

Stabiliteit van C-Star steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken



Stabiliteit van C-Star steenzetting bij golfaanval

Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

Guido Wolters

1208618-016

Titel

Stabiliteit van C-Star steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat WVL Berding Beton GmbH	1208618-016	1208618-016-HYE-0009	39

Trefwoorden

Steenzetting, C-Star, dijken, zetsteen

Samenvatting

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

Het in dit rapport beschreven deel van het onderzoek betreft de stabiliteit van zetstenen van het type C-Star, waarvoor Berding Beton (in samenwerking met LBN Betonproducten B.V. en Noppert Beton) als marktpartij in het onderzoek participeert.

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

De beproefde steenzetting had een toplaagdikte van 0,175 m. Onder de C-Stars was een filterlaag aangebracht van steenslag met daaronder een geotextiel.

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

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

Op basis van de proefresultaten en de rekenresultaten met Steentoets is de stabiliteitsfactor afgeleid. Deze blijkt voor de C-Stars in combinatie met Steentoets2014 (versie 14.1.2.1) $f_{\text{stabiliteit}} = 1,17$ te zijn. Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Referenties




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

Opdracht Berding Beton GmbH voor het project "Vergelijkend Onderzoek Zetsteen", 1208618-006-HYE-0004, 29.01.2014

Titel

Stabiliteit van C-Star steenzetting bij golfaanval

Opdrachtgever Rijkswaterstaat WVL Berding Beton GmbH	Project 1208618-016	Kenmerk 1208618-016-HYE-0009	Pagina's 39
---	-------------------------------	--	-----------------------

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	mrt. 2015	Guido Wolters		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	
2.0	okt. 2015	Guido Wolters		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	
3.0	mrt. 2016	Guido Wolters		Mark Klein Breteler		Klaas Jan Bos	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken	1
1.2 Steenzetting van C-Star (Berding Beton GmbH, LBN Betonproducten B.V.)	2
1.3 Opzet van het rapport	3
2 Schaling	5
2.1 Faciliteit en C-Star	5
2.2 Schaling	6
2.2.1 Algemeen	6
2.2.2 Schaalregels	6
3 Modelopstelling en proevenprogramma	9
3.1 Algemeen	9
3.2 Plaatsing C-Star	10
3.3 Metingen	13
3.3.1 Golfcondities	13
3.3.2 Profielmetingen	14
3.3.3 Hoogteverschillen van taludoppervlak en uitspoeling	15
3.3.4 Wrijvingscoëfficiënt	15
3.4 Proevenprogramma	16
4 Schadebeschrijvingen en observaties	19
4.1 Algemeen	19
4.2 Serie 1, korteduurproeven, $s_{op}=0,02$ (Proeven C01 – C05)	22
4.3 Serie 2, korteduurproeven, $s_{op} = 0,04$ (Proeven C06 – C08)	24
4.4 Series 3, langeduurproef, $s_{op} = 0,04$ (Proeven C08 - C10)	27
4.5 Dwarsprofielen	29
5 Analyse van de proefresultaten	31
5.1 Uitspoeling van inwasmateriaal en filter	31
5.2 Stabiliteit steenzetting	31
5.3 Stabiliteitsfactor	33
6 Conclusies	37
Bijlage(n)	
A Tabellen	A-1
B Zeefkrommes	B-1
C Lasermetingen en dwarsprofielen	C-3
C.1 Lasermetingen	C-3
C.2 Dwarsprofielen	C-6
D Overschrijdingskrommes golfhoogte	D-1

E Foto's	E-1
F Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor	F-1
F.1 Inleiding	F-1
F.2 Interpretatie van de proeven	F-2
F.3 Bepaling stabiliteitsfactor	F-3

