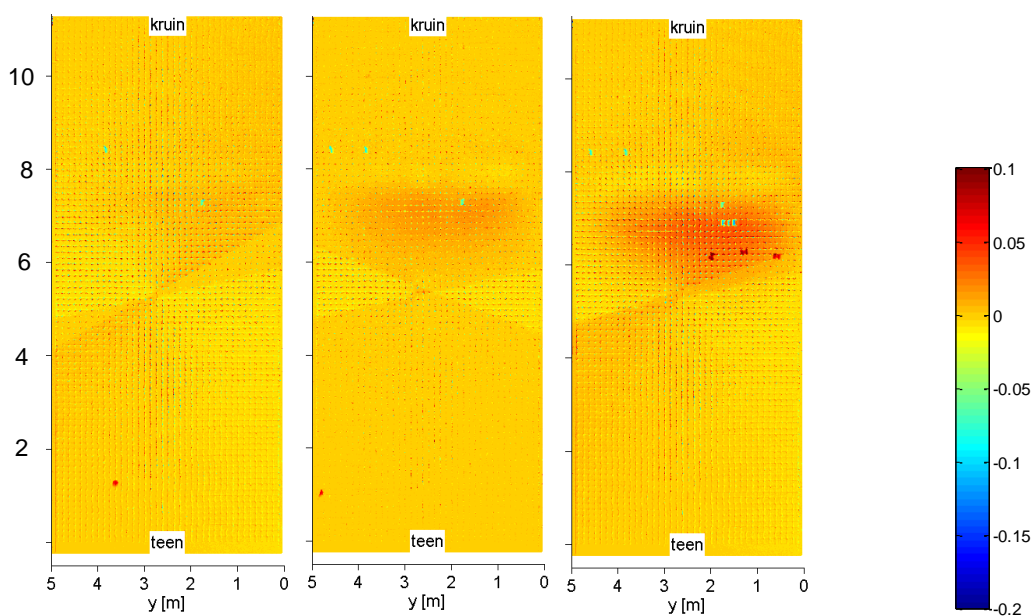
Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (Schadecategorie A). Wel bleek er een Testblok afgebroken te zijn (de locatie is aangegeven in Foto A.13), maar dat wordt hier niet gezien als een relevant bezwijkmechanisme. Er was een duidelijke kattenrug zichtbaar (zie ook de verschilplot in Figuur 4.6). Het inwasmateriaal was uitgespoeld aan de rechterzijde en in het midden (Zie Figuur B.7 voor een indruk van de resultaten van de metingen van het inwasmateriaal). Na de test is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht.

*Test S06 ( $H_s = 0,99$  m,  $s_{op} = 0,04$ )*

Tijdens deze proef is schade opgetreden (Schadecategorie D). Drie Testblokken zijn volledig uit het talud gelicht. De proef is stopgezet direct nadat de schade is opgemerkt (1620 seconden). Het inwasmateriaal was aan beide zijden uitgespoeld, zoals te zien is in Figuur B.8. Er was een duidelijke kattenrug zichtbaar (Zie Figuur 4.6).



Figuur 4.5 Schade tijdens Test S06



Figuur 4.6 Verschilplot Test Serie 2 ten opzichte van de situatie voor Test S03 (Links: na Test S04, midden: na Test S05, rechts: na Test S06). De eenheid van de kleurschaal is in meters.

#### 4.4 Test Serie 3: langeduurproeven, $H_s = 0,7$ m, $s_{op} = 0,04$

Test S07 en Test S08 (ingolfproeven  $H_s = 0,53$  m,  $s_{op} = 0,042$ , waterstand = 4,55 m, duur: 2 x 20 minuten)

Tijdens deze twee proeven is geen schade opgetreden (Schadecategorie A). Er is gekozen om twee ingolfproeven uit te voeren vanwege twee open dagen voor extern geïnteresseerden. Op beide dagen is er een ingolfproef gedemonstreerd. Er zijn na de proef geen hoogteverschillen tussen de zuilen en geen kattenrug waargenomen. Na Test S08 is het inwasmateriaal opnieuw aangebracht.

*Test S09a (2 uur, cumulatief: 2 uur)*

Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (Schadecategorie A). Wel bleek er een Testblok afgebroken te zijn (de locatie is aangegeven in Foto A.14), maar dat wordt hier niet gezien als een relevant bezwijkmechanisme. Hoewel de sterkte van deze blokken niet is opgemeten, is het gezien het productieproces waarschijnlijk dat de sterkte beduidend kleiner is dan de blokken in de praktijk. Het breken van een blok is derhalve een modeffect.

Er was een minimale kattenrug zichtbaar (zie ook de verschilplot in Figuur 4.7) van orde 1 cm. Deze kattenrug was zo klein dat het niet de oorzaak kan zijn van spanningen in de blokken die zouden kunnen leiden tot de breuk van blokjes. Daarom is het waarschijnlijker dat er al haarscheurtjes in het gebroken blok aanwezig waren, als gevolg van het productieproces.

Het inwasmateriaal was geheel uitgespoeld aan de rechterzijde (meetcabinezijde) en grotendeel uitgespoeld aan de linkerzijde (Zie Figuur B.9 voor een indruk van de resultaten van de metingen van het inwasmateriaal). Na de test is het inwasmateriaal niet opnieuw aangebracht.

*Test S09b (0,5 uur, cumulatief: 2,5 uur)*

Tijdens deze proef is schade opgetreden (Schadecategorie D). Een indruk van de schade is weergegeven in Foto A.15. Een Testblok was gedeeltelijk uit het talud gelicht. De proef is stopgezet direct nadat de schade is opgemerkt (1801 seconden). Het inwasmateriaal was niet verder uitgespoeld ten opzichte van Test S09a, zoals is te zien in Figuur B.9. Er was een lichte kattenrug zichtbaar (Zie Figuur 4.7). Na de test is het inwasmateriaal niet opnieuw aangebracht. Ondanks dat er schade was opgetreden is besloten om de verdere ontwikkeling van de schade te onderzoeken en zijn er aanvullende testen uitgevoerd (Test S09c en Test S09d).

*Test S09c (1,5 uur, cumulatief: 4 uur)*

Tijdens deze test is de schade iets groter geworden. Een indruk van de schade is weergegeven in Foto A.16. Na de test bleken zes Testblokken (12,5 cm x 6,25 cm) volledig uit het talud te zijn gelicht en zijn twee Testblokken in het ontstane gat omgevallen. De kattenrug was iets groter geworden. Het inwasmateriaal aan de halzijde was iets verder uitgespoeld ten opzichte van de situatie na Test S09b (zie Figuur B.10). Na de test is het inwasmateriaal niet opnieuw aangebracht.

*Test S09d (1 uur, cumulatief: 5 uur)*

Tijdens deze test is de schade significant groter geworden. De Testblokken zijn bezweken over een oppervlakte van circa 4,5 m parallel aan het talud x circa 2,5 m evenwijdig aan de waterspiegel. Dit is weergegeven in Foto A.17 en Foto A.18. De ontwikkeling van de schade is weergegeven in het onderstaande fotoverslag.

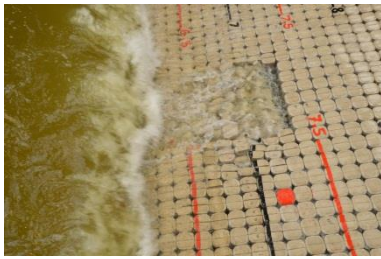


Na circa 4 uur, 14 minuten

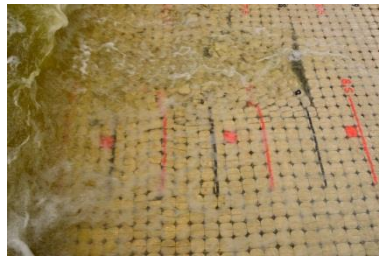
Na circa 4 uur, 27 minuten

Na circa 4 uur, 34 minuten

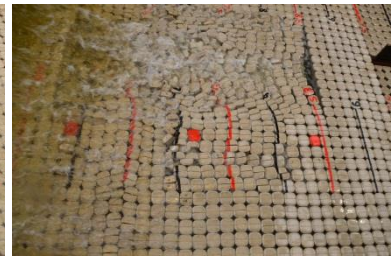




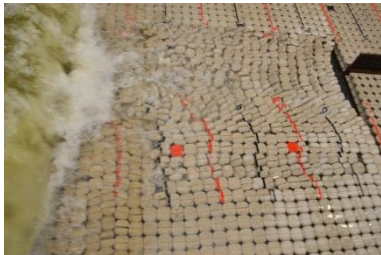
Na circa 4 uur, 38 minuten



Na circa 4 uur, 47 minuten

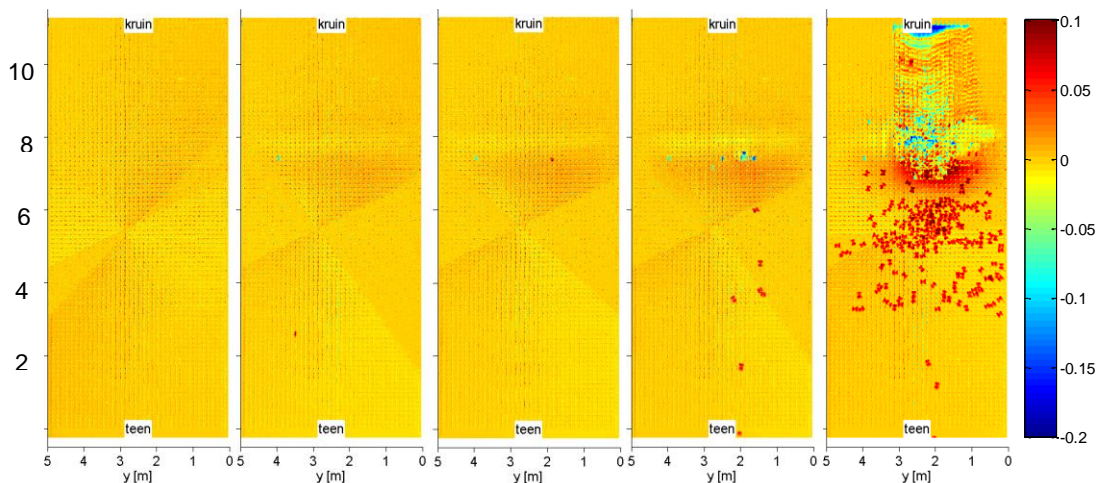


Na circa 4 uur, 54 minuten



Na circa 4 uur, 59 minuten

De schade breidde zich vanuit de oorspronkelijke schade verder omhoog uit. Opvallend hierbij is dat de Testblokken naar beneden zakten en de filterlaag en onderliggende lagen nog wel bescherming lijken te bieden. Vanaf het niveau  $Z = 5,5$  m (gemeten verticaal vanaf de bodem en aangegeven met de lijn  $X' = 9,5$  m) konden de Testblokken niet verder zakken vanwege een stalen strip die daar onder de Testblokken was aangebracht (de reden van deze strip is toegelicht in Paragraaf 3.1.1). Gezien het schadepatroon en de observaties wordt geconcludeerd dat de Testblokken in de golfaanvalzone uit het talud worden gelicht en niet in de hogergelegen zone. De Testblokken in de hogergelegen zone zakten alleen parallel aan het talud richting de teen van de dijk.



Figuur 4.7 Schadeverloop tijdens langeduurproef, v.l.n.r.: na ingolfproeven (S07 en S08), na 2 uur (S09a), na 2,5 uur (S09b), na 4 uur (S09c), na 5 uur (S09d). De eenheid van de kleurschaal is in meters.



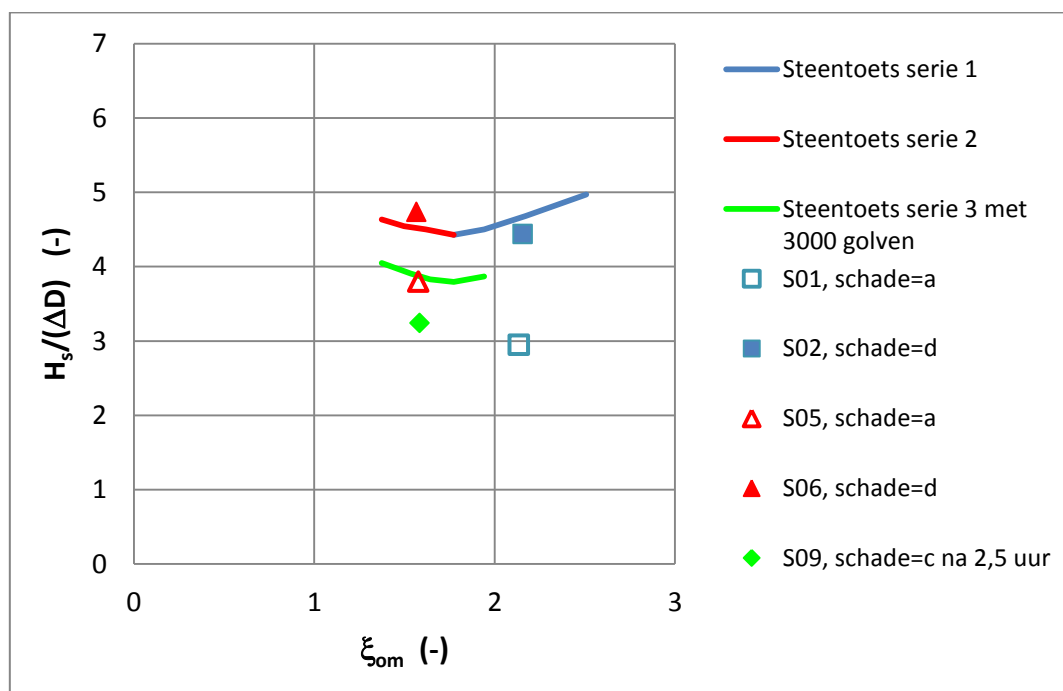
## 5 Analyse van de proefresultaten

### 5.1 Stabiliteit

De steenzetting is bij alle drie de series bezweken door het uitlichten van afzonderlijke zetstenen uit de bekleding. Dit sluit aan bij de categorisering in Paragraaf 4.1. Een overzicht van alle testresultaten is weergegeven in Tabel C.2. Een overzicht van de belangrijkste testen (testen met de hoogste golfhoogten en waarbij geen schade is opgetreden en de testen met de laagste golfhoogte waarbij wel schade is opgetreden) is weergegeven in Tabel 5.1. In de tabel is ook de waarde van de belastingparameter ( $H_s/(\Delta D)$ ) gegeven zoals deze is gemeten en zoals deze met Steentoets is bepaald. Overigens is bij de berekening met Steentoets een aangepaste waarde van de wrijvingscoëfficiënt toegepast. Deze is gebaseerd op de metingen zoals beschreven in Paragraaf 3.1.4 en Tabel C.3. De resultaten zijn grafisch weergegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Overzicht resultaten testen met schade (en laagste golfhoogte) en zonder schade (met hoogste golfhoogte)

Serie	Test	$H_{s,cat.a}$ (m)	$H_{s,cat.c/d}$ (m)	$N_{cat.c/d}$	$H_s/(\Delta D)$ gemeten	$H_s/(\Delta D)$ Steentoets
1	S01ingolf	0,62	-	-	2,95	4,64
	S02	-	0,93	-	4,44	
2	S05	0,79	-	-	3,80	4,50
	S06	-	0,99	-	4,73	
3	S09b	-	0,67	3079	3,18	3,83



Figuur 5.1 Resultaten van de relevante proeven en overeenkomstige berekeningen met Steentoets

Op de horizontale as van Figuur 5.1 is de brekerparameter  $\xi_{om}$  (zie Paragraaf 3.3 voor een definitie) weergegeven. Deze parameter is gebaseerd op de spectrale periodemaat  $T_{m-1,0}$ . Op

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

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 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. De meetpunten en de lijnen met dezelfde kleur horen bij elkaar.

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 Testblokken voor ongeveer 30% uit kanalen bestaan. Er is gerekend met een toplaagdikte van 15 cm en een soortelijke massa van het beton van  $2390 \text{ kg/m}^3$  conform de concept NEN7024-1, die naar verwachting in 2015 wordt vastgesteld.

In de figuur valt te zien dat bij Test Serie 1 (korteduurproef,  $s_{op} = 0,02$ ) de steenzetting is bezweken bij een golfhoogte welke lager is dan de golfhoogte zoals deze is berekend met Steentoets. Bij Test Serie 2 (korteduurproef,  $s_{op} = 0,04$ ) ligt de met Steentoets berekende waarde tussen de gemeten waarden (het punt waarbij schade optrad en het punt waarbij dit niet het geval is). Bij Test Serie 3 (langeduurproef,  $H_s = 0,67 \text{ m}$ ) lag het bezwijkpunt zoals waargenomen tijdens de testen lager dan het met Steentoets berekende bezwijkpunt. Het verschil (m.b.t. discrepantie Steentoets en meting) tussen Test Serie 2 en Test Serie 3 is opmerkelijk aangezien de testcondities vrijwel gelijk waren. Mogelijk kan dit worden verklaard doordat de steenzetting bij Test Serie 2 na iedere test (circa 1000 golven) opnieuw werd ingewassen. Bij Test Serie 3 is er gedurende circa 3000 golven niet ingewassen. Het uitspoelen van het inwasmateriaal was immers een belangrijke factor bij het instabiel worden van de steenzetting.

In vergelijking met eerder onderzoek naar de stabiliteit van Hillblocks (Van Steeg, 2012) is de stabiliteit lager. In dat onderzoek is geen schade opgetreden waarmee kon worden geconcludeerd dat het schadepunt hoger ligt dan dat met Steentoets is berekend. Het belangrijkste verschil tussen de twee projecten was de hoogte van de blokken. In het eerdere onderzoek was de hoogte van het Hillblock gelijk aan 40 cm (ware grootte), in het huidige onderzoek was de hoogte van het Testblok gelijk aan 30 cm (ware grootte). De voet van het Testblok was lager dan de voet van het Hillblock. Dit heeft waarschijnlijk invloed gehad op het uitspoelen van het inwasmateriaal. Dit is verder uitgewerkt in Paragraaf 5.2.

## 5.2 Uitspoeling inwasmateriaal

Tijdens de testen bleek het inwasmateriaal grotendeels weg te spoelen. Dit is beschreven in Hoofdstuk 4 en grafisch weergegeven in Bijlage B. Er zijn verschillende methodes gehanteerd met verschillende korrelverdelingen van het inwasmateriaal, maar dit bleek weinig invloed te hebben. Doordat het inwasmateriaal niet bleef zitten zal er in mindere mate klemming tussen de Testblokken optreden wat een negatieve invloed heeft op de stabiliteit. In de eerdere proeven met Hillblocks welke in 2011 zijn uitgevoerd (Van Steeg, 2012) was er veel minder uitspoeling van het inwasmateriaal. Het verschil kan waarschijnlijk worden verklaard door het verschil in hoogte van de voet van het de blokken en de tapsheid van de voet. Daarnaast is het mogelijk dat het inwasmateriaal beter zou blijven zitten indien een hoekiger materiaal zou zijn gebruikt in de fractie 0-4 mm welke in het huidige onderzoek niet bijzonder hoekig was. In Figuur 5.2 zijn twee foto's weergegeven van het aangepaste

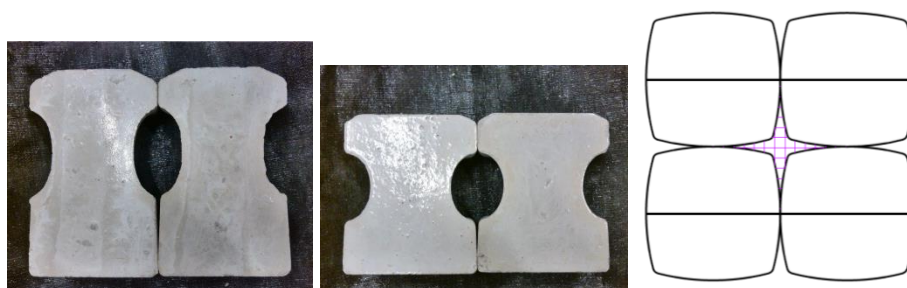
inwasmateriaal (waarbij een fractie 0 - 4 mm is toegepast) direct na aanbrengen en na een test.



Figuur 5.2 Impressie inwasmateriaal waarbij tevens een fractie 0-4 mm is gebruikt. Links: voor de test. Rechts na een test.

Tabel 5.2 Overzicht hoogte van het blok en de voet in het onderzoek in 2011 en het huidige onderzoek

	Hoogte blok	Hoogte voet
2011 Hillblock	0,20 m	0,075 m
2014 Testblok	0,15 m (75%)	0,050 m (67%)



Figuur 5.3 Indruk van het geometrisch verschil van de blokken welke zijn gebruikt in het onderzoek in 2011 (links) en in het huidige onderzoek (midden). Rechts: dwarsdoorsnede ter hoogte van het grondvlak (identiek voor beide)



Figuur 5.4 Impressie van het verschil tussen een Hillblock met een hoogte van 20 cm en een Testblok met een hoogte van 15 cm (modelwaarden)

De hoogte van het Hillblock in het onderzoek in 2011 was 0,20 m, de hoogte van het Testblok in het onderhavige onderzoek was 0,15 m (dus 75% ten opzichte van 2011). De hoogte van de voet van het Hillblock in het onderzoek in 2011 was 0,075 m, de hoogte van de voet van

het Testblok in het onderhavige onderzoek was 0,05 m (dus 67% ten opzichte van 2011). Dit is samengevat in Tabel 5.2 en weergegeven in Figuur 5.3 en Figuur 5.4.

### 5.3 Bepaling stabiliteitsfactor

Op basis van de uitgevoerde proevenseries is voor de Testblokken (huidige proeven) en Hillblocks (Van Steeg, 2012) 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 Testblokken met een hoogte van 30 cm (ware grootte) en Hillblocks met een hoogte van 40 cm (ware grootte).

#### 5.3.1 Bepaling stabiliteitsfactor Testblokken (30 cm hoog op ware grootte)

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) is daarvoor de significante golfhoogte waarbij de steenzetting bezwijkt van belang: de bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk}$ . Voor Test Serie 3 (langeduurproef met constante significante golfhoogte) is het aantal golven tot bezwijken van belang.

- *Test Serie 1:*  
Wanneer tijdens een korteduurproevenserie schade ontstaat, is conform de procedure uit Bijlage E aangehouden dat  $H_{s,bezwijk}$  gelijk is 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 waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).  
Tijdens Test Serie 1 was nog geen schade opgetreden tijdens proef S01 ( $H_s = 0,62$  m), maar wel tijdens S02 ( $H_s = 0,93$  m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk} = 0,78$  m.
- *Test Serie 2:*  
Tijdens Test Serie 2 was nog geen schade opgetreden tijdens proef S05 ( $H_s = 0,79$  m), maar wel tijdens S06 ( $H_s = 0,99$  m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk} = 0,89$  m.
- *Test Serie 3:*  
Voor de langeduurproef (proef S09) geldt naast de significante golfhoogte en golfperiode van de proef het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef, dus  $H_{s,bezwijk} = 0,67$  m,  $T_p = 3,40$  s en  $N = 3079$ . De eerste twee proeven van deze serie worden niet meegeteld omdat het ingolfproeven betreffen, waarna de steenzetting opnieuw was ingewassen.

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; met stabiliteitsfactor = 1), bij de bezwijkgolffhoogte van de betreffende serie (m)
- $D_{\text{Steentoets}}$  = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc. en met stabiliteitsfactor = 1), bij de bezwijkgolffhoogte van de betreffende serie (m)
- $D_{\text{in modelproeven}}$  = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (m), dus  $D_{\text{in modelproeven}} = 0,150 \text{ m}$

De benodigde toplaagdiktes  $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  en  $D_{\text{Steentoets}}$  volgen uit Steentoetsberekeningen. Hiervoor is gebruikgemaakt van Steentoets2014 versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014). In de berekeningen zijn de tijdens het Deltagootonderzoek geconstateerde bezwijkgolffhoogtes 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  $D_{\text{Steentoets}}$  is gerekend met klemming en voor het berekenen van  $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  is gerekend zonder klemming en het werkelijke gewicht van de Testblokken.

De Steentoetsberekening 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  $D_{15}$  van het filter ( $D_{15}$  = 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. Daarnaast is in de berekeningen uitgegaan van de karakteristieke korrelgroottes van het theoretische mengsel van het inwasmateriaal zoals beschreven in Paragraaf 3.1.5.

Voor deze berekeningen is het werkelijke volume van de Testblokken,  $V$ , en het volume van een massief blok (zonder kanalen) met hetzelfde grondvlak en hoogte als de Testblokken 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 Testblokken  $V = 0,809$  liter is.

Het volume  $V_{\text{massief}}$  van een massief blok met hetzelfde grondvlak en hoogte is als volgt berekend:

$$V_{\text{massief}} = L \cdot B \cdot D \cdot (1 - \Omega) = 0,125 \cdot 0,068 \cdot 0,15 \cdot (1 - 0,084) = 1,073 \text{ liter} \quad (5.1)$$

Met:

$V_{\text{massief}}$  = het volume van een massief blok (zonder kanalen) met hetzelfde grondvlak en hoogte als de Testblokken

$D$  = hoogte van blok (m)

$B$  = breedte van blok (m)

$L$  = lengte van blok (m)

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

Een massief blok met hetzelfde grondvlak en hoogte als het Testblok, maar met soortelijke massa van  $2043 \text{ kg/m}^3$  geeft onder water dezelfde kracht op de ondergrond als een Testblok. Dit is in de Steentoets-berekeningen gebruikt voor het bepalen van de stabiliteit met alleen het eigen gewicht van de blokken (zonder klemming etc.:  $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$ ).

