

## Stabiliteit van Basalton<sup>®</sup> Quattroblocks in golfaanval

Modelonderzoek in Deltagoot



# Stabiliteit van Basalton® Quattroblocks in golfaanval

## Modelonderzoek in Deltagoot

**Auteur(s)**

Nova Huppes

# Stabiliteit van Basalton® Quattroblocks in golfaanval

## Modelonderzoek in Deltagoot

<b>Opdrachtgever</b>	Holcim Coastal B.V.
<b>Contactpersoon</b>	de heer J-P. Quataert
<b>Referenties</b>	Opdracht in email van J-P. Quataert van 17 december 2021
<b>Trefwoorden</b>	Steenzetting, Basalton Quattroblock, dijkbekledingen, zetsteen, stabiliteit, stabiliteitsfactor

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	2
<b>Datum</b>	14-03-2022
<b>Projectnummer</b>	11207841-002
<b>Document ID</b>	11207841-002-HYE-0005
<b>Pagina's</b>	57
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Nova Huppès	
--	-------------	--

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	datum
0.1	Nova Huppès	Mark Klein Breteler	Paul van Steeg	4-3-2022
2	Nova Huppès	Mark Klein Breteler	Paul van Steeg	14-3-2022



# Samenvatting

Het in dit rapport beschreven onderzoek betreft de stabiliteit van zetstenen van het type Basalton® Quattroblock, ontwikkeld door Holcim. Om de stabiliteit van Quattroblocks bij golfaanval te bepalen, is grootschalig modelonderzoek uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares volgens NEN-7024. De geometrische schaal van dit onderzoek was 1:2,95. 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 13,9 cm, wat overeenkomt met 41 cm in werkelijkheid. Onder de 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 (ruim 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) en de proeven van serie 2 met een grote golfsteilheid (korte golven).
- *Serie 3:* de laatste serie bestond uit een langeduurproef. Deze proef, met gelijkblijvende golfcondities, is voortgezet totdat schade optrad.

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 Quattroblock is:  $f_{stab} = 1,64$ . In overleg met Rijkswaterstaat wordt de waarde van de stabiliteitsfactor bepaald die opgenomen wordt in Steentoets.



*Golfbelasting in Deltagoot op talud met Quattroblocks*



# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Doel van het onderzoek	6
1.2	Basalton® Quattroblocks	7
<b>2</b>	<b>Schaling</b>	<b>8</b>
2.1	Algemeen	8
2.2	Schaling van de golven	9
2.3	Schaling dimensieloze parameters	9
2.4	Schaling van stroming in de constructie	10
<b>3</b>	<b>Modelopstelling</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Proefresultaten en observaties</b>	<b>15</b>
4.1	Proevenprogramma	15
4.2	Waarnemingen tijdens en na de proeven	17
4.2.1	Tijdens de proeven	17
4.2.2	Vervorming van het taludoppervlak	17
4.2.3	Uitspoeling van het inwasmateriaal	19
<b>5</b>	<b>Stabiliteitsfactor</b>	<b>20</b>
5.1	Gemeten stabiliteit ten opzichte van met Steentoets berekende stabiliteit	20
5.2	Stabiliteitsfactor	21
<b>6</b>	<b>Conclusies</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>25</b>
<b>A</b>	<b>Tabellen</b>	<b>26</b>
<b>B</b>	<b>Figuren</b>	<b>29</b>
<b>C</b>	<b>Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor</b>	<b>39</b>
C.1	Inleiding	39
C.2	Interpretatie van de proeven	39
C.3	Bepaling stabiliteitsfactor	41
<b>D</b>	<b>Indeling schadecategorieën</b>	<b>44</b>
<b>E</b>	<b>Foto's</b>	<b>46</b>

# 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). De gevolgde procedure tijdens de proeven van het 'Vergelijkend onderzoek zetsteen voor dijken' is conform de norm NEN-7024. 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 B.V. heeft aan Deltares gevraagd om volgens dezelfde procedure als in het "Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken" de stabiliteitsfactor te bepalen voor 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 Quattroblock, 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.

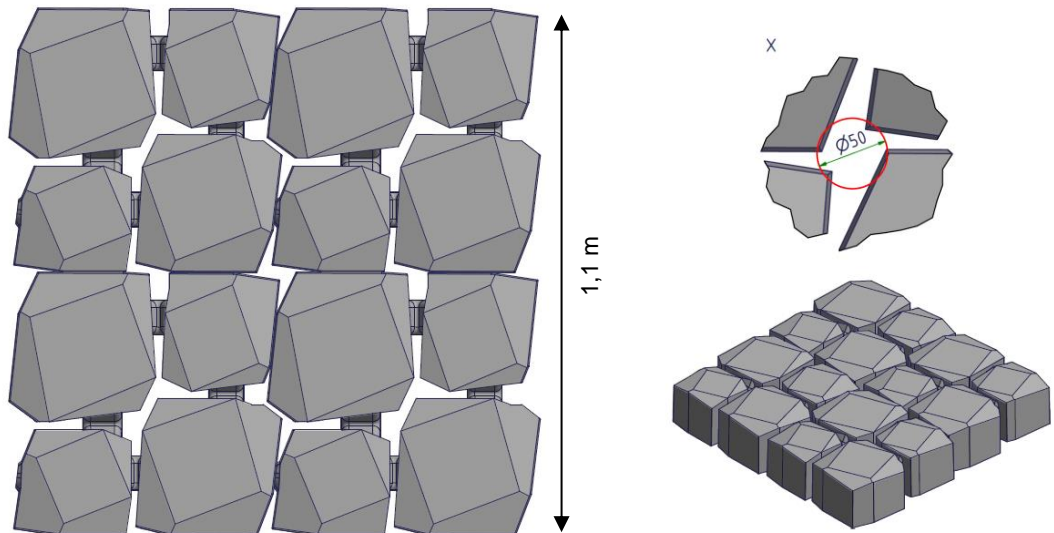
De golven in de werkelijkheid op de primaire waterkeringen kunnen echter nog hoger worden dan in de Deltagoot. Daarom is het huidige onderzoek uitgevoerd op een geometrische schaal 1:2,95. Bij deze schaal zijn er verwaarloosbare schaafeffecten en kunnen de resultaten toegepast worden op het volledige scala aan zuilhoogtes van de Quattroblocks.

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.

Het huidige onderzoek is uitgevoerd in januari en februari 2022 onder leiding van ir. N. Huppes en ir. M. Klein Breteler.

## 1.2 Basalton® Quattroblocks

De Basalton® Quattroblock is een innovatieve steenzetting die ontwikkeld is door Holcim Coastal B.V. Het is gebaseerd op het vertrouwde Basalton. Zoals weergegeven in Figuur 1.1, Figuur 1.2 en Fig. B-1 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 in werkelijkheid, 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 1.1 Tekening van vier Basalton® Quattroblocks (maten op ware grootte)



Figuur 1.2 Foto's van een zetsteen van het type Basalton® Quattroblock zoals toegepast in de Deltagoot



## 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 1:2,95.

Een geometrische schaal van 1:2,95 houdt in dat alle afmetingen van de zetstenen in de modelopstelling 2,95 maal zo klein 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 Quattroblocks als uitgangspunt genomen die op ware grootte circa 40 cm hoog zijn. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal gemaakt door Holcim. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt, waarbij alle maten een factor 2,95 kleiner zijn gekozen dan die op ware grootte. Dit resulteerde in verschaalde zuilen met een gemiddelde zuilhoogte  $D = 13,9$  cm, wat overeen komt met een zuilhoogte op ware grootte van  $D = 41$  cm.

In een schaalmodel met schaal 1:2,95 zijn ook de golven (golfhoogte en golflengte) 2,95 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.



Figuur 2.1 Golfbelasting op Quattroblocks

## 2.2 Schaling van de golven

Bij het verschalen 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 verschalen van golven op 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:

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

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  $n_L = L_{\text{prototype}}/L_{\text{model}} = 2,95$ . Uit de bovenstaande Froude schaalregel zijn dan de volgende verbanden af te leiden:

- Golfhoogte:  $n_H = n_L$ , in dit geval dus:  $n_H = 2,95$
- Tijdschaal (proefduur, golfperiode):  $n_t = \sqrt{n_L}$ , in dit geval dus:  $n_t = \sqrt{2,95} \approx 1,72$
- Snelheid (voortplantingssnelheid van golven):  $n_u = \sqrt{n_L}$ , in dit geval dus:  $n_u = \sqrt{2,95} \approx 1,72$

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) (kg/m<sup>3</sup>)

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

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 kan worden gezien als de verhouding tussen de golfbelasting (de golfhoogte  $H_{m0}$ ) en het gewicht 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 de 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:

$$Re = \frac{L \cdot u}{\nu} \quad (2.3)$$

Met:

Re = Reynolds getal (-)

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

u = snelheid of doorlatendheid (m/s)

$\nu$  = kinematische viscositeit (voor water: ca.  $1,2 \cdot 10^{-6}$ ) (m<sup>2</sup>/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 ( $n_L = 2,95$ ) voldoet dus aan deze eis.

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

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

Met:

$\Lambda$  = leklengte (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 leklengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal:  $n_\Lambda = n_L = 2,95$ . Met het rekenmodel Steentoets is de leklengte op ware grootte en in het schaalmodel berekend. Voor deze berekeningen is gebruikgemaakt van Steentoets versie v20.1.1 zonder stabiliteitsfactor (Klein Breteler e.a., 2020). In de berekeningen is uitgegaan van inwasmateriaal met korrelgrootte  $D_{f15} = 3,0$  mm in het schaalmodel (betreft de gemeten waarde, zie hoofdstuk 3) en  $D_{f15} = 8,9$  mm op ware grootte.

Uit de berekeningen is gebleken dat bij schaal van 1:2,95 in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte van ongeveer  $b = 4$  cm en korrelgrootte  $D_{f15} = 5$  à 8 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  $b = 10$  à 14 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 leklengte, uitgaande van verscaling van de leklengte met de lengteschaal  $n_L = 2,95$ .



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)	0,41	0,139
open oppervlak	$\Omega$	(%)	10,5	10,5
filterlaagdikte	B	(m)	0,12	0,04
korrelgrootte filter	$D_{f15}$	(mm)	18,6	6,3
korrelgrootte inwashmateriaal	$D_{i15}$	(mm)	8,9	3
toplaagdoorlatendheid	$k'$	(mm/s)	56	31
leklengte	$\Lambda$	(m)	0,49	0,16

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.



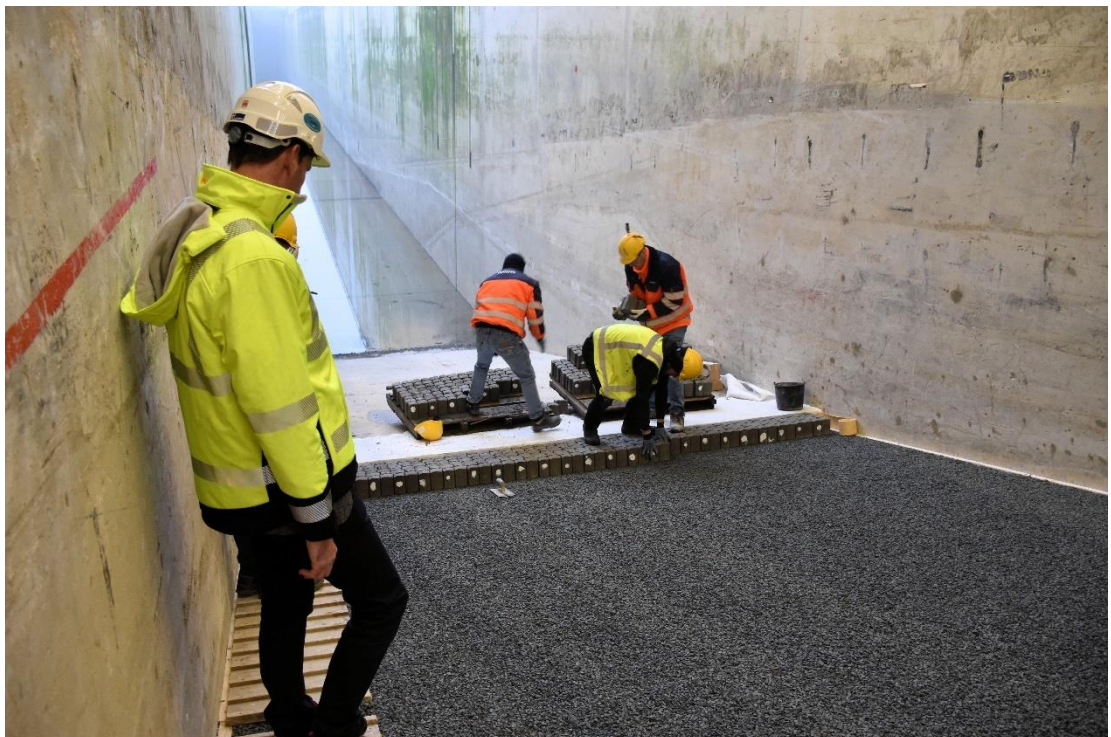
dijken (zie Fig. E-1 in Bijlage E). Door geen klei maar zandcement toe te passen was de modelopstelling eenvoudiger te bouwen, terwijl dit geen invloed heeft op de stabiliteit van de Quattroblocks.

