

# Stabiliteit van Basalton Quattroblocks in golfaanval

Modelonderzoek in de Deltagoot





# **Stabiliteit van Basalton Quattroblocks in golfaanval**

**Modelonderzoek in de Deltagoot**

M. Klein Breteler  
S. Zwanenburg

11201336-000



## Titel

Stabiliteit van Basalton Quattroblocks in golfaanval

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Holcim Coastal BV	11201336-000	11201336-000-HYE-0013	59

## Trefwoorden

Steenzetting, Basalton Quattroblocks, dijken, zetsteen, stabiliteit, stabiliteitsfactor

## Samenvatting

Het in dit rapport beschreven onderzoek betreft de stabiliteit van zetstenen van het type Basalton Quattroblocks. Om de stabiliteit van Basalton Quattroblocks bij golfaanval te bepalen, is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. De geometrische schaal van dit onderzoek was 1:1,5. Alle maten die in dit rapport zijn gerapporteerd, betreffen waarden op modelschaal, dus zoals aanwezig in de Deltagoot, tenzij nadrukkelijk anders is vermeld. De beproefde steenzetting had een toplaagdikte van circa 20 cm. Onder de Basalton Quattroblocks was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder een geotextiel.

De steenzetting is beproefd met drie proevenseries:

- *Series 1 en 2:* eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (circa 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid: de proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met een kleine golfsteilheid (lange golven), de proeven van serie 2 met een grote golfsteilheid (korte golven). De golfhoogte is na elke proef verhoogd totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- *Serie 3:* de laatste serie (serie 3) bestond uit een langeduurproef. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat een totale proefduur van 26 uur was bereikt.

Het doel van het onderzoek is het vaststellen van de stabiliteitsfactor van de steenzetting ( $f_{stab}$ ). Deze stabiliteitsfactor is een soortspecifieke factor die aangeeft hoe stabiel een steenzetting is in golfaanval, ten opzichte van een berekening met het rekenmodel Steentoets (met  $f_{stab} = 1$ ). Hoe beter de steenzetting presteert ten opzichte van de berekening met Steentoets, hoe hoger de stabiliteitsfactor.

De op basis van de uitgevoerde proeven afgeleide stabiliteitsfactor voor Basalton Quattroblocks is:  $f_{stab} = 1,37$ . Deze factor wordt opgenomen in Steentoets.

## Referenties

Opdracht: email van 23 augustus 2017

contactpersoon opdrachtgever: Jean-Pierre Quataert

Versie	Datum	Auteur	Review	Goedkeuring
1	jan. 2018	M. Klein Breteler	P. van Steeg	M.R.A. van Gent
2	mrt. 2018	M. Klein Breteler S. Zwanenburg	P. van Steeg	M.R.A. van Gent

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Doel van het onderzoek	1
1.2 Basalton Quattroblocks	2
<b>2 Schaling</b>	<b>5</b>
2.1 Algemeen	5
2.2 Schaling van de golven	5
2.3 Schaling dimensieloze parameters	6
2.4 Schaling van stroming in de constructie	6
<b>3 Modelopstelling</b>	<b>9</b>
<b>4 Proefresultaten en observaties</b>	<b>13</b>
4.1 Proevenprogramma	13
4.2 Waarnemingen tijdens en na de proeven	15
4.2.1 Eerste proevenserie (relatief lange golven)	16
4.2.2 Tweede proevenserie (relatief korte golven)	18
4.2.3 Derde proevenserie (langeduurproef)	20
<b>5 Stabiliteitsfactor</b>	<b>23</b>
5.1 Gemeten stabiliteit ten opzichte van met Steentoets berekende stabiliteit	23
5.2 Stabiliteitsfactor	24
<b>6 Conclusies</b>	<b>27</b>
<b>7 Referenties</b>	<b>29</b>
 <b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Tabellen</b>	<b>A-1</b>
A.1 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T01	A-1
A.2 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T02	A-1
A.3 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T03	A-2
A.4 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T04	A-2
A.5 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T05	A-3
A.6 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T06	A-3
A.7 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T07	A-4
A.8 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T09	A-4
A.9 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T11	A-5
A.10 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T13	A-5
<b>B Figuren</b>	<b>B-1</b>
B.1 Zeefkrommen	B-2
B.2 Modelschaal maten van de Basalton Quattroblocks	B-3
B.3 Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen van Serie 1	B-4
B.4 Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen van Serie 2	B-5

B.5	Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen van Serie 3	B-6
<b>C</b>	<b>Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor</b>	<b>C-1</b>
C.1	Inleiding	C-1
C.2	Interpretatie van de proeven	C-1
C.3	Bepaling stabiliteitsfactor	C-2
<b>D</b>	<b>Indeling schadecategorieën</b>	<b>D-1</b>
<b>E</b>	<b>Foto's</b>	<b>E-1</b>
E.1	Bouw van het model	E-1
E.2	Proeven	E-5



# 1 Inleiding

## 1.1 Doel van het onderzoek

In het kader van het 'Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken' is in de periode van 2014 tot 2016 een groot aantal types steenzettingen onderzocht in de Deltagoot (Klein Breteler 2016). Het doel was om van alle moderne steenzettingen een stabiliteitsfactor vast te stellen. Deze stabiliteitsfactor  $f_{stab}$  is een soortspecifieke factor die aangeeft hoe stabiel een steenzetting is in golfaanval, ten opzichte van een berekening met het rekenmodel Steentoets (met  $f_{stab} = 1$ ). Hoe beter de steenzetting presteert, hoe hoger de stabiliteitsfactor.

Steentoets wordt in Nederland gebruikt voor het ontwerpen van nieuwe steenzettingen en voor de periodieke wettelijke beoordeling van bestaande steenzettingen op primaire waterkeringen. Door de introductie van de stabiliteitsfactor in Steentoets wordt bij het ontwerp van steenzettingen optimaal rekening gehouden met de werkelijke stabiliteit van de steenzetting zoals vastgesteld tijdens de Deltagootproeven.

Holcim Coastal BV heeft aan Deltares gevraagd om volgens dezelfde procedure als in het "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" de stabiliteitsfactor te bepalen voor Basalton Quattroblocks met behulp van Deltagootproeven.



Figuur 1.1 Deltagoot van Deltares

De Deltagoot (Figuur 1.1) is bij uitstek geschikt om de stabiliteit van een steenzetting, zoals Basalton Quattroblocks, vast te stellen. De goot is 300 m lang, 5 m breed en 9,5 m diep en er kunnen golven opgewekt worden met een significante golfhoogte tot 2 m. Dergelijk grootschalig onderzoek is nodig omdat de stabiliteit van steenzettingen beïnvloed wordt door schaal-

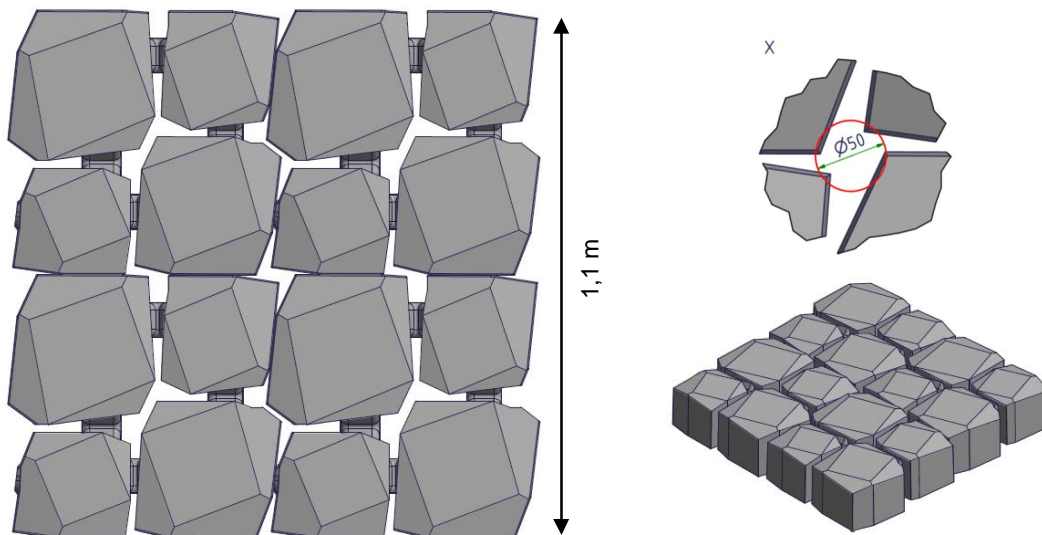
effecten. Daardoor is het niet mogelijk om het onderzoek uit te voeren bij een kleinere schaal dan 1:3.

De golven in de werkelijkheid op de primaire waterkeringen kunnen echter nog hoger worden dan in de Deltagoot. Daarom is het huidige onderzoek uitgevoerd op schaal 1:1,5. Bij deze schaal zijn er verwaarloosbare schaafeffecten en kunnen de resultaten toegepast worden op het volledige scala aan zuilhoogtes van de Basalton Quattroblocks.

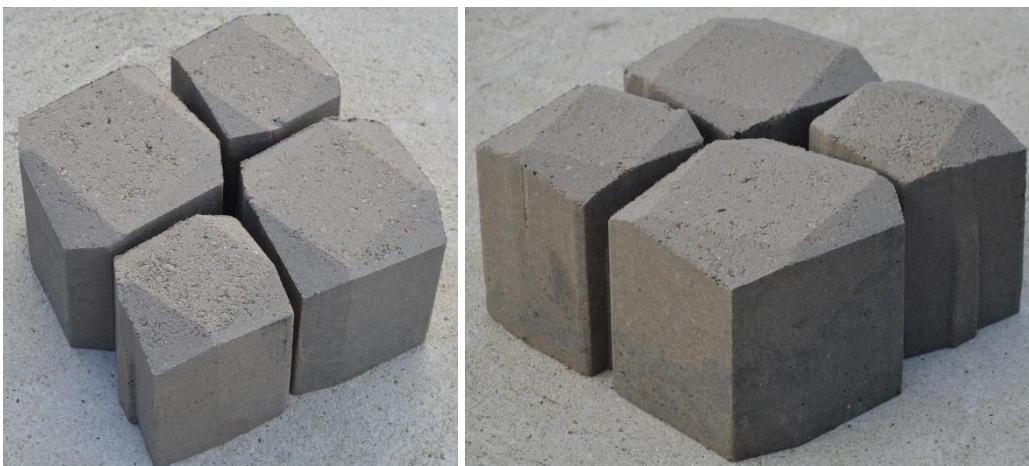
Het huidige onderzoek is uitgevoerd in november en december 2017 onder leiding van ir S. Zwanenburg en ir. M. Klein Breteler.

## 1.2 Basalton Quattroblocks

De Basalton Quattroblock is een innovatieve steenzetting die ontwikkeld is door Holcim Coastal BV. Het is gebaseerd op het vertrouwde Basalton. Zoals weergegeven in Figuur 1.2 en Figuur 1.3 zijn er vier zuilen met vergelijkbare vorm als Basalton aan elkaar verbonden tot de vorming van een Basalton Quattroblock. De blokken hebben daardoor vrij grote afmetingen, namelijk 55x55 cm, terwijl toch de doorlatendheid relatief goed gespreid is. Er is een relatief open oppervlak bereikt van 10,5%, terwijl elke opening toch zo klein is dat het onderliggende filtermateriaal niet kan uitspoelen.



Figuur 1.2 Tekening van vier Basalton Quattroblocks (maten op ware grootte) (zie ook Figuur B.2)



Figuur 1.3 Foto's van een zetsteen van het type Basalton Quattroblock zoals toegepast in de Deltagoot

Opgemerkt wordt dat de robuustheid van de Quattroblocks (ten aanzien van breuk bij plaatsing, bij het eroverheen rijden met onderhoudsvoertuigen en bij vorst-dooi wisselingen) niet in dit project is onderzocht. De relevante eisen zijn opgenomen in de NEN-7024.



## 2 Schaling

### 2.1 Algemeen

Voor steenzettingen geldt dat naarmate een modelopstelling kleiner is dan de ware grootte, het moeilijker wordt om proefresultaten te vertalen naar de ware grootte, vanwege strijdige schaalregels voor de golven en voor de stroming in het filter. Daarnaast is het in een kleinschalige modelopstelling moeilijk om de interactie tussen stenen goed weer te geven. Vanaf een schaal kleiner dan ongeveer 1:3 zijn voor steenzettingen de proefresultaten met de huidige kennis niet meer voldoende nauwkeurig te vertalen (Bezuijen e.a. 1990), en bij een schaal van bijvoorbeeld 1:10 is het voorsnog onmogelijk. Daarom is dit experimenteel onderzoek uitgevoerd op een zo groot mogelijke schaal. Er is gekozen voor een geometrische schaal van 1:1,5.

Een geometrische schaal van 1:1,5 houdt in dat alle afmetingen van de zetstenen in de modelopstelling 1,5 maal zo klein moeten zijn als die op ware grootte. Dit geldt voor zowel de verticale als horizontale afmetingen van de zetstenen (hoogte, lengte en breedte), met behoud van de vorm van de zetsteen.

Voor het onderhavige onderzoek zijn Basalton Quattroblocks als uitgangspunt genomen die op ware grootte circa 30 cm hoog zijn. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal gemaakt door Holcim Coastal BV. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, waarbij alle maten een factor 1,5 kleiner zijn gekozen dan die op ware grootte. Dit resulteerde in verschaalde zuilen met een gemiddelde zuilhoogte  $D = 19,9$  cm, wat overeen komt met een zuilhoogte op ware grootte van  $D = 29,8$  cm.

In een schaalmodel met schaal 1:1,5 zijn ook de golven (golfhoogte en golflengte) 1,5 maal zo klein als die op ware grootte. De taludhelling is wel gelijk aan die op ware grootte, evenals de soortelijke massa van de zetstenen. Dit is onderstaand nader toegelicht.

### 2.2 Schaling van de golven

Bij het verscalen van steenzettingen dienen verschillende schaalregels in acht genomen te worden voor zowel de stroming in de constructie (door en onder de toplaag) als voor de golven op het talud. Een nadeel is echter dat deze schaalregels strijdig met elkaar zijn.

Over het algemeen wordt voor het verscalen van waterbouwkundige constructies de zogenaamde Froude schaling toegepast. Deze schaling geldt voor processen waarin traagheid en zwaartekracht een dominante rol spelen, wat het geval is in dit model. Bij een goede schaling dient het Froude getal in het schaalmodel hetzelfde te zijn als in de werkelijke situatie. Het Froude getal wordt als volgt berekend:

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

Met:

Fr = Froude getal (-)

u = snelheid (m/s)

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

L = karakteristieke lengte (bijvoorbeeld de waterdiepte) (m)

Voor het beproefde schaalmodel is de schaling uitgewerkt voor een lengteschaal  $n_L = L_{\text{prototype}}/L_{\text{model}} = 1,5$ . Uit de bovenstaande Froude schaalregel zijn dan de volgende verbanden af te leiden:

- Golfhoogte:  $n_H = n_L$ , in dit geval dus:  $n_H = 1,5$
- Tijdschaal (proefduur, golfperiode):  $n_t = \sqrt{n_L}$ , in dit geval dus:  $n_t = \sqrt{1,5} \approx 1,22$
- Snelheid (voortplantingssnelheid van golven):  $n_u = \sqrt{n_L}$ , in dit geval dus:  $n_u = \sqrt{1,5} \approx 1,22$

De Froude schaling is gebruikt voor het bepalen van de golfcondities.

### 2.3 Schaling dimensieloze parameters

Dimensieloze parameters dienen niet verschaald te worden. Voorbeelden van dimensieloze parameters zijn de taludhelling ( $\tan\alpha$ ) en de relatieve soortelijke massa van de zetstenen ( $\Delta$ ). De relatieve soortelijke massa van de zetstenen is beschreven met de volgende formule:

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (2.2)$$

Met:

- $\Delta$  = relatieve soortelijke massa van de zetstenen ten opzichte van het water (-)
- $\rho_s$  = soortelijke massa van de zetstenen (volgens NEN-7024) ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_w$  = soortelijke massa van het water ( $\text{kg/m}^3$ )

Uit formule 2.2 volgt dat, vanwege de gelijkblijvende  $\Delta$  en  $\rho_w$ , ook de soortelijke massa van de zetstenen  $\rho_s$  niet wordt verschaald.

Een andere belangrijke dimensieloze parameter in het onderzoek is de belastingparameter  $H_{m0}/(\Delta D)$ . De belastingparameter  $H_{m0}/(\Delta D)$  kan worden gezien als de verhouding tussen de golfbelasting (de golfhoogte  $H_{m0}$ ) en de sterkte van de steenzetting (relatieve soortelijke massa  $\Delta$  en toplaagdikte  $D$ ). In de belastingparameter wordt gebruik gemaakt van de volgende symbolen:

- $H_{m0}$  = significante golfhoogte (m)
- $\Delta$  = relatieve soortelijke massa van de zetstenen ten opzichte van het water (-)
- $D$  = dikte van de toplaag van Basalton Quattroblocks, gedefinieerd als de afstand tussen de boven- en onderzijde van de zuilen, loodrecht op het talud gemeten (m)

In de belastingparameter is  $\Delta$  dimensieloos en zijn  $H_{m0}$  en  $D$  uitgedrukt in lengte-eenheden die verschaald worden met de lengteschaal. De belastingparameter is daardoor dimensieloos en is in het schaalmodel dus hetzelfde als in de werkelijke situatie.

