

## **Stabiliteit van Basalton 30 STS steenzetting bij golfaanval**

**Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken**





# **Stabiliteit van Basalton 30 STS steenzetting bij golfaanval**

**Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken**

Guido Wolters

1208618-007



## Titel

Stabiliteit van Basalton 30 STS steenzetting bij golfaanval

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat WVL Holcim Coastal B.V.	1208618-007	1208618-007-HYE-0008	47

## Trefwoorden

Steenzetting, Basalton, dijken, zetsteen

## 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 type steenzettingen ook de golfoplooppremende werking gemeten.

Het in dit rapport beschreven deel van het onderzoek betreft de stabiliteit van zetstenen van het type Basalton 30 STS, waarvoor Holcim Coastal BV als marktpartij in het onderzoek participeert.

Om de stabiliteit bij golfaanval van Basalton 30 STS 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 Basalton was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder geotextiel.

De constructie is beproefd met drie proefseries. De eerste twee series bestonden uit korteduurproeven met in iedere serie een gelijkblijvende brekerparameter. De derde serie bestond uit twee langeduurproeven met gelijkblijvende golfcondities.




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

De proefresultaten laten een wat lagere stabiliteit zien ten opzichte van eerder onderzoek met Basalton. De van de proeven afgeleide stabiliteitsfactor voor Basalton 30 STS is:  $f_{stab} = 0,98$ . Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

## Referenties

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

Opdracht Holcim Coastal B.V voor het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", 1208618-000-HYE-0005/0006, 21.11.2013

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	mei 2014	Guido Wolters		Paul van Steeg		Wiel Tilmans	
2.0	juni 2015	Guido Wolters		Mark Klein Breteler		Klaas Jan Bos	
3.0	okt. 2015	Guido Wolters		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	
4.0	mrt. 2016	Guido Wolters		Mark Klein Breteler		Klaas Jan Bos	

**Status**  
definitief

**Titel**

Stabiliteit van Basalton 30 STS steenzetting bij  
golfaanval

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat WVL  
Holcim Coastal B.V.

**Project**

1208618-007

**Kenmerk**

1208618-007-HYE-0008

**Pagina's**

47

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken	1
1.2	Steenzetting van Basalton (Holcim Coastal B.V.)	2
1.3	Opzet van het rapport	2
<b>2</b>	<b>Schaling</b>	<b>3</b>
2.1	Faciliteit en Basalton 30 STS	3
2.2	Schaling	4
2.2.1	Algemeen	4
2.2.2	Schaalregels	5
<b>3</b>	<b>Modelopstelling en proevenprogramma</b>	<b>9</b>
3.1	Algemeen	9
3.2	Plaatsing Basalton 30 STS	10
3.3	Metingen	14
3.3.1	Golfhoogtemetingen	14
3.3.2	Oploopmetingen	15
3.3.3	Profielmetingen	15
3.3.4	Hoogteverschillen van taludoppervlak en uitspoeling	17
3.3.5	Wrijvingscoëfficiënt	17
3.3.6	Soortelijke massa van de zuilen	18
3.4	Proevenprogramma	18
<b>4</b>	<b>Schadebeschrijvingen en observaties</b>	<b>21</b>
4.1	Algemeen	21
4.2	Serie 1, korteduurproeven, $s_{op}=0,02$ (Proeven P01 – P03)	24
4.3	Serie 2, korteduurproeven, $s_{op}=0,04$ (Proeven P04 – P07)	27
4.4	Serie 3, langeduurproeven, $s_{op}=0,04$ (Proeven P08 – P013)	29
4.5	Dwarsprofielen	35
<b>5</b>	<b>Analyse van de proefresultaten</b>	<b>37</b>
5.1	Uitspoeling van inwasmateriaal en filter	37
5.2	Stabiliteit steenzetting	38
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Literatuur</b>	<b>47</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Zeefkrommes</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Lasermetingen en dwarsprofielen</b>	<b>C-1</b>
C.1	Lasermetingen	C-1

C.2 Dwarsprofielen	C-4
<b>D Overschrijdingskrommes golfhoogte</b>	<b>D-1</b>
<b>E Foto's</b>	<b>E-1</b>
<b>F Invloed van zuildiameter op stijghoogteverschil</b>	<b>F-1</b>
F.1 Inleiding	F-1
F.2 Invloed van de zuildiameter op de belasting	F-1
F.3 Invloed van zuildiameter op sterkte	F-3
F.4 Conclusie	F-4
<b>G Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor</b>	<b>G-1</b>
G.1 Inleiding	G-1
G.2 Interpretatie van de proeven	G-1
G.3 Bepaling stabiliteitsfactor	G-2



## Symbolenlijst

b	=	Dikte van de filterlaag (m)
D	=	Toplaagdikte (m)
$D_{f15}$	=	Korrelgrootte van het filter, onderschrijdingswaarde van 15% op basis van het gewicht (m)
$D_{f50}$	=	Korrelgrootte van het filter, onderschrijdingswaarde van 50% op basis van het gewicht (m)
$D_{i15}$	=	Korrelgrootte van het inwasmateriaal, onderschrijdingswaarde van 15% op basis van het gewicht (m)
$D_{i50}$	=	Korrelgrootte van het inwasmateriaal, onderschrijdingswaarde van 50% op basis van het gewicht (m)
F	=	Stabiliteitsparameter $(H_s/\Delta D) \cdot \xi_p^{2/3}$ (-)
Fr	=	Froudegetal (-)
g	=	Versnelling als gevolg van de zwaartekracht ( $m/s^2$ )
G	=	Equivalente gatgrootte in de steenzetting (m)
h	=	Waterstand (m)
$H_s$	=	Significante golfhoogte (hier gedefinieerd op basis van energie) (m)
$H_{m0}$	=	Significante golfhoogte (hier gedefinieerd op basis van energie) (m)
$H_s/(\Delta D)$	=	Belastingparameter (-)
$H_{max}$	=	Maximale golfhoogte (m)
k	=	Doorlatendheid van de filterlaag (m/s)
$k'$	=	Doorlatendheid van de toplaag (m/s)
L	=	Lengte (m)
$L_p$	=	$1,56T_p^2$ = diepwater golflengte op basis van $T_p$ (-)
$M_{50}$	=	Massa van de breuksteen met 50 procent onderschrijdingsfrequentie (kg)
N	=	Aantal golven (-)
Re	=	Reynoldsgetal (-)
$S_{om}$	=	$H_s/(1,56T_{m-1,0}^2)$ = golfsteilheid op basis van diepwater golflengte en de spectrale golfperiode (-)
$S_{op}$	=	$H_s/(1,56T_p^2)$ = golfsteilheid op basis van diepwater golflengte en de piekperiode (-)
$T_{m-1,0}$	=	Spectrale golfperiode (s)
$T_p$	=	Golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
t	=	Belastingduur of proefduur (uur)
$t_{cum}$	=	Totale tijd, cumulatief (uur)
u	=	Snelheid of doorlatendheid (m/s)
x	=	Lengte langs het talud vanaf de onderkant van de steenzetting (m)

$z$	=	Niveau ten opzichte van de gootbodern (m)
$z_{2\%}$	=	Golfoploop (m), 2% overschrijdingswaarde (verticale afstand tussen SWL en oplooptniveau)
$\alpha$	=	Taludhelling ten opzichte van horizontaal ( $^{\circ}$ )
$\Delta$	=	$(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van zetsteen (-)
$\Lambda$	=	Leklengte (m)
$\rho_s$	=	Soortelijke massa van de zetstenen ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho$	=	Soortelijke massa van water ( $\text{kg/m}^3$ )
$\xi_{om}$	=	$\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_{m-1,0}^2))}$ = brekerparameter op basis van spectrale periode (-)
$\xi_{op}$	=	$\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$ = brekerparameter op basis van piekperiode (-)
$\nu$	=	Kinematische viscositeit van water, ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

# 1 Inleiding

## 1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

In het kader van het “Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken” onderzoeken Rijkswaterstaat, drie noordelijke waterschappen (in Project Overstijgende Verkenning Waddenzeedijken van 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 Basalton 30 STS die zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit in golfaanval. Tegelijkertijd zijn golfloopmetingen uitgevoerd, die als vergelijking kunnen dienen bij het bepalen van de golfloopreducerende werking van andere typen steenzettingen.

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.

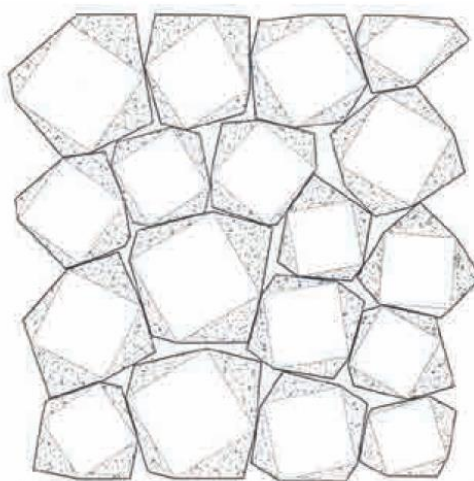
Daarom zijn de huidige proeven op grote schaal (schaal 1:2 ten opzichte van de werkelijkheid) uitgevoerd. De Deltagoot is bij uitstek geschikt om de stabiliteit van steenzettingen te beproeven, omdat hierin een dijk op bijna prototype-schaal kan worden ingebouwd en belast kan worden door grote golven. Door de grootte van deze golfgoot zijn er geen ongewenste schaaffecten te verwachten.

Het onderzoek is in november 2013 - februari 2014 uitgevoerd onder leiding van M. Klein Breteler en G. Wolters.

## 1.2 Steenzetting van Basalton (Holcim Coastal B.V.)

In dit eerste deel van het onderzoek is een steenzetting van Basalton 30 STS (van Holcim Coastal B.V.) bekeken. Basalton is een type steenzetting van beton die op een filterlaag wordt toegepast om dijken en oevers te verdedigen tegen golfaanval en stromingsbelasting. De vorm is gebaseerd op natuurlijke basalt zuilen.

Figuur 1.1 geeft een indruk van de vorm van de zetstenen en het uiterlijk op een dijk.



Figuur 1.1 Basalton 30 STS

## 1.3 Opzet van het rapport

Dit rapport beschrijft in hoofdstuk 2 de faciliteit en het schalingsproces, in hoofdstuk 3 de modelopstelling in de Deltagoot en in hoofdstuk 4 de metingen en proefobservaties. In hoofdstuk 5 worden de resultaten geanalyseerd, waarna in hoofdstuk 6 de conclusies zijn gegeven.

De appendices bevatten:

- Appendix A: Meetresultaten in tabelvorm, gemeten uitspoeling van inwassing en ingemeten posities van specifieke zuilen
- Appendix B: Zeefkrommes van de ingebouwde materialen (zand, filter, inwas)
- Appendix C: Lasermetingen van het taludoppervlak en dwarsprofielen
- Appendix D: Golfhoogte overschrijdingskrommen en energiedichtheidspectra
- Appendix E: Foto's
- Appendix F: Invloed van de zuildiameter op het stijghoogteverschil over de zetstenen
- Appendix G: Procedure voor het bepalen van stabiliteitsfactor

## 2 Schaling

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

### 2.1 Faciliteit en Basalton 30 STS

Het modelonderzoek is uitgevoerd in een grootschalige onderzoeksfaciliteit, namelijk de Deltagoot van Deltares, waarin er op een grote schaal getest kan worden en ongewenste schaalearselen zoveel mogelijk worden voorkomen.

De Deltagoot in de Noordoostpolder is een 230 m lange, 5 m brede en 7 m diepe golfgoot. 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. Dit is voornamelijk tegen het ontstaan van laagfrequente stoorgolven.

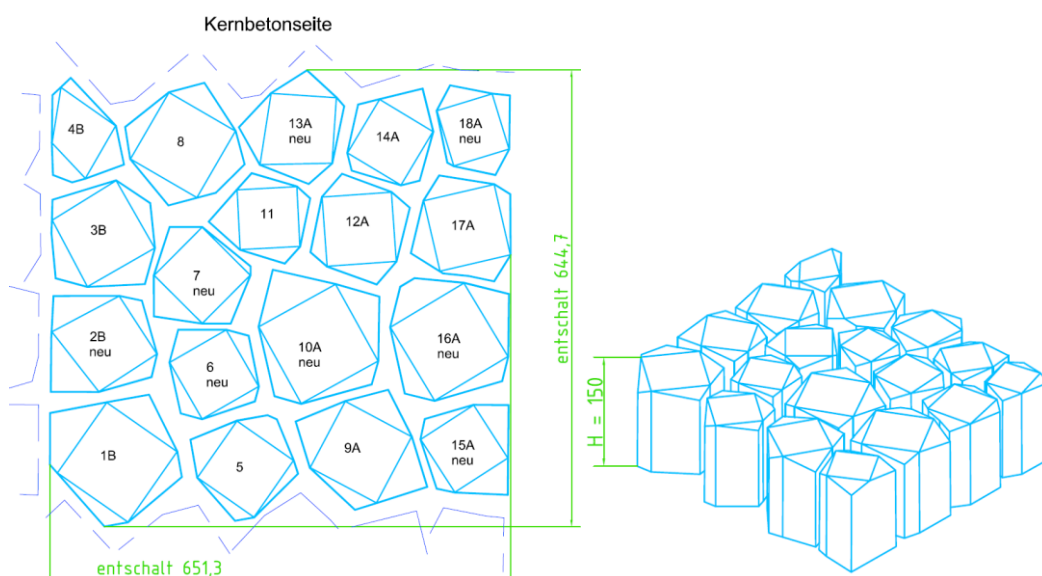


Figuur 2.1 Golfaanval op Basalton 30 STS in de Deltagoot

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken met een significante golfhoogte tot ongeveer  $H_s = 1,60$  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 ruim tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal 1:2.

De steenzetting op ware grootte, die als uitgangspunt is genomen voor dit onderzoek, bestaat uit Basalton 30 STS met zuilhoogte van 30 cm. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal 1:2 gemaakt door Holcim Coastal bv. Daarbij zijn alle maten (hoogte, lengte en breedte) een factor 2 kleiner gekozen dan in werkelijkheid. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, zie Figuur 2.2.



Figuur 2.2 Basalton 30 STS op schaal 1:2

De soortelijke massa van de zuilen is in het schaalmodel gelijk aan die op ware grootte (schaal 1:1).

De resultaten van dit onderzoek kunnen door middel van Steentoets gebruikt worden voor een breed scala aan bekledingsgeometrieën met Basalton 30 STS.

Alle maten die vermeld worden in dit rapport zijn op de modelschaal, dus zoals ze in de Deltagoot waren.

## 2.2 Schaling

### 2.2.1 Algemeen

Naarmate de modelopstelling kleiner is ten opzichte van de werkelijkheid, zal het moeilijker zijn om de resultaten te vertalen naar de werkelijkheid, omdat er strijdige schaalregels zijn voor de golven en de stroming in het filter. Ook is het erg moeilijk om de interactie tussen de stenen goed weer te geven in een kleinschalige opstelling. Vanaf een schaal van ongeveer 3 is dat met de huidige stand van de kennis niet meer voldoende nauwkeurig te vertalen, en bij een schaal van bijvoorbeeld 10 is dit vooralsnog onmogelijk. Daarom wordt dit experimenteel onderzoek uitgevoerd op een schaal van 1:2.

Een schaal van 1:2 betekent dat de afmetingen van de zetstenen half zo groot moeten zijn. Dit geldt zowel voor de verticale als horizontale afmetingen van de zetstenen (hoogte, breedte en lengte), met behoud van vorm, zie figuur 2.2. In vergelijking met de proeven van 2010 (Wolters & Klein Breteler, 2011) zijn hier de breedte en lengte van de Basalton 30 STS zuilen dus wel geschaald in het model.

In een schaalmodel met schaal 2 zijn ook de golven half zo groot (golfhoogte en golflengte), maar is de taludhelling gelijk aan die in werkelijkheid.

Het schaalmodel is weergegeven in Figuur 3.1.

## 2.2.2 Schaalregels

Bij het schalen van steenzettingen zijn er conflicterende schaalregels in acht te nemen vanwege het belang van de stroming in de constructie (onder de toplaag) en de golven op het talud.

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

$$Fr^2 = \frac{u^2}{gL} \quad (1)$$

In deze formule staan  $u$  voor de snelheid (m/s),  $g$  voor de zwaartekrachtsversnelling ( $m/s^2$ ) en  $L$  voor de lengte (m).

Uit de bovenstaande schaalregel zijn dan de volgende belangrijke verbanden te leggen (voor een lengteschaal  $n_L = L_{prototype} / L_{model} = 2$ ):

- Proefduur, golfperiode (tijdschaal):  $n_t = \sqrt{n_L}$ , in dit geval dus  $\sqrt{2} \approx 1,41$ ;
- Golfhoogte:  $n_H = n_L$ , golfhoogte heeft een lengte-eenheid, dus de schaal is 2.
- Snelheid, zoals voortplantingssnelheid van de golven en watersnelheid:  $n_u = \sqrt{n_L}$ , in dit geval dus  $\sqrt{2} \approx 1,41$

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

Voor parameters die gebaseerd zijn op verhoudingen geldt een schaal van 1:1. Voorbeelden hiervan zijn de taludhelling  $\tan\alpha$  en de relatieve soortelijke massa van de zetstenen:  $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ , met  $\rho_s$  = soortelijke massa van de zetstenen ( $kg/m^3$ ) en  $\rho$  = soortelijke massa van water ( $kg/m^3$ ).

De dikte van de toplaag is bepaald met de belastingsparameter (en afhankelijk van de maximale golfcondities in de goot), welke gedefinieerd is als  $H_s/(\Delta D)$ . Hierin is  $H_s$  de significante golfhoogte,  $\Delta$  de relatieve soortelijke massa van de Basalton ten opzichte van het water en  $D$  de dikte van de Basalton toplaag. De parameter  $\Delta$  is een dimensieloze verhouding (dus op schaal 1:1),  $H_s$  en  $D$  worden beiden uitgedrukt in lengte-eenheden waardoor deze belastingsparameter dimensieloos wordt. De belastingsparameter is in werkelijkheid gelijk aan de belastingsparameter in het model (schaal 1:1).

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

$$Re = \frac{Lu}{\nu} \quad (2)$$

Met:

$Re$	= Reynoldsgetal	(-)
$L$	= lengte	(m)
$u$	= snelheid of doorlatendheid	(m/s)
$\nu$	= kinematisch viscositeit (ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$ )	( $m^2/s$ )

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

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

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \quad (3)$$

Met hierin:

$\Lambda$	= 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:  $n_{\Lambda} = 2$ . Met het rekenmodel Steentoets is de leklengte op ware grootte en in het model berekend. Voor deze berekeningen is gebruikgemaakt van Steentoets2014 versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014a).

Uit de berekeningen is, uitgaand van de gehanteerde schaal van 1:2, gebleken dat in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte  $b$  van ongeveer 0,10 m en korrelgrootte  $D_{f15} = 14$  mm goed overeenkomt met onder andere een filterlaagdikte van  $b = 0,18$  m en korrelgrootte van  $D_{f15} = 20$  mm in de werkelijkheid. Bij  $b = 0,07$  m en  $D_{f15} = 11$  mm hoort een filter in werkelijkheid met  $b = 0,12$  m en  $D_{f15} = 20$  mm.

In Tabel 2.1 is ter illustratie voor de situatie op ware grootte en in het schaalmodel weergegeven welke combinatie van parameters resulteren in een vergelijkbare leklengte, uitgaande van verschaling van de leklengte met de lengteschaal  $n_L = 2$ . Opgemerkt wordt dat een iets andere combinatie van parameters kan resulteren in dezelfde leklengte.



Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde op ware grootte	Waarde op schaal (indicatief)
dikte van de top laag	D	(m)	0,30	0,15
open oppervlak	$\Omega$	(%)	10	10
filterlaagdikte	B	(m)	0,12	0,07
korrelgrootte filter	$D_{f15}$	(mm)	20	11
korrelgrootte inwasmateriaal	$D_{i15}$	(mm)	15	8
toplaagdoorlatendheid	$k'$	(mm/s)	63	48
leklengte	$\Lambda$	(m)	0,32	0,16

Tabel 2.1 Parameters van de steenzetting met de waarden op ware grootte en overeenkomstige waarden op schaal (indicatief).

Omdat in de werkelijkheid diverse soorten filtermateriaal en diverse filterlaagdiktes worden toegepast, kunnen in het schaalmodel binnen bepaalde grenzen ook andere waarden gebruikt worden. Uiteindelijk wordt de stabiliteitsfactor bepaald op basis van Steentoetsberekeningen die uitgevoerd worden met exact dezelfde waarden als toegepast is in het schaalmodel. Daardoor heeft de keuze van het filtermateriaal binnen ruime grenzen een verwaarloosbare invloed op de resulterende stabiliteitsfactor.

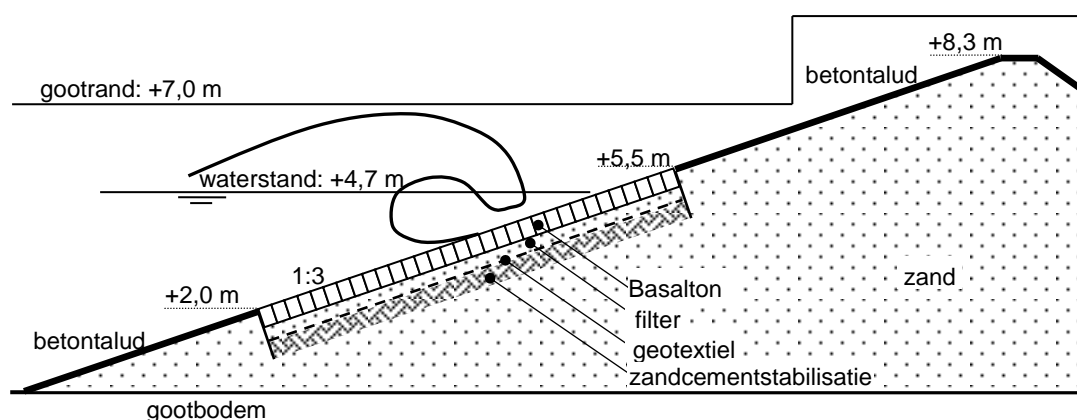
In overleg met Rijkswaterstaat is besloten de eerste proefserie met  $D_{15,f} = 14$  mm en een laagdikte van  $b = 0,1$  m uit te voeren.



### 3 Modelopstelling en proevenprogramma

#### 3.1 Algemeen

De dwarsdoorsnede van de modelopstelling (met schaal 1:2) in de Deltagoot is gegeven in Figuur 3.1. Alle afmetingen zijn hierbij gehalveerd ten opzichte van de werkelijkheid op echte dijken, zie hoofdstuk 2. Alle maten die vermeld worden in dit rapport zijn op de modelschaal, dus zoals ze in de Deltagoot waren.



Figuur 3.1 Schematische doorsnede van de beproefde steenzetting

De opstelling bestaat uit een dijklichaam van zand waarop de kleilaag gesimuleerd is met een laag zandcementstabilisatie. Bovenop deze stabilisatielaag is geotextiel toegepast tegen het uitspoelen van zand. Op het geotextiel is een filterlaag aangebracht met een dikte van 0,095 m in Serie 1, 0,069 m in Serie 2 en 0,071 m in Serie 3. Het gebruikte filtermateriaal had een  $D_{f15} = 14\text{mm}$  in de eerste serie proeven,  $D_{f15} = 7\text{mm}$  in serie 2 en  $D_{f15} = 11\text{mm}$  in serie 3. Op de filterlaag is Basalton 30 STS aangebracht. Op deze Basalton wordt later in dit hoofdstuk nog teruggekomen. De zuilen zijn ingewassen met gebroken steenslag (hoekig), de sortering hiervan was  $D_{f15} = 5.5\text{mm}$  en  $D_{f90} = 15\text{mm}$  (Serie 2+3:  $D_{f15} = 8.5\text{mm}$  en  $D_{f90} = 20\text{mm}$ ).

In Serie 2 en 3 is zwaarder inwasmateriaal toegepast, nameleijk basaltsplit met soortelijke massa van  $2979\text{ kg/m}^3$ , in plaats van het Noors graniet, dat gebruikt is in Serie 1 ( $2681\text{ kg/m}^3$ ).

De proefopstelling had de volgende kenmerken:

- Hoogte van de dijk ten opzichte van de bodem van de goot: 8,3 m
- Taludhelling van 1:3,0
- Een dummy bekleding (beton) van de gootbodem tot een hoogte van 2,0 m
- Een dummy bekleding (beton) vanaf 5,5 m boven de gootbodem tot de kruin van de dijk (8,3m boven de gootbodem)
- Basalton 30 STS van 2,0 m boven de gootbodem tot 5,5 m boven de gootbodem
- Basalton 30 STS met een hoogte van 15,0 cm:
  - Soortelijke massa: gemiddeld  $2293\text{ kg/m}^3$  (met  $\rho_{min} = 2265\text{ kg/m}^3$  en  $\rho_{max} = 2326\text{ kg/m}^3$ )
  - Open oppervlak: gemiddeld 9,7%

- Equivalente gatgrootte: 5-6cm (van twee standard sets zijn van alle gaten de oppervlakken opgeteld en gedeeld door het aantal gaten; dit oppervlak is dan vertaald in een equivalente gatgrootte).
- Inwasmateriaal:
  - sortering:  $D_{i15}=5.5\text{mm}$  en  $D_{i90}=15\text{ mm}$  (Serie 1) en  $D_{i15}=8.5\text{mm}$  en  $D_{i90}=20\text{mm}$  (Serie 2 en 3), zie Appendix B.
  - soortelijke massa: noorse graniet met  $\rho=2681\text{ kg/m}^3$  (Serie 1), basaltsplit met  $\rho=2979\text{ kg/m}^3$  (Serie 2 en 3)
- Filterlaag (steenslag):
  - dikte: 9,5 cm in Serie 1, 6,9 cm in Serie 2 en 7,1 cm in Serie 3
  - soortelijke massa van de korrels: gemiddeld  $2681\text{ kg/m}^3$
  - sortering:  $D_{f15}=14\text{mm}$  en  $D_{f90}=35\text{mm}$  (Serie 1),  $D_{f15}=7\text{mm}$  en  $D_{f90}=31\text{mm}$  (Serie 2),  $D_{f15}=11\text{mm}$  en  $D_{f90}=35\text{mm}$  (Serie 3), zie Appendix B.
- De stabiliteitsproeven zijn uitgevoerd bij een waterstand van 4,7 m boven de gootbodem.

Om deze 8,3 m hoge dijk in de Deltagoot te kunnen bouwen, is plaatselijk bij de kruin van de dijk de gootwand wat opgehoogd. Het dijklichaam was tevens voorzien van drainage zodat eventuele snelle waterstandswisselingen in de goot niet zouden leiden tot het opbarsten van de dichte betonnen teen.

Het niveau van het talud van de testsectie kan worden uitgedrukt als functie van de horizontale locatie. De lijn over het talud in de testsectie heeft de volgende functie:

$$z = \frac{x - 174,855}{2,996} \quad (4)$$

Met:

- z = verticale afstand tot de gootbodem (m)
- x = horizontale afstand tot het golfschot (m)

De zuilhoogte is tijdens het plaatsen geregeld gecontroleerd en bleek binnen enkele mm nauwkeurig te zijn.

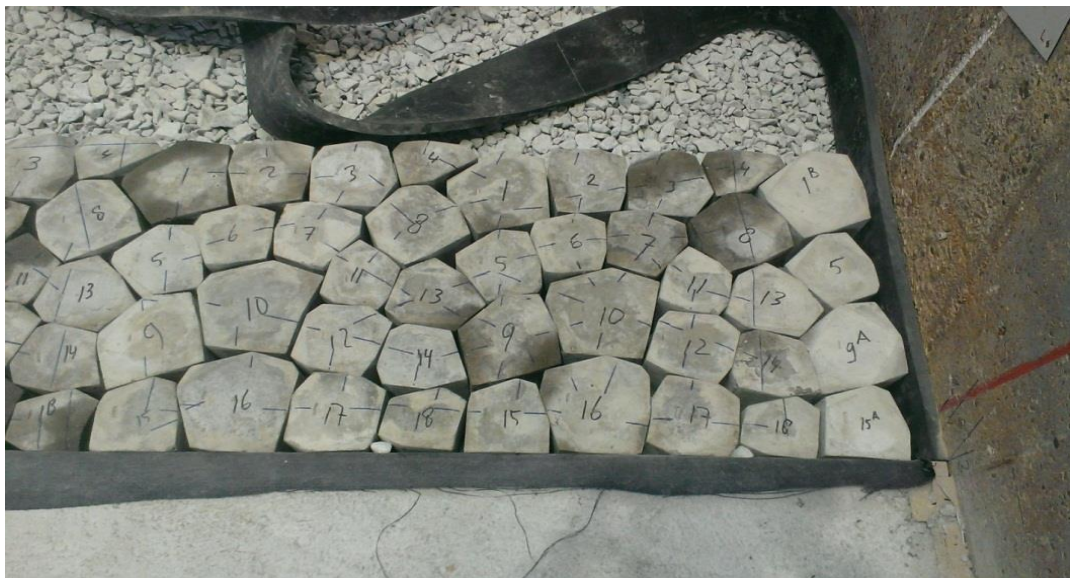
### 3.2 Plaatsing Basalton 30 STS

Het plaatsen van de Basalton 30 STS in de Deltagoot is gezamenlijk door medewerkers van Deltares en Holcim Coastal BV uitgevoerd.

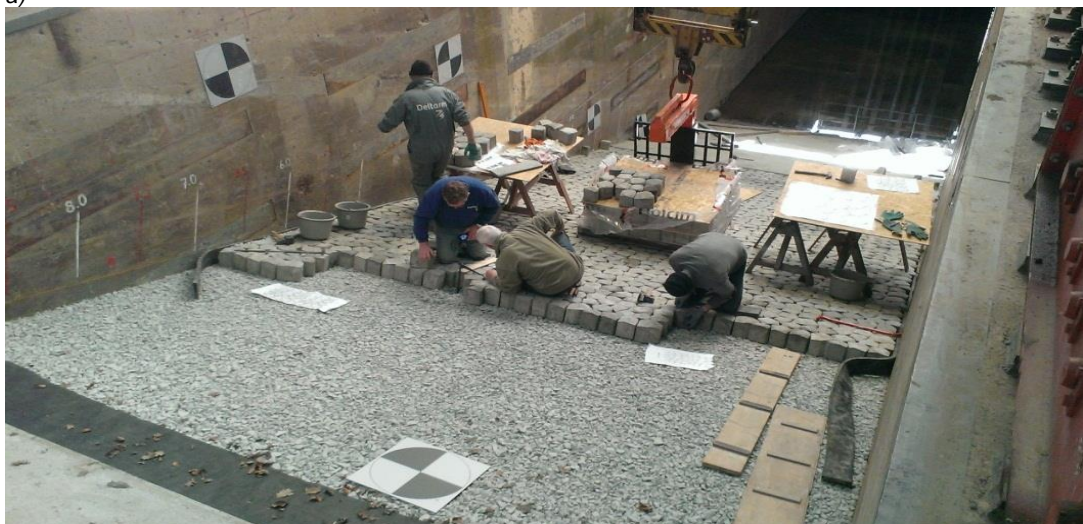
De Basalton 30 STS zuilen zijn in hetzelfde patroon in de Deltagoot geplaatst zoals ze ook op een werkelijke dijk machinaal worden geplaatst met bochtensets. Op de foto's van Figuur 3.2 is de typische geometrie op een dijk te zien.



Figuur 3.2 Plaatsing van Basalton in het veld



a)



b)

Figuur 3.3 Plaatsing van Basalton 30 STS in de Deltagoot (2014)

Om dit te bereiken is een tekening van het grondvlak van de zuilen in de juiste configuratie afgedrukt op ware grootte. Steeds zijn de zuilen van een set van de pallet gepakt en precies op de juiste wijze op de tekening gezet. Vervolgens zijn er streepjes en nummers op de zuilen gezet, zodat de zuilen precies op deze wijze ook op het talud in de Deltagoot konden worden gezet. Zo is set voor set het hele talud opgebouwd.

Tijdens het inbouwen van de Basalton 30 STS is op 6-10 locaties, verspreid over het oppervlak van het talud, de dikte van de filterlaag gecontroleerd. Daarvoor is de totale afstand tussen het geotextiel en het oppervlak van de Basalton gemeten (som van toplaagdikte en filterlaagdikte). De dikte van de filterlaag was mooi constant, met slechts enkele mm verschil over de lengte van het talud, zie Appendix A. De gemiddelde filterdiktes en zuilhoogtes zijn gegeven in Tabel 3.1.

De bekleding is ingewassen met steenslag met zeefkrommen zoals weergegeven in Appendix B.

Om een goede klemming tussen de zuilen te realiseren is er na het aanbrengen van het inwasmateriaal met een trilplaat over de steenzetting heen gegaan. De ontstane ruimte (door het zetten/zakken van het inwasmateriaal) is weer opgevuld met nieuw inwasmateriaal. Deze bijzondere wijze van werken, die afwijkt van de werkwijze in de praktijk, is uitgevoerd omdat de steenzetting volledig nieuw is en in de Deltagoot gelijk zwaar belast wordt door golven. In werkelijkheid ligt het inwasmateriaal na een paar jaar veel vaster en daarom hebben we extra ons best gedaan om een situatie te creëren zoals op een echte dijk na enkele jaren. Daar zal het inwasmateriaal in de loop der tijd door temperatuurvariaties en weer & wind steeds vaster in de bekleding komen te zitten. We hebben dit proces in onderling overleg gesimuleerd door met een trilplaat over de bekleding te gaan om alles goed vast te trillen en een ingolfproef uit te voeren met kleine golven. De intentie was dus een situatie creëren zoals over een paar jaar op een echte dijk, en niet om een recept vast te leggen zoals in werkelijkheid het inwasmateriaal aangebracht moet worden.