Bovenop de zandcementlaag van de meetsectie is een geotextiel toegepast zoals dat gebruikelijk is op een kleilaag (zie Fig. E-2). Op het geotextiel is een filterlaag aangebracht met steenslag van Noors graniet (zie Fig. E-3). Op basis van vele metingen tijdens het zetten van de steenzetting is vastgesteld dat de gemiddelde dikte van deze laag 4,0 cm is (zie Tbl. A-1 en Tbl. A-2). Het gebruikte filtermateriaal heeft een korrelgrootte van 6 – 11 mm ( $D_{f15} = 6,3$  mm). De zeefkromme van het filtermateriaal is te vinden in Fig. B-2.

Op het filtermateriaal is de steenzetting aangebracht van Quattroblocks. De maten op modelschaal van de Quattroblocks zijn gegeven in Fig. B-1 (Bijlage B). Na het aanbrengen van de steenzetting is deze ingewassen met steenslag (Noors graniet) met  $D_{15} = 3,0$  mm. De zeefkromme hiervan staat in Fig. B-3. De Quattroblocks zijn met de hand op het talud geplaatst, zie Figuur 3.3.

De belangrijkste afmetingen van het schaalmodel zijn als volgt:

- taludhelling: 1:3,59
- gemiddelde topplagdikte:  $D = 0,1396$  m voor de eerste twee proevenseries en  $D = 0,1392$  m voor de derde proevenserie
- gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen:  $\rho_z = 2084$  kg/m<sup>3</sup> voor de eerste twee proevenseries en  $\rho_z = 2090$  kg/m<sup>3</sup> voor de derde proevenserie
- relatief open oppervlak: 10,5%
- gemiddelde filterlaagdikte: 0,040 m
- korrelgrootte van het filter: 6-11 mm,  $D_{f15} = 6,3$  mm
- korrelgrootte van het inwasmateriaal: 3-8 mm,  $D_{i15} = 3,0$  mm
- geotextiel: Geopex TB PPHT Z 320



Figuur 3.3 Plaatsing Quattroblocks op het filter

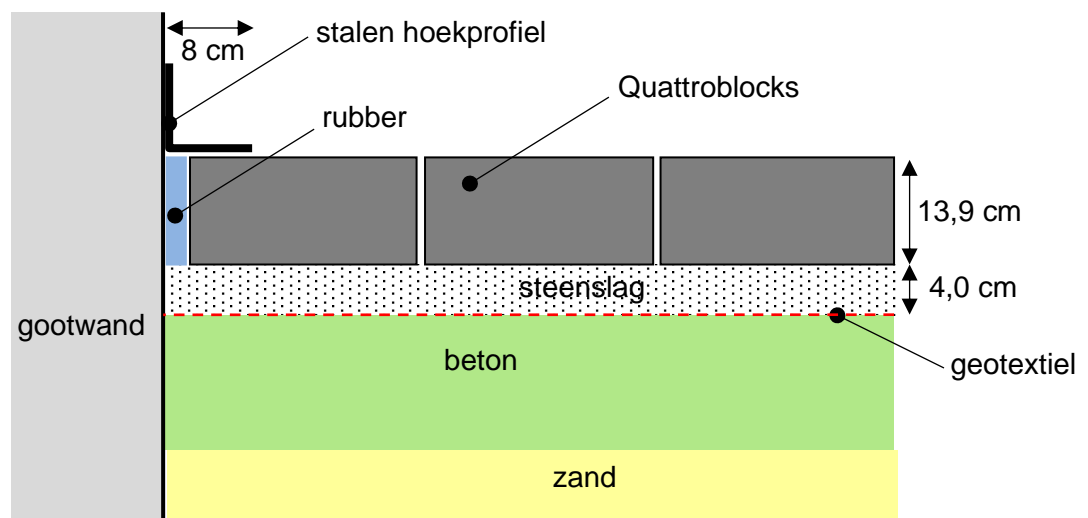


De hoogte van de Quattroblocks is bij 27 zetstenen van verschillende pallets gemeten. De gemiddelde hoogte was 139,6 mm met een standaardafwijking van 8,7 mm voor de eerste twee proevenseries. Voor de derde proevenserie was de gemiddelde hoogte 139,2 mm met een standaard afwijking van 7,8 mm. Bij 74 zetstenen is de soortelijke massa van de Quattroblocks bepaald nadat deze lange tijd in het water waren gezet. Deze was gemiddeld 2084 kg/m<sup>3</sup> met een standaardafwijking van 26 kg/m<sup>3</sup> voor de eerste twee proevenseries, en gemiddeld 2090 kg/m<sup>3</sup> met een standaardafwijking van 23 kg/m<sup>3</sup> voor de derde proevenserie. 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 aangebracht, zie Figuur 3.4. De laatste tussenruimtes zijn opgevuld met vulplaatjes voor een optimale aansluiting tussen de steenzetting en de gootwand. 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 (zie Fig. E-8).



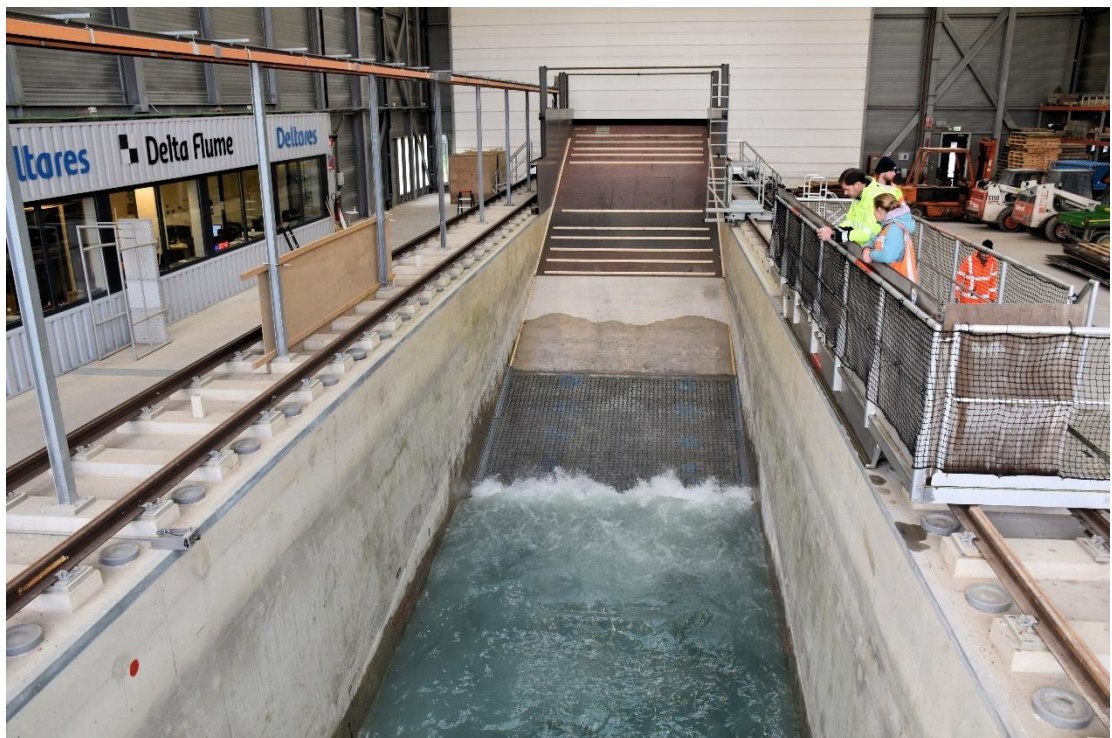
Figuur 3.4 Aansluiting van de steenzetting tegen de gootwand (schematische dwarsdoorsnede)

## 4 Proefresultaten en observaties

### 4.1 Proevenprogramma

De steenzetting is achtereenvolgens beproefd met de volgende drie proevenseries:

- 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 relatief lange golven (golfsteilheid van 2%), en de proeven van serie 2 zijn uitgevoerd met relatief korte golven (golfsteilheid van 4%).
- 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 de eventuele vervorming/schade te kunnen monitoren.



Figuur 4.1 Golfbelasting op talud met Quattroblocks tijdens ingolfproef (proef QB-01)

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 inkomende significante golfhoogte ( $H_{m0}$ ) 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 vermelde schade-categorie staat nader toegelicht in Bijlage D.

De genoemde waarden in Tabel 4.1 betreffen de condities zoals gemeten in de Deltagoot (schaal 1:2,95). De overeenkomstige belastingduur is op ware grootte  $\sqrt{2,95} = 1,72$  groter dan de duur op modelschaal zoals aangegeven in Tabel 4.1 (zie paragraaf 2.2).

In de tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

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

$H_{m0}$  = significante golfhoogte (m)  
 $T_p$  = golfperiode bij de piek van het spectrum (s)  
 $T_{m-1,0}$  = spectrale golfperiode (s)  
 $s_{op}$  = golfsteilheid op basis van de piekperiode:  $s_{op} = H_{m0}/((g/2\pi) \cdot T_p^2)$  (-)  
 $g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $m/s^2$ )  
 $\alpha$  = taludhelling ( $^\circ$ )  
 $N$  = aantal golven (-)  
 $H_s/(\Delta D)$  = belastingparameter (-)

serie	proef	h (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)	Duur (uur)	Aantal golven	$s_{op}$ (-)	$H_{m0}/(\Delta D)$	Schade*
1	QB-01	5,60	0,71	4,72	1,15	1112	0,020	4,70	a
1	QB-02	5,80	1,01	5,66	1,38	1135	0,020	6,70	a
1	QB-03	5,80	1,32	6,45	1,60	1173	0,020	8,76	a
1	QB-04	5,80	1,53	6,91	1,56	1064	0,021	10,12	a
1	QB-05	6,10	1,74	7,42	1,67	1056	0,020	11,57	a
2	QB-06	6,10	1,77	5,26	1,23	1024	0,041	11,75	a
2	QB-07	6,10	2,00	5,71	0,97	743	0,039	13,25	d
3	QB-08	5,80	0,71	4,69	1,00	962	0,021	4,67	a
3	QB-09	6,00	1,00	5,66	1,00	815	0,020	6,62	a
3	QB-10	6,10	1,64	5,05	2,00	1756	0,041	10,80	d

Tabel 4.1 Gerealiseerde golfcondities (zie ook tabel A-2)

De golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra van enkele uitgevoerde proeven zijn weergegeven in Bijlage B, Fig. B-8 t/m Fig. B-11.

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) wordt de bekleding normaliter niet tussentijds ingewassen. Er ontstond echter schade aan de steenzetting aan het einde van proef QB-10, waardoor hier geen sprake van was.



Figuur 4.2 Golfbelasting tijdens proef QB-06



Aan het begin van proevenserie 1 is op de nieuw aangelegde steenzetting eerst een ingolfproef (QB-01) met bescheiden golfhoogte uitgevoerd met een duur van een uur om de steenzetting en het inwasmateriaal zich zo goed mogelijk te laten zetten. Deze ingolfproef is uitgevoerd met een waterstand van 5,6 m boven de gootbodempl. Tijdens de andere proeven is een waterstand aangehouden van 5,8 m of 6,1 m boven de gootbodempl, afhankelijk van de golfhoogte. Na afloop van elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er al vervorming of schade was ontstaan en te zien hoeveel inwasmateriaal er is uitgespoeld. Voor de karakterisering van de schade zijn de categorieën uit bijlage D gehanteerd.

## 4.2 Waarnemingen tijdens en na de proeven

### 4.2.1 Tijdens de proeven

Tijdens de proeven is de steenzetting visueel gemonitord om te controleren of er schade ontstaat.

De visuele waarnemingen tijdens de proeven werden helaas sterk bemoeilijkt door het turbulente water op de bekleding, zie Figuur 4.3.

Toen tijdens proef QB-10 er een zetsteen uit de bekleding spoelde, is de proef direct stopgezet. Echter, er kon hiermee niet voorkomen worden dat de laatste nog inkomende golven additionele schade teweegbrachten.



*Figuur 4.3 Visuele waarnemingen tijdens de proeven werden bemoeilijkt door de heftige waterbeweging*

### 4.2.2 Vervorming van het taludoppervlak

Na elke proef is de waterstand verlaagd voor een visuele inspectie. Bovendien zijn er metingen uitgevoerd om de vervorming en eventuele 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 voor en na een bepaalde proef in een figuur weergegeven.



De figuren met de resultaten van de laserscans zijn gegeven in Bijlage B, namelijk Fig. B-4 t/m Fig. B-7. De laserscans van de eerste twee proeven lieten geen vervorming zien en in Fig. B-4 t/m Fig. B-6 is te zien dat ook tijdens proef QB-03 tot en met QB-06 relatief weinig vervorming optrad.