Lijst met Symbolen

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

u	=	Snelheid of doorlatendheid (m/s)
x	=	Lengte langs het talud vanaf de onderkant van de steenzetting (m)
z	=	Niveau ten opzichte van de gootbodem (m)
$z_{2\%}$	=	Golfoploop (m), 2% overschrijdingswaarde (verticale afstand tussen SWL en oplooptniveau)
α	=	Taludhelling ten opzichte van horizontaal ($^{\circ}$)
Δ	=	$(\rho_s - \rho)/\rho$ = relatieve soortelijke massa van zetsteen (-)
Λ	=	Leklengte (m)
ρ_s	=	Soortelijke massa van de zetstenen (kg/m^3)
ρ	=	Soortelijke massa van water (kg/m^3)
ξ_{om}	=	$\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_{m-1,0}^2))}$ = brekerparameter op basis van spectrale periode (-)
ξ_{op}	=	$\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$ = brekerparameter op basis van piekperiode (-)
ν	=	Kinematische viscositeit van water, ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$ (m^2/s)

1 Inleiding

1.1 Vergelijkend onderzoek zetstenen voor dijken

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

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

Dit rapport beschrijft de proeven met een steenzetting van het type C-Star van Berding Beton GmbH en LBN Betonproducten B.V., die zijn gericht op het bepalen van de stabiliteit in golfaanval.

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

Deze stabiliteitsfactor is de verhouding tussen de benodigde toplaagdikte die volgt uit de resultaten van het experimentele onderzoek en de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (met stabiliteitsfactor = 1), rekening houdend met een veiligheidsmarge.

De stabiliteitsfactor kan niet gebaseerd worden op kleinschalige modelproeven (kleiner dan schaal 1:3) omdat bij steenzettingen er sprake is van strijdige schaalregels. De stabiliteit op kleine schaal kan daardoor niet goed omgerekend worden naar de overeenkomstige stabiliteit op grote schaal.

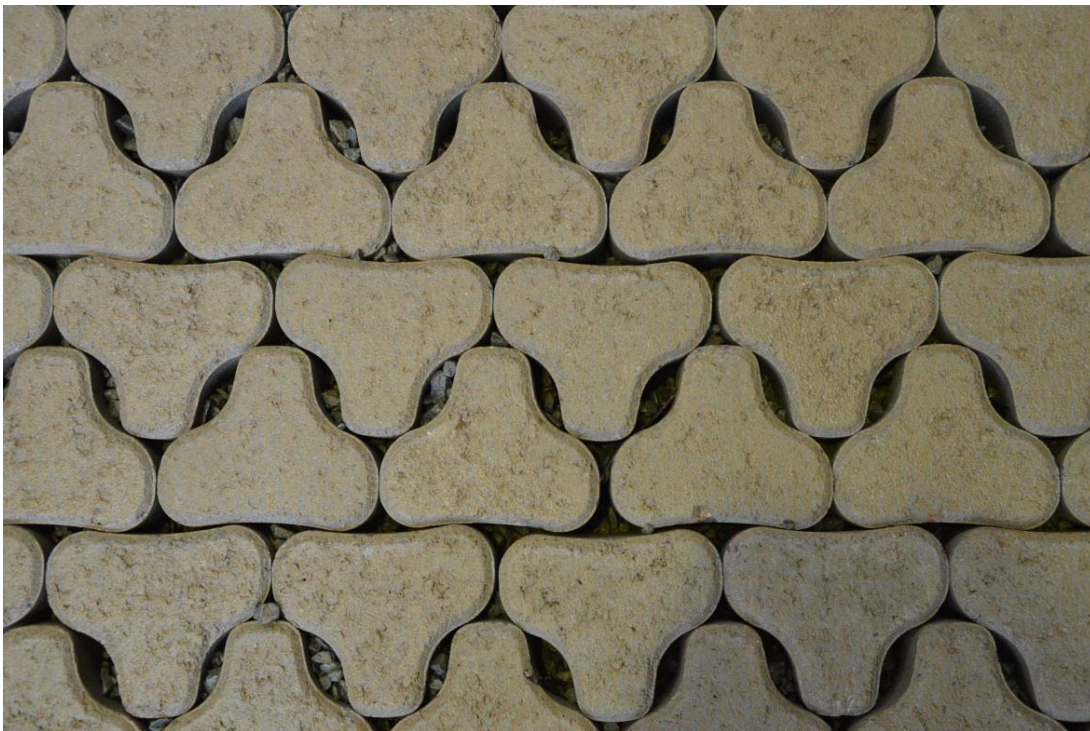
Daarom zijn de huidige proeven op grote schaal (schaal 1:2 ten opzichte van de werkelijkheid) uitgevoerd. De Deltagoot is bij uitstek geschikt om de stabiliteit van steenzettingen te beproeven, omdat hierin een dijk op bijna prototype-schaal kan worden ingebouwd en belast kan worden door grote golven.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