	<b>Serie 1</b>	<b>Serie 2</b>	<b>Serie 3</b>
Filterdikte (gemiddeld)	9,5 cm	6,9 cm	7,1 cm
zuilhoogte (gemiddeld)	15,0 cm	15,0 cm	15,0 cm

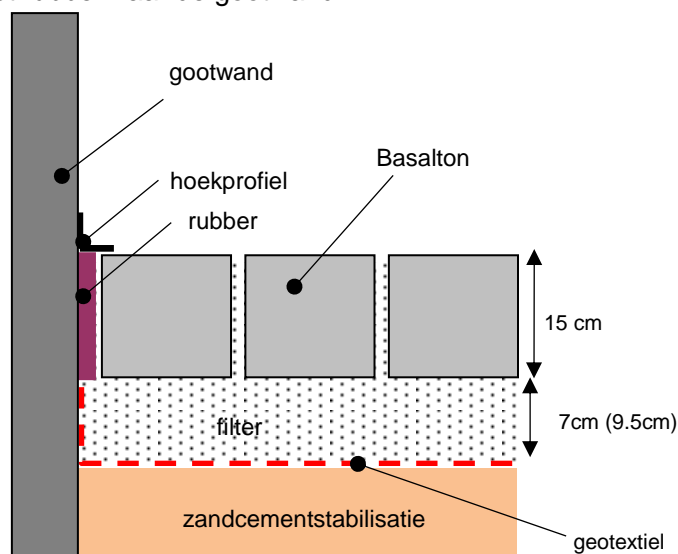
Tabel 3.1 Gemiddelde (gemeten) filterdiktes en zuilhoogtes

Bij het inbouwen van de zuilen is opgemerkt dat de maatafwijkingen tussen de zuilen (met name over de hoogte, maar ook in breedte en lengte) in het algemeen 1-3 mm zijn. Verder vertoonden de zuilen soms concave, soms convexe zijanten, wat ervoor zorgde dat de onderlinge afstanden en het plaatsingspatroon voor verschillende pallets altijd iets van elkaar afweken.

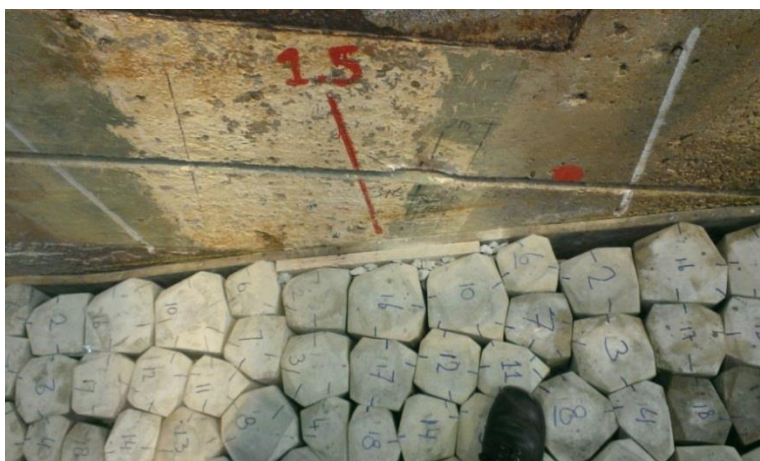
Tevens is het open oppervlak bepaald voor verschillende patrooneenheden en gemiddeld, waarbij de patrooneenheid het samenstel is van zetstenen dat als geheel repeterend in de steenzetting wordt gelegd (ook wel set of pakket genoemd). Het gemeten open oppervlak was tussen 9,5% en 9,8% (gemiddeld 9,7%). Het open oppervlak is wat kleiner geworden dan gebruikelijk is op een dijk in de werkelijkheid omdat de zetstenen erg nauwkeurig zijn geplaatst. Dit kleine open oppervlak heeft

uiteindelijk geen invloed op de stabiliteitsfactor, omdat ook de Steentoetsberekeningen zijn uitgevoerd met dit kleine open oppervlak.

Tussen de gootwand en de bekleding is een strook celrubber aangebracht, zie Figuur 3.4, 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 verkregen wordt. Tijdens de proeven mag zich wel een kleine normaalkracht ontwikkelen, die dan beperkt blijft qua grootte vanwege het rubber. Tevens was langs de gootwand een hoekstaal aangebracht die ervoor zorgde dat er geen randeffecten op zouden treden als gevolg van de overgang van de zuilen naar het rubber en van het rubber naar de gootwand.



Figuur 3.4 Aansluiting gootwand met steenzetting



Figuur 3.5 Afwerken van zijkanten

Bij het plaatsen van de zuilen is vanuit de rechter kant (meetcabinezijde) naar de halzijde toegewerkt. Omdat de zuilen niet altijd goed aansloten bij de wand is er soms nog een houten plaat tussen rubber en zuil geplaatst, zie Figuur 3.5 (links). De resterende holtes zijn opgevuld met steenslag.

Elke vierde zuilenrij is met een streep en letter gemarkeerd. Dit vergemakkelijkt het identificeren van de locatie waar schade optreedt. De locatie van de strepen zijn aangegeven in Tabel A.2 (Appendix A).



Figuur 3.6 Uiteindelijke ligging van Basalton 30 STS zuilen in de Deltagoot

### 3.3 Metingen

Tijdens de proeven zijn golfhoogtemetingen en golfoploopmetingen uitgevoerd en na elke proef is de schade bepaald, zijn profielmetingen gedaan en is de uitspoeling van het inwasmateriaal vastgesteld. De resultaten zijn terug te vinden in bijlage A (tabellen van golfkarakteristieken tijdens de proeven) en bijlage C-D (overschrijdingskrommen, golfspectra en (verschil-) profielen van het talud). In de volgende alinea's is de methodiek van de metingen verder uitgelegd.

#### 3.3.1 Golfhoogtemetingen

De golfhoogten zijn gemeten met drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit twee parallel aan elkaar, verticaal gespannen draden, waarvan de onderlinge elektrische weerstand verandert met de oppervlakte-uitwijking van het water. De golfhoogtemeters (GHM) 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 bepaald worden 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 bereikt zijn. De calibratie van de GHMs is gecontroleerd door middel van verplaatsbare golfhoogtemeters van het type “oppervlaktevolver”.

De golfcondities zijn gerapporteerd in bijlage A en in paragraaf 3.4. Tevens zijn de overschrijdingskrommen van golfhoogte en de energiedichtheidspectra van de inkomende golven gegeven in bijlage C.

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 dan bepaald middels het (met de gemeten reflectiecoëfficiënt  $C_r$ ) gecorrigeerde tijdsignaal van golfhoogtemeter GHM 1:

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1+C_r^2}}$$

Waarbij

$H_i$  = inkomende golfhoogte (m)

$H_t$  = totale golfhoogte (m)

$C_r$  = reflectiecoëfficiënt (-)

Voor de golfhoogtemeters is een bemonsteringsfrequentie van 30 Hz gebruikt.

### 3.3.2 Oplopmetingen

Tijdens de proeven zijn ook visuele oplopmetingen uitgevoerd. Deze oplopmetingen worden als referentieproeven voor andere steenzettingen uit het onderzoeksprogramma gebruikt.

Voor de oplopmetingen zijn lijnen op het talud geschilderd (met afstand van ca. 60cm, d.w.z. elke 4<sup>e</sup> rij zuilen in een set). Voor de locaties van deze lijnen wordt verwezen naar Appendix A. Tijdens de proeven is de hoogst overschreden lijn van elke oploop geteld. Dit is gedaan gedurende 30 minuten van elke proef (behalve de ingolfproef P01).

De analyse van deze metingen wordt in een apart rapport vastgelegd.

### 3.3.3 Profielmetingen

Het niveau van het taludoppervlak is gemeten en geanalyseerd met de *FARO Focus<sup>3D</sup> Multi Sensor Laser Scanner* en de *SCENE 5.0* software, zie Figuur 3.7.

Het taludoppervlak kon tijdens het golven niet gemeten worden, en daarom is er geregeld gestopt met golven (zie proevenprogramma). De waterstand is dan verlaagd en het profiel gefotografeerd en ingemeten met de laserscanner.



Figuur 3.7 Profielmeting met laser

Controlemetingen (referentietalud en talud na schade) zijn uitgevoerd met de standaard profielvolger van de Deltagoot (zie Figuur 3.8). Deze metingen waren slechts bedoeld voor het geval dat de lasermeting mislukt is.

De profielvolger bestaat uit een wieltje dat over het taludoppervlak rijdt en constant het niveau van het talud als functie van de locatie meet (zowel de horizontale als de verticale coördinaat van elk punt op het talud). Deze meting is standaard over drie raaien gedaan.



Figuur 3.8 De profielvolger vlak voor een meting.

De scanmetingen zijn per proef gerapporteerd in bijlage C. Het verschilprofiel geeft de verandering van het niveau van het talud ten opzichte van het begin van de proevenserie (resulterende beweging van taludoppervlak). Verder is het talud tijdens de proeven constant visueel in de gaten gehouden en gefilmd met een digitale camcorder.

### 3.3.4 Hoogteverschillen van taludoppervlak en uitspoeling

Na elke proef is bepaald of er zuilen uit de steenzetting zijn getild en is de grootte van de vervorming van het taludoppervlak gemeten. Verder is de uitspoeling van inwas- en filtermateriaal uit de spleten gedocumenteerd, zie hoofdstuk 4 en Appendix A.

### 3.3.5 Wrijvingscoëfficiënt

De zuilen zijn vervaardigd van een betonsoort die wat afwijkt van de beton in de zuilen voor werkelijke dijken. Voor het schaalmodel is gebruikgemaakt van gietbeton, terwijl in werkelijkheid aardvochtige beton wordt gebruikt. Daarom is gecontroleerd of de wrijvingscoëfficiënt van de beton afwijkt.

Test	Wrijvingshoek $\phi$ [°]	Wrijvingscoëfficiënt f [-]
1	32.95	0.65
2	33.64	0.67
3	32.80	0.64
4	34.19	0.68
5	32.61	0.64
6	33.39	0.66
7	31.83	0.62
8	32.65	0.64
9	30.72	0.59
10	29.48	0.57
11	30.00	0.58
Gemiddeld	32.20	0.63

Tabel 3.2 Wrijvingscoëfficiënten

De proeven zijn uitgevoerd door een zuil op een plank vast te maken en een andere zuil erop te leggen met een extra gewicht van 16 of 23 kg (met de zijanten van de zuilen tegen elkaar). Vervolgens is de plank zo schuin gehouden totdat de bovenste zuil van de onderste afschoof. De hoek van de plank is genoteerd. De tangens van deze hoek is de wrijvingscoëfficiënt.

Alle proeven zijn uitgevoerd met natte zuilen. De resultaten zijn te zien in Tabel 3.2. Deze wrijvingscoëfficiënt is ongeveer hetzelfde als de Basalton op ware grootte (zie bv. Wolters 2009).

Het oppervlak van de thans gebruikte zuilen had wel een andere textuur, dat vlakker en harder was dan de Basalton 30 STS op ware grootte. Hierdoor zou het inwasmateriaal wat makkelijker kunnen uitspoelen (Kaste en Desta 2014).

### 3.3.6 Soortelijke massa van de zuilen

Van 13 zuilen is de soortelijke massa bepaald door de zuilen onder water en boven water te wegen. De resultaten zijn in Tabel 3.3 vermeld. Het gemiddelde was 2293 kg/m<sup>3</sup> en de spreiding was  $\sigma = 15$  kg/m<sup>3</sup>.

nr	Gewicht boven water (kg)	Gewicht onder water (kg)	Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )
1	6,190	3,495	2297
2	6,650	3,751	2294
3	6,620	3,735	2295
4	8,170	4,585	2279
5	6,270	3,539	2296
6	3,509	1,975	2287
7	3,935	2,219	2292
8	5,208	2,950	2306
9	5,122	2,895	2300
10	4,959	2,798	2295
11	5,496	3,080	2275
12	3,487	1,948	2265
13	3,497	1,994	2326
gemiddeld			2293

Tabel 3.3 Gemeten soortelijke massa van de zuilen

## 3.4 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestond uit 3 testseries. De eerste 2 series bestaan uit korteduurproeven van maximaal ca. 1000 golven, waarbij de eerste is uitgevoerd met een golfsteilheid van 2% en de tweede met 4%. In een serie wordt de golfhoogte stap voor stap opgehoogd totdat de bekleding bezwaken is, of de maximale capaciteit van de Deltagoot was bereikt.

Naast de korteduurproeven in de eerste 2 series zijn er langeduurproeven uitgevoerd in de derde serie. Deze proeven geven inzicht in de langeduursterkte van de bekleding.

Tijdens de proeven is steeds een waterstand aangehouden van 4,70 m boven de gootbodem (behalve voor de ingolfproeven). Na elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al schade is ontstaan. Hierbij is gewerkt met bepaalde categorieën van de schade aan de steenzetting (zie paragraaf 4.1).

Tussen de verschillende testseries is de bekleding weer hersteld. Na elke proef van 1000 golven tijdens serie 1 en 2 is het uitgespoelde inwasmateriaal weer aangevuld, zodat de afzonderlijke proeven als onafhankelijk van elkaar kunnen worden beschouwd. Ook zijn de eventueel verplaatste zetstenen terug in het verband gedrukt. Vervormingen van het taludoppervlak (S-profiel) en vervormingen die geen invloed hebben op de stabiliteit van de steenzetting zijn niet hersteld. Tijdens serie 3 is de bekleding niet hersteld (langeduurproef). Deze serie is uitgevoerd in delen om tussentijds het talud te kunnen inspecteren.

De proeven zijn uitgevoerd met onregelmatige golven. De golfcondities van de proeven worden gekarakteriseerd door de significante golfhoogte ( $H_s$ ), de spectrale golfperiode ( $T_{m-1,0}$ ) en de piekperiode ( $T_p$ ). De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz spectrum. Dit spectrum is karakteristiek voor de golfcondities langs de Nederlandse kust.

In Tabel 3.4 en bijlage A zijn de gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) weergegeven. De golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra zijn gepresenteerd in bijlage D.

SERIES	PROEF	PROEF CONDITIES				
		h [m]	N [-]	$N_N$ [-]	Duur [h]	Cum. Duur [h]
Series 1	P01	4.55	532	-	0.50	-
	P02	4.70	1217	1217	1.35	-
	P03	4.70	681	1898	0.83	-
Series 2	P04	4.55	647	-	0.50	-
	P05	4.70	634	-	0.50	-
	P06	4.70	1080	1080	1.00	-
	P07	4.70	627	1707	0.62	-
Series 3a	P08	4.70	629	-	0.50	-
	P09	4.70	1598	1598	1.36	1.36
	P10	4.70	1772	3370	1.54	2.90
	P11	4.70	735	4105	0.62	3.52
Series 3b	P12	4.70	2315	2315	2.00	2.00
	P13	4.70	1365	3680	1.20	3.20

a) Algemene proefcondities

SERIES	PROEF	GOLF PARAMETERS (INKOMEND)							$H_s/\Delta D$	F
		$H_{m0,i}$ [m]	$H_{m0,i,N}$ [m]	$T_{m-1,0,i}$ [s]	$T_{p,i}$ [s]	$T_{p,i,N}$ [s]	$\xi_{p,i}$ [-]	$\xi_{p,i,N}$ [-]		
Series 1	P01	0.62		3.80	4.45		2.36	-	3.18	5.64
	P02	0.89	0.89	4.78	5.29	5.29	2.33	-	4.59	8.07
	P03	1.12	0.98	5.28	6.00	5.62	2.36	-	5.77	10.24
Series 2	P04	0.67		3.04	3.08	-	1.57	-	3.43	4.64
	P05	0.71		3.16	3.61	-	1.79	-	3.66	5.39
	P06	0.98	0.98	3.83	4.01	4.01	1.68	-	5.07	7.18
	P07	1.18	1.06	4.13	4.28	4.13	1.64	-	6.09	8.48
Series 3a	P08	0.70		3.15	3.15	-	1.57	-	3.59	4.86
	P09	0.85	0.85	3.53	3.98	3.98	1.80	1.80	4.36	6.45
	P10	0.85	0.85	3.49	3.81	3.89	1.72	1.76	4.39	6.30
	P11	0.89	0.86	3.54	4.01	3.91	1.77	1.73	4.59	6.72
Series 3b	P12	0.87	0.87	3.52	3.77	3.77	1.68	1.68	4.51	6.37
	P13	0.90	0.88	3.55	3.80	3.78	1.67	1.66	4.66	6.55

b) Gerealiseerde golf parameters

Tabel 3.4 Proevenprogramma met gerealiseerde waarden

In deze tabellen zijn de volgende parameters gebruikt:

F = Stabiliteitsparameter  $(H_s/\Delta D) \cdot \xi_p^{2/3}$

h = Waterstand (m)

N = Aantal golven (-)

$N_N$  = Cumulatief aantal golven over beschouwde proeven (-)

$H_{m0,i,N}$  = Inkomende significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)

- $H_s/(\Delta D)$  = Belastingparameter (-)  
 $T_{m-1,0}$  = Spectrale golfperiode (s)  
 $T_{p,i,N}$  = Golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (inkomend) (s)  
 $\xi_{p,1,N}$  = Brekerparameter gemiddeld over de beschouwde proeven (-)  
 $\Delta$  =  $(\rho_s - \rho)/\rho$  = relatieve soortelijke massa van zetsteen op basis van de gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen (-)

Vanwege de duur van de proeven zijn een aantal proeven in proefserie 3 in verschillende delen uitgevoerd. De golfcondities van elke proefdeel zijn weergegeven in tabel A.1 in bijlage A. Het berekenen van de golfcondities van de samengestelde proefdelen is gedaan op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven):

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

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

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

Het proevenprogramma van de derde serie is uitgevoerd met golfcondities die tijdens de eerste twee series nog net geen schade hebben opgeleverd ( $H_s = 0.9m$ ). De serie proeven is gestopt zodra er schade is ontstaan of de genoemde duur is bereikt. De genoemde waarden in Tabel 3.4 zijn op schaal 2 in de Deltagoot. De overeenkomstige belastingduur van Serie 3a is in werkelijkheid  $\sqrt{2}$  langer, dus in totaal  $3,52 \cdot \sqrt{2} = 4,98$  uur.

## 4 Schadebeschrijvingen en observaties

### 4.1 Algemeen

De procedure die bij elke proef gevolgd is, was steeds dezelfde. Na een proef werd eerst het water weggepompt. Vervolgens is er op het droge talud een visuele inspectie gedaan van de toestand van de bekleding en is de mate van uitspoeling van inwasmateriaal en filtermateriaal vastgesteld. Na de inspectie werd het talud gescand met de laser ten behoeve van het vaststellen van vervormingen in het oppervlak. Bij de korteduurproeven zijn de voegen tussen de stenen opnieuw ingewassen met inwasmateriaal. Bij de langeduurproeven is er tussen de proeven niet opnieuw ingewassen.



*Figuur 4.1 Beproeven van Basalton 30 STS zuilen in de Deltagoot (Tijdens Proef 07)*

In de volgende paragrafen zal eerst het algemene beeld van de constructie tijdens de proeven besproken worden waarna elke proef afzonderlijk nog aan bod zal komen.



*Figuur 4.2 Tijdens de golfneerloop lijkt er water uit de bekleding te komen en was er sprake van uitspoeling van inwasmateriaal*

Tijdens de proeven is veel uitspoeling van het inwasmateriaal geconstateerd. Eenige uitspoeling is overigens een normaal verschijnsel bij steenzettingen. Tijdens de storm spoelt altijd veel inwasmateriaal uit, vooral de steentjes die los in de spleten zitten (met name in de grote gaten), zie bijvoorbeeld Figuur 4.3. De vastzittende steentjes langs de contactvlakken tussen de zuilen blijven in het algemeen wel zitten en dragen daardoor bij aan de klemming (interactie tussen de stenen) van de steenzetting. Zodra gemiddeld meer dan de helft van de spleethoogte is uitgespoeld, zal een beheerder doorgaans het inwasmateriaal in lopend onderhoud weer aanvullen.

In deze proeven is echter geconstateerd dat een groot deel van de steentjes langs de contactvlakken, die de klemming leveren, is uitgespoeld tijdens de verschillende meetseries (zie de volgende proefbeschrijvingen). Dit verschijnsel heeft de uiteindelijke sterkte van de steenzetting duidelijk verminderd, zie paragraaf 5.1. Het uitspoelen was erger dan de eerder beproefde Basalton steenzetting (Wolters & Klein Breteler, 2011). Wellicht is dit het gevolg van het toepassen van verschaalde zuilen, waardoor ook de spleten smaller zijn en er fijner inwasmateriaal moest worden toegepast. Verder is het open oppervlak wat kleiner, namelijk 9,7% in plaats van ca. 13%.

#### *Grotere uitspoeling meetcabinezijde*

Tijdens de proeven P01, P03, P05, P08 en P09 was iets meer uitspoeling van inwasmateriaal aan de meetcabinezijde geconstateerd dan aan de Halzijde. De reden hiervoor is onduidelijk, vooral omdat deze observatie niet consistent was met de andere proeven binnen de meetseries.



Figuur 4.3 Uitspoelen van inwasmateriaal: er zijn duidelijk wolkjes van inwasmateriaal te zien die zich over de steenzetting heen bewegen



Aan het eind van Serie 1 (na Proef P03) is een licht verhoogde uitspoeling aan meetcabinezijde geconstateerd (verschil van ca. 1cm), na Serie 2 was dit niet het geval (gelijkmatige uitspoeling). Het sterkste effect is te zien tijdens Serie 3: Na Proef P09 is een sterke uitspoeling aan meetcabinezijde geconstateerd, maar niet aan de halzijde (dit is vervolgens als modeffect geclassificeerd, zie ook discussie na Proef P09).

In het volgende worden de proefresultaten per proef bediscussieerd. In paragraaf 3.4 en bijlage A zijn de gerealiseerde waarden te vinden van de golfcondities en de gemeten schade. Verder zijn hier de posities van alle zuilrijen weergegeven en ook alle metingen van de uitspoeling van inwas- en filtermateriaal. Voor een beeld van de uitspoeling op verschillende hoogtes van de steenzetting wordt hiernaar verwezen.

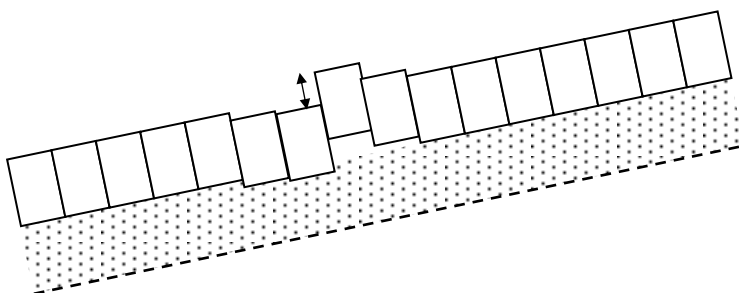
#### *Schadecategorieën*

De geconstateerde schade wordt als volgt ingedeeld in vier categorieën (a t/m d):

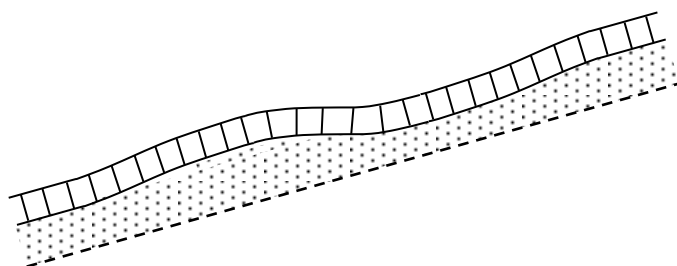
- a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag ( $0,1 \cdot D$ , met  $D$  = toplaagdikte) (zie zie Figuur 4.4), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 4.5) is kleiner dan 20% van de toplaagdikte. 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 4.4 verplaatsing van zetsteen ten opzichte van naastliggende zetsteen



Figuur 4.5 Vervorming tot S-profiel

## 4.2 Serie 1, korteduurproeven, $s_{op}=0,02$ (Proeven P01 – P03)

### Proef P01 (ingolfproef)

Tijdens deze proef is geen schade opgetreden (categorie a, zakking minder dan 1cm). Hoogteverschillen tussen de zuilen waren ook nauwelijks te zien. In de golfoploop en golfneerloopzone heeft beperkte uitspoeling van het inwasmateriaal plaatsgevonden (~3-4 cm). In de golfklapzone (bij  $z = 3.7 - 4.2\text{m}$ ) is sterke uitspoeling geconstateerd (tot 18-19 cm diep, dus ook 3-4 cm uitspoeling van het filtermateriaal), vooral de taludhelft aan de meetcabinezijde. Bij de taludhelft aan de halzijde was de uitspoeling grotendeels beperkt tot 3-4cm. Onder  $z = 3.5\text{ m}$  (streep 9) is geen uitspoeling vastgesteld. Een klein deel van het uitgespoelde materiaal kwam op de teen van de steenzetting terecht, zie de foto's in bijlage E. De rest lag op de bodem van de goot.

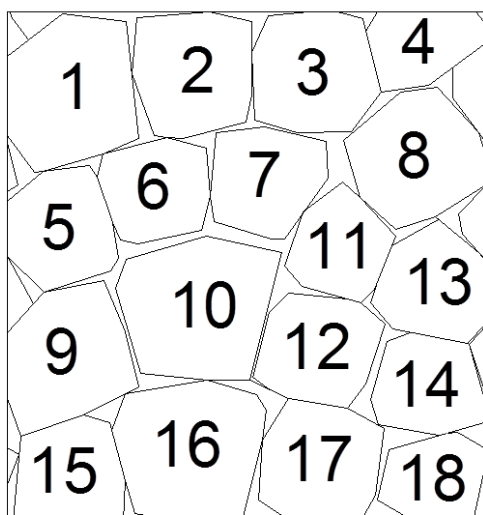
Na Proef 1 (en in de volgende proeven) is naast het gewone inwasmateriaal ook nog met grover materiaal ingewassen om bij de grotere gaten in de steenzetting de klemming te verbeteren. Er zijn korrels gebruikt uit de fractie 22 – 40 mm.

### Proef P02

Na Proef P02 is een beginnende kattenrug (schade categorie a, maximale hoogteverschil ca. 2cm) tussen  $z = 3.45\text{m}$  en  $z = 3.85\text{m}$  geconstateerd (grotendeels aan de meetcabinezijde). Hoogteverschillen tussen de zuilen waren overal  $< 1\text{cm}$  (schade categorie a). Ook een lichte zakking van de steenzetting boven de kattenrug is vastgesteld van  $< 1\text{cm}$ .

In tegenstelling tot Proef P01 was de uitspoeling gelijkmatiger over hele gootbreedte verdeeld. De maximaal gemeten uitspoeling was 17.5 – 18cm, zodat ook 2.5 – 3.5 cm filter was uitgespoeld. Over een groot deel van het talud (tussen  $z = 3.4 - 5.3\text{m}$ , hal- en meetcabinezijde) waren zuilen te zien waar het inwasmateriaal volledig was verdwenen (zie volgende paragraaf Figuur 4.6). De ergste uitspoeling (grootste diepte over

grootste oppervlak) is weer geconstateerd in de golfklapzone (bij  $z = 3.7 - 4.2\text{m}$ ). Onder  $z=3.5\text{m}$  (streep 9) is geen uitspoeling vastgesteld. Na de proef was geen inwasmateriaal op het talud geconstateerd, alles lag op de bodem van de goot. Voor de verdeling van de uitspoeling langs het talud wordt verwezen naar Appendix A.



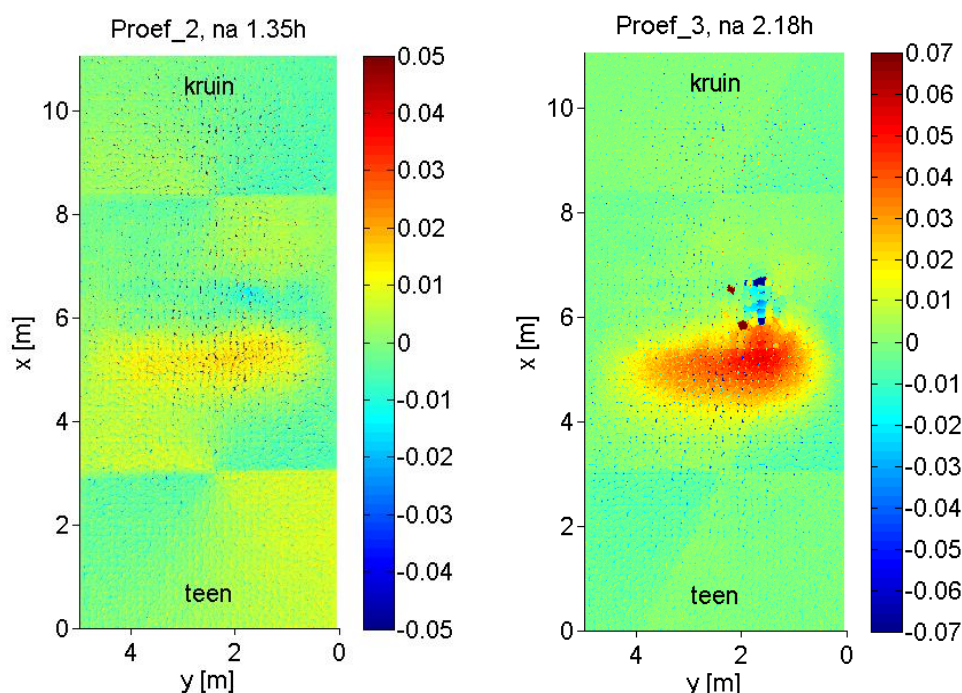
Figuur 4.6 Zuilnummers per set zoals geplaatst in de Deltagoot

Bij de volgende zuilen is doorgaans de grootste uitspoeling vastgesteld: zuilen met nummer 1, 8, 10, 15, 16 en 18, waarbij bij de naast elkaar liggende zuilen 8 en 1 meestal de uitspoeling het grootst was, zie Figuur 4.6. Dat geldt ook voor alle volgende proeven. Rond de zuilen 1 en 8 zijn spleten van 1-4cm breedte gemeten (gemiddeld 2-3cm). Spleten van 2-3cm zijn ook naast zuilen 10, 15, 16 en 18 gevonden. Ook deze zuilen zaten naast elkaar.

#### Proef P03

Na 50 minuten van Proef P03 is de eerste zuil door de golven uit de steenzetting geslagen (schade categorie d) en is de proef gestopt. Na het laten zakken van het water is vastgesteld dat drie zuilen eruit waren (bij  $z = 4.0\text{m}$  en  $z=3.8\text{m}$ ,  $y=1.6\text{m}$ ), zie foto's in Appendix E. Er was een duidelijke kattenrug (bult) in de steenzetting ontstaan tussen  $z=3.2\text{m}$  en  $z=4.1\text{m}$  (grotendeels in de taludhelft aan de meetcabinezijde) met een maximale hoogteverschil van ca. 7cm ( $S=0.035\text{m}$ ). Bij de bult zijn door het uitgespoelde filtermateriaal ook duidelijke hoogteverschillen tussen de zuilen geconstateerd van 1 - 4 cm. Een uitgebreide zakking van de steenzetting boven de kattenrug is niet geconstateerd, maar er was wel een lokale zakking van 2-3cm tussen  $z=3.85\text{m}$  en  $4.1\text{m}$  over een breedte van 1m direct boven het grootste schadegebied ( $y=1-2\text{m}$ , zie bijvoorbeeld Figuur 4.7).

De schade is echter niet ontstaan door de vorming van de kattenrug (en vervolgens het opbarsten van deze), maar door het uittillen van enkele (losse) zuilen. Dit was het gevolg van grote verschildrukken.



Figuur 4.7 Vervorming na Proef P02 en Proef P03 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 1) ( $x$ = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant;  $y$ =lengte vanaf de gootwand aan de meetcabinezijde; legenda in [cm])

De maximaal gemeten uitspoeling was 18cm (3cm in het filter). Over een groot deel van het talud (tussen  $z = 3.4 - 5.3$ m) waren zuilen te zien waar het inwasmateriaal volledig was verdwenen (zie beschrijving bij Proef 2), zowel in de taludhelft aan de hal- als de meetcabinezijde. De uitspoeling was vooral geconstateerd in de golfklapzone (bij  $z = 3.5 - 4.1$ m), waar bijna over de hele lengte aan de meetcabinezijde het inwasmateriaal volledig verdwenen was. Ook aan de halzijde was het inwasmateriaal grotendeels verdwenen (uitspoeling gemiddeld tot ongeveer 15cm diepte), maar het filter was alleen bij enkele zuilen aangetast.

Na de proef was geen inwasmateriaal op het talud geconstateerd, alles lag op de bodem van de goot.

#### Conclusies na Serie 1

Volgens Steentoets zou deze steenzetting bezwijken bij  $H_s = 0,84$  m en  $H_s/\Delta D = 5,02$  (als gerekend wordt met de ondergrens van de soortelijke massa,  $\Delta_{min}$ ) of  $H_s = 0,91$  m en  $H_s/\Delta D = 4,59$  (als gerekend wordt met de gemiddelde soortelijke massa,  $\Delta_{gem}$ ), zie ook paragraaf 5.2. Tijdens de proeven trad bezwijken op bij  $H_s = 1,12$  m. De stabiliteit is dus weliswaar hoger dan deze voorspelde stabiliteit volgens Steentoets maar ook lager dan de gemeten stabiliteit in 2010 ( $H_s/\Delta D = 7.7$ , Wolters & Klein Breteler 2011).

Tijdens de proeven is geconstateerd dat er relatief veel inwasmateriaal uitspoelde. Dit heeft waarschijnlijk de interactie (klemming) tussen de zuilen verminderd. Omdat dit in 2010 veel minder gebeurde, is ervoor gekozen om de modelopstelling wat aan te passen en te bezien of hiermee het uitspoelen kan worden verminderd. Dit is gedaan om uit te sluiten dat er sprake is van een ongewenst modeffect dat wel in de Deltagoot speelt, maar niet in de werkelijkheid.

Het vervolg van de proeven is daarom uitgevoerd met een dunnere filterlaag, met een kleinere korrelgrootte. Daardoor is het te verwachten dat er minder water door de toplaag naar buiten komt tijdens de golfneerloop. Dit zal naar verwachting bijdragen aan een vermindering van de uitspoeling. De gekozen waarden voor de filterlaagdikte en de korrelgrootte is, omgerekend naar ware grootte, nog wel in de range van waarden die men in de praktijk kan aantreffen.

Daarnaast is ervoor gekozen om de steenzetting in te wassen met steenslag met grotere soortelijke massa, namelijk basaltsplit, zie ook paragraaf 3.1.

#### 4.3 Serie 2, korteduurproeven, $s_{op}=0,04$ (Proeven P04 – P07)

Zoals al in paragraaf 4.2 is uitgelegd is in Serie 2 sprake van een steenzetting met een aangepast filter en inwasmateriaal. Er is een filterlaagdikte van 7 cm toegepast met  $D_{f15} = 7$  mm. Het filter en de steenzetting zijn vervangen vanaf rij 3.5 ( $z = 2.55$ m). De filterlaagdikte is over een lengte van ca. 1,2m van 9,5cm naar 6,9 cm verkleind.

Rond de zuilen 1, 8, 10, 15, 16 en 18, waar de uitspoeling het snelst plaatsvond, is wat grovere basaltsplit toegepast (uit de fractie 22 – 40 mm).