Vanaf proef QB-04 ontstond er net onder de waterlijn een kuil, waarin de steenzetting minder dan 1 cm is gezakt. Dit is in de laserscans zichtbaar als een groen gebied. In de opvolgende proeven wordt dit gebied groter en dieper, tot de steenzetting na proef QB-06 ongeveer 2 cm is gezakt (zie Fig. B-6 rechts). Net boven de waterlijn is de steenzetting dan ongeveer 1 cm omhoog gekomen (geel gebied). Met een amplitude van 1,5 cm valt dit S-profiel binnen schadecategorie a, omdat de amplitude van het S-profiel kleiner is dan 20% van de toplaagdikte, zie bijlage D.

Doordat er nog zo weinig vervorming is opgetreden t/m proef QB-05 is besloten om zonder de steenzetting opnieuw in te bouwen de tweede proevenserie te starten. Gezien de hoge stabiliteit van de Quattroblocks is de tweede serie gestart met een golfhoogte van  $H_{m0} = 1,77$  m (proef QB-06).

Tijdens QB-07 (tweede proevenserie) zijn er zetstenen uit de bekleding gekomen (zie Figuur 4.4), waardoor schade van categorie d is ontstaan. Hierna is de bekleding opnieuw ingebouwd voor de langeduurproef. Na het inbouwen zijn eerst twee ingolfproeven uitgevoerd met vrij lage golfhoogte en waterstand. Tijdens deze ingolfproeven QB-08 en QB-09 zijn geen vervormingen opgetreden. Tijdens proef QB-10 zijn na 2 uur golven zetstenen uit het talud gekomen en is er sprake van schadecategorie d (zie Figuur 4.5).



*Figuur 4.4 Tijdens QB-07 zijn zetstenen uit de bekleding gespoeld*





Figuur 4.5 Aan het eind van QB-10 (langeduurproef) zijn zetstenen uit de bekleding gespoeld

#### 4.2.3 Uitspoeling van het inwasmateriaal

Na afloop van elke proef is bekeken in hoeverre het inwasmateriaal was uitgespoeld (zie Figuur 4.6). Dit bleek tijdens de korteduurproeven (serie 1 en 2) in de golfklapzone slechts enkele centimeters te zijn. Dit is na enkele proeven precies opgemeten, zie Bijlage A, Tbl. A-4 t/m Tbl. A-7. Na elke proef van de eerste twee series is het inwasmateriaal weer aangevuld, waardoor de situatie aan het begin van elke proef gelijk was. Op basis van de metingen na afloop van de verschillende proeven ontstaat het beeld dat er meer inwasmateriaal uitspoelt bij een toenemende golfhoogte. Verder lijkt er minder inwasmateriaal uit te spoelen bij lange golven dan bij korte golven. Over het algemeen wordt waargenomen dat het meeste inwasmateriaal verdwijnt in de golfklap- en golfoploopzone. Dieper onder de waterlijn is de uitspoeling van inwasmateriaal gering.



Figuur 4.6 Uitspoeling inwasmateriaal na QB-01 ter hoogte van meter 10 langs het talud

## 5 Stabiliteitsfactor

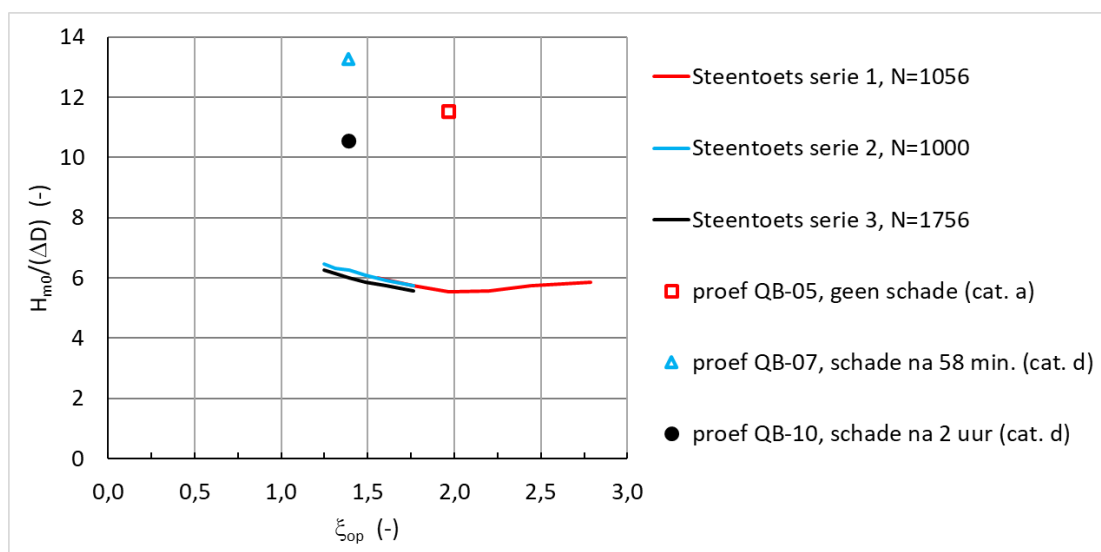
### 5.1 Gemeten stabiliteit ten opzichte van met Steentoets berekende stabiliteit

Voor elke proevenserie is met Steentoets berekend bij welke significante golfhoogte de steenzetting volgens Steentoets versie 20.1.1 (Klein Breteler e.a., 2020) 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  $s_{op}$  (op basis van de golfperiode bij de piek van het spectrum  $T_p$ ).

serie	invoer		resultaat		
	$s_{op}$ [-]	N [-]	$H_{m0}$ [m]	$\xi_{op}$ [m]	$H_{m0}/(\Delta D)$ [-]
1	0,02	1056	0,70	1,96	5,53
2	0,04	1000	0,66	1,39	6,27
3	0,04	1756	0,68	1,37	6,02

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

De resultaten van de proeven en de Steentoetsberekeningen zijn grafisch weergegeven in Figuur 5.1. Op de horizontale as staat de brekerparameter  $\xi_{op}$  (gebaseerd op de piekperiode  $T_p$ ). Op de verticale as staat de belastingparameter  $H_s/(\Delta D)$  op basis van de gemiddelde soortelijke massa.

Tijdens de eerste proevenserie is er geen schade ontstaan aan de steenzetting (schade-categorie a) en daarom is de proef weergegeven met de hoogste significante golfhoogte. Van de tweede en derde serie is het schadepunt gegeven. De lijnen geven de resultaten van Steentoetsberekeningen, 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 Quattroblocks is dus beduidend hoger dan wat Steentoets berekent met een stabiliteitsfactor van 1,0. Dat betekent dat de stabiliteitsfactor groter moet zijn dan 1,0.

## 5.2 Stabiliteitsfactor

De stabiliteitsfactor van de Quattroblocks is berekend op basis van de uitgevoerde proeven in de Deltagoot. Met deze stabiliteitsfactor zal in de toekomst het resultaat van Steentoets-berekeningen 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 daarvoor vastgestelde procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor op basis van de Deltagootproeven is gedetailleerd beschreven in bijlage C (Klein Breteler, 2015).

In de procedure is aangegeven hoe de proefresultaten geïnterpreteerd moeten worden, zie bijlage C.2. Tijdens de korteduurproeven is tijdens de eerste serie geen schade ontstaan en tijdens de tweede serie is wel schade opgetreden. Tijdens de langeduurproef is na 2 uur schade ontstaan. Hiermee komen we in deze interpretatieprocedure uit op punten 1 en 2 uit de lijst:

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

Hierbij wordt ervan uit gegaan dat wanneer in de eerste serie na QB-05 een proef zou zijn gestart met een 15% hogere golfhoogte (namelijk 2,00 m), er schade zou zijn opgetreden.

Dit betekent dat voor het afleiden van de stabiliteitsfactor gerekend wordt met de volgende condities:

- Eerste serie: bezwijkgolffhoogte:  $H_{m0} = (1,74+2,00)/2 = 1,87$  m.
- Tweede serie: bezwijkgolffhoogte:  $H_{m0} = (1,77+2,00)/2 = 1,89$  m.
- Derde serie: bezwijkgolffhoogte  $H_{m0} = 1,64$  m na 1756 golven (2 uur).

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

$$f_{stab} = \left( \frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \quad (2.5)$$



$$\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$$

(2.6)

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 (m)
- $D_{Steentoets}$  = 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 (m)
- $D_{in\ modelproeven}$  = de toplaagdikte (zuilhoogte) die toegepast is in de Deltagoot. In dit geval was dat 0,139 m.
- $f_{stab}$  = stabiliteitsfactor (de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets moet gedeeld worden door deze stabiliteitsfactor om rekening te houden met de specifieke stabiliteit van het betreffende type steenzetting) (-)
- $\gamma$  = veiligheidsfactor (-)
- $\sigma$  = standaarddeviatie van berekende waarde van  $D_{Steentoets}/D_{in\ modelproeven}$  (-)

	$D_{in\ modelproeven}$ (m)	$D_{Steentoets}$ (m)	$D_{ST}$ eigen gewicht (m)	$\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}}$	$f_{stab}$ (-)
<b>Serie 1</b>	0,196	0,313	0,384	2,24	1,75
<b>Serie 2</b>	0,196	0,277	0,277	1,98	1,64
<b>Serie 3</b>	0,192	0,249	0,249	1,79	1,52
<b>Standaarddeviatie</b>				0,23	
<b>Veiligheidsfactor <math>\gamma</math></b>				1,53	
<b>Gemiddeld</b>					1,64

Tabel 5.2 Tussenresultaten van berekening van stabiliteitsfactor op basis van drie proevenseries

Voor de Quattroblocks resulteert de procedure derhalve in een stabiliteitsfactor van  $f_{stab} = 1,64$ .

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met, omgerekend naar ware grootte, Quattroblocks van 41 cm hoog (op schaal 1:2,95, dus 13,9 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 20 cm tot 82 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 verder, 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 Quattroblocks vastgesteld. Daarvoor is op schaal 1:2,95 een dijk van Quattroblocks opgebouwd en beproefd met hoge golven. De belangrijkste eigenschappen van de dijk en de bekleding waren (maten op schaal):

- taludhelling: 1:3,59
- gemiddelde toplaagdikte:  $D = 0,139$  m
- gemiddelde soortelijke massa van de zetstenen:  $\rho_z = 2084$  kg/m<sup>3</sup> voor de eerste twee proevenseries en  $\rho_z = 2090$  kg/m<sup>3</sup> voor de derde proevenserie
- relatief open oppervlak: 10,5%
- gemiddelde filterlaagdikte: 0,040 m
- korrelgrootte van het filter: 6-11 mm,  $D_{f15} = 6,3$  mm
- korrelgrootte van het inwasmateriaal: 3-8 mm,  $D_{i15} = 3,0$  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  $H_{m0} = 1,74$  m
- 2 korteduurproeven met relatief korte golven met golfsteilheid  $s_{op} = 0,04$  en significante golfhoogte tot  $H_{m0} = 2,00$  m
- 3 langeduurproef met relatief korte golven met golfsteilheid  $s_{op} = 0,04$  en significante golfhoogte van  $H_{m0} = 1,64$  m

Na afloop van de eerste proevenserie met korte duur was er nog geen schade ontstaan. Ook de vervorming was verwaarloosbaar en de mate van uitspoeling van het inwasmateriaal was beperkt. Tijdens de tweede proevenserie zijn er bij een golfhoogte van  $H_{m0} = 2,00$  m zetstenen uit het talud gekomen, waarmee schadecategorie d is opgetreden.

Tijdens de langeduurproef is na ongeveer 2 uur schade van de categorie d opgetreden, doordat zetstenen uit het talud kwamen.