### 2.4 Schaling van stroming in de constructie

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

$$\text{Re} = \frac{Lu}{\nu} \quad (2.3)$$

Met:

- $\text{Re}$  = Reynolds getal (-)
- $L$  = karakteristieke lengte (bijvoorbeeld de korrelgrootte) (m)
- $u$  = snelheid of doorlatendheid (m/s)
- $\nu$  = kinematische viscositeit (voor water: ca.  $1,2 \cdot 10^{-6}$ ) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Het gelijktijdig voldoen aan de Reynolds schaal en de Froude schaal is in een kleinschalig model niet mogelijk. Daarom dient het onderzoek op een zo groot mogelijke schaal te worden uitgevoerd. Tot  $n_L = 3$  (Bezuijen, Burger en Klein Breteler, 1990) is de invloed van schaal-effecten verwaarloosbaar. Het huidige onderzoek ( $n_L = 1,5$ ) voldoet hier dus ruimschoots aan.

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

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \quad (2.4)$$

Met:

- $\Lambda$  = lek lengte (m)
- $b$  = dikte van de filterlaag (m)
- $k$  = doorlatendheid van de filterlaag (m/s)
- $D$  = dikte van de toplaag (m)
- $k'$  = doorlatendheid van de toplaag (m/s)

De lek lengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal:  $n_\Lambda = n_L = 1,5$ . Met het rekenmodel Steentoets is de lek lengte op ware grootte en in het schaalmodel berekend. Voor deze berekeningen is gebruikgemaakt van Steentoets versie v17.1.1.1 zonder stabiliteitsfactor (Klein Breteler, 2017). In de berekeningen is uitgegaan van inwasmateriaal met korrelgrootte  $D_{f15} = 5,7$  mm in het schaalmodel (betreft de gemeten waarde, zie hoofdstuk 3) en  $D_{f15} = 8,6$  mm op ware grootte.

Uit de berekeningen is gebleken dat bij schaal van 1:1,5 in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte van ongeveer  $b = 8$  cm en korrelgrootte  $D_{f15} = 10$  à  $14$  mm goed overeenkomt met onder andere de volgende filterlaagdiktes en korrelgroottes van steenzettingen op ware grootte:  $b = 12$  cm in combinatie met  $D_{f15} = 16$  à  $23$  mm, of met  $D_{f15} = 20$  mm in combinatie met  $b = 11$  à  $13$  cm.

Ter illustratie is in Tabel 2.1 voor de situatie op ware grootte en voor de situatie in de Deltagoot weergegeven welke combinatie van parameters resulteren in een vergelijkbare lek lengte, uitgaande van verscaling van de lek lengte met de lengteschaal  $n_L = 1,5$ . Opgemerkt wordt dat een iets andere combinatie van parameters kan resulteren in dezelfde lek lengte.

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde op ware grootte	Waarde op schaal (indicatief)
dikte van de toplaag	D	(m)	0,30	0,20
open oppervlak	$\Omega$	(%)	10,5	10,5
filterlaagdikte	B	(m)	0,12	0,08
korrelgrootte filter	$D_{f15}$	(mm)	20	13
korrelgrootte inwasmateriaal	$D_{i15}$	(mm)	8,6	5,7
toplaagdoorlatendheid	$k'$	(mm/s)	51	41
lek lengte	$\Lambda$	(m)	0,42	0,28

Tabel 2.1 Parameters met betrekking tot de stroming in de steenzetting met de waarden op ware grootte en overeenkomstige waarden op schaal (indicatief).

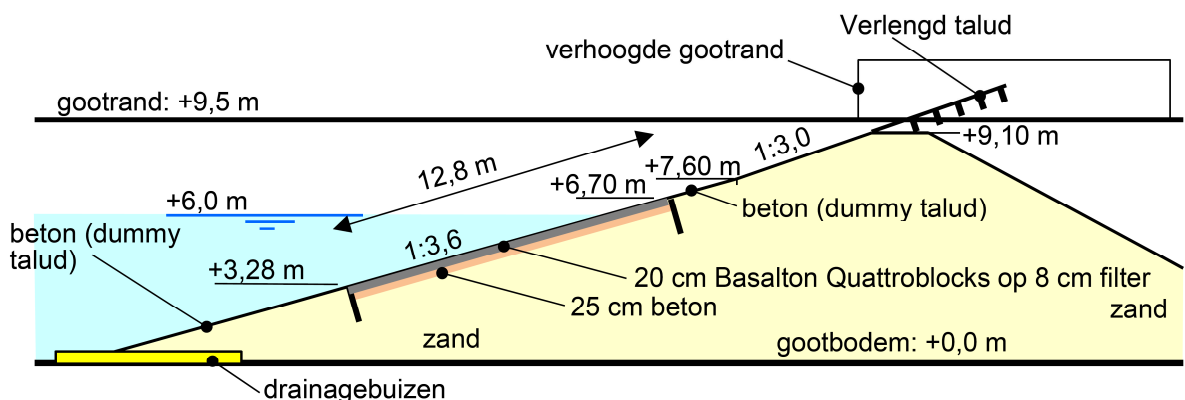
Omdat in de praktijk mogelijk diverse soorten filtermateriaal en diverse filterlaagdiktes worden toegepast, kunnen in het schaalmodel binnen bepaalde grenzen ook andere waarden gebruikt worden.



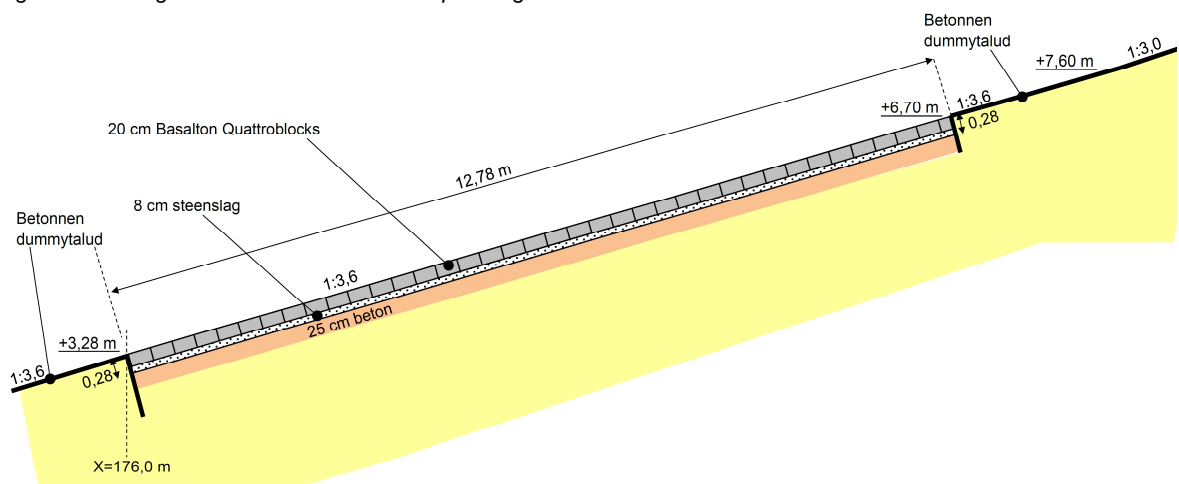


### 3 Modelopstelling

In de Deltagoot is een dijk gebouwd met een steenzetting van Basalton Quattroblocks op een laagje steenslag, zoals dat ook op een werkelijke dijk gebouwd zou worden. De afmetingen van de dijk en de dijkbekleding zijn echter aangepast (zie ook hoofdstuk 2), omdat de Deltagoot een beperkte capaciteit heeft qua golfhoogte. Daarom is een schaalmodel gebouwd met schaal 1:1,5 (zie Hoofdstuk 2).



Figuur 3.1 Langsdoorsnede van de modelopstelling



Figuur 3.2 Langsdoorsnede van modelsectie

De dwarsdoorsnede van de modelopstelling is gegeven in Figuur 3.1. De opstelling bestaat uit een dijklichaam van zand dat vanaf de gootbodem tot het niveau +3,28 m boven de gootbodem en vanaf het niveau +6,70 m tot +9,10 m bekleed is met een laag beton. Daartussen is de modelsectie aangebracht, zie Figuur 3.2. Boven +9,10 m was het talud van hout tot een niveau +11 m boven de gootbodem.

Het relevante deel van het talud had een taludhelling van 1:3,6. Boven het niveau +7,60 m boven de gootbodem was het talud iets steiler, namelijk 1:3. Dit steilere deel heeft echter geen invloed op de hydraulische belasting of stabiliteit van de Basalton Quattroblocks.

In de modelsectie (+3,28 m – +6,70 m) is op het zand van het dijklichaam een laag beton aangebracht, die de kleilaag simuleert die normaal gesproken toegepast wordt op dijken. Door

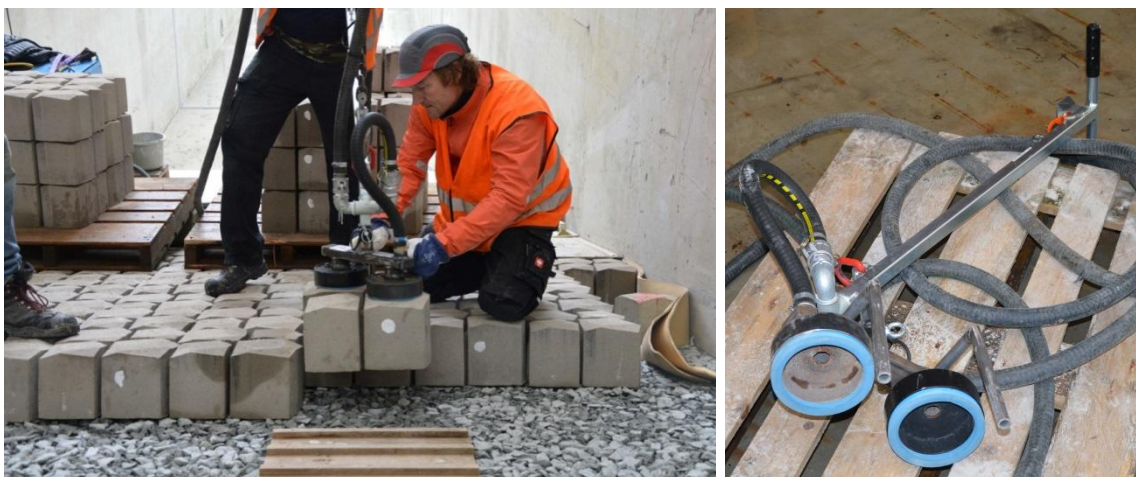
geen klei maar beton toe te passen was de modelopstelling eenvoudiger te bouwen, terwijl dit geen invloed heeft op de stabiliteit van de Basalton Quattroblocks.

Bovenop de betonlaag van de meetsectie is een geotextiel toegepast zoals dat gebruikelijk is op een kleilaag. Op het geotextiel is een filterlaag aangebracht met steenslag van Noors graniet. Op basis van vele metingen tijdens het zetten van de steenzetting is vastgesteld dat de gemiddelde dikte van deze laag 7,5 cm is. Het gebruikte filtermateriaal heeft een korrelgrootte van 11 – 35 mm ( $D_{15} = 13$  mm). De zeefkromme van het filtermateriaal is te vinden in Figuur B.1.

Op het filtermateriaal is de steenzetting aangebracht van Basalton Quattroblocks. De maten in modelschaal van de Basalton Quattroblocks zijn gegeven in Bijlage B.2. Na het aanbrengen van de steenzetting is deze ingewassen met steenslag (Noors graniet, zie Figuur B.1). Voor het plaatsen van de Basalton Quattroblocks is gebruikgemaakt van een speciale zuignap die ontwikkeld is door Holcim, die te zien is in Figuur 3.3.

De belangrijkste afmetingen van het schaalmodel zijn als volgt:

- taludhelling: 1:3,6
- gemiddelde toplaagdikte:  $D = 0,199$  m
- gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen:  $\rho_z = 2262$  kg/m<sup>3</sup>
- gemiddelde filterlaagdikte: 0,075 m
- korrelgrootte van het filter: 11-35 mm,  $D_{15} = 13$  mm
- korrelgrootte van het inwasmateriaal: 5-20 mm,  $D_{15} = 5,7$  mm
- geotextiel: GEOPEX-NW270-S22NW-TYPE 1



Figuur 3.3 Plaatsing van Basalton Quattroblock op het filter (links) met speciale zuignap (rechts)

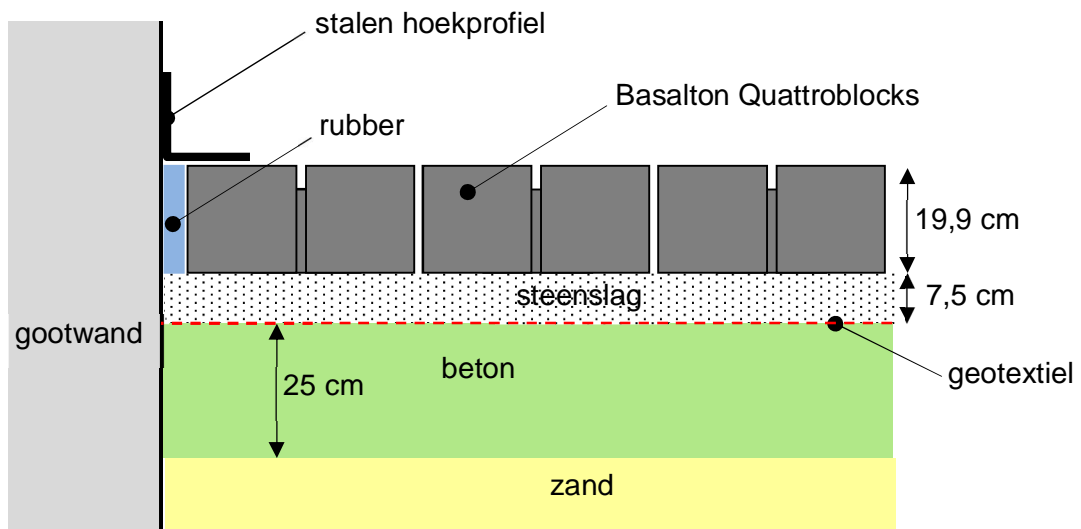
De hoogte van de Quattroblocks is bij 27 zetstenen van verschillende pallets gemeten. De gemiddelde hoogte was 199 mm met een standaardafwijking van 3,9 mm. Bij 10 natte zetstenen is de soortelijke massa bepaald nadat deze lange tijd in het water waren gezet. Deze was gemiddeld 2262 kg/m<sup>3</sup> met een standaardafwijking van 27 kg/m<sup>3</sup>. Gezien het feit dat het om een goed geklemde steenzetting gaat, is de gemiddelde zuilhoogte en soortelijke massa maatgevend.

Het open oppervlak aan de onderzijde van de Quattroblocks (zie definitie in NEN-7024) is bepaald door het aantal toegepaste blokken in de Deltagoot te vermenigvuldigen met het gemiddelde grondoppervlak van een blok en dit te vergelijken met het totale oppervlak van de

meetsectie. De verbindingen tussen de vier blokken in één Quattroblock lopen helemaal door tot aan het grondvlak.

Tussen de gootwand en de zetstenen is een strook rubber van 1,2 cm dikte aangebracht, zie Figuur 3.4. Dat is gebruikelijk bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klemwigt tussen de starre gootwanden, waardoor een overschatting van de stabiliteit verkregen zou kunnen worden.

Langs de gootwanden is op de steenzetting een stalen hoekprofiel bevestigd, wat ervoor zorgt dat er geen randeffecten optreden als gevolg van de overgang van de zuilen naar het rubber en van het rubber naar de gootwanden.



Figuur 3.4 Aansluiting van de steenzetting tegen de gootwand (schematische dwarsdoorsnede).



## 4 Proefresultaten en observaties

### 4.1 Proevenprogramma

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende drie proevenseries:

- Serie 1 en 2: eerst zijn twee proevenseries met korteduurproeven (circa 1000 golven per proef) uitgevoerd. Per serie zijn alle proeven uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid. De proeven van serie 1 zijn uitgevoerd met relatief lange golven (golfsteilheid van 2%), en de proeven van serie 2 zijn uitgevoerd met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%). Binnen deze series is de golfhoogte bij elke volgende proef weer een stukje verhoogd totdat de maximaal op te wekken golfhoogte was bereikt.
- Serie 3: tijdens de laatste serie (serie 3) is een langeduurproef uitgevoerd met gelijkblijvende golfcondities. Deze serie geeft inzicht in de langeduursterkte van de bekleding. De langeduurproef van serie 3 is uitgevoerd met dezelfde golfsteilheid als serie 2 en de grootst mogelijke golven. De langeduurproef is in delen uitgevoerd om tussentijds eventuele schade te kunnen monitoren.



Figuur 4.1 Golfbelasting op talud met Basalton Quattroblocks

De gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) zijn weergegeven in Tabel 4.1. Alle proeven zijn uitgevoerd met onregelmatige golven. De golfcondities van de proeven worden gekarakteriseerd door de significante golfhoogte ( $H_{m0}$ ), de spectrale golfperiode ( $T_{m-1,0}$ ) en de piekperiode ( $T_p$ ). Alle proeven zijn uitgevoerd met een Jonswap spectrum. Dit spectrum is representatief voor de golfcondities langs de Nederlandse primaire waterkeringen en Noordzee.

De golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidspectra van de uitgevoerde proeven zijn weergegeven in de bijlagen B.3 t/m B.5.

Na elke proef van de series 1 en 2 is het uitgespoelde inwasmateriaal weer aangevuld, zodat de afzonderlijke proeven als onafhankelijk van elkaar kunnen worden beschouwd. Tijdens serie 3 (langeduurproef) is de bekleding niet tussentijds ingewassen.

Aan het begin van de proevenseries 1 is op de nieuw aangelegde steenzetting eerst een ingolfproef uitgevoerd met een duur van een half uur om de steenzetting en het inwasmateriaal zich zo goed mogelijk te laten zetten. Deze ingolfproef is uitgevoerd met een waterstand van 5,8 m boven de gootbodem. Tijdens de andere proeven is een waterstand aangehouden van 6,1 m boven de gootbodem. Na afloop van elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al schade was ontstaan en op te meten hoeveel inwasmateriaal er is uitgespoeld.