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

$$f_{stab} = \left( \frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \quad (5.2)$$

Met:

- $f_{stab}$  = stabiliteitsfactor voor een bepaald type steenzetting (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 (-)

De waarde van de veiligheidsfactor  $\gamma$  wordt bepaald op basis van de standaardafwijking in de proefresultaten (berekend met  $D_{Steentoets}/D_{in\ modelproeven}$ ). Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

- Drie proevenseries:  $\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$  (5.3)

Met:

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

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 5.3 en Tabel 5.4.

Proevenserie	$N_{langeduur}$ [-]	$H_{s,bezwijk}$ [m]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	$D_{in\ modelproeven}$ [m]	$D_{Steentoets}$ [m]	$D_{ST\ eigen\ gewicht}$ [m]
Serie 1, $s_{om} = 0,024$	n.v.t.	0,78	3,74	0,150	0,130	0,218
Serie 2, $s_{om} = 0,045$	n.v.t.	0,89	4,27	0,150	0,144	0,216
Serie 3, $s_{om} = 0,043$	3079	0,67	3,21	0,150	0,130	0,203

Tabel 5.3 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.

Proevenserie	$D_{Steentoets}/D_{in\ modelproeven}$ [-]		$D_{Steentoets}/D_{ST\ eigen\ gewicht}$ [-]	$f_{stab}$ [-]
Serie 1, $s_{om} = 0,024$	0,87		0,60	0,82
Serie 2, $s_{om} = 0,043$	0,96		0,67	0,91
Serie 3, $s_{om} = 0,042$	0,87		0,64	0,83
Serie 1 t/m 3	$\mu$	$\sigma$	$\gamma$	$\mu$
	0,90	0,053	1,20	0,85

Tabel 5.4 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten ( $\mu$  = gemiddelde;  $\sigma$  = standaardafwijking).

Conform de met Rijkswaterstaat afgesproken procedure (zie Bijlage E) resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor de Testblokken:  $f_{stab} = 0,85$ .

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Testblokken van 30 cm hoog (op schaal 1:2, dus 15 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van



zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

### 5.3.2 Bepaling stabiliteitsfactor Hillblock (40 cm hoog op ware grootte)

Dezelfde procedure als bovenstaand is gehanteerd voor de Hillblocks met hoogte van 40 cm op ware grootte. Deze waren in de Deltagoot beproefd in 2011 (Van Steeg, 2012). Omdat toen zowel de Basisblocks als de Slimblocks in de golfaanvalzone zijn beproefd, kan voor beide de stabiliteitsfactor bepaald worden. De eigenschappen van de steenzetting was als volgt (op Deltagootschaal):

- Taludhelling: 1:3
- Toplaagdikte:  $D = 0,20$  m
- Soortelijke massa van de Hillblocks (Basisblock en Slimblock):  $\rho_s = 2372$  kg/m<sup>3</sup>
- Filterlaagdikte:  $b = 0,07$  m
- Karakteristieke korrelgrootte van het filter:  $D_{f15} = 12$  mm

Ook toen zijn drie proevenseries uitgevoerd, maar bleek er bij geen van de proevenseries schade te zijn ontstaan. De golfhoogte kon niet verder worden verhoogd vanwege de bereikte grens in de capaciteit van de Deltagoot.

Dat levert volgens de procedure uit Bijlage E slechts één set golfcondities bij bezwijken:

- significante golfhoogte bij bezwijken:  $H_{s, bezwijk} = 1,43$  m
- spectrale golfperiode:  $T_{m-1,0} = 4,83$  s
- belastingduur, uitgedrukt in aantal golven:  $N = 30.074$  (20% meer dan het totaal aantal golven dat zonder schade is doorstaan)

Tabel 5.5 Proefresultaten met Hillblocks van 20 cm (Van Steeg, 2012)

serie	proef	$H_s$ (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	$\xi_{om}$ (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	schade
1	T005	1,49	6,20	2,11	5,43	geen
2	T014	1,50	5,20	1,77	5,47	geen
3	T008-T-015	1,43	4,83	1,68	5,20	geen

Het volume van het Basisblock ( $V_{basis}$ ) en het Slimblock ( $V_{slim}$ ) is gemeten tijdens het bepalen van de soortelijke massa van het beton. De resultaten zijn samen met het berekende volume van een massief blok,  $V_{massief}$ , met hetzelfde grondvlak en hoogte als het Basisblock en het Slimblock gegeven in Tabel 5.6. Omdat het grondvlak van beide hetzelfde is, is ook  $V_{massief}$  voor beide hetzelfde.

Type Hillblock	Volume V (l)	$V_{massief}$ (l)	$\rho_{massief}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Basisblock	1,060	1,431	2015
Slimblock	0,975	1,431	1933

Tabel 5.6 Volumina en soortelijke massa dat voor massief blok onder water dezelfde kracht op de ondergrond geeft als het Hillblock ( $\rho_{massief}$ ).

Voor het berekenen van de stabiliteitsfactor zijn conform de procedure uit Bijlage E de volgende waarden nodig (berekend met Steentoets 2014, versie v14.1.2.1, zie Klein Breteler, 2014):

- Basisblock:
  - $D_{ST}$  eigen gewicht = 0,430 m
  - $D_{Steentoets}$  = 0,260 m

- $D_{in\ modelproeven} = 0,200\ m$   
Slimblock:  
 $D_{ST\ eigen\ gewicht} = 0,469\ m$   
 $D_{Steentoets} = 0,260\ m$   
 $D_{in\ modelproeven} = 0,200\ m$

Voor het berekenen van de veiligheidsfactor wordt  $\sigma = 0,05$  aangehouden, omdat er slechts één proevenserie beschikbaar is. Dit leidt voor beide tot:  $\gamma = 1,19$ .

Met bovenstaande gegevens en formules (5.2) en (5.3) resulteert dit uiteindelijk in een stabiliteitsfactor van  $f_{stab} = 1,193$  voor het Basisblock en  $f_{stab} = 1,185$  voor het Slimblock, dat voor beide wordt afgerond naar  $f_{stab} = 1,19$ .

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Hillblocks van 40 cm hoog (op schaal 1:2, dus 20 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 20 cm tot 80 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

## 6 Conclusies

Om de stabiliteit en golfploopreducerende eigenschappen van Testblokken met een hoogte op ware grootte van 30 cm onder golfaanval te onderzoeken is er dijk met een hoogte van 8,3 m en een buitentalud met een steilheid van 1:3 opgebouwd in de Deltagoot (Noordoostpolder) van Deltares. Deze dijk is voorzien van een bekleding met de volgende eigenschappen (maten in het model):

- Geometrische schaal: 1:2
- Type steenzetting:
  - o Testblok, type Basis (t.b.v. bepaling stabiliteit en golfploop)
  - o Testblokken, type Slim (t.b.v. bepaling golfploop boven de waterlijn)
- Dikte toplaag: 0,150 m
- Dikte filterlaag: 7,3 cm
- Open oppervlak in de toplaag: 8,4 % (kleinste doorsnede aan de voet)
- Soortelijke massa
  - o Type Basisblok: 2390 kg/ m<sup>3</sup>
  - o Type Slimblok: 2445 kg/ m<sup>3</sup>
- Karakteristieke korreldiameter filter,  $D_{f15}$ : 11,5 mm
- Karakteristieke korreldiameter inwas,  $D_{i15}$ : 4,5 mm Noors graniet (aannemende dat de in serie 2 en 3 toegevoegde fijne fractie het eerste uitspoelde)

Er zijn twee proefopstellingen gebouwd.

Bij Proefopstelling 1 zijn Testblokken boven de waterlijn ( $Z_{SWL} = 5,5$  m) geplaatst. Onder de waterlijn lag een relatief glad talud. Het doel van deze proevenserie was om de golfploopreductie van Testblokken boven de waterlijn te meten. Dit is gedaan door aan één zijde van de goot Testblokken van het type Slim te plaatsen en aan de andere zijde Testblokken van het type Basis. Deze constructie is getest door middel van een serie oploopprouwen (Test Serie 4). Hierbij is gevarieerd met de significante golfhoogte ( $H_s = 0,6$  m; 0,9 m en 1,2 m), de golfsteilheid ( $s_{op} = 1\%$ , 3%, 5%) en het type golfspectrum (Jonswap en Pierson-Moskowitz).

Bij proefopstelling 2 zijn Testblokken van het type Basis op het gehele talud geplaatst, behalve een deel van de golfploopzone. Eén helft van het talud, vanaf 0,8 m boven de waterlijn en hoger, was bekleed met Testblokken van het type Slim. Het doel van deze proevenserie was om de stabiliteit en de golfploopreductie van Testblokken van het type Basis te bepalen. Deze constructie is getest door middel van twee series korteduurproeven met oplopende golfhoogten en gelijkblijvende golfsteilheid ( $s_{op}$ ) en één serie langeduurproeven met constante golfhoogte ( $H_s$ ) en golfperiode ( $T_p$ ). De resultaten van de proeven met betrekking tot de stabiliteit en de berekeningen met Steentoets zijn samengevat in Tabel 5.1 en Figuur 5.1.

In twee van de drie proevenseries bleek bezwijken eerder op te treden dan berekend met Steentoets. De stabiliteit was tevens beduidend lager dan de stabiliteit tijdens eerdere proeven (Van Steeg, 2012) waarbij Hillblocks, overeenkomend met een hoogte van 40 cm op ware grootte, waren toegepast op schaal 1:2. Een waarschijnlijke verklaring hiervoor is dat de

voet van het kleinere Testblok lager is (ook in verhouding) en minder taps waardoor inwasmateriaal eenvoudig kon uitspoelen.

Op basis van deze proefresultaten en de proefresultaten uit het eerder onderzoek is de stabiliteitsfactor bepaald (blokmaten op ware grootte) (voor Steentoets2014, versie v14.1.2.1):

- Hillblocks (Basisblock en Slimblock) met een hoogte van 40 cm:  $f_{\text{stabiliteit}} = 1,19$
- Testblokken met een hoogte van 30 cm:  $f_{\text{stabiliteit}} = 0,85$

Hoewel de beproefde Hillblocks in 2011 (Basisblock en Slimblock) één specifieke maat hadden, namelijk de op schaal gereproduceerde elementen van 40 cm hoogte, wordt met het onderzoek voldoende specifieke kennis opgedaan over de werking van het systeem, dat met de proefresultaten ook uitspraken gedaan kunnen worden over de stabiliteit van Hillblocks met andere toplaagdiktes. Belangrijke aspecten van de stabiliteit, zoals de klemming, het optreden van stijghoogteverschillen over de toplaag en het uitspoelen van inwasmateriaal dienen echter niet wezenlijk anders te zijn. Zoals dat gebruikelijk is bij steenzettingen, worden de proefresultaten representatief geacht voor toplaagdiktes tussen 20 cm en 50 cm. Voor alle steenzettingen geldt dat de meeste ervaring is opgedaan met steenzettingen met relatief dunne toplaag. Extrapolatie van die kennis is wel mogelijk, maar er is geen vertrouwen in dergelijke extrapolatie voor toplaagdiktes boven de 50 cm.

Een essentiële voorwaarde voor toepassing van de conclusie op basis van de 40 cm Hillblocks naar andere toplaagdiktes, is dat de vorm van de Hillblocks goed vergelijkbaar moeten zijn. Het moet een perfecte geometrische schaling zijn in de hoogterichting, met gelijk grondoppervlak ( $25 \times 12,5 \text{ cm}^2$ ). De Testblokken voldeden daar niet aan en presteerden vervolgens minder goed doordat het inwasmateriaal vroegtijdig uitspoelde. Dit is mogelijk ook te verklaren doordat de kleinere fracties (0-4 mm) in het inwasmateriaal niet erg hoekig was.

Deze factor voor Hillblocks is opgenomen in Steentoets2015.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Testblokken en Hillblocks van respectievelijk 30 cm en 40 cm hoog (op schaal 1:2, dus respectievelijk 15 cm en 20 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog voor de Testblokken en van 20-80 cm voor Hillblocks. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

## Literatuur

- Bezuijen, A., Burger, A.M. en M. Klein Breteler, 1990. *Taludbekledingen van gezette steen*. ISBN: 90-9003232-0
- Klein Breteler, M. (2014), *Documentatie Steentoets2014, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*, rapport 1208045-009-HYE-0008, versie 4.1.1, Deltares, juli 2014
- 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 Golfoploop 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, kenmerk 1202901-000-HYE-0014
- Van Steeg, P., 2015, *Analyse golfoploopreductie Hillblock taludbescherming; Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken*, Deltares conceptrapport 1208618-009, 17-2-2015
- Wolters, G., Klein Breteler, M., 2014, *Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken, stabiliteitsproeven Basalton steenzetting*, Deltares rapport in voorbereiding



## A Foto's

- Foto A.1 Aanbrengen zandcement stabilisatie*
- Foto A.2 Zandcement stabilisatie in oploop zone aangebracht*
- Foto A.3 Modelopstelling t.b.v. golfoploop testen*
- Foto A.4 Golfoploop testen (tijdens impact)*
- Foto A.5 Golfoploop testen (tijdens oploop)*
- Foto A.6 Golfoploop testen (oploop over kruin)*
- Foto A.7 Aanbrengen filterlaag*
- Foto A.8 Tijdens opbouw Testblok talud*
- Foto A.9 Talud volledig opgebouwd t.b.v. stabiliteitstesten (Test S01 en Test S02)*
- Foto A.10 Talud voor Test S01 en na Test S02*
- Foto A.11 Talud na Test S02*
- Foto A.12 Talud na Test S02 en nadat losse stenen zijn verwijderd*
- Foto A.13 Voor Test S03 (bovenste foto), na Test S06 (onderste foto)*
- Foto A.14 Talud na Test S09a (in totaal 2 uur golven)*
- Foto A.15 Talud na Test S09b (in totaal 2,5 uur golven)*
- Foto A.16 Talud na Test S09c (in totaal 4 uur golven)*
- Foto A.17 Talud na Test S09d (in totaal 5 uur golven)*
- Foto A.18 Talud na Test S09d (in totaal 5 uur golven)*







Aanbrengen zand-cement stabilisatie

1208618.009

**Deltares**

Foto A.1

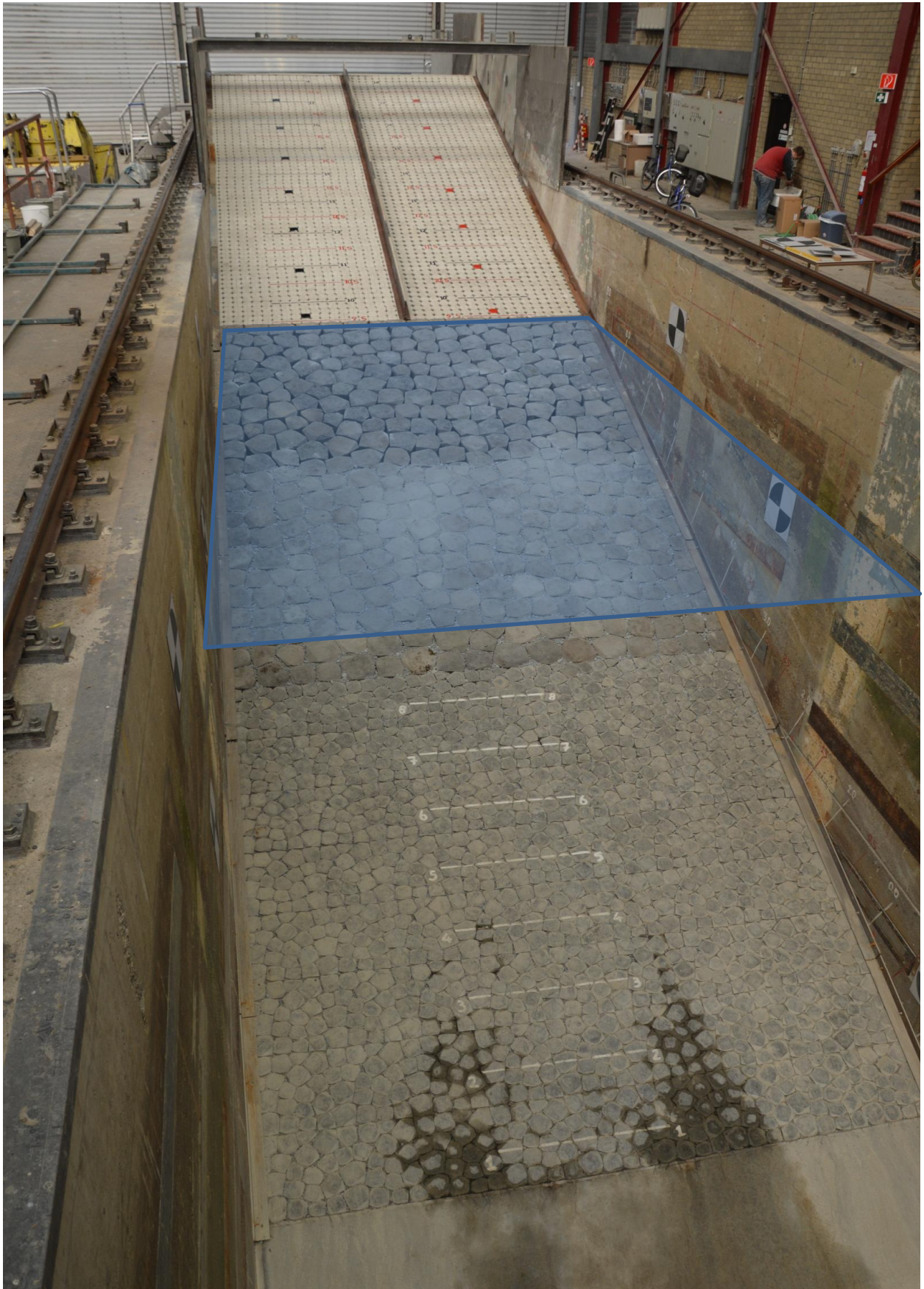


Zand-cement stabilisatie in oloop zone aangebracht

1208618.009

**Deltares**

Foto A.2



modelopstelling t.b.v. golfoploop testen

(waterstand is ingetekend)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.3



golfoploop testen (tijdens impact)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.4



golfoploop testen (tijdens oploop)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.5



golfoploop testen (oploop over kruin)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.6



aanbrengen filterlaag (links zijn de geplaatste DRO's zichtbaar)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.7



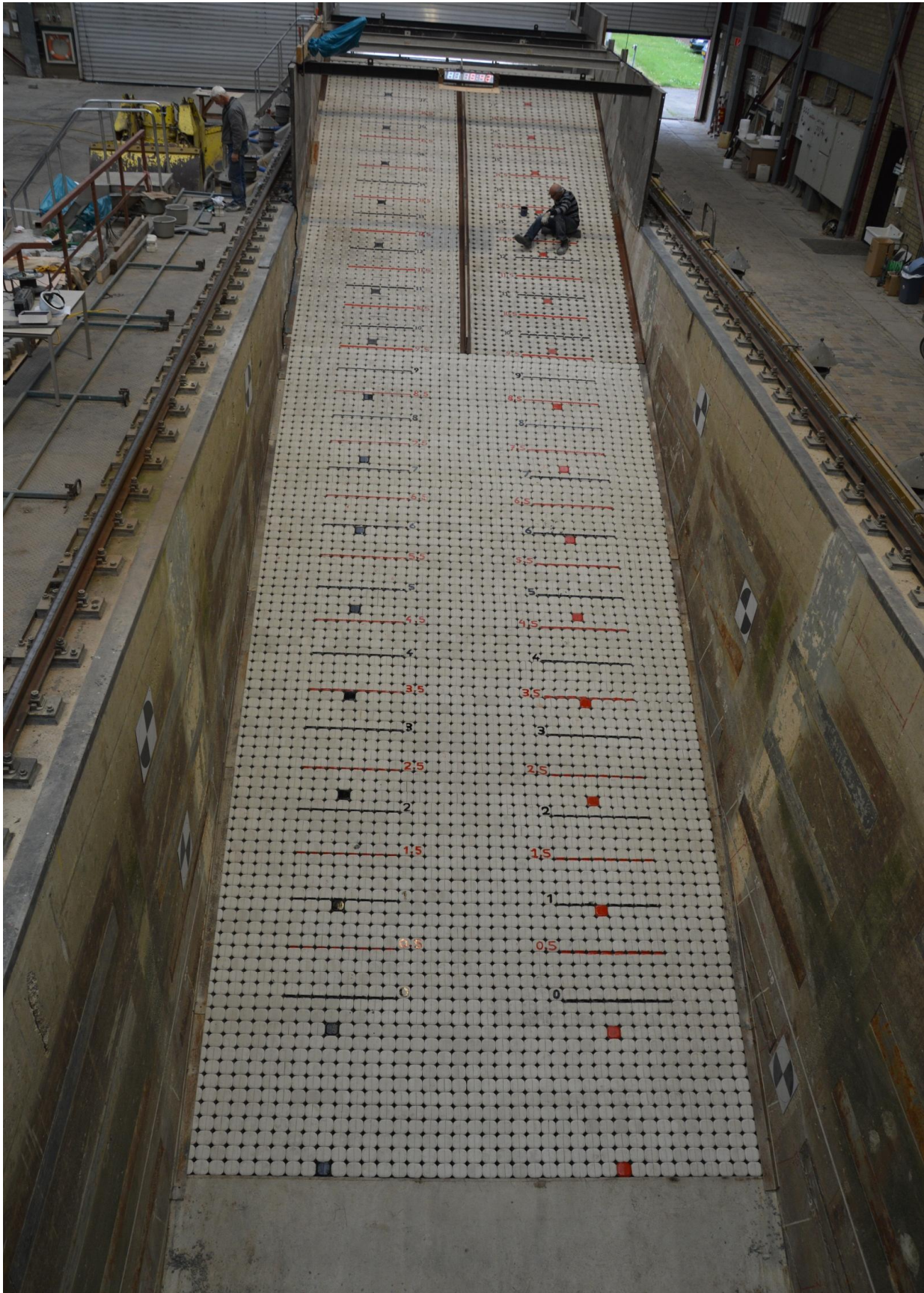
tijdens opbouw Testblok talud

1208618.009

**Deltares**

Foto A.8





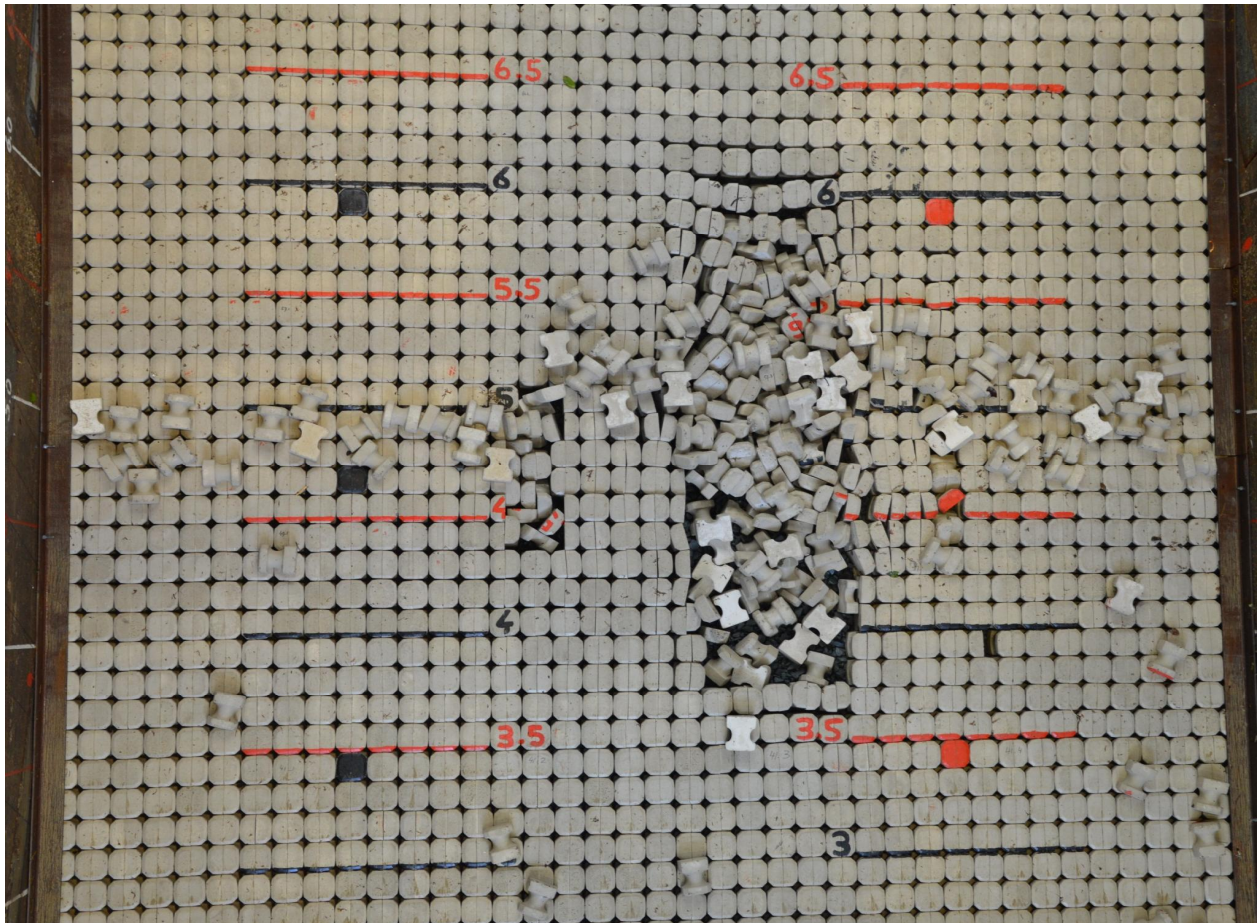
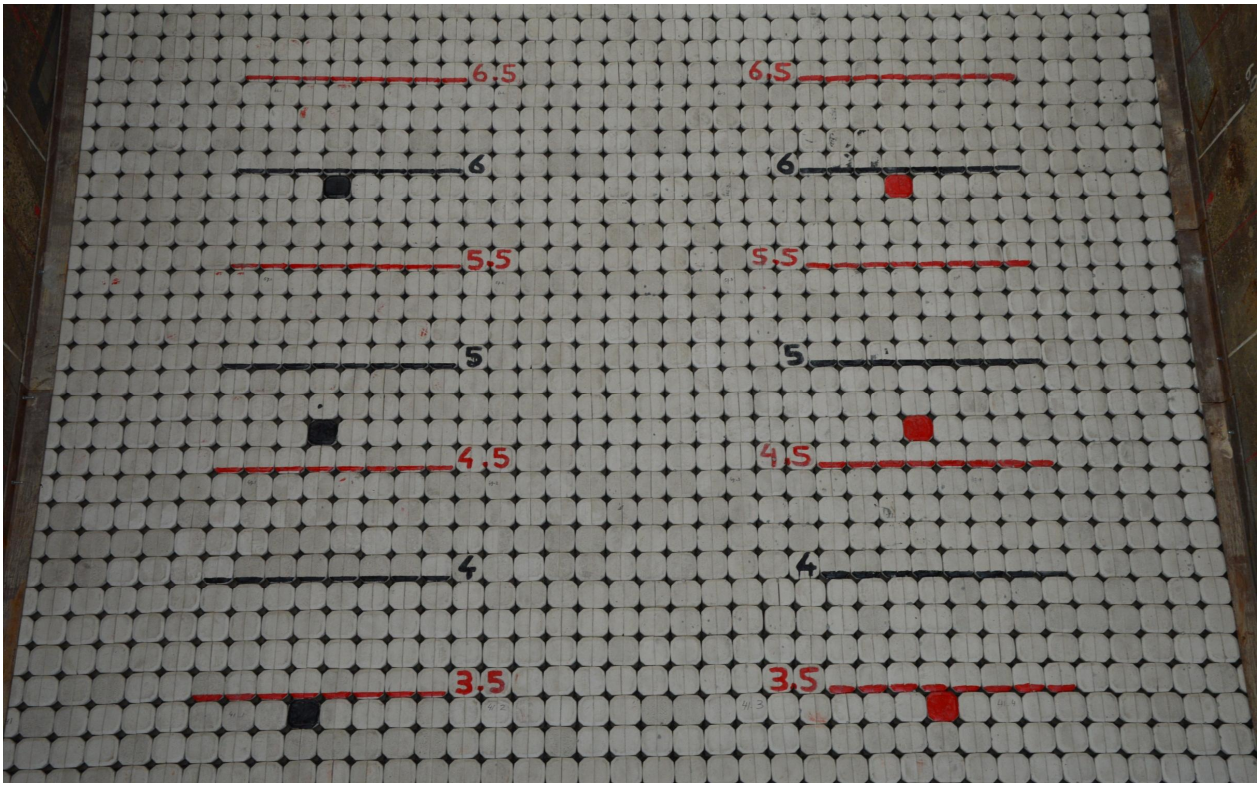
Talud volledig opgebouwd t.b.v. stabiliteitstesten