Figuur 6.1 Golfbelasting tijdens proef QB-07

Op basis van deze proefresultaten en de daarvoor geldende procedure (zie Bijlage C) is de stabiliteitsfactor voor de Quattroblocks bepaald:  $f_{stab} = 1,64$ . In overleg met Rijkswaterstaat wordt de waarde van de stabiliteitsfactor bepaald die opgenomen wordt in Steentoets.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met, omgerekend naar ware grootte, Quattroblocks van 41 cm hoog (op schaal 1:2,95, dus 13,9 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 20 cm tot 82 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 verder, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal circa 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. (2016),  
Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken, Samenvattend rapport,  
Deltares rapport 1208618-006, 7 juli 2016

Klein Breteler, M., D. Kaste en G. Mourik (2020),  
Documentatie Steentoets, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van  
steenzettingen,  
Deltares rapport 11203721, 10 november 2020

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



# A Tabellen

locatie	Filterlaagdikte (mm)			
	Links	Links van het midden	Rechts van het midden	Rechts
rij 8	40	40	39	40
rij 16	41	40	41	40
rij 24	40	40	39	40
rij 32	41	41	40	40
rij 40	40	41	39	40
rij 48	39	40	41	40
rij 56	41	41	40	40
rij 64	39	41	40	41
gemiddeld				40

Tbl. A-1 Gemeten filterlaagdikte eerste en tweede proevenserie (mm)

locatie	Filterlaagdikte (mm)			
	Links	Links van het midden	Rechts van het midden	Rechts
rij 12	Gelijk aan eerste en tweede proevenserie			
rij 20	Gelijk aan eerste en tweede proevenserie			
rij 28	Gelijk aan eerste en tweede proevenserie			
rij 36	40	40	43	43
rij 44	38	39	39	42
rij 52	40	40	40	39
rij 60	39	40	41	40
rij 68	40	40	41	40
gemiddeld				40

Tbl. A-2 Gemeten filterlaagdikte derde proevenserie (mm)

serie	proef	h (m)	H <sub>m0</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	T <sub>m-1,0</sub> (s)	Duur (uur)	N (-)	S <sub>op</sub> (-)	S <sub>om</sub> (-)	ξ <sub>op</sub> (-)	H <sub>m0</sub> / (ΔD)
1	QB-01	5,60	0,71	1,47	4,72	4,34	1,15	1112	0,020	0,024	1,96	4,70
1	QB-02	5,80	1,01	2,11	5,66	5,15	1,38	1135	0,020	0,024	1,96	6,70
1	QB-03	5,80	1,32	2,86	6,45	5,82	1,60	1173	0,020	0,025	1,96	8,76
1	QB-04	5,80	1,53	3,47	6,91	6,18	1,56	1064	0,021	0,026	1,96	10,12
1	QB-05	6,10	1,74	3,25	7,42	6,66	1,67	1056	0,020	0,025	1,96	11,57
1	QB-06	6,10	1,77	3,17	5,26	4,83	1,23	1024	0,041	0,049	1,39	11,75
2	QB-07	6,10	2,00	3,36	5,71	5,20	0,97	743	0,039	0,047	1,39	13,25
3	QB-08	5,80	0,71	1,35	4,69	4,35	1,00	962	0,021	0,024	1,96	4,67
3	QB-09	6,00	1,00	2,07	5,66	5,17	1,00	815	0,020	0,024	1,96	6,62
3	QB-10	6,10	1,64	3,03	5,05	4,68	2,00	1756	0,041	0,048	1,39	10,80

Tbl. A-3 Gerealiseerde golfcondities

In de tabel zijn de volgende parameters gebruikt:

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

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

H<sub>max</sub> = hoogste gemeten golf in de proef (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:  $\xi_{op} = \tan(\alpha)/\sqrt{s_{op}}$  (-)

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

α = taludhelling (°)

N = aantal golven (-)

H<sub>s</sub>/(ΔD) = belastingparameter (-)

Locatie langs talud [m]	Links	Links van het midden	Rechts van het midden	Rechts
12	1,5	2	2	2,3
10	1,5	2	2	3
8	2,5	1	1,5	3,5
6	3	0,5	2,5	2
4	-	-	-	-
2	-	-	-	-

Tbl. A-4 Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef QB-02 (cm)

Locatie langs talud [m]	Links	Links van het midden	Rechts van het midden	Rechts
12	3,5	3	3	2
10	3	3	3,5	3,5
8	3,5	3,5	2,5	3,5
6	2	2,5	2,5	3,5
4	2	0	0	2,5
2	-	-	-	-

Tbl. A-5 Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef QB-04 (cm)

Locatie langs talud [m]	Links	Links van het midden	Rechts van het midden	Rechts
12	4,5	3	3,5	3,5
10	4	4,5	3,5	3
8	5	3,5	5	4,5
6	4,5	3,5	5,5	4,5
4	2	3	2,5	2,5
2	3,5	3	3,5	4

Tbl. A-6 Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef QB-05 (cm)

Locatie langs talud [m]	Links	Links van het midden	Rechts van het midden	Rechts
12	4	3,5	4	4
10	4	3,5	4	4
8	4	4	4,5	5
6	1,5	2	2	4,5
4	1	0	0,5	1,5
2	0	0	0,5	0,5

Tbl. A-7 Diepte uitgespoeld inwasmateriaal na proef QB-06 (cm)

## B Figuren

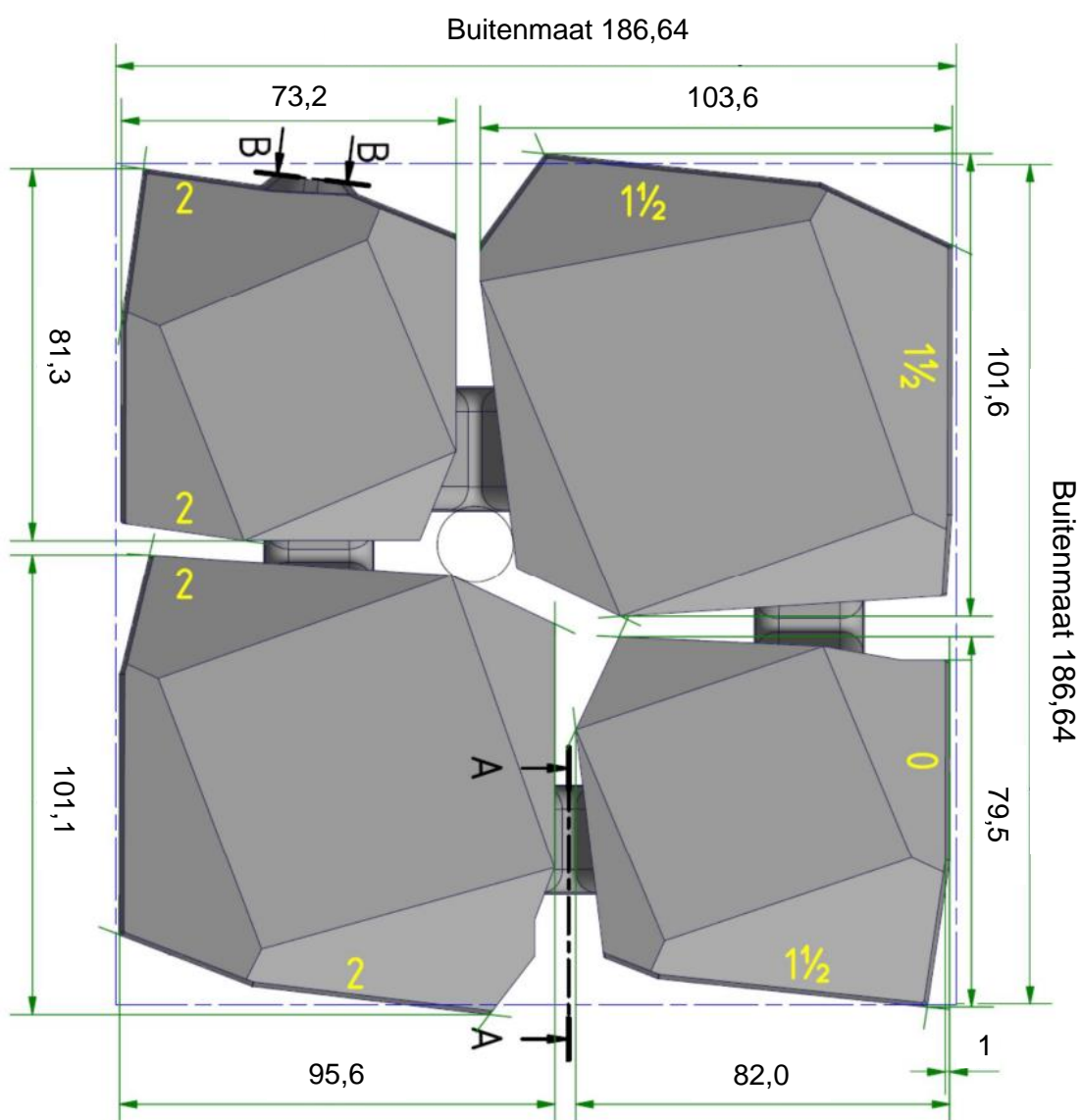


Fig. B-1 Basalton® Quattroblocks met maten in millimeter (op schaal van de Deltagoot) (gele waarden zijn de tapsheid van de zijvlakken)



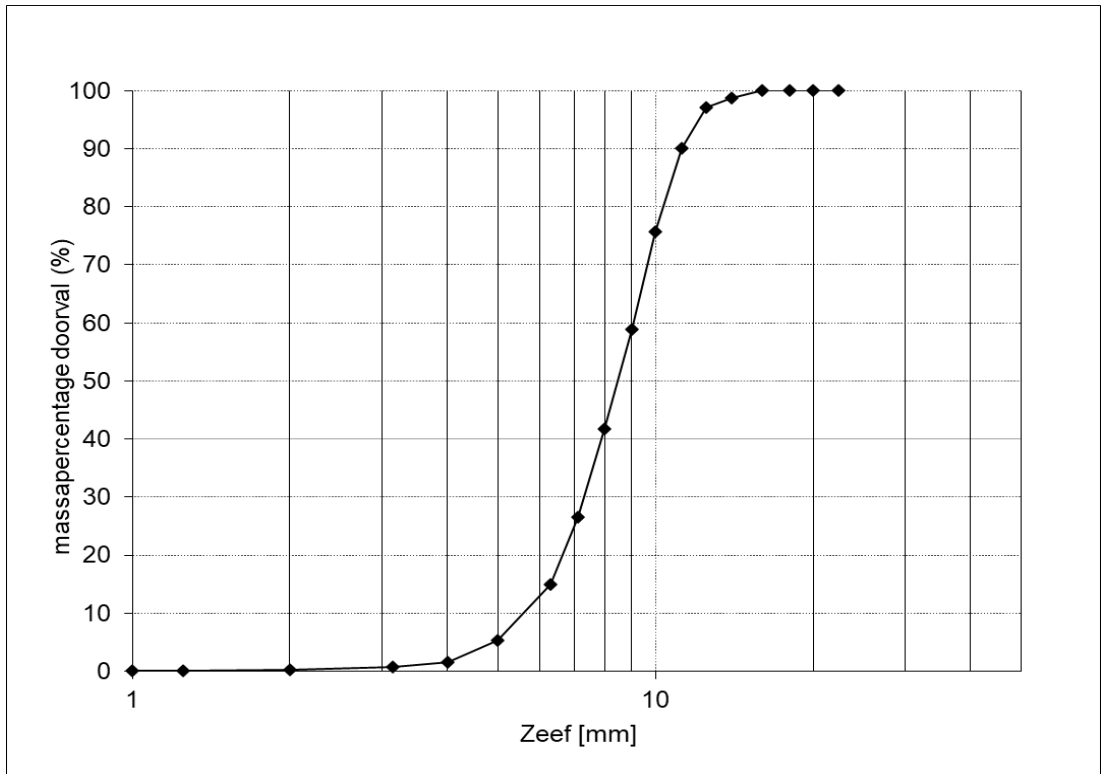


Fig. B-2 Zeefkromme van het filtermateriaal ( $D_{115} = 6,3 \text{ mm}$ )

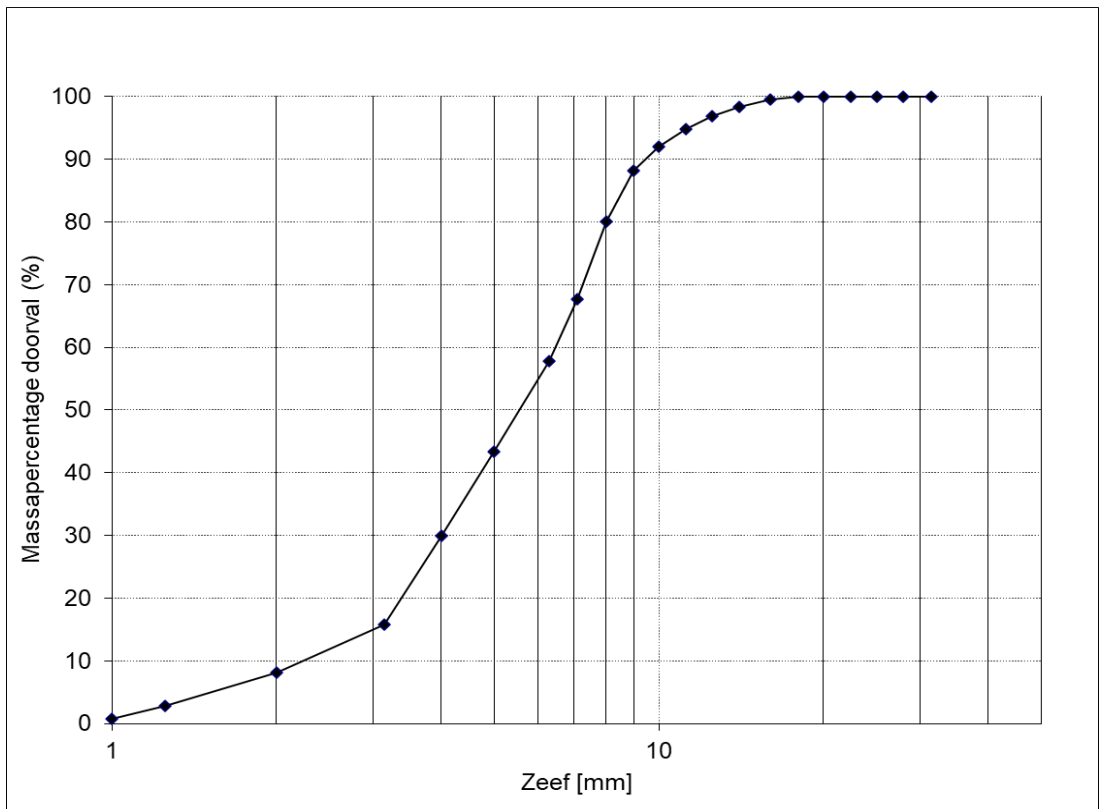


Fig. B-3 Zeefkromme van het inwasmateriaal ( $D_{115} = 3,0 \text{ mm}$ )