Voor de karakterisering van de schade zijn de categorieën uit bijlage D gehanteerd.

De genoemde waarden in Tabel 4.1 betreffen de condities zoals gemeten in de Deltagoot (schaal 1:1,5). De overeenkomstige belastingduur is op ware grootte  $\sqrt{1,5} = 1,22$  groter (zie paragraaf 2.2).

Serie	Proef	h	H <sub>m0</sub>	T <sub>p</sub>	T <sub>m-1,0</sub>	S <sub>op</sub>	S <sub>om</sub>	ξ <sub>op</sub>	ξ <sub>om</sub>	N	duur	H <sub>m0</sub> /(ΔD)
		[m]	[m]	[s]	[s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[h]	[-]
1	T01	5,8	1,17	6,18	5,61	0,020	0,024	1,98	1,80	387	0,5	4,66
	T02	6,1	1,57	7,13	6,20	0,020	0,026	1,97	1,72	1222	1,8	6,25
	T03	6,1	1,82	7,59	6,38	0,020	0,029	1,95	1,64	1229	1,9	7,25
	T04	6,1	1,93	7,98	6,66	0,019	0,028	1,99	1,66	1260	2,0	7,69
2	T05	6,1	1,48	5,05	4,67	0,037	0,044	1,44	1,33	1121	1,3	5,89
	T06	6,1	1,72	5,35	4,94	0,038	0,045	1,42	1,31	1016	1,2	6,84
3	T07	6,1	1,91	5,66	5,21	0,038	0,045	1,42	1,31	1036	1,3	7,59
	T07	6,1	1,91	5,66	5,21	0,038	0,045	1,42	1,31	1036	1,3	7,59
	T08	6,1	1,91	5,65	5,18	0,038	0,046	1,42	1,30	532	0,7	7,62
	T09	6,1	1,89	5,63	5,20	0,038	0,045	1,42	1,31	3155	4,0	7,53
	T10	6,1	1,91	5,61	5,19	0,039	0,045	1,41	1,30	1586	2,0	7,61
	T11	6,1	1,90	5,64	5,19	0,038	0,045	1,42	1,31	4683	6,0	7,57
	T12	6,1	1,91	5,64	5,20	0,039	0,045	1,42	1,30	4663	6,0	7,62
T13	6,1	1,93	5,64	5,20	0,039	0,046	1,41	1,30	4650	6,0	7,69	
Totale serie 3		6,1	1,91	5,64	5,2	0,038	0,045	1,42	1,31	20305	26,0	7,62

Tabel 4.1 Proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities (T07 is één keer uitgevoerd, maar telt mee in serie 2 en 3).

In de tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

h = waterstand (m, t.o.v. de gootbodem)

H<sub>m0</sub> = significante golfhoogte (m)

T<sub>p</sub> = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)

T<sub>m-1,0</sub> = spectrale golfperiode (s)

S<sub>op</sub> = golfsteilheid op basis van de piekperiode:  $s_{op} = H_{m0}/((g/2\pi) \cdot T_p^2)$  (-)

S<sub>om</sub> = golfsteilheid op basis van de spectrale golfperiode:  $s_{om} = H_{m0}/((g/2\pi) \cdot T_{m-1,0}^2)$  (-)

ξ<sub>op</sub> = brekerparameter op basis van de piekperiode:  $\xi_{op} = \tan(\alpha)/\sqrt{s_{op}}$  (-)

ξ<sub>om</sub> = brekerparameter op basis van de spectrale golfperiode:  $\xi_{om} = \tan(\alpha)/\sqrt{s_{om}}$  (-)

$g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $m/s^2$ )  
 $\alpha$  = taludhelling ( $^\circ$ )  
 $N$  = aantal golven (-)  
 $H_s/(\Delta D)$  = belastingparameter (-)

De langeduurproef is in delen uitgevoerd, namelijk T07 t/m T13. Voor het samenstellen van de golfcondities is gebruik gemaakt van de volgende formules:

$$H_{sN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{\sum_{i=1}^n N_i}} \quad (4.1)$$

$$T_{pN} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{pi})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i} \quad (4.2)$$

$$T_{m-1,0,N} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{m-1,0,i})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i} \quad (4.3)$$

Met:

$T_{m-1,0,i}$  = spectrale golfperiode in proef  $i$  (s)  
 $T_{m-1,0,N}$  = spectrale golfperiode, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)  
 $n$  = aantal proeven (-)  
 $N_i$  = aantal golven in proef  $i$  (-)  
 $H_{si}$  = significante golfhoogte in proef  $i$  (m)  
 $H_{sN}$  = significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)  
 $T_{pi}$  = de golfperiode bij de piek van het spectrum in proef  $i$  (s)  
 $T_{pN}$  = de golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (s)

Met deze formules is berekend dat de gemiddelde golfcondities tijdens de langeduurproef als volgt waren:

- $H_{m0} = 1,91$  m
- $T_p = 5,64$  s ( $s_{op} = 0,039$ )
- $T_{m-1,0} = 5,20$  s ( $s_{om} = 0,045$ )

#### 4.2 Waarnemingen tijdens en na de proeven

Tijdens de proeven is de steenzetting visueel gemonitord om te controleren of er schade ontstaat (zie Figuur 4.2).

Naast deze visuele inspectie zijn er na afloop van de proeven metingen uitgevoerd om de schade kwantitatief vast te stellen. Met behulp van een laserscanner is het niveau van het taludoppervlak in detail ingemeten om vervormingen van het talud door de golfbelasting vast te kunnen stellen. Hierbij is het verschil tussen de laserscan na een bepaalde proef en die voor proef T01 in een figuur weergegeven.

Verder is bij 44 Quattroblocks gemeten wat de uitspoeldiepte van het inwasmateriaal is in de openingen tussen de blokken en de opening in het midden van de blokken (zie Figuur 4.2).

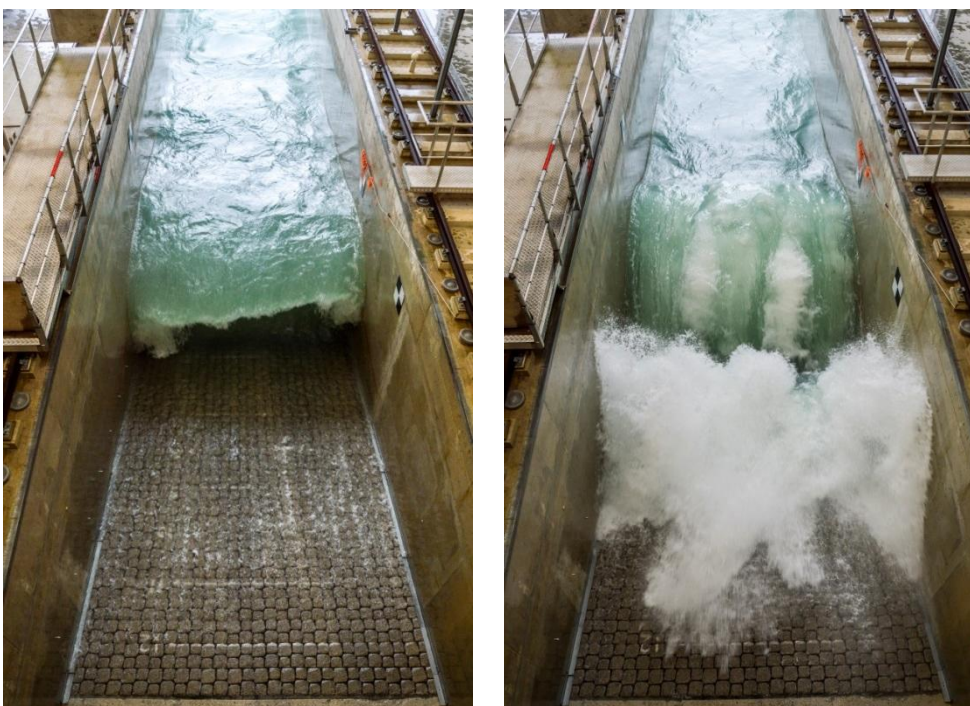


Figuur 4.2 Monitoring van schade tijdens de proeven (links) en het meten van de uitspoeldiepte na afloop van de proeven (rechts)

De waarnemingen en meetresultaten van de drie testseries staan in de volgende paragrafen nader beschreven.

#### 4.2.1 Eerste proevenserie (relatief lange golven)

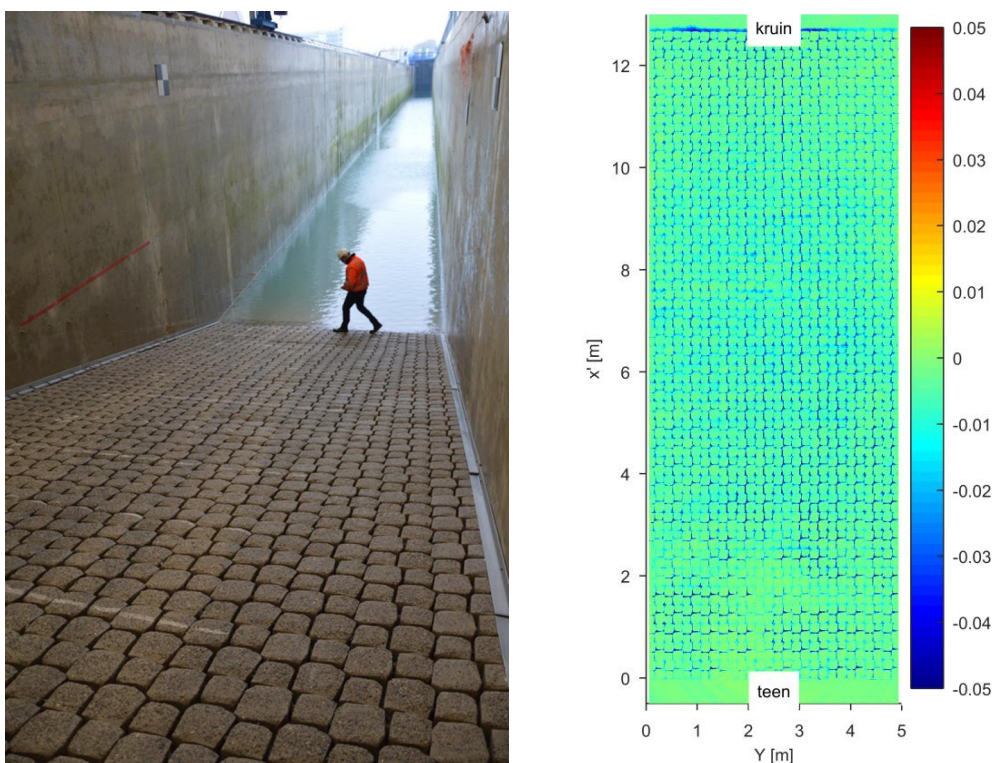
De eerste serie proeven is uitgevoerd met relatief lange golven met een golfsteilheid van  $s_{op} = 2\%$ . Er is gestart met een ingolfproef (T01) om de steenzetting en het inwasmateriaal zich zo goed mogelijk te laten zetten. Vervolgens zijn drie proeven uitgevoerd (T02-T04) waarbij de golfhoogte steeds verhoogd is van een significante golfhoogte van 1,57 m bij proef T02 tot de maximaal haalbare significante golfhoogte van 1,93 m bij proef T04. Tussen twee proeven is het uitgespoelde inwasmateriaal steeds aangevuld. Figuur 4.3 geeft een indruk van de golven tijdens Serie 1. Meer foto's van de proeven zijn terug te vinden in Bijlage E.



Figuur 4.3 Foto's tijdens test T04

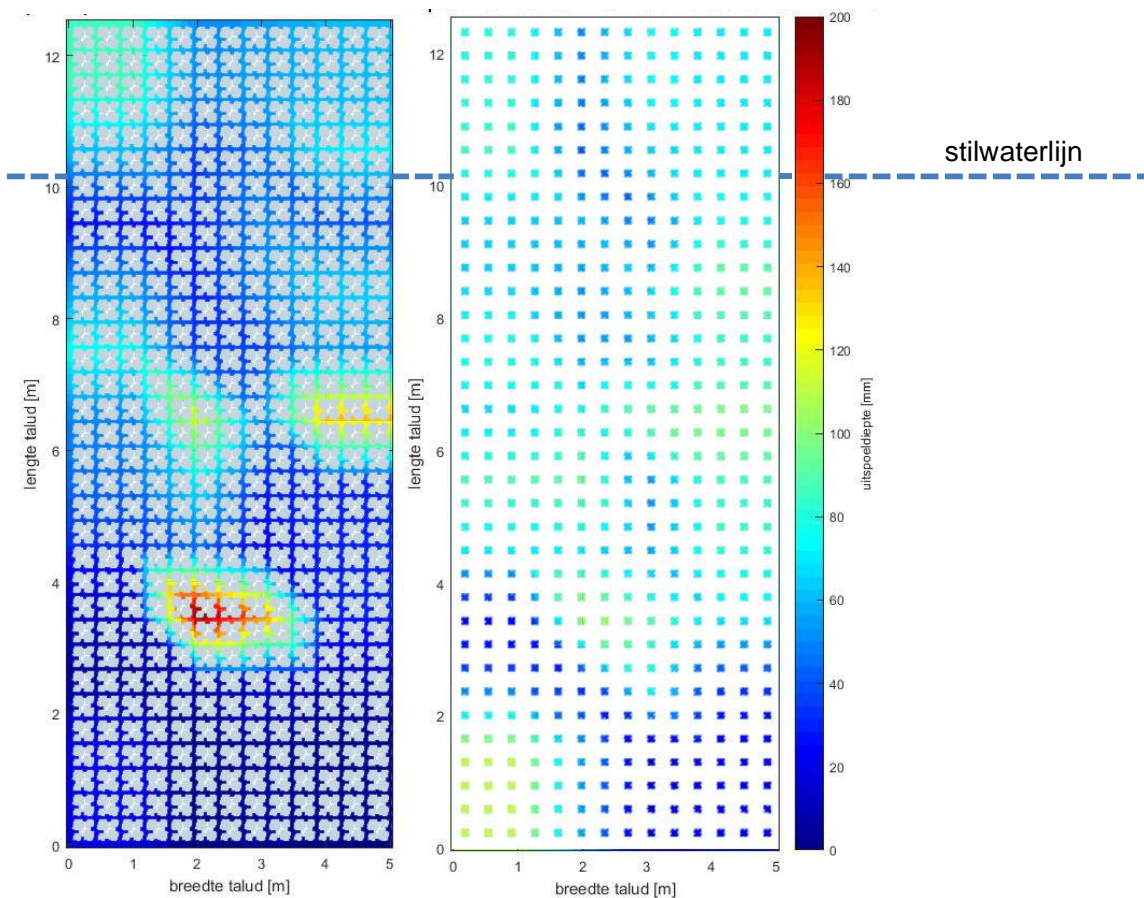


Tijdens alle proeven van Serie 1 is er geen schade aan de steenzetting waargenomen (schadecategorie a, zoals beschreven in Bijlage D). Uit de meting met de laserscan bleek dat er nagenoeg geen tot enkele millimeters vervorming was opgetreden gedurende de proeven in Serie 1. Dit is weergegeven in Figuur 4.4. In deze figuur tekenen de contouren van de Quattroblocks wel af, omdat er wat inwasmateriaal is uitgespoeld. Dat wordt hier geregistreerd als een lokale verlaging van het taludoppervlak.



Figuur 4.4 Steenzetting na T04 en gemeten vervorming (in m) van het talud na proef T04 ten opzichte van de situatie voor proef T01

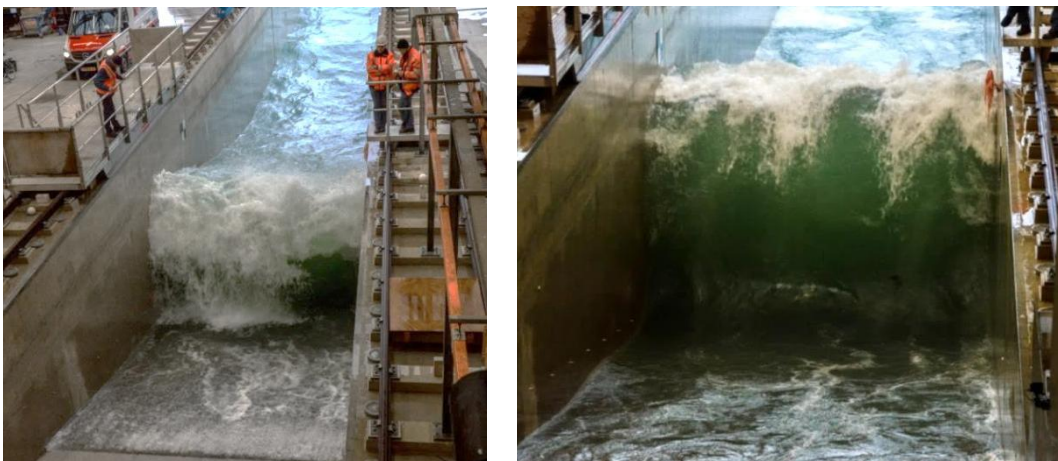
De meting van de uitspoeldiepte van de testen is gegeven in Bijlage A.1 tot en met A.4. Tijdens de ingolfproef T01 is er weinig inwasmateriaal uitgespoeld. Gemiddeld gezien over het talud was de uitspoeldiepte orde 1,5 cm met een maximum van 7 cm. Bij toenemende golfbelasting is ook een toegenomen uitspoeldiepte gemeten. De uitspoeldiepte van het inwasmateriaal na de proef met de zwaarste golfbelasting (T04) is weergegeven in Figuur 4.4. Hierbij zijn de openingen tussen de blokken en de openingen in het midden van de blokken zichtbaar. Bij deze proef is gemiddeld over het talud een uitspoeldiepte van 5,5 cm gemeten. Op één locatie is een uitspoeldiepte van 20 cm gemeten, wat betekent dat op deze locatie geen inwasmateriaal meer tussen de blokken aanwezig was. Hier is echter geen uitspoeling van het filter opgetreden. Deze grootste uitspoeldiepte kwam voor in de golfklapzone. De maximale uitspoeling tussen de blokken is groter dan de maximale uitspoeling in het midden van de blokken terwijl het midden van de blokken gemiddeld gezien dieper is uitgespoeld dan de ruimten tussen de blokken.