(Test S01 en Test S02)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.9



Talud voor Test S01 en na Test S02

1208618.009

Deltares

Foto A.10



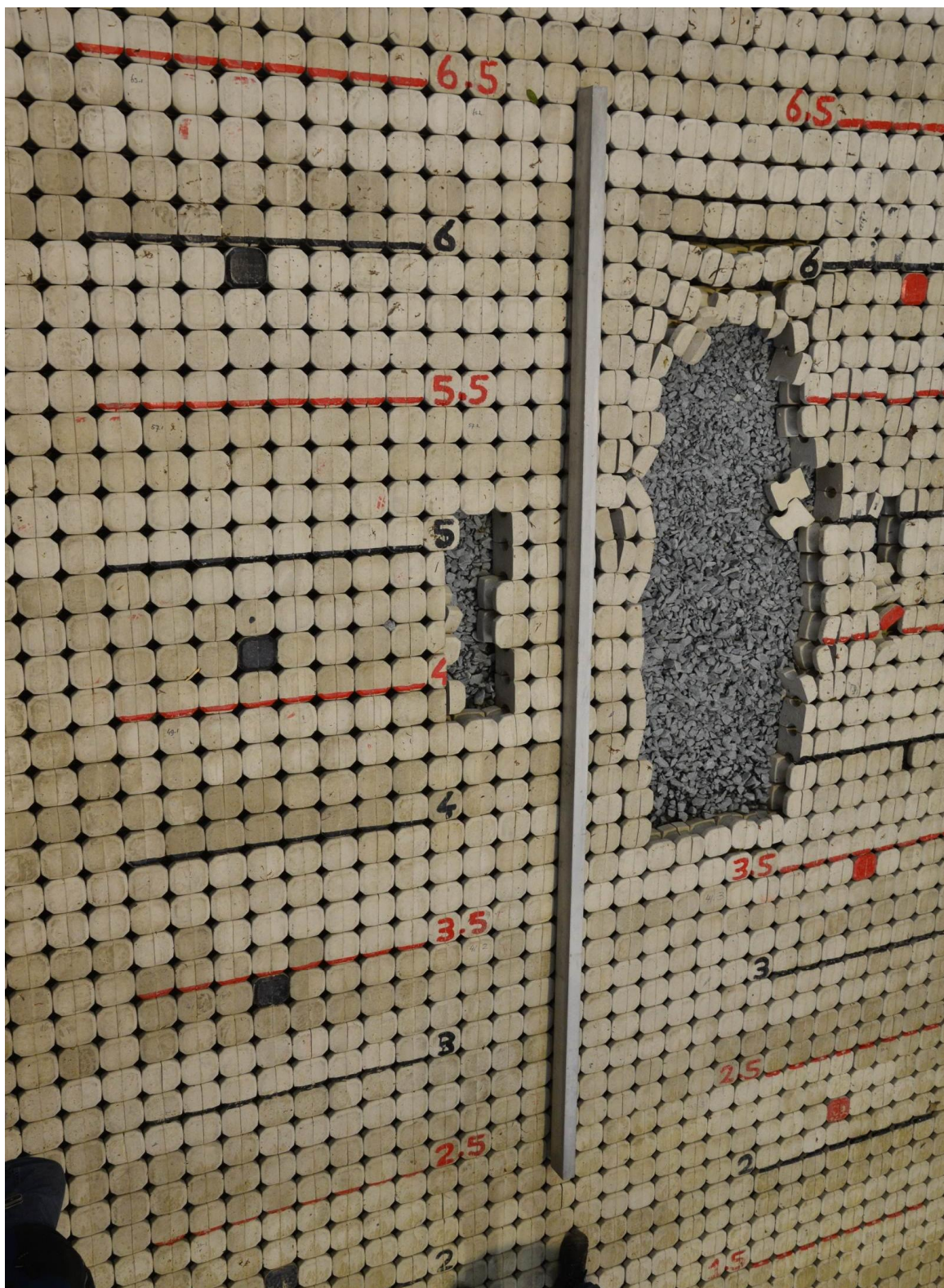
Talud na Test S02

1208618.009

**Deltares**

Foto A.11

# Bovenzijde (kruin)



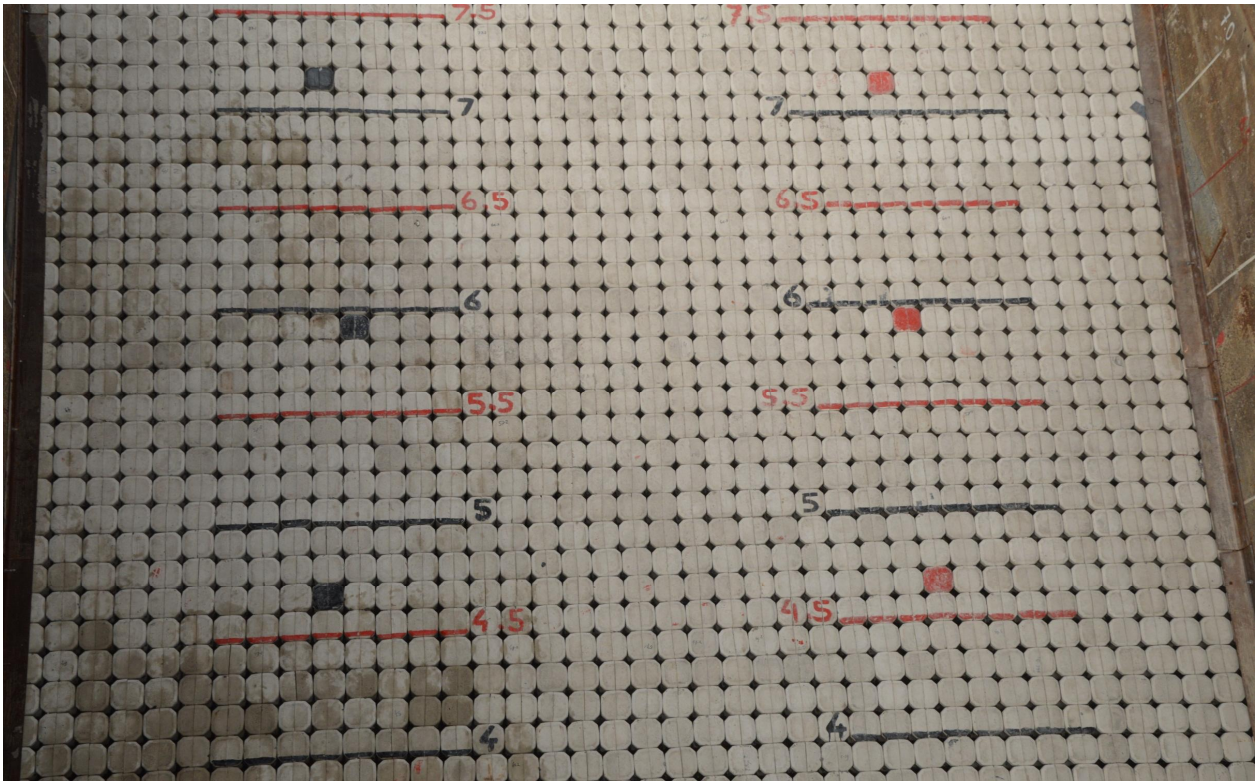
# Onderzijde (teen)

Talud na Test S02 en nadat losse stenen zijn verwijderd

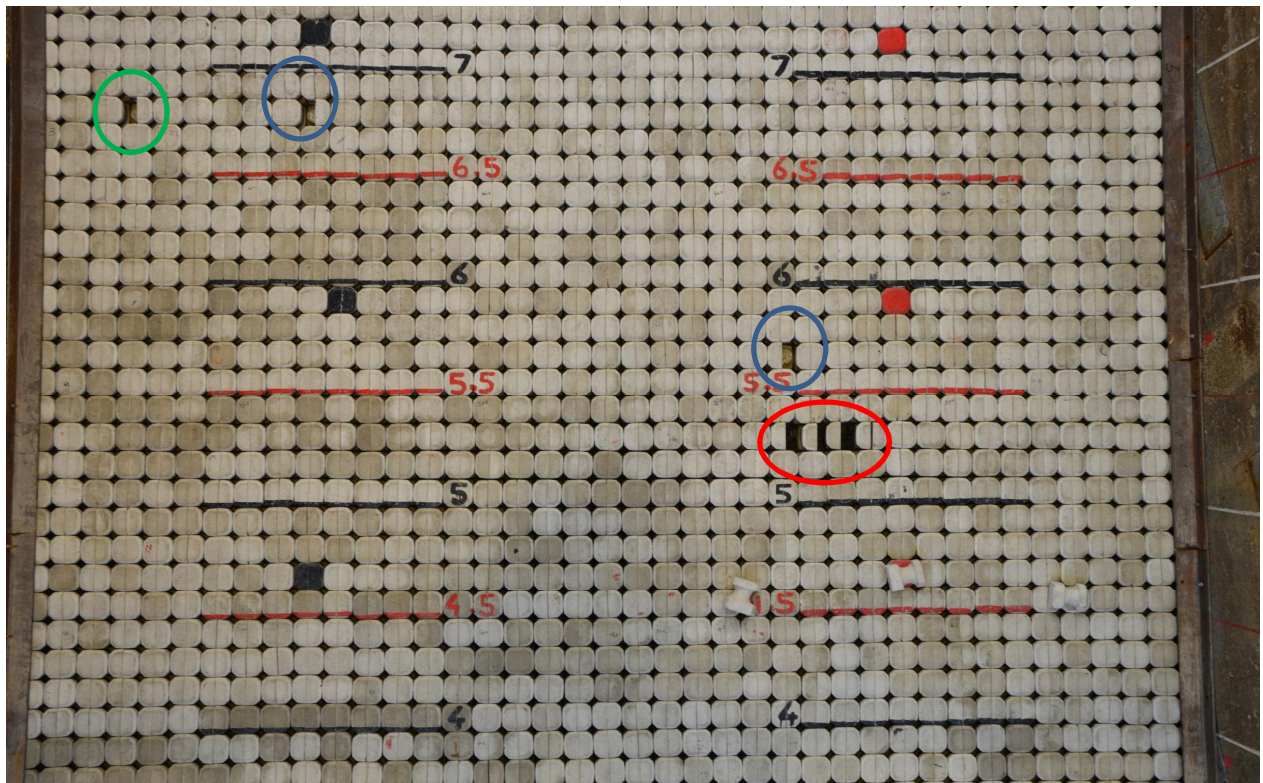
1208618.009

**Deltares**

Foto A.12



in blauwe cirkels: afgebroken Testblok tijdens Test S04  
 in groen cirkel: afgebroken Testblok tijdens Test S05  
 in rode cirkel: 3 x een Testblok volledig uit talud gelicht

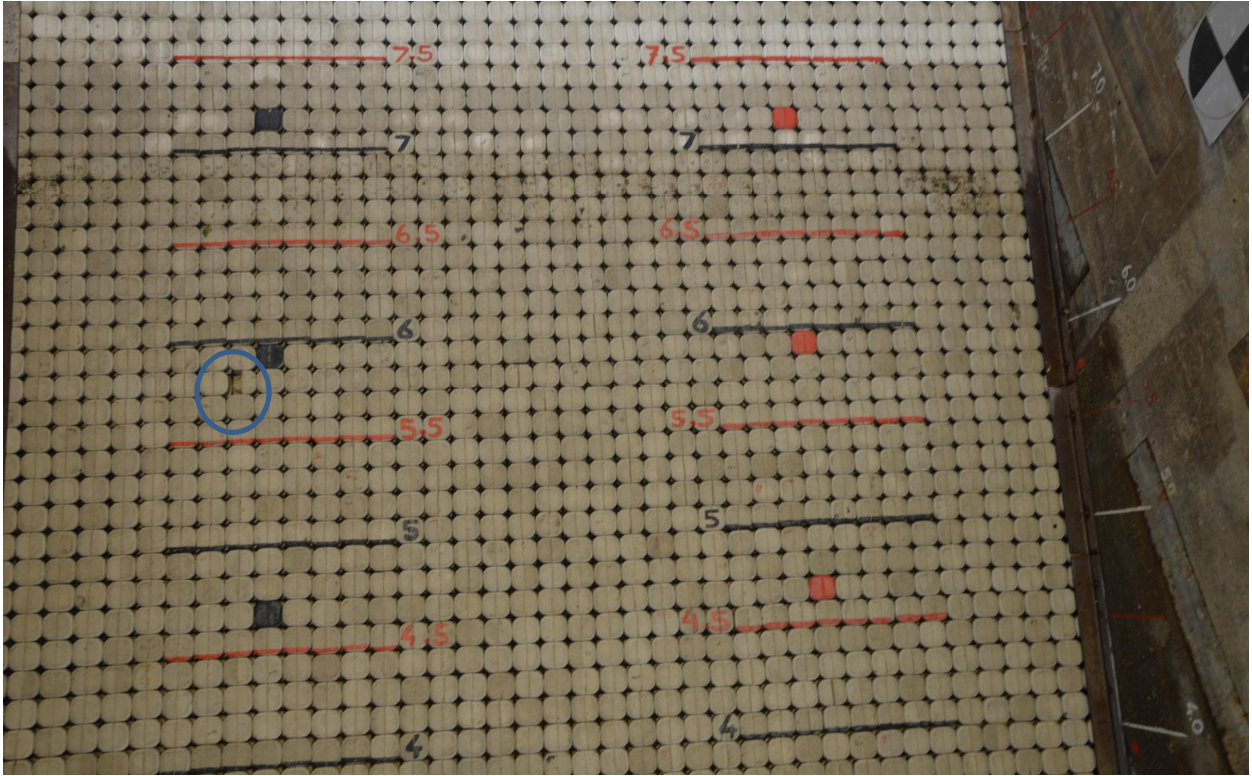


Voor Test S03 (bovenste foto), na Test S06 (onderste foto)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.13



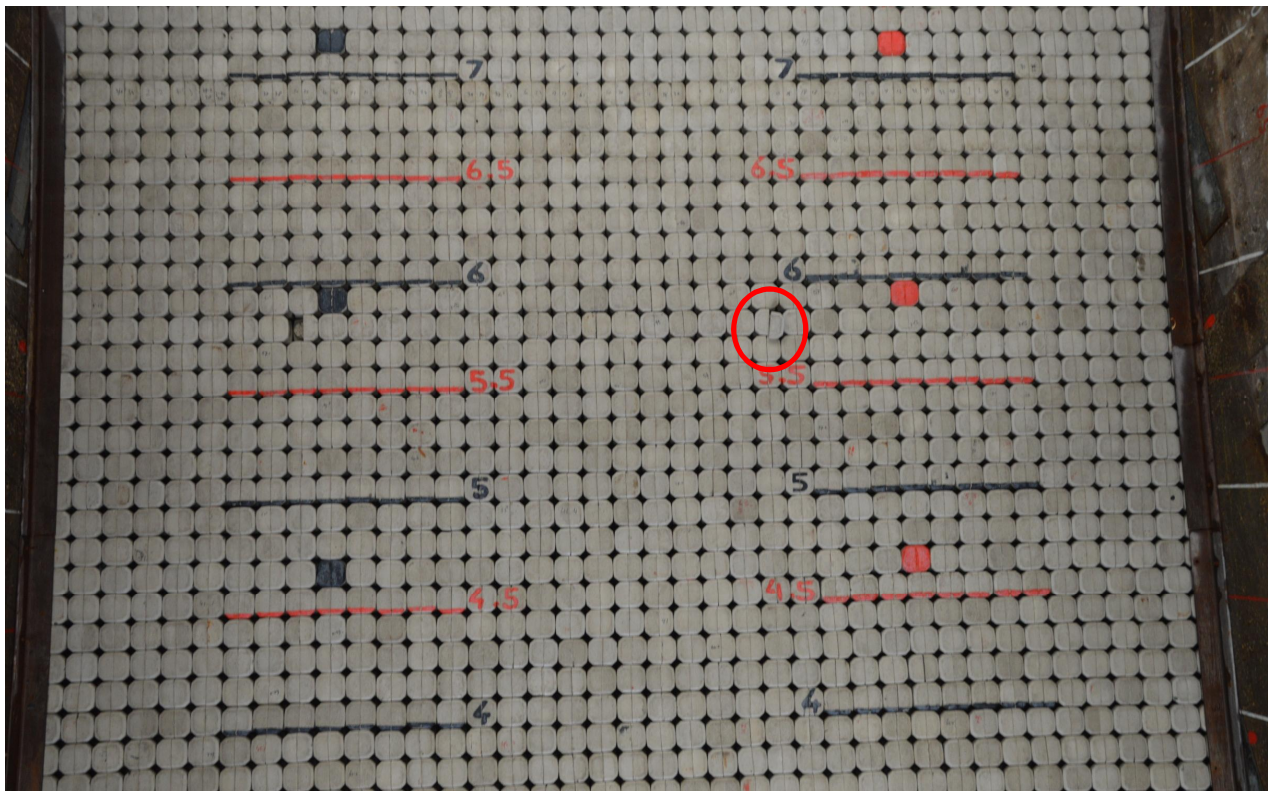
na S09a (1 afgebroken blokje aan linkerzijde bij  $X' = 5.8$  m)

Na Test S09a (in totaal 2 uur golven)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.14

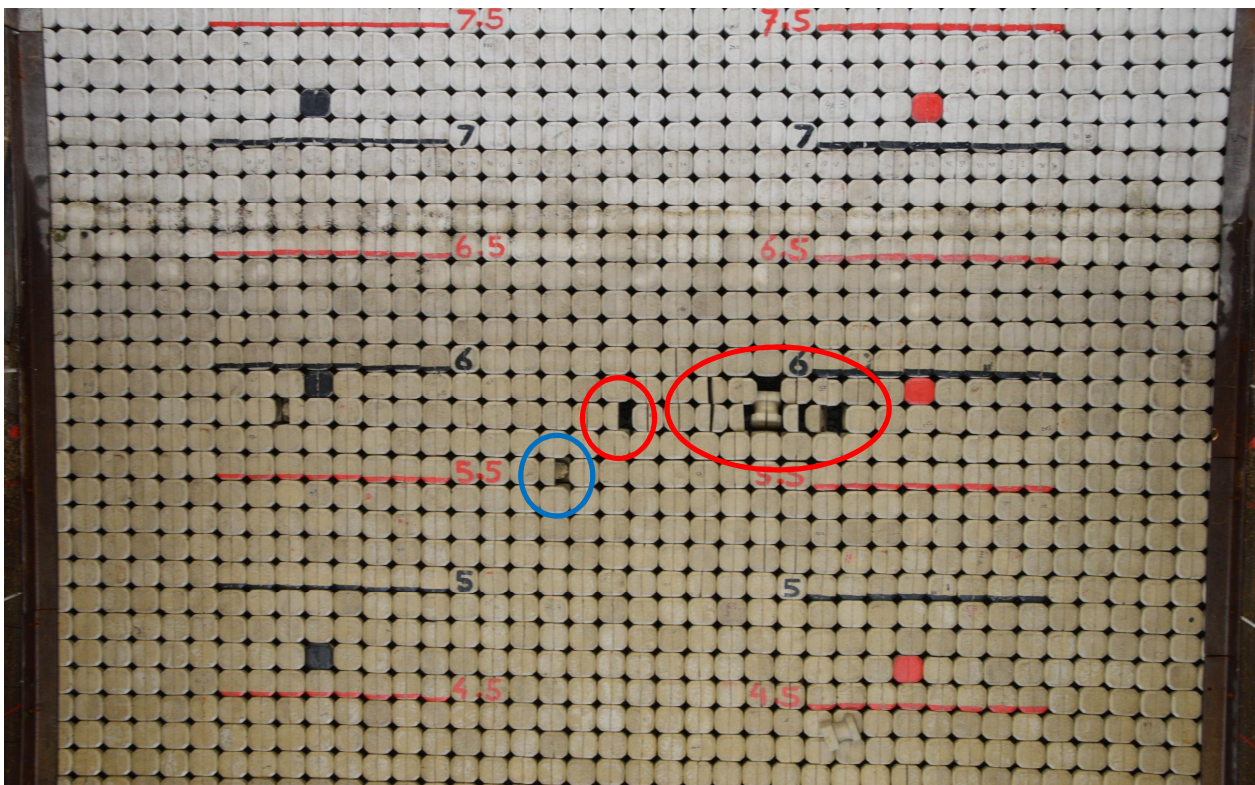


Schade na test S09b (in totaal 2.5 uur golven)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.15



in blauwe cirkel: afgebroken blokje  
 in rode cirkel: volledig uit talud gelicht



Schade na test S09c (in totaal 4 uur golven)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.16