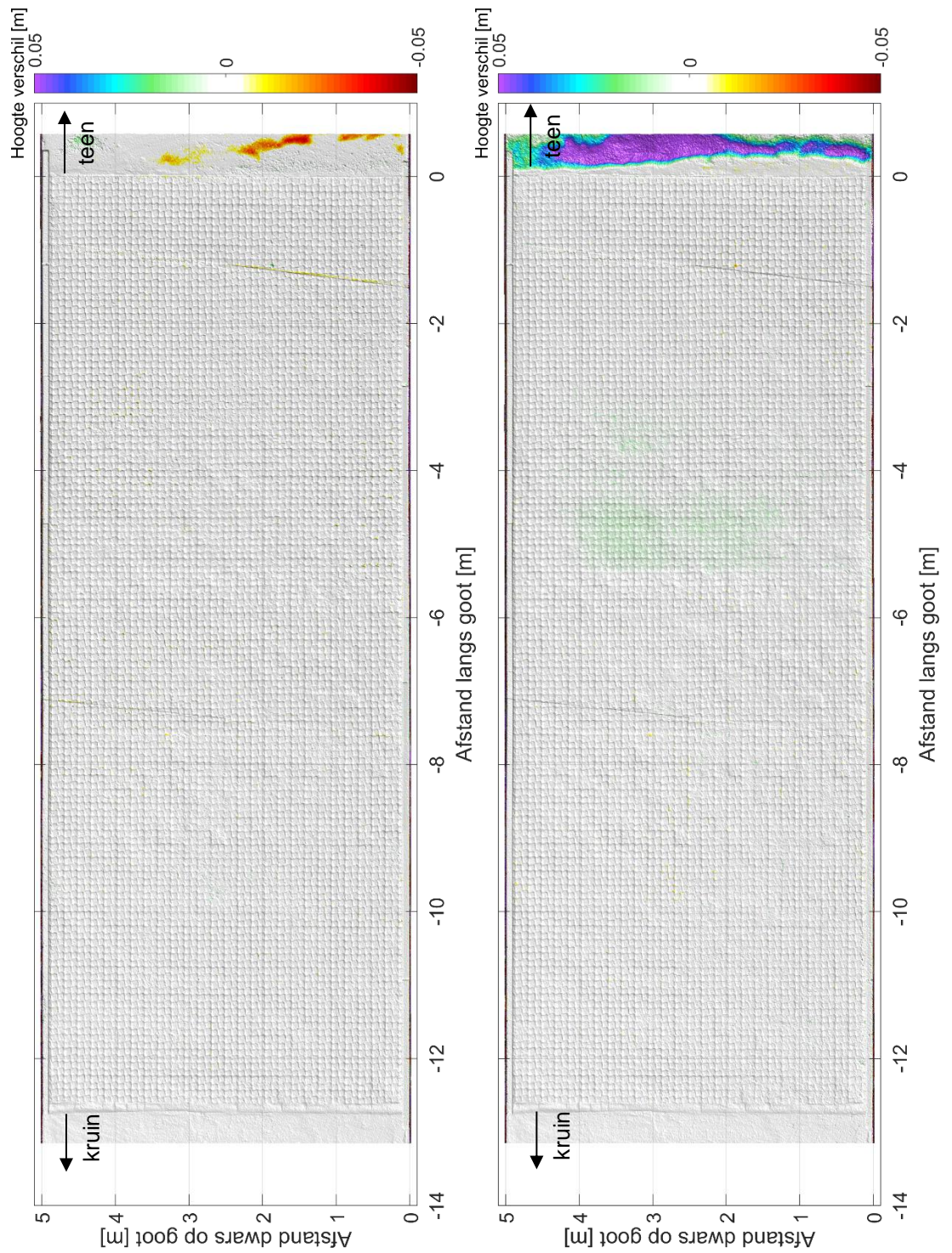


Fig. B-4 Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen voor en na proef QB-02; rechts: verschil tussen voor en na proef QB-03)



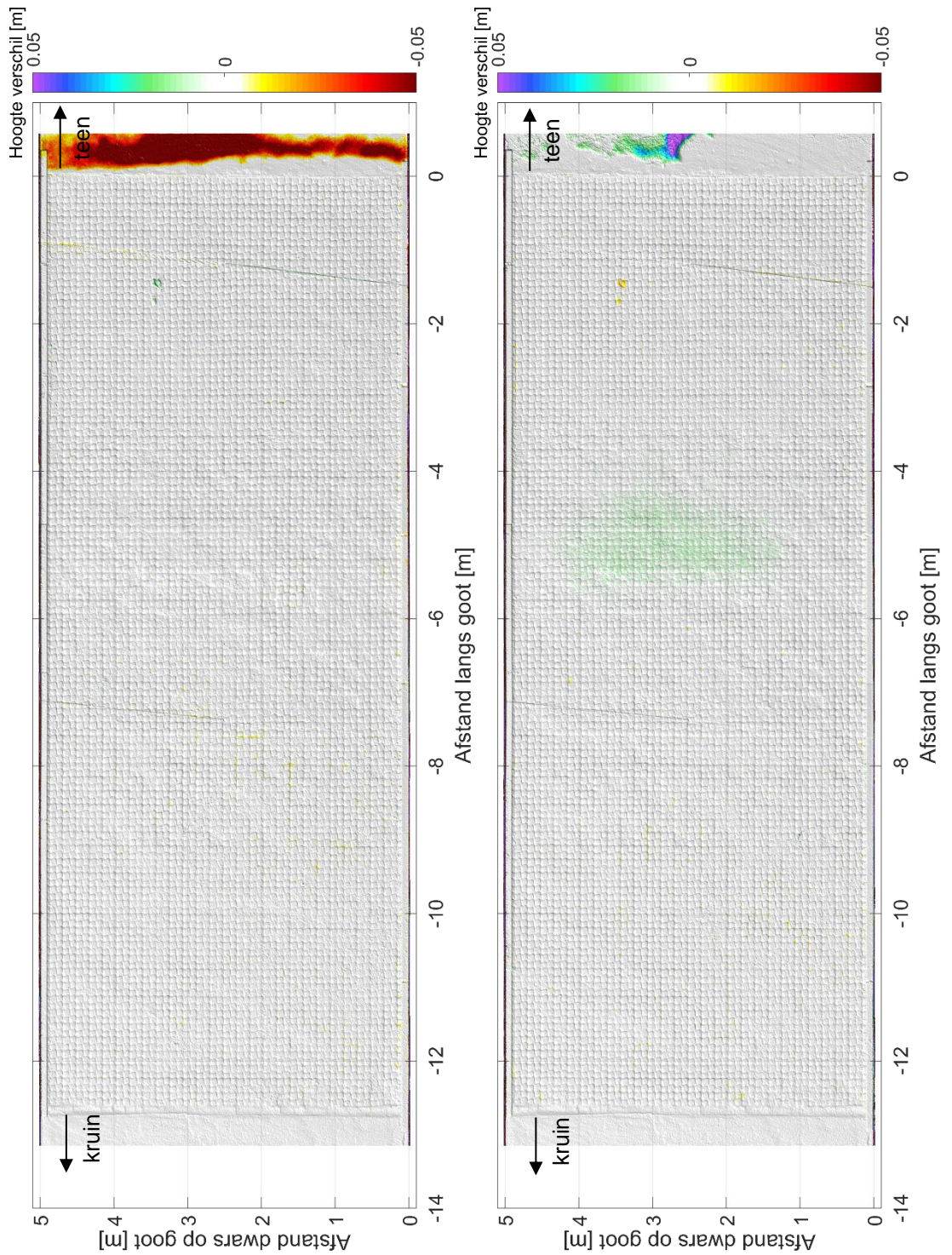


Fig. B-5 Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen voor en na proef QB-04; rechts: verschil tussen voor en na proef QB-05)

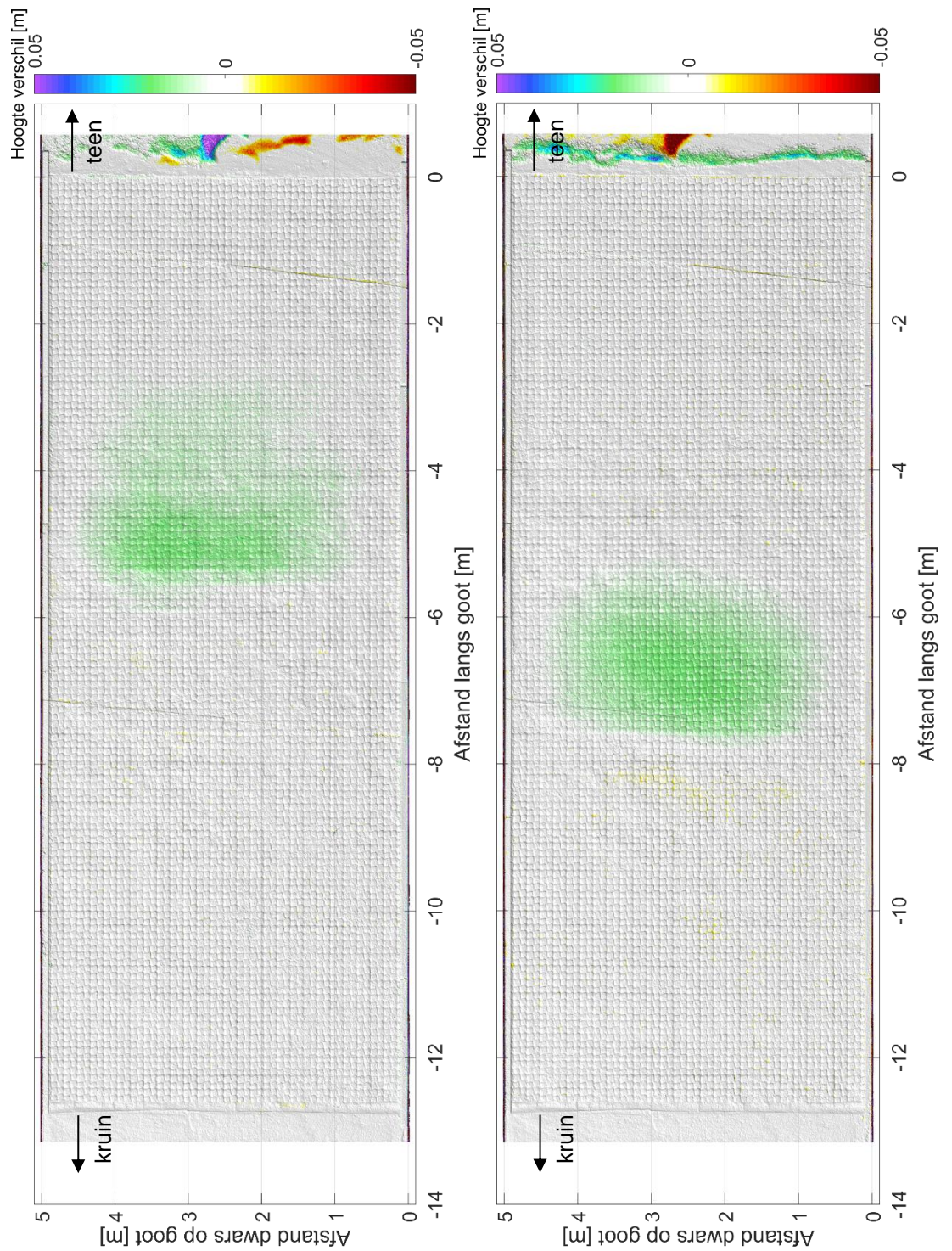


Fig. B-6 Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen na proef QB-01 en na proef QB-05; rechts: verschil tussen voor en na proef QB-06)