##### *Proef P04 (ingolfproef):*

Tijdens de proef is geconstateerd dat duidelijk minder inwasmateriaal is uitgespoeld dan in Serie 1. De maximaal gemeten uitspoeling was 16cm (1cm in filter) bij zuil 16/18. De meeste uitspoeling was tussen  $z=4.0$ m en 4.2m (vanaf  $z=3.95$ m beginnende uitspoeling, daaronder waren de spleten vol gebleven).

Er is geen vervorming/bolling van de steenzetting geconstateerd en ook geen uitstekende zuilen.

Zoals in proefserie 1 kwam het uitgespoelde inwasmateriaal grotendeels op de bodem van de goot terecht en bleef het niet op het talud.

##### *Proef P05 (herhaling van Proef P04 met hogere WS: 4.7m; tijdens startbijeenkomst)*

In tegenstelling tot Proef P04 is tijdens de proef een ophoping van inwasmateriaal op de taludhelft aan de halzijde (onderkant van talud) geconstateerd. Zoals in Proef P04 zaten alle spleten vol tot  $z = 3.95$ m (streep 11). Door de ophoping van inwasmateriaal aan de halzijde waren hier de spleten tussen  $z= 3.95$ m – 4.3m (strepen 11-13) ook bijna vol.

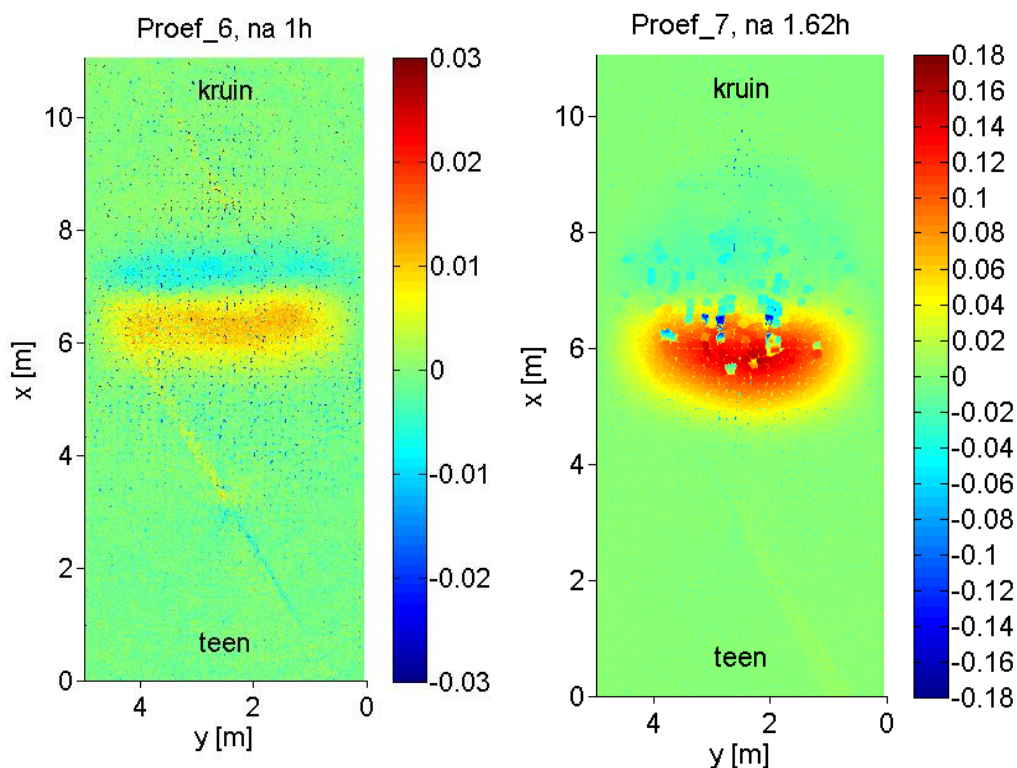
De maximaal gemeten uitspoeling was 15cm bij zuil 3 en 8 (tussen  $z=4.2$ m en  $z=4.5$ m, alleen meetcabinezijde).

Er is geen vervorming van de steenzetting geconstateerd en ook geen uitstekende zuilen.

##### *Proef P06*

Tijdens Proef P06 is in een brede zone ( $z= 3.9 - 4.6$ m) veel uitspoeling tot maximaal 18cm (3 cm in de filter) opgetreden. Tot  $z= 3.85$ m (streep 10.5) waren alle spleten vol met inwasmateriaal. De uitspoeling op de taludhelften aan hal- en meetcabinezijde waren vergelijkbaar.

Een beginnende kattenrug is geconstateerd ( $S = 0.013$ m, schade categorie a) tussen  $z = 3.7$ m en  $z = 4.4$ m en beginnende zakking van <1cm tussen  $z = 4.2$ m en  $z = 4.4$ m. De hoogteverschillen tussen naast elkaar gelegen zuilen was overall < 1cm (schade categorie a).



Figuur 4.8 Vervorming na Proef 6 en Proef 7 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 5)( $x$ = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant;  $y$ =lengte vanaf de meetcabinezijde; legenda in [cm])

#### Proef P07

Na ca. 37min is de proef afgebroken vanwege schade, omdat de eerste zuilen uit de steenzetting kwamen. Na het leegpompen van de goot bleken 14 zuilen verdwenen te zijn, verdeeld over de hele breedte van de kattenrug (tussen  $z = 3.7\text{m}$  en  $z = 4.0\text{m}$ ; schade categorie d). Verder is er een vervorming van het talud met een maximale hoogteverschil van ca. 21cm ( $S = 0.105\text{m}$ ) tussen  $z = 3.5\text{m}$  en  $z = 4.5\text{m}$  geconstateerd. De ligging van de kattenrug was centraal over de gootbreedte. Er zijn dus geen randeffecten aanwezig, zie Figuur 4.8.

Boven de kattenrug heeft een lokale zakking tussen  $z = 4.1\text{m}$  en  $z = 4.5\text{m}$  van ca. 2-5cm plaats gevonden. Hier zijn ook grote hoogteverschillen tussen naastelkaar gelegen zuilen van ca. 3-4cm vastgesteld.

Tijdens Proef P07 is op grote delen van het talud het filter deels uitgespoeld. Dit is gebeurd onder  $z = 4.9\text{m}$ , waar nog slechts 0-4cm van het filter over was. Boven  $z = 4.9\text{m}$  zat nog inwasmateriaal in de spleten (6-10cm). Onder  $z = 3.45\text{m}$  was de steenzetting nog volledig ingewassen.

Na Proef P07 is de steenzetting hersteld vanaf streep 5 ( $z = 2.8\text{m}$ ). De eerste 5 rijen sets (incl. de 2 rijen sets voor de overgang van 9.5cm filterdikte naar 7cm) hebben geen schade getoond en zijn blijven staan.

### *Conclusies na Serie 2*

Volgens Steentoets zou deze steenzetting bezwijken bij  $H_s = 0,98$  m of  $H_s/\Delta D = 5.87$  (gebaseerd op  $\Delta_{min}$ ) of  $H_s = 1,12$  m of  $H_s/\Delta D = 5.64$  (gebaseerd op  $\Delta_{gem}$ ), zie ook paragraaf 5.2.

Tijdens de proeven is echter gebleken dat de Basalton 30 STS is bezweken na 37 minuten golven met  $H_{s,i} = 1,18$  m.

De stabiliteit is dus hoger dan de voorspelde stabiliteit volgens Steentoets maar lager dan de gemeten stabiliteit van de proeven uit 2010 ( $H_s/\Delta D = 7.7$ , Wolters & Klein Breteler 2011).

Ondanks het aangepaste filter en inwasmateriaal (zie Serie 1) blijken de resultaten consistent met Serie 1 te zijn. Dit duidt erop dat er geen sprake is van een modeffect, maar dat dit resultaat het gevolg is van de steenzetting zelf. Er is daarom ervoor gekozen Serie 1 niet te herhalen maar direct door te gaan met Serie 3 (langeduurproeven).

## **4.4 Serie 3, langeduurproeven, $s_{op}=0,04$ (Proeven P08 – P013)**

Voor de langeduurproeven is een stuurfile van 16 uur aangemaakt. Bij elke proef is hiervan een gedeelte gedraaid. Dit is de reden waarom de golfhoogtes van de individuele proefdelen een bepaalde spreiding vertonen.

### *Proef P08 (ingolfproef, zelfde als P05)*

Er was geen schade zichtbaar na deze proef. De maximale uitspoeling van het inwasmateriaal was 15-16cm (tussen  $z=4.2$ m en  $z=4.4$ m). Onder  $z = 4.0$ m zaten alle spleten vol met inwasmateriaal. Boven  $z=4.4$ m verminderde de uitspoeling geleidelijk van 5-7cm tot 3-4cm (boven  $z=4.9$ m). Net als bij proef P05 was de mate van uitspoeling iets groter in de taludhelft aan de meetcabinezijde, zie Appendix A. Tijdens proef P02, P03, P06 en P07 was de uitspoeling aan beide zijden veel minder verschillend.

Na deze proef is de steenzetting weer ingewassen. Bij alle volgende proeven is dit niet meer gedaan.

### *Proef P09*

Na 82 minuten is de proef gestopt omdat een zuil door de golven uit de steenzetting was gespoeld bij  $z=4.2$ m en  $y=1.0$ m (en bij duidelijk lagere golfhoogte,  $H_s = 0.85$ m, dan in Serie 2 met  $H_s = 1.2$ m). Aan de meetcabinezijde is ook een taludvervorming met een maximaal hoogteverschil van 11cm vastgesteld, zie Figuur 4.10. Aan de halzijde was geen schade te zien.

Gezien het vermoeden dat de mate van uitspoeling in de goothelft aan de meetcabinezijde onrealistisch snel gaat, is besloten het proevenprogramma voort te zetten met uitsluitend de Basalton 30 STS aan de halzijde. Om dat mogelijk te maken moest ervoor worden gezorgd dat er verder geen schade meer kon optreden aan de meetcabinezijde. Dit is bereikt door deze zijde te versterken.

Daartoe is direct op het filter horregaas geplaatst met openingen van 1mm om de uitspoeling van het filtermateriaal te voorkomen. Op de bovenkant van de steenzetting is kippengaas aangebracht en dat is vastgezet door middel van metalen strippen met een onderlinge afstand van 40cm, zie Figuur 4.9. Op de halzijde van de steenzetting zijn geen wijzigingen doorgevoerd (ook geen nieuwe inwassing) zodat deze kant van de steenzetting verder beproefd kon worden.

Deze werkwijze is gekozen omdat er het vermoeden bestond dat er sprake is van een ongewenst modeffect dat wel in de Deltagoot plaatsvindt, maar niet in de werkelijkheid.



Figuur 4.9 Resultaat na het herstellen van de schade aan meetcabinezijde na Proef 9

Bij de analyse van de schade na Proef P09 is het volgende opgevallen:

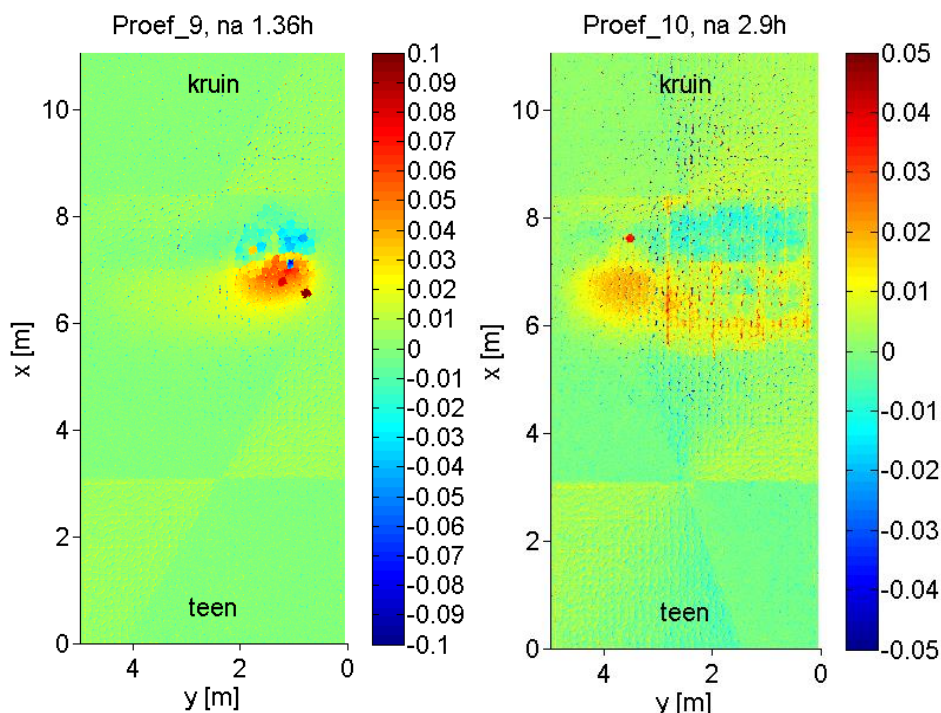
- Bijzonder sterke uitspoeling van het inwasmateriaal aan de meetcabinezijde (er was praktisch geen inwasmateriaal aanwezig tussen  $z=3.8\text{m}$  en  $z=4.4\text{m}$  en geen klemming meer tussen de zuilen).  
Tussen  $z=3.85\text{m}$ - $4.4\text{m}$  zijn naast het inwasmateriaal ook delen van het filter uitgespoeld, d.w.z. tussen  $0.5\text{cm}$  en  $4\text{cm}$ . Op de halzijde is echter geen filtermateriaal uitgespoeld. Wel was het inwasmateriaal voor een deel uitgespoeld:  $3\text{-}9\text{cm}$  diep, bij enkele zuiltjes ook  $13\text{-}15\text{cm}$  (namelijk bij zuil 10, 8, 1 en 15).
- Het blijkt dat, zodra voldoende inwasmateriaal was verdwenen, een duidelijke beweging van het filtermateriaal is ingezet voordat de eerste zuilbeweging is opgetreden (de zuilen aan de bovenkant zijn eerst gezakt voordat hieronder een kattenrug is ontstaan).

Bij het zoeken naar een verklaring voor het grote verschil in uitspoeling van inwasmateriaal tussen de meetcabinezijde en de halzijde zijn na de proef de spleten tussen de zuilen nog eens nauwkeurig opgemeten:

- De som van spleten aan de halzijde is vergeleken met de som van spleten aan de meetcabinezijde. Hiervoor is de horizontale afstand van zuil 18 over de breedte van twee sets ingemeten, zowel aan de meetcabinezijde als aan de halzijde. Dit is gedaan op verschillende hoogtes van de steenzetting. Daarbij is vastgesteld dat de gemeten afstand iets groter was aan de halzijde (verschillen van  $5\text{mm}$ - $10\text{mm}$  over 2 sets).
- Na de proef zijn de video's nog een keer nauwkeurig bekeken om te zien of de golf aan de ene zijde anders breekt dan aan de andere zijde, of dat de golfklap aan een



kant later optreedt. Er is echter geen duidelijk verschil geconstateerd tussen hal- en meetcabinezijde. Over een periode van ca. 100 golven was het tijdstip van de golfklap over de gootbreedte meestal gelijk (73% van de golven), iets vroeger meetcabinezijde (9%) en iets vroeger halzijde (10%) en iets vroeger in het midden (8%).



Figuur 4.10 Vervorming na Proef 9 en Proef 10 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 8)  
( $x$ = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant;  $y$ =lengte vanaf de gootwand aan de meetcabinezijde; legenda in [cm])

#### Proef P10 (alleen halzijde)

Na 1.54 uur ( $t_{cumulatief} = 2.9$  uur) is de proef gestopt omdat een zuil wat omhoog kwam, namelijk zuil 8 bij  $z=4.23$ m. Na het verlagen van de waterstand is vastgesteld dat de zuil 5cm eruit was getild (schade categorie c). Er zat geen inwasmateriaal meer omheen (overigens ook niet bij de zuilen ernaast). Een beginnende taludvervorming met een maximaal hoogteverschil van 2.5cm ( $S=0.013$ m) is gemeten aan de halzijde (schade categorie a, tussen  $z= 3.85$ m en  $z= 4.55$ m) met een verzakking van 0.5-1.5cm tussen  $z=4.1$ m en 4.55m. Op de beschermde zijde van de steenzetting was geen duidelijke kattenrug te zien. Ook was hier bijna geen uitspoeling geconstateerd (alleen op sommige plekken tot 5cm uitspoeling).

Gezien het feit dat er schade van de categorie c is opgetreden tijdens deze proef, wordt deze proef gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor, samen met de proefresultaten uit serie 1 en 2.

De omhoog gekomen zuil (zuil 8) stond echter los van het overige schadegebied en bleek dus een lokale effect te zijn (onvoldoende klemming). Daarom is na Proef 10 deze zuil weer op zijn plaats geduwd en eromheen opnieuw ingewassen voordat de langeduurproef is vervolgd. Het vervolg is alleen maar uitgevoerd om te bezien of er

een groot verschil is tussen de stabiliteit van de overige zuilen en die ene zuil die tijdens proef P10 is bezwaken.



Figuur 4.11 Omhoog gekomen zuil 8 na Proef 10

#### Proef P11 (alleen halzijde)

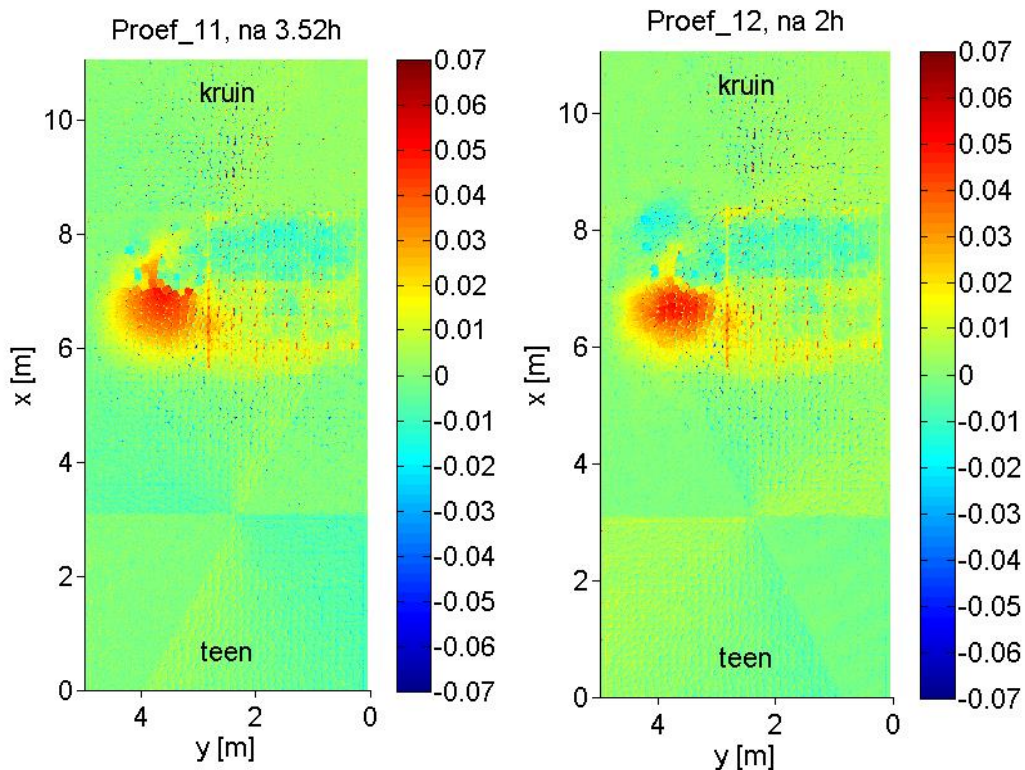
Proef 11 is na 37min gestopt ( $t_{\text{cumulatief}} = 3.52$  uur) omdat er weer een zuil omhoog uit de zetting stak. Dit was 2 zuilrijen onder de zuil 8 die tijdens Proef 10 omhoog was gekomen. Zuil 7 bij  $z=4.20\text{m}$  was grotendeels eruit ( $\sim 14\text{cm}$ ) maar is na het stoppen van de proef weer teruggevallen op zijn positie (schade categorie d).

Rond zuil 7 zijn grote hoogteverschillen in de zuilen geconstateerd: bij zuil 5 was dat  $4.8\text{cm}$  en bij zuil 7  $4.2\text{cm}$ . De vervorming van het talud is toegenomen ten opzichte van Proef 10 tot ca.  $7\text{cm}$  ( $S=0.035\text{m}$ , schade categorie c, tussen  $z= 3.85\text{m}$  en  $z= 4.55\text{m}$ ) met een verzakking van  $2\text{cm}$  tussen  $z=4.1\text{m}$  en  $4.55\text{m}$ . Binnen het schadegebied was het inwasmateriaal helemaal uitgespoeld, waardoor de zuilen wellicht geen meer klemming hadden.

Tijdens deze proef is relatief snel schade opgetreden, waaruit blijkt dat tijdens proef P10 er weliswaar maar één zuil omhoog kwam, maar dat de steenzetting er wel aan toe was om te bezwijken.

Proef P11 is niet gebruikt voor het bepalen van de stabiliteitsfactor, omdat reeds tijdens P10 schade van categorie c was opgetreden.

Na de proef zijn alle zuilen weer terug geduwd (zover mogelijk), het talud is tussen strepen 10-15 (halzijde) opnieuw ingewassen en er is met de trilplaat over het beschadigd gebied gegaan. De volgende proeven P12 en P13 beschrijven dus in feite een nieuwe meetreeks en moeten apart worden gezien van proeven P09-P11.



Figuur 4.12 Vervorming na Proef 11 en Proef 12 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 8 en voor Proef 12); x= lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant; y=lengte vanaf de gootwand aan de meetcabinezijde; legenda in [cm]

#### Proef P12 (alleen halzijde)

Vanaf proef P12 is een nieuwe langeduurproef gestart op een zo goed mogelijk herstelde steenzetting (serie 3b).

Bij deze proef is zonder te stoppen 2 uur doorgelopen ( $t_{cumulatief} = 2$  uur). Tijdens de meting is er geen schade opgevallen. Na het laten zakken van de waterstand is vastgesteld dat de kattenrug nog steeds dezelfde hoogte had als na Proef P11 ( $S=0.035m$ , tussen  $z= 3.85m$  en  $z= 4.6m$ ); alleen de verzakking bleek iets uitgebreider (2cm tussen  $z=4.15m$  en  $4.6m$ ). Er was veel uitspoeling van inwasmateriaal bij de zuilen in het gebied waar eerder schade was opgetreden.

De hoogteverschillen tussen de zuilen in het schadegebied ( $z= 3.85m$  en  $z= 4.2m$ ) liepen op tot ca. 3cm (schade categorie b, zuil 5: 3cm, zuil 13: 1.5cm, zuil 11: 1.5cm, zuil 8: 2.5cm, zuil 7: 2cm, zuil 6: 1.5cm).

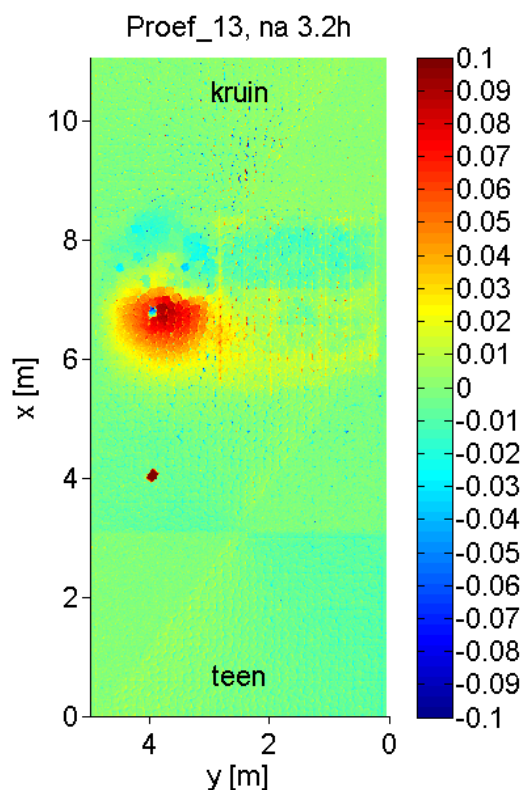
De grootste uitspoeling is vastgesteld tussen  $z=4.0m$  en  $z=4.3m$  (tot 17cm, 2cm in filter).

#### Proef P13 (vervolg van P12, alleen halzijde)

De proef is gestopt na 1.2 uur ( $t_{cumulatief} = 3.2$  uur inclusief P12) toen de eerste zuil eruit kwam (schade categorie d), zie Figuur 4.13. In dit gebied was vrijwel geen inwasmateriaal meer te zien.

De maximale gemeten vervorming van het talud was ca. 13cm ( $S=0.065m$ , tussen  $z= 3.85m$  en  $z= 4.6m$ ) met een verzakking tot 3cm tussen  $z=4.15m$  en  $4.6m$ .

Hoogteverschillen tussen de zuilen was opgelopen tot 4.5cm (z=4.32m: 3cm bij zuil 5; z=4.23m: 3cm bij zuil 8 en 4cm bij zuil 11; z=4.14m: 4.5cm bij zuil 7 en 2cm bij zuil 7 en 10).



Figuur 4.13 Vervorming na Proef 13 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 8)  
(x=lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant; y=lengte vanaf de gootwand aan de meetcabinezijde; legenda in [cm])

De grootste uitspoeling is vastgesteld tussen z=4m en z=4.6m waar op enkele plekken ook het filter compleet was uitgespoeld. Onder z=3.7m zaten alle spleten vol met inwasmateriaal.

### Conclusies na Serie 3

De eerste schade was reeds ontstaan na 82 minuten aan de meetcabinezijde, maar omdat er het vermoeden was dat het uitspoelen van het inwasmateriaal onrealistisch snel ging, is verder gegaan met de taludhelft aan de halzijde.

Aan de halzijde is de Basalton 30 STS bezweken na  $t_{cumulatief} = 2,9$  uur golven (Serie 3a, Proeven P09-P10) en  $t_{cumulatief} = 3,2$  uur (Serie 3b, Proeven P12-P13) bij een golfhoogte van respectievelijk  $H_{s,i,N} = 0.86$ m en  $H_{s,i,N} = 0.88$ m. Het verschil in belastingduur tot schade is vrij klein gebleken, waardoor geconcludeerd kan worden dat de proeven-serie 3a en 3b een consistent resultaat hebben opgeleverd.

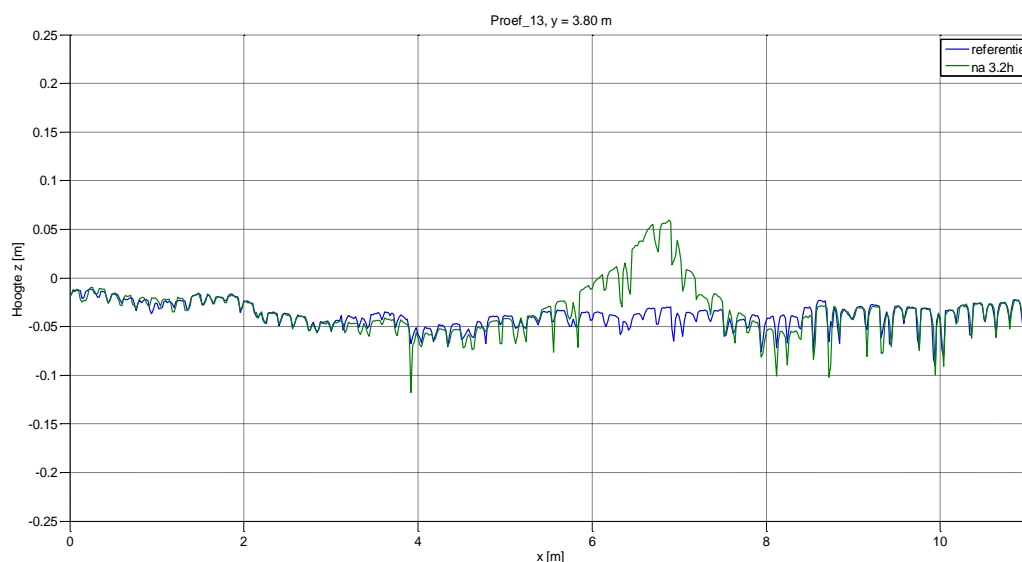
Volgens Steentoets zou deze steenzetting bij deze belastingduur bezwijken bij  $H_s = 0,76$  m of  $H_s/\Delta D = 4.59$  (gebaseerd op  $\Delta_{min}$ ) of  $H_s = 0,85$  m of  $H_s/\Delta D = 4.26$  (gebaseerd op de gemiddelde soortelijke massa van de zuilen), zie ook paragraaf 5.2.

De steenzetting heeft een beperkte langeduursterkte, die lager is dan bij de proeven in 2010 (Wolters & Klein Breteler, 2011). Het resultaat is consistent met de resultaten uit de eerste twee proevenseries.

#### 4.5 Dwarsprofielen

Alle laserprofielen (cumulatieve verschilprofielen tegenover het referentieprofiel) en de dwarsprofielen met de maximale uitwijking (S-profiel) zijn weergegeven in Appendix C.

Voor een beschrijving van de schade per individuele proef (lasermeting van het oppervlak) wordt verwezen naar paragraaf 4.2 - 4.4. Als voorbeeld van een typische vervorming wordt hier het dwarsprofiel na proef P13 (eind serie 3) ten opzichte van het begin van serie 3 getoond, zie Figuur 4.14.



Figuur 4.14 Hoogte taludoppervlak na Proef 13 ( $y=3.8\text{m}$ , groene lijn) en referentie (voor proef 12, blauwe lijn, waarbij de taludhelling reeds van beide lijnen is afgetrokken)

Zoals al beschreven in paragraaf 4.4 is na Proef P13 een kattenrug van ca. 10cm hoogte vastgesteld tussen  $z=3.85\text{m}$  en  $z=4.2\text{m}$  ( $x=6\text{m}$  en  $x=7.2\text{m}$ ) met een verzakking tot 3cm tussen  $z=4.2\text{m}$  en  $z=4.6\text{m}$  ( $x=7.2\text{m}$  en  $x=8.4\text{m}$ ).

Aan het verloop van de blauwe lijn (referentie van voor proef P12) is duidelijk te zien dat gedurende de proeven (Series 1-3) het gehele taludoppervlak meerdere cm gezakt is.

Opgemerkt wordt dat de volledig uit de toplaag geslagen zetstenen niet zichtbaar zijn in de hier getoonde dwarsprofielen.

De negatieve pieken in de dwarsprofielen geven een indicatie van de lokale uitspoeling van het inwas- en filtermateriaal tussen de individuele zuilen. Het wordt echter opgemerkt dat dit alleen een indicatie is, omdat de laser niet verticaal boven de spleten stond maar onder een hoek tegen de spleten aankeek. De handmetingen van de uitspoeling van het inwas- en filtermateriaal (zie Appendix A) worden hier als betrouwbaarder beschouwd.



## 5 Analyse van de proefresultaten

### 5.1 Uitspoeling van inwasmateriaal en filter

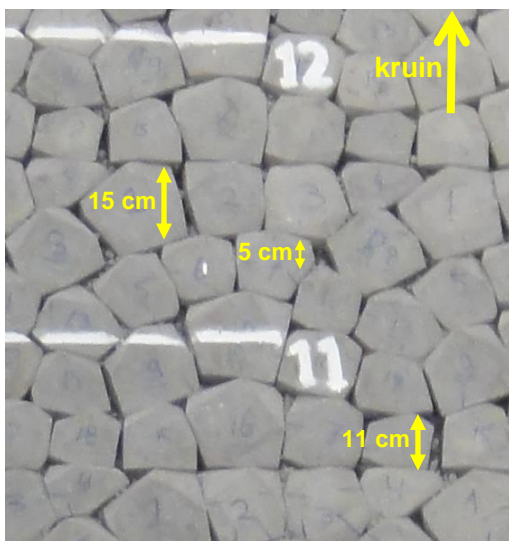
Er is een belangrijke uitspoeling van het inwas- en filtermateriaal vastgesteld tijdens alle proefseries (Series 1-3). Een overzicht van alle metingen is gegeven in Appendix A.

In Series 3 is na 3,2 - 3,5 uur beproeven met  $H_{m0} = 0,9\text{m}$  een groot deel van de filterdikte (7cm, d.w.z. een erosiediepte van  $Y = \text{zuilhoogte} + \text{filterhoogte} = 0,22\text{m}$ ) uitgespoeld. Hetzelfde is geconstateerd tijdens Serie 2 (Proef 7) binnen 0.62 uur met  $H_{m0} = 1,2\text{m}$ . Tijdens Serie 1 (Proef 3,  $H_{m0} = 1,1\text{m}$ ) was de filteruitspoeling grotendeels beperkt tot ca. 3cm.

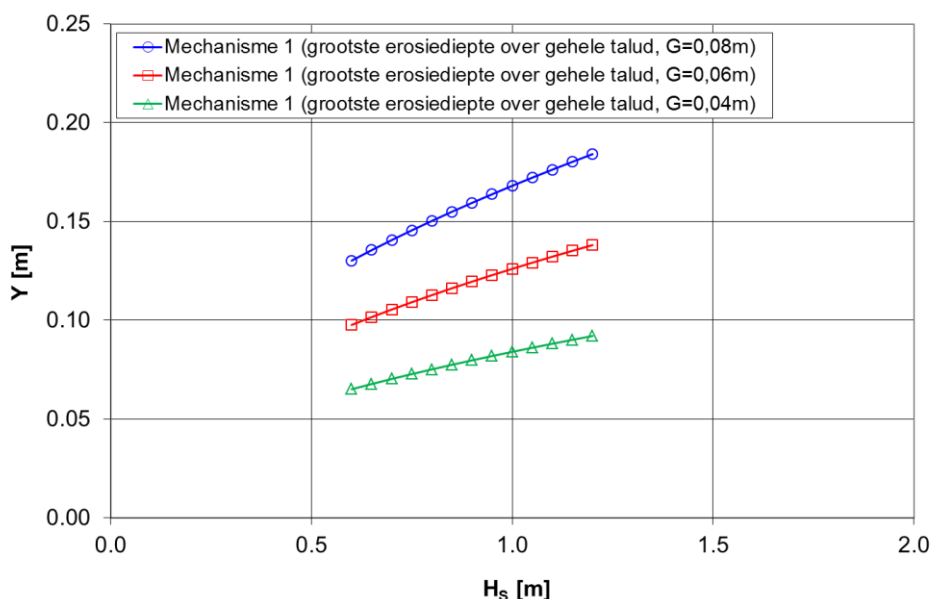
De theoretisch verwachte erosie is aangegeven in Figuur 5.2 (gebaseerd op Bezuijen et al. 1990). Er is hier gerekend met een korrelgrootte van 12 mm, zoals gebruikt in de tweede serie. Voor een typische equivalente gatgrootte van Basalton 30 STS zuilen ( $G=5\text{-}6\text{cm}$ , modelproeven) volgt een verwachte erosie van  $Y = 12\text{-}13.8\text{cm}$  voor een golfhoogte van  $H_s = 0,9\text{-}1,2\text{m}$ . Dit is duidelijk minder dan de gemeten erosie van  $Y = 22\text{cm}$  en minder dan de zuilhoogte van 15cm. In

Figuur 5.2 is ook de verwachte erosie voor gaten met diameter  $G=0,04\text{m}$  en  $G=0,08\text{m}$  getoond.