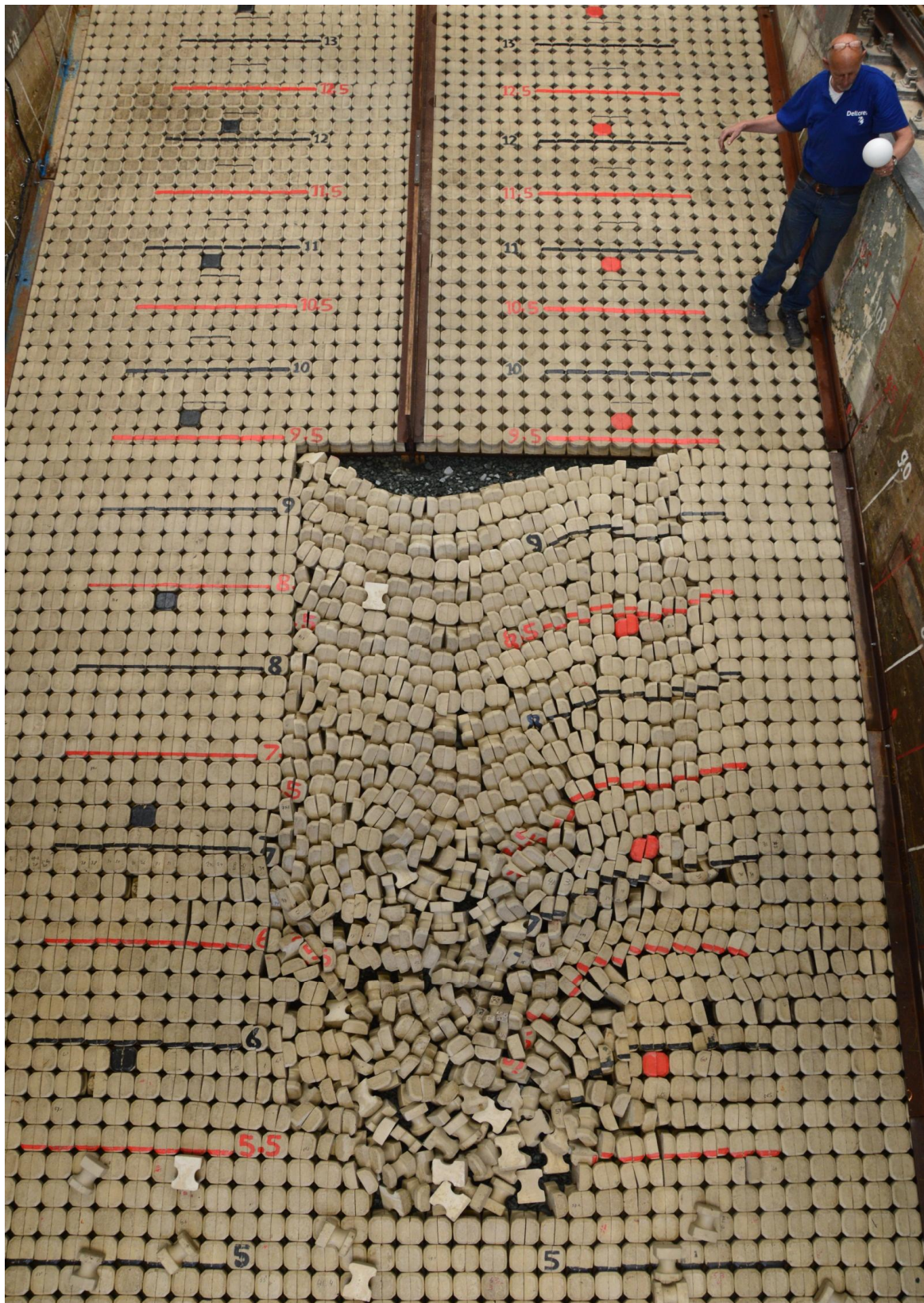


Schade na test S09d (in totaal 5 uur golven)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.17



Schade na test S09d (in totaal 5 uur golven)

1208618.009

**Deltares**

Foto A.18

## B Figuren

*Figuur B.1 Technische tekeningen Testblok zetstenen*

*Figuur B.2 Korrelverdeling filtermateriaal en inwasmateriaal*

*Figuur B.3 Uitspoeling inwasmateriaal Test S01*

*Figuur B.4 Uitspoeling inwasmateriaal Test S02*

*Figuur B.5 Uitspoeling inwasmateriaal Test S03*

*Figuur B.6 Uitspoeling inwasmateriaal Test S04*

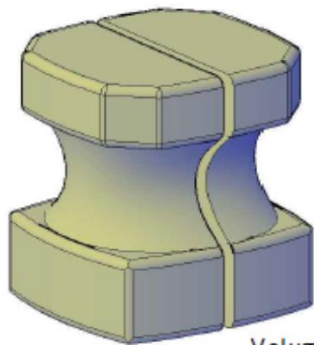
*Figuur B.7 Uitspoeling inwasmateriaal Test S05*

*Figuur B.8 Uitspoeling inwasmateriaal Test S06*

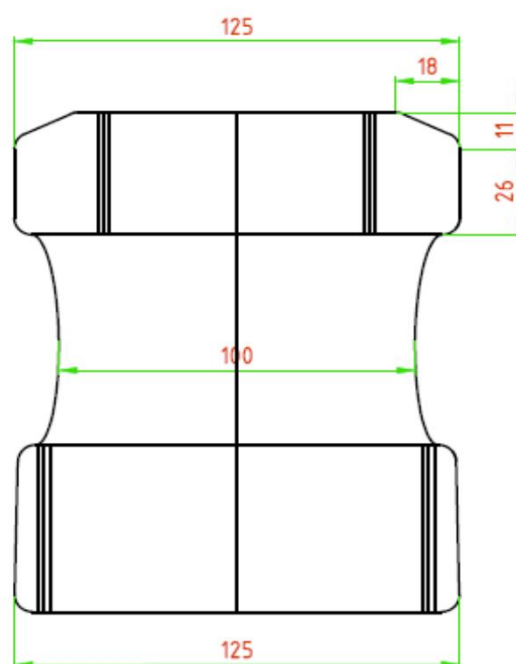
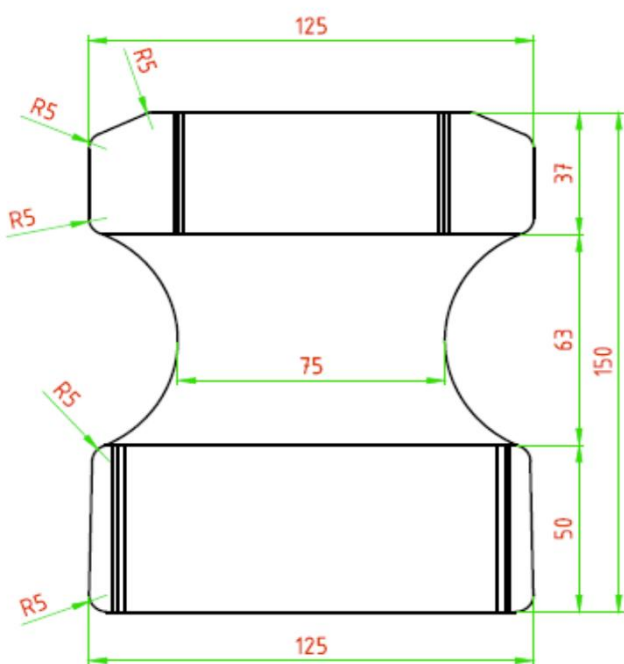
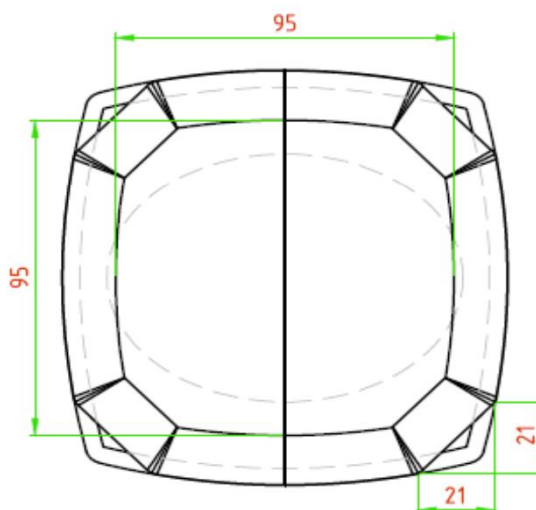
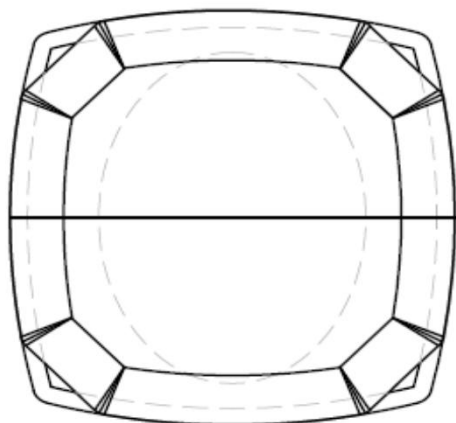
*Figuur B.9 Uitspoeling inwasmateriaal Test S09a en Test S09b*

*Figuur B.10 Uitspoeling inwasmateriaal Test S09c*





Volume p/st 0.841 dm<sup>3</sup>

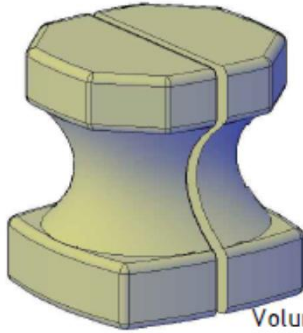


afmetingen Testblok van het type Basis  
(maten zoals gemeten door Deltares)

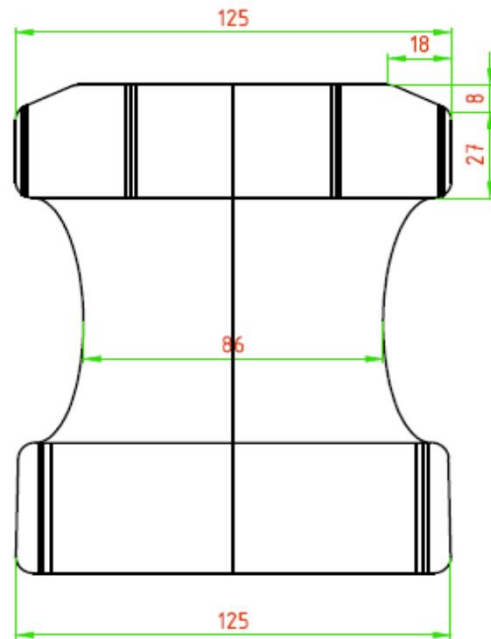
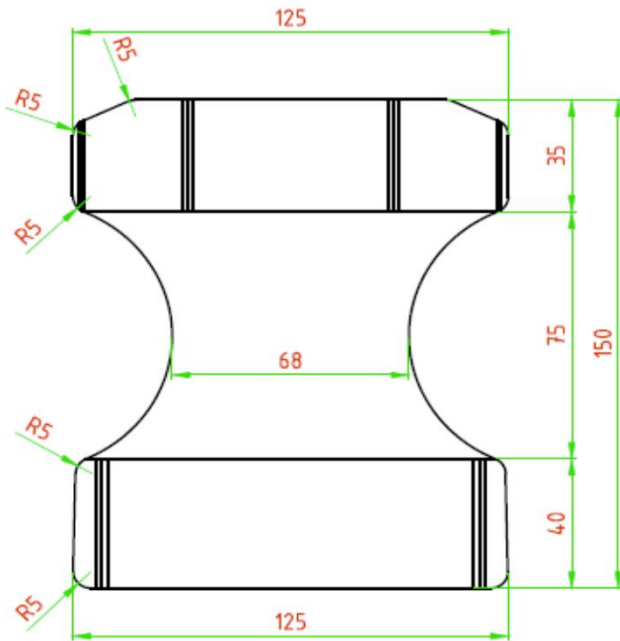
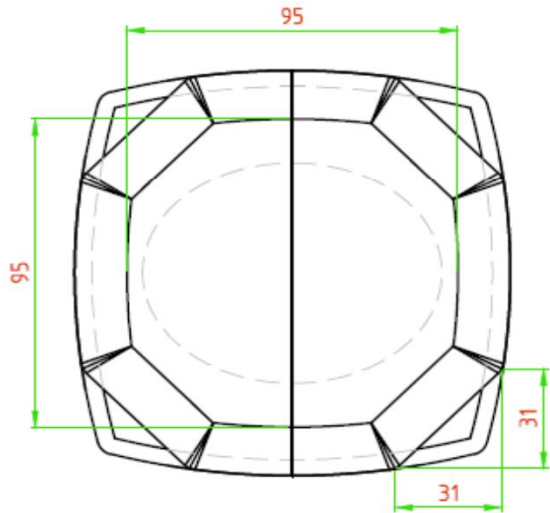
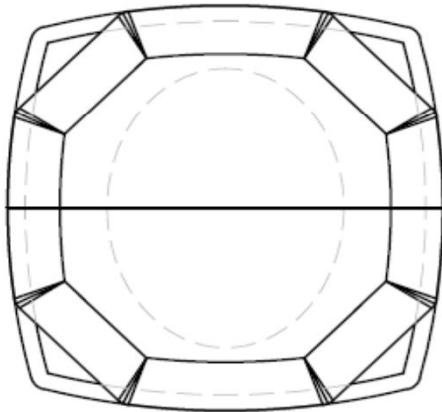
1208618.009

**Deltares**

Fig. B.1a



Volume p/st 0.755 dm<sup>3</sup>



afmetingen Testblokken van het type Slim

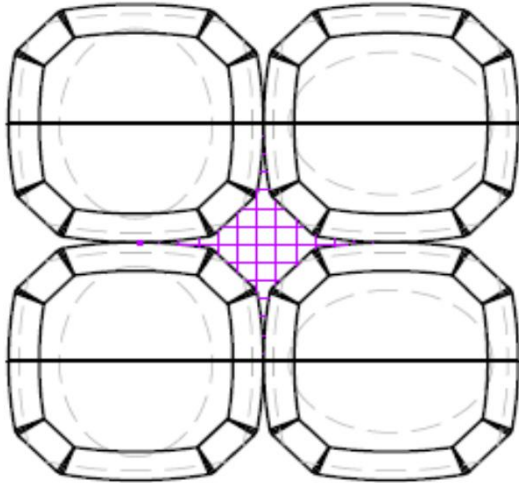
(maten zoals gemeten door Deltares)

1208618.009

**Deltares**

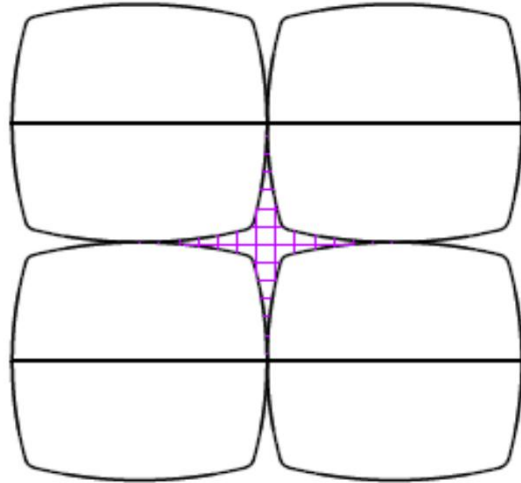
Fig. B.1b

Oppervlakte Testblok Basis 137.1cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 19.1 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 12.2 %

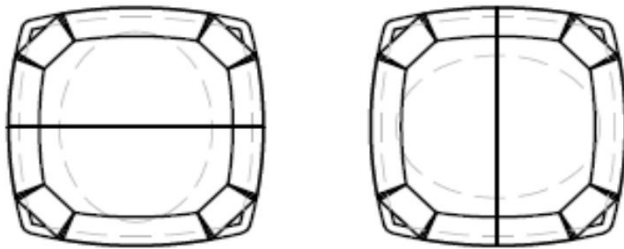


Doorsnede C - C (kop)

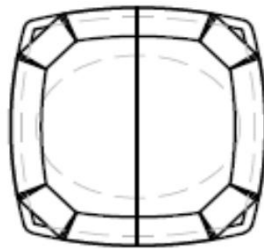
Oppervlakte Testblok Basis 143.1cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 13.1 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 8.4 %



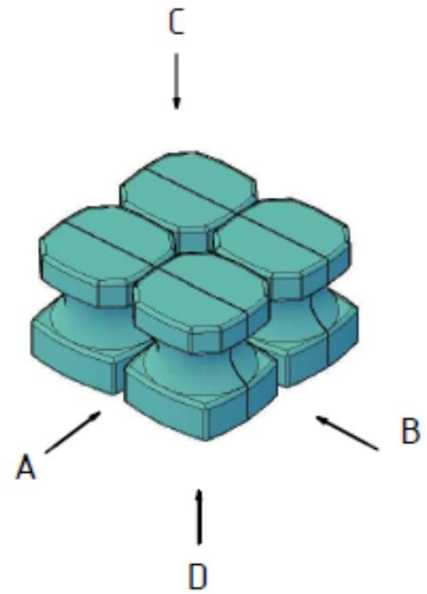
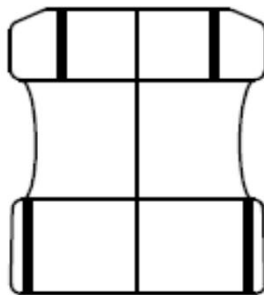
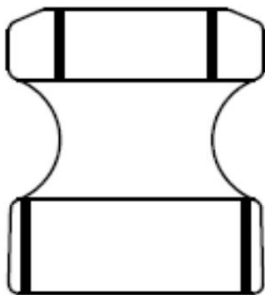
Doorsnede D - D (voet)



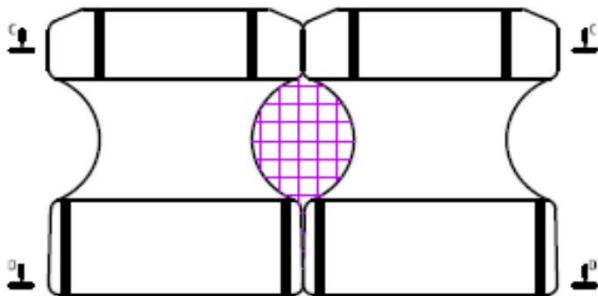
Aanzicht A



Aanzicht B

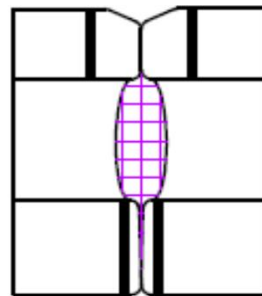


Oppervlakte Testblok Basis 161 cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 24.8 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 13.3 %



Aanzicht A

Oppervlakte Testblok Basis 171 cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 14.4 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 7.8 %



Aanzicht B

oppervlaktebepaling Testblokken van het type Basis

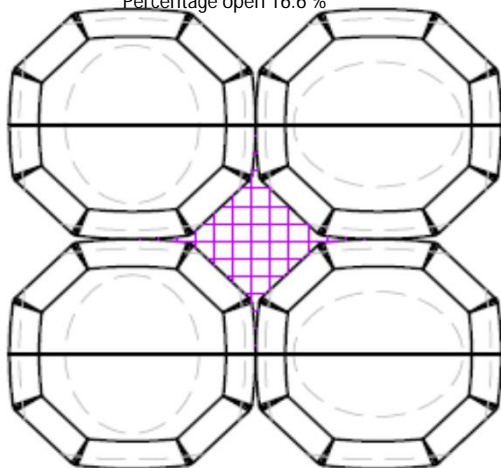
(maten zoals gemeten door Deltares)

1208618.009

**Deltares**

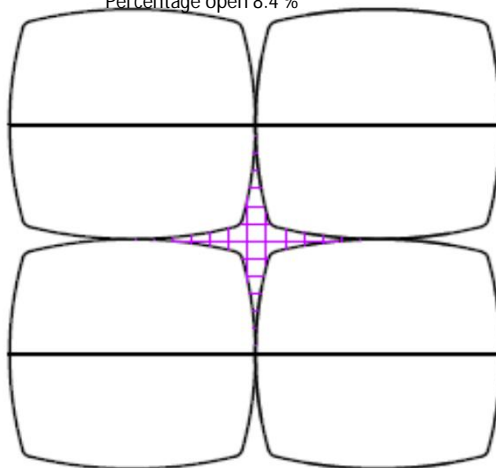
Fig. B.1c

Oppervlakte Testblok Basis 130.2 cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 26.0 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 16.6 %

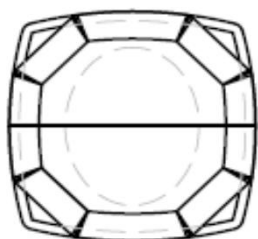


Doorsnede C - C (kop)

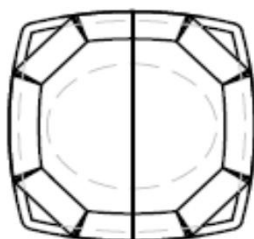
Oppervlakte Testblok Basis 143.1 cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 13.1 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 8.4 %



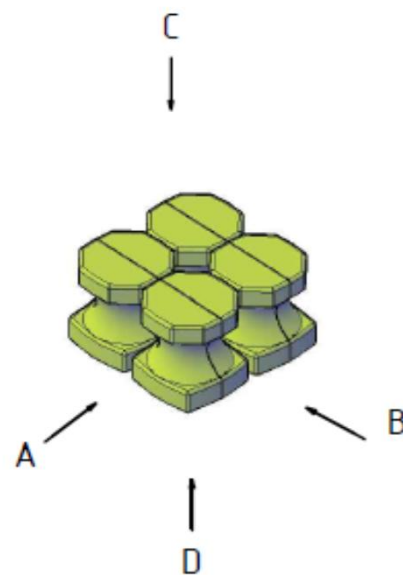
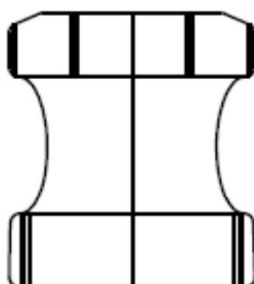
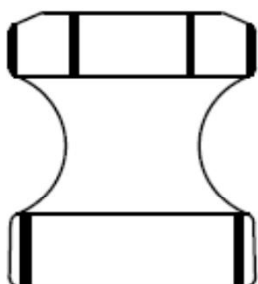
Doorsnede D - D (voet)



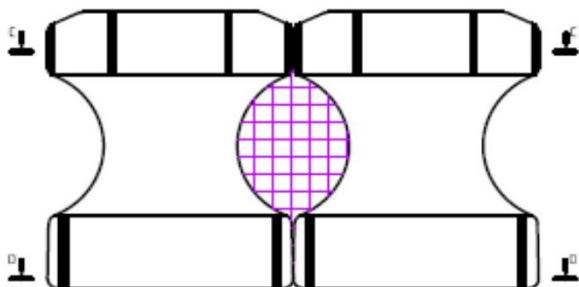
Aanzicht A



Aanzicht B

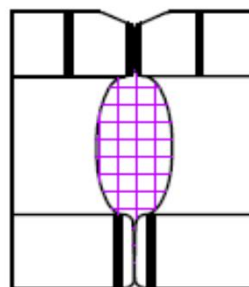


Oppervlakte Testblok Slim 153 cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 32.9 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 17.7 %



Aanzicht A

Oppervlakte Testblok Slim 161 cm<sup>2</sup>  
 Oppervlakte doorlaat 25.0 cm<sup>2</sup>  
 Percentage open 13.4 %



Aanzicht B

oppervlaktebepaling Testblokken van het type Slim

(maten zoals gemeten door Deltares)