Het onderzoek is in januari 2015 - februari 2015 uitgevoerd onder leiding van M. Klein Breteler en G. Wolters.

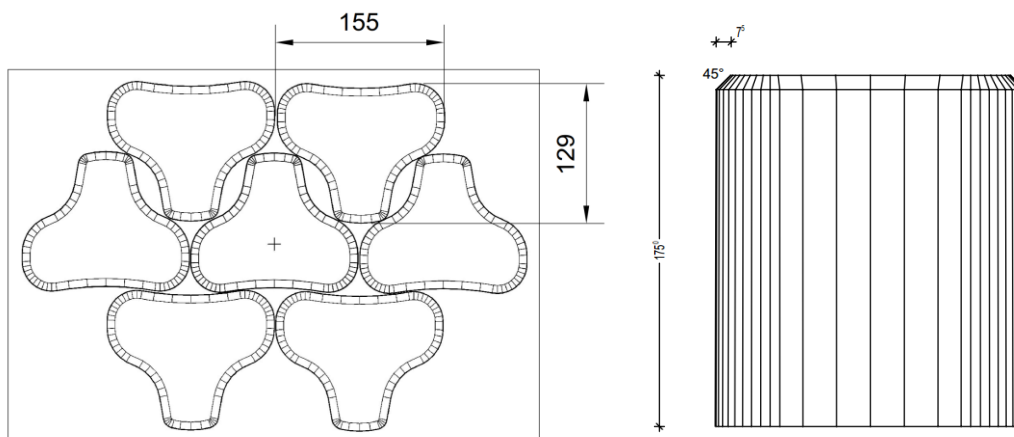
1.2 Steenzetting van C-Star (Berding Beton GmbH, LBN Betonproducten B.V.)

In dit deel van het onderzoek is een steenzetting van het type C-Star beproefd. C-Star is een type steenzetting van beton die op een filterlaag wordt toegepast om dijken en oevers te verdedigen tegen golfaanval en stromingsbelasting. Figuur 1.2 - Figuur 1.3 geven een indruk van de vorm van de zetstenen.

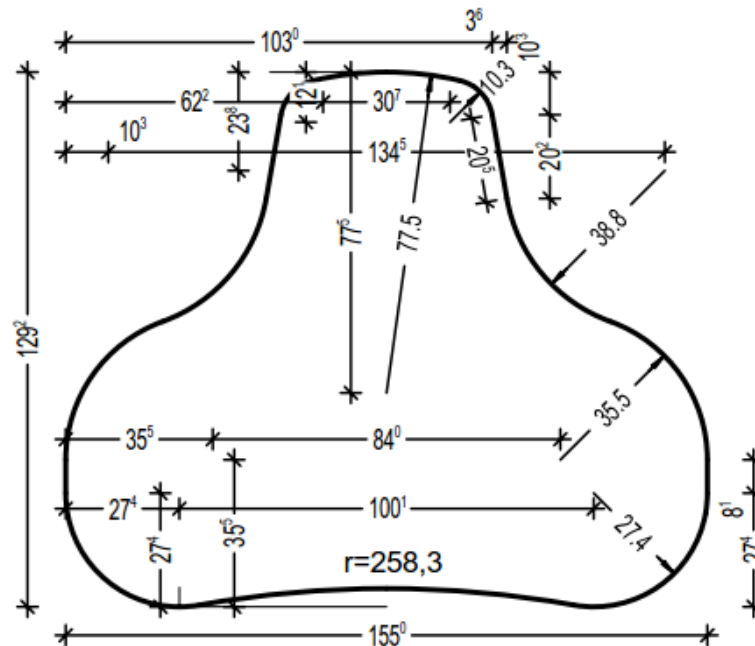
De werkende breedte en lengte van de C-Star in het model zijn 0,095m x 0,155m (in werkelijkheid 0,19m x 0,31m).