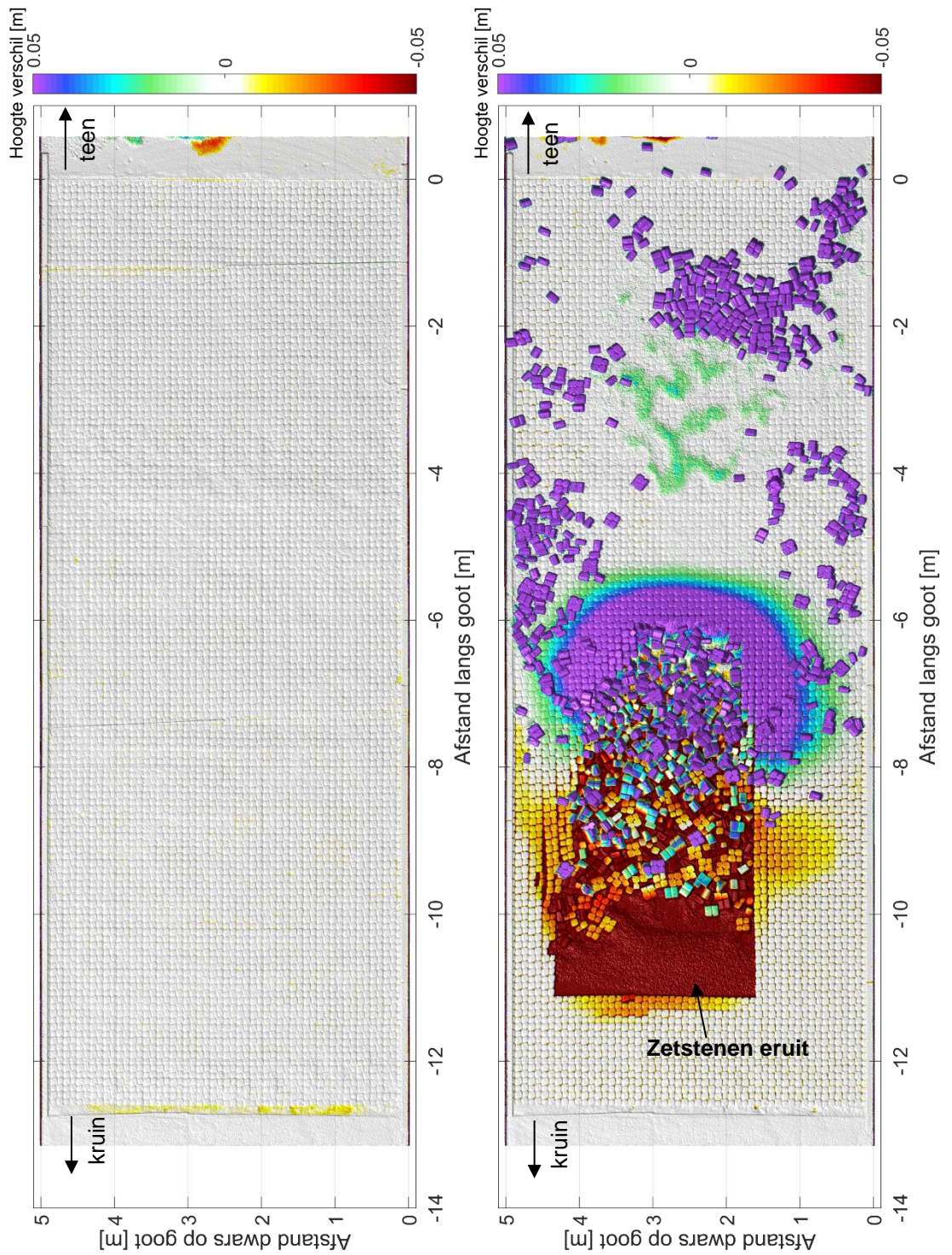


Fig. B-7 Vervorming taludoppervlak volgens laserscan (links: verschil tussen voor en na proef QB-09; rechts: verschil tussen voor en na proef QB-10)

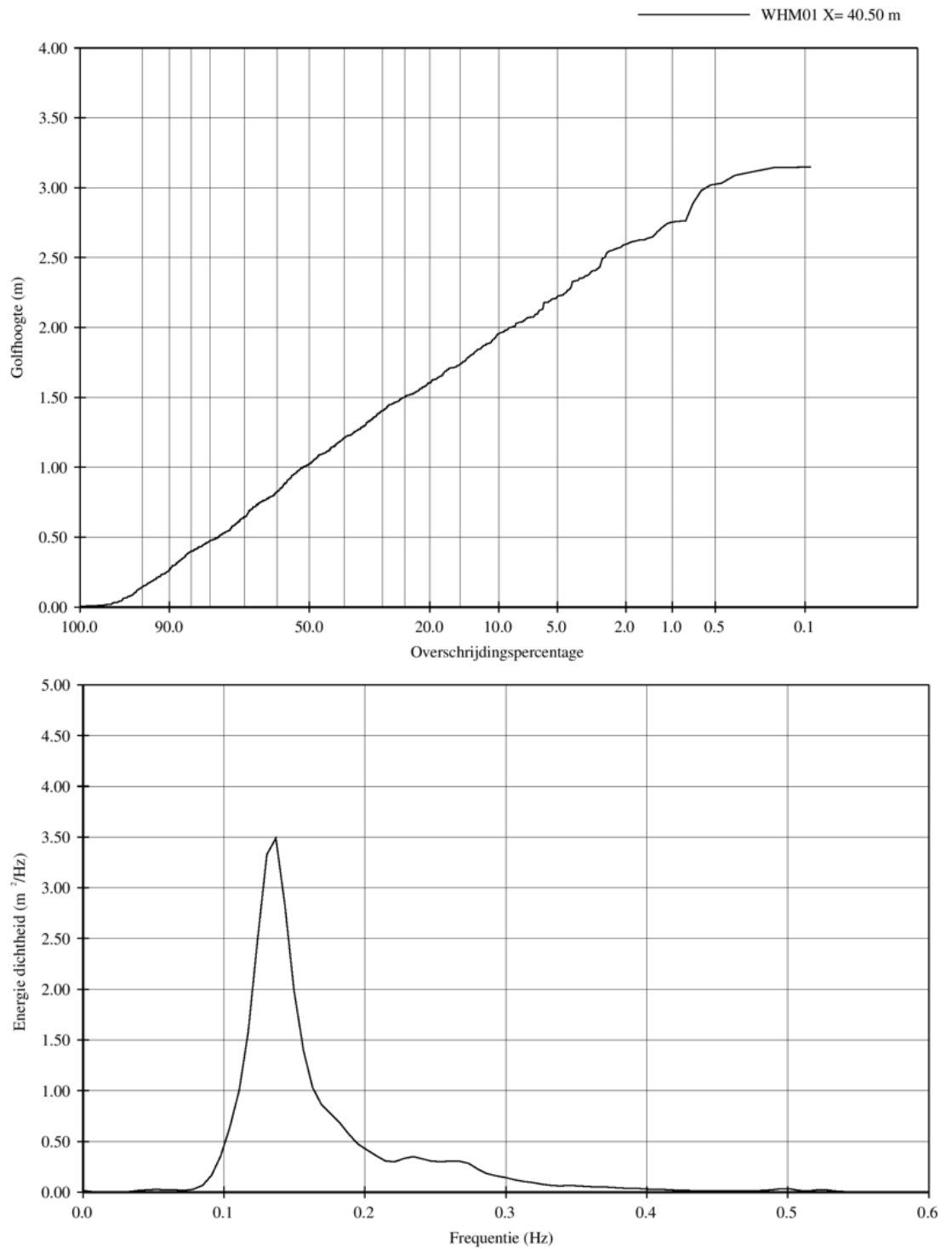


Fig. B-8 Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum van de inkomende golven van proef QB-05

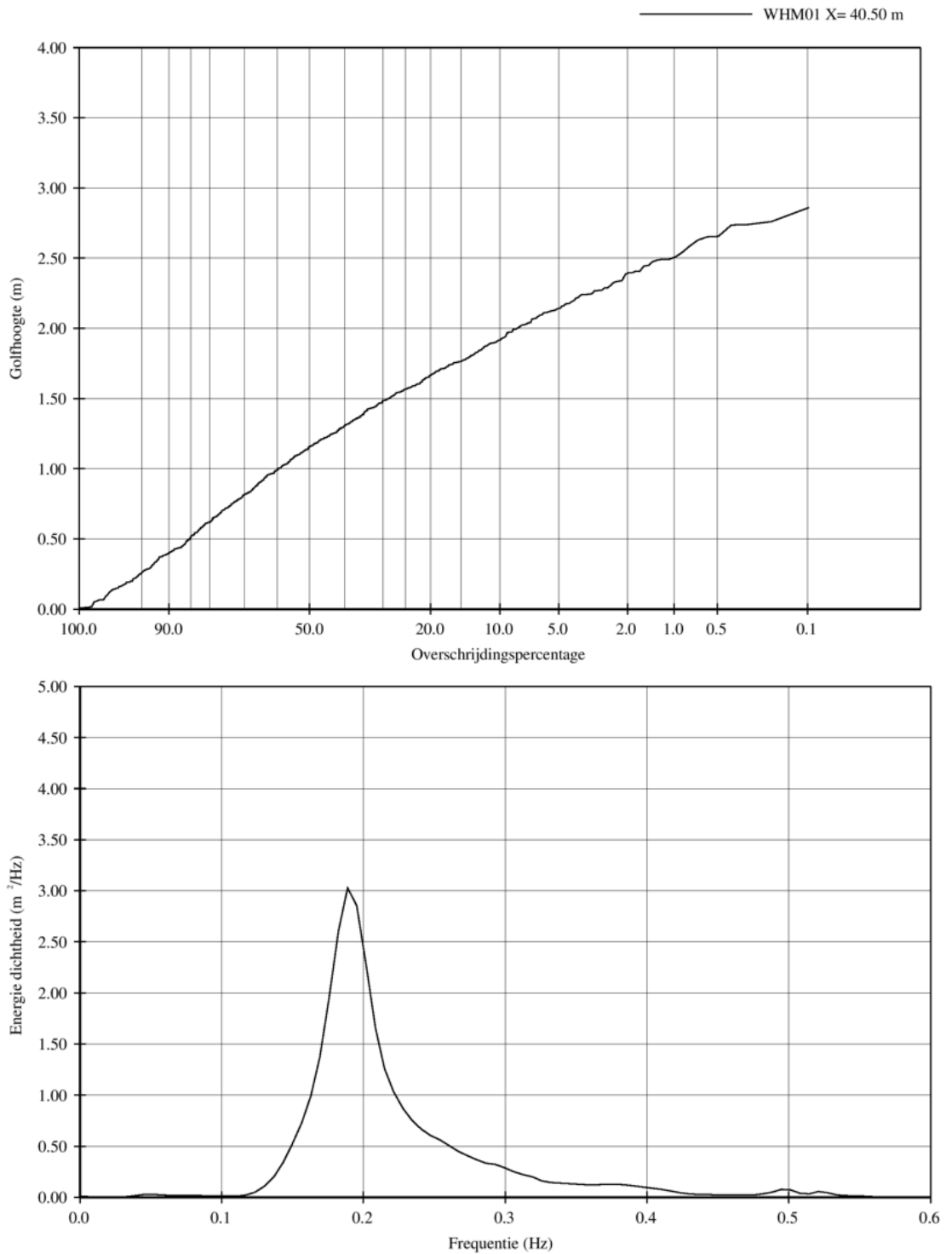


Fig. B-9 Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum van de inkomende golven van proef QB-06

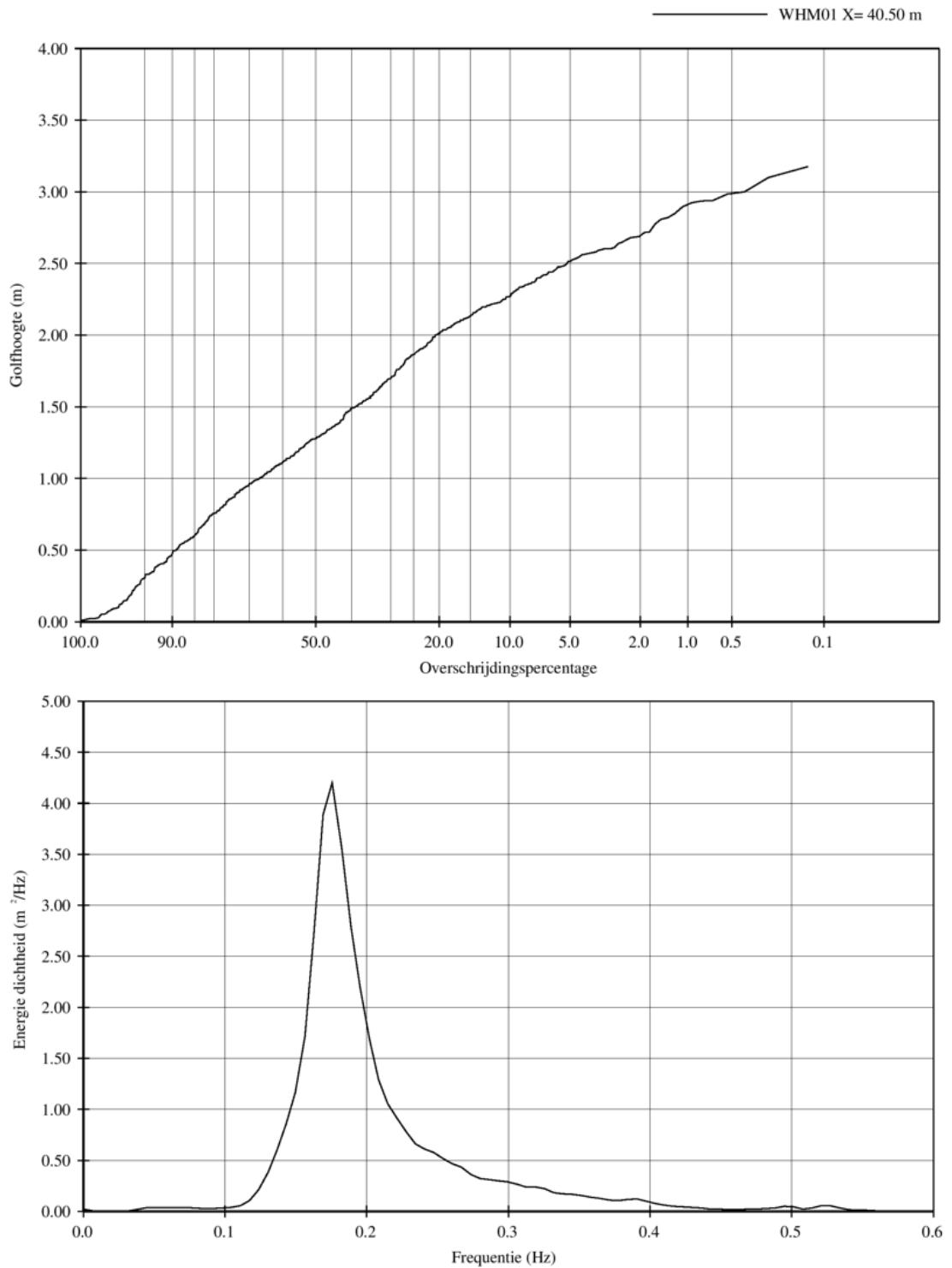


Fig. B-10 Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum van de inkomende golven van proef QB-07