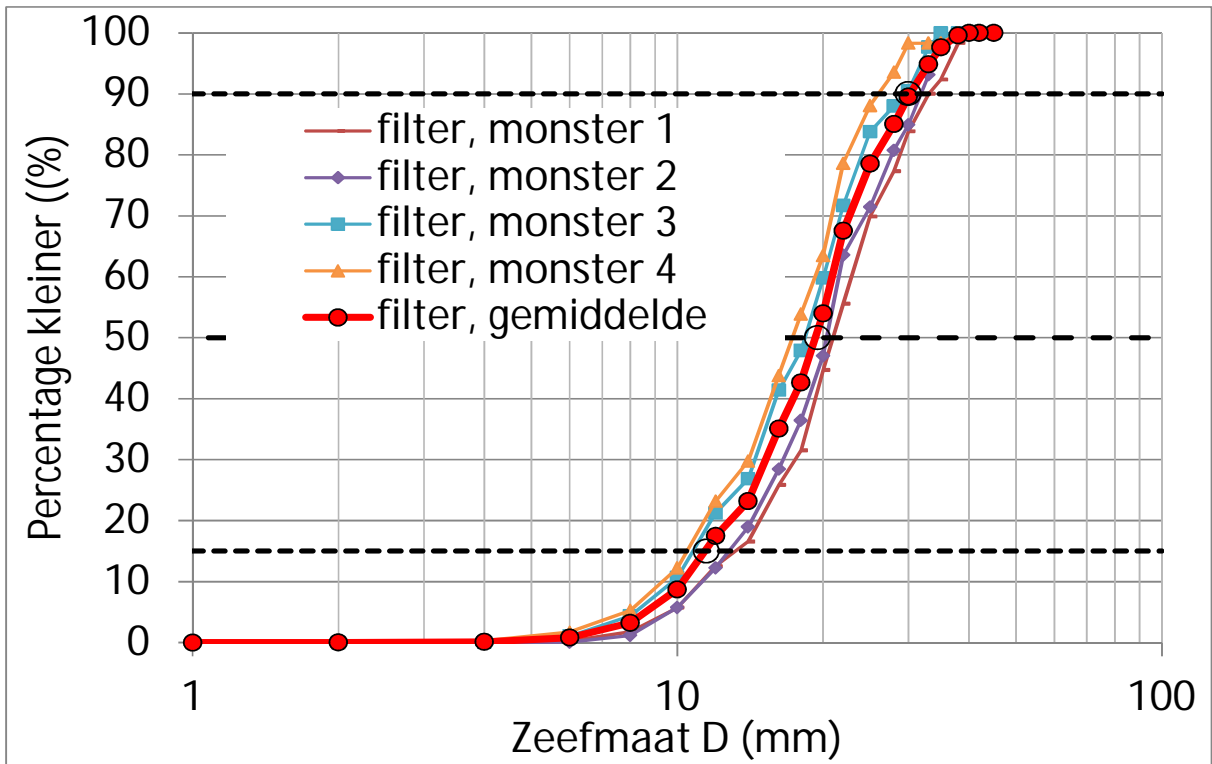
1208618.009

**Deltares**

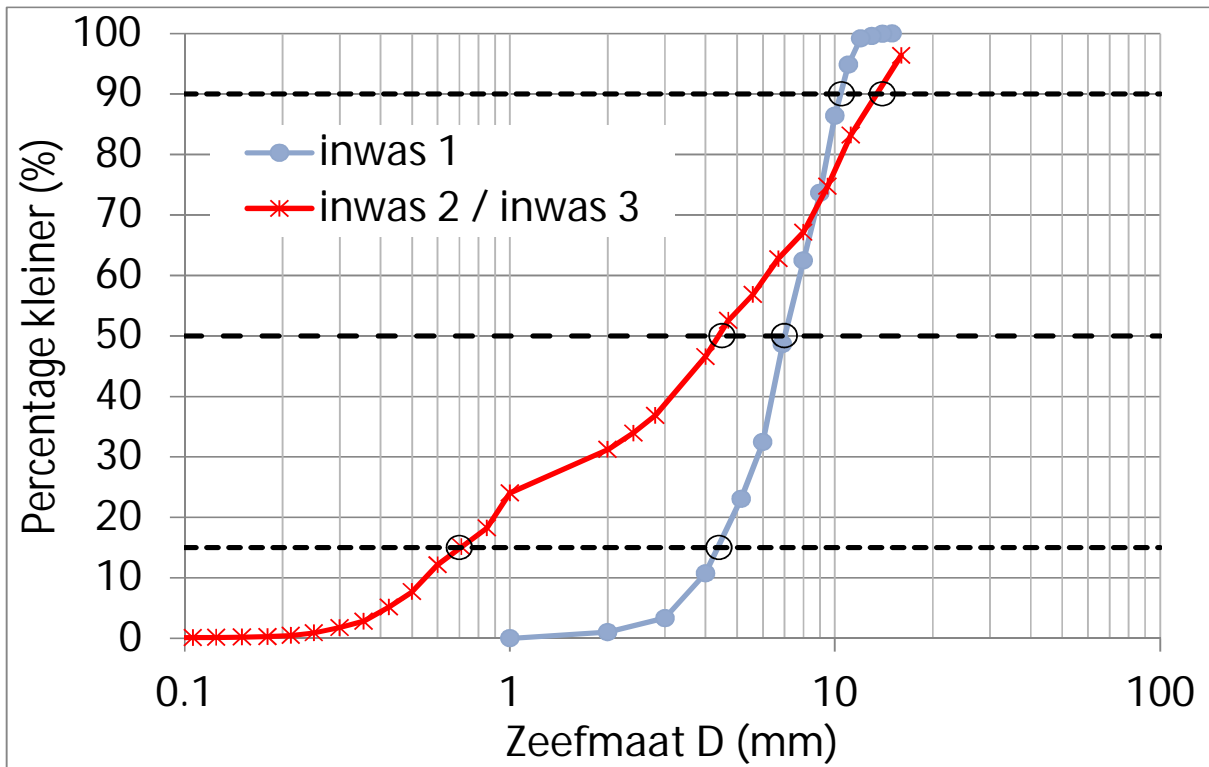
Fig. B.1d



zeefkromme filtermateriaal

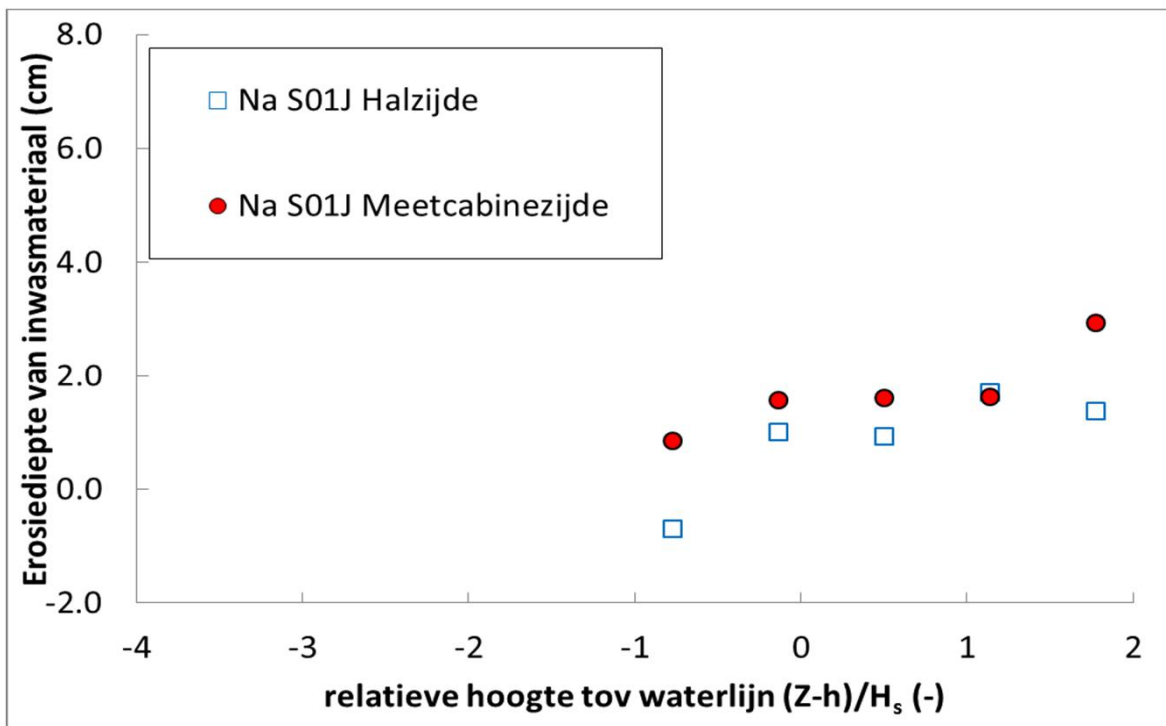
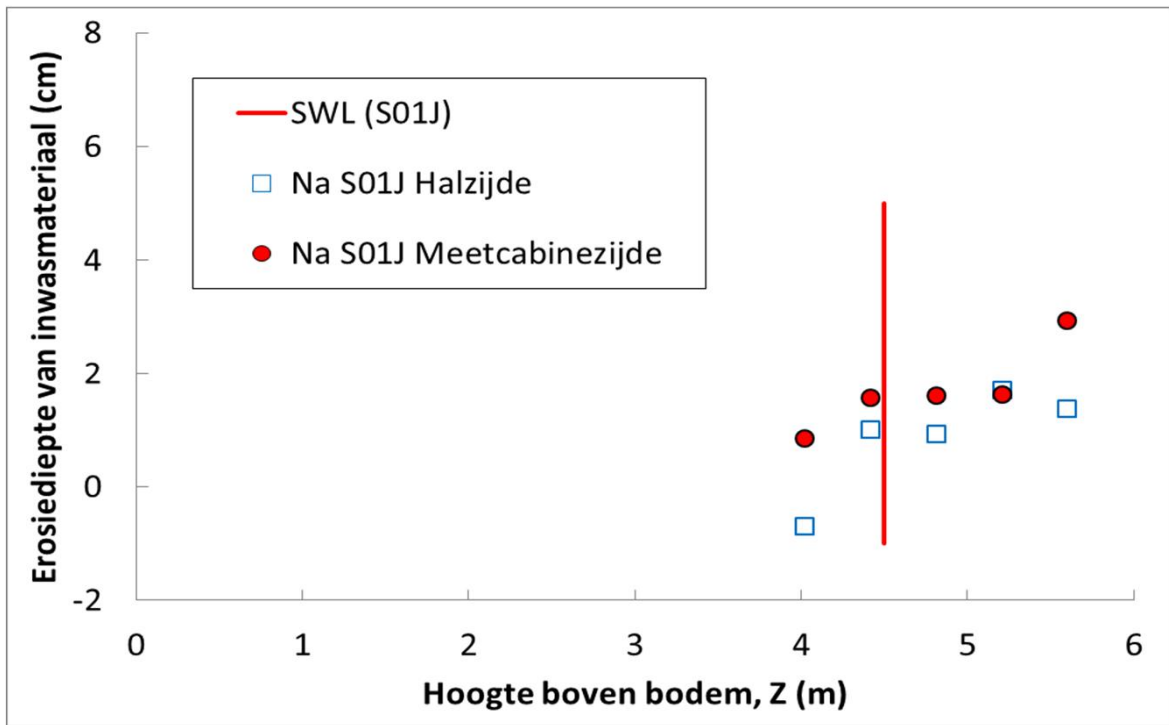


zeefkromme inwasmateriaal



korrelverdeling filter en inwasmateriaal

1208618.009

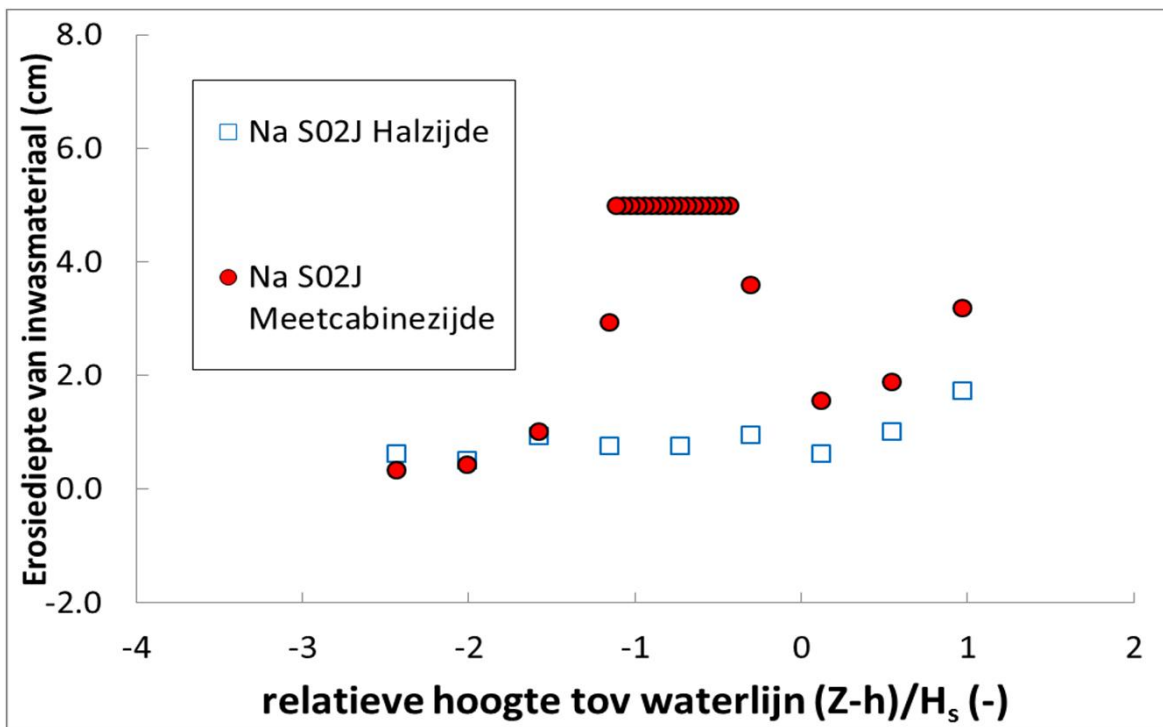
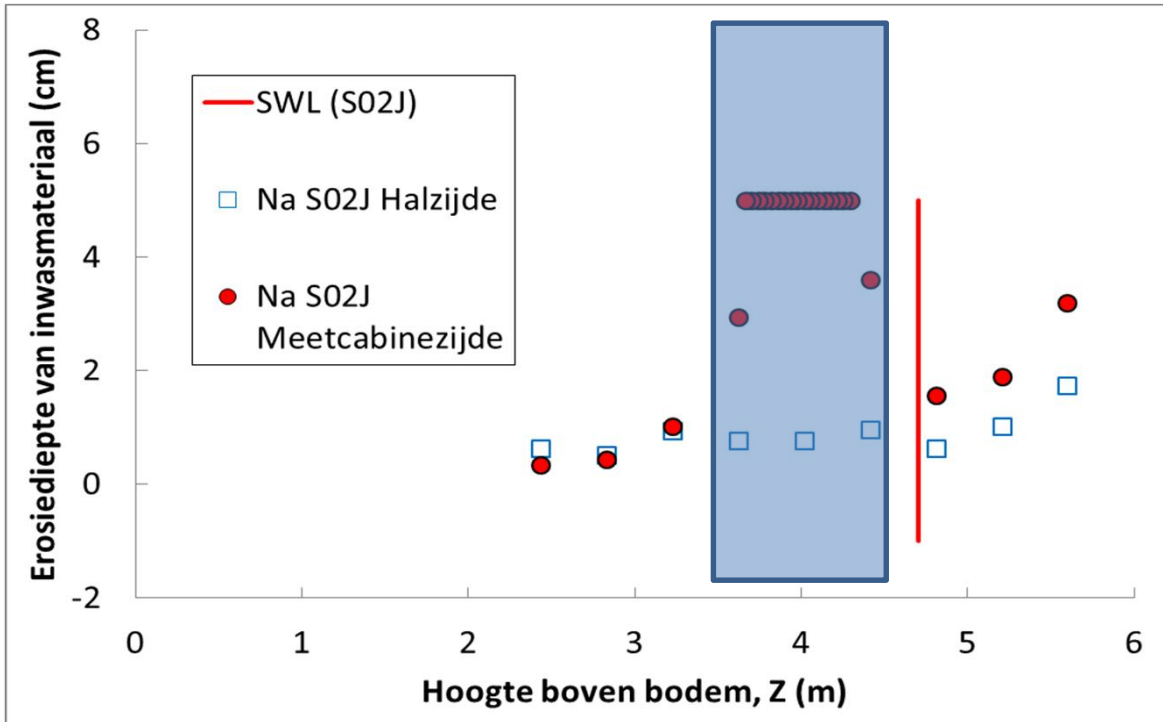


Uitspoeling inwasmateriaal Test S01

1208618.009

Deltares

Fig. B.3



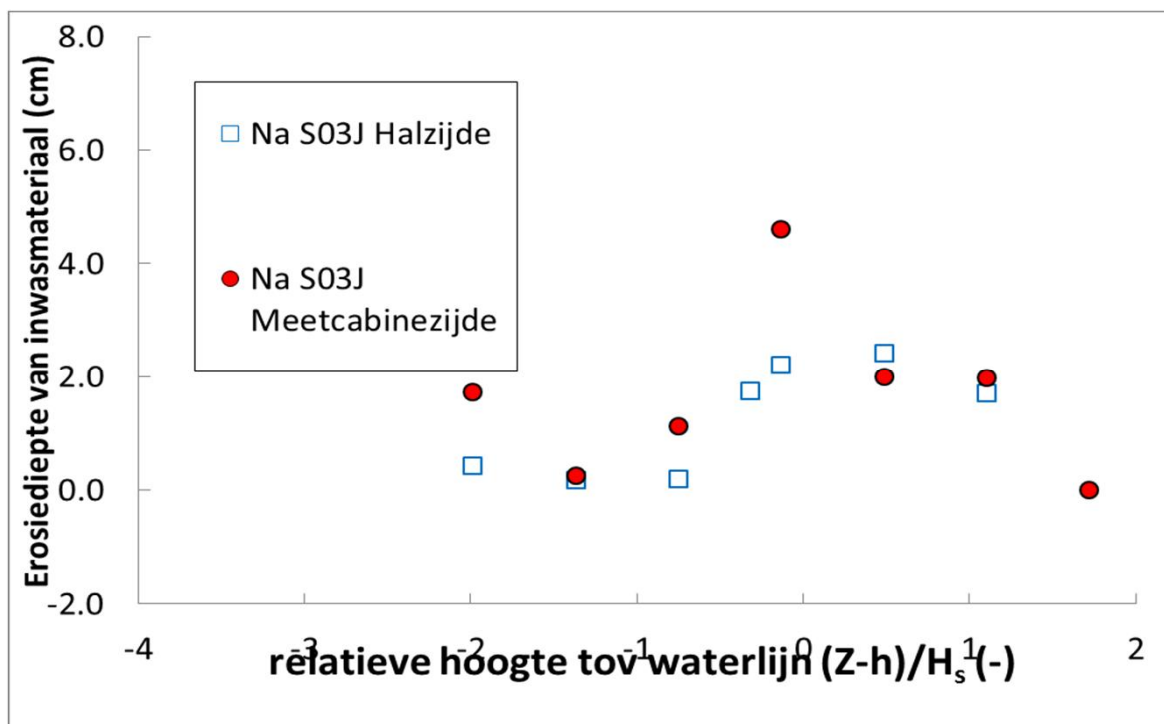
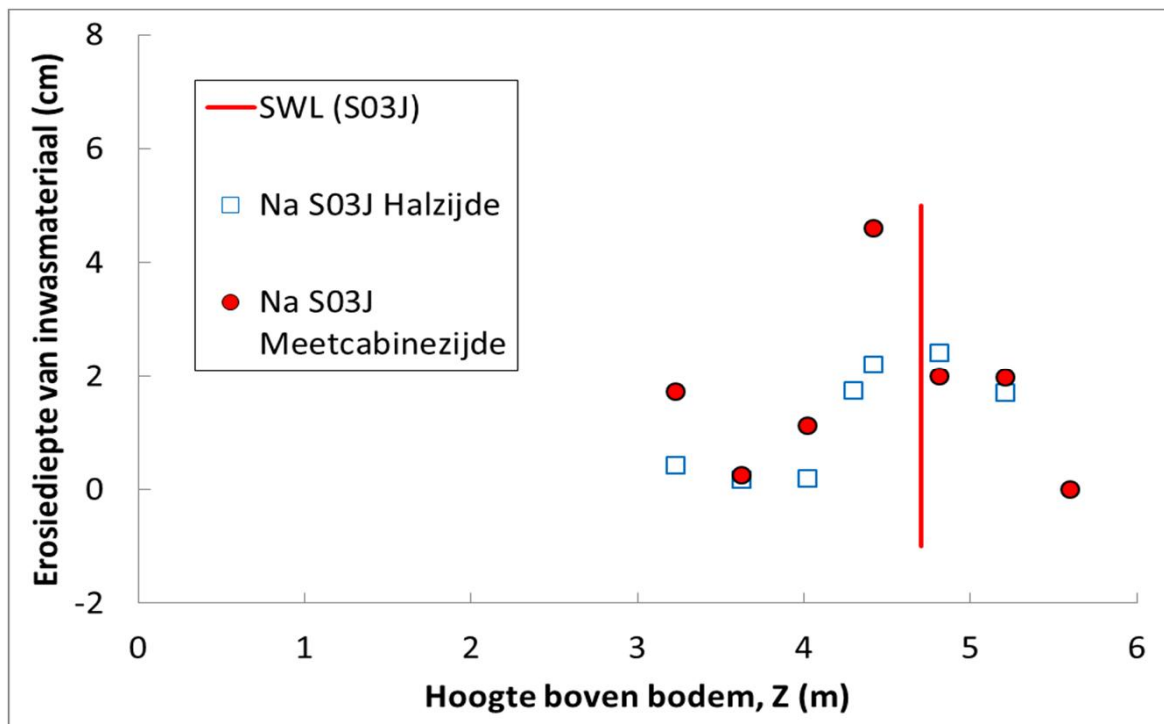
Schadegebied aangegeven met blauw vlak

Uitspoeling inwasmateriaal Test S02

1208618.009

Deltares

Fig. B.4

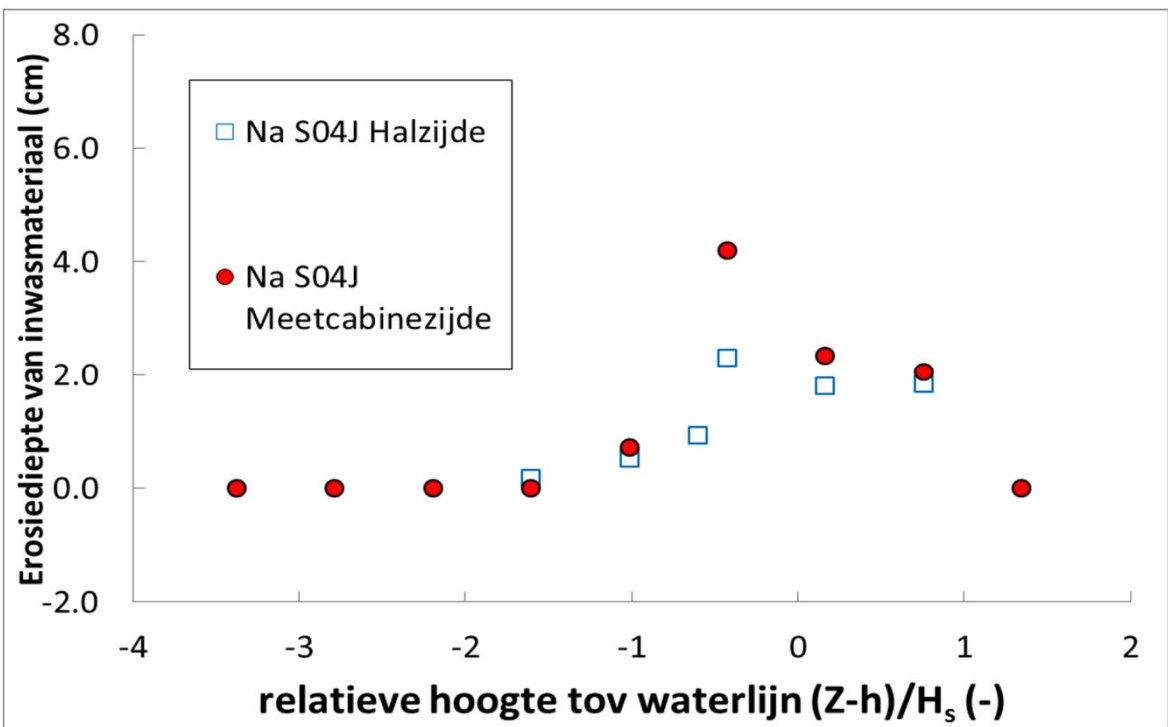
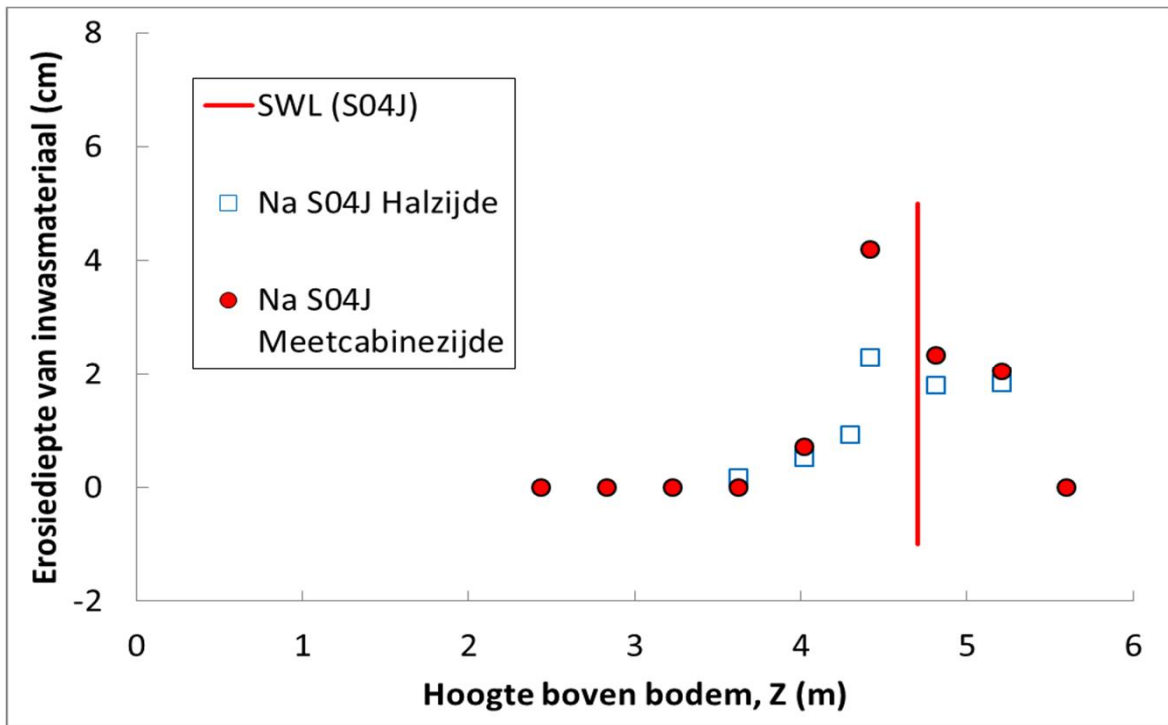