Figuur 1.1 C-Star in de Deltagoot



Figuur 1.2 Maten van de C-Star (L x B x H = 155mm x 129mm x 175mm; schaal 1:2)



Figuur 1.3 Grondplan C-Star (schaal 1:2)

1.3 Opzet van het rapport

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

De appendices bevatten:

- Appendix A: Meetresultaten in tabelvorm, gemeten filterdiktes, wrijvingscoëfficiënten en uitspoeling van inwasmateriaal
- Appendix B: Zeefkrommes van de ingebouwde materialen (filter, inwasmateriaal)
- Appendix C: Lasermetingen van het taludoppervlak en dwarsprofielen
- Appendix D: Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidspectra
- Appendix E: Foto's
- Appendix F: Invloed van de zuildiameter op het stijghoogteverschil over de zetstenen.

2 Schaling

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

2.1 Faciliteit en C-Star

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

De Deltagoot in de Noordoostpolder is een 230 m lange, 5 m brede en 7 m diepe golfgoot. De goot is voorzien van een golfschot waarmee zowel regelmatige als onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. Tevens is het golfschot voorzien van een systeem dat gereflecteerde golven compenseert zodat deze niet opnieuw bij het golfschot in de richting van de constructie reflecteren. Dit is voornamelijk tegen het ontstaan van laagfrequente stoorgolven.



Figuur 2.1 Golfaanval op steenzetting van het type C-Star in de Deltagoot

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken met een significante golfhoogte tot ongeveer $H_s = 1,6$ m. Met deze golfhoogte is het mogelijk de maximale golfcondities op beschutte locaties in estuaria en binnenwateren op volle schaal te reproduceren. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de maatgevende golven echter tot ruim tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal 1:2.

De steenzetting op ware grootte, die als uitgangspunt is genomen voor dit onderzoek, bestaat uit C-Stars met zuilhoogte van 35 cm. De zuilen zijn speciaal voor het onderzoek op schaal 1:2 gemaakt door Berding Beton. Daarbij zijn alle maten (hoogte, lengte en breedte) een factor 2 kleiner gekozen dan in werkelijkheid. Daarvoor zijn speciale mallen gemaakt. Er is verder gebruik gemaakt van normale aardvochtige beton en de productiemachine, zoals dat gebruikelijk is voor zetstenen voor dijken.

De resultaten van dit onderzoek kunnen door middel van Steentoets gebruikt worden voor een breed scala aan bekledingsgeometrieën met C-Star.

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

2.2 Schaling

2.2.1 Algemeen

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

Een schaal van 1:2 betekent dat de afmetingen van de zetstenen half zo groot moeten zijn. Dit geldt zowel voor de verticale als horizontale afmetingen van de zetstenen (hoogte, breedte en lengte), met behoud van vorm.

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

Het schaalmodel is weergegeven in Figuur 3.1.

2.2.2 Schaalregels

Bij het schalen van steenzettingen moet er rekening gehouden worden met conflicterende schaalregels vanwege het belang van de stroming in de constructie (onder de toplaag) en de golven op het talud.

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

voor dat het Froude-getal hetzelfde is in het model als in de werkelijkheid. Het Froude-getal wordt als volgt berekend:

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

In deze formule staan u voor de snelheid (m/s), g voor de zwaartekrachtsversnelling (m/s²) en L voor de lengte (m).

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

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

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

Voor parameters die gebaseerd zijn op verhoudingen geldt een schaal van 1:1. Voorbeelden hiervan zijn de taludhelling $\tan\alpha$ en de relatieve soortelijke massa van de zetstenen:

$\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$, met ρ_s = soortelijke massa van de zetstenen (kg/m³) en ρ = soortelijke massa van water (kg/m³).