Figuur 4.5 Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal tussen de Quattroblocks (links) en in het midden van de Quattroblocks (rechts) na proef T04

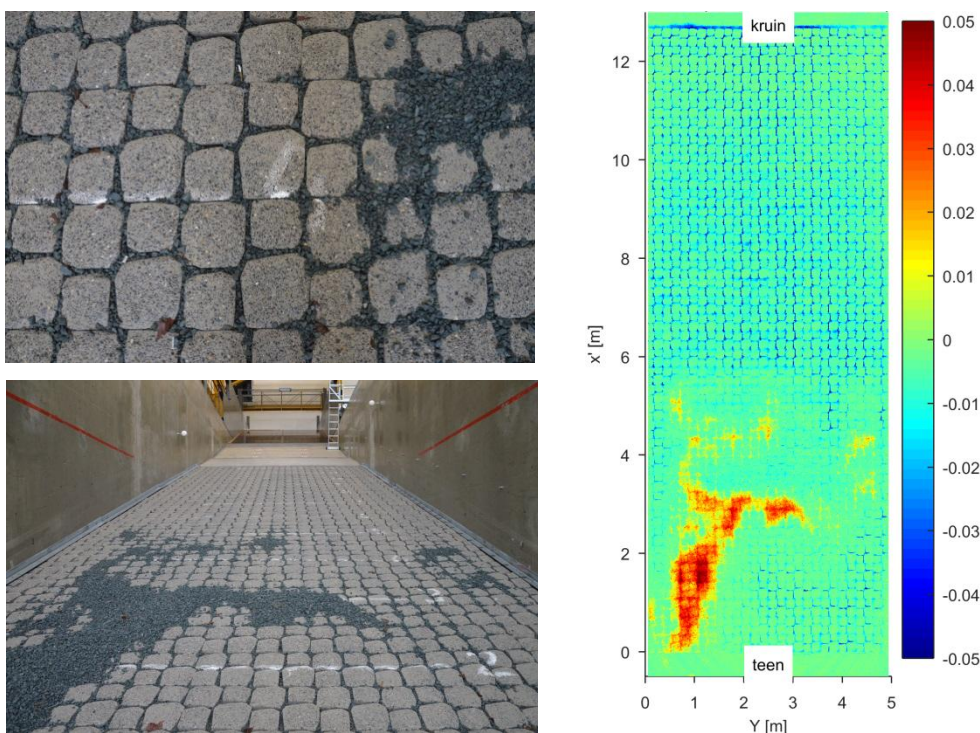
## 4.2.2 Tweede proevenserie (relatief korte golven)

De tweede serie proeven is uitgevoerd met relatief korte golven met een golfsteilheid van 4%. Er zijn drie proeven uitgevoerd (T05-T07) waarbij de golfhoogte steeds verhoogd is van een significante golfhoogte van 1,48 m bij proef T05 tot de maximaal haalbare significante golfhoogte van 1,91 m bij proef T07. Tussen twee proeven is het uitgespoelde inwasmateriaal steeds aangevuld. Figuur 4.6 geeft een indruk van de golven tijdens Serie 2. Meer foto's van de proeven zijn terug te vinden in Bijlage E.



Figuur 4.6 Foto's tijdens test T07 van Serie 2

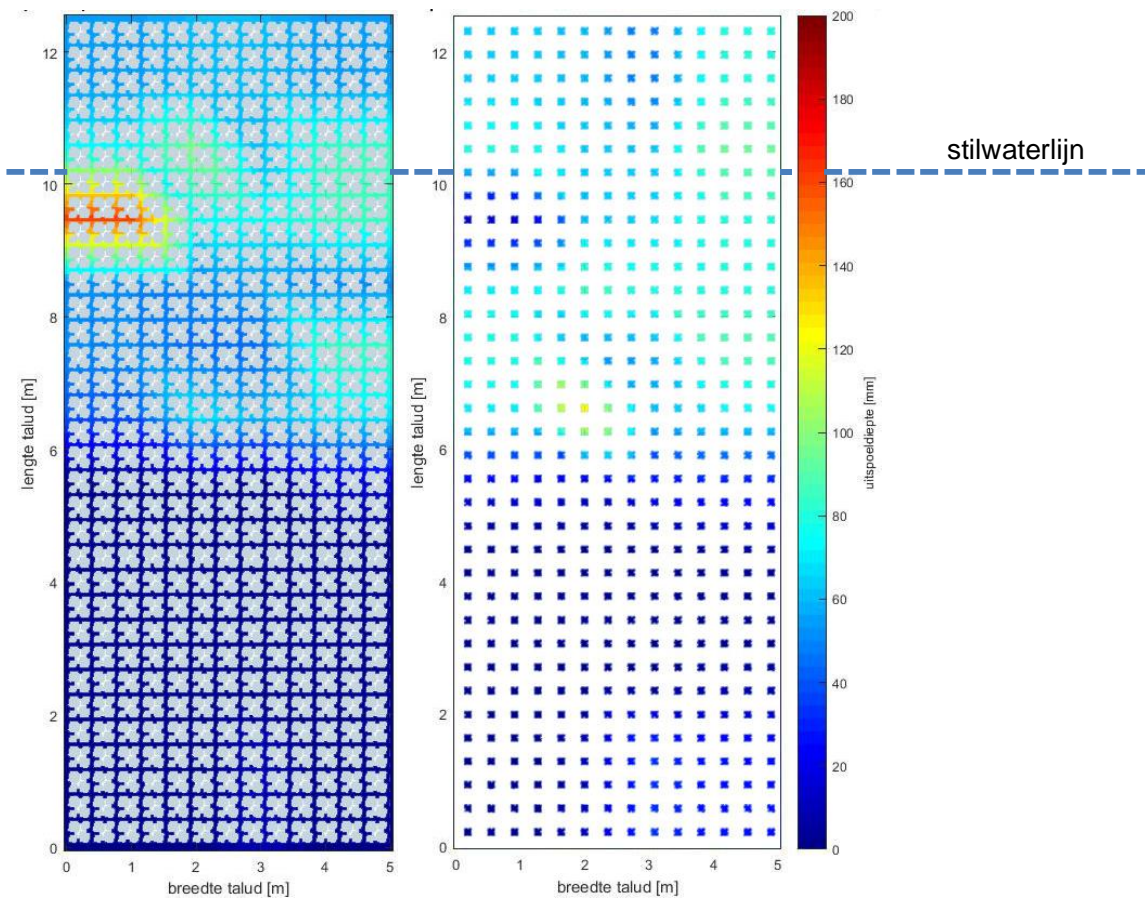
Tijdens alle proeven van Serie 2 is er geen schade aan de steenzetting waargenomen (schadecategorie a, zoals beschreven in Bijlage D). Uit de laserscan bleek dat er nagenoeg geen tot enkele millimeters vervorming was opgetreden (zie Figuur 4.7). De gebieden waar het niveau van het taludoppervlak significant lijkt te zijn toegenomen (rode vlakken in Figuur 4.7) geven geen vervormingen van de steenzetting aan, maar is een laagje uitgespoelde inwasmateriaal wat op het talud is achtergebleven (zoals ook te zien is op de foto's van Figuur 4.7).



Figuur 4.7 Steenzetting na T07 en vervorming van het talud na proef T07 ten opzichte van de situatie voor proef T01

De meting van de uitspoeldiepte van de testen is gegeven in Bijlage A.5 tot en met A.7. Tijdens de proef met de laagste golfhoogte, T05, is er weinig inwasmateriaal uitgespoeld. Gemiddeld gezien over het talud was de uitspoeldiepte orde 1 cm met een maximum van 13,5 cm. Tijdens de proeven van Serie 2 is het inwasmateriaal voornamelijk in de golfklapzone uitgespoeld. De golfklapzone lag bij de proeven van Serie 2 wat hoger op het talud als bij de proeven van Serie 1. In de onderste helft van het talud, onder de golfklapzone, was nagenoeg geen inwasmateriaal uitgespoeld.

Bij toenemende golfbelasting is een kleine toename van de uitspoeldiepte gemeten. De uitspoeldiepte van het inwasmateriaal is bij de proef met de zwaarste golfbelasting (T07) weergegeven in Figuur 4.8 voor de openingen tussen de blokken en de openingen in het midden van de blokken. Bij deze proef is gemiddeld over het talud een uitspoeldiepte van 4,5 cm gemeten met een maximum van 16 cm. Zoals te zien is in Figuur 4.8 is ook bij deze proef voornamelijk de bovenste helft van het talud uitgespoeld.



Figuur 4.8 Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal tussen de Quattroblocks (links) en in het midden van de Quattroblocks (rechts) na proef T07

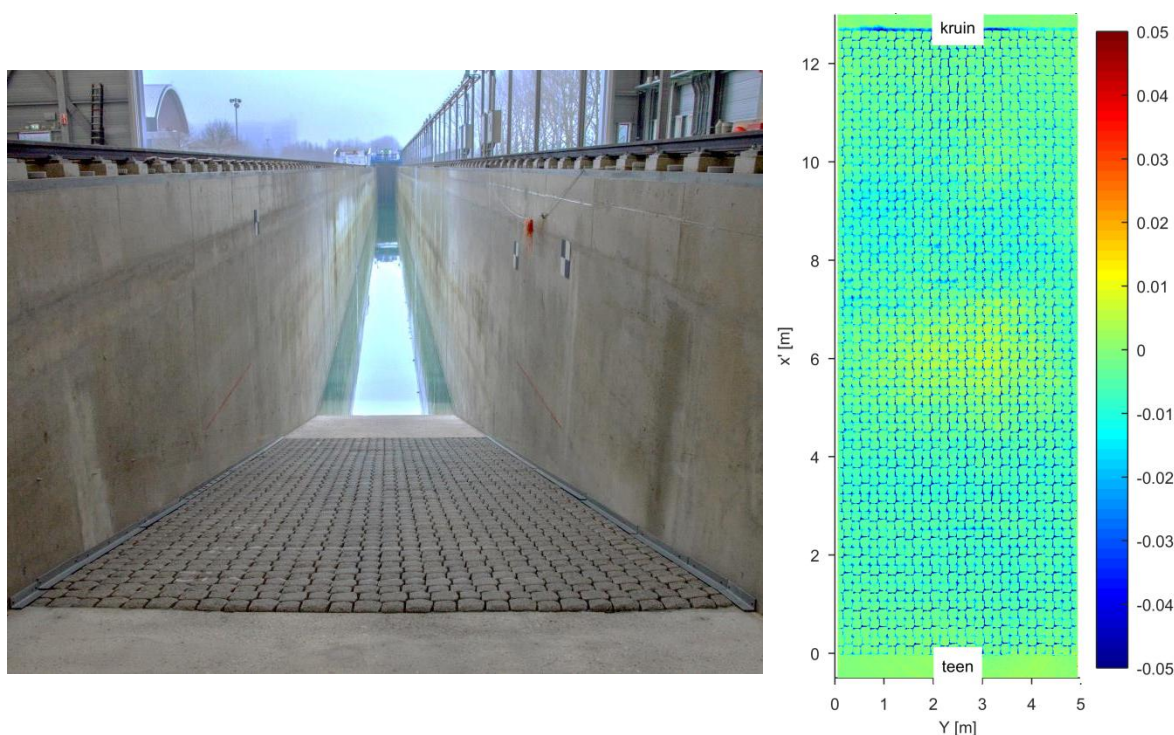
### 4.2.3 Derde proevenserie (langeduurproef)

Omdat er geen significante schade is ontstaan tijdens Serie 1 en Serie 2 is de langeduurproef, Serie 3, uitgevoerd met de grootste golfbelasting van de voorgaande proeven, namelijk gelijk aan T07. Tijdens Serie 3 is de steenzetting gedurende 26 uur belast met golven met een golfsteilheid van  $s_{op} = 4\%$  zonder de steenzetting tussentijds opnieuw in te wassen. Figuur 4.9 geeft een indruk van de golven tijdens Serie 3. Meer foto's van de proeven zijn terug te vinden in Bijlage E.



Figuur 4.9 Foto's tijdens T12 van Serie 3

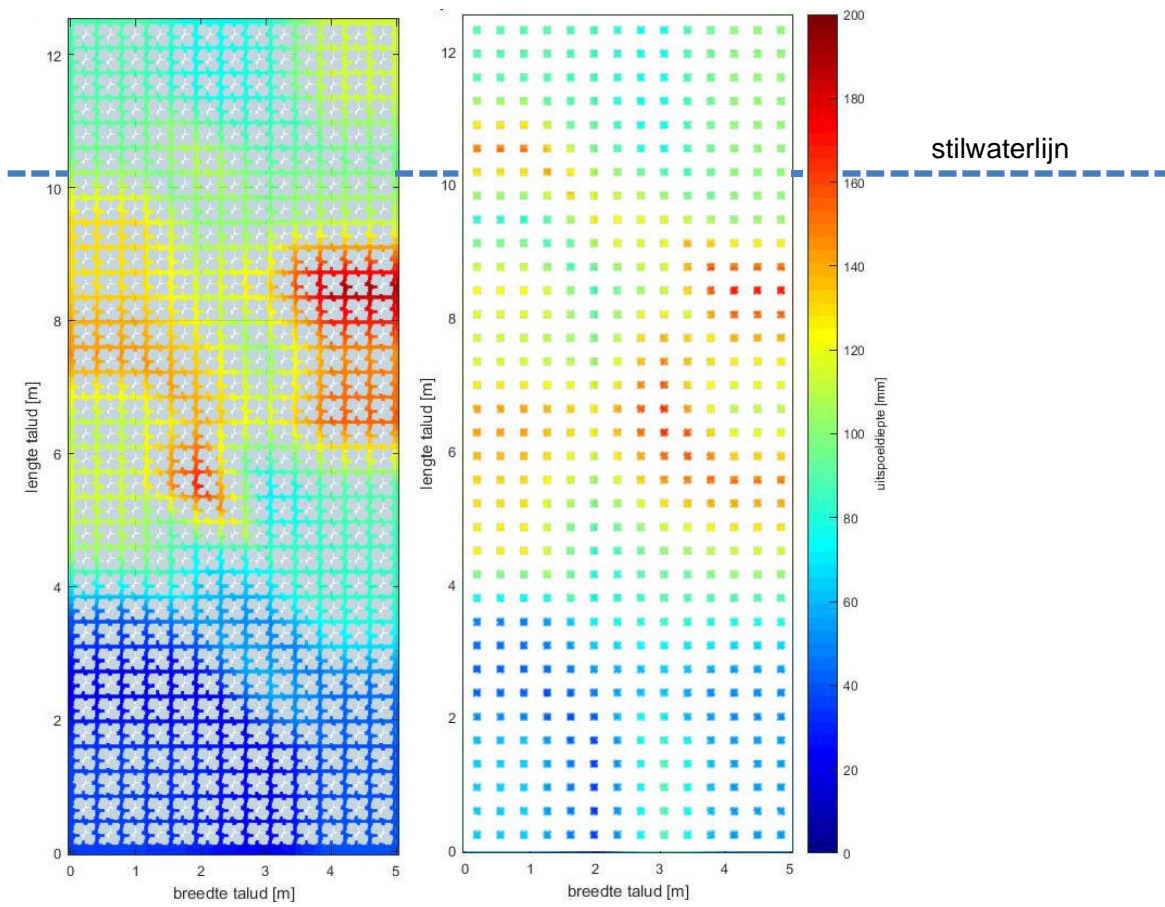
Tijdens alle proeven van Serie 3 is er ook geen schade aan de steenzetting waargenomen. In de resultaten van de laserscan zoals weergegeven in Figuur 4.10 is te zien dat de steenzetting rond de 6 m lijn (het gebied tussen 0,8 en 1,4 m onder het stilwaterniveau) orde 1 cm omhoog is gekomen. Tussen de 8 en 9 m, waar de meeste golfklappen op het talud neerkwamen, is een verlaging van orde 1 cm te zien. Deze vervorming van het talud is nog ruimschoots kleiner dan 10% van de blokhoogte, waardoor de schade nog ruim in categorie a valt (zie Bijlage D).



Figuur 4.10 Steenzetting na T13 en gemeten vervorming van het talud na proef T13 ten opzichte van de situatie voor proef T01

De meting van de uitspoeldiepte van de testen is gegeven in Bijlage A.7 tot en met A.10. De uitspoeldiepte nam langzaam toe naarmate het talud langer belast werd. Aan het eind van de langeduurproef, na 26 uur, is gemiddeld over het talud een uitspoeldiepte van 10 cm gemeten. Op een aantal locaties was het inwasmateriaal tot op het filter uitgespoeld. Er is nergens uitspoeling van het filtermateriaal opgetreden. De uitspoeldiepte van het inwasmateriaal na proef T13 is weergegeven in Figuur 4.11.

Tijdens geen van de proevenseries is significante schade van de steenzetting opgetreden. De schade na alle proeven valt in categorie a (zie Bijlage D).