De meeste openingen in de Basalton 30 STS zijn slechts een paar centimeter in diameter. Als echter de dominante stromingsrichting op het talud in acht wordt genomen, dan zijn er openingen met een lengte in deze richting van wel 15 cm. Dit is te zien in Figuur 5.1. Als er met de formules van Bezuijen et al (1990) wordt gerekend met dergelijke grote openingen, wordt een erosiediepte van 16cm berekend (bij  $H_s = 1,2\text{ m}$  en  $D_{50} = 12\text{ mm}$ ). Dit is nog steeds minder dan er gemeten is, maar het komt wel dichterbij in de buurt.



Figuur 5.1 Openingen tussen de zuilen, gemeten in de richting van de golven



Figuur 5.2 Berekening uitspoeling filter (erosiediepte  $Y$ ) volgens Bezuijen et al. (1990)

## 5.2 Stabiliteit steenzetting

Viermaal is de steenzetting zo zwaar belast dat de steenzetting bezweek, namelijk:

- Serie 1: bij golfsteilheid van  $s_{op} \approx 0,02$
- Serie 2: bij golfsteilheid van  $s_{op} \approx 0,04$
- Serie 3a: bij golfsteilheid van  $s_{op} \approx 0,04$  met een langdurige belasting
- Serie 3b: bij golfsteilheid van  $s_{op} \approx 0,04$  met een langdurige belasting

Na elke proef uit de serie is de waterstand verlaagd en de schade geïnventariseerd. De geconstateerde schade aan de steenzetting is ingedeeld in vier categorieën (a t/m d). De definitie van deze categorieën is gegeven in paragraaf 4.1.

serie	Proef nr.	$s_{om}$ (-)	$H_s$ (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	$N_{proef}$ (-)	$\Sigma N$ (-)	$t_{proef}$ (uur)	$\xi_{om}$ (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	Schade	
										verpl. (cm)	categorie
1	P01	0,027	0,62	3,80	532		0,50	2,02	3,18	0	a
	P02	0,025	0,89	4,78	1217		1,35	2,11	4,59	1	a
	P03	0,026	1,12	5,28	681		0,83	2,08	5,77	15	d
2	P04	0,046	0,67	3,04	647		0,50	1,55	3,43	0	a
	P05	0,045	0,71	3,16	634		0,50	1,56	3,66	0	a
	P06	0,043	0,98	3,83	1080		1,00	1,61	5,07	1	a
	P07	0,044	1,18	4,13	627		0,62	1,58	6,09	15	d
3a	P08	0,045	0,70	3,15	629		0,50	1,57	3,59	0	a
	P09	0,044	0,85	3,53	1598	1598	1,36	1,60	4,36	1	a
	P10	0,045	0,85	3,49	1772	3370	1,54	1,58	4,39	5	c
	P11	0,046	0,89	3,54	735		0,62	1,56	4,59	15	d
3b	P12	0,045	0,87	3,52	2315	2315	2,00	1,57	4,51	3	b
	P13	0,046	0,90	3,55	1365	3680	1,20	1,55	4,66	15	d

Tabel 5.1 Overzicht proevenprogramma en geconstateerde schade

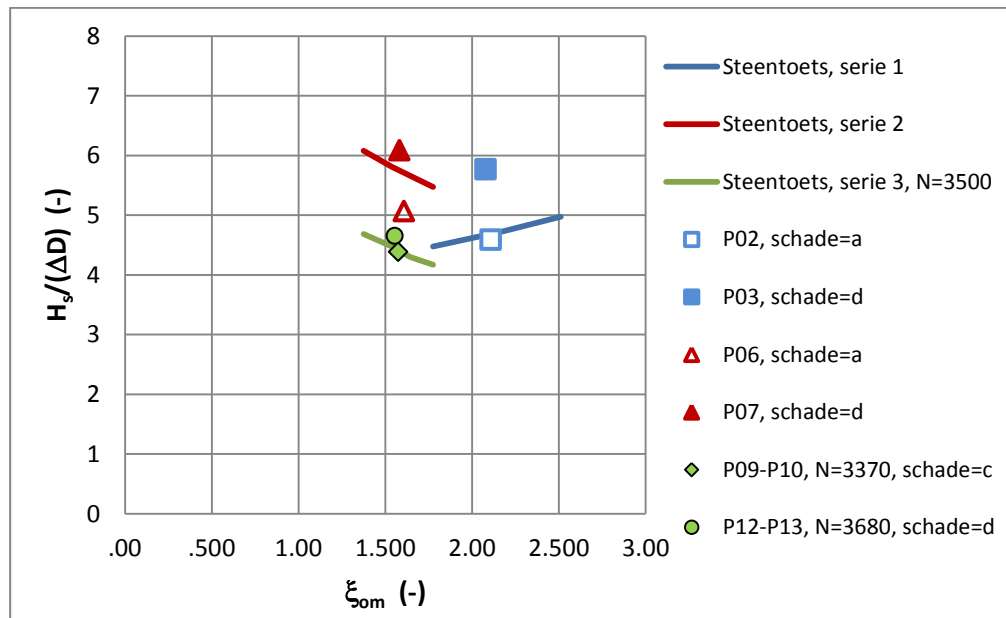
De resultaten van de proeven zijn samengevat in Tabel 5.1 (zie ook Tabel A.1, Appendix A; hier zijn ook de amplitudes van de kattenrug gegeven). In de tabel is ook



de waarde van de belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  gegeven, die hier berekend is met de gemiddelde soortelijke massa van de zuilen. Er is gebruik gemaakt van het gemiddelde, omdat doorgaans de schade geïnitieerd is door de vervorming van een groep zuilen tot een kattenrug en niet door een individuele zuil. Daardoor is de gemiddelde soortelijke massa relevanter dan de extreme waarden.

serie	$H_s$ (m)	$N_{\text{proef}}$ (-)	$\Sigma N$ (-)	$t_{\text{proef}}$ (uur)	$H_s/(\Delta D)$ (-)
1	0,90	1000		1,3	4,64
2	1,12	1000		1,1	5,75
3a	0,86		3500	3,3	4,43

Tabel 5.2 Steentoetresultaten (gebaseerd op  $\Delta_{\text{gem}}$ )



Figuur 5.3 Resultaten van de belangrijkste proeven en overeenkomstige berekeningen met Steentoets

Van Proef P09 en P10 is ook het cumulatieve aantal golven vermeld, omdat deze samen een langeduurproef vormen. Dit geldt ook voor P12 en P13. Proef P11 is niet bij P09 en P10 geteld, omdat na proef P10 al schadecategorie c was bereikt, zodat toen al sprake was van bezwijken.

De schade in de tabel is weergegeven als het grootste aantal centimeters verplaatsing tussen naast elkaar gelegen zuilen (verpl.) en de schadecategorie.

De belangrijkste proefresultaten zijn weergegeven in Figuur 5.5. In deze figuur staat op de horizontale as de brekerparameter op basis van de spectrale golfperiode:  $\xi_{\text{om}} = \tan \alpha / \sqrt{s_{\text{om}}}$  met  $s_{\text{om}} = H_s / (g T_{m-1,0}^2 / (2\pi))$ . Op de verticale as staat de belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  op basis van de gemiddelde soortelijke massa.

Uit elke serie is de proef gegeven met de grootste golfhoogte waarbij de steenzetting nog niet is bezwaken en de proef met de kleinste golfhoogte waarbij wel bezwijken is geconstateerd. De meetpunten met de open symbolen betreffen proeven waarbij de steenzetting nog niet is bezwaken (schadecategorie a of b), terwijl voor de dichte symbolen dat wel het geval is (schadecategorie c of d).

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

In de figuur is te zien dat alle punten waarbij schade is opgetreden boven de lijnen liggen die berekend zijn met Steentoets. De resultaten van de berekeningen met Steentoets komen dus overeen met de metingen. De meetpunten liggen echter vrij dicht bij de berekende lijnen.

In vergelijking met het onderzoek van 2010 (Wolters e.a. 2011) is de stabiliteit lager. Toen ontstond pas schade bij  $H_s/(\Delta D) = 7,7$  en  $\xi_{om} = 1,47$  terwijl volgens Steentoets schade zou moeten zijn ontstaan bij een 40% lagere waarde van  $H_s/(\Delta D)$ .

In vergelijking tot dat onderzoek is het talud nu iets steiler (1:3 in plaats van 1:3,5), is er geen berm in het talud en zijn er nu verschaalde zuilen toegepast. Uit berekeningen met Steentoets blijkt dat de invloed van de taludhelling en de berm slechts marginaal is.

De grootte van de zuilen kan echter wel een belangrijke invloed hebben. In het onderzoek in 2010 was de gemiddelde breedte van de zuilen (in het vlak van het talud) tweemaal zo groot als nu. Als de afmetingen van de zuilen (de diameter van de cirkel met hetzelfde oppervlak als de zuil) groot zijn, zal het gemiddelde stijghoogteverschil over een zuil kleiner zijn. Dit is een gevolg van het feit dat het grootste stijghoogteverschil slechts in een betrekkelijk smalle strook op het talud plaatsvindt. Een decimeter boven of onder deze strook is het stijghoogteverschil al aanzienlijk kleiner dan dit maximum. In bijlage F is aannemelijk gemaakt dat het gemiddelde stijghoogteverschil over een zuil orde 20% kleiner is bij zuilen met een diameter van 30 cm ten opzichte van zuilen met een diameter van 15 cm. Dit aspect kan dus flink bijgedragen hebben aan de lagere stabiliteit die nu met deze verschaalde zuilen is gemeten.

Het stijghoogteverschil is niet precies omgekeerd evenredig met de stabiliteit (golfhoogte bij bezwijken), maar dit kan wel als zodanig als eerste benadering gehanteerd worden.

Verder bleek het inwasmateriaal tijdens de huidige proeven vrij gemakkelijk uit te spoelen, terwijl dat voorheen nauwelijks gebeurde. Ook dit heeft een flinke invloed op de stabiliteit van de steenzetting. Er is geen duidelijke reden gevonden voor dit uitspoelen. Mogelijk dat het ontbreken van een tapsheid in de zuilen en de afwijkende oppervlaktetextuur een kleine invloed had. Normaal geproduceerde zuilen voor dijken in de praktijk hebben wel een kleine tapsheid, die mogelijk zou kunnen bijdragen aan het vastwiggen van het inwasmateriaal. Dit is ook geconstateerd door Kaste en Desta (2014).

De wrijvingscoëfficiënt tussen de zuilen die gebruikt zijn in het huidige modelonderzoek is hetzelfde als bij zuilen die gebruikt worden op dijken (zie paragraaf 3.3.5). Dit aspect heeft derhalve geen invloed gehad op de proefresultaten. Desondanks was de oppervlaktetextuur anders: harder en vlakker. Dat laatste kan wel invloed hebben gehad op het uitspoelen van het inwasmateriaal.

### 5.3 Stabiliteitsfactor

De 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.

Op basis van de uitgevoerde proevenseries is voor Basalton 30 STS een stabiliteitsfactor berekend, waarmee in de toekomst het resultaat van Steentoets-

berekeningen 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 G. In deze paragraaf is dit uitgewerkt voor Basalton 30 STS.



Figuur 5.4 Golfklap op Basalton 30 STS tijdens proef P07.

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

- **Serie 1:**  
Conform de procedure uit bijlage G is  $H_{s,bezwijk}$  gelijk aan het gemiddelde van de golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte in dezelfde serie waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).  
Tijdens serie 1 was nog geen schade opgetreden tijdens proef P02 ( $H_s = 0,89$  m), maar wel tijdens P03 ( $H_s = 1,12$  m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk} = (0,89+1,12)/2 = 1,01$  m.
- **Serie 2:**  
Tijdens serie 2 was nog geen schade opgetreden tijdens proef P06 ( $H_s = 0,98$  m), maar wel tijdens P07 ( $H_s = 1,18$  m). Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte  $H_{s,bezwijk} = 1,08$  m.
- **Serie 3a:**

Voor de langeduurproef (proef P09 en P10) geldt naast de gemiddelde significante golfhoogte en golfperiode van de proeven het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef, dus  $H_{s,bezwijk} = 0,85$  m,  $T_{m-1,0} = 3,51$  s en  $N = 3370$ . De ingolfproef (P08) telt hierbij niet mee, omdat daarna de bekleding opnieuw is ingewassen.

- *Serie 3b:*

Voor de tweede langeduurproef (proef P12 en P13) was de gemiddelde significante golfhoogte en golfperiode  $H_{s,bezwijk} = 0,89$  m,  $T_{m-1,0} = 3,53$  s en was de belastingduur tot schade, uitgedrukt in het aantal golven,  $N = 3680$ .

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 G 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), bij de bezwijk-golfhoogte van de betreffende serie (m)

$D_{Steentoets}$  = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc.), bij de bezwijk-golfhoogte van de betreffende serie (m)

$D_{in \text{ modelproeven}}$  = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (m), dus  $D_{in \text{ modelproeven}} = 0,15$  m.

De benodigde toplaagdiktes  $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  en  $D_{Steentoets}$  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 bezwijk-golfhoogtes als uitgangspunt genomen (zie boven). Voor elke proevenserie is met Steentoets (rekenend met de geconstateerde bezwijk-golfhoogte en met stabiliteitsfactor = 1) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets bij de geconstateerde bezwijk-golfhoogte nog net voldoende is. Voor het berekenen van  $D_{Steentoets}$  is gerekend met klemming en voor het berekenen van  $D_{ST \text{ eigen gewicht}}$  is gerekend zonder klemming.

De Steentoetsberekeningen zijn uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er is gerekend met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van het beton, de gemeten karakteristieke korrelgrootte  $D_{f15}$  van het filter ( $D_{f15}$  = korrelgrootte die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden), de gemeten dikte van de filterlaag, de gemeten golfcondities, de gemeten taludhelling, et cetera. Voor de dikte van de steenzetting is de hoogte van de zetstenen aangehouden.

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor vervolgens voor elke serie afzonderlijk bepaald met formule (5).

$$f_{stab} = \left( \frac{D_{Steentoets}}{D_{in \text{ modelproeven}}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST \text{ eigen gewicht}}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST \text{ eigen gewicht}}} \quad (5)$$

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 van alle 4 series (berekend met  $D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{in modelproeven}}$ ). Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

$$\bullet \quad \text{Voor 4 proevenserie: } \gamma = 1,1 + 1,64 \cdot \sigma \quad (6)$$

Met:

$\sigma$  = standaardafwijking in de proefresultaten (-)

Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries betreft de stabiliteitsfactor die voor het beproefde steenzettingtype wordt aangehouden als eindresultaat. De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 5.3 en Tabel 5.4.

Serie	$N_{\text{langeduur}}$ [-]	$H_{s,\text{bezwijk}}$ [m]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	$D_{\text{in modelproeven}}$ [m]	$D_{\text{Steentoets}}$ [m]	$D_{\text{ST eigen gewicht}}$ [m]
Serie 1, $s_{om} = 0,025$	n.v.t.	1,01	5,18	0,150	0,163	0,243
Serie 2, $s_{om} = 0,044$	n.v.t.	1,08	5,58	0,150	0,147	0,189
Serie 3a, $s_{om} = 0,044$	3370	0,85	4,37	0,150	0,149	0,183
Serie 3b, $s_{om} = 0,046$	3680	0,89	4,58	0,150	0,154	0,188

Tabel 5.3 Geschatte  $H_s/(\Delta D)$  bij begin van bezwijken conform de procedure uit bijlage G, de beproefde toplaagdikte en de resultaten van berekeningen met Steentoets2014.

Proevenserie	$D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{in modelproeven}}$ [-]			$D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{ST eigen gewicht}}$ [-]	$f_{\text{stab}}$ [-]
Serie 1, $s_{om} = 0,025$	1,09			0,67	1,02
Serie 2, $s_{om} = 0,044$	0,98			0,78	0,95
Serie 3a, $s_{om} = 0,044$	0,99			0,82	0,97
Serie 3b, $s_{om} = 0,046$	1,03			0,82	1,00
	$\mu$	$\sigma$	$\gamma$		$\mu$
Serie 1 t/m 3	1,02	0,05	1,18		<b>0,98</b>

Tabel 5.4 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten.

Conform de met Rijkswaterstaat afgesproken procedure (zie bijlage G) resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor Basalton 30 STS:  $f_{\text{stab}} = 0,98$ .

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Basalton 30 STS 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.



## 6 Conclusies

Om de stabiliteit van Basalton 30 STS zuilen onder golfaanval te onderzoeken is er een ruim 8 m hoge dijk met een talud van 1:3 opgebouwd in de Deltagoot, voorzien van een bekleding met de volgende eigenschappen:

- Type steenzetting: Basalton 30 STS, type standaardset (volledig op schaal 1:2)
- Dikte toplaag:  $D = 0,15$  m
- Open oppervlak in de toplaag: gemiddeld 9,7%
- Gemiddelde soortelijke massa:  $\rho_{Basalton} = 2293$  kg/m<sup>3</sup>
- Dikte filter  $b = 0,095$  m in serie 1,  $b = 0,069$  m in serie 2 en  $b = 0,071$  m in serie 3.
- Karakteristieke korrelgrootte filter in serie 1:  $D_{15} = 14$  mm, in serie 2:  $D_{15} = 7$  mm en in serie 3:  $D_{15} = 11$  mm.
- Karakteristieke korrelgrootte van het inwasmateriaal:  $D_{f15} = 5,5$  mm (Serie 1) en  $D_{f15} = 8,5$  mm (Serie 2 en 3)

Het open oppervlak is wat kleiner geworden dan gebruikelijk is op dijken in de werkelijkheid omdat de zetstenen erg nauwkeurig zijn geplaatst. Dit kleine open oppervlak heeft uiteindelijk geen invloed op de stabiliteitsfactor, omdat ook de Steentoetsberekeningen zijn uitgevoerd met dit kleine open oppervlak.

Deze constructie is getest door middel van 2 series korteduurproeven met oplopende golfhoogten (tot  $H_s=1,2$ m) en gelijkblijvende golfsteilheid ( $s_{om}$ ) en een serie langeduurproeven met constante golfhoogte en -periode.

De resultaten van de proeven zijn samengevat in tabel 5.1 en figuur 5.4 in paragraaf 5.3.

In de figuur is te zien dat alle punten waarbij schade is opgetreden boven de lijnen liggen die berekend zijn met Steentoets. De resultaten van de berekeningen met Steentoets komen dus overeen met de metingen. De meetpunten liggen echter vrij dicht bij de berekende lijnen.

In vergelijking met het onderzoek van 2010 (Wolters e.a. 2011) is de stabiliteit lager. Toen ontstond pas schade bij  $H_s/(\Delta D) = 7,7$  en  $\xi_{om} = 1,47$  terwijl volgens Steentoets schade zou moeten zijn ontstaan bij een 40% lagere waarde van  $H_s/(\Delta D)$ .

In vergelijking tot dat onderzoek is het talud nu iets steiler (1:3 in plaats van 1:3,5), is er geen berm in het talud en zijn er nu verschaalde zuilen toegepast. Uit berekeningen met Steentoets blijkt dat de invloed van de taludhelling en de berm slechts marginaal is.

De grootte van de zuilen kan echter wel een belangrijke invloed hebben. In 2010 was de gemiddelde breedte van de zuilen (in het vlak van het talud) tweemaal zo groot als nu. Als de afmetingen van de zuilen (de diameter van de cirkel met hetzelfde oppervlak als de zuil) groot zijn, zal het gemiddelde stijghoogteverschil over een zuil kleiner zijn. In bijlage F is aannemelijk gemaakt dat het gemiddelde stijghoogteverschil over een zuil orde 20% kleiner is bij zuilen met een diameter van 30 cm ten opzichte van zuilen met een diameter van 15 cm. Dit aspect kan dus flink bijgedragen hebben aan de lagere stabiliteit die nu met deze verschaalde zuilen is gemeten.

Verder bleek het inwasmateriaal tijdens de huidige proeven vrij gemakkelijk uit te spoelen, terwijl dat voorheen nauwelijks gebeurde. Ook dit heeft een flinke invloed op de stabiliteit van de steenzetting. Mogelijk dat de tapsheid en de oppervlaktetextuur van het beton, die anders was dan bij zuilen in de werkelijkheid, hier invloed op hebben gehad (Kaste en Desta 2014).

Op basis van de proefresultaten is de stabiliteitsfactor bepaald (zie paragraaf 5.4). Hoe beter de steenzetting presteert, hoe hoger deze factor is. De resultaten leiden tot de volgende waarde van de stabiliteitsfactor:  $f_{\text{stabiliteit}} = 0,98$ . Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Basalton 30 STS van 30 cm hoog (op schaal 1:2, dus 15 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar voor 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.



## 7 Literatuur

Bezuijen, A , Burger, A.M en Klein Breteler, M, 1990. Taludbekledingen van gezette steen. ISBN: 90-9003232-0

Kaste, D. en Klein Breteler, M., 2013. Veiligheidsfactor voor ontwerpen met Steentoets2010 voor betonzuilen, Deltares, rapport 120 6424.010, November 2013.

Kaste, D, en F. Desta, 2014, Trends t.a.v. uitspoelen inwasmateriaal uit Basalton, Benodigde kracht om steenslag uit spleten in de steenzetting te trekken, Deltares rapport 1210447-000, november 2014

Klein Breteler, M., 2014a. Documentatie Steentoets 2014, Deltares rapport 1208045-009.

Klein Breteler, M., 2014b. Steentoets kalibreren op basis van Deltagootproeven, Procedure voor bepalen van stabiliteitsfactor, Deltares rapport 1208045-013.

Mansard, E. en Funke, E., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least-square method. Proc. ICCE'80, ASCE pp 154-172, Sydney.

TAW, 2003. Technisch Rapport Steenzettingen. ISBN 90-369-5551-3

Wolters, G., 2009, Wrijvingscoëfficiënten van C-Fix-, basalt en betonzuilen

Wolters, G. en Klein Breteler, M., 2011. Reststerkte van een dijk met steenzetting op een kleilaag, Meetverslag Deltagootproeven SBW-Reststerkte, Project 1202122, Deltares.



## A Tabellen

SERIES	PROEF PROEF CONDITIES				INKOMEND GOLF PARAMETERS										Schadecriteria			OPMERKINGEN				
	h [m]	N [°]	N <sub>a</sub> [°]	Duur [h]	Cum. Duur [h]	H <sub>mo,j</sub> [m]	H <sub>mol,N</sub> [m]	T <sub>10,0,j</sub> [s]	T <sub>10,0,N</sub> [s]	T <sub>5,0,j</sub> [s]	T <sub>5,0,N</sub> [s]	ξ <sub>0,1,0</sub>	ξ <sub>sp</sub>	H <sub>z</sub> /AD	F	R <sub>N,IF</sub> [-]	Max. verschil ZH [m]	% toplaag [m]	Max. amplitude S [m]	% toplaag [m]	Type	
Series 1	P01	4.55	532	-	0.50	-	0.62	-	3.80	4.45	-	2.02	2.36	3.18	5.64	0.41	-	-	-	-	-	Ingolven
	P02	4.70	1217	1.35	-	0.89	-	4.76	5.29	-	2.11	2.33	4.59	6.07	0.45	-	0.01	0.07	0.010	0.07	a	Ingolven
	P03	4.70	681	1.898	0.83	-	1.12	-	5.28	6.00	-	2.08	2.36	5.77	10.24	0.46	0.15	1.00	0.035	0.23	d	Ingolven
Series 2	P04	4.55	647	-	0.50	-	0.67	-	3.04	3.08	-	1.55	1.57	3.43	4.64	0.29	-	-	-	-	-	Ingolven
	P05	4.70	634	-	0.50	-	0.71	-	3.16	3.61	-	1.57	1.79	3.66	5.39	0.31	-	-	-	-	-	Ingolven
	P06	4.70	1080	1.00	-	0.98	-	0.98	-	3.83	4.01	-	1.61	1.68	5.07	7.18	0.31	0.01	0.07	0.013	0.09	a
Series 3a	P07	4.70	627	1707	0.62	-	1.18	-	4.13	4.28	-	1.58	1.64	6.09	8.48	0.31	0.15	1.00	0.105	0.70	d	Ingolven
	P08	4.70	629	-	0.50	-	0.70	-	3.15	3.15	-	1.57	1.57	3.59	4.86	0.29	-	-	-	-	-	Ingolven
	P09	4.70	1598	1.36	1.36	0.85	0.85	3.53	3.98	3.98	3.98	1.60	1.80	4.36	6.45	0.30	0.01	0.07	0.010	0.07	a	Meetcabinekant beschermd
Series 3b	P10	4.70	1772	3370	1.54	2.90	0.85	0.85	3.49	3.81	3.89	1.58	1.72	4.39	6.30	0.28	0.05	0.33	0.013	0.09	c	Meetcabinekant beschermd
	P11	4.70	735	4105	0.62	3.52	0.89	0.86	3.54	4.01	3.91	1.56	1.77	4.59	6.72	0.27	0.15	1.00	0.035	0.23	d	Meetcabinekant beschermd
	P12	4.70	2315	2315	2.00	2.00	0.87	0.87	3.52	3.77	3.77	1.57	1.68	4.51	6.37	0.29	0.03	0.20	0.035	0.23	b	Meetcabinekant beschermd
P13	4.70	1365	3680	1.20	3.20	0.90	0.88	3.55	3.80	3.78	1.56	1.67	4.66	6.55	0.27	0.15	1.00	0.065	0.43	d	Meetcabinekant beschermd	

Tabel A.1

- h: Waterstand
- N: Aantal golven
- N<sub>a</sub>: Aantal golven gemiddeld over beschouwde proeven
- H<sub>mo,j,N</sub>: Inkomende significante golfhoopte, gemiddeld over de beschouwde proeven
- T<sub>5,0,j,N</sub>: Golpperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (Inkomend)
- ξ<sub>sp</sub>: Brekerparameter
- F: Stabiliteitsparameter (H<sub>z</sub>/AD) ξ<sub>sp</sub><sup>2,0</sup>
- D: Dikte van de toplaag
- R<sub>N,IF</sub>: Reflectiecoëfficiënt volgens Mansard & Funke
- ZH: Zuilhoogte
- S: Amplitude kattenrug

Lijn	z (m)	x (m)	Opmerking	
1	2.00	0	onderkant steenzetting	
	2.09	0.3		
	2.18	0.6		
2	2.27	0.9		
	2.36	1.2		
3	2.46	1.5		
	2.55	1.8		
4	2.65	2.1		
	2.74	2.4		
5	2.83	2.7		
	2.91	3		
6	3.00	3.3		
	3.10	3.6		
7	3.19	3.9		
	3.28	4.2		
8	3.37	4.5		
	3.47	4.8		
9	3.57	5.1		
	3.66	5.4		
10	3.76	5.7	golfklapzone (streep 9.5-13): 0,5-1m onder de waterlijn	
	3.85	6		
11	3.95	6.3		
	4.04	6.6		
12	4.14	6.9		
	4.23	7.2		
13	4.32	7.5		
	4.42	7.8		
14	4.52	8.1		
	4.62	8.4		
15	4.71	8.7		waterlijn (4.7m)
	4.81	9		
16	4.92	9.3		
	5.01	9.6		
17	5.10	9.9		
	5.20	10.2		
18	5.29	10.5		
	5.39	10.8		
19	5.49	11.1	bovenkant steenzetting	

Tabel A.2 Locatie van lijnen op steenzetting

Meting	x (m)	z (m)	Serie 1	Serie 2	Serie 3
H1	9.5	4.98	9.6	7	*
H2	9.5	4.98	9.5	7	*
H3	7.5	4.32	9.4	6.7	7.1
H4	7.5	4.32	9.5	6.7	7.2
H5	5.5	3.69	9.9	6.9	7.1
H6	5.5	3.69	9.8	6.8	7.1
H7	3.5	3.06	9.2	7	6.9
H8	3.5	3.06	9.4	6.7	7.1
H9	1.5	2.46	9.7	*	*
H10	1.5	2.46	9.4	*	*
Gemiddeld			9.5	6.9	7.1

\*Gedeelte van filter dat niet is aangepast ten opzichte van de laatste serie

Tabel A.3 Gemeten filterdiktes in [cm]

Na Proef1 (Serie 1)		y (m vanaf meetcabinezij)																																			
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25																	
19	5.49	gemiddeld 3-4cm uitspoeling																																			
18.5	5.39																																				
18	5.29																																				
17.5	5.20																																				
17	5.10																																				
16.5	5.01																																				
16	4.92																																				
15.5	4.81																																				
15	4.71																																				
14.5	4.62																																				
14	4.52	onder streep 9 alles vol met inwas (halzij: onder streep 13.5)																																			
13.5	4.42																				2				3				3.5				7				5.5
13	4.32																													13				13.5			
12.5	4.23																													15				18			
12	4.14																				17	4		2					3				15	18		14	
11.5	4.04																													16	15		17.5		19		
11	3.95																													18.5		16					
10.5	3.85																				15	3		2					2				16	15		15.5	
10	3.76																													16		15		16			
9.5	3.66																													16		16					
9	3.57										16		16																								
8.5	3.47										16		16																								
8	3.37										16		16																								
7.5	3.28										16		16																								
7	3.19										16		16																								
6.5	3.10										16		16																								
6	3.00										16		16																								
5.5	2.91										16		16																								

Tabel A.4.1 Uitspoeling (Proef 1, in cm)

Na Proef2 (Serie 1)		y (m vanaf meetcabinezij)																																					
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25																			
19	5.49	gemiddeld 3-4cm uitspoeling																																					
18.5	5.39																																						
18	5.29																																						
17.5	5.20																																						
17	5.10																																						
16.5	5.01																																						
16	4.92																																						
15.5	4.81																																						
15	4.71																																						
14.5	4.62																																						
14	4.52	onder streep 9 alles vol met inwas																																					
13.5	4.42																				5				6.5						7				7				5.5
13	4.32																																14.5	12		9			
12.5	4.23																																15		9				
12	4.14																				16			13					16			16.5		14					
11.5	4.04																													18			17.5		16.5				
11	3.95																				13				15					18			17.5		16.5				
10.5	3.85																													18			17.5		16.5				
10	3.76																				15			12					16			11.5		15.5					
9.5	3.66																													16			11.5		15.5				
9	3.57	7			5					5.5			4.5		4																								
8.5	3.47										5.5			4.5		4																							
8	3.37										5.5			4.5		4																							
7.5	3.28										5.5			4.5		4																							
7	3.19										5.5			4.5		4																							
6.5	3.10										5.5			4.5		4																							
6	3.00										5.5			4.5		4																							
5.5	2.91										5.5			4.5		4																							

Tabel A.4.2 Uitspoeling (Proef 2, in cm)

Na Proef 3 (Serie 1)		y (m vanaf meetcabinezij)																			
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	
19	5.49	boven streep 15: gemiddeld 2-4cm uitspoeling																			
18.5	5.39																				
18	5.29																				
17.5	5.20																				
17	5.10																				
16.5	5.01																				
16	4.92																				
15.5	4.81																				
15	4.71																				
14.5	4.62																				
14	4.52	4	4	3	5	3															
13.5	4.42	7	9	7.5	15	8	6														
13	4.32																				
12.5	4.23																				
12	4.14	16	17.5	17.5	18	18	18														
11.5	4.04																				
11	3.95																				
10.5	3.85																				
10	3.76																				
9.5	3.66																				
9	3.57																				
8.5	3.47	17	15	15	16	16	15.5														
8	3.37																				
7.5	3.28																				
7	3.19												6								
6.5	3.10	onder streep 6 alles vol met inwas																			
6	3.00																				
5.5	2.91																				

Tabel A.4.3 Uitspoeling (Proef 3, in cm)

Na Proef 4 (Serie 2)		y (m vanaf meetcabinezij)																				
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25		
19	5.49	boven streep 15: gemiddeld 2-4cm uitspoeling																				
18.5	5.39																					
18	5.29																					
17.5	5.20																					
17	5.10																					
16.5	5.01																					
16	4.92																					
15.5	4.81																					
15	4.71																					
14.5	4.62																					
14	4.52	2	2	3	3.5	2																
13.5	4.42																					
13	4.32					11	12	9	8	4												
12.5	4.23																					
12	4.14	3	9	14	6	15	16	12	10	2												
11.5	4.04	13.5	7.5	15	16	14	6	16	16													
11	3.95	onder streep 11 alles vol met inwas																				
10.5	3.85																					
10	3.76																					
9.5	3.66																					
9	3.57																					
8.5	3.47																					
8	3.37																					
7.5	3.28																					
7	3.19																					
6.5	3.10																					
6	3.00																					
5.5	2.91																					

Tabel A.4.4 Uitspoeling (Proef 4, in cm)

Na Proef 5 (Serie 2)		y (m vanaf meetcabinezij)																																					
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25																			
19	5.49	boven streep 16: gemiddeld 2-4cm uitspoeling																																					
18.5	5.39																																						
18	5.29																																						
17.5	5.20																																						
17	5.10																																						
16.5	5.01																																						
16	4.92																																						
15.5	4.81	onder streep 11 alles vol met inwas																																					
15	4.71																				4				5.5				4				4.5					4	
14.5	4.62																																						
14	4.52																				5					8			9	13	14		15	8			7	11	
13.5	4.42																																14.5						
13	4.32																				2					2				14				8			13	6	
12.5	4.23																													10							15		
12	4.14																				2					2		2	3					4				4	
11.5	4.04																				onder streep 11 alles vol met inwas																		
11	3.95																																						
10.5	3.85																																						
10	3.76																																						
9.5	3.66																																						
9	3.57																																						
8.5	3.47																																						
8	3.37																																						
7.5	3.28																																						
7	3.19																																						
6.5	3.10																																						
6	3.00																																						
5.5	2.91																																						

Tabel A.4.5 Uitspoeling (Proef 5, in cm)