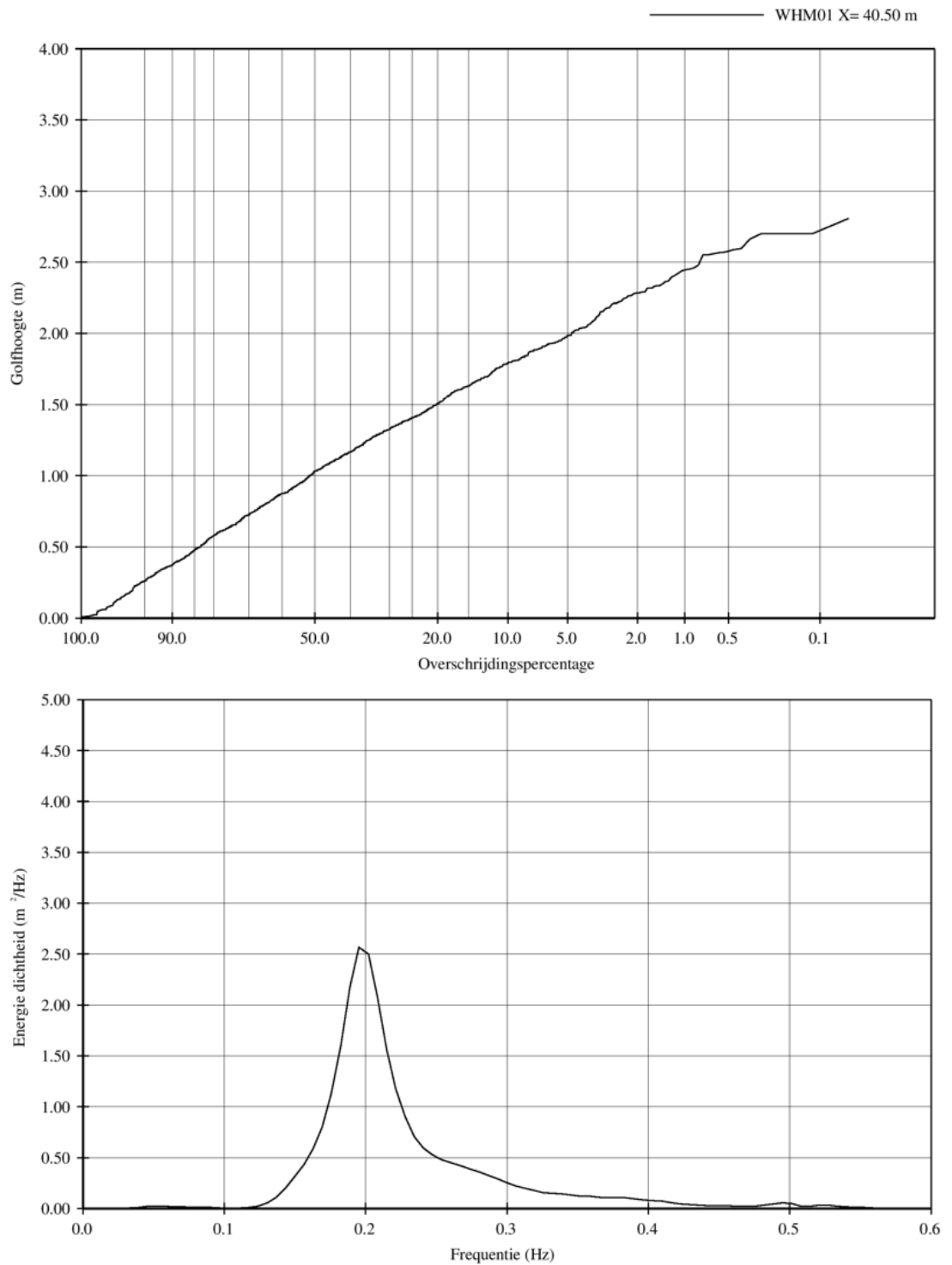


Fig. B-11 Golfhoogte-overschrijdingskromme en spectrum van de inkomende golven van proef QB-10

# 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.



Fig. C-1 Golfaanval op testsectie van Quattroblocks

## C.2 Interpretatie van de proeven

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

- 1 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 2%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.
- 2 serie waarin de golfhoogte stap voor stap is verhoogd bij een golfsteilheid van 4%, tot bezwijken optrad of de maximale capaciteit van de Deltagoot werd bereikt.

- 3 langeduurproef met constante golfcondities die net zolang is uitgevoerd totdat bezwijken optrad of de maximale proefduur was verstreken (golfsteilheid van 4%).

Ten aanzien van de eerste twee series wordt de bezwijkgolffhoogte gelijkgesteld aan het gemiddelde tussen de  $H_s$  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 golffhoogte in de Deltagoot het denkbaar is dat het niet lukt om de steenzetting te laten bezwijken, is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolffhoogte verder uitgedetailleerd (zie bijlage D voor omschrijving schadecategorieën):

- 1 De golffhoogte bij het bezwijken van de steenzetting is voor de eerste twee proevenseries met korteduurproeven gelijk aan het gemiddelde van de golffhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golffhoogte van de proef met de hoogste golffhoogte in dezelfde serie (ongeveer dezelfde golfsteilheid) waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
- 2 Voor de langeduurproef wordt de gemiddelde golffhoogte en golfperiode bepaald en geldt het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de proef.
- 3 Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golffhoogte nog geen bezwijken is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golffhoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golffhoogte-stappen van 15% te werken. Aangenomen wordt dat bij die fictieve proef wel 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 8 uur (prototypewaarde) heeft standgehouden bij dezelfde golfcondities. Het doorstaan van de 8 uur golfbelasting tijdens de langeduurproef impliceert dat bezwijken bij een hogere golffhoogte optreedt dan 15% boven de maximale golfcondities. In dat geval geldt voor als de lange duurproef 8 à 15 uur heeft geduurd tot schade (zie volgende paragraaf):
  - Ga ervan uit dat bij een 15% hogere golffhoogte er schade zou zijn opgetreden tijdens de eerste proevenserie met lange golven.
  - Bereken met Steentoets een schatting van de golffhoogte bij bezwijken van de tweede proevenserie (met korte golven) op basis van het resultaat van de langeduurproef (met korte golven).
- 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 golffhoogte 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 bezwijkgolffoogte 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.

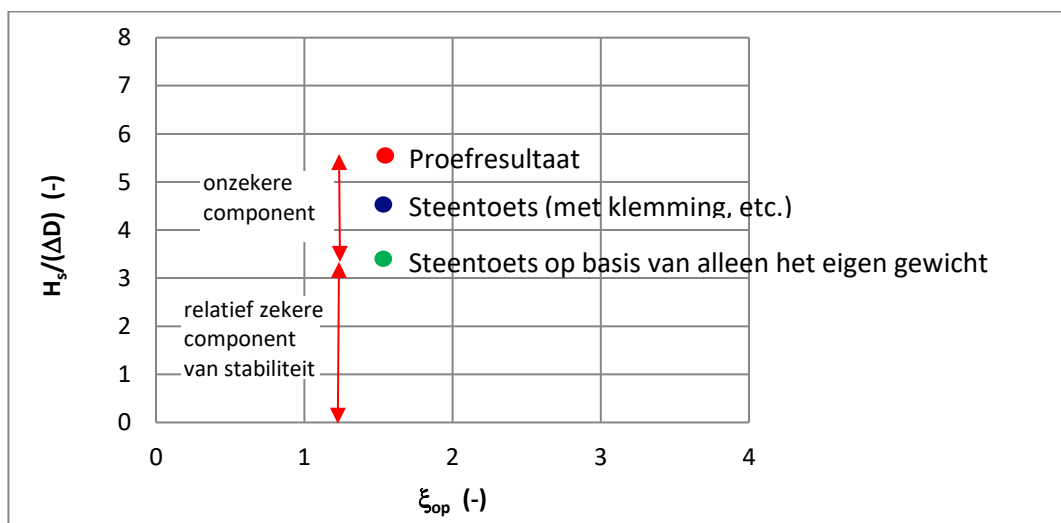


Fig. C-2 De gemeten stabiliteit bestaat uit een relatief zekere component (berekend met Steentoets met alleen eigengewicht) en een component die in de praktijk wat kan tegenvallen



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 Fig. C-2) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Fig. 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 onderschrijdskans 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.

Als er tijdens de eerste twee proevenseries geen schade is opgetreden en tijdens de lange duurproef de steenzetting langer dan 8 uur (prototype) heeft standgehouden, is er sprake van een bijzondere situatie. Bereken de stabiliteitsfactor dan als volgt:

- a) Bereken de stabiliteitsfactor door alleen gebruik te maken van het resultaat van de langeduurproef.
- b) Bereken voor de eerste proevenserie (met lange golven) de golfhoogte bij bezwijken aannemende dat bezwijken op was getreden bij een proef met 15% hogere golfhoogte. Bereken met Steentoets een schatting van de golfhoogte bij bezwijken van de tweede proevenserie (met korte golven) op basis van het resultaat van de langeduurproef (met korte golven). Bereken de stabiliteitsfactor op basis van de zo verkregen resultaten van de drie proevenseries.
- c) De stabiliteitsfactor is de kleinste van a) en b) als de langeduurproef tussen 8 en 15 uur heeft geduurd tot schade is opgetreden en is gelijk aan de waarde van a) als tijdens de langeduurproef er pas na 15 uur schade is opgetreden. In dit laatste geval wordt er gerekend met een standaardafwijking van 0,05.

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 Fig. D-1), of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Fig. D-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 door de golfbelasting (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 door de golfbelasting (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.

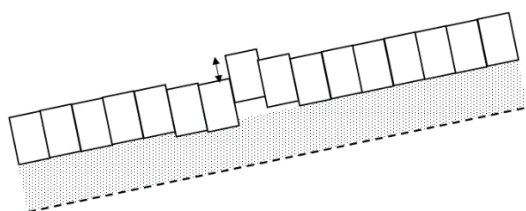
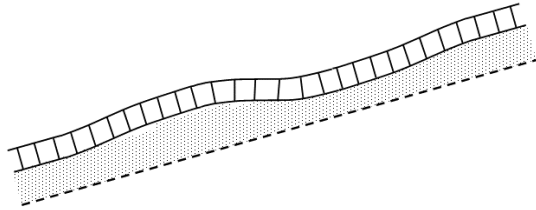


Fig. D-1 Verplaatsing van zetstenen ten opzichte van naastgelegen zetstenen



*Fig. D-2 Vervorming tot S-profiel*



## E Foto's

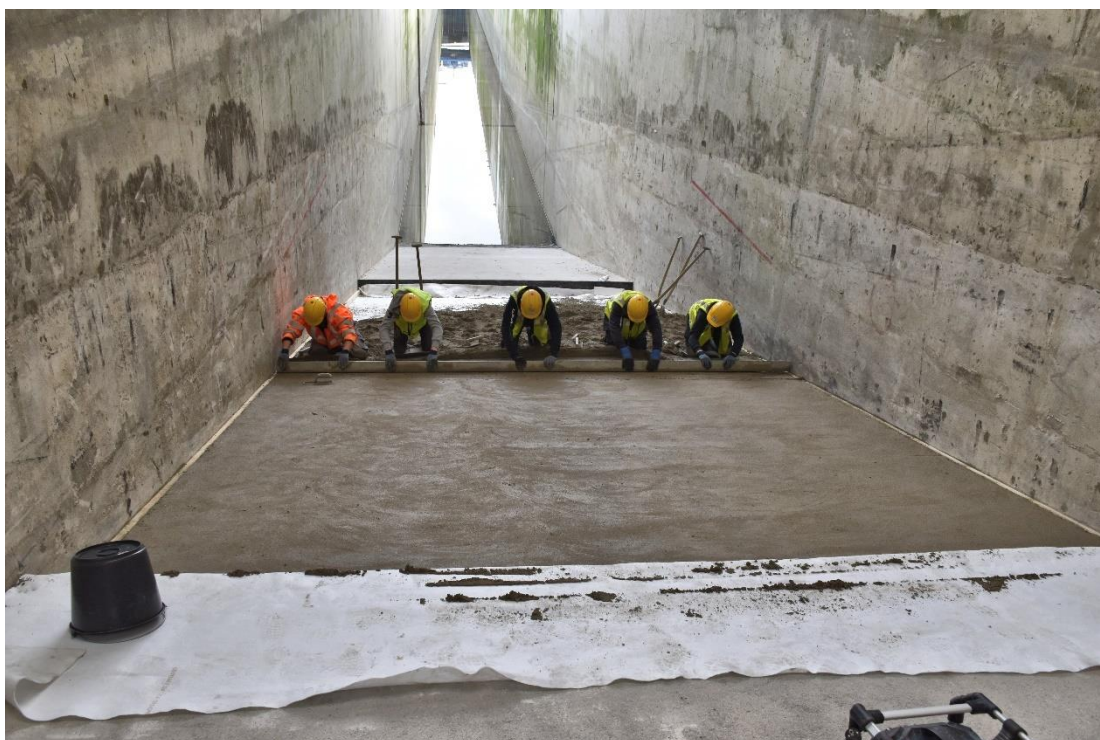


Fig. E-1 Aanbrengen zandcement in het vak waar later de steenzetting komt



Fig. E-2 Aanbrengen geotextiel op het zandcement





*Fig. E-3 Aanbrengen van de filterlaag op het geotextiel*



*Fig. E-4 Plaatsing Quattroblocks op het filter*





*Fig. E-5 De spleet tussen de steenzetting en het boventalud is opgevuld met zandcement*