Figuur 4.11 Uitspoeldiepte van het inwasmateriaal tussen de Quattroblocks (links) en in het midden van de Quattroblocks (rechts) na proef T13

## 5 Stabiliteitsfactor

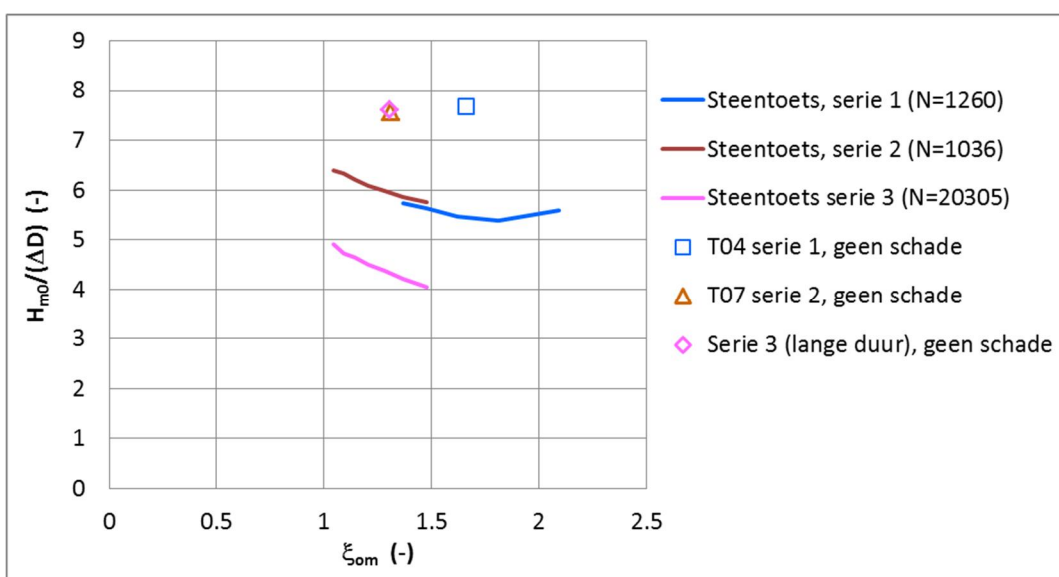
### 5.1 Gemeten stabiliteit ten opzichte van met Steentoets berekende stabiliteit

Voor elke proevenserie is met Steentoets berekend bij welke significante golfhoogte de steenzetting volgens Steentoets versie 17.1.7.1 (Klein Breteler, 2017) zou bezwijken. De resultaten zijn gegeven in Tabel 5.1. Hierbij is ook de bijbehorende belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  vermeld.

Bij de berekening met Steentoets is gebruikgemaakt van de modelwaarden zoals deze gemeten zijn in de Deltagoot en een stabiliteitsfactor gelijk aan 1,0. De berekeningen zijn gebaseerd op de gemeten golfsteilheid  $s_{om}$  (op basis van de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$ ).

Serie	Invoer			Resultaat	
	$s_{om}$ [-]	N	$H_s$ [m]	$\xi_{om}$ [-]	$H_s/(\Delta D)$ [-]
1	0,028	1260	1,37	1,66	5,45
2	0,045	1036	1,49	1,31	5,93
3	0,045	20305	1,09	1,30	4,34

Tabel 5.1 Resultaten van de berekeningen met Steentoets met stabiliteitsfactor gelijk aan 1,0.



Figuur 5.1 Resultaten van de belangrijkste proeven en de overeenkomstige berekeningen met Steentoets.

Tijdens de proeven in de Deltagoot is echter geen schade vastgesteld (aan het eind van alle proeven: schadecategorie a). De resultaten van de proeven en de Steentoetsberekeningen zijn grafisch weergegeven in Figuur 5.1. Op de horizontale as staat de brekerparameter  $\xi_{om}$ . Deze brekerparameter is gebaseerd op de spectrale periodemaat  $T_{m-1,0}$ . Op de verticale as staat de belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  op basis van de gemiddelde soortelijke massa.

Van elke serie is de proef weergegeven met de hoogste significante golfhoogte. Bij geen van deze proeven is schade opgetreden. De lijnen geven de resultaten van Steentoets-berekeningen, waarbij de golfsteilheid wat gevarieerd is rond de waarde die toegepast is tijdens de proevenseries. De meetpunten en lijnen met dezelfde kleur horen bij elkaar.

In de figuur is te zien dat alle meetpunten ruim boven de lijnen liggen die met Steentoets zijn berekend. De stabiliteit van Basalton Quattroblocks is dus beduidend hoger dan wat Steentoets berekend met een stabiliteitsfactor van 1,0. Dat betekent dat de stabiliteitsfactor groter moet zijn dan 1,0.

## 5.2 Stabiliteitsfactor

De stabiliteitsfactor voor Basalton Quattroblocks is berekend op basis van de uitgevoerde proeven in de Deltagoot. Met deze stabiliteitsfactor zal in de toekomst het resultaat van Steentoetsberekeningen zodanig gecorrigeerd worden 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 de code van Steentoets. De toplaagdikte die volgens Steentoets nodig is (zonder gebruik van de stabiliteitsfactor), zal in het programma gedeeld worden door de 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 door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in bijlage C. Deze procedure is hetzelfde als tijdens het "vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" (Klein Breteler, 2015).

In de procedure is aangegeven hoe de proefresultaten geïnterpreteerd moeten worden, zie bijlage C.2. Omdat ook tijdens de langeduurproef er geen schade is ontstaan aan de Basalton Quattroblocks, komen we in deze interpretatieprocedure uit op punt 5 uit de lijst:

Als tijdens geen enkele proevenserie bezwijken is opgetreden, wordt aangenomen dat er wel bezwijken 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 (in bijlage C.2) wordt dan niet toegevoegd, omdat het doorstaan van de langeduurproef impliceert dat bezwijken bij een veel hogere golfhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

Dit betekent dat voor het afleiden van de stabiliteitsfactor gerekend wordt alsof er schade is ontstaan bij de volgende condities:

- gemiddelde significante golfhoogte tijdens de langeduurproef:  $H_{m0} = 1,91$  m
- gemiddelde spectrale golfperiode tijdens de langeduurproef:  $T_{m-1,0} = 5,20$  s
- schade na een belastingduur die 20% langer is dan de uitgevoerde proef, uitgedrukt in het aantal golven:  $N = 24366$ .

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor op basis van deze gegevens bepaald met de volgende formule:

$$f_{stab} = \left( \frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \quad (5.1)$$

Met:

$D_{ST\ eigen\ gewicht}$  = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets, als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht (als blok zonder klemming; met stabiliteitsfactor = 1), bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot



$D_{\text{Steentoets}}$	= de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming en met stabiliteitsfactor = 1) bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot
$D_{\text{in modelproeven}}$	= de toplaagdikte (zuilhoogte) die toegepast is in de Deltagoot. In dit geval was dat 0,199 m.
$f_{\text{stab}}$	= 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 (-)

De resultaat van de berekeningen met Steentoets met stabiliteitsfactor gelijk aan 1 zijn:

- $D_{\text{ST eigen gewicht}} = 0,391$  m
- $D_{\text{Steentoets}} = 0,296$  m

De waarde van de veiligheidsfactor  $\gamma$  wordt bepaald op basis van de standaardafwijking in de proefresultaten. Omdat in dit geval slechts één proevenserie voor deze berekeningen gebruikt wordt, wordt gerekend met een minimumwaarde zoals beschreven in bijlage C, namelijk  $\sigma = 0,05$ . De veiligheidsfactor wordt berekend met de volgende formule, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

$$\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma = 1,1 + 1,89 \cdot 0,05 = 1,20 \quad (5.2)$$

Met:

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

Door deze resultaten in te vullen in formule (5.1) wordt de volgende stabiliteitsfactor voor Basalton Quattroblocks verkregen:  $f_{\text{stab}} = 1,37$ .

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Quattroblocks van 30 cm hoog (op schaal 1:1,5, dus 20 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog. 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 circa 4,5 m.



## 6 Conclusies

In de Deltagoot van Deltares is de stabiliteit van Basalton Quattroblocks vastgesteld. Daarvoor is op schaal 1:1,5 een dijk met Basalton Quattroblocks opgebouwd en beproefd met hoge golven. De belangrijkste eigenschappen van de dijk en de bekleding waren (maten op schaal):

- taludhelling: 1:3,6
- gemiddelde toplaagdikte:  $D = 0,199$  m
- gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen:  $\rho_z = \text{ca } 2262 \text{ kg/m}^3$
- relatief open oppervlak: 10,5%
- gemiddelde filterlaagdikte: 0,075 m
- korrelgrootte van het filter: 11-35 mm,  $D_{f15} = 13$  mm
- korrelgrootte van het inwasmateriaal: 5-20 mm,  $D_{i15} = 5,7$  mm

Er zijn drie proevenseries uitgevoerd:

- 1 korteduurproeven met relatief lange golven met golfsteilheid  $s_{op} = H_{m0}/(1,56T_p^2) = 0,02$  en significante golfhoogte tot  $H_{m0} = 1,93$  m
- 2 korteduurproeven met relatief korte golven met golfsteilheid  $s_{op} = 0,04$  en significante golfhoogte tot  $H_{m0} = 1,91$  m
- 3 langeduurproef met relatief korte golven met golfsteilheid  $s_{op} = 0,04$  en significante golfhoogte van  $H_{m0} = 1,91$  m

Na afloop van al deze proeven was er nog geen schade aan de steenzetting ontstaan. De geconstateerde vervormingen zitten nog ruimschoots in schadecategorie a, terwijl er pas van bezwijken wordt gesproken in schadecategorie c.

Op basis van deze proefresultaten en de door Rijkswaterstaat vastgestelde procedure (zie bijlage C) is de stabiliteitsfactor voor Basalton Quattroblocks bepaald:  $f_{stab} = 1,37$ .

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met Quattroblocks van 30 cm hoog (op schaal 1:1,5, dus 20 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 15 cm tot 60 cm hoog. 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 Referenties

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

Klein Breteler, M. (2014), *Documentatie Steentoets, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*, Deltares rapport 1209832-006, 9 mei 2017

Klein Breteler, M. (2016), *Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken, Samenvattend rapport*, Deltares rapport 1208618-006, 7 juli 2016

NEN-7024, *Zetsteen*; ICS 91.10030; 93.160, april 2015



## A Tabellen

### A.1 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T01

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	32	40	41	30	25	39	32	62
10,5	18	20	5	22	24	30	26	50
9,5	0	15	15	15	15	30	20	35
8,5	0	0	0	0	27	40	30	55
7,5	0	0	5	0	30	60	35	50
6,5	0	5	10	25	30	40	70	70
5,5	5	0	5	5	40	35	35	70
4,5	10	15	5	5	15	20	15	35
3,5	0	0	5	10	5	15	5	40
2,5	0	5	5	15	5	30	20	20
1,5	0	15	5	15	5	25	5	15

### A.2 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T02

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	45	60	30	60	75	80	35	75
10,5	50	65	35	50	30	45	40	75
9,5	45	70	30	40	50	60	30	55
8,5	45	90	40	40	50	60	55	90
7,5	60	80	35	75	35	35	50	55
6,5	130	90	25	50	65	90	45	70
5,5	45	20	15	15	15	15	10	20
4,5	5	25	0	0	5	25	25	14
3,5	0	10	0	0	0	0	0	0
2,5	0	0	0	0	0	5	0	0
1,5	0	0	0	10	5	15	5	0

## A.3 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T03

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	45	50	45	50	45	50	45	50
10,5	20	25	20	25	20	25	20	25
9,5	10	20	10	20	10	20	10	20
8,5	60	50	60	50	60	50	60	50
7,5	5	20	5	20	5	20	5	20
6,5	70	80	70	80	70	80	70	80
5,5	80	85	80	85	80	85	80	85
4,5	30	70	30	70	30	70	30	70
3,5	45	30	45	30	45	30	45	30
2,5	175	95	175	95	175	95	175	95
1,5	10	40	10	40	10	40	10	40

## A.4 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T04

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	85	80	85	80	85	80	85	80
10,5	60	85	60	85	60	85	60	85
9,5	25	65	25	65	25	65	25	65
8,5	55	65	55	65	55	65	55	65
7,5	75	80	75	80	75	80	75	80
6,5	50	65	50	65	50	65	50	65
5,5	45	90	45	90	45	90	45	90
4,5	30	70	30	70	30	70	30	70
3,5	10	20	10	20	10	20	10	20
2,5	5	40	5	40	5	40	5	40
1,5	20	110	20	110	20	110	20	110



**A.5 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T05**

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	60	70	60	70	60	70	60	70
10,5	55	80	55	80	55	80	55	80
9,5	40	65	40	65	40	65	40	65
8,5	30	60	30	60	30	60	30	60
7,5	5	35	5	35	5	35	5	35
6,5	0	45	0	45	0	45	0	45
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0
4,5	0	0	0	0	0	0	0	0
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
2,5	5	5	5	5	5	5	5	5
1,5	5	5	5	5	5	5	5	5

**A.6 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T06**

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	60	75	60	75	60	75	60	75
10,5	50	80	50	80	50	80	50	80
9,5	40	75	40	75	40	75	40	75
8,5	30	50	30	50	30	50	30	50
7,5	0	90	0	90	0	90	0	90
6,5	10	70	10	70	10	70	10	70
5,5	5	15	5	15	5	15	5	15
4,5	0	0	0	0	0	0	0	0
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
2,5	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0	5	0	5	0	5	0	5

## A.7 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T07

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	55	65	55	65	55	65	55	65
10,5	75	80	75	80	75	80	75	80
9,5	160	10	160	10	160	10	160	10
8,5	50	70	50	70	50	70	50	70
7,5	50	80	50	80	50	80	50	80
6,5	40	70	40	70	40	70	40	70
5,5	0	20	0	20	0	20	0	20
4,5	0	0	0	0	0	0	0	0
3,5	0	0	0	0	0	0	0	0
2,5	0	0	0	0	0	0	0	0
1,5	0	0	0	0	0	0	0	0

## A.8 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T09

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	80	70	80	70	80	70	80	70
10,5	80	85	80	85	80	85	80	85
9,5	80	80	80	80	80	80	80	80
8,5	65	90	65	90	65	90	65	90
7,5	35	90	35	90	35	90	35	90
6,5	45	100	45	100	45	100	45	100
5,5	45	60	45	60	45	60	45	60
4,5	40	40	40	40	40	40	40	40
3,5	25	40	25	40	25	40	25	40
2,5	30	45	30	45	30	45	30	45
1,5	10	35	10	35	10	35	10	35

**A.9 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T11**

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	110	100	110	100	110	100	110	100
10,5	85	125	85	125	85	125	85	125
9,5	90	95	90	95	90	95	90	95
8,5	70	115	70	115	70	115	70	115
7,5	105	120	105	120	105	120	105	120
6,5	85	85	85	85	85	85	85	85
5,5	35	100	35	100	35	100	35	100
4,5	55	145	55	145	55	145	55	145
3,5	35	60	35	60	35	60	35	60
2,5	35	75	35	75	35	75	35	75
1,5	15	40	15	40	15	40	15	40

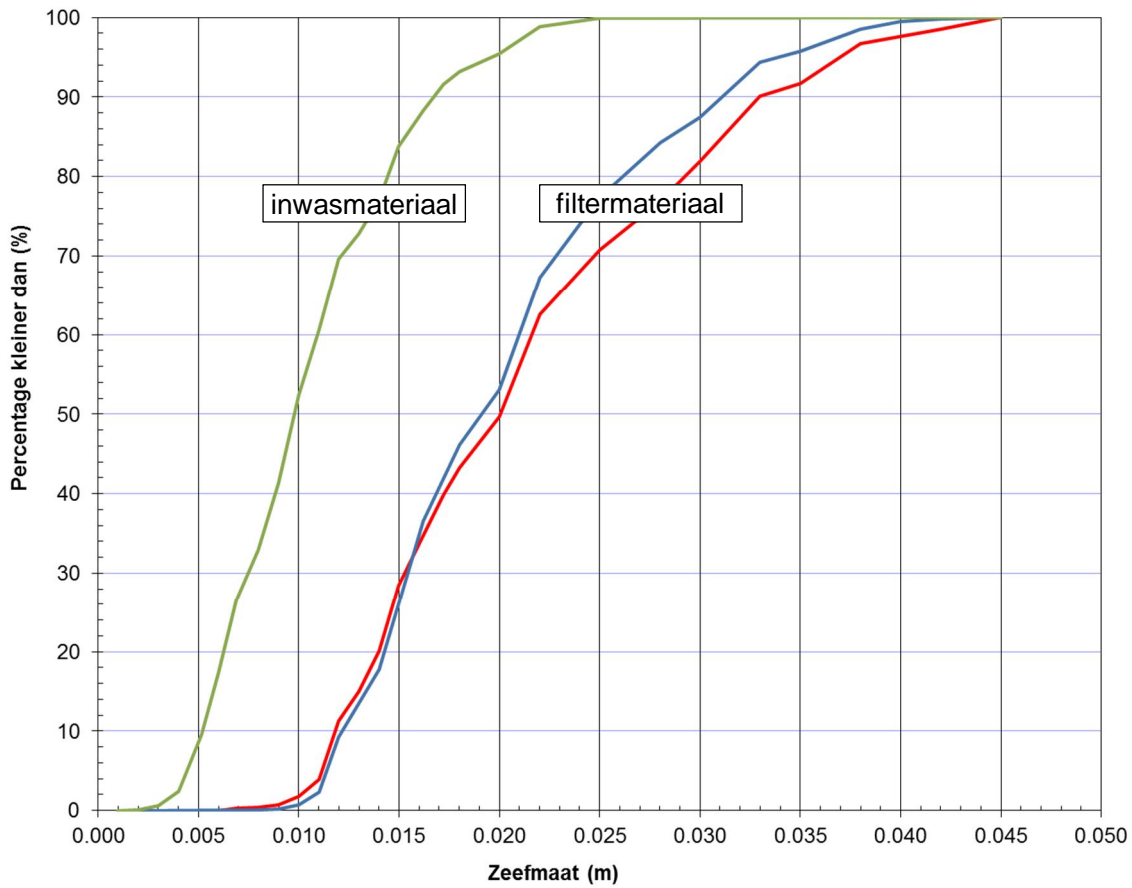
**A.10 Uitgespoeld inwasmateriaal na proef T13**