Uitspoeling inwasmateriaal Test S03

1208618.009

Deltares

Fig. B.5

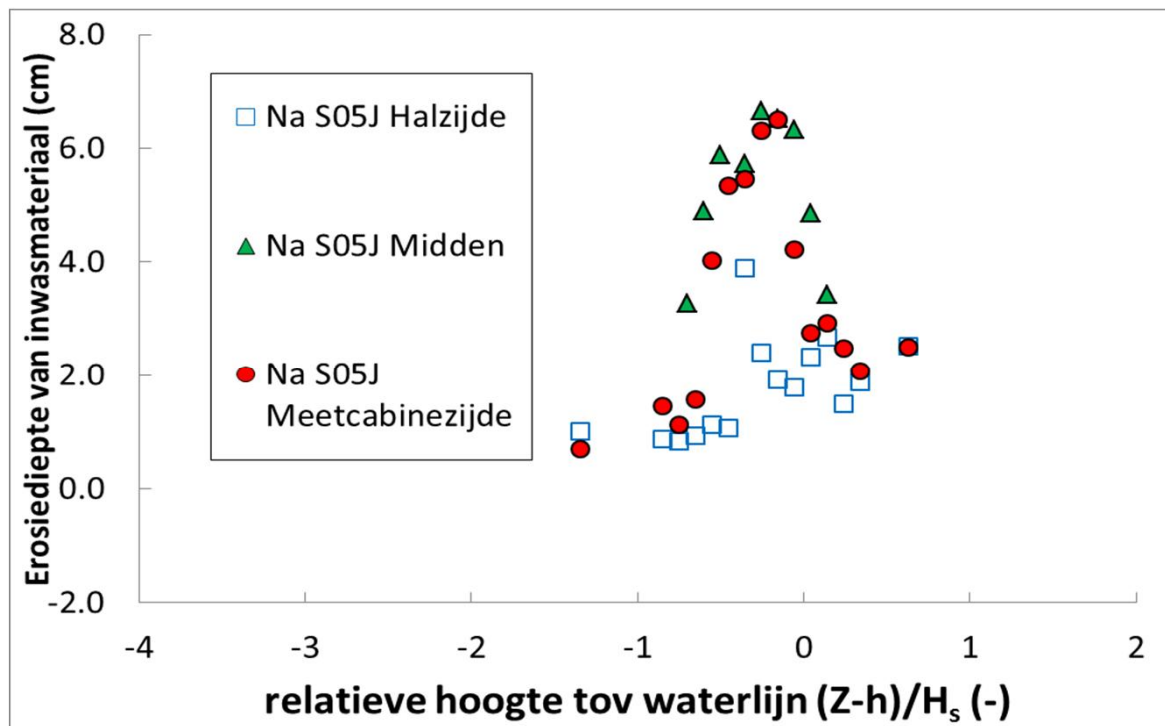
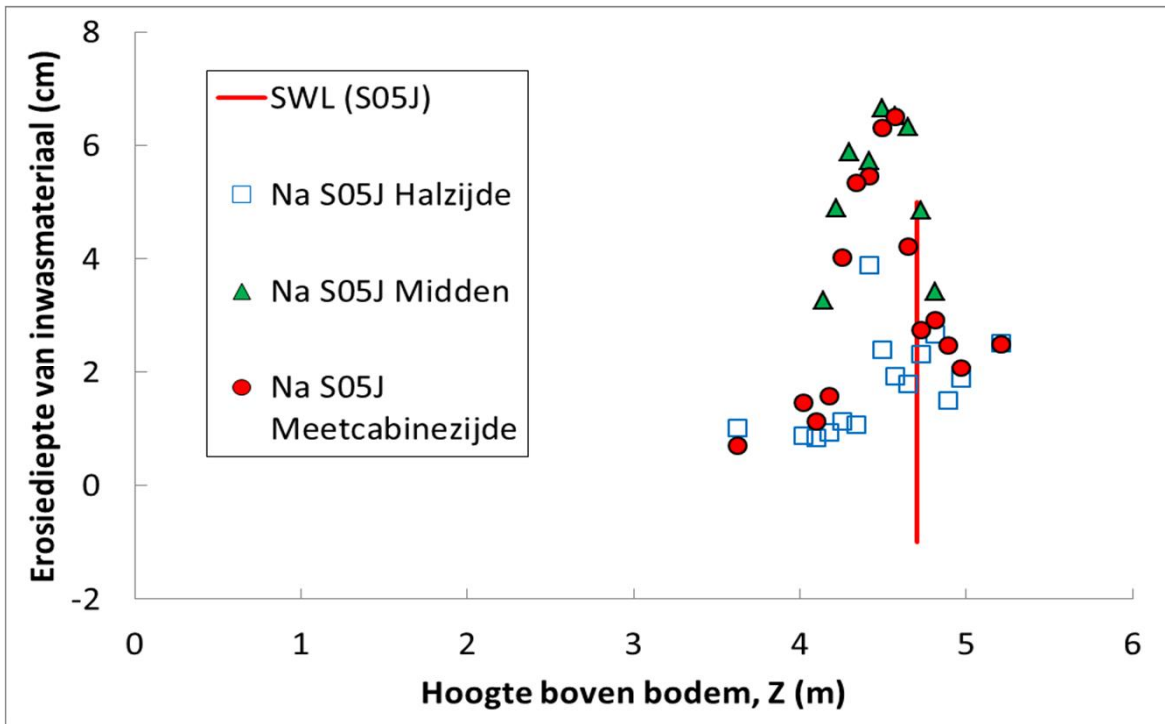


Uitspoeling inwasmateriaal Test S04

1208618.009

Deltares

Fig. B.6

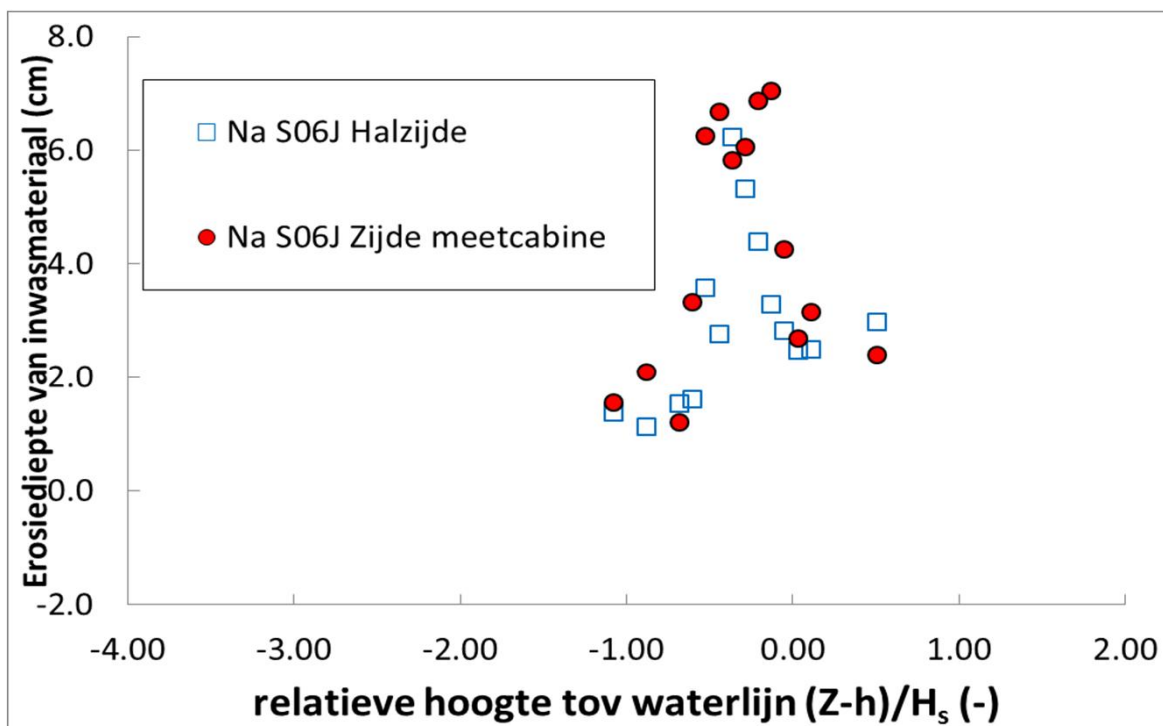
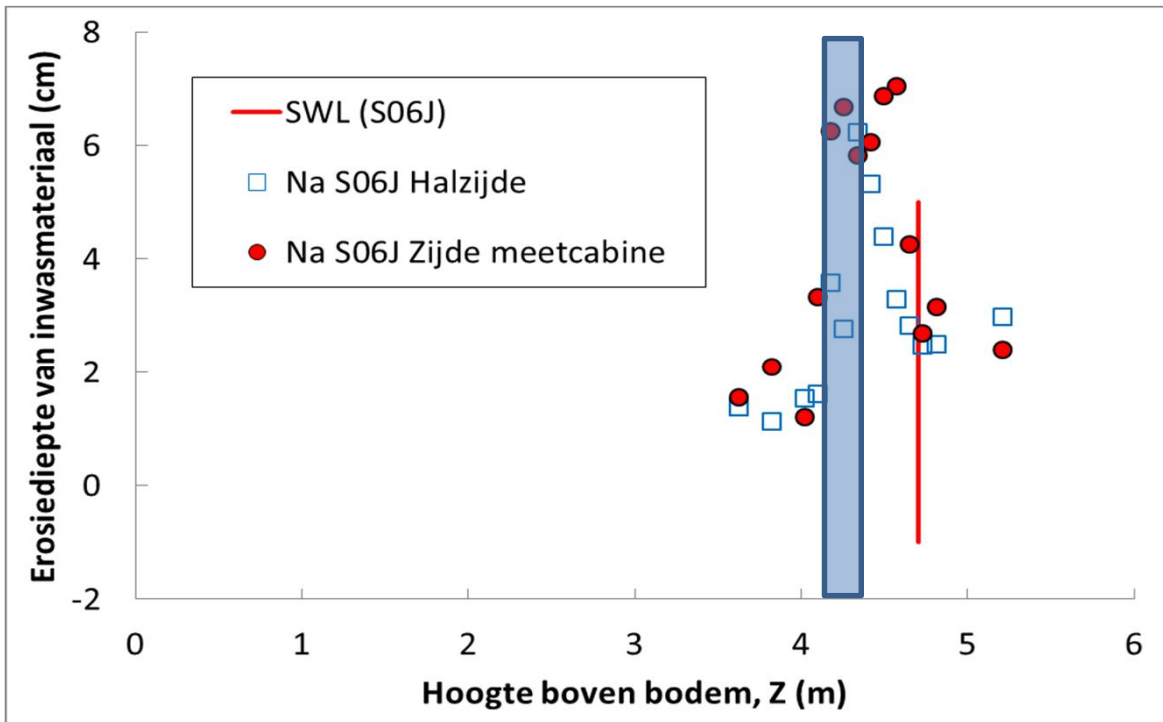


Uitspoeling inwasmateriaal Test S05

1208618.009

Deltares

Fig. B.7



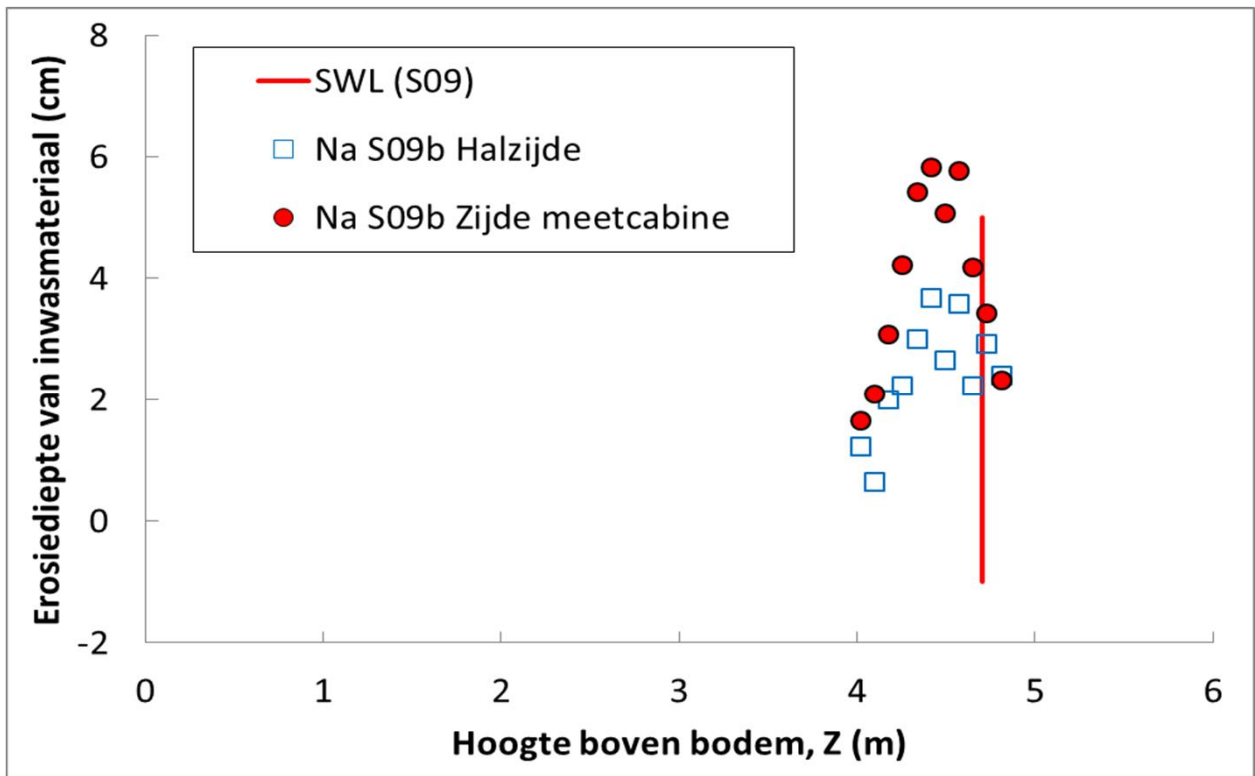
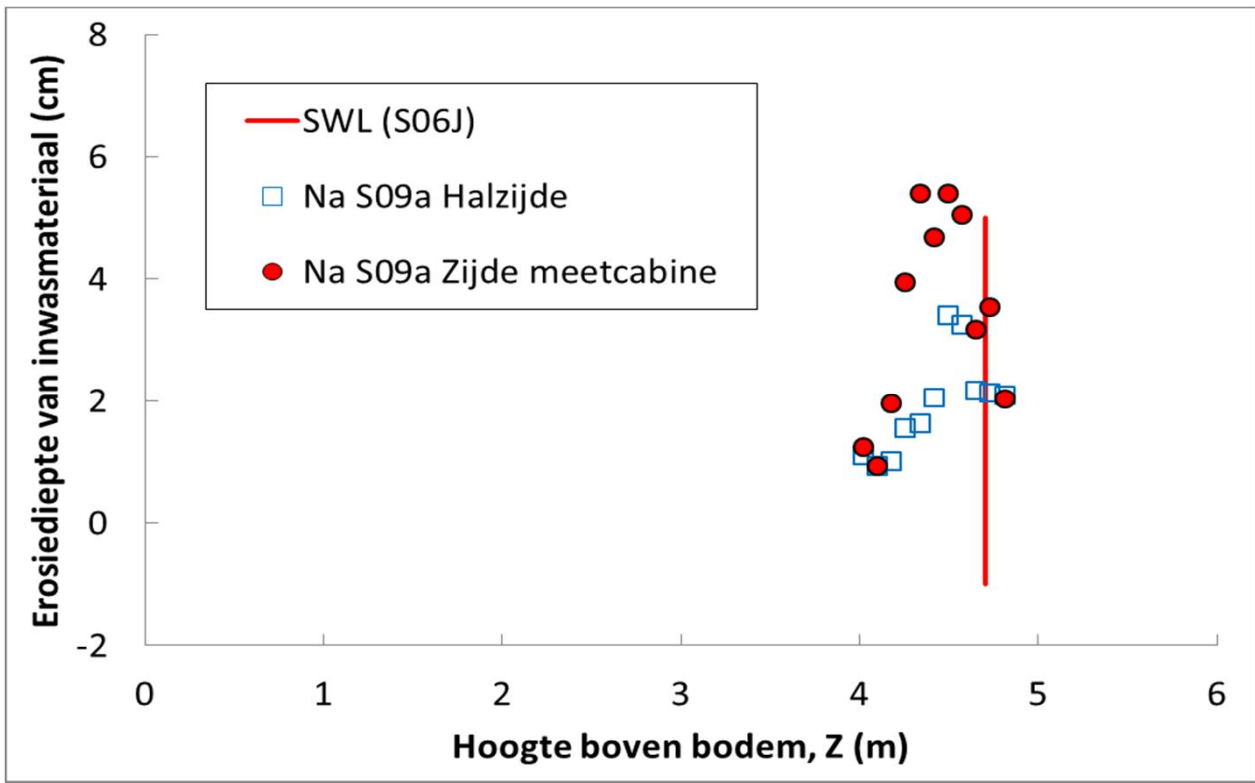
Schadegebied aangegeven met blauw vlak

Uitspoeling inwasmateriaal Test S06

1208618.009

Deltares

Fig. B.8



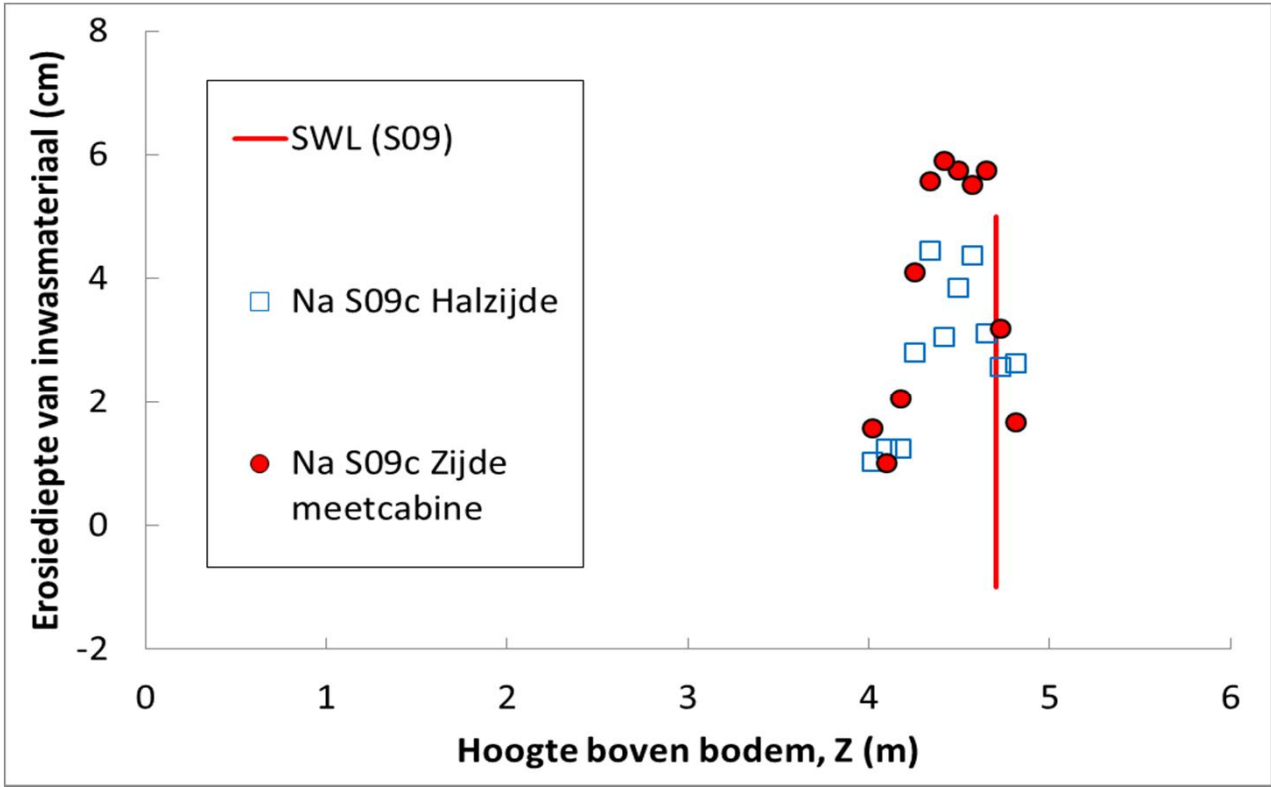
Uitspoeling inwasmateriaal Test S09a (boven) en Test S09b (onder)

1208618.009

Deltares

Fig. B.9





Uitspoeling inwasmateriaal Test S09c

1208618.009



## C Tabellen

*Tabel C.1 Proevenprogramma Test Serie 4 (golfoploopproeven, gemeten waarden)*

*Tabel C.2 Proevenprogramma Test Serie 1, 2 en 3 (golfoploop- en stabiliteitsproeven, gemeten waarden)*

*Tabel C.3 Hoek van schuiven en wrijvingscoëfficiënt natte Testblokken*

*Tabel C.4 Verticale positie drukopnemers*

*Tabel C.5 Opgemeten dikte Testblokken (type basis)*



Tabel C.1 Proevenprogramma Test Serie 4 (golfoplooppoeven, gemeten waarden)

Proef	Waterstand (m+bodem)	Golfhoogte $H_{m0}$ (m)	Golfperiode			Golfsteilheid $S_{op}$ (-)	aantal golven N (-)
			$T_p$ (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	$T_m$ (s)		
27	5.48	0.58	2.92	2.70	2.52	0.044	2081
24	5.48	0.62	3.70	3.23	2.86	0.029	1358
21	5.48	0.62	6.55	5.43	4.40	0.009	881
28	5.48	0.88	3.42	3.19	2.93	0.048	1256
25	5.48	0.93	4.17	3.87	3.33	0.034	1105
22	5.48	0.95	7.31	6.37	5.07	0.011	739
29	5.48	1.15	3.77	3.74	3.36	0.052	175
24-J	5.48	0.64	3.71	3.44	3.09	0.030	1162
23-J	5.48	1.24	8.68	7.53	5.39	0.011	562
27-J	5.48	0.57	2.81	2.71	2.51	0.046	1426
21-J	5.48	0.63	6.20	5.65	4.80	0.011	747
28-J	5.48	0.92	3.37	3.24	3.02	0.052	1190
25-J	5.48	0.91	4.29	4.04	3.53	0.032	1019
22-J	5.48	0.92	7.38	6.84	5.81	0.011	618
26-J	5.48	1.18	5.01	4.69	4.07	0.030	794
29-J	5.48	1.12	3.92	3.75	3.45	0.047	1043
29a-J	5.48	1.23	3.86	3.73	3.43	0.053	1049

Tabel C.2 Proevenprogramma Test Serie 1, 2 en 3 (golfoploop en stabiliteitsproeven, gemeten waarden)

Proef	Waterstand (m+bodem)	Golfhoogte H <sub>m0</sub> (m)	Golfperiode			Golfsteilheid S <sub>op</sub> (-)	aantal golven N (-)	Duur		Schadecat.	Foto	inwas
			T <sub>p</sub> (s)	T <sub>m.1.0</sub> (s)	T <sub>m</sub> (s)			t (s)	t <sub>cum</sub> (uur)			
S01ingolf	4.55	0.62	4.42	4.02	3.51	0.020	491	1800		a		B.3
S02	4.70	0.93	5.30	4.98	4.41	0.021	391	1841		d	A.10/11/12	B.4
S03ingolf	4.55	0.54	2.83	2.75	2.56	0.043	672	1800		a		B.5
S04	4.70	0.67	3.28	3.12	2.86	0.040	1031	2952		a		B.6
S05	4.70	0.79	3.56	3.37	3.09	0.040	1034	3240		a		B.7
S06	4.70	0.99	3.91	3.74	3.45	0.041	463	1620		d	A.13	B.8
S07ingolf	4.55	0.53	2.90	2.75	2.60	0.041	440	1200		a		
S08ingolf	4.55	0.53	2.82	2.76	2.60	0.043	441	1200		a		
S09-a	4.70	0.67	3.40	3.17	2.89	0.037	2490	7200	2.0	a	A.14	B.9
S09-b	4.70	0.66	3.36	3.12	2.93	0.038	589	1801	2.5	d	A.15	B.9
S09-c	4.70	0.68	3.35	3.13	2.90	0.039	1807	5400	4.0	d	A.16	B.10
S09-d	4.70	0.72	3.36	3.15	2.91	0.041	1187	3600	5.0	d	A.17/18	

*Tabel C.3a: hoek bij schuiven, natte Testblokken (<sup>o</sup>)*

	meting 1	meting 2	meting 3	gemiddelde
vlakke zijde met gewicht (10 kg)	36.9	36.4	34.8	36.0
vlakke zijde zonder gewicht	36.9	39.9	41.5	39.4
gekromde zijde met gewicht (10 kg)	33.1	33.7	33.7	33.5
gekromde zijde zonder gewicht	30.2	36.0	31.7	32.6
gemiddelde				35.4

*Tabel C.3b: wrijvingscoefficient, natte Testblokken (-)*

	meting 1	meting 2	meting 3	gemiddelde
vlakke zijde met gewicht (10 kg)	0.75	0.74	0.70	0.73
vlakke zijde zonder gewicht	0.75	0.84	0.88	0.82
gekromde zijde met gewicht (10 kg)	0.65	0.67	0.67	0.66
gekromde zijde zonder gewicht	0.58	0.73	0.62	0.64
gemiddelde				0.71

*Tabel C.4 Verticale positie drukopnemers in het filter t.o.v. bodem*

	Z (m) vanaf bodem
DRO01	3.140
DRO02	3.270
DRO03	3.412
DRO04	3.508
DRO05	3.613
DRO06	3.692
DRO07	3.775
DRO08	3.859
DRO09	3.938
DRO10	4.009
DRO11	4.077
DRO12	4.143
DRO13	4.243

*Tabel C.5 Opgemeten dikte Testblokken (type basis)*

Meting	dikte (cm)
1	14.95
2	14.95
3	14.93
4	14.94
5	14.92
6	14.95
7	14.97
8	14.95
9	14.97
10	14.97
11	14.98
12	15.00
13	14.97
14	14.94
15	14.98
16	14.95
17	14.95
18	14.97
19	14.98
20	14.97
mu	14.96
stdev	0.02