Een belangrijke parameter voor het analyseren van de stabiliteit is de belastingsparameter, welke gedefinieerd is als $H_s/(\Delta D)$. Hierin is H_s de significante golfhoogte, Δ de relatieve soortelijke massa van de C-Stars ten opzichte van het water en D de dikte van de C-Star toplaag. De parameter Δ is een dimensieloze verhouding (dus op schaal 1:1), H_s en D worden beiden uitgedrukt in lengte-eenheden waardoor deze belastingsparameter dimensieloos wordt. De belastingparameter is in werkelijkheid gelijk aan de belastingparameter in het model (schaal 1:1).

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

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

Met:

Re = Reynoldsgetal (-)

L = lengte (m)

u = snelheid of doorlatendheid (m/s)

ν = kinematische viscositeit (ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$) (m²/s)

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

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

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

Met hierin:

Λ	= lek lengte	(m)
b	= dikte van de filterlaag	(m)
k	= doorlatendheid van de filterlaag	(m/s)
D	= effectieve dikte van de toplaag	(m)
k'	= doorlatendheid van de toplaag	(m/s)

De lek lengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal: $n_\Lambda = n_L = 2$. Met het rekenmodel STEENTOETS (Klein Breteler, 2014a) is de lek lengte in prototype-omstandigheden en in het schaalmodel berekend. Voor deze berekeningen is gebruikgemaakt van Steentoets2014 versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014). In de berekeningen is uitgegaan van inwasmateriaal met korrelgrootte $D_{f15} = 8$ mm in het schaalmodel en $D_{f15} = 16$ mm in prototype.

Uit de berekeningen is, uitgaand van de gehanteerde schaal van 1:2, gebleken dat in de modelopstelling een filterlaag met laagdikte b van ongeveer 7 cm en korrelgrootte $D_{f15} = 10$ à 13 mm goed overeenkomt met onder andere de volgende filterlaagdiktes en korrelgroottes van steenzettingen in de werkelijkheid: $b = 14$ cm in combinatie met $D_{f15} = 15$ à 21 mm, of met $D_{f15} = 18$ mm in combinatie met $b = 13$ à 15 cm.

In Tabel 2.1 is ter illustratie voor prototype- en schaalmodelomstandigheden weergegeven welke combinatie van parameters resulteren in een vergelijkbare lek lengte, uitgaande van verscaling van de lek lengte met de lengteschaal $n_L = 2$. Opgemerkt wordt dat een iets andere combinatie van parameters kan resulteren in dezelfde lek lengte.

Parameter	Symbol	Eenheid	Waarde op ware grootte	Waarde op schaal (indicatief)
dikte van de toplaag	D	(m)	0,35	0,175
open oppervlak	Ω	(%)	10,3	10,3
filterlaagdikte	b	(m)	0,14	0,07
korrelgrootte filter	D_{f15}	(mm)	18	11
korrelgrootte inwasmateriaal	D_{i15}	(mm)	16	8
toplaagdoorlatendheid	k'	(mm/s)	0,07	0,05
lek lengte	Λ	(m)	0,37	0,19

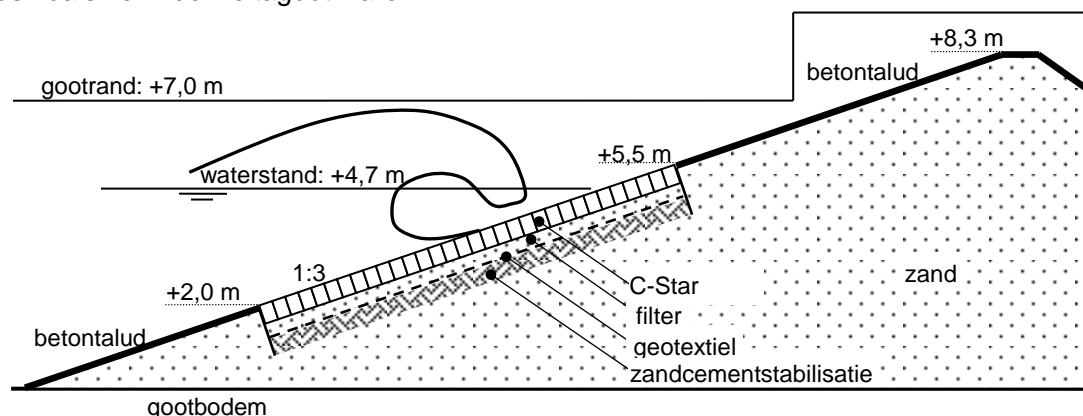
Tabel 2.1 Parameters met betrekking tot de stroming in de steenzetting met de waarden op ware grootte en overeenkomstige waarden op schaal (indicatief).