Afstand vanaf de onderzijde van het talud (m)	Uitspoeldiepte bij 3° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 6° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 9° blok vanaf meetcabine		Uitspoeldiepte bij 12° blok vanaf meetcabine	
	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)	Tussen (mm)	Midden (mm)
11,5	90	90	90	90	90	90	90	90
10,5	95	150	95	150	95	150	95	150
9,5	130	80	130	80	130	80	130	80
8,5	130	125	130	125	130	125	130	125
7,5	145	110	145	110	145	110	145	110
6,5	110	145	110	145	110	145	110	145
5,5	115	130	115	130	115	130	115	130
4,5	105	125	105	125	105	125	105	125
3,5	40	50	40	50	40	50	40	50
2,5	20	40	20	40	20	40	20	40
1,5	35	65	35	65	35	65	35	65



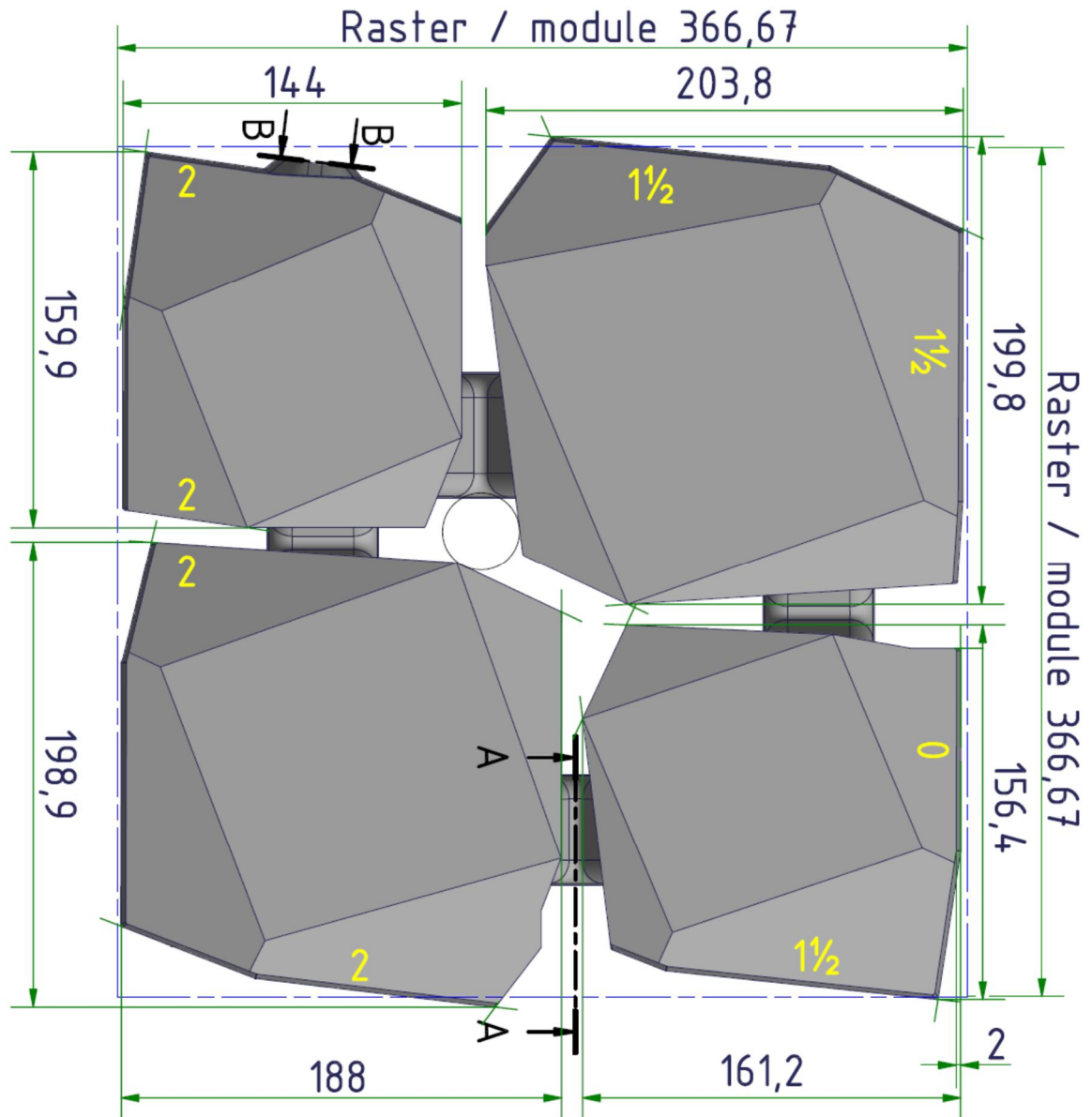
## **B Figuren**

## B.1 Zeefkrommen



Figuur B.1 Zeefkromme van inwasmateriaal (groen) en filtermateriaal (er zijn twee monsters geanalyseerd: zie rode en blauwe lijn)

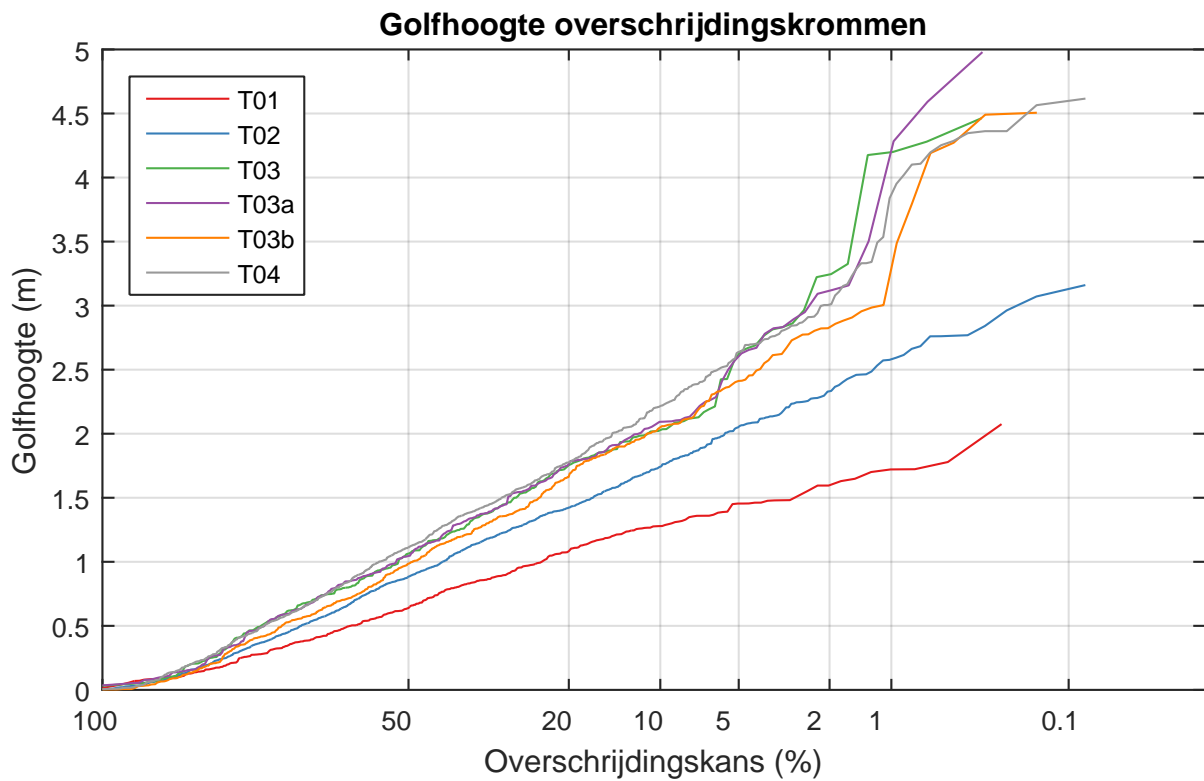
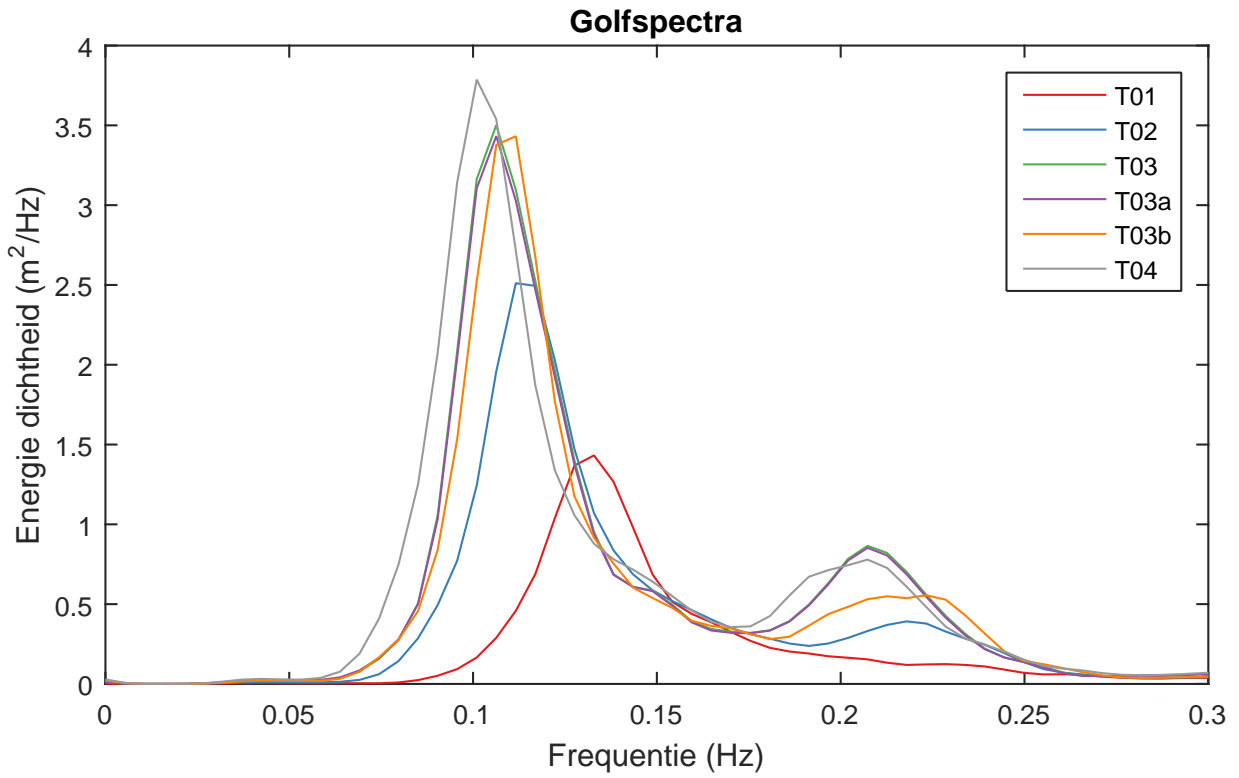
## B.2 Modelschaal maten van de Basalton Quattroblocks



Figuur B.2 Basalton Quattroblocks met maten in millimeter (op schaal van de Deltagoot) (op een aantal plaatsen is de tapsheid van de zijvlakken gemeten, zie gele waarden in millimeter).

## **B.3 Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskomsten van Serie 1**





Stabiliteitsonderzoek van Basalton Quattroblocks in de Deltagoot  
Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen

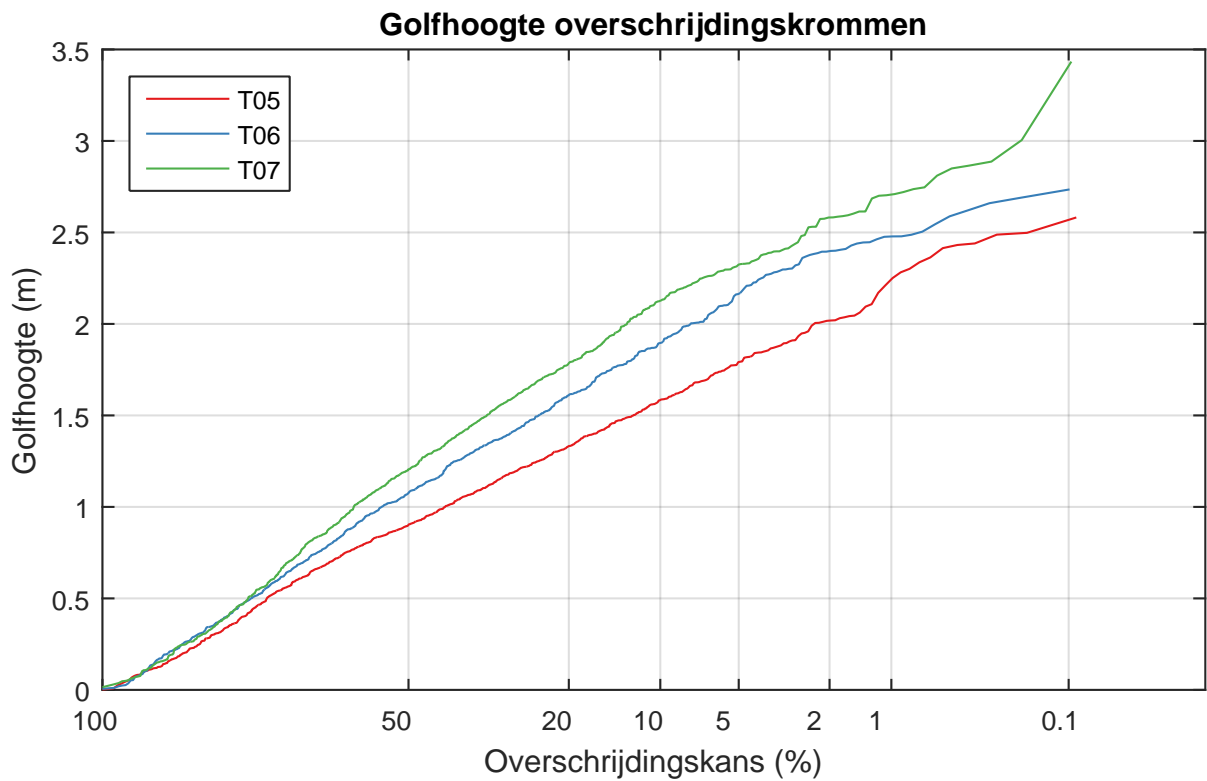
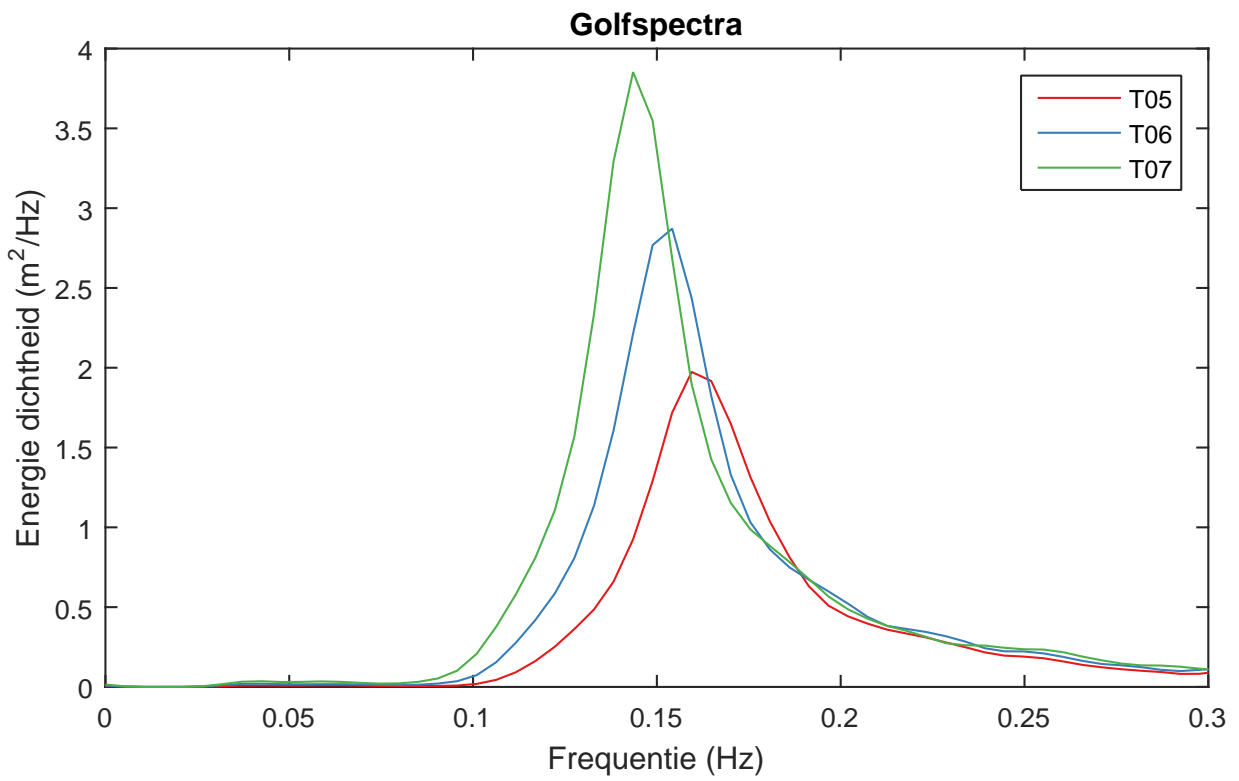
Serie 1