Na Proef 6 (Serie 2)		y (m vanaf meetcabinezij)																				
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25		
19	5.49	boven streep 16: gemiddeld 3-4cm uitspoeling																				
18.5	5.39																					
18	5.29																					
17.5	5.20																					
17	5.10																					
16.5	5.01																					
16	4.92																					
15.5	4.81	5								6				7					9		7	
15	4.71																					
14.5	4.62	12		10							11				13			12		11		
14	4.52																					
13.5	4.42						15								14.5							
13	4.32	16									17									17		14
12.5	4.23																					
12	4.14			15							16									13.5		16
11.5	4.04	onder streep 10.5 alles vol met inwas																				
11	3.95																					
10.5	3.85																					
10	3.76																					
9.5	3.66																					
9	3.57																					
8.5	3.47																					
8	3.37																					
7.5	3.28																					
7	3.19																					
6.5	3.10																					
6	3.00																					
5.5	2.91																					

Tabel A.4.6 Uitspoeling (Proef 6, in cm)



Na Proef 7 (Serie 2)																				
streep	z	y (m vanaf meetcabinezij)																		
		4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
19	5.49	boven streep 16: gemiddeld 6 - 10cm																		
18.5	5.39																			
18	5.29																			
17.5	5.20																			
17	5.10																			
16.5	5.01																			
16	4.92	17						22		21		19							18	
15.5	4.81				20			14.5				21				19				
15	4.71	17				22				22				18				21.5	19	
14.5	4.62																			
14	4.52	21					21			21										20.5
13.5	4.42																			
13	4.32		21			22									22				22	
12.5	4.23		21			20									19				20	
12	4.14	Kattenrug / schadegebied (inwasmateriaal compleet uitgespoeld)																		
11.5	4.04																			
11	3.95																			
10.5	3.85																			
10	3.76																			
9.5	3.66																			
9	3.57	onder streep 8.5 alles vol met inwas																		
8.5	3.47																			
8	3.37																			
7.5	3.28																			
7	3.19																			
6.5	3.10																			
6	3.00																			
5.5	2.91																			

Tabel A.4.7 Uitspoeling (Proef 7, in cm)

Na Proef 8 (Serie 3)																				
streep	z	y (m vanaf meetcabinezij)																		
		4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
19	5.49	boven streep 16: gemiddeld 3-4cm uitspoeling																		
18.5	5.39																			
18	5.29																			
17.5	5.20																			
17	5.10																			
16.5	5.01																			
16	4.92																			
15.5	4.81																			
15	4.71	4.5				5				4				6						4
14.5	4.62																			
14	4.52	5				6				7				6						5
13.5	4.42									12.5		15.5								
13	4.32	2				4								15						9
12.5	4.23	16										12								
12	4.14	4				2				3		12		4						3
11.5	4.04	onder streep 11 alles vol met inwas																		
11	3.95																			
10.5	3.85																			
10	3.76																			
9.5	3.66																			
9	3.57																			
8.5	3.47																			
8	3.37																			
7.5	3.28																			
7	3.19																			
6.5	3.10																			
6	3.00																			
5.5	2.91																			

Tabel A.4.8 Uitspoeling (Proef 8, in cm)

Na Proef 09 (Serie 3)		y (m vanaf meetcabinezij)																		
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
19	5.39	boven streep 16: gemiddeld 3-5cm																		
18.5	5.29																			
18	5.20																			
17.5	5.10																			
17	5.01																			
16.5	4.92																			
16	4.81																			
15.5	4.71																			
15	4.62																			
14.5	4.52																			
14	4.42	3-9cm uitspoeling																		
13.5	4.32																			
13	4.23																			
12.5	4.14																			
12	4.04																			
11.5	3.95																			
11	3.85																			
10.5	3.76																			
10	3.66																			
9.5	3.57																			
9	3.47	onder streep 10.5 alles vol met inwas																		
8.5	3.37																			
8	3.28																			
7.5	3.19																			
7	3.10																			
6.5	3.00																			
6	2.91																			

Tabel A.4.9 Uitspoeling (Proef 9, in cm)

Na Proef 10 (Serie 3)		y (m vanaf meetcabinezij)																		
streep	z	4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
19	5.49	boven streep 16: gemiddeld 3-5cm (boven streep 14 gemiddeld 5-7.5cm)																		
18.5	5.39																			
18	5.29																			
17.5	5.20																			
17	5.10																			
16.5	5.01																			
16	4.92																			
15.5	4.81																			
15	4.71																			
14.5	4.62																			
14	4.52	Beschermd (<5cm uitspoeling)																		
13.5	4.42																			
13	4.32																			
12.5	4.23																			
12	4.14																			
11.5	4.04																			
11	3.95																			
10.5	3.85																			
10	3.76																			
9.5	3.66																			
9	3.57	onder streep 10.5 alles vol met inwas																		
8.5	3.47																			
8	3.37																			
7.5	3.28																			
7	3.19																			
6.5	3.10																			
6	3.00																			
5.5	2.91																			

Tabel A.4.10 Uitspoeling (Proef 10, in cm)

Na Proef 11 (Serie 3)

streep	z	y (m vanaf meetcabinezij)																		
		4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
19	5.49																			
18.5	5.39	boven streep 18: gemiddeld 3-4cm																		
18	5.29																			
17.5	5.20	7.0	3.8	3.9	6.5	5.6	7.8	5.0												
17	5.10	-	-	-	-	-	-	-												
16.5	5.01	5.8	4.0	4.5	6.0	5.5	5.5	5.5												
16	4.92	-	-	-	-	-	-	-												
15.5	4.81	6.0	3.8	4.5	7.5	5.6	6.3	6.1												
15	4.71	11.1	7.0	13.8	7.0	4.8	7.0	9.3												
14.5	4.62	8.4	9.8	15.6	16.5	16.9	15.8	13.1												
14	4.52	10.3	10.8	15.0	16.0	17.5	16.8	16.0												
13.5	4.42	8.5	16.0	16.8	16.5	14.6	15.5	17.5												
13	4.32	14.3	15.0	15.0	15.0	15.6	15.5	15.4												
12.5	4.23	14.0	16.3	17.0	15.0	19.0	17.5	16.8	Beschermd (<4cm uitspoeling)											
12	4.14	14.1	14.3	16.3	18.0	14.9	13.3	15.4												
11.5	4.04	12.0	15.0	15.0	15.0	11.8	10.3	14.8												
11	3.95	12.8	6.8	6.8	14.7	13.1	11.7	14.1												
10.5	3.85	13.3	12.1	11.7	15.8	8.8	11.3	11.5												
10	3.76	2.8	4.3	4.0	3.7	5.3	5.5													
9.5	3.66	onder streep 9.5 alles vol met inwas																		
9	3.57																			
8.5	3.47																			
8	3.37																			
7.5	3.28																			
7	3.19																			
6.5	3.10																			
6	3.00																			
5.5	2.91																			

Tabel A.4.11 Uitspoeling (Proef 11, in cm)

Na Proef 12 (Serie 3)

streep	z	y (m vanaf meetcabinezij)																		
		4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
19	5.49																			
18.5	5.39	boven streep 18: gemiddeld 3-4cm																		
18	5.29																			
17.5	5.20	7.0	6.3	3.6	6.0	5.9	6.8	4.3												
17	5.10	-	-	-	-	-	-	-												
16.5	5.01	5.0	4.0	3.4	4.5	6.0	5.8	3.6												
16	4.92	-	-	-	-	-	-	-												
15.5	4.81	3.5	3.5	3.9	5.5	4.3	5.0	5.8												
15	4.71																			
14.5	4.62	6.9	5.5	5.3	7.0	6.3	8.5	9.3												
14	4.52	4.9	5.3	6.4	10.0	5.6	4.5	10.5												
13.5	4.42	5.8	6.5	4.6	8.5	9.1	7.5	13.4												
13	4.32	9.1	8.0	6.1	6.0	12.6	6.8	11.0												
12.5	4.23	10.7	12.8	14.6	14.0	13.5	11.0	12.8	Beschermd (<4cm uitspoeling)											
12	4.14	13.0	10.2	9.6	12.5	11.5	13.5	11.5												
11.5	4.04	12.4	7.9	12.4	16.9	10.4	14.9	13.7												
11	3.95	5.4	7.0	8.2	9.2	12.3	7.2	13.6												
10.5	3.85	9.2	6.4	10.8	8.5	14.7	13.0	8.9												
10	3.76	4.7	7.3	6.2	2.4	4.8	7.4	8.2												
9.5	3.66	onder streep 9.5 alles vol met inwas																		
9	3.57																			
8.5	3.47																			
8	3.37																			
7.5	3.28																			
7	3.19																			
6.5	3.10																			
6	3.00																			
5.5	2.91																			

Tabel A.4.12 Uitspoeling (Proef 12, in cm)

Na Proef 13 (Serie 3)

streep	z	y (m vanaf meetcabinezij)																		
		4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
19	5.49	boven streep 18.5: gemiddeld 3-4cm																		
18.5	5.39	3.6	4.3	5.3	7	4.1	4.3	6.3	9		3		3		4		4			
18	5.29																			
17.5	5.20	5.6	4.3	5.1	5.0	5.5	7.5	5.4	3		5.5		4		6.5		6.5			
17	5.10																			
16.5	5.01	4.6	3.8	3.3	5.0	5.3	6.5	5.9	9		6		6.5		6		4		7	
16	4.92																			
15.5	4.81	4.8	4.5	4.6	6.5	5.9	4.8	4.0	8.5	11	6	6	10.5	11	8	5	8	-	-	-
15	4.71				6.0															
14.5	4.62	9.8	8.0	12.3	13.0	15.4	14.8	13.0												
14	4.52	6.3	11.3	16.3	15.5	14.9	15.8	15.1												
13.5	4.42	11.6	13.3	14.9	14.0	15.6	15.3	14.1												
13	4.32	12.8	16.3	14.9	16.5	15.4	15.3	15.5												
12.5	4.23	11.6	11.3	15.4	17.0	16.5	13.8	14.4												
12	4.14	14.4	15.8	16.0	20.0	20.8	14.5	12.4												
11.5	4.04	11.1	8.3	10.6	15.5	8.3	13.0	14.0												
11	3.95	6.1	9.5	5.7	12.0	8.6	9.5	13.8												
10.5	3.85	7.2	8.5	7.5	10.5	7.8	8.3	10.6												
10	3.76	4.9	3.0	12.0	7.0	5.5	3.8	6.1												
9.5	3.66	onder streep 9.5 alles vol met inwas																		
9	3.57																			
8.5	3.47																			
8	3.37																			
7.5	3.28																			
7	3.19																			
6.5	3.10																			
6	3.00																			
5.5	2.91																			

Tabel A.4.13 Uitspoeling (Proef 13, in cm)

nr	Gewicht boven water (kg)	Gewicht onder water (kg)	Dichtheid (kg/m <sup>3</sup> )
1	6,190	3,495	2297
2	6,650	3,751	2294
3	6,620	3,735	2295
4	8,170	4,585	2279
5	6,270	3,539	2296
6	3,509	1,975	2287
7	3,935	2,219	2292
8	5,208	2,950	2306
9	5,122	2,895	2300
10	4,959	2,798	2295
11	5,496	3,080	2275
12	3,487	1,948	2265
13	3,497	1,994	2326
gemiddeld			2293

Tabel A.5 Gemeten soortelijke massa zuilen [kg/m<sup>3</sup>]

Test	Wrijvingshoek $\varphi$ [°]	Wrijvingscoëfficiënt f [-]
1	32.95	0.65
2	33.64	0.67
3	32.80	0.64
4	34.19	0.68
5	32.61	0.64
6	33.39	0.66
7	31.83	0.62
8	32.65	0.64
9	30.72	0.59
10	29.48	0.57
11	30.00	0.58
Gemiddeld	32.20	0.63

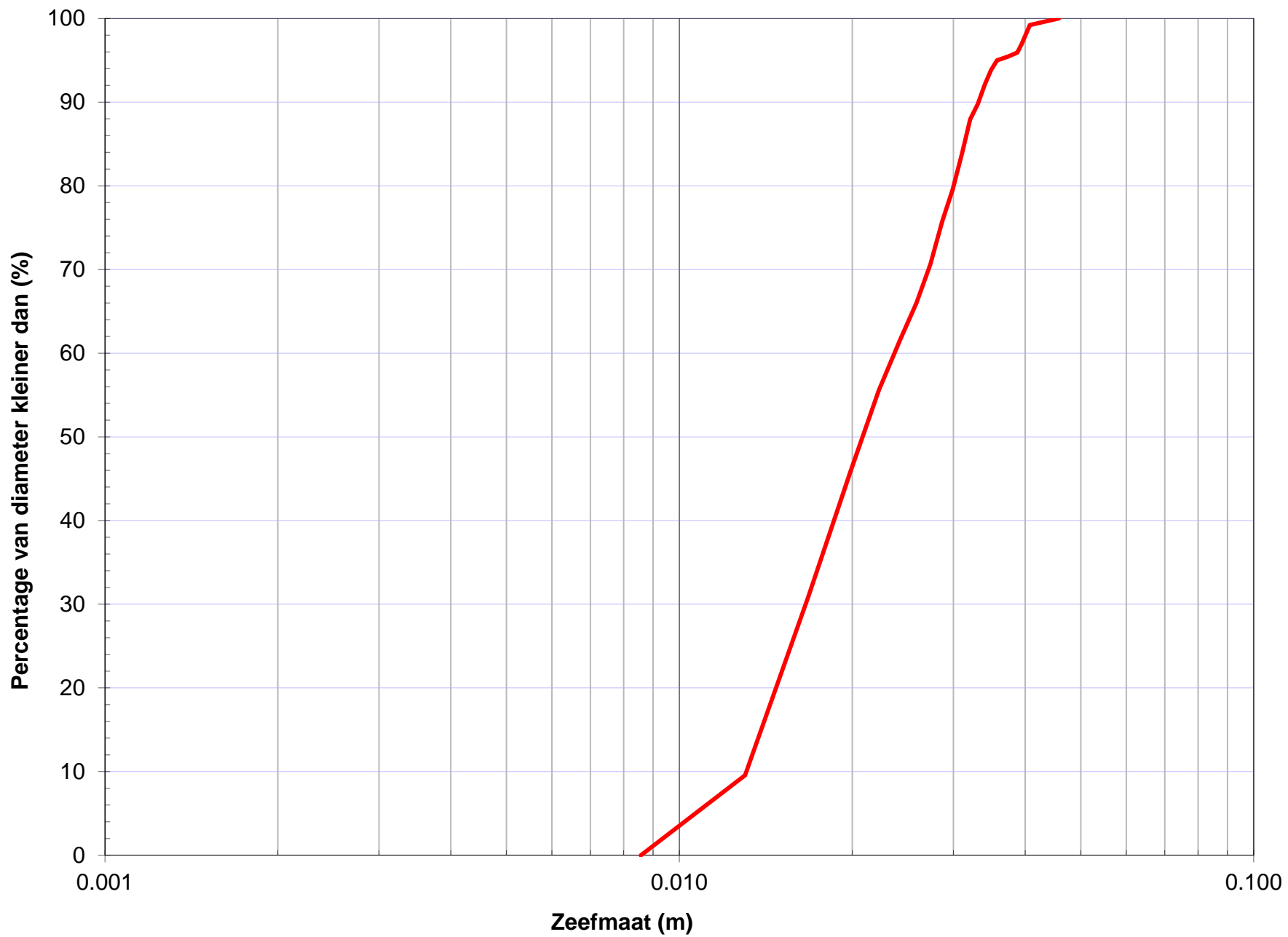
Tabel A.6 Wrijvingscoëfficiënten



## **B Zeefkrommes**





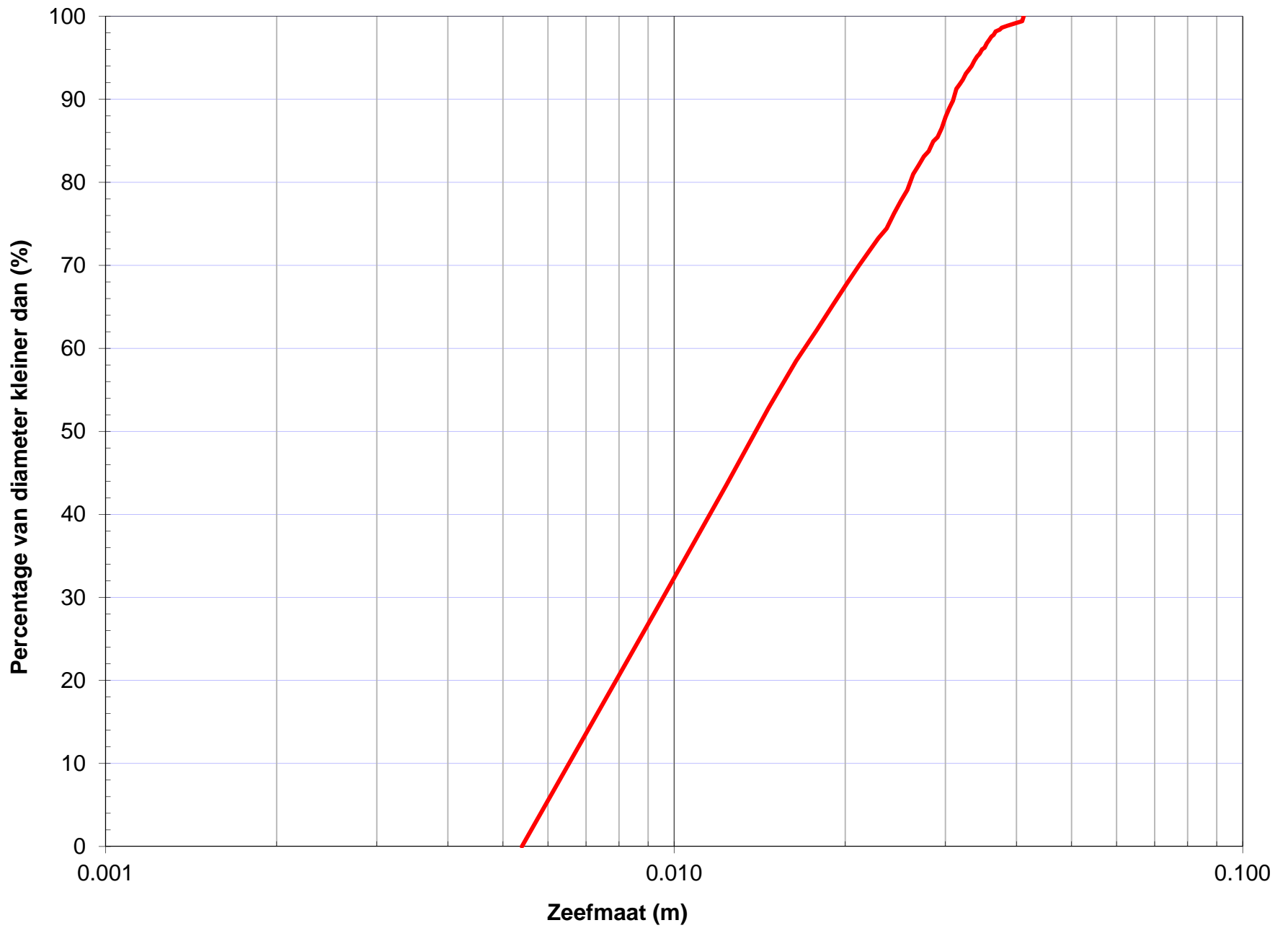


Zeefkromme filter (Serie 1)

Deltares

1208618

Fig. B.1



Zeefkromme filter (Serie 2)

Deltares

1208618

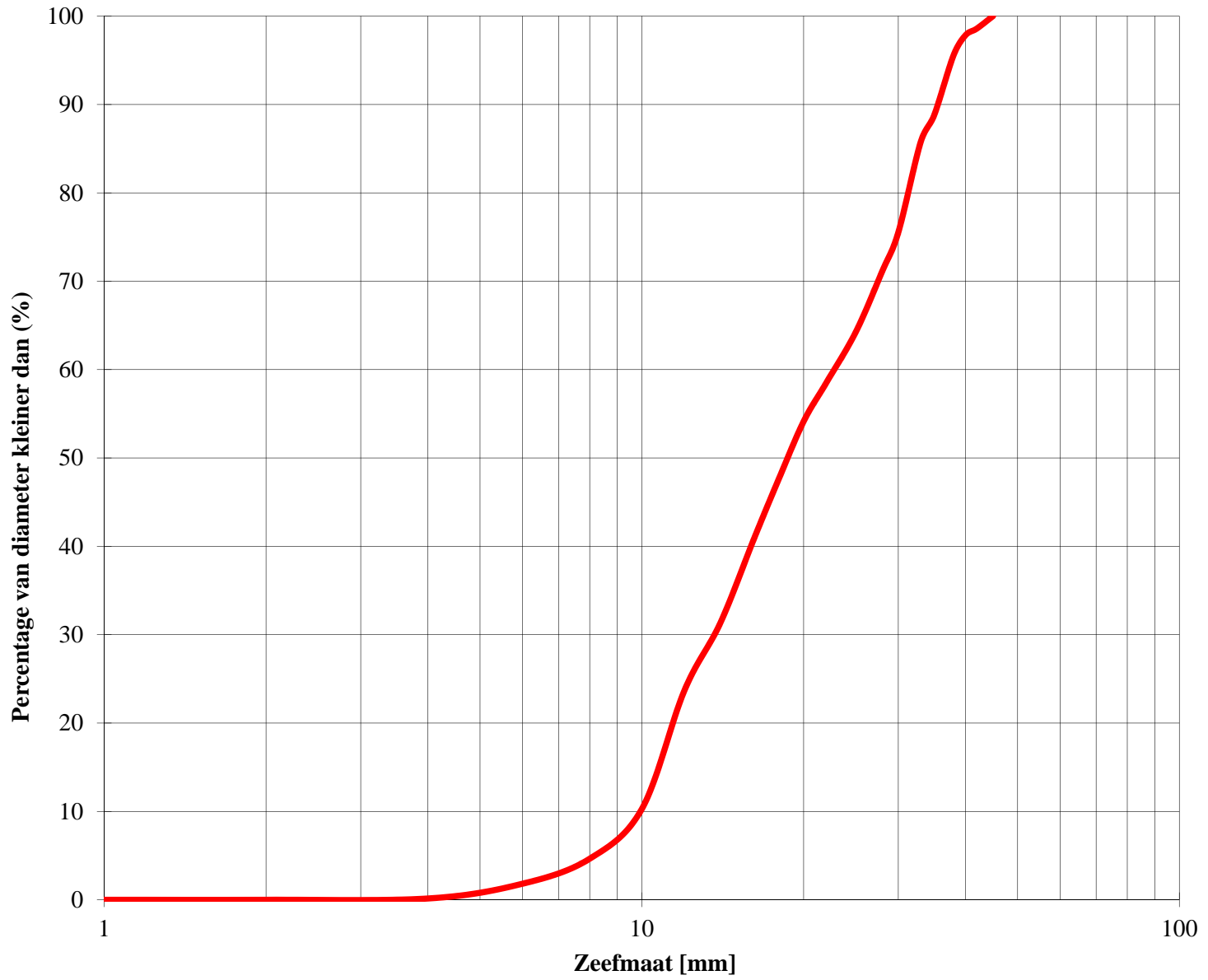
Fig. B.2

Zeefkromme filter (Serie 3)

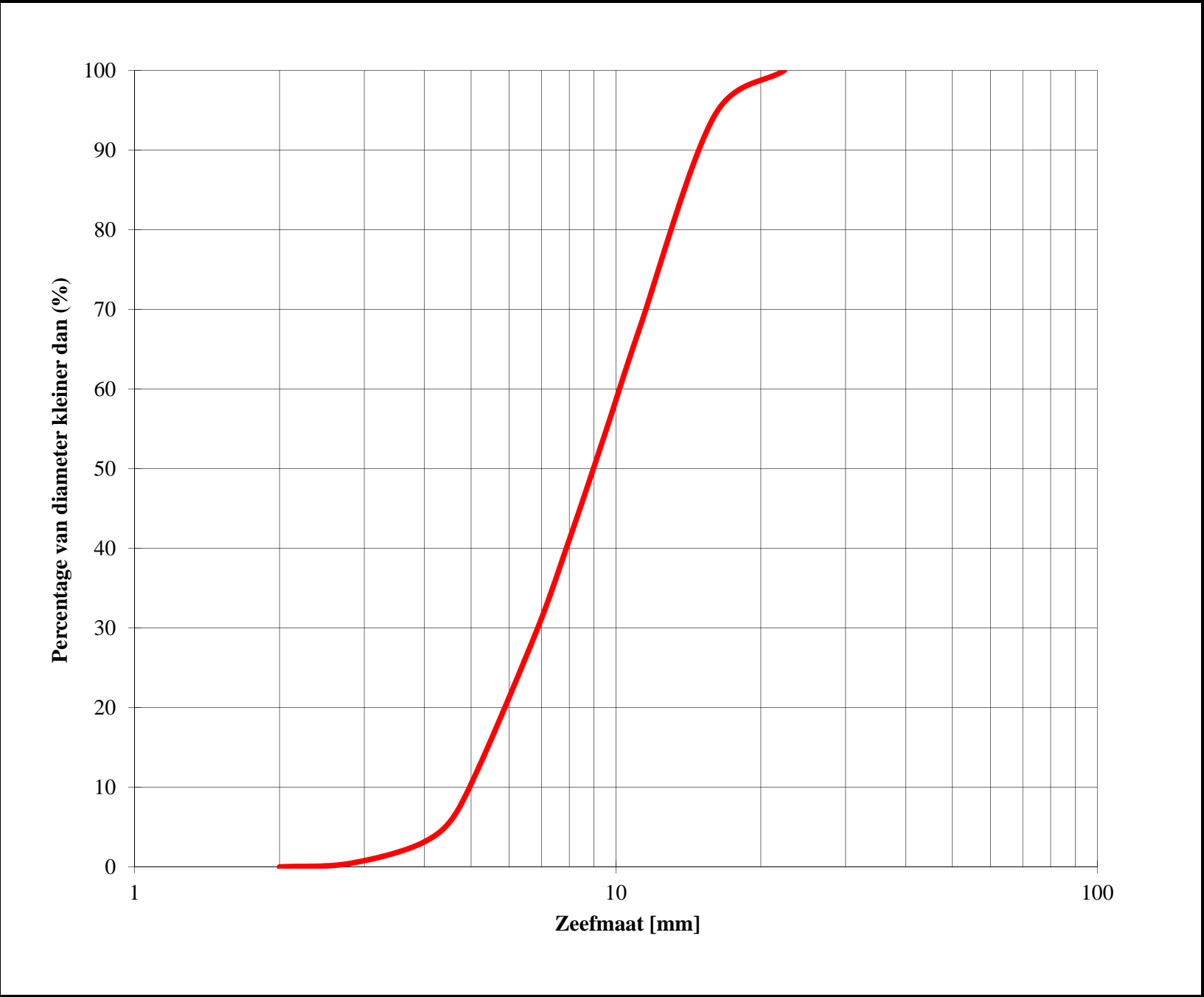
Deltares

1208618

Fig. B.3



<b>Deltares</b>		<b>Zeefkromme inwasmateriaal (Serie 1)</b>	
<b>1208618</b>			
<b>Fig. B.4</b>			

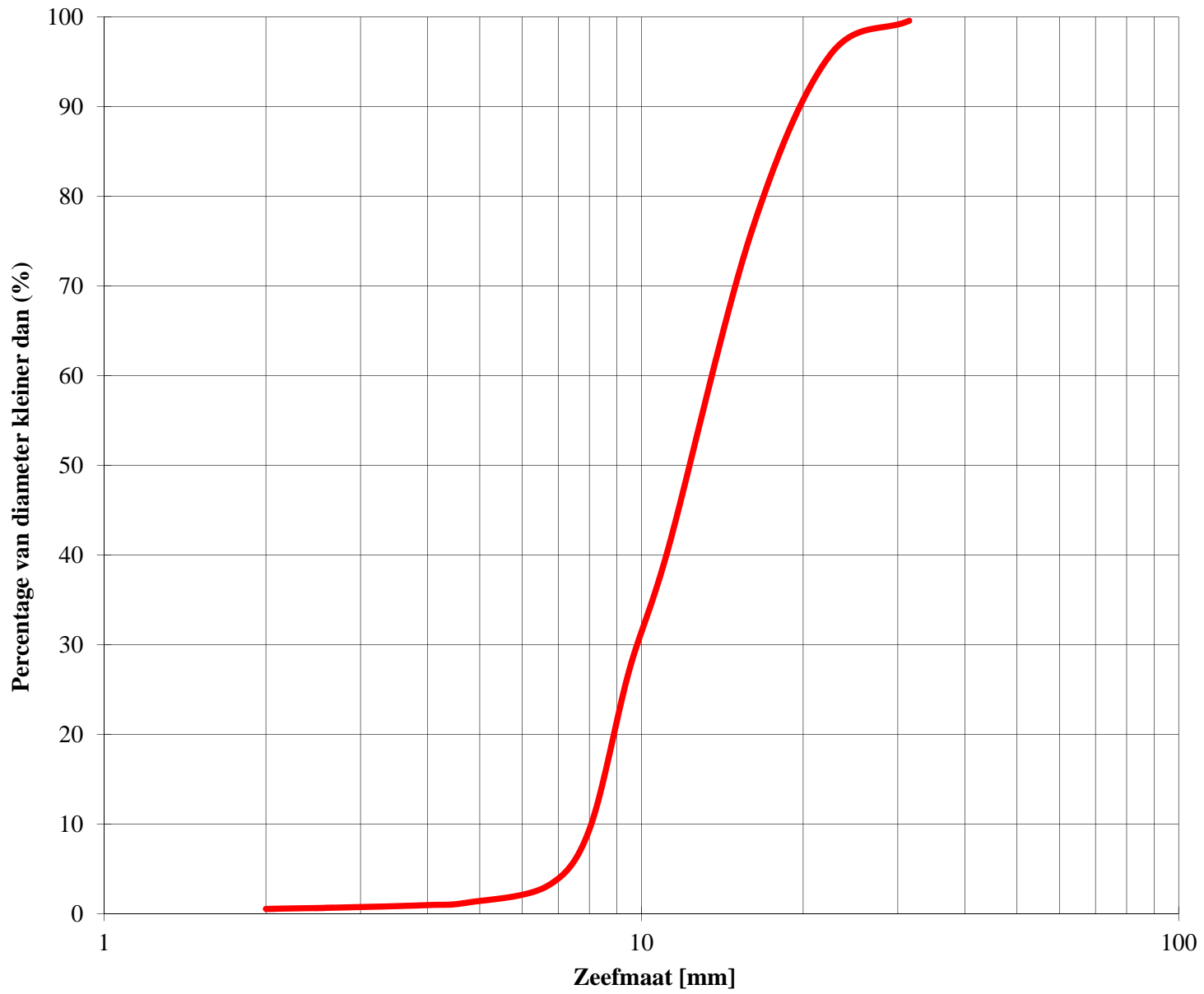


Zeefkromme inwasmateriaal (Serie 2 en 3, basaltsplit)