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

3 Modelopstelling en proevenprogramma

3.1 Algemeen

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



Figuur 3.1 Schematische doorsnede van de beproefde steenzetting

De opstelling bestaat uit een dijklichaam van zand waarop de kleilaag gesimuleerd is met een laag zandcementstabilisatie. Bovenop deze stabilisatielaag is een geotextiel (GEOPEX-NW270-S22NW-TYPE 1) toegepast tegen het uitspoelen van zand. Op het geotextiel is een filterlaag aangebracht met een dikte van 0,073 m. Het gebruikte filtermateriaal had een korrelgrootte van 10-32 mm met $D_{15} = 11$ mm. Op de filterlaag is de steenzetting van C-Stars aangebracht. Op deze C-Star wordt later in dit hoofdstuk nog teruggekomen. De zuilen zijn ingewassen met gebroken steenslag (hoekig), de sortering hiervan was $D_{15} = 8$ mm en $D_{90} = 15$ mm.

De proefopstelling had de volgende kenmerken:

- Hoogte van de dijk ten opzichte van de bodem van de goot: 8,3 m
- Taludhelling van 1:3,0
- Filterlaag (steenslag, Noors graniet):
 - dikte: 7,0 à 7,7 cm (gemiddeld 7,3 cm, zie Appendix A)
 - sortering 10-32 mm met: $D_{15} = 11$ mm en $D_{90} = 29$ mm, zie Appendix B.
- Inwasmateriaal:
 - Sortering Noors graniet: $D_{15} = 8$ mm en $D_{90} = 15$ mm, zie Appendix B.
- C-Stars:
 - Gemiddelde hoogte: 17,5 cm (17,4 à 17,8 cm)
 - Soortelijke massa: gemiddeld 2346 kg/m^3 (met $\rho_{min} = 2334 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_{max} = 2362 \text{ kg/m}^3$)
 - Open oppervlak: gemiddeld 10,3%
 - Maximale gatgrootte: 2 cm.
- Steenzetting van C-Stars van 2,0 m boven de gootbodem tot 5,5 m boven de gootbodem
- Een dummy bekleding (beton) van de gootbodem tot een hoogte van 2,0 m

- Een dummy bekleding (beton) vanaf 5,5 m boven de gootbodembodem tot de kruin van de dijk (8,3 m boven de gootbodembodem)

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

De proeven zijn uitgevoerd bij een waterstand van 4,70 m boven de gootbodembodem. Alleen de ingolfproeven zijn met een iets lagere waterstand uitgevoerd: 4,55 m.

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

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

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

Met:

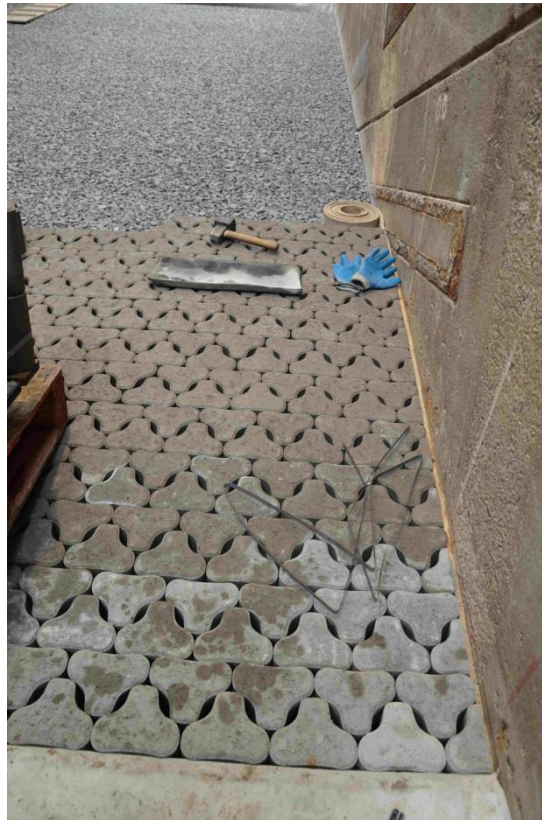
- z = verticale afstand tot de gootbodembodem (m)
x = horizontale afstand tot het golfschot (m)