## D Golfhoogte overschrijdingskrommen en golfspectra

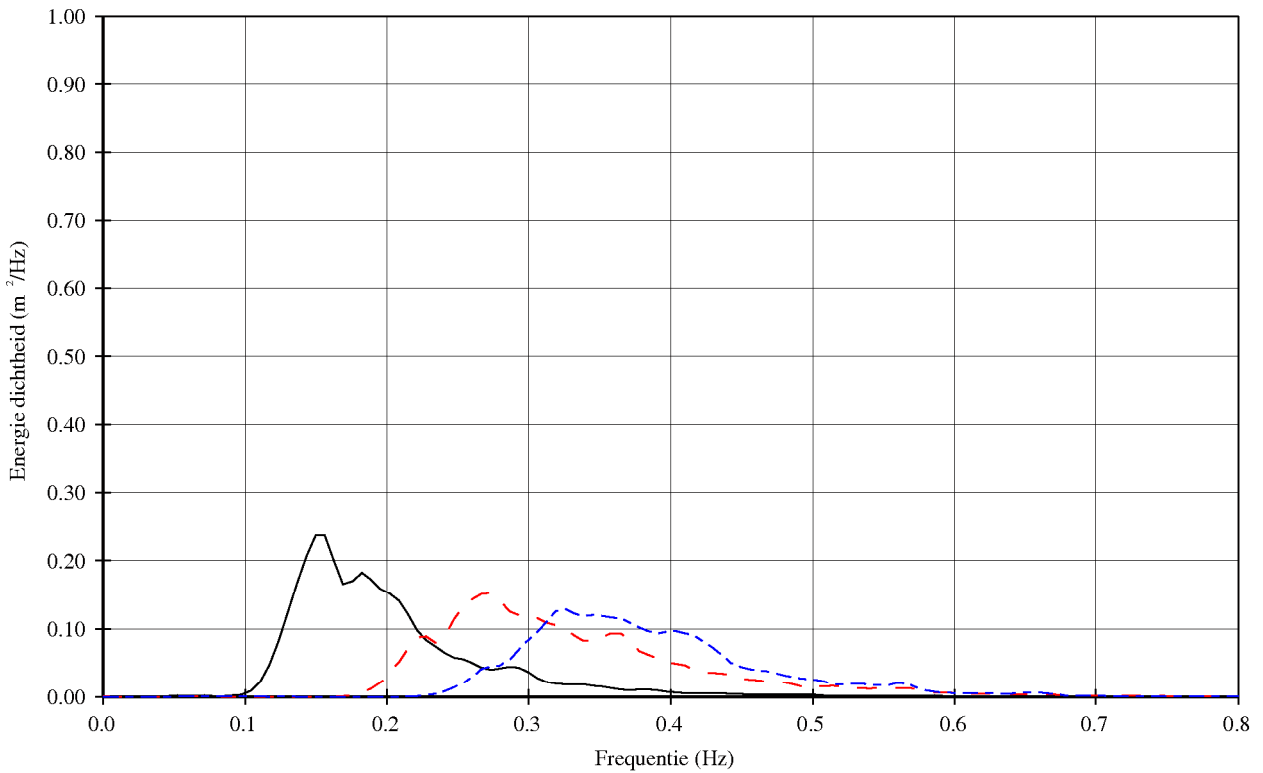
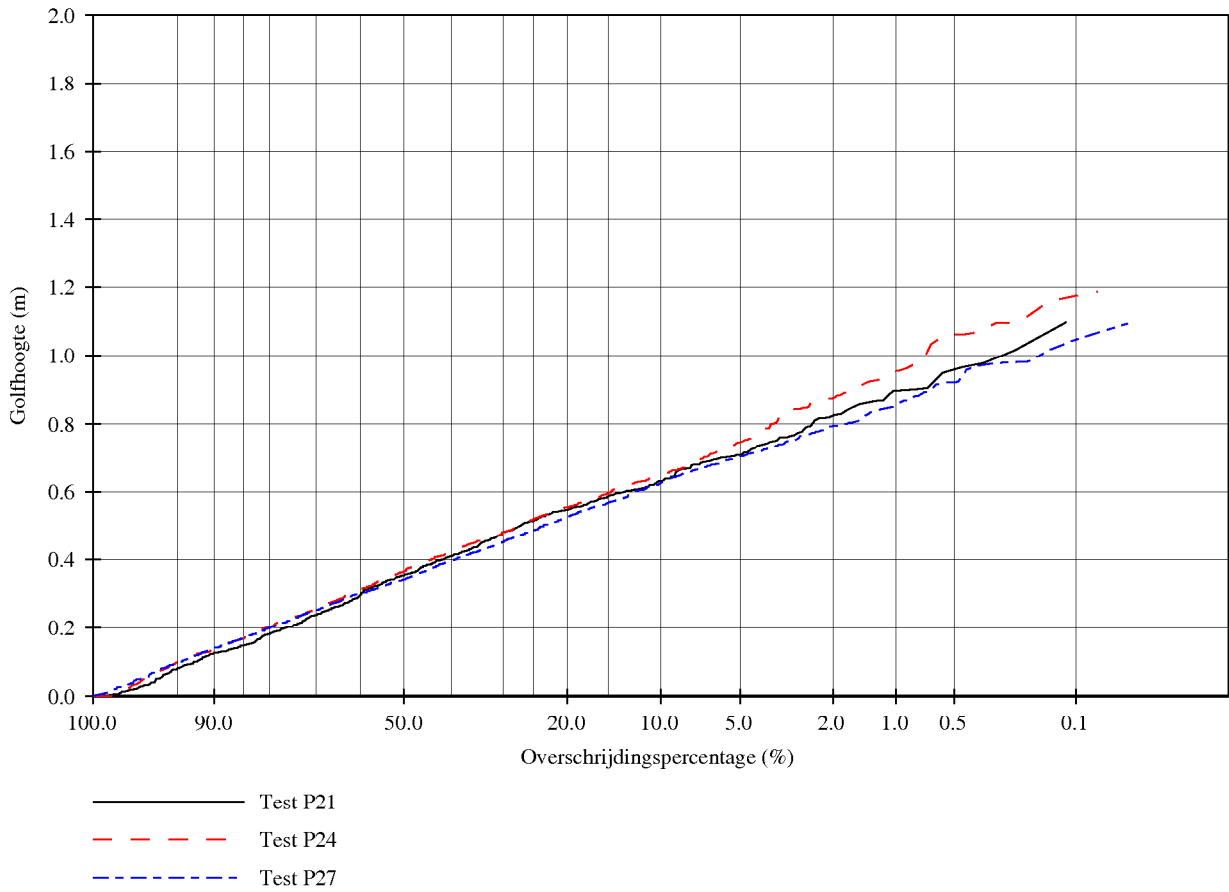
*Testen m.b.t. bepaling golfploophoogte Testblokken boven de stilwaterlijn*

<i>Figuur D.1 Test P21, P24, P27</i>	<i>(Pierson-M.</i>	<i><math>H_s = 0.6 \text{ m}</math>, <math>s_{op} = 1\%</math>; 3%; 5%)</i>
<i>Figuur D.2 Test P21J, P24-J, P27-J</i>	<i>(Jonswap</i>	<i><math>H_s = 0.6 \text{ m}</math>, <math>s_{op} = 1\%</math>; 3%; 5%)</i>
<i>Figuur D.3 Test P22, P25, P28</i>	<i>(Pierson M.</i>	<i><math>H_s = 0.9 \text{ m}</math>, <math>s_{op} = 1\%</math>; 3%; 5%)</i>
<i>Figuur D.4 Test P22J, P25J, P28J</i>	<i>(Jonswap</i>	<i><math>H_s = 0.9 \text{ m}</math>, <math>s_{op} = 1\%</math>; 3%; 5%)</i>
<i>Figuur D.5 Test P23J, P26J, P29J</i>	<i>(Jonswap</i>	<i><math>H_s = 1.2 \text{ m}</math>, <math>s_{op} = 1\%</math>; 3%; 5%)</i>

*Testen m.b.t. bepaling stabiliteit*

<i>Figuur D.6 Test S02</i>	<i>(Jonswap</i>	<i><math>H_s = 0.9 \text{ m}</math>, <math>s_{op} = 2\%</math>)</i>
<i>Figuur D.7 Test S04, S05, S06, S08</i>	<i>(Jonswap</i>	<i><math>H_s = 0.7 \text{ m}</math>; 0.8 m; 1.0 m; 0.7 m, <math>s_{op} = 4\%</math>)</i>





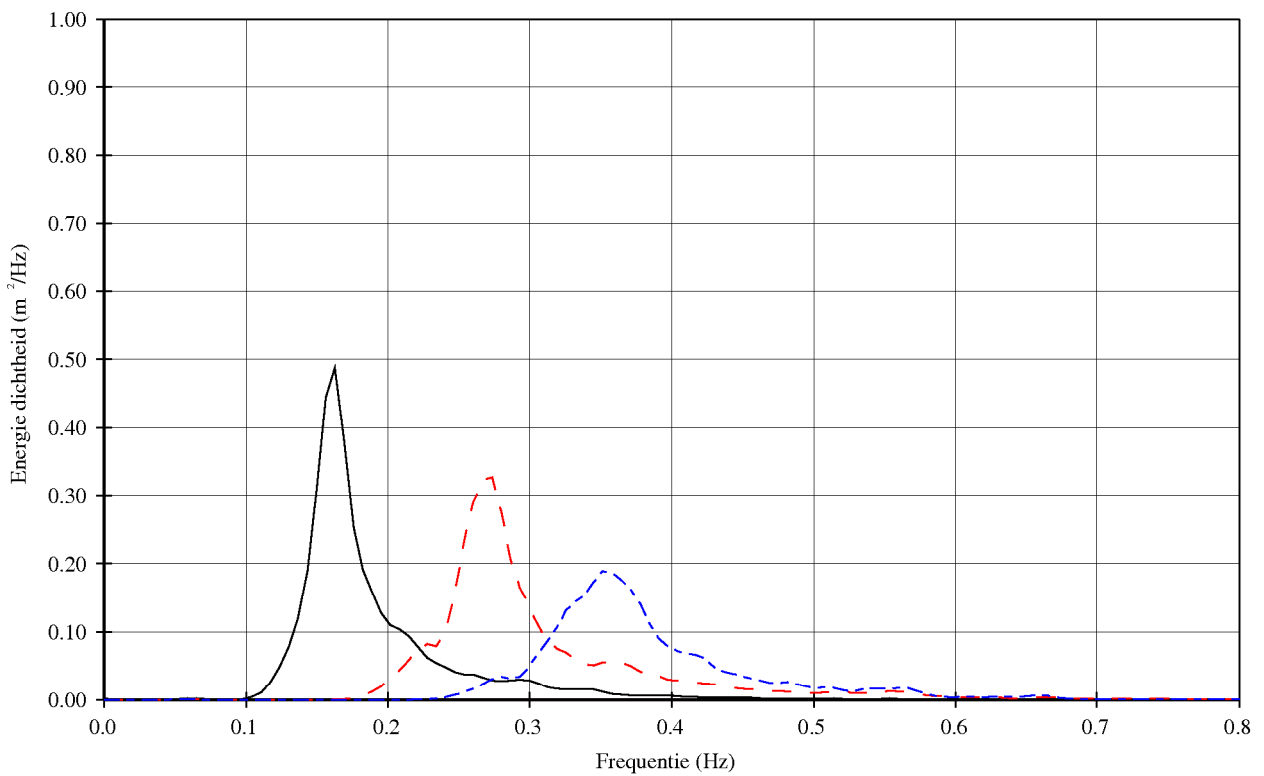
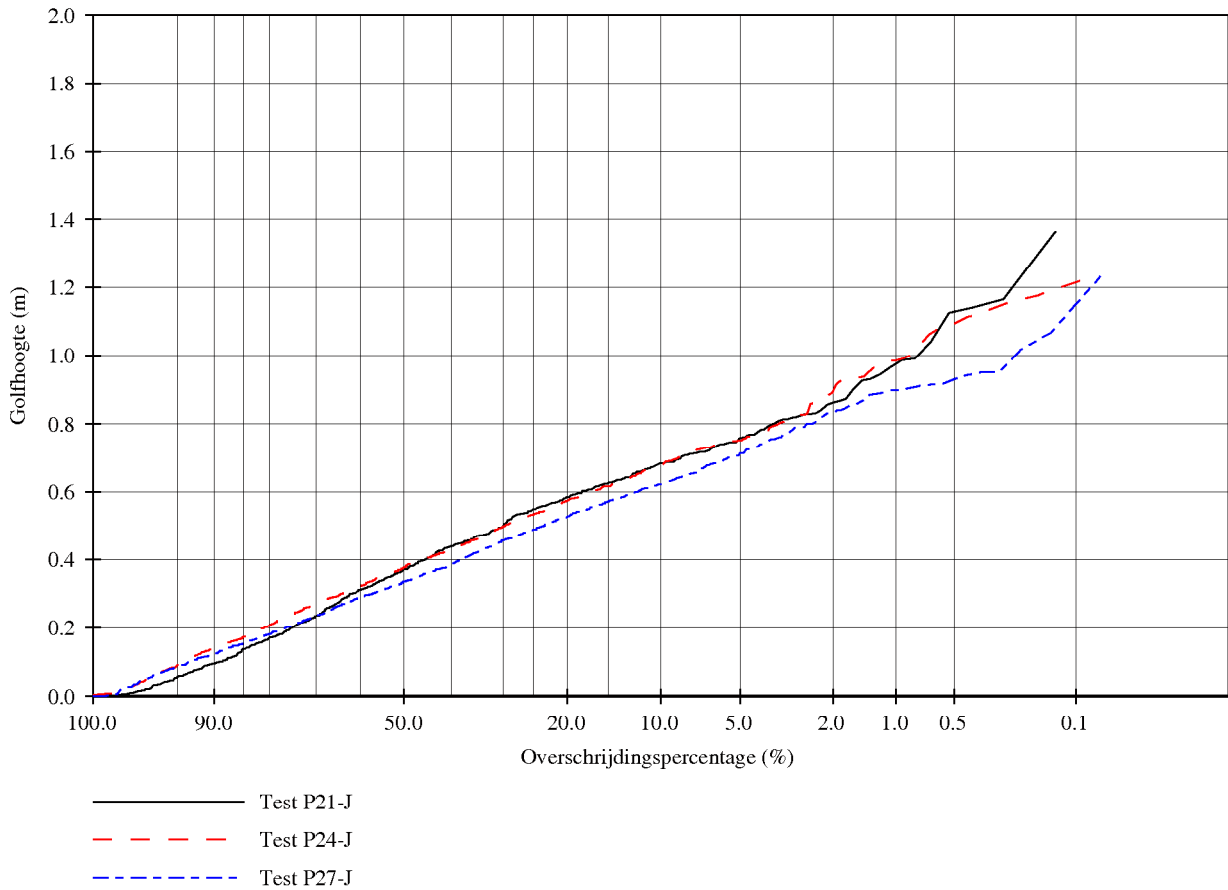
Golfhoogte overschrijdingskrommen en energie spectra  
(Piers-M. Hs = 0.6 m sop = 1%; 3% ; 5%)

Inkomend

**Deltares**

1208618.009

FIG. D.1



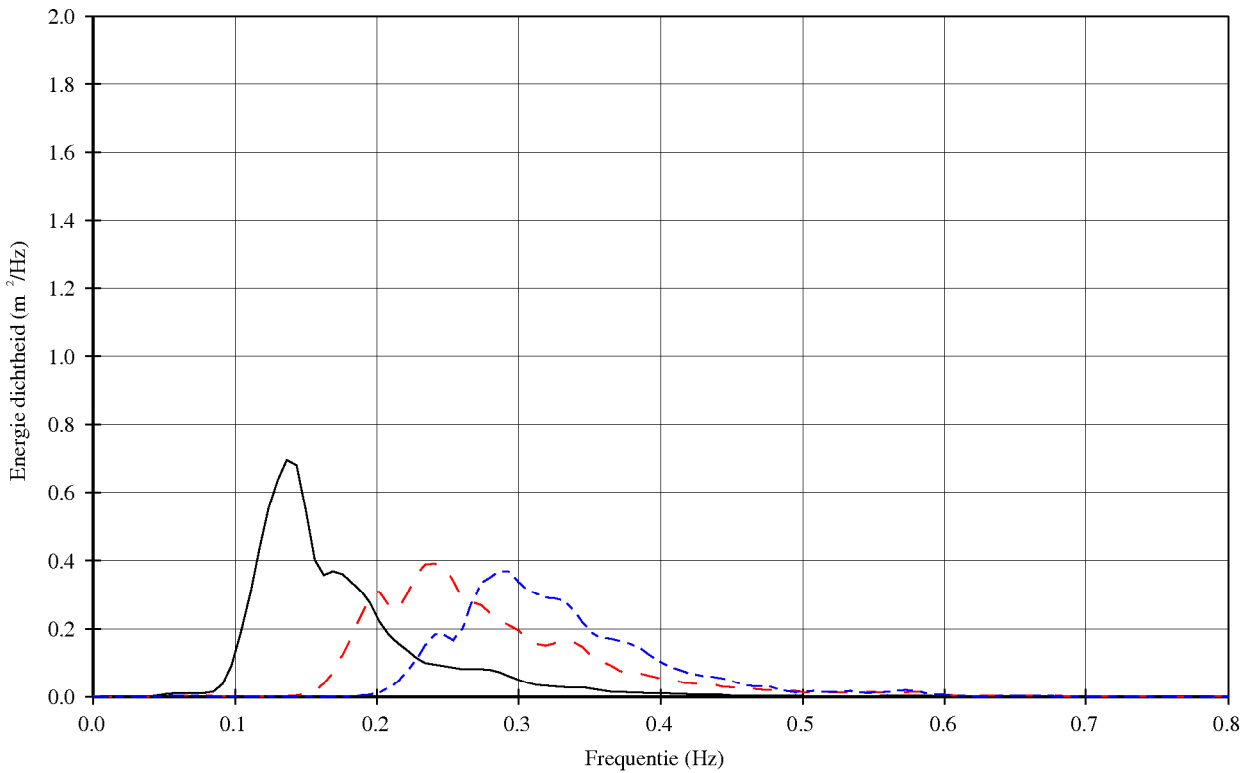
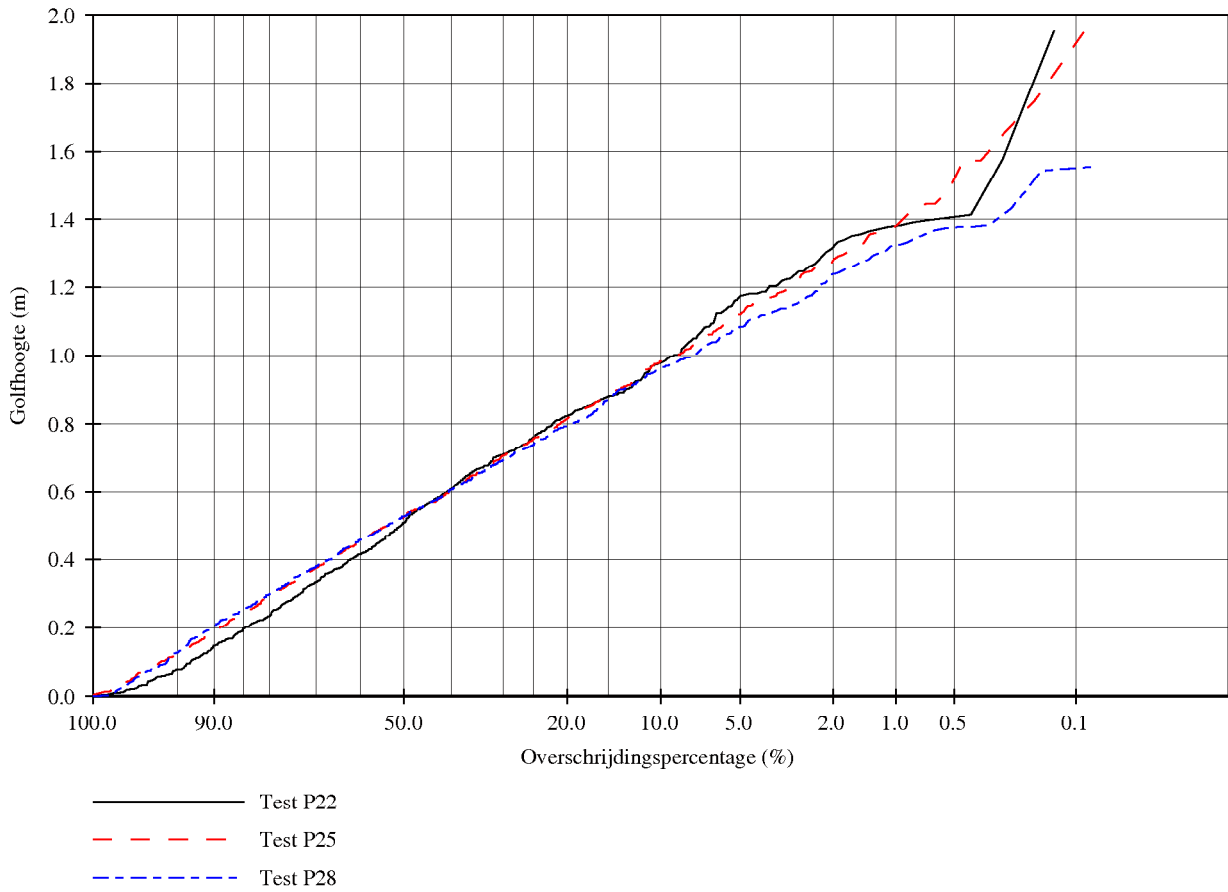
Golfhoogte overschrijdingskrommen en energie spectra  
 (Jonswap.  $H_s = 0.6$  m  $sop = 1\%$ ;  $3\%$ ;  $5\%$ )

Inkomend

**Deltares**

1208618.009

FIG. D.2



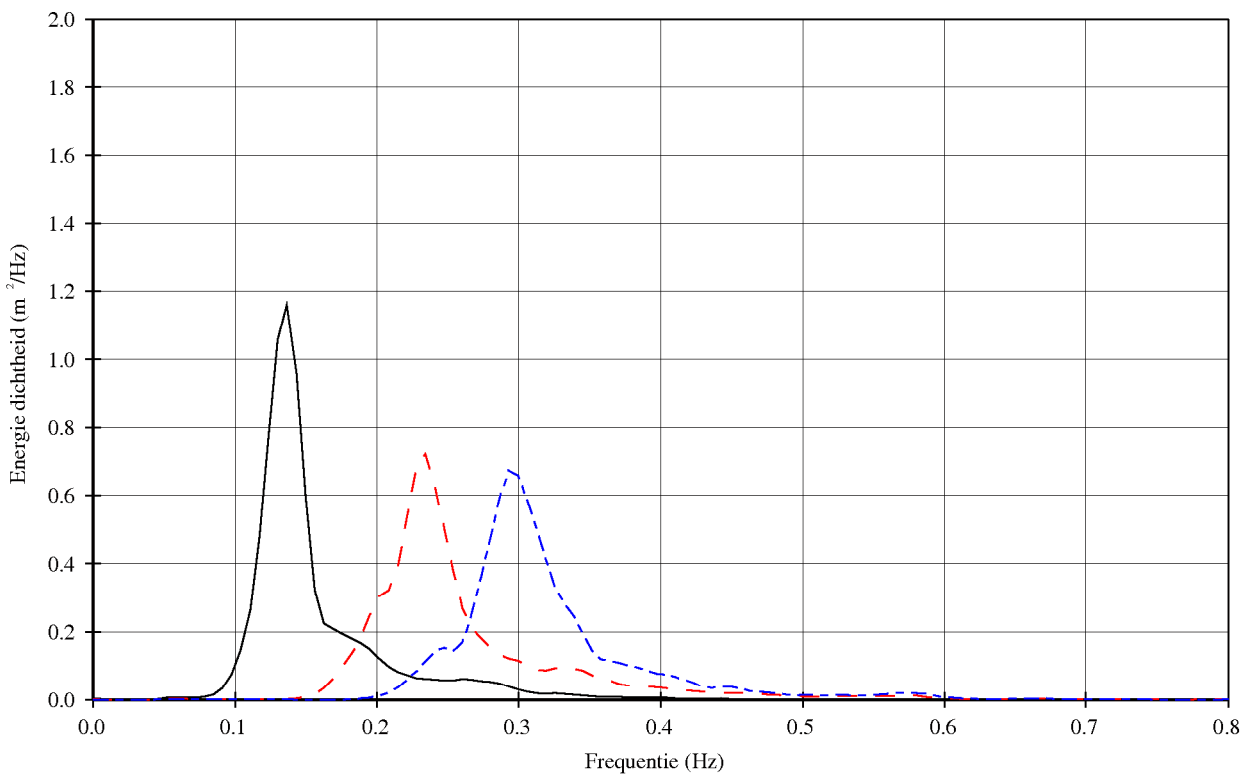
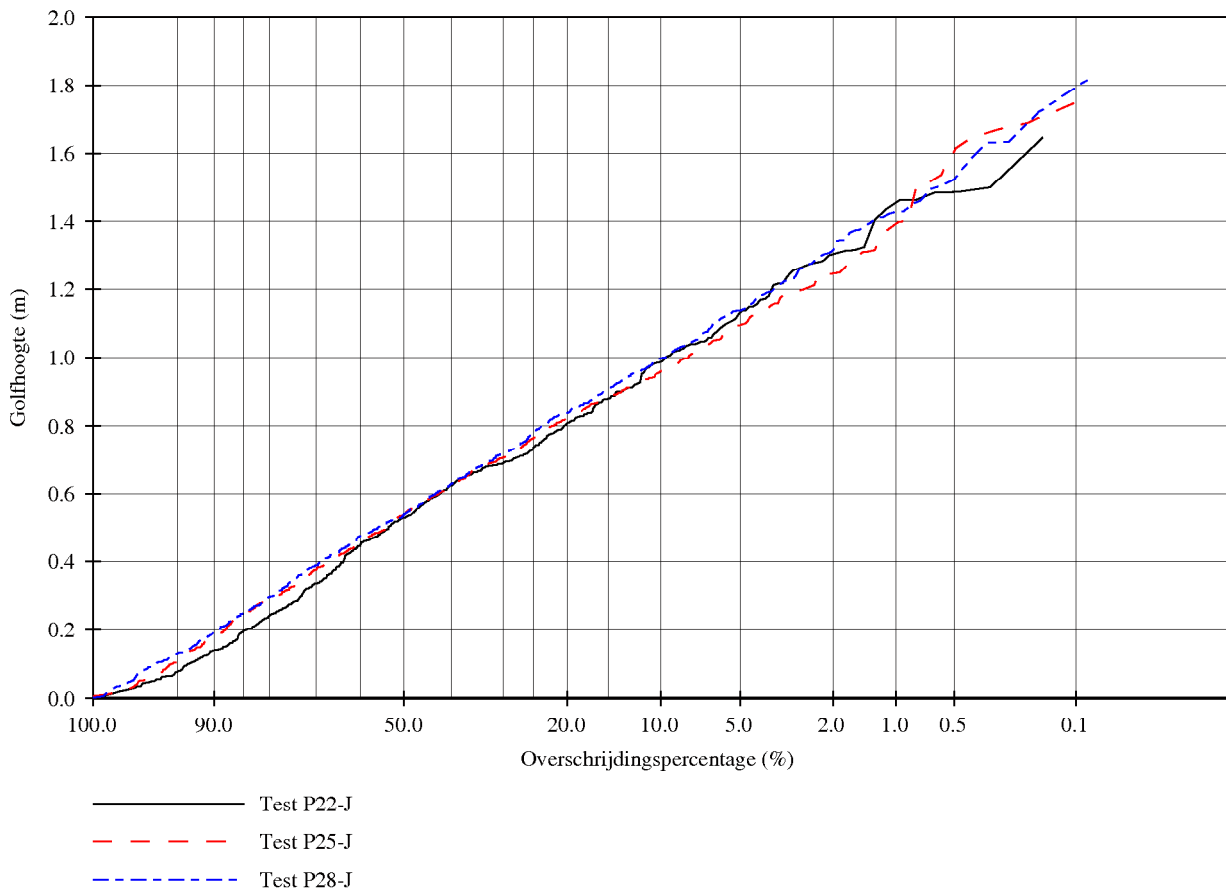
Golfhoogte overschrijdingskrommen en energie spectra  
(Piers-M. Hs = 0.9 m sop = 1%; 3% ; 5%)