**Deltares**

11201336

B.3

#### **B.4 Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen van Serie 2**



Stabiliteitsonderzoek van Basalton Quattroblocks in de Deltagoot  
Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen

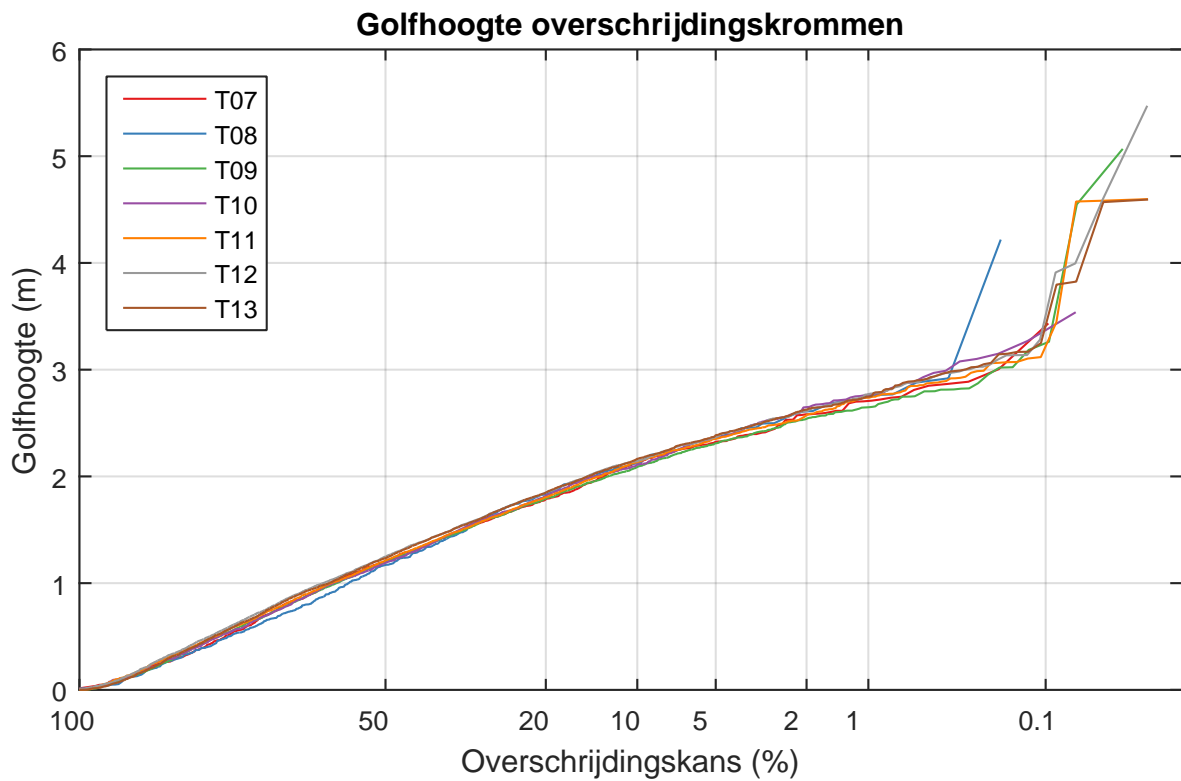
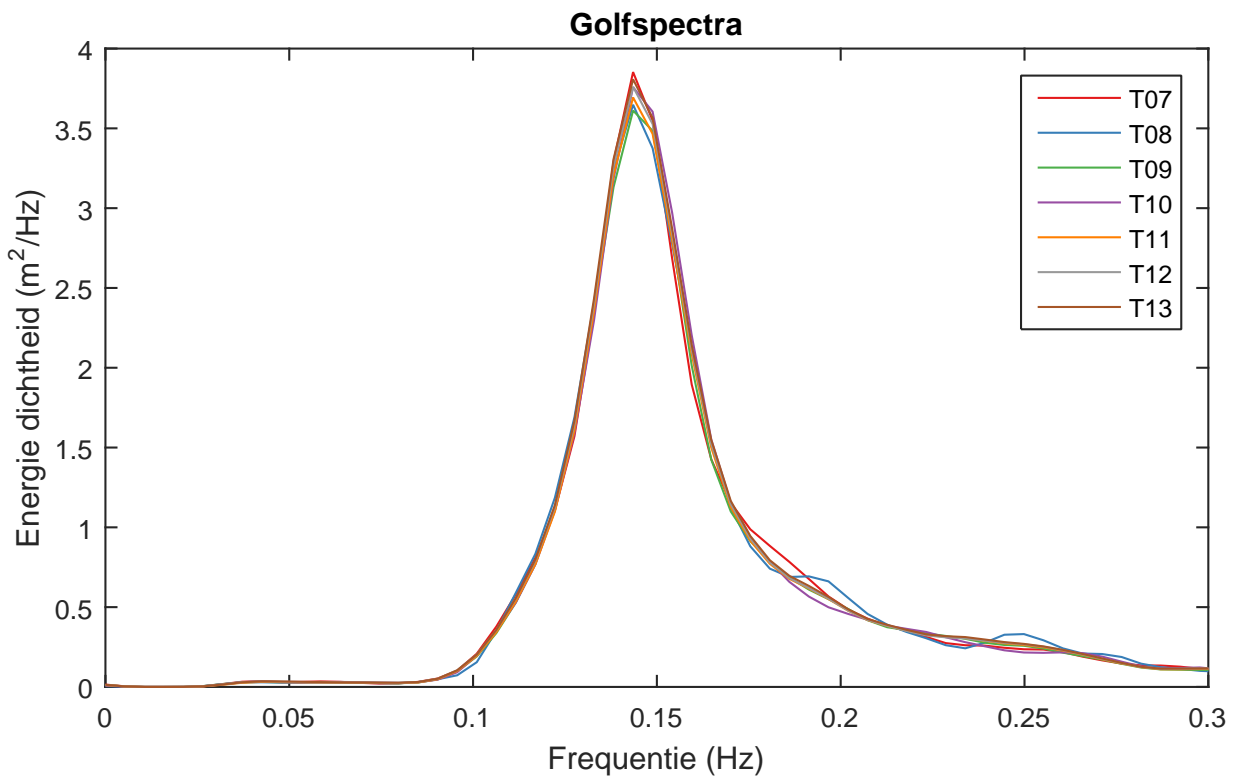
Serie 2

**Deltares**

11201336

B.4

## **B.5 Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen van Serie 3**



Stabiliteitsonderzoek van Basalton Quattroblocks in de Deltagoot  
Golfspectra en golfhoogte overschrijdingskrommen

Serie 3

**Deltares**

11201336

B.5



## C Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

### C.1 Inleiding

Het onderzoek 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 C.1 Golfaanval op testsectie van Basalton Quattroblocks

### C.2 Interpretatie van de proeven

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

- 4 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.
- 5 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.
- 6 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  $H_s$  die nog net geen bezwijken gaf en de  $H_s$  die net wel in bezwijken resulteerde. Bij de derde serie is de totale proefduur tot het bezwijken van de steenzetting, 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 de steenzetting te laten bezwijken, is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolffoogte verder uitgedetailleerd (zie bijlage D voor omschrijving schadecategorieën):

- 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 bezwijken 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 bezwijken 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 bezwijken 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 bezwijken 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 de steenzetting tijdens de langeduurproef niet bezwijkt, wordt aangenomen dat er wel bezwijken zou zijn ontstaan als de proef 20% langer had geduurd.
- 5 Als tijdens geen enkele proevenserie bezwijken is opgetreden, wordt aangenomen dat er wel bezwijken 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 bezwijken bij een veel hogere golffoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities.

### C.3 Bepaling stabiliteitsfactor

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



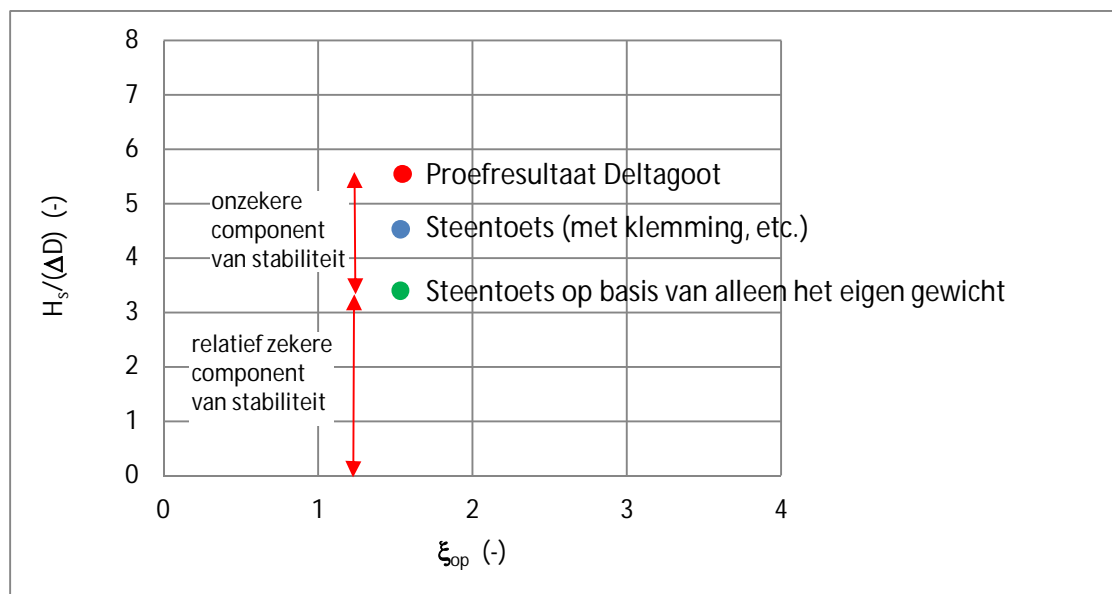
De methode voor het bepalen van de veiligheidsmarge in de stabiliteitsfactor gaat uit van de veronderstelling dat een deel van de stabiliteit heel zeker is (gerelateerd aan het eigengewicht van de steenzetting) en een deel onzeker (gerelateerd aan de bijzondere eigenschappen die leiden tot grote klemming of andere stabiliteit verhogende aspecten).

Er is voor gekozen om een veiligheidsfactor toe te passen op het onzekere deel, en niet op het zekere deel.

Bij het stap voor stap groter maken van de golfbelasting zal er namelijk in eerste instantie geen vrees zijn dat de steenzetting gaat bezwijken. Pas als de golfhoogte ten opzichte van de afmetingen van de toplaag groot begint te worden, kan er bezwijken gaan optreden. Aangenomen kan worden dat er bezwijken zou kunnen gaan optreden als de golfhoogte groter is dan de bezwijkgolffhoogte 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 C.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 bezwijken en niet bezwijken)
- $D_{Steentoets}$  = 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 C.2) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur C.2). Dit kan op de volgende wijze worden bereikt:

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

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:

$$f_{stab} = \left( \frac{D_{Steentoets}}{D_{inmodelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{STeigengewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{STeigengewicht}} \quad (C.2)$$

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  $D_{Steentoets}/D_{inmodelproeven}$ ). Hiervoor wordt de volgende formule gebruikt, die gebaseerd is op een Student-verdeling en een onderschrijdingskans van 10%:

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

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

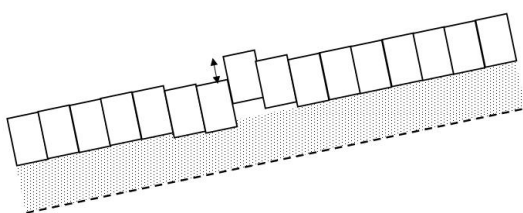


## D Indeling schadecategorieën

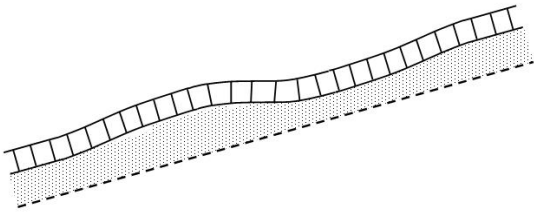
Na elke proef is de vervorming en schade aan de steenzetting bepaald. Hiervoor wordt schade aan de steenzetting gekarakteriseerd volgens de volgende schadecategorieën (categorie a t/m d):

- a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggende zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag ( $0,1 \cdot D$ , met  $D$  = toplaagdikte) (zie Figuur 7.1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 7.2) is kleiner dan 20% van de toplaagdikte. In de praktijk is dan doorgaans nog geen waarneembare schade aanwezig.
- b) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggende 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 naastliggende 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 naastliggende 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 wordt als bezweken beschouwd als schade van de categorie c of d is opgetreden.



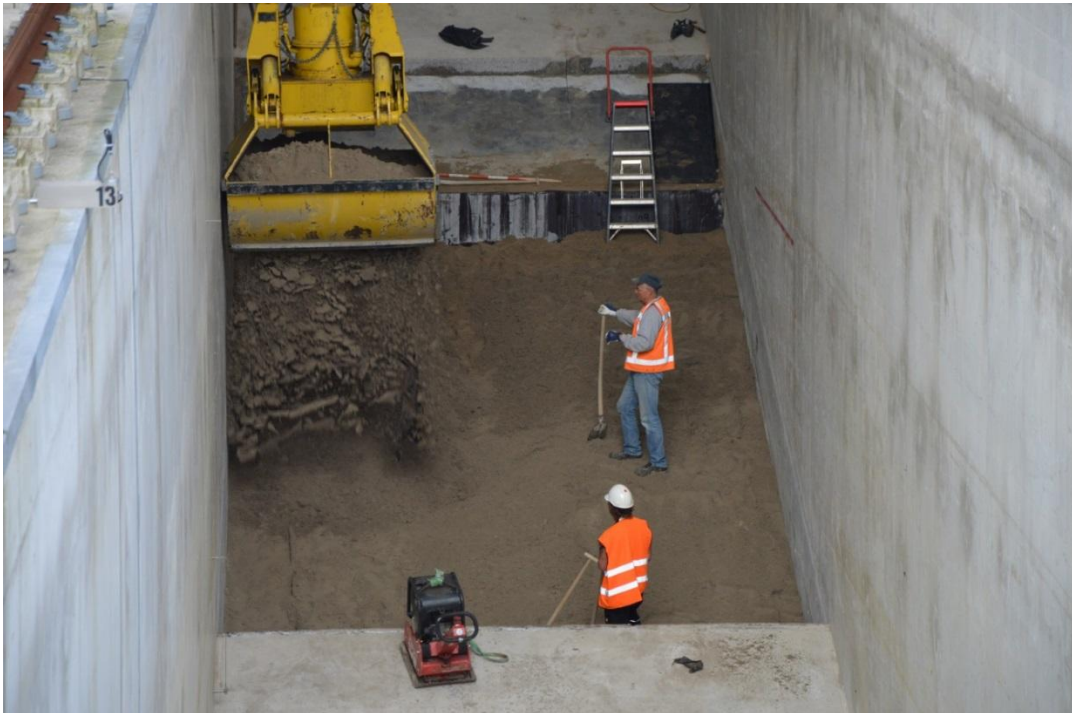
Figuur 7.1 Verplaatsing van zetstenen ten opzichte van naastgelegen zetstenen.



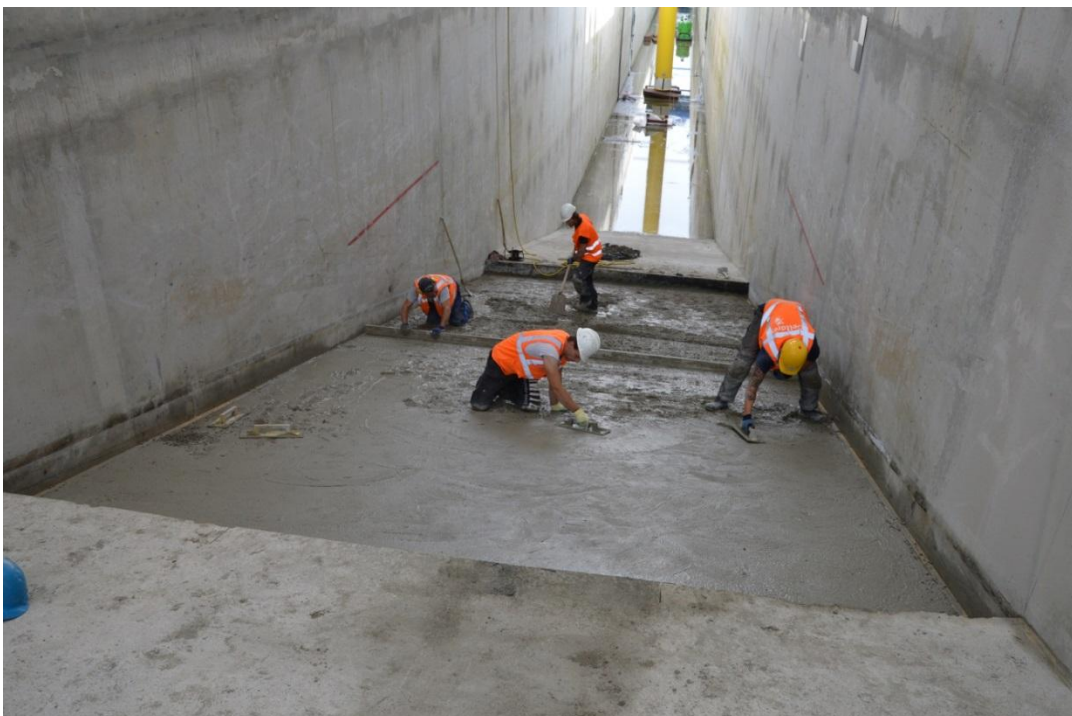
Figuur 7.2 Vervorming tot S-profiel.