3.2 Plaatsing C-Star

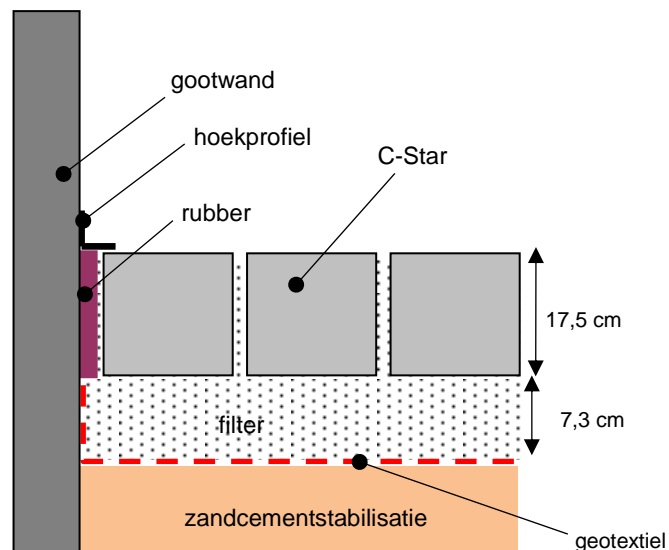
De C-Star zuilen zijn in hetzelfde patroon in de Deltagoot geplaatst zoals ze ook op een werkelijke dijk machinaal worden geplaatst. Op de foto van Figuur 3.2 en Figuur 3.3 is de typische geometrie te zien.



Figuur 3.2 Plaatsing van C-Star in de Deltagoot (2015)



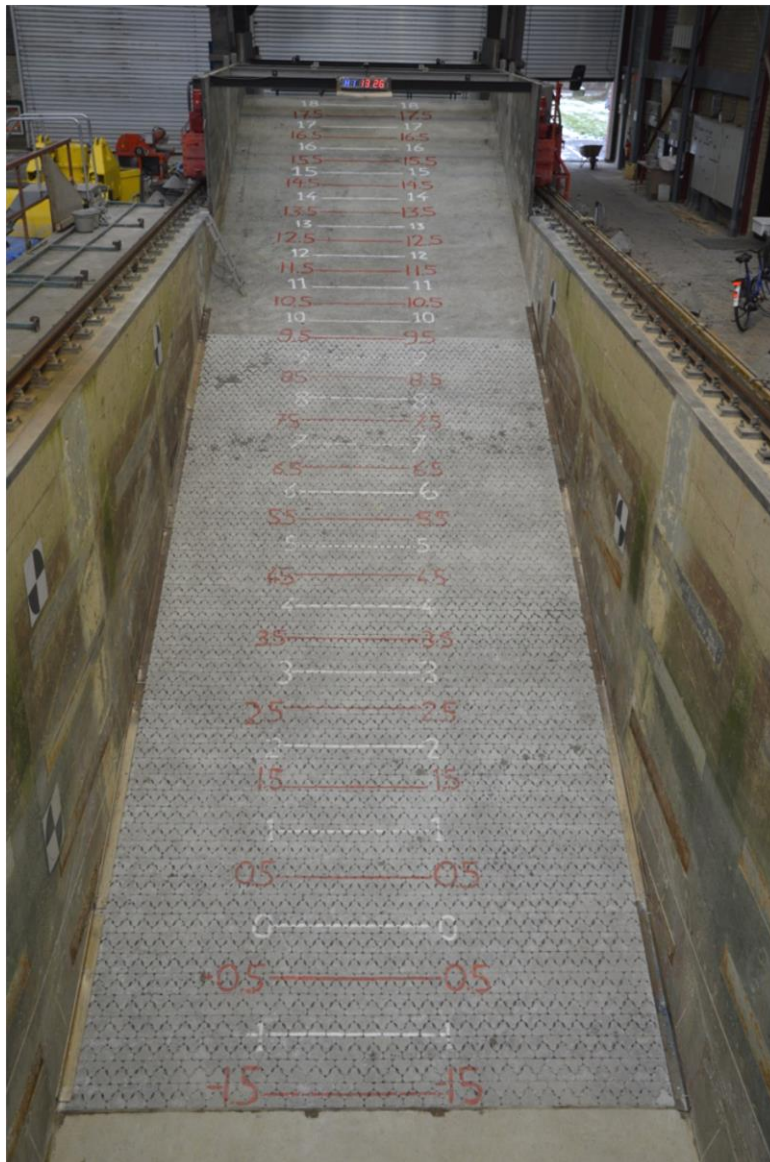
Figuur 3.3 Plaatsing van C-Star in de Deltagoot (2015)