Deltares

1208618

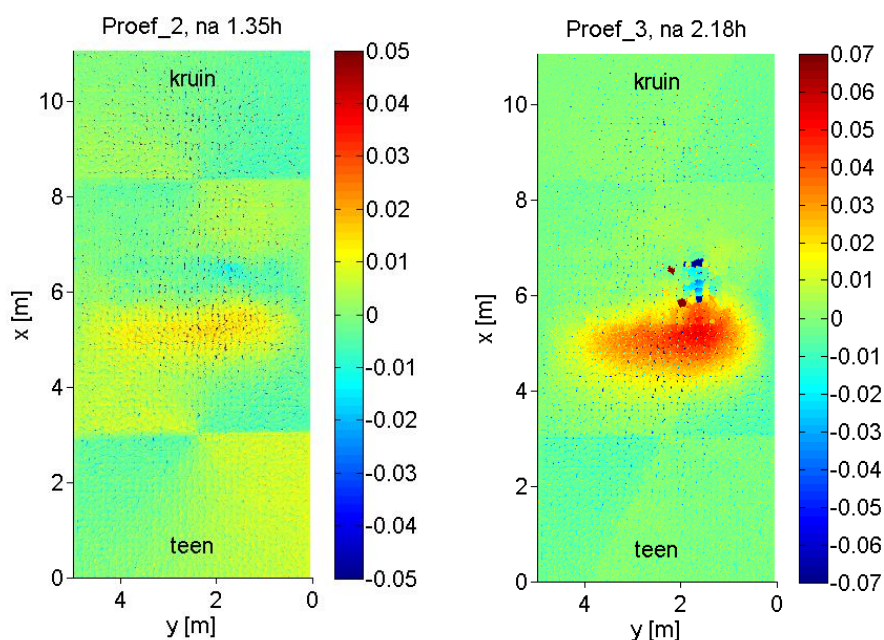
Fig. B.5



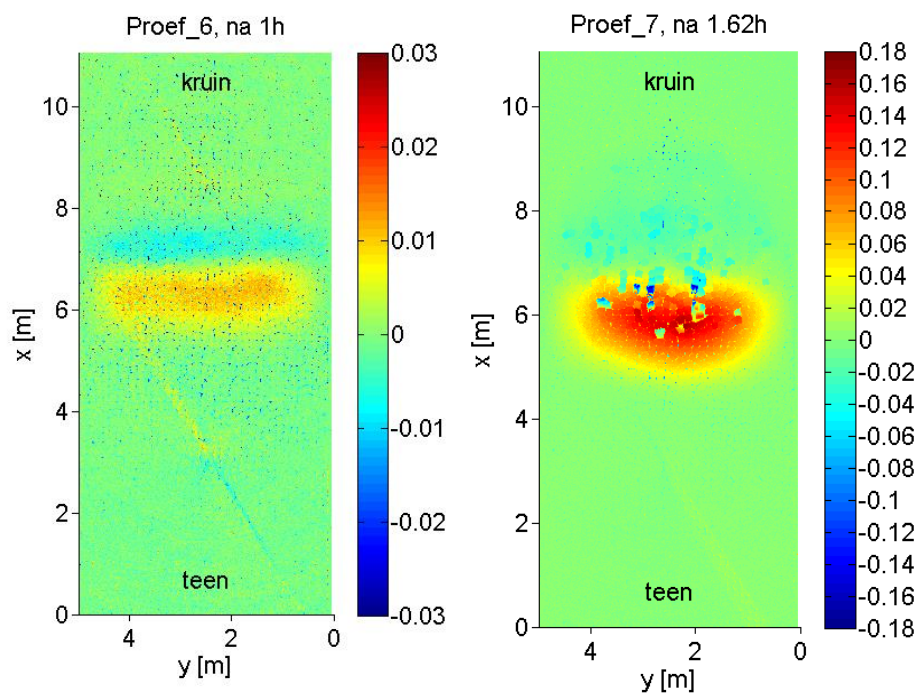


## C Lasermetingen en dwarsprofielen

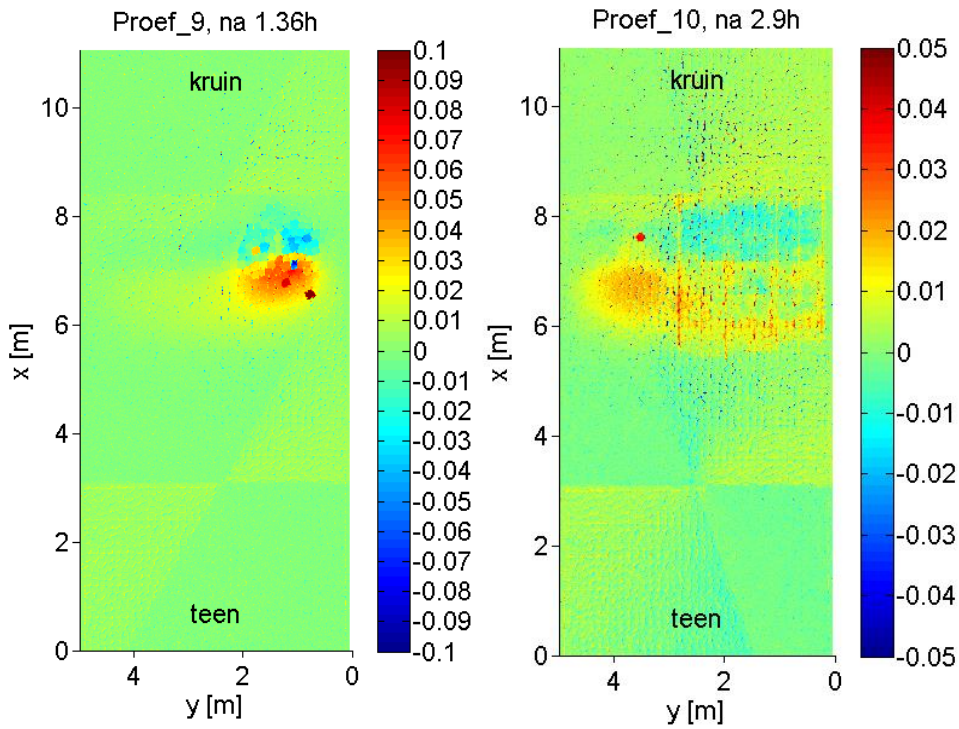
### C.1 Lasermetingen



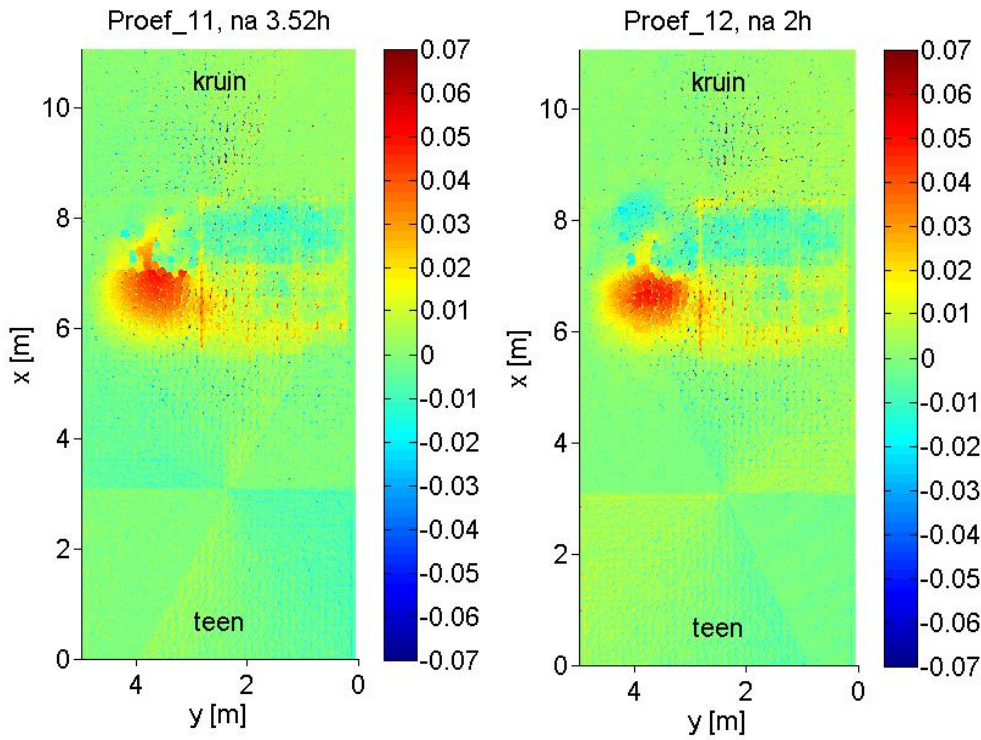
Figuur C.1 Vervorming na Proef 2 en Proef 3 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 1)  
( $x$ = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant;  $y$ =lengte in gootdwarsrichting gemeten van meetcabinezijde; legenda in [cm])



Figuur C.2 Vervorming na Proef 6 en Proef 7 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 5)

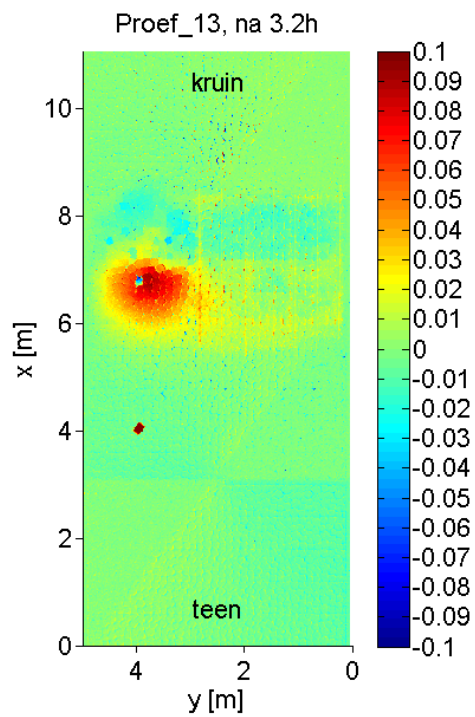


Figuur C.3 Vervorming na Proef 9 en Proef 10 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef 8)



Figuur C.4 Vervorming na Proef 11 en Proef 12 ten opzichte van het referentieprofiel (voor Proef 8 en voor Proef 12)



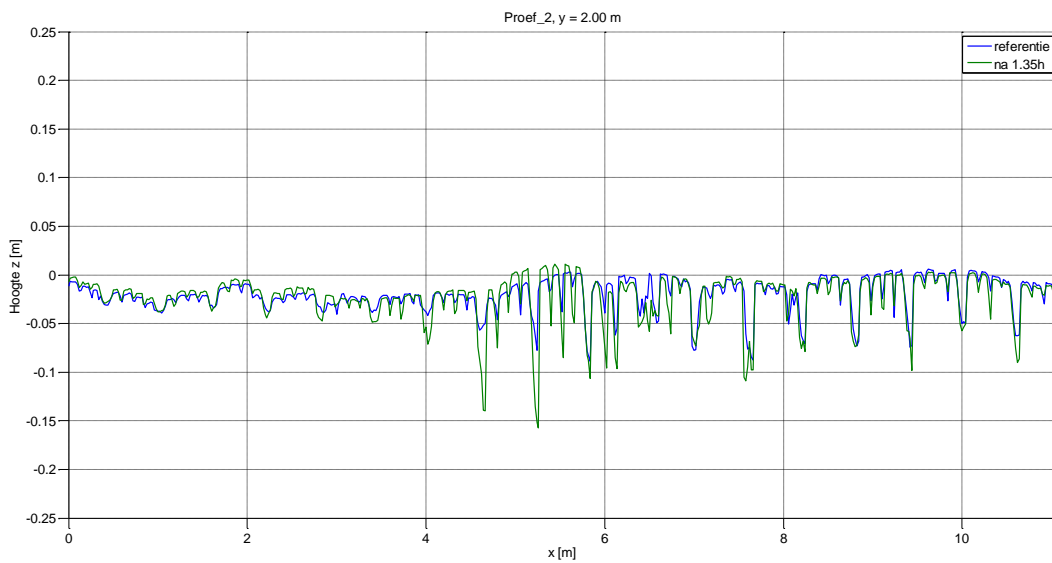


Figuur C.5 Vervorming na Proef 13 ten opzichte van het referentieprofiel (voor Proef 12)

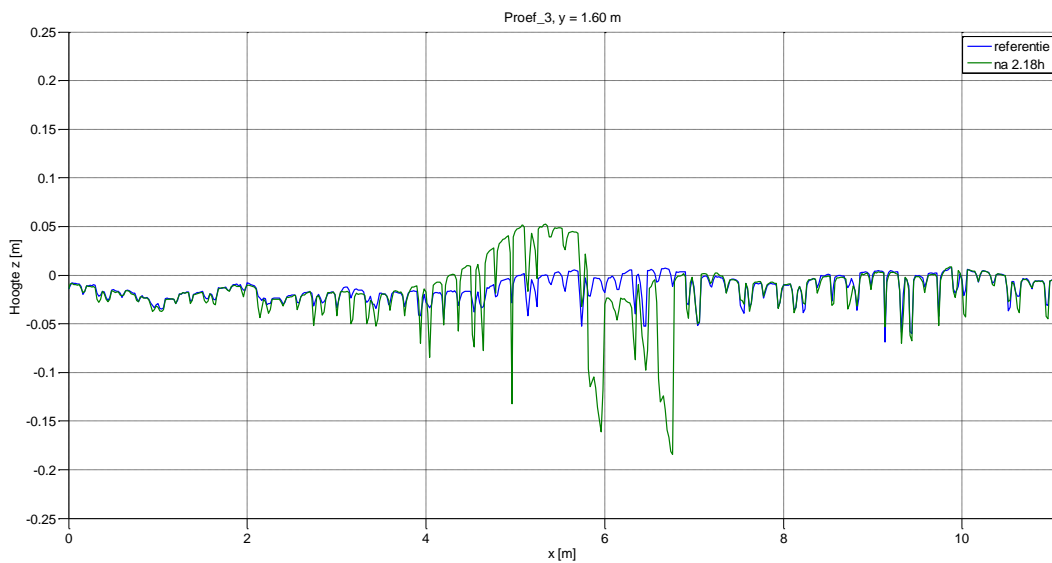
## C.2 Dwarsprofielen

In deze Appendix is de vervorming van de meest vervormde raai (S-profiel) ten opzichte van het referentieprofiel (na de ingolfproef) weergegeven na elke Proef. Dit is nader toegelicht in paragraaf 4.5.

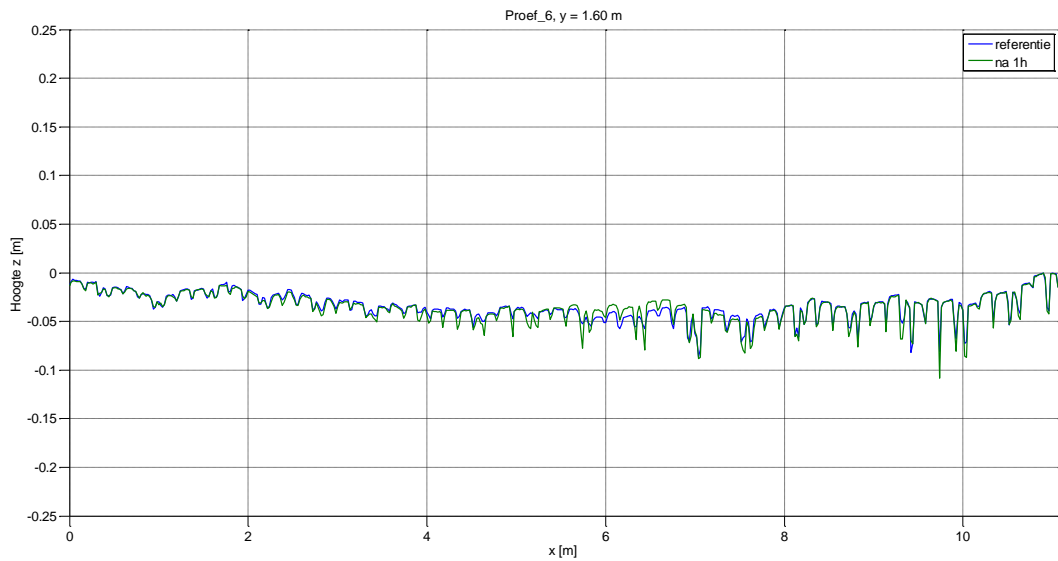
Steeds is eerst de taludhelling van de registraties afgetrokken, en daarna is de lijn voor de figuur gegenereerd.



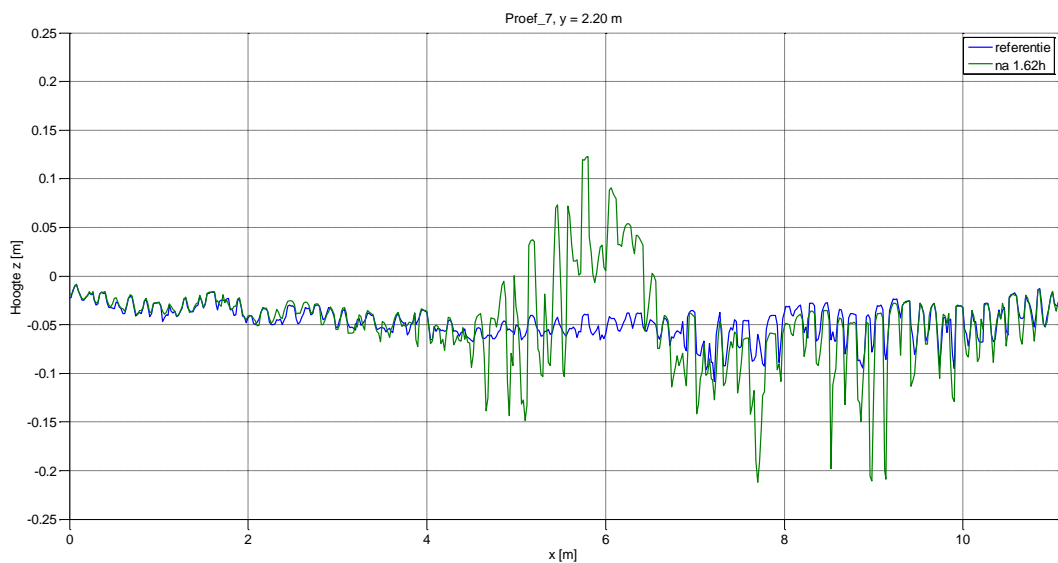
Figuur C.6 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 2 ( $y=2.00\text{m}$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



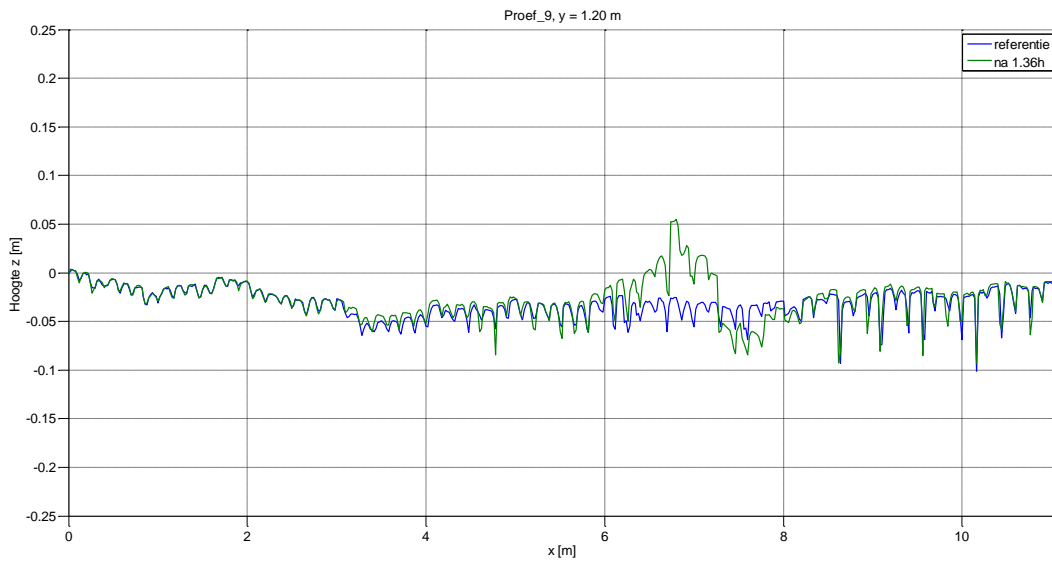
Figuur C.7 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 3 ( $y=1.60\text{m}$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



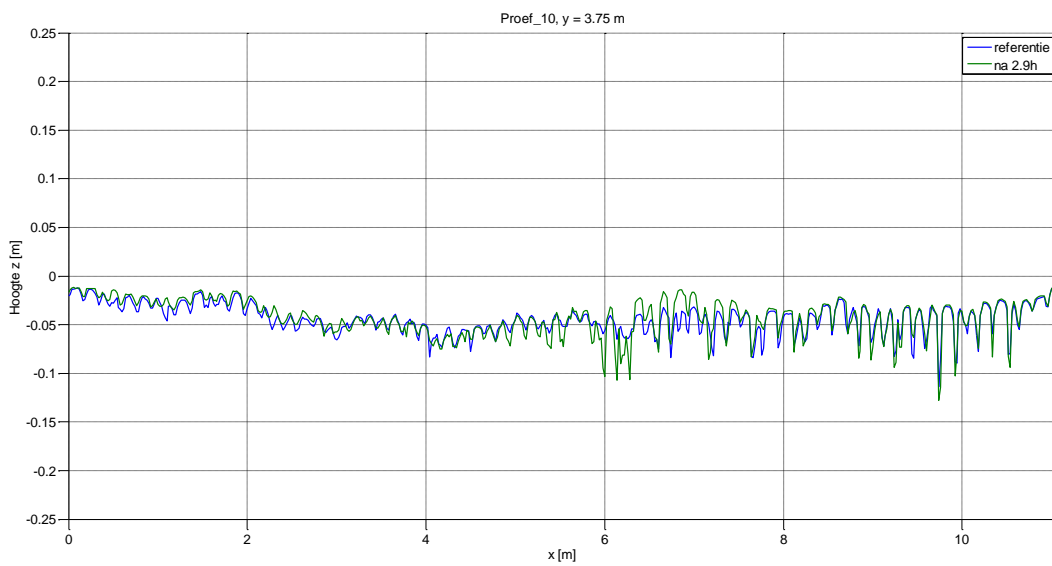
Figuur C.8 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 6 ( $y=1.60\text{ m}$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



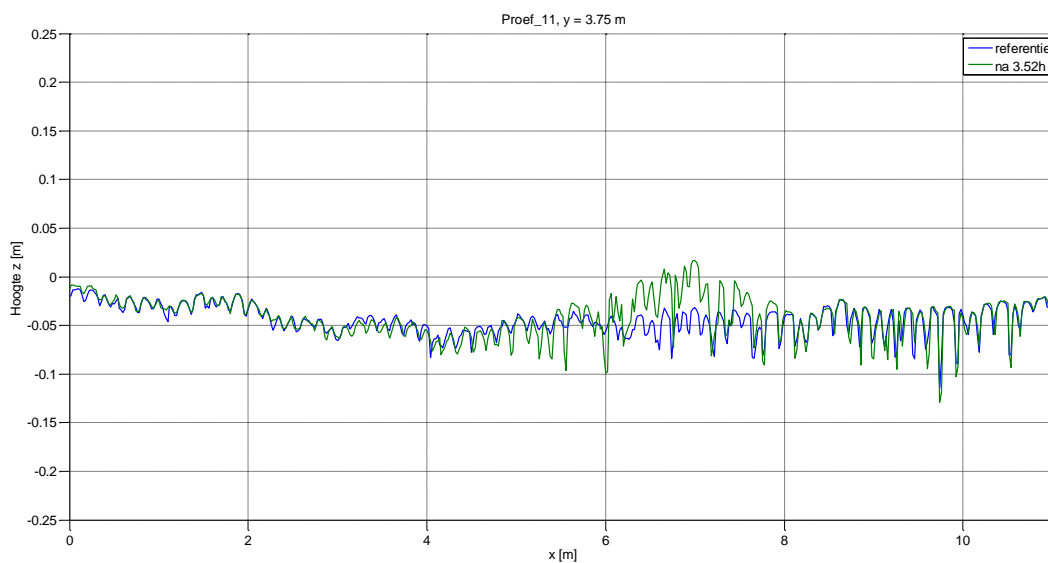
Figuur C.9 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 7 ( $y=2.20\text{ m}$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



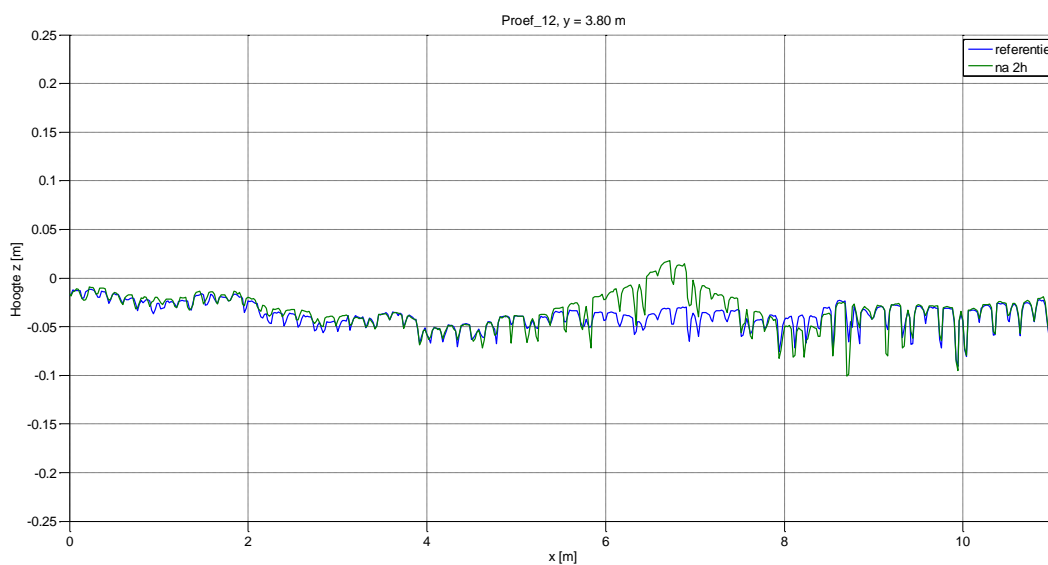
Figuur C.10 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 9 ( $y=1.20\text{ m}$ ) (schade alleen op meetcabinezijde; geen schade halzijde) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



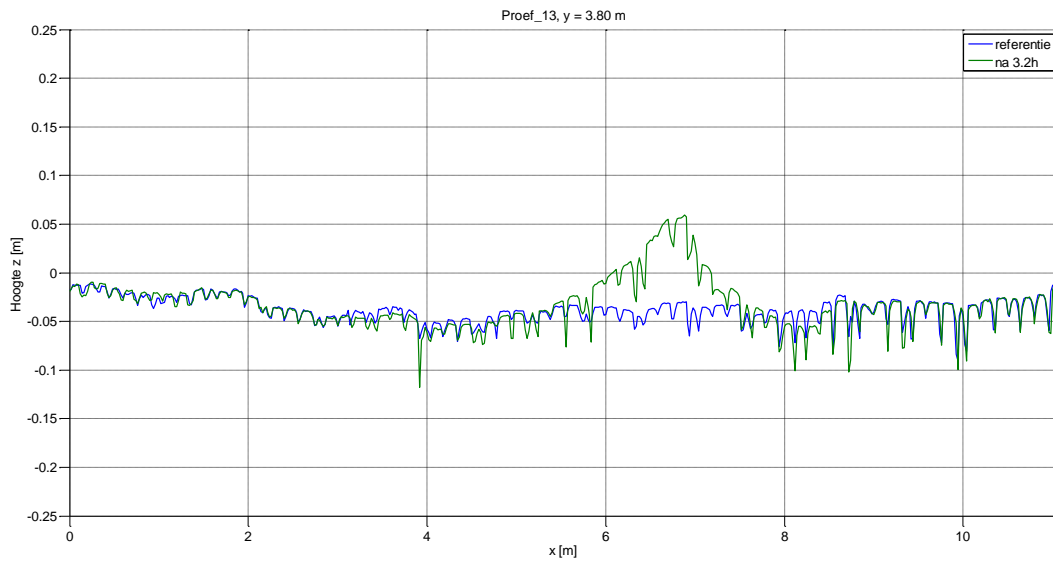
Figuur C.11 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 10 ( $y=3.75\text{ m}$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



Figuur C.12 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 11 ( $y=3.75m$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



Figuur C.13 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 12 ( $y=3.80m$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud

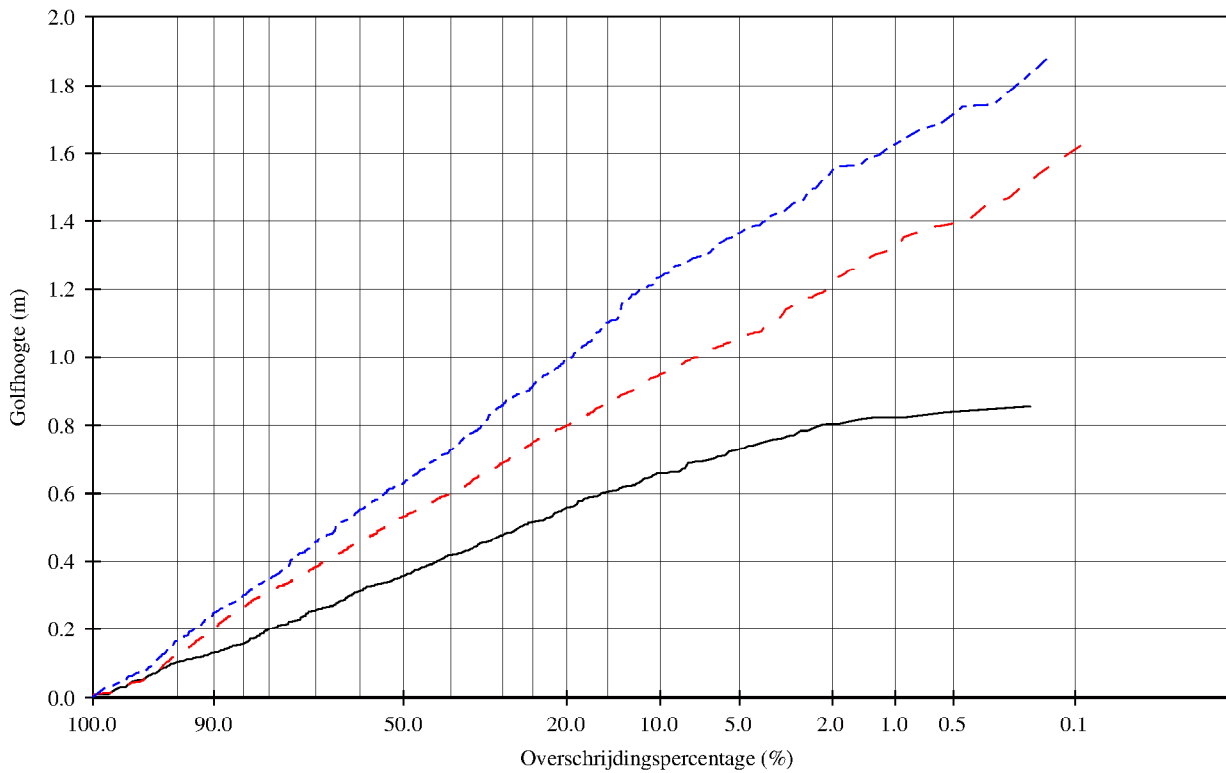


Figuur C.14 Hoogte van het taludoppervlak na Proef 13 ( $y=3.8m$ ) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud

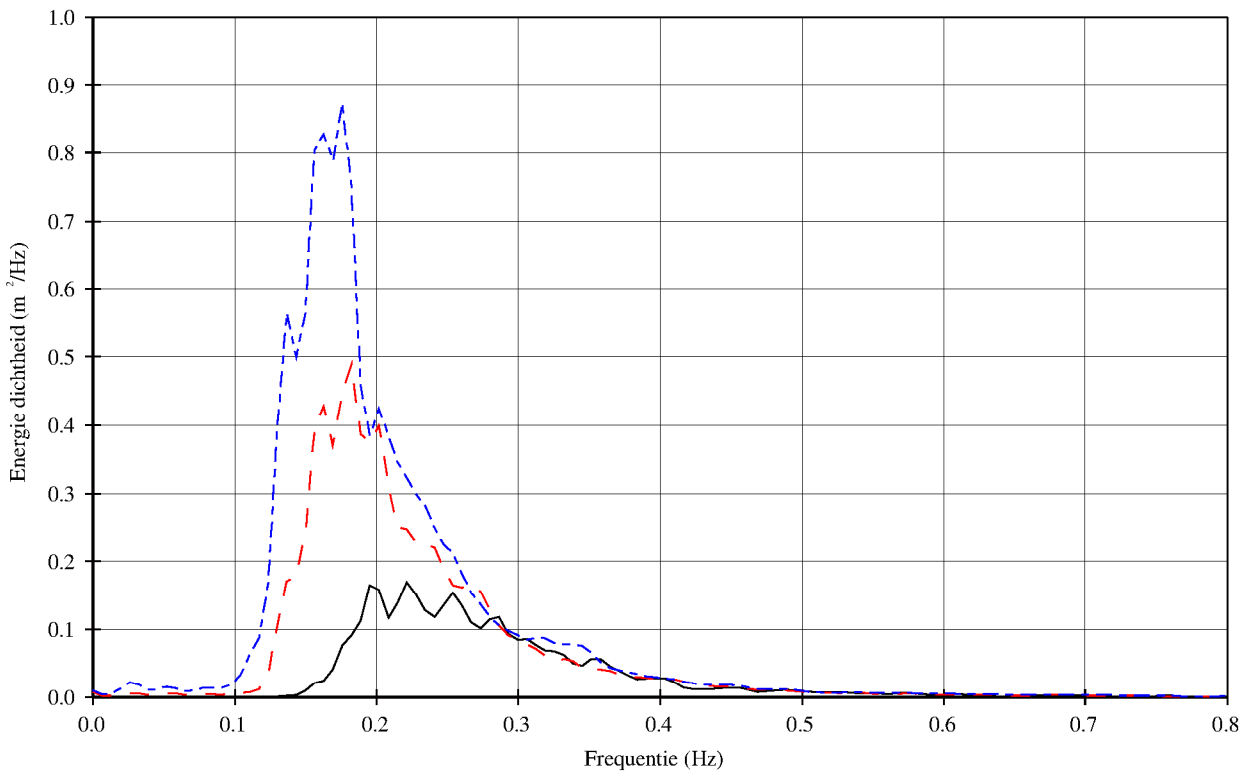
## **D Overschrijdingskrommes golfhoogte**







- Serie 1 P01 ( $H_{m0} = 0.60$  m) ( $T_p = 4.40$  s) ( $w.s = 4.55$  m)
- - - Serie 1 P02 ( $H_{m0} = 0.90$  m) ( $T_p = 5.37$  s) ( $w.s = 4.70$  m)
- - - Serie 1 P03 ( $H_{m0} = 1.10$  m) ( $T_p = 5.94$  s) ( $w.s = 4.70$  m)