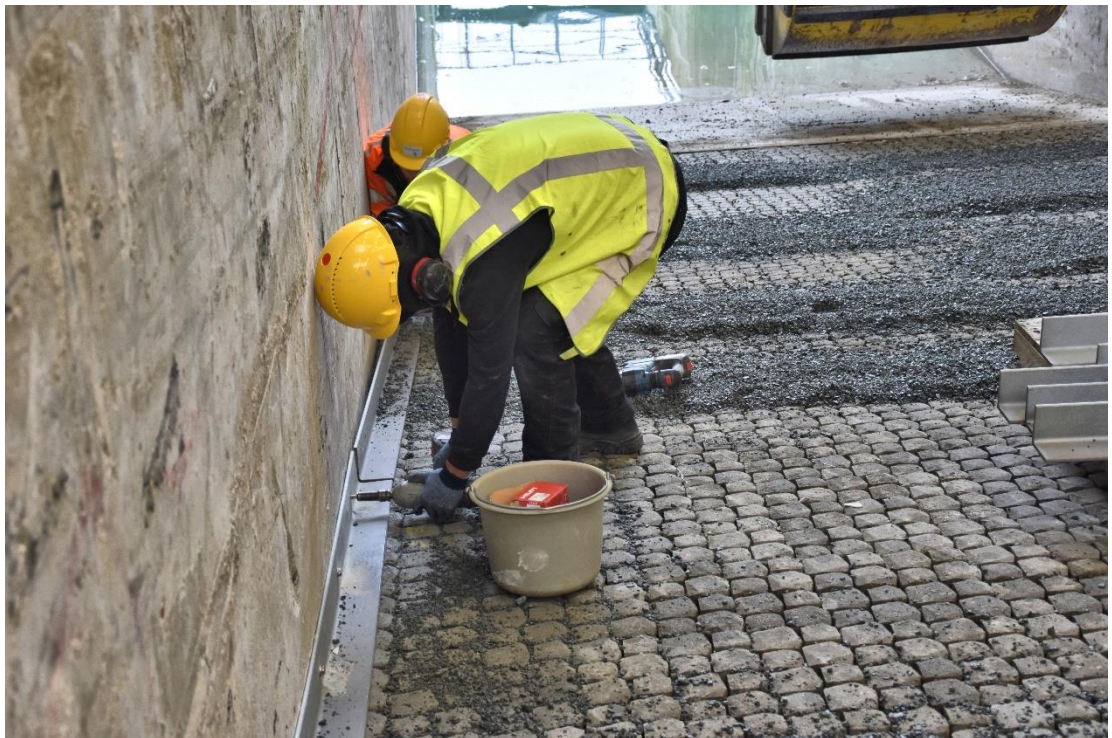


*Fig. E-6 De ruimte tussen de zetstenen en de gootwand is opgevuld met rubber*



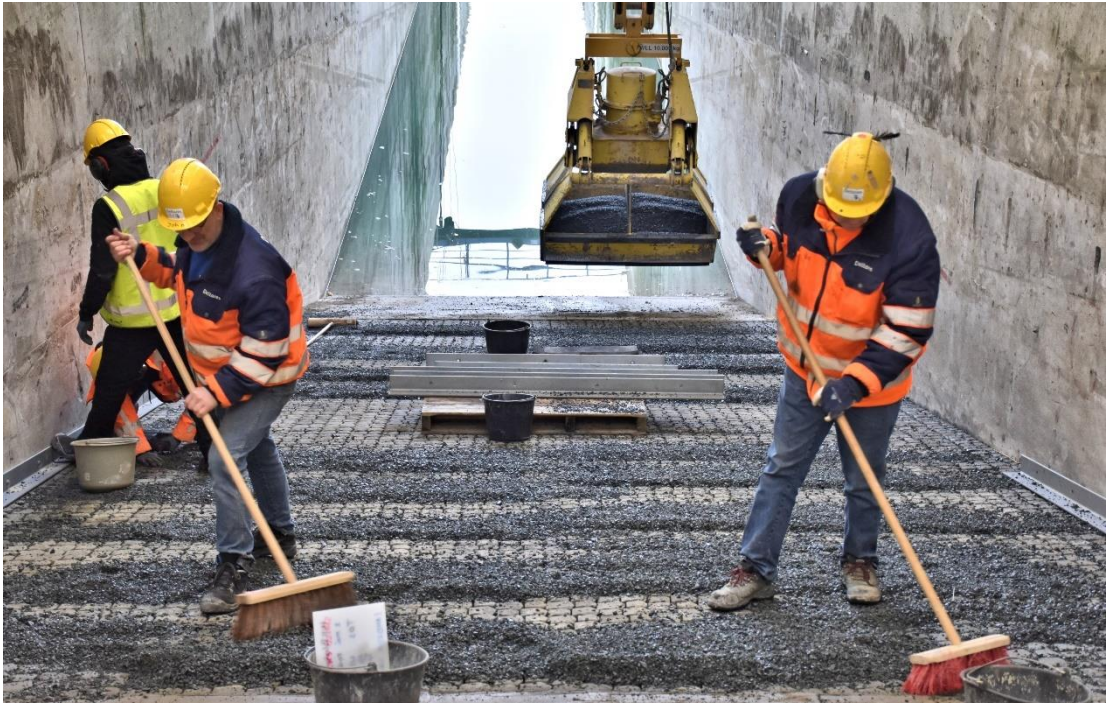


*Fig. E-7 Aan de randen is de steenzetting met de hand ingewassen met steenslag*



*Fig. E-8 Monteren van hoekprofielen bij de aansluiting met de gootwand*





*Fig. E-9 Inwassen van de steenzetting met steenslag*



Fig. E-10 Overzicht van dijktalud





Fig. E-11 Golfbelasting tijdens proef QB-04

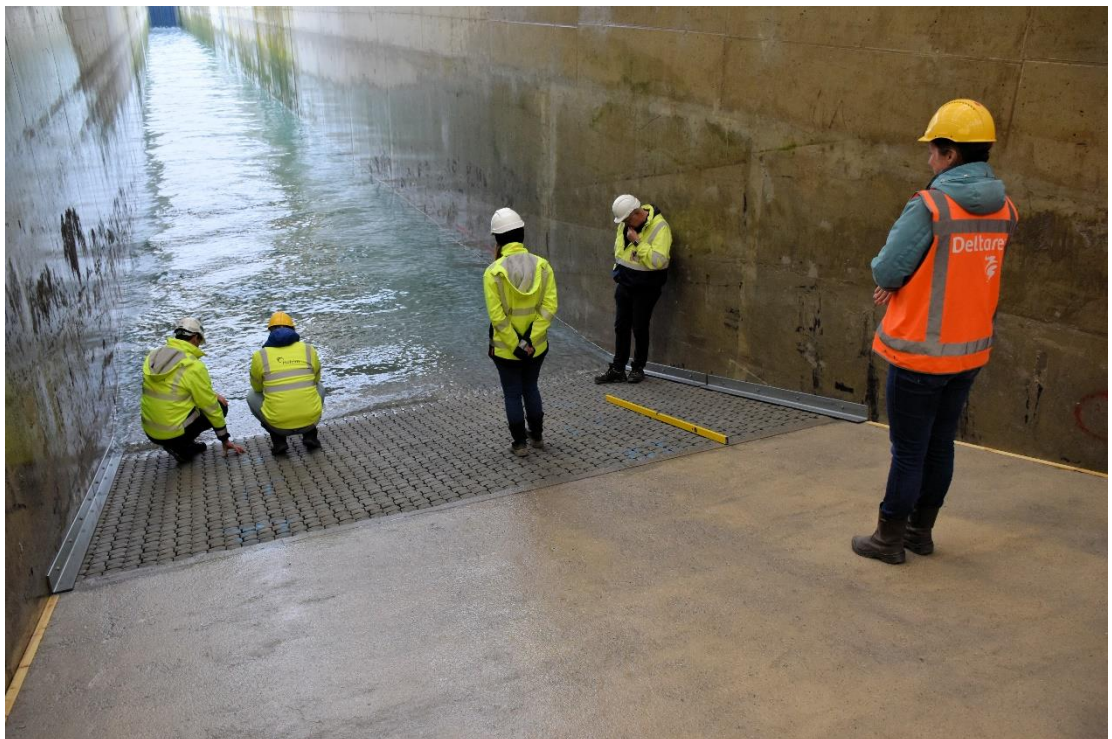


Fig. E-12 Inspectie van talud na proef QB-04





*Fig. E-13 Inwassen tussen de proeven*



*Fig. E-14 Overzicht van het talud na proef QB-01*





*Fig. E-15 Golfbelasting tijdens proef QB-05*



*Fig. E-16 Taludoppervlak met minimale vervorming na proef QB-05*



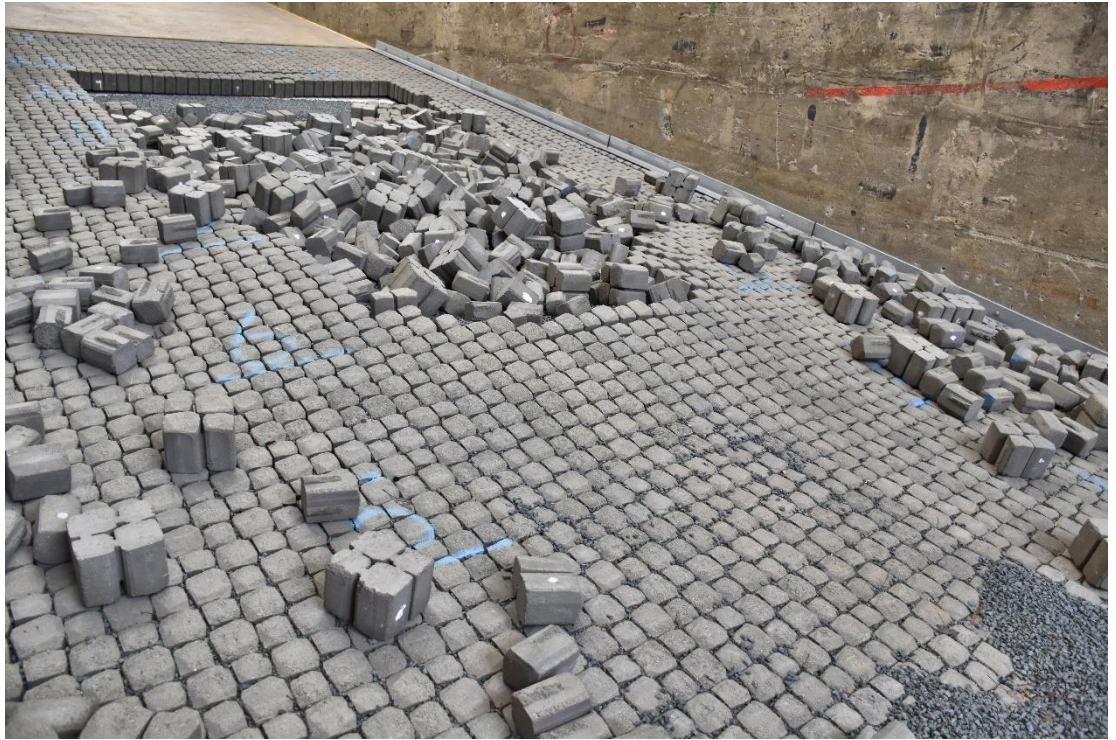


*Fig. E-17 Taludoppervlak met minimale vervorming na proef QB-06*



*Fig. E-18 Schade na proef QB-07*





*Fig. E-19 Schade na proef QB-10*

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)