## E Foto's

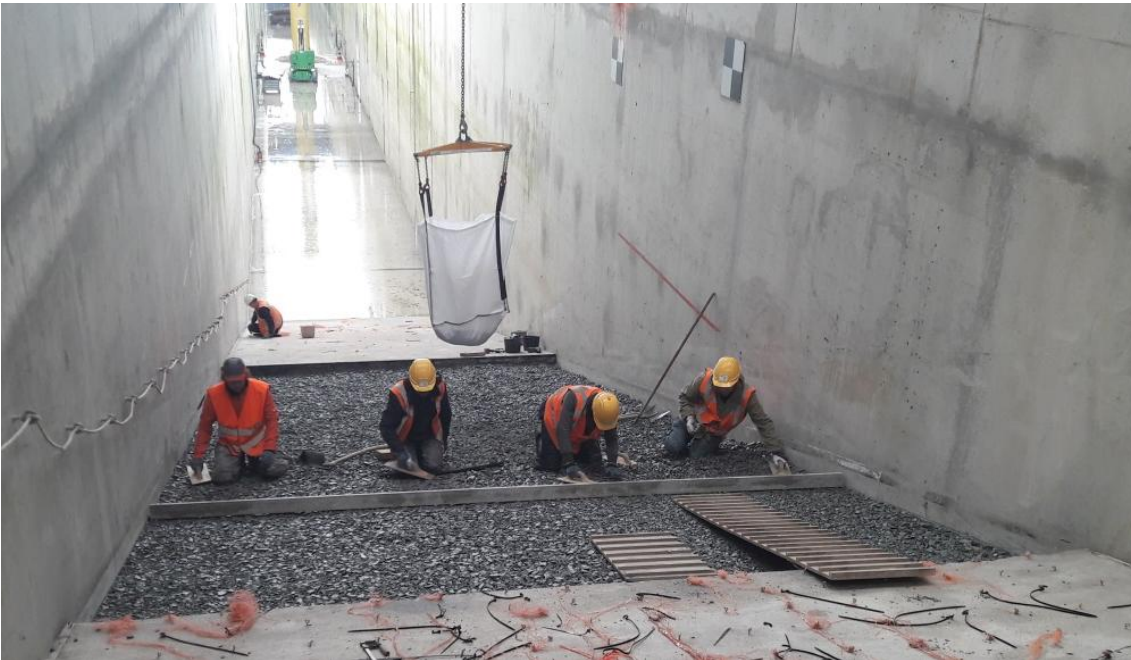
### E.1 Bouw van het model



Figuur E.1 Aanvullen en egaliseren van de zandkern ter voorbereiding van het storten van de betonvloer



Figuur E.2 Storten en egaliseren van de betonvloer waar de steenzetting op geplaatst wordt

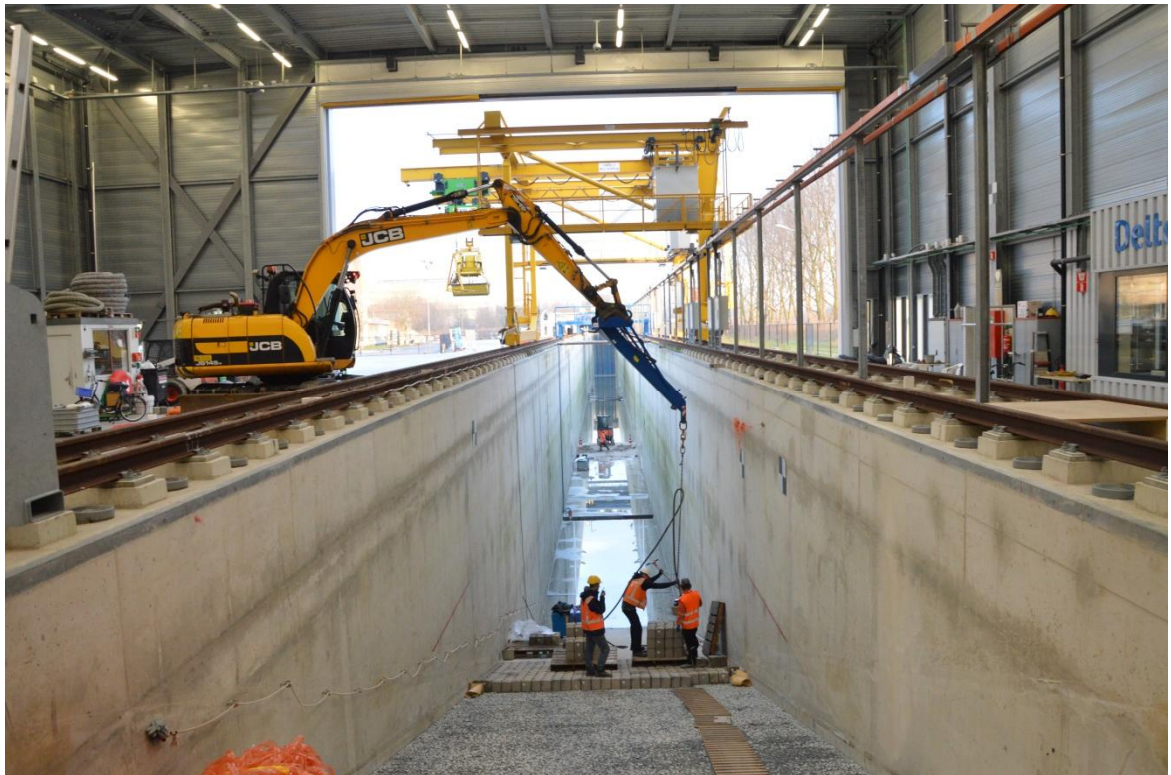


*Figuur E.3 Aanbrengen en egaliseren van de filterlaag*



*Figuur E.4 Op maat zagen van een Quattroblock voor de rand van het talud*

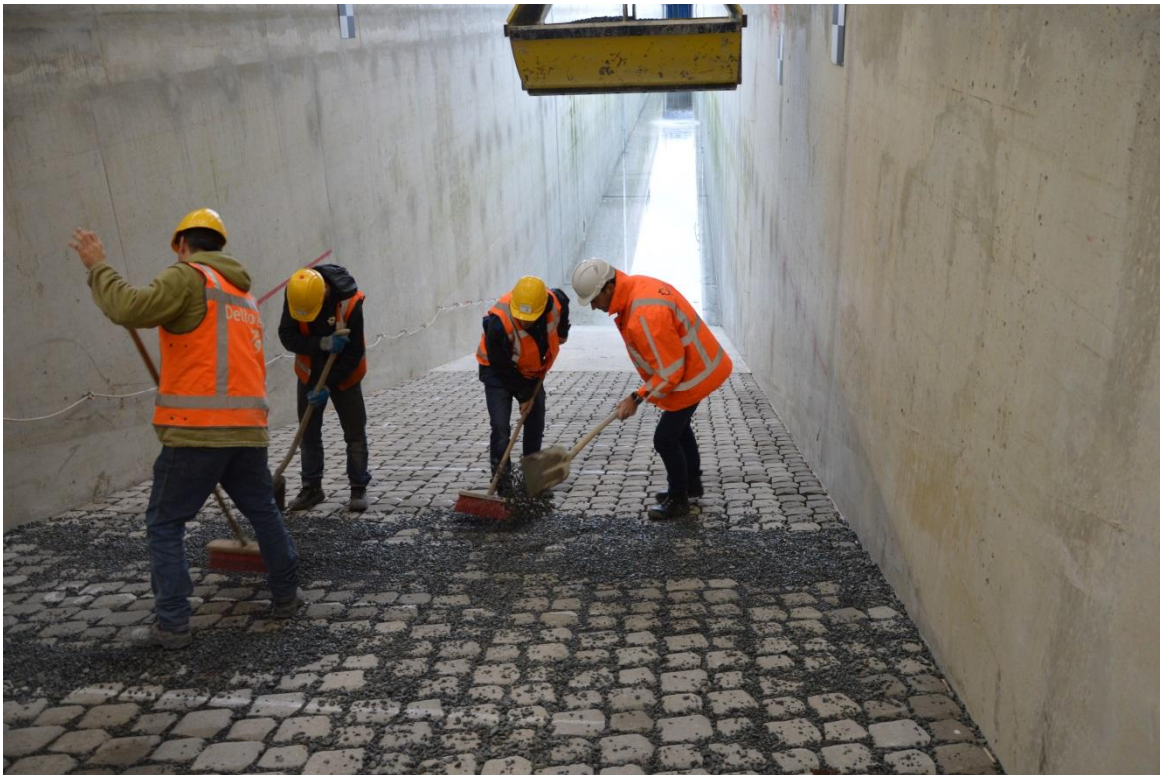




Figuur E.5 Plaatsen van de Quattroblocks



Figuur E.6 Plaatsen van de Quattroblocks met behulp van de zuignap



*Figuur E.7 Aanbrengen van het inwashmateriaal*



*Figuur E.8 Aanbrengen van de stalen hoekprofielen langs de gootwanden*

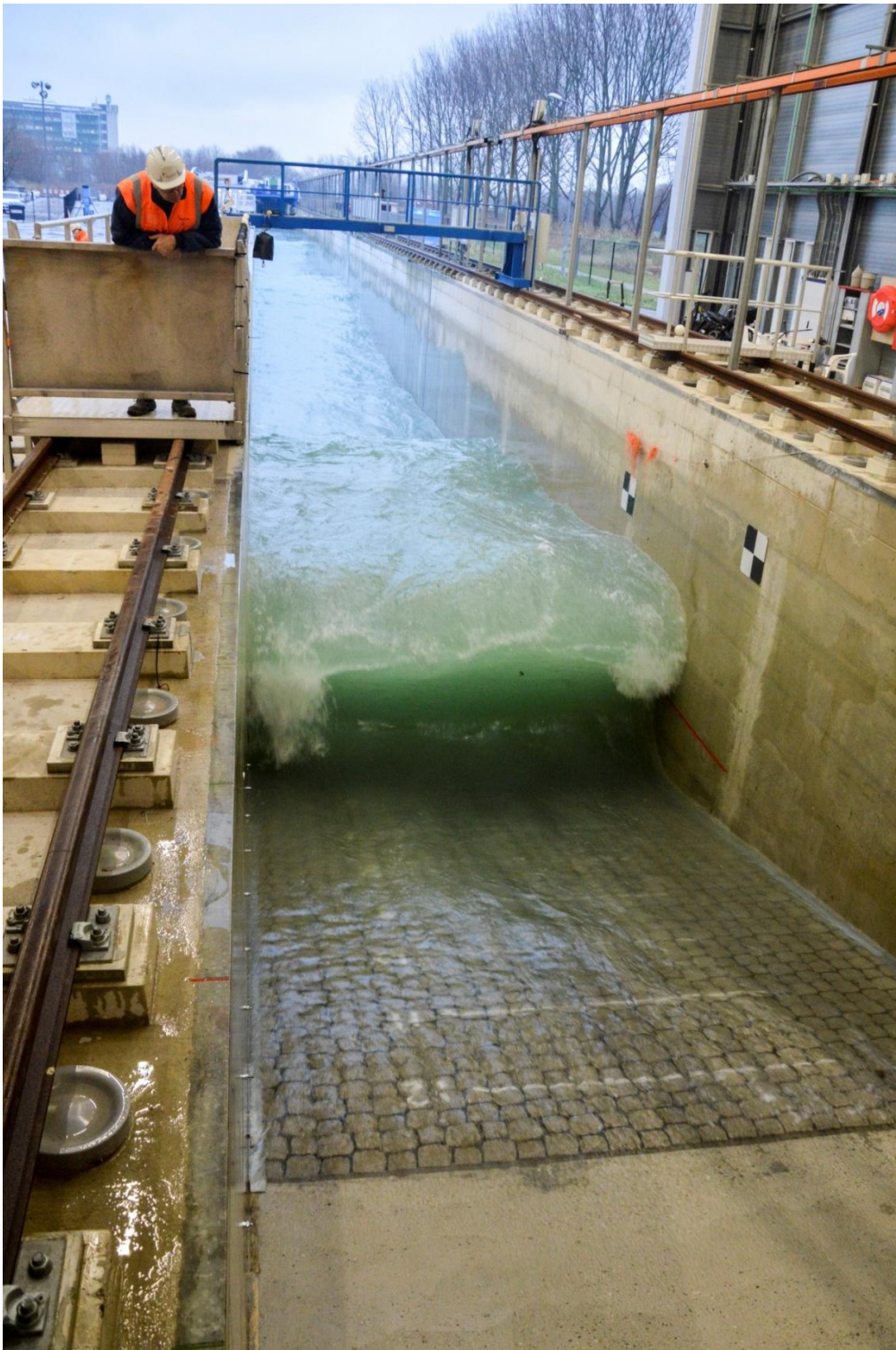


Figuur E.9 Het talud met Basalton Quattroblocks is gereed voor de proeven

## E.2 Proeven



Figuur E.10 Golven tijdens proef T02 van Serie 1



Figuur E.11 Golf tijdens proef T02 van Serie 1



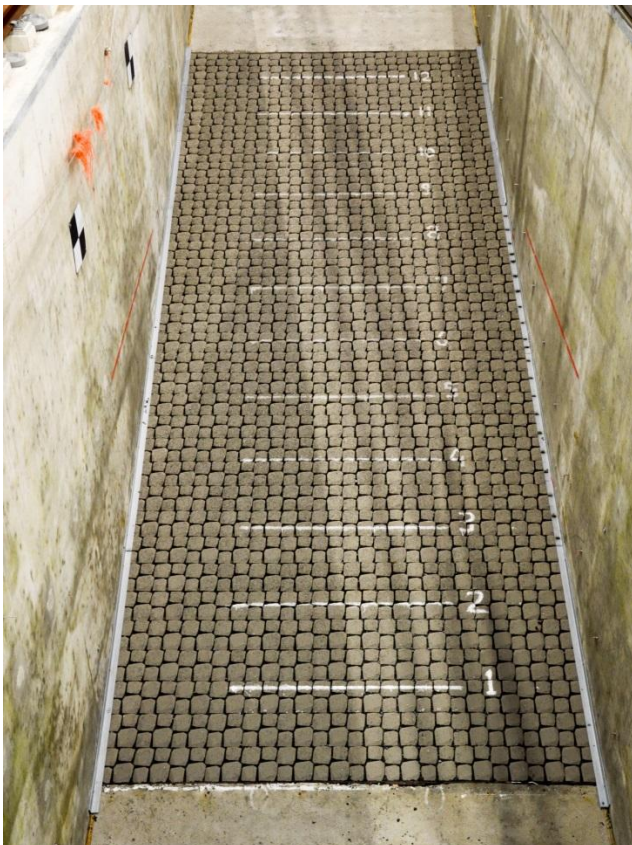
Figuur E.12 Golf tijdens proef T03 van Serie 1



Figuur E.13 Golf tijdens proef T03 van Serie 1



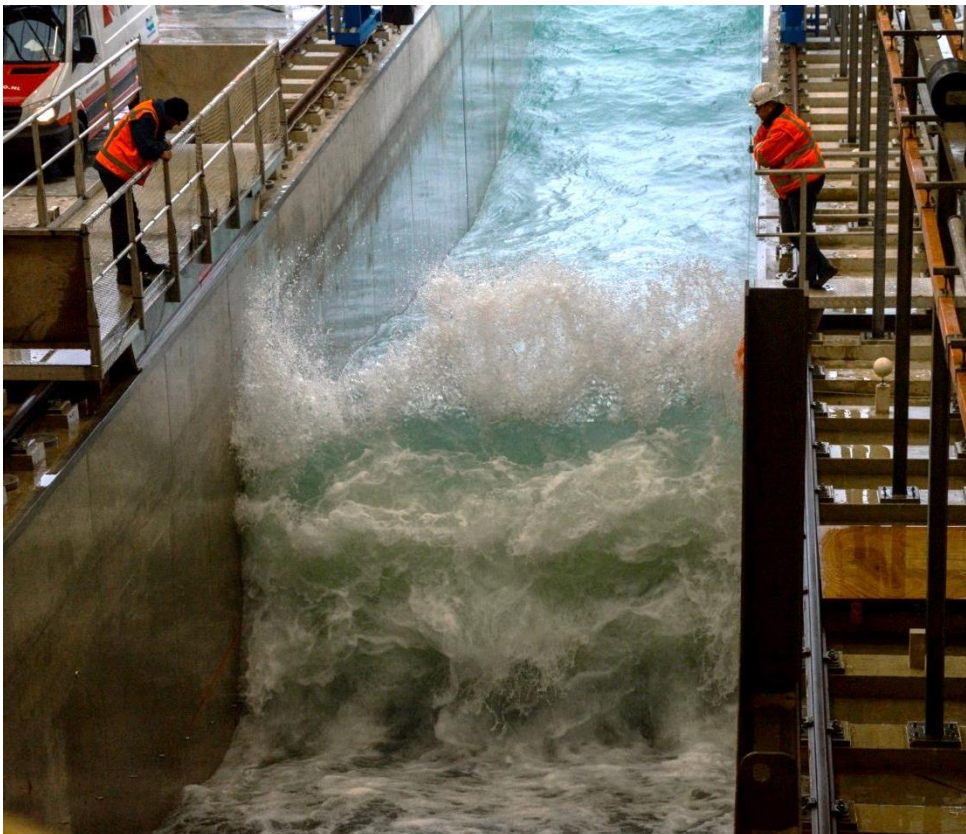
Figuur E.14 Golf tijdens proef T03 en T04 van Serie 1



Figuur E.15 Talud na Serie 1



*Figuur E.16 Golven tijdens proeven T05 en T06 van Serie 2*



*Figuur E.17 Golf tijdens proef T07 van Serie 2 en 3*