Inkomend

**Deltares**

1208618.009

FIG. D.3



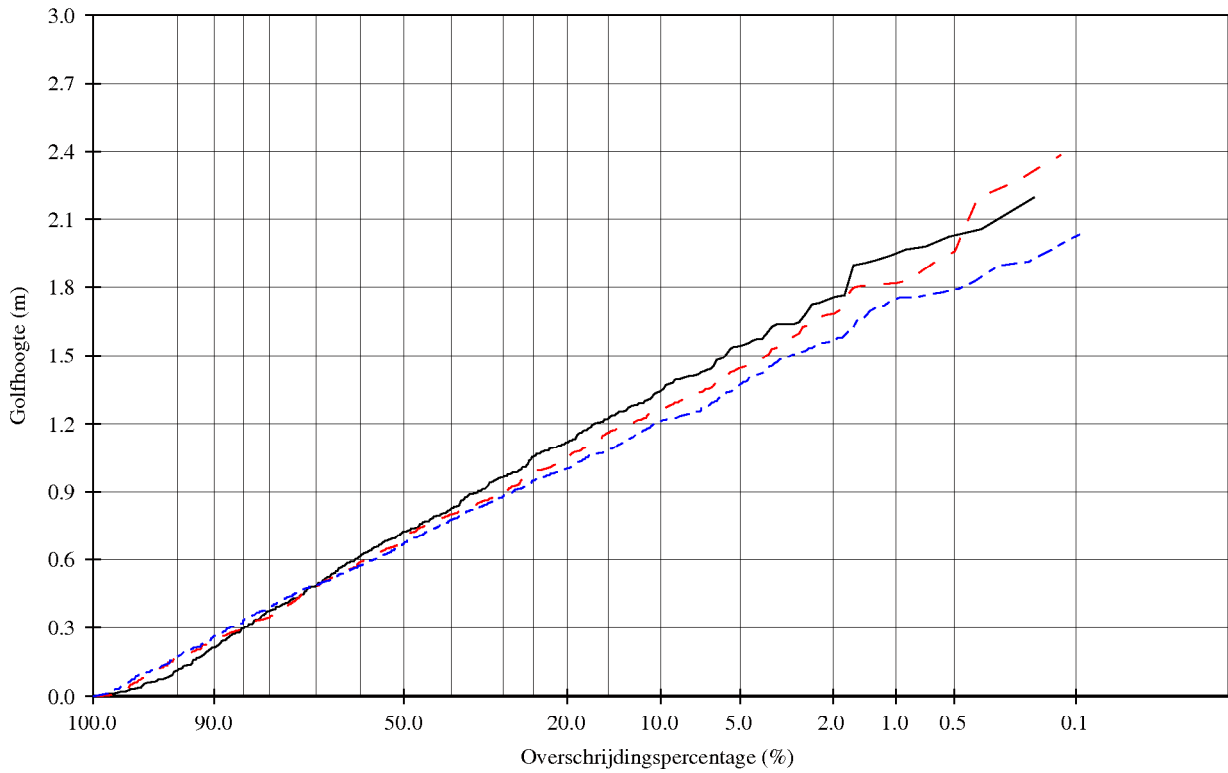
Golfhoogte overschrijdingskrommen en energie spectra  
 (Jonswap.  $H_s = 0.9$  m  $sop = 1\%$ ;  $3\%$ ;  $5\%$ )

Inkomend

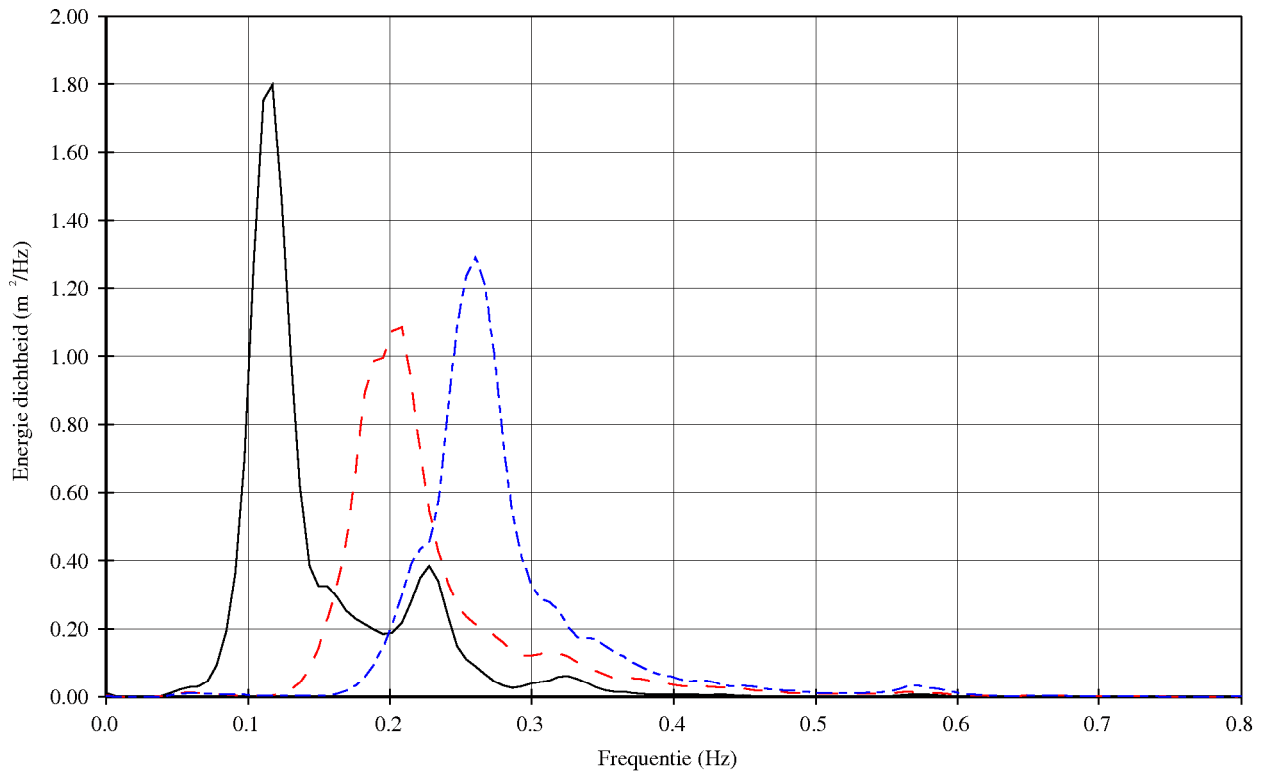
**Deltares**

1208618.009

FIG. D.4



- Test P23-J
- - - Test P26-J
- - - Test P29A-J

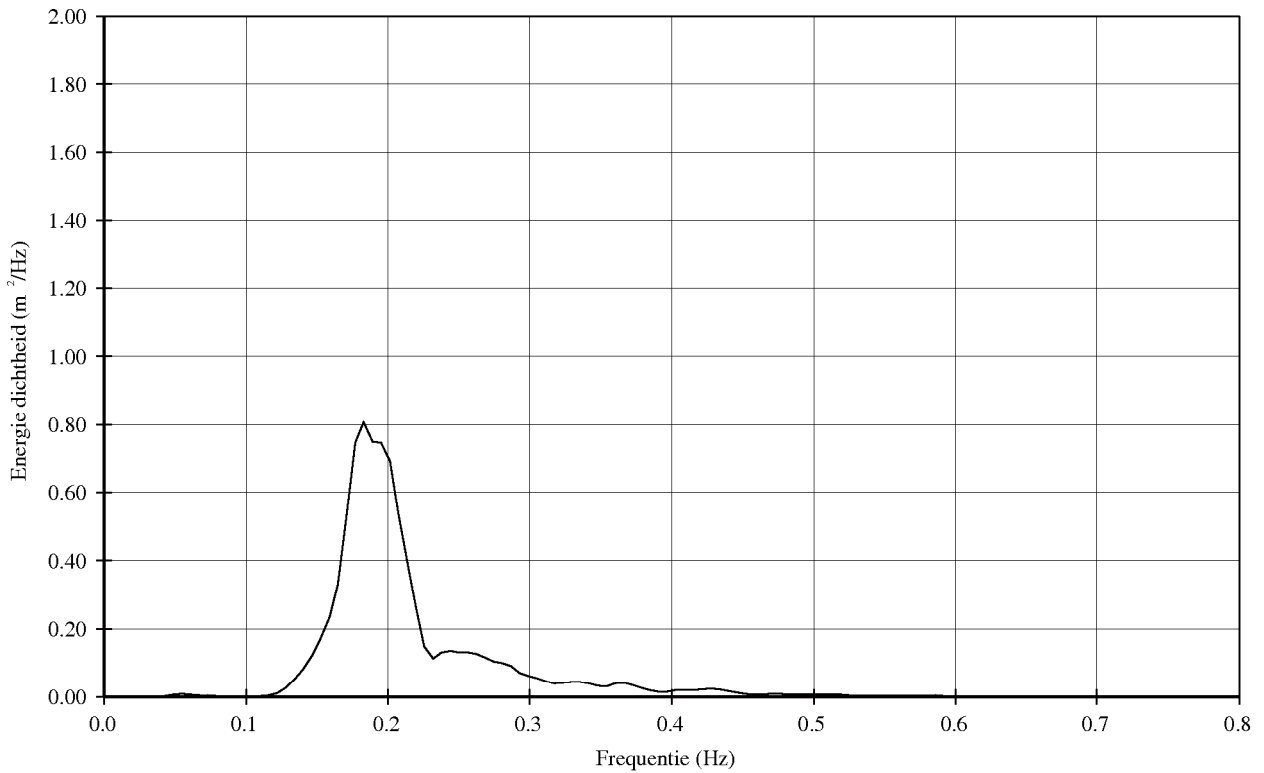
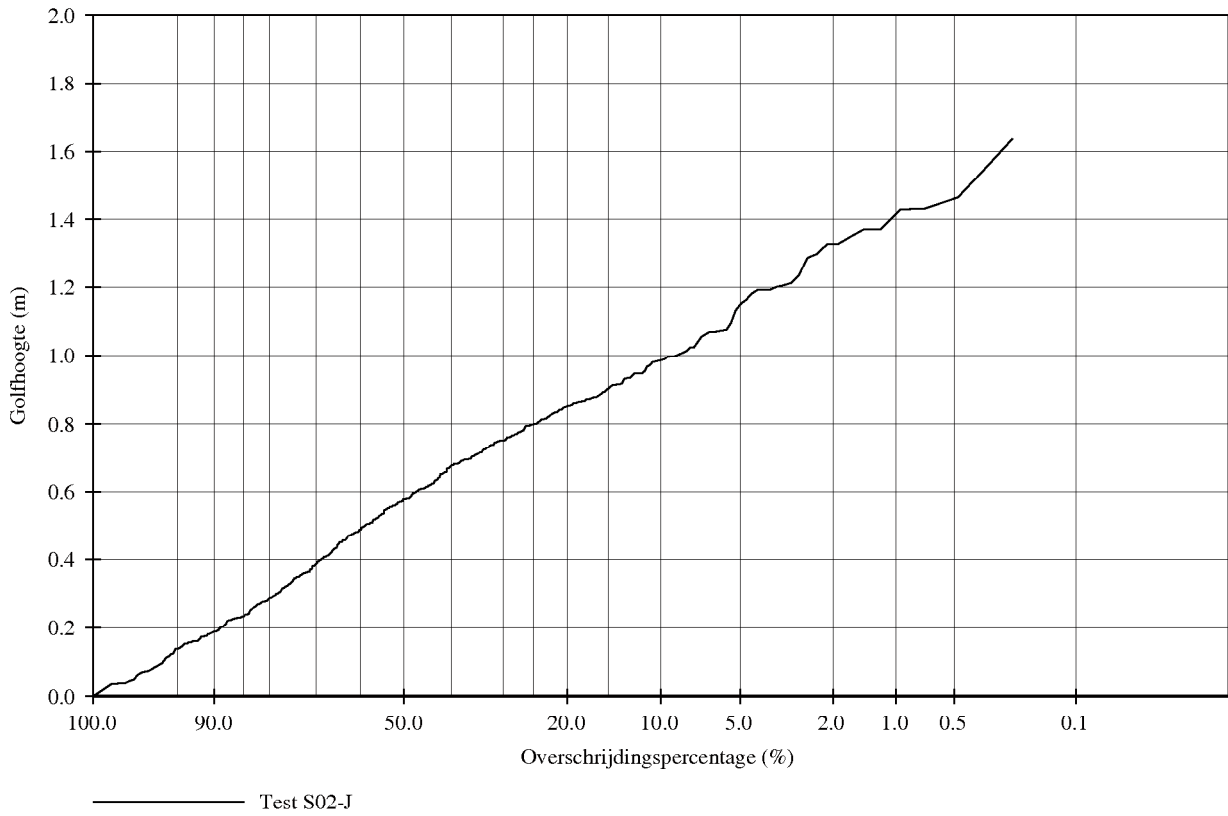


Golfhoogte overschrijdingskrommen en energie spectra  
(Jonswap.  $H_s = 1.2$  m  $sop = 1\%$ ;  $3\%$ ;  $5\%$ )

Inkomend

Deltares

1208618.009 FIG. D.5



Golfhoogte overschrijdingskrommen en energie spectra  
 (Jonswap.  $H_s = 0.9$  m  $sop = 2\%$ )

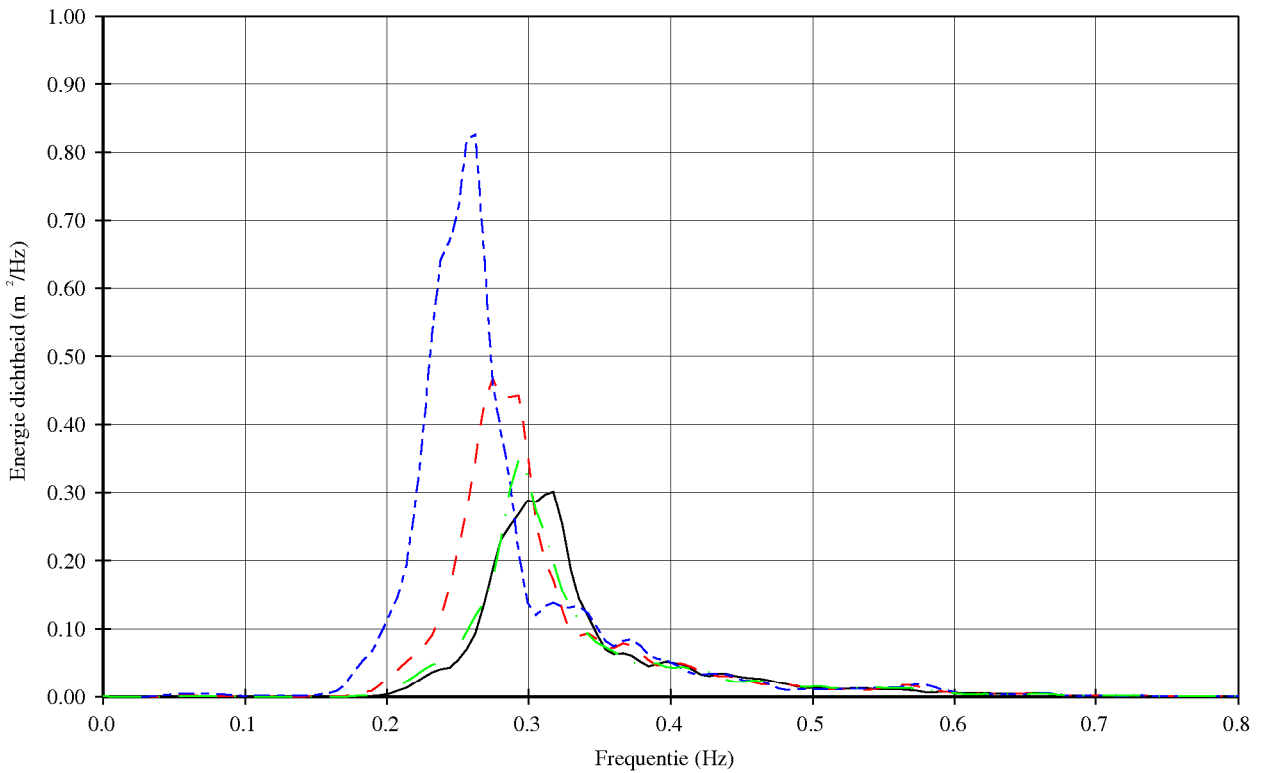
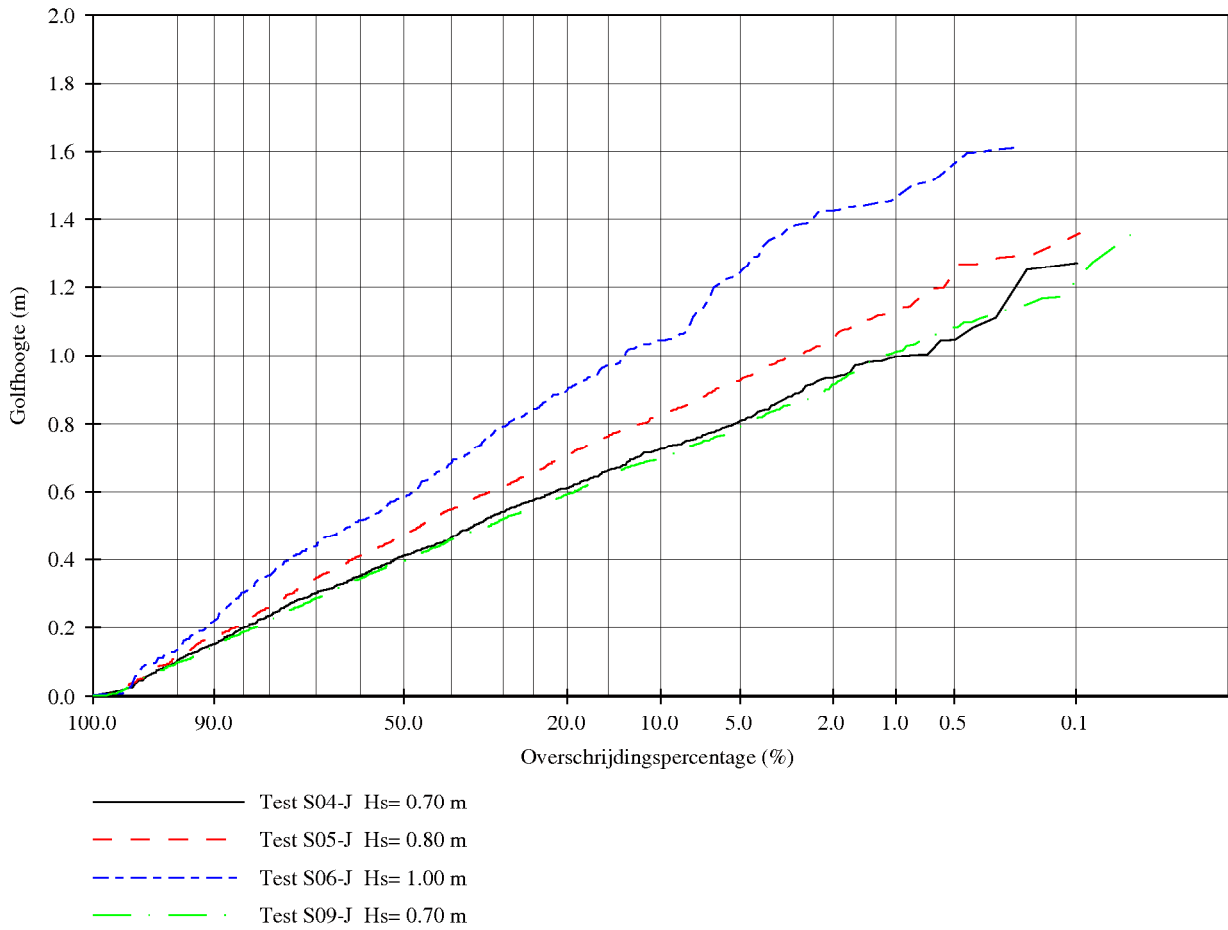
Inkomend

Deltares

1208618.009

FIG. D.6





Golfhoogte overschrijdingskrommen en energie spectra  
(Jonswap. sop = 4%)

Inkomend

Deltares

1208618.009

FIG. D.7



## 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.



Figuur E.1 Golfaanval op testsectie van Testblokken.

### 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 bezwijkgolffhoogte 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 golffhoogte 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 bezwijkgolffhoogte verder uitgedetailleerd (zie Paragraaf 4.1 voor omschrijving schadecategorieën):

- 1 De golffhoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste twee proevenseries met korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de golffhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golffhoogte van de proef met de hoogste golffhoogte in dezelfde serie (ongeveer dezelfde golfsteilheid) waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
- 2 Voor de langeduurproef wordt de gemiddelde golffhoogte en golfperiode bepaald en geldt het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef.
- 3 Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golffhoogte nog geen schade is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golffhoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golffhoogte-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 golffbelasting tijdens de langeduurproef impliceert dat schade bij een veel hogere golffhoogte 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 golffhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

### E.3 Bepaling stabiliteitsfactor

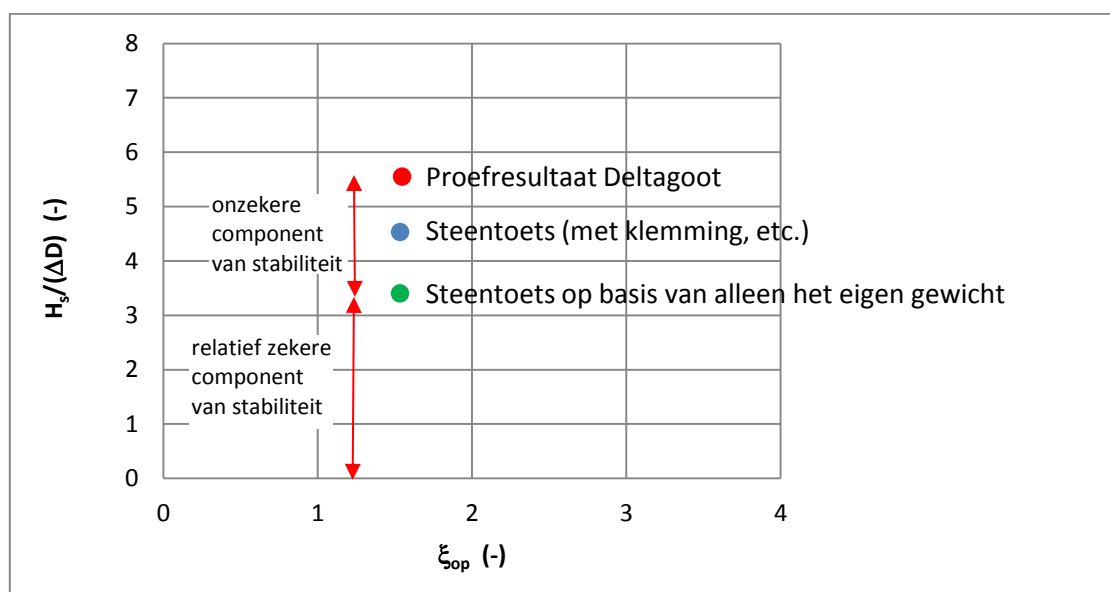
Voor het bepalen van de stabiliteitsfactor wordt zoveel mogelijk kennis en ervaring van steenzettingen benut, om een zo goed mogelijke factor te verkrijgen met de juiste veiligheidsmarge. Dit wordt enerzijds gerealiseerd door gebruik te maken van het rekenmodel Steentoets en anderzijds door te bedenken 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.2 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:

- $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  = 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
- $D_{in \text{ modelproeven}}$  = 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.2) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur E.2). Dit kan op de volgende wijze worden bereikt:

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

Met:

- $f_{stab}$  = 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:

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

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:  $\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$  (D.3)

• Vier proevenseries:  $\gamma = 1,1 + 1,64 \cdot \sigma$  (D.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, zodat er geen standaardafwijking is. In dat geval wordt er gerekend met een standaardafwijking van 0,05, hetgeen 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.