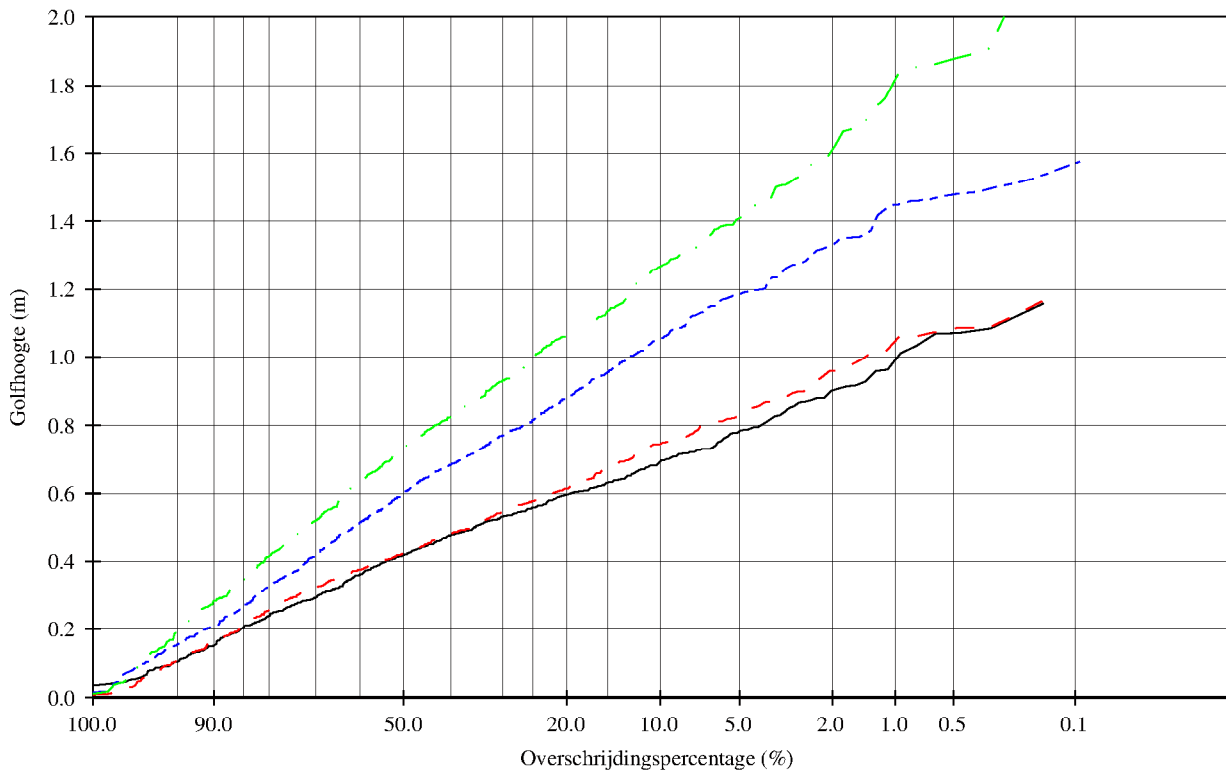


Wave height exceedance curves and energy density spectra

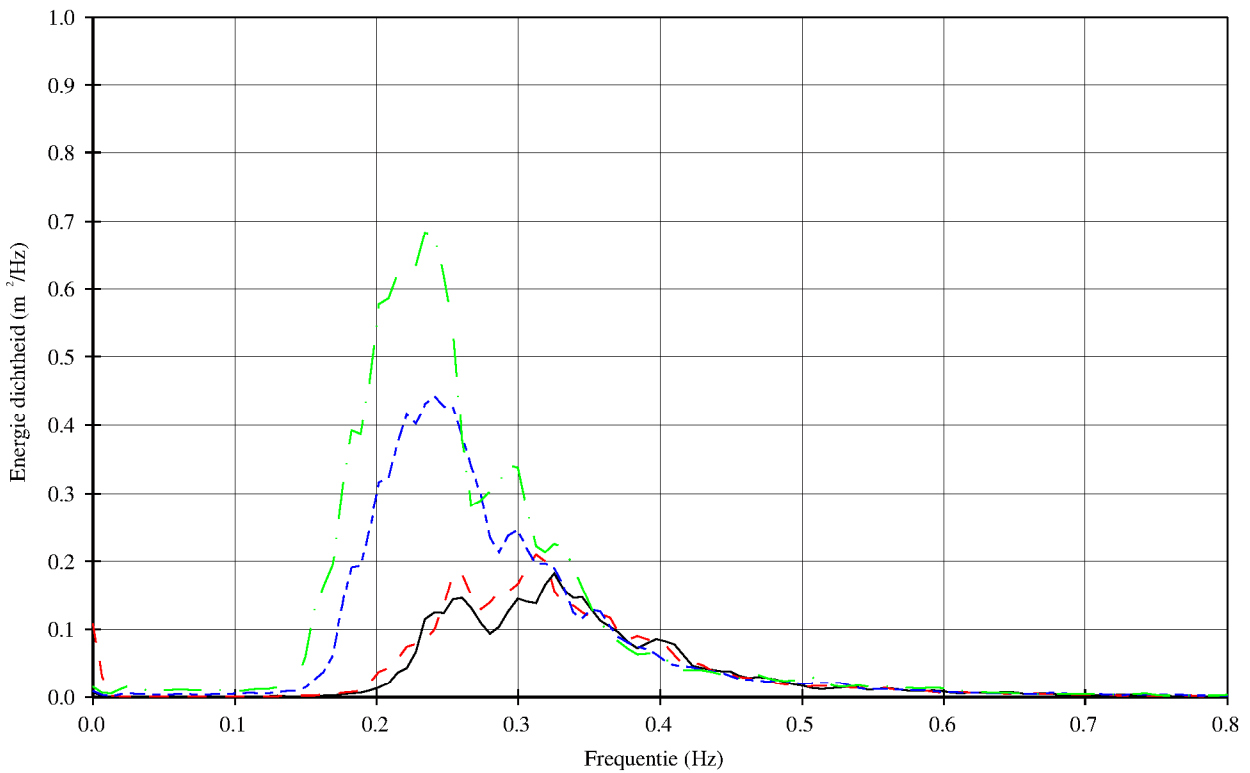
Inkomend

Deltares

1208618.007 FIG. D.1



- Serie 2 P04 (Hm0 = 0.70 m) (Tp = 3.35 s) (w.s = 4.55 m)
- - - Serie 2 P05 (Hm0 = 0.70 m) (Tp = 3.35 s) (w.s = 4.70 m)
- - - Serie 2 P06 (Hm0 = 1.00 m) (Tp = 4.00 s) (w.s = 4.70 m)
- · - Serie 2 P07 (Hm0 = 1.20 m) (Tp = 4.40 s) (w.s = 4.70 m)

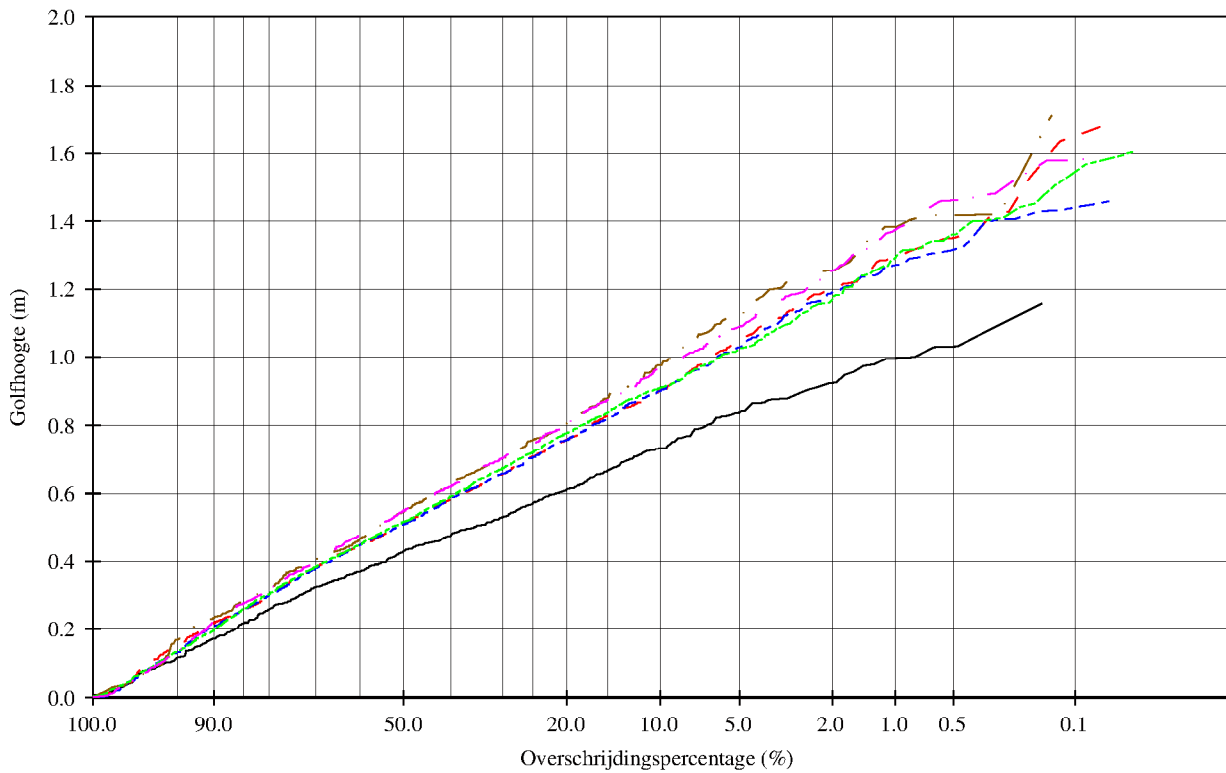


Wave height exceedance curves and energy density spectra

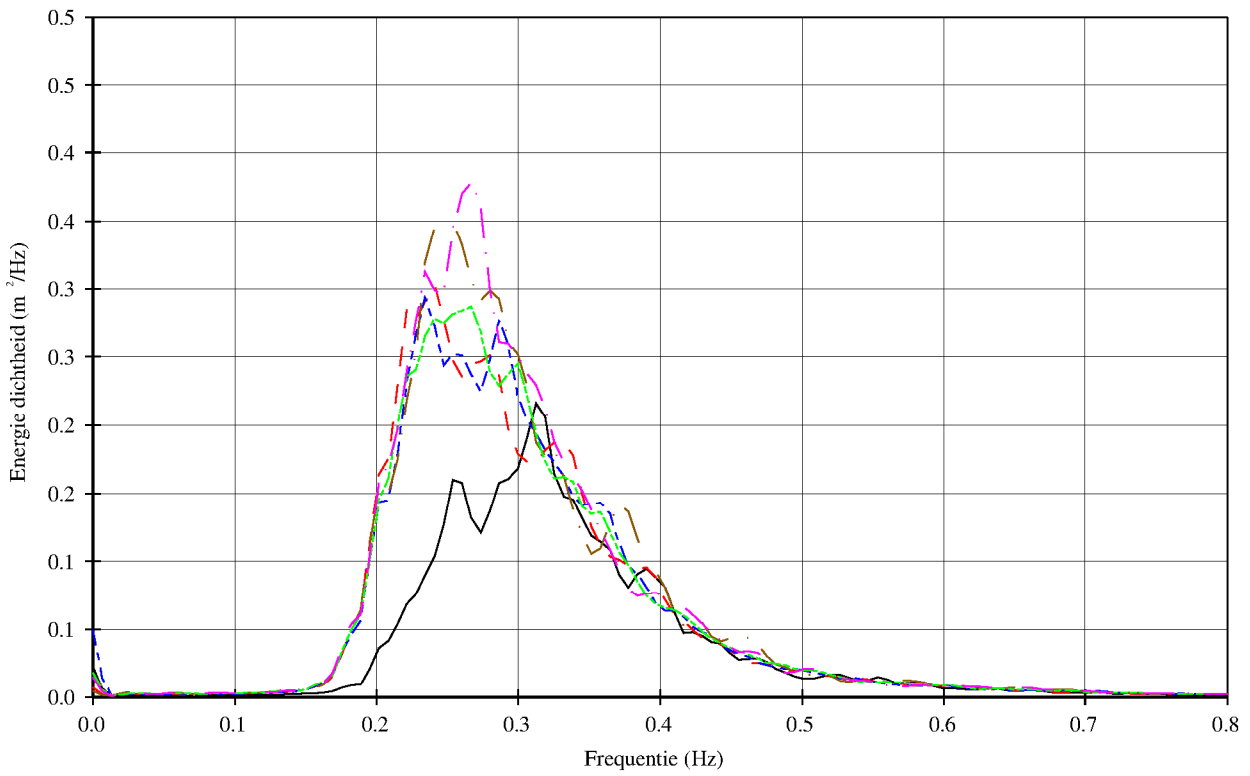
Inkomend

Deltares

1208618.007 FIG. D.2



- Serie 3 P08 ( $H_{m0} = 0.90$  m) ( $T_p = 3.35$  s) ( $w.s = 4.70$  m)
- - - Serie 3 P09 ( $H_{m0} = 0.90$  m) ( $T_p = 3.80$  s) ( $w.s = 4.70$  m)
- - - Serie 3 P10 ( $H_{m0} = 0.90$  m) ( $T_p = 3.80$  s) ( $w.s = 4.70$  m)
- · - Serie 3 P11 ( $H_{m0} = 0.90$  m) ( $T_p = 3.80$  s) ( $w.s = 4.70$  m)
- · - Serie 3 P12 ( $H_{m0} = 0.90$  m) ( $T_p = 3.80$  s) ( $w.s = 4.70$  m)
- · - Serie 3 P13 ( $H_{m0} = 0.90$  m) ( $T_p = 3.80$  s) ( $w.s = 4.70$  m)



Wave height exceedance curves and energy density spectra

Inkomend

Deltares

1208618.007 FIG. D.3

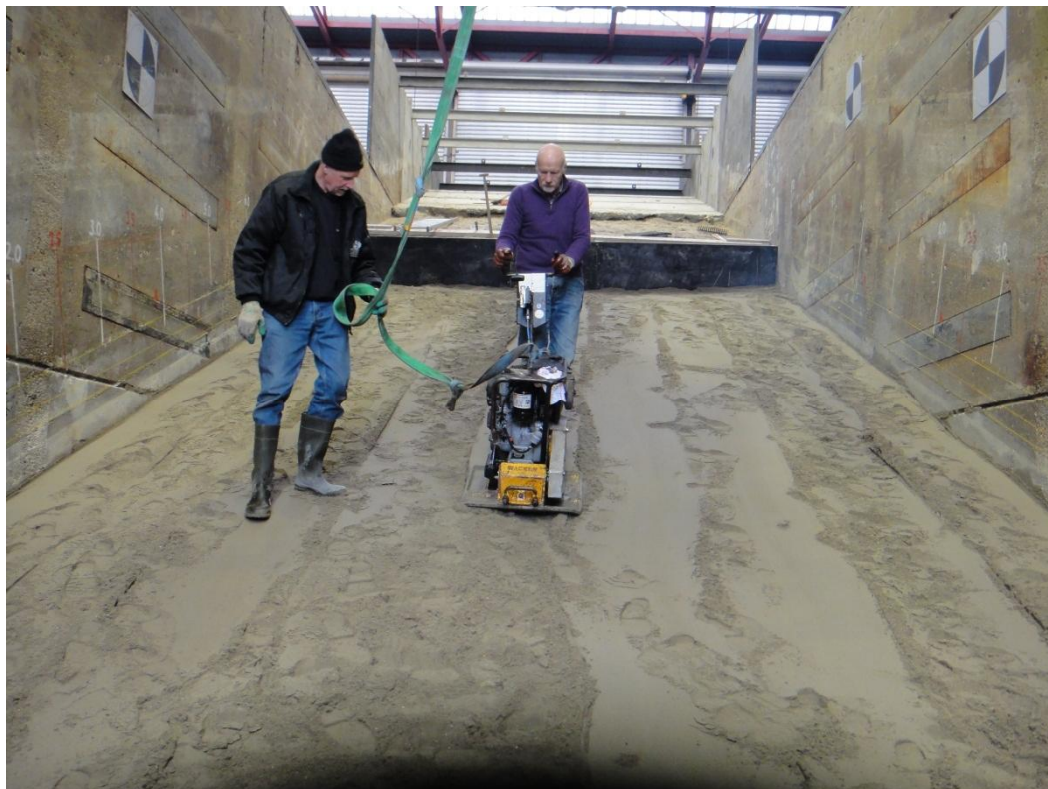


## **E Foto's**





a) Opbouw model: aanbrengen zandcementstabilisatie



b) Opbouw model: aanbrengen zandcementstabilisatie

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

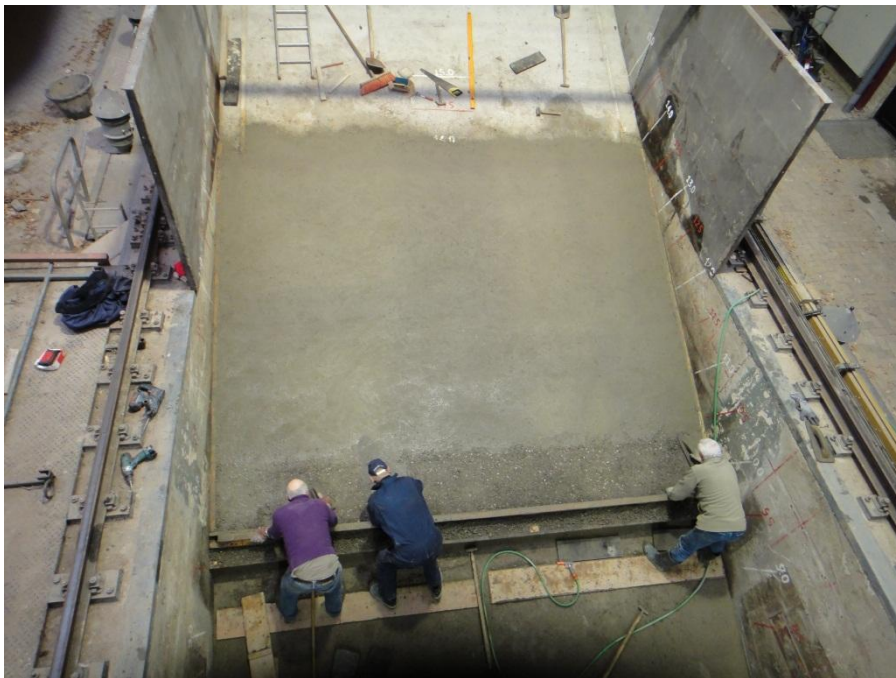
**DELTA****RES**

**1208618**

**Foto 1**



a) Opbouw model: zandcementstabilisatie klaar



b) Opbouw model: afwerken bovenkant talud

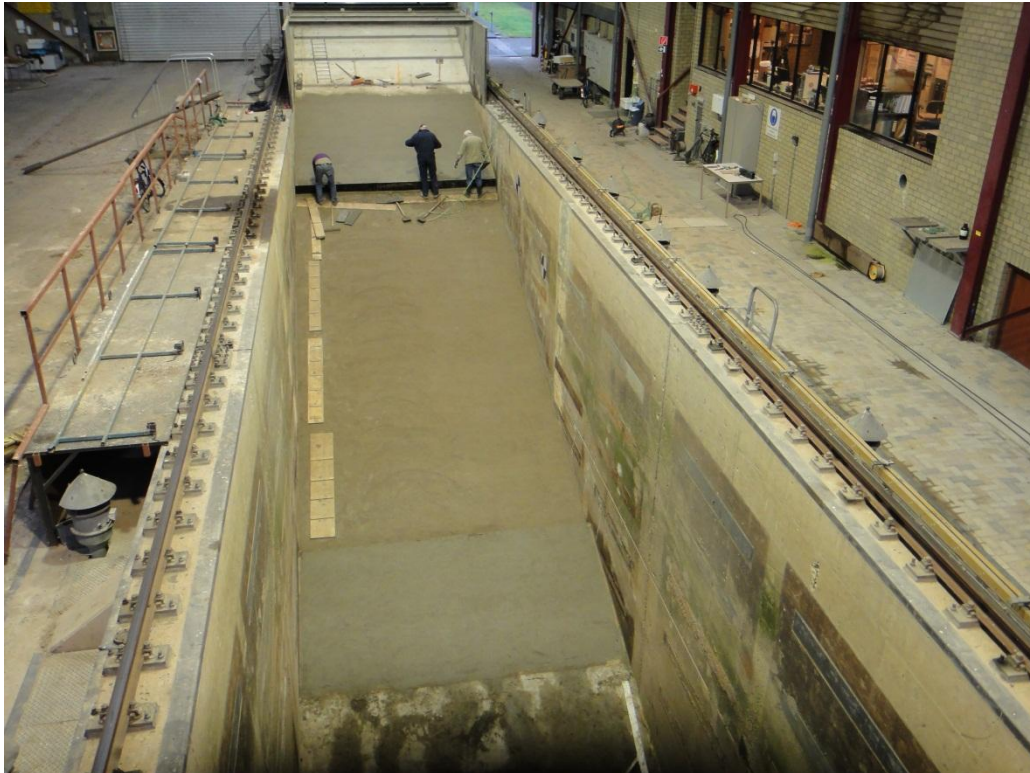
Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 2**





a) Opbouw model: afwerken boven- en onderkant talud



b) Opbouw model: plaatsen van geotextiel

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 3**



a) Opbouw model: aanbrengen filterlaag



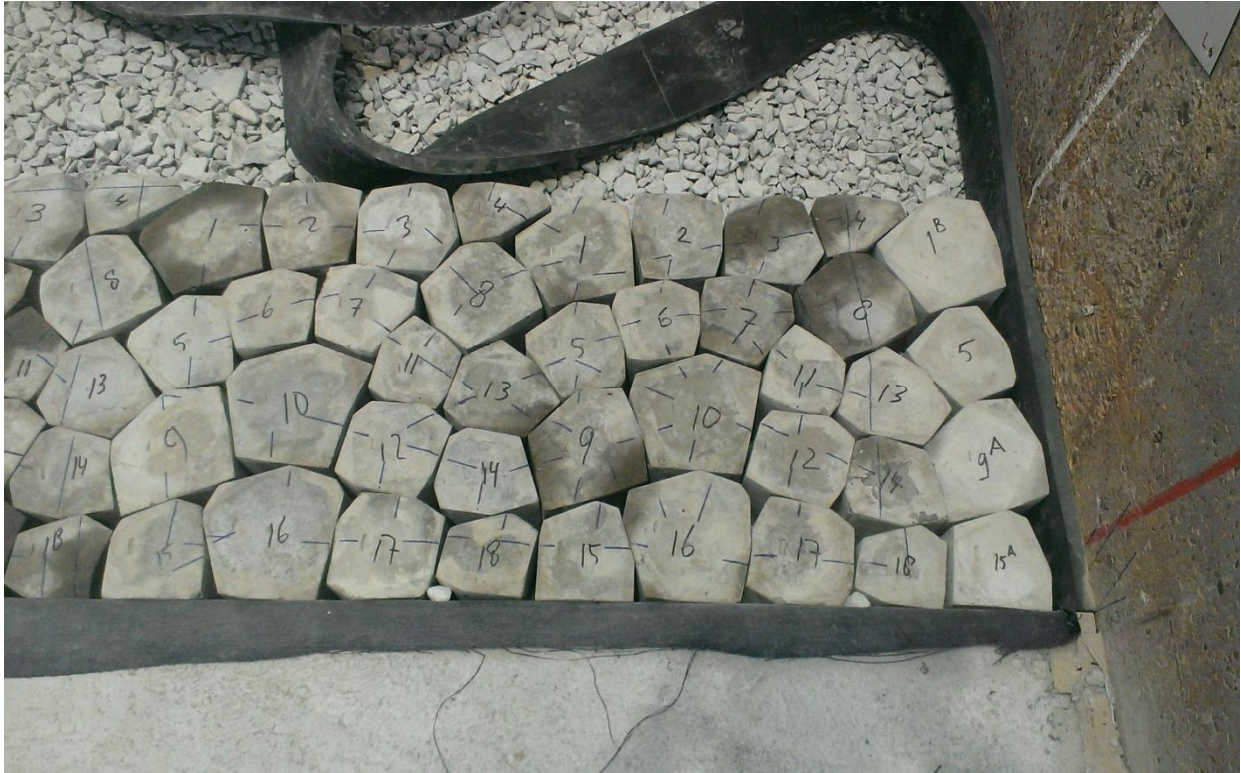
b) Opbouw model: proefopzet van blokken (voor inbouw)

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 4**



a) Opbouw model: plaatsen van steenzetting volgens palletpatroon



b) Opbouw model: plaatsen van steenzetting volgens palletpatroon

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

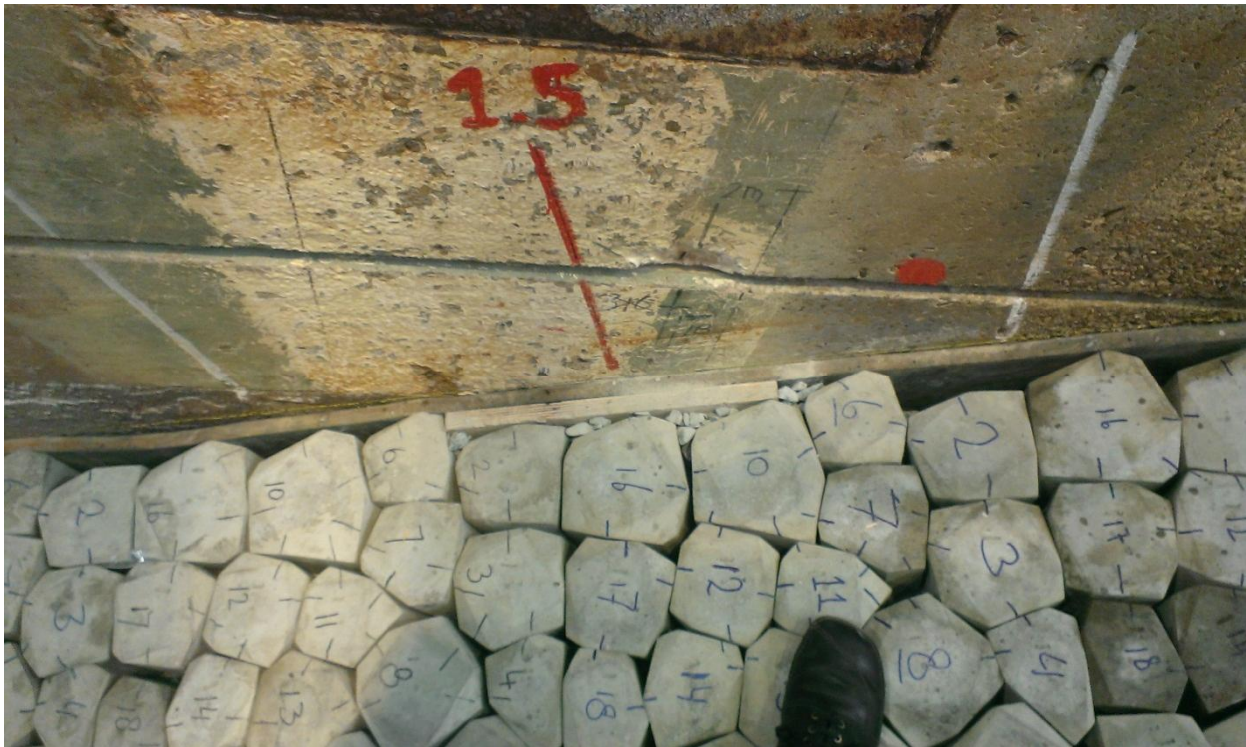
**DELTARES**

**1208618**

**Foto 5**



a) Opbouw model: afwerken van zijkanen



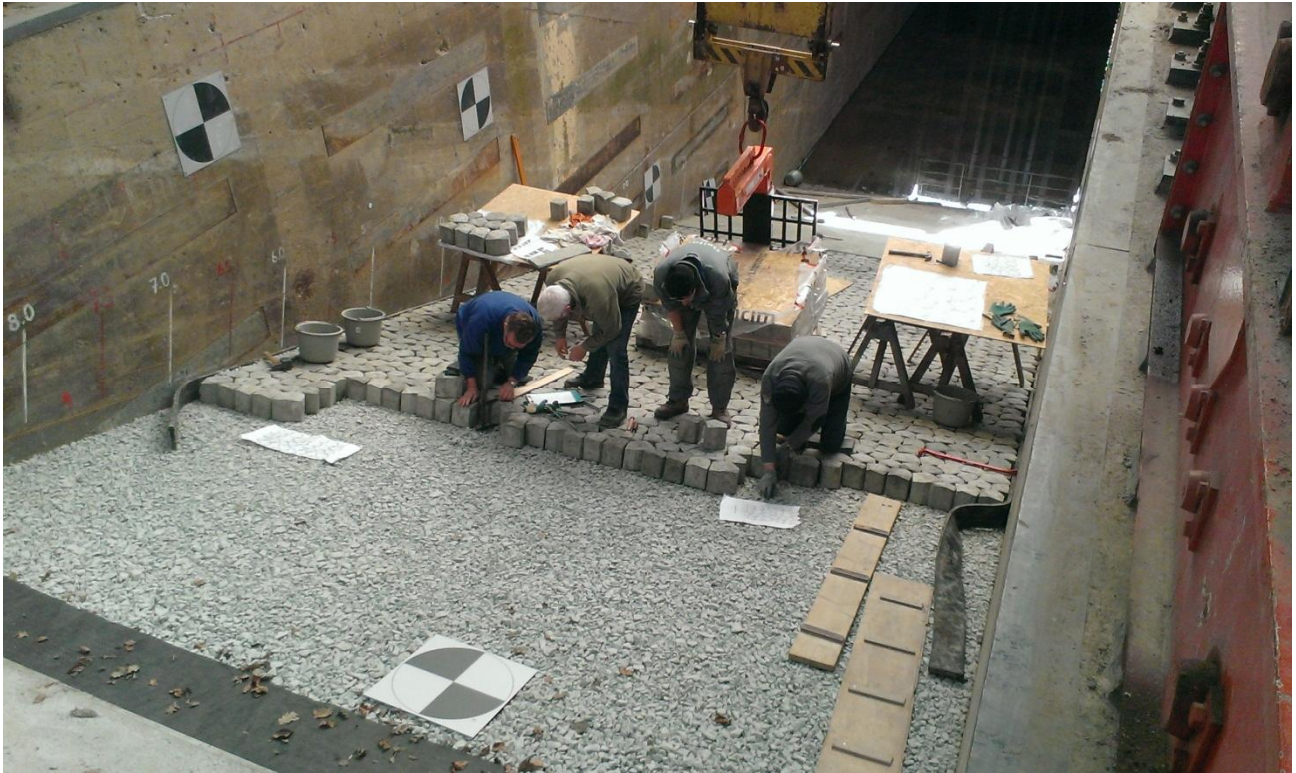
b) Opbouw model: afwerken van zijkanen

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 6**



a) Opbouw model: plaatsen van steenzetting



b) Opbouw model: plaatsen van steenzetting

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

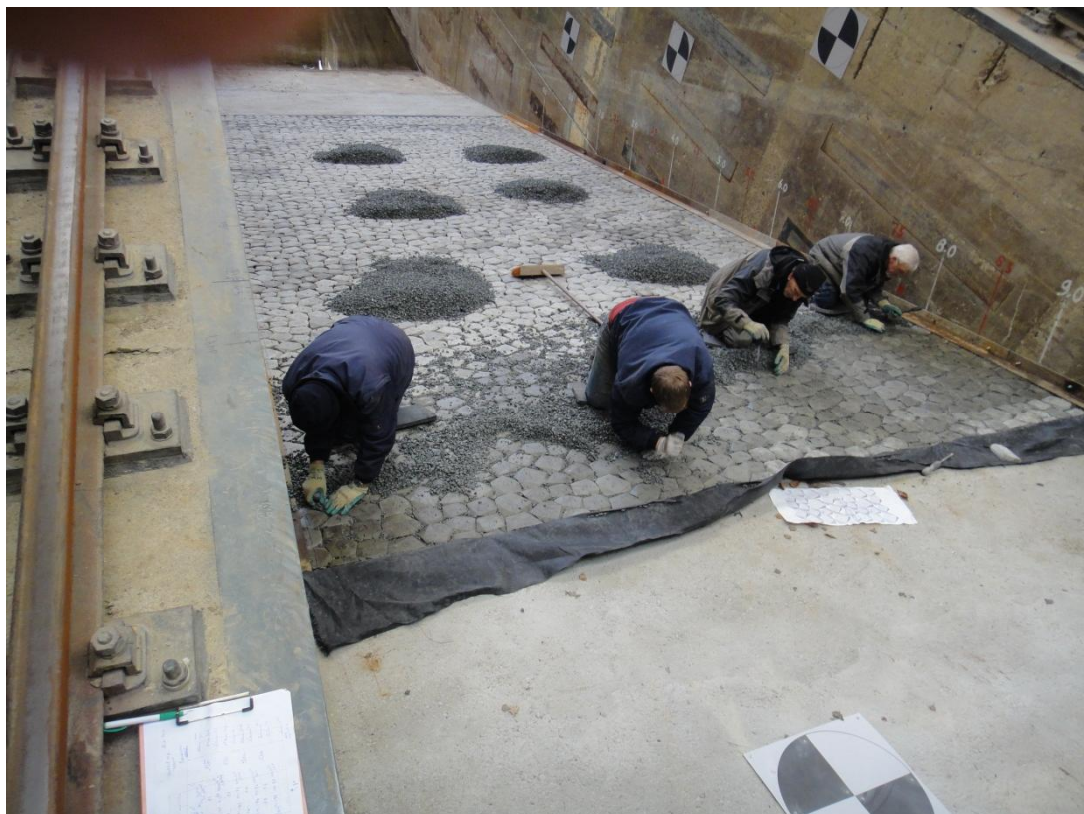
**DELTARES**

**1208618**

**Foto 7**



a) Opbouw model: inwassen van steenzetting



b) Opbouw model: inwassen van steenzetting

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 8**



a) Opbouw model: inwassen van steenzetting (met trilplaat overheen)



b) Opbouw model: ingewassen steenzetting

Opbouw model met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 9**



a) wrijvingsproef

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 10**





Serie 1: Na Proef 1 (ingolven)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 11**



Serie 1: Na proef 2

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 12**



a) Serie 1: Na Proef 2 (Sterke uitspoeling van inwasmateriaal)



b) Serie 1: Tijdens Proef 3 (Eerste blokken eruit; na 50min)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot		
<b>DELTARES</b>	<b>1208618</b>	<b>Foto 13</b>



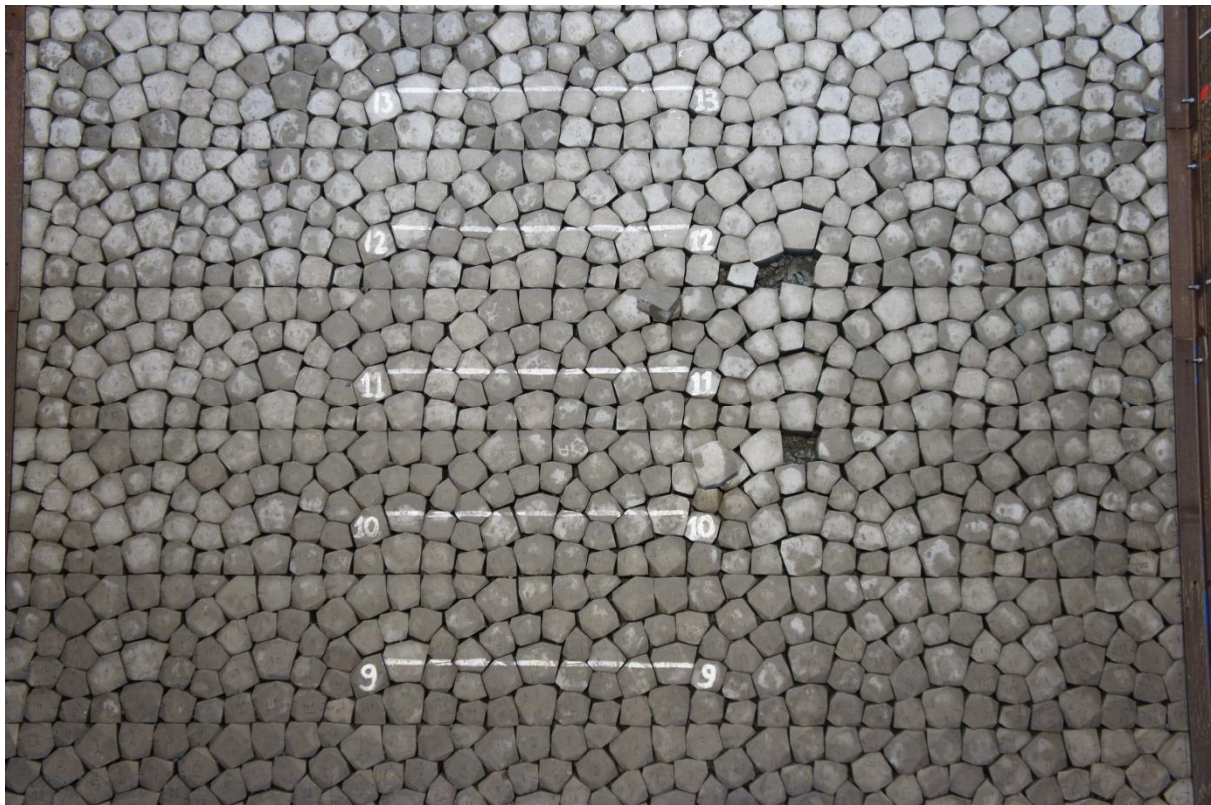
Serie 1: Na Proef 3 (gestopt na 50min)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