Figuur 3.4 Aansluiting gootwand met steenzetting

Tijdens het inbouwen van de C-Star is op 24 locaties, verspreid over het oppervlak van het talud, de dikte van de filterlaag gecontroleerd. De dikte van de filterlaag was bijna constant, met slechts enkele mm verschil over de lengte van het talud, zie Appendix A. De bekleding is ingewassen met steenslag met zeefkrommen zoals weergegeven in Appendix B.

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



Figuur 3.5 Overzicht van de modelsectie met C-Star zuilen in de Deltagoot

Tevens is het open oppervlak aan de hand van foto's bepaald. Het gemeten open oppervlak was redelijk constant, namelijk ongeveer 10,3%.

Tussen de gootwand en de bekleding is een strook celrubber aangebracht, zie Figuur 3.4, zoals dat gebruikelijk is bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klemwigt tussen de starre gootwand waardoor een overschatting van de stabiliteit verkregen wordt. Tijdens de proeven mag zich wel een kleine normaalkracht ontwikkelen, die dan beperkt blijft qua grootte vanwege het rubber.

Tevens was langs de gootwand een hoekstaal aangebracht die ervoor zorgde dat er geen randeffecten op zouden treden als gevolg van de overgang van de zuilen naar het rubber en van het rubber naar de gootwand.

Bij het plaatsen van de zuilen is vanuit de linkerkant (halzijde) naar de rechterkant (meetcabinezijde) toegewerkt. Langs de wanden zijn de zuilen op maat gezaagd (zie Figuur 3.3).

Elke vierde zuilenrij is met een streep en letter gemarkeerd. Dit vergemakkelijkt het identificeren van de locatie waar schade optreedt. De locatie van de strepen zijn aangegeven in Tabel A.4 (Appendix A), samen met de gemeten uitspoeling van het inwasmateriaal.

3.3 Metingen

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

3.3.1 Golfcondities

De golfcondities (golfhoogte en golfperiode) zijn gemeten met drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit twee parallel aan elkaar, verticaal gespannen draden, waarvan de onderlinge elektrische weerstand verandert met de oppervlakte-uitwijking van het water. De golfhoogtemeters (GHM) hingen op respectievelijk 80 m, 87 m en 89,5 m van het golfschot.

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

De overschrijdskrommen van de inkomende golven zijn dan bepaald middels het (met de gemeten reflectiecoëfficiënt C_r) gecorrigeerde tijdsignaal van golfhoogtemeter GHM 1:

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1+C_r^2}} \quad (5)$$

Waarbij

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

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

Voor de golfhoogtemeters is een bemonsteringsfrequentie van 30 Hz gebruikt.