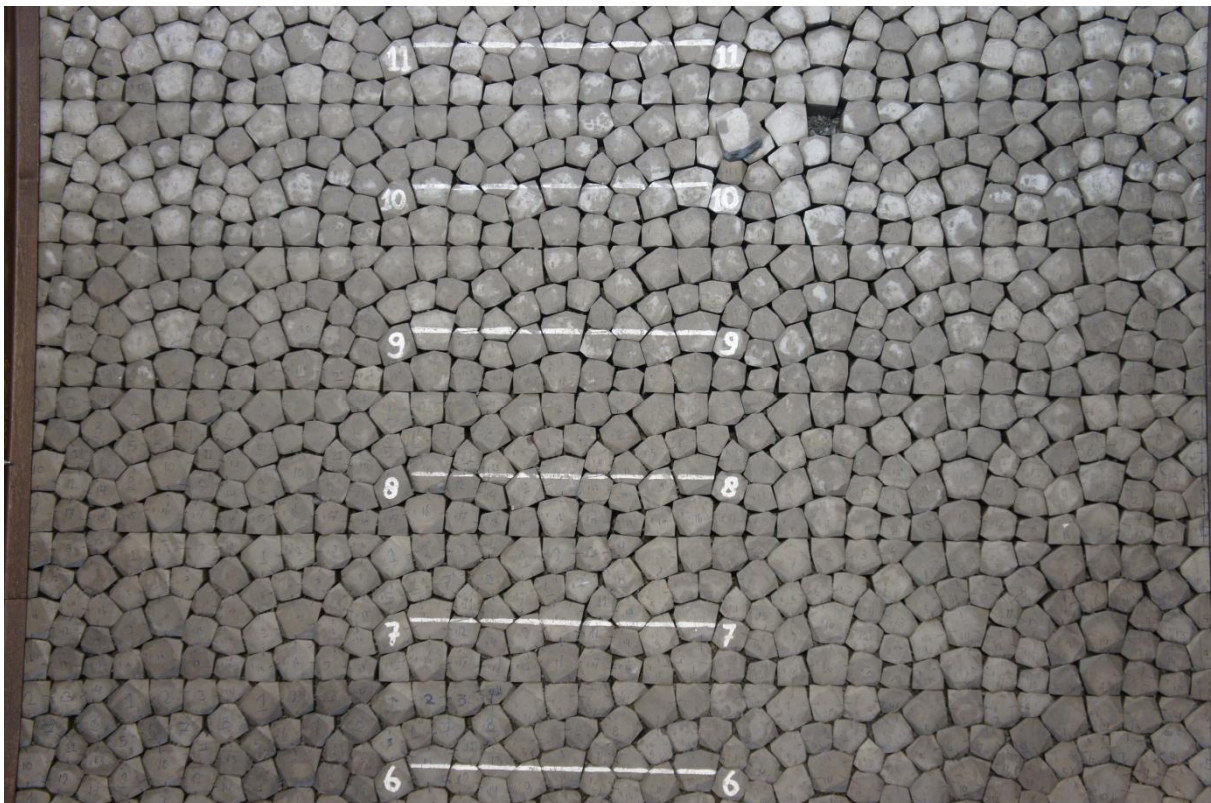
**DELTARES**

**1208618**

**Foto 14**



a) Serie 1: Schade na Proef 3



b) Serie 1: Schade na Proef 3

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot		
<b>DELTARES</b>	<b>1208618</b>	<b>Foto 15</b>



a) Serie 1: Schade na Proef 3



b) Serie 1: Schade na Proef 3

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

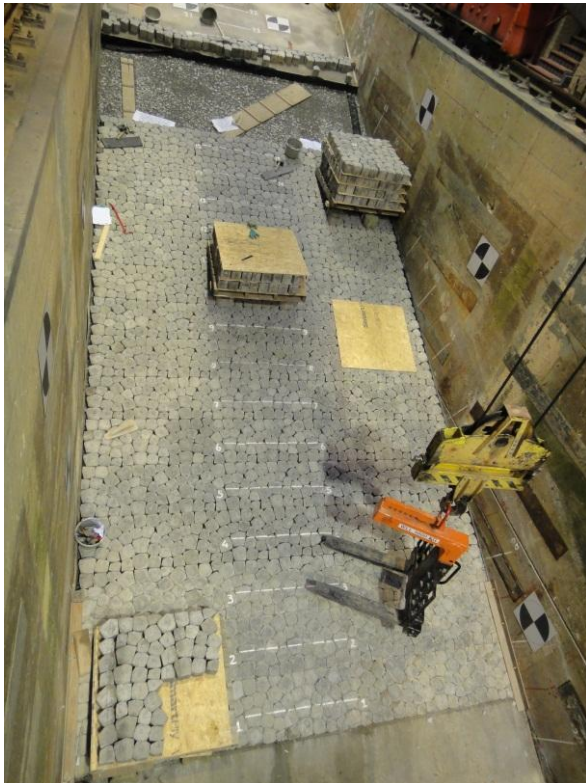
**DELTA**RES

1208618

Foto 16



a) Serie 2: Herstel van talud (met nieuw filter en inwasmateriaal)



b) Serie 2: Herstel van talud (met nieuw filter en inwasmateriaal)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 17**



a) Serie 2: Na Proef 4 (ingolven)



b) Serie 2: Na Proef 5 (ingolven, Open Dag)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 18**





Open Dag: Startbijeenkomst ‘Vergelijkend onderzoek zetsenen voor dijken’

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

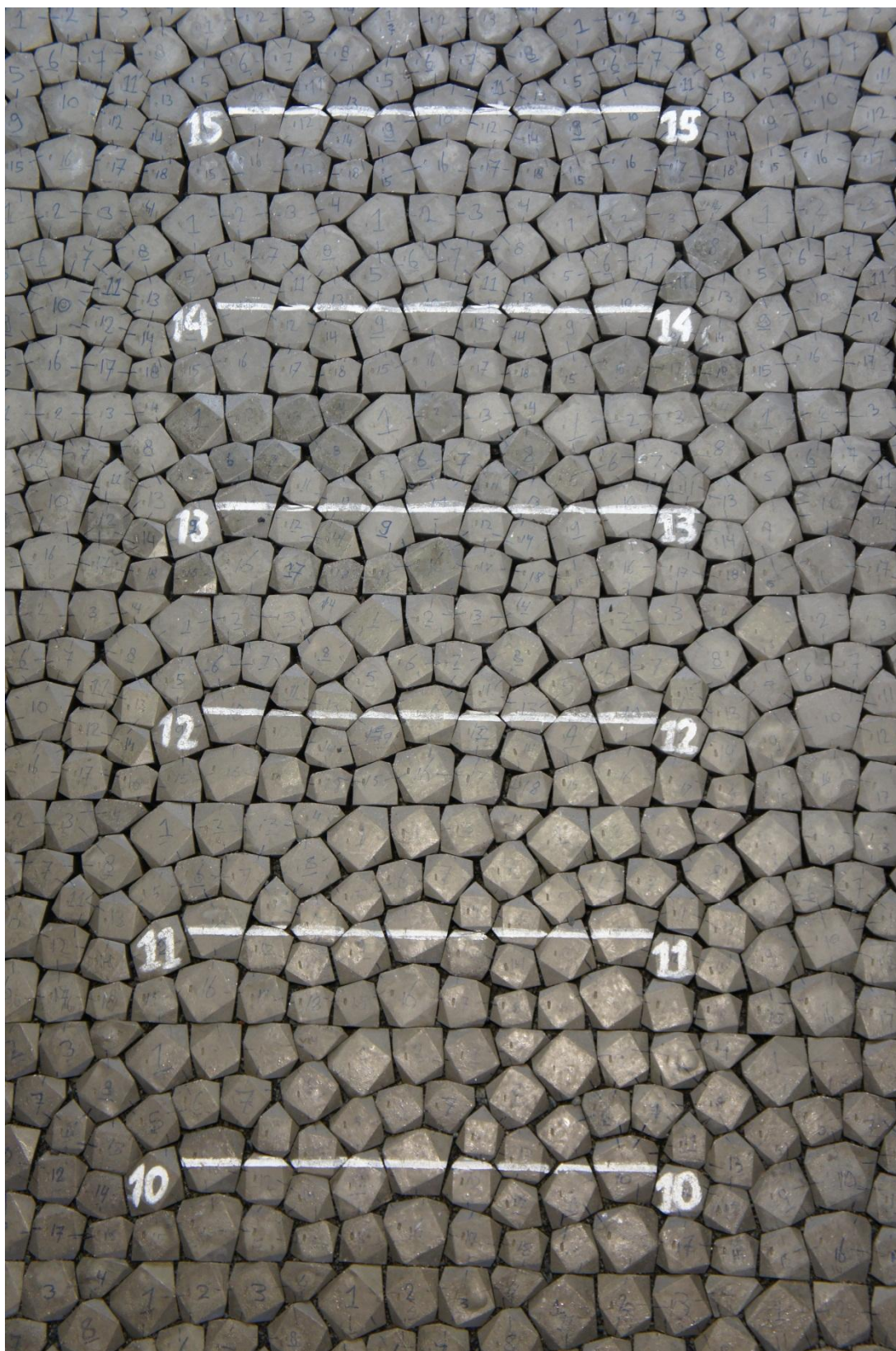
**1208618**

**Foto 19**



Open Dag: Startbijeenkomst 'Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken'

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot		
<b>DELTARES</b>	<b>1208618</b>	<b>Foto 20</b>



Serie 2: Na Proef 6

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot		
<b>DELTARES</b>	<b>1208618</b>	<b>Foto 21</b>



Serie 2: Schade na Proef 7

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 22**



a) Serie 2: Schade na Proef 7



b) Serie 2: Schade na Proef 7

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 23**



Serie 2: Schade na Proef 7

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 24**



Serie 3: Herstel van talud

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 25**



Serie 3: Na Proef 8

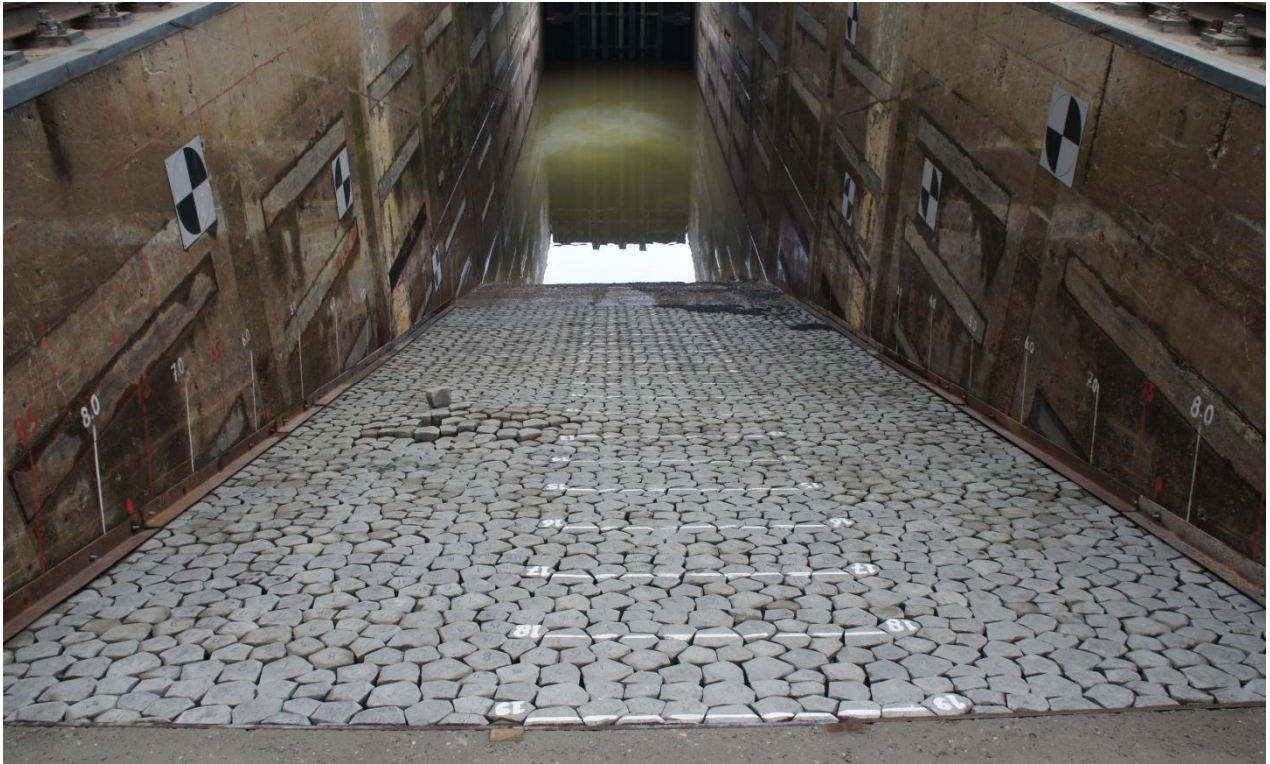
Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 26**





a) Serie 3: Na Proef 9



b) Serie 3: Na Proef 9

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 27**



b) Serie 3: Na Proef 9

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 28**



a) Na Proef 9



b) Serie 3: Herstel na Proef 9

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 29**



a) Serie 3: Herstel na Proef 9



b) Serie 3: Herstel na Proef 9

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot		
	<b>DELTA</b>	<b>Foto 30</b>



a) Serie 3: Herstel na Proef 9



b) Serie 3: Na Proef 10

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 31**



a) Serie 3: Na Proef 10



b) Serie 3: Herstel na Proef 10 (blok 8 opnieuw geplaatst en ingewassen)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot		
<b>DELTARES</b>	<b>1208618</b>	<b>Foto 32</b>



a) Serie 3: Schade na Proef 11



b) Serie 3: Schade na Proef 11

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 33**



Serie 3: Schade na Proef 11

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

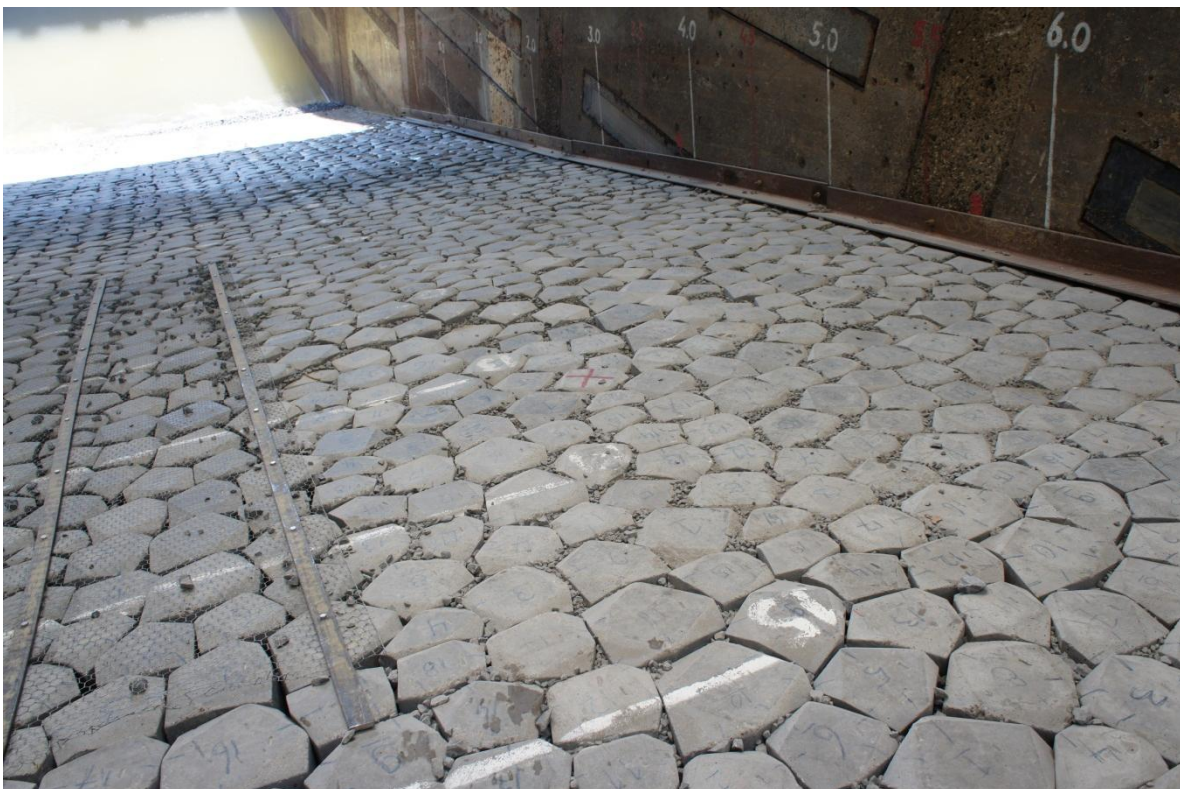
**1208618**

**Foto 34**





a) Serie 3: Herstel na Proef 11 (blokken terug op positie en ingewassen)



b) Serie 3: Herstel na Proef 11 (blokken terug op positie en ingewassen)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 35**



a) Serie 3: Schade na Proef 12



b) Serie 3: Schade na Proef 13

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 36**



a) Serie 3: Schade na Proef 13



b) Serie 3: Schade na Proef 13

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 37**



Serie 3: Schade na Proef 13

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 38**



a) Serie 3: Na Proef 13 (verwijderen van steenzetting)



b) Serie 3: Na Proef 13 (na verwijderen van gaas)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot

**DELTARES**

**1208618**

**Foto 39**



Serie 3: Na Proef 13 (aanzicht filter na verwijderen van steenzetting)

Proeven met Basalton 30 STS in de Deltagoot		
<b>DELTARES</b>	<b>1208618</b>	<b>Foto 40</b>

## F Invloed van zuildiameter op stijghoogteverschil

### F.1 Inleiding

In het kader van het "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" is voor het eerst een Basalton 30 STS steenzetting beproefd waarbij ook de horizontale maten van de zuilen (de zuildiameter) verschaald is. Bij de uitvoering van de proeven is geconstateerd dat de stabiliteit van deze kleine zuiltjes relatief laag is ten opzichte van eerdere proeven met grote zuilen, ondanks dat de toplaagdikte hetzelfde was.

In deze bijlage is de invloed van de zuildiameter op de stabiliteit van de steenzetting geschat. Deze invloed bestaat uit twee aspecten:

- de invloed op het gemiddelde stijghoogteverschil over een zuil
- de invloed op de sterkte

### F.2 Invloed van de zuildiameter op de belasting

De belangrijkste belasting voor een steenzetting is het stijghoogteverschil (drukverschil) over de toplaag dat ontstaat door het breken van golven op het talud. In plaats van de druk op het talud wordt de stijghoogte beschouwd, die als volgt gedefinieerd is:

$$\phi = \frac{p}{\rho g} + z$$

met:

$\phi$  = stijghoogte (m)

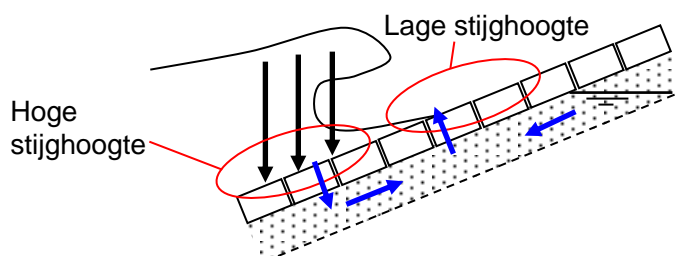
$p$  = druk (N/m<sup>2</sup>)

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

$g$  = versnelling als gevolg van de zwaartekracht (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$z$  = plaatshoogte ten opzichte van het referentievlak (bij voorbeeld de stilwaterlijn) (m)

De stijghoogte kan gezien worden als de waterdruk in meters waterkolom ten opzichte van de stilwaterlijn.

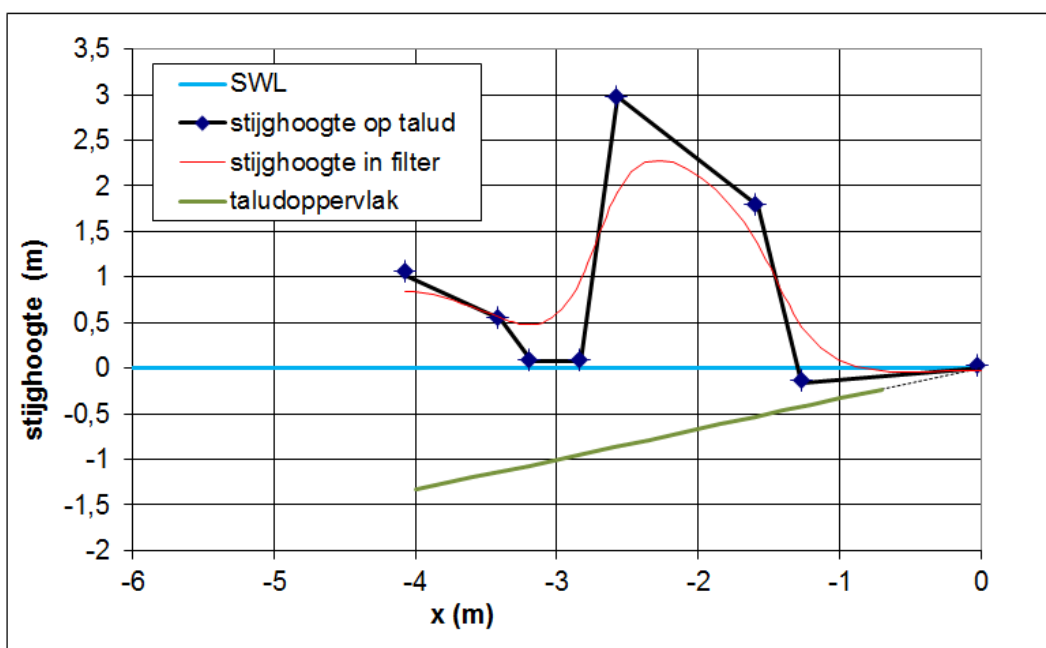


Figuur 7.1 Zone met hoge stijghoogte op het talud en zone met lage stijghoogte (blauwe pijlen: druktransmissie in het filter en door de toplaag)

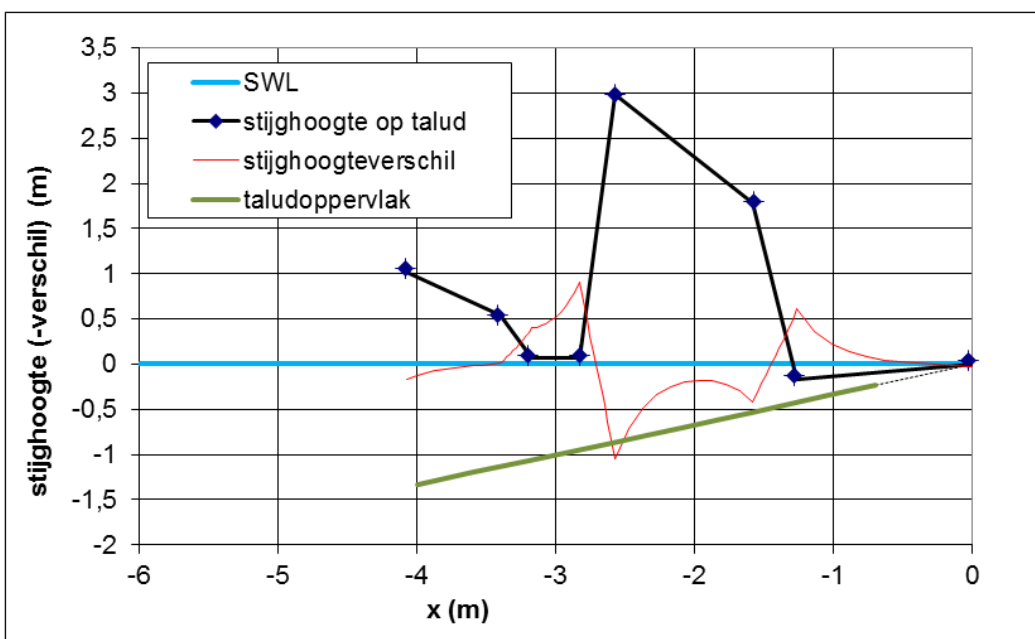
In een bepaalde fase van het breken van een golf zal er plaatselijk een hoge stijghoogte op de toplaag zijn en daarnaast een lage stijghoogte. Deze grote verschillen op een bepaald moment leiden tot stijghoogteverschillen over de toplaag die kunnen leiden tot het uitdrukken van zetstenen. Het stijghoogteverschil ontstaat doordat de hoge stijghoogte wordt

doorgegeven in het filter naar de zone met lage stijghoogte op de toplaag. Dit is geschetst in Figuur 7.1.

Bij de moderne steenzettingen met een kleine leklengte is de zone met een hoog stijghoogteverschil slechts vrij smal. In Figuur 7.2 is het stijghoogteverloop op de toplaag getekend tijdens een golfklap: de zwarte lijn. De dunne rode lijn is de stijghoogte in het filter. Dit is een gedempt verloop van de zwarte lijn. Duidelijk is te zien dat bij  $x = -2,8$  m een groot stijghoogteverschil omhoog aanwezig is, want de rode lijn (stijghoogte in het filter) ligt boven de zwarte lijn (stijghoogte op de toplaag).



Figuur 7.2 Stijghoogte op de toplaag en in het filter tijdens een golfklap



Figuur 7.3 Stijghoogte op de toplaag en het stijghoogteverschil over de toplaag tijdens een golfklap



De berekeningen zijn uitgevoerd voor een steenzetting op schaal 1:2 in de Deltagoot, met een golfhoogte van  $H_s = 1,5$  m ( $s_{op} = 0,03$ ) en een leklengte van 25 cm. Hoewel dit niet precies hetzelfde is als de thans uitgevoerde proeven in de Deltagoot en de proeven van 2010 (Wolters e.a. 2011), is de schaal, leklengte en golfsteilheid zo gekozen dat het dicht in de buurt zit van de proeven.

In Figuur 7.3 is de rode lijn het stijghoogteverschil over de toplaag. Er is een maximum bij  $x = -2,8$  m, maar daar vlak naast is het stijghoogteverschil een stuk kleiner.

Voor de stabiliteit van steenzettingen is het gemiddelde stijghoogteverschil over een zuil van belang. Als de zuil 15 cm breed is, is in dit voorbeeld het gemiddelde stijghoogteverschil volgens de berekeningen 0,74 m. Voor een zuil van 30 cm breed is dit echter slechts 0,57 m. Hieruit blijkt dat zuilen met een grote diameter een kleiner gemiddeld stijghoogteverschil over de toplaag hebben dan zuilen met een kleine diameter. Dit verschil is ongeveer 20 à 30%. Dit percentage is nauwelijks afhankelijk van de golfcondities, maar wel afhankelijk van de leklengte. Hoe kleiner de leklengte hoe hoger het percentage. Het stijghoogteverschil is niet precies omgekeerd evenredig met de stabiliteit (golfhoogte bij bezwijken), maar dit kan wel als zodanig als eerste benadering gehanteerd worden.

Bij een perfecte inklemming hoeft dit niet te betekenen dat de stabiliteit ook 20 à 30% hoger is. Er zullen namelijk in zo'n geval meerdere zuilen tegelijk omhoog bewegen in de vorm van een kattenrug. Als echter door het uitspoelen van het inwasmateriaal de klemming lokaal vermindert, zal er echter wel een stabiliteitsverschil tussen kleine en grote zuilen ontstaan. Zoals de berekeningen laten zien, kan dit verschil oplopen tot 20 à 30%.

### F.3 Invloed van zuildiameter op sterkte

Bij een goed geklemde steenzetting kan een afzonderlijke zetsteen niet uit de steenzetting gelicht worden, door de interactie met de zetstenen eromheen. In zo'n geval zal het stijghoogteverschil over de toplaag ertoe leiden dat er een vervorming van de toplaag ontstaat in de vorm van een kattenrug, zie het voorbeeld in Figuur 7.4.



Figuur 7.4 Kattenrug in een steenzetting van Hydroblocks

Bij de vorming van een kattenrug moeten de zetstenen onderling een beetje schuiven en roteren. Het is daarom te verwachten dat wanneer de zetstenen een kleinere diameter hebben, het vormen van een kattenrug gemakkelijker is. Er zijn dan immers meer contactvlakken per vierkante meter waar zetstenen onderling kunnen schuiven en roteren. Naarmate er meer spleten zijn per  $m^1$  (in de richting tegen het talud op), zijn er meer vrijheidsgraden, oftewel meer spleten waar de interactie tussen de elementen door toevallige omstandigheden tekort kan schieten om de noodzakelijke belastingspreiding te verzorgen. De kans dat de kattenrug in de richting tegen het talud op wordt onderbroken (schade) is dus groter naarmate er meer voegen aanwezig zijn.

De invloed van de diameter van de zuilen op de sterkte van de steenzetting is helaas met de huidige inzichten niet te kwantificeren. Met het bovenstaande is echter wel aannemelijk gemaakt dat de sterkte groter is naarmate de zetstenen een grotere diameter hebben.

#### **F.4 Conclusie**

De stabiliteit van de steenzetting wordt bepaald door de belasting (het stijghoogteverschil over de toplaag) en de sterkte (het gewicht van de toplaag en de klemming).

Op basis van enkele berekeningen is aannemelijk gemaakt dat het gemiddelde stijghoogteverschil over een zetsteen kleiner is naarmate de zetstenen een grotere diameter hebben. Een tweemaal zo grote diameter van de zetsteen geeft in het voorbeeld een verkleining van het gemiddelde stijghoogteverschil van 20 à 30%.

Verder heeft het vergroten van de diameter van de zetsteen ook een positief effect op de sterkte. De vorming van een kattenrug zal in zo'n geval pas bij een hogere golfhoogte plaatsvinden. Hoeveel hoger, is niet te kwantificeren.

Voor de stabiliteit betekent het bovenstaande dat zuilen met een grote diameter pas zullen bezwijken bij een hogere golfhoogte dan zuilen met een kleinere diameter (met dezelfde toplaagdikte).

## G Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

### G.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 G.1 Golfaanval op testsectie van Basalton 30 STS.

### G.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 bezwijkgolffoogte 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 series te gebruiken en daarnaast rekening te houden met de spreiding van de drie meetresultaten.

Omdat vanwege de beperkte golffoogte 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 bezwijkgolffoogte verder uitgedetailleerd (zie paragraaf 4.1 voor omschrijving schade-categorieën):

- 1 De golffoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste twee proevenseries met korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de golffoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golffoogte van de proef met de hoogste golffoogte in dezelfde serie (ongeveer dezelfde golfsteilheid) waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
- 2 Voor de langeduurproef wordt de gemiddelde golffoogte en golfperiode bepaald en geldt het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef.
- 3 Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golffoogte nog geen schade is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golffoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golffoogte-stappen van 15% te werken. Aangenomen wordt dat bij die fictieve proef wel schade zou zijn opgetreden (schadecategorie c of d). Deze fictieve proef wordt op dezelfde wijze geïnterpreteerd als omschreven bij punt 1.  
Dit wordt echter niet gedaan als beide series korteduurproeven niet geleid hebben tot schade en bovendien tijdens de langeduurproef de steenzetting langer dan 15 uur heeft standgehouden bij dezelfde golfcondities. Het doorstaan van de 15 uur golfbelasting tijdens de langeduurproef impliceert dat schade bij een veel hogere golffoogte 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 golffoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

### G.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 veiligheids-marge. 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.

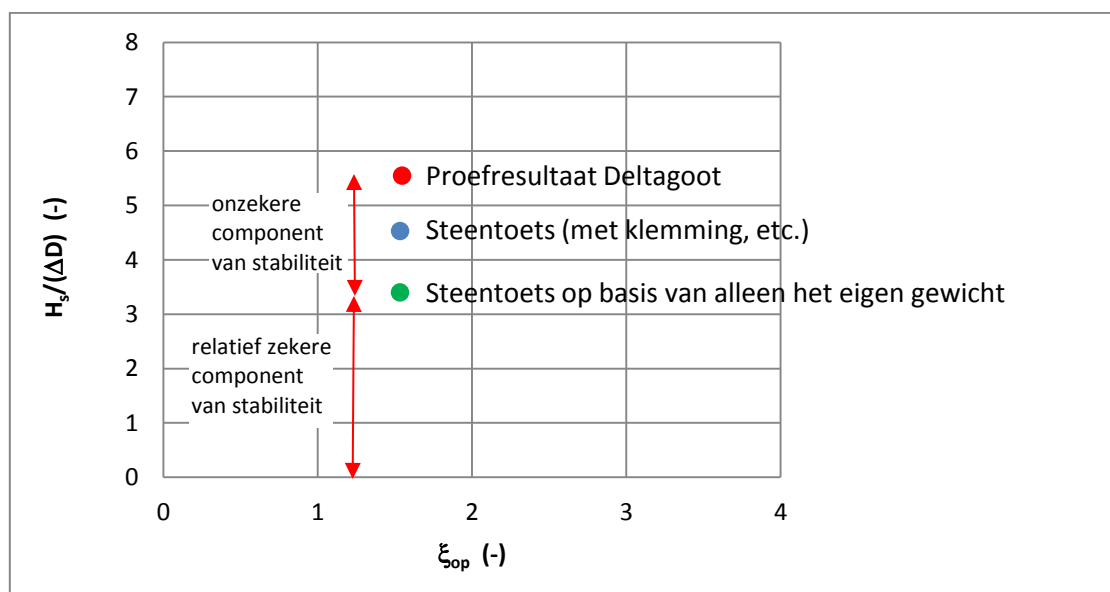
De methode voor het bepalen van de veiligheidsmarge in de stabiliteitsfactor gaat uit van de veronderstelling dat een deel van de stabiliteit heel zeker is (gerelateerd aan het eigengewicht van de steenzetting) en een deel onzeker (gerelateerd aan de bijzondere eigenschappen die leiden tot grote klemming 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 bezwijkgolfhoogte 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. 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 G.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 G.2) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur G.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 stabiliteitsfactor wordt eerst voor elke proevenserie bepaald. Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries betreft de stabiliteitsfactor die voor het beproefde steenzettingtype wordt aangehouden als eindresultaat.

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

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

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

Met:

$\sigma$  = standaardafwijking in de proefresultaten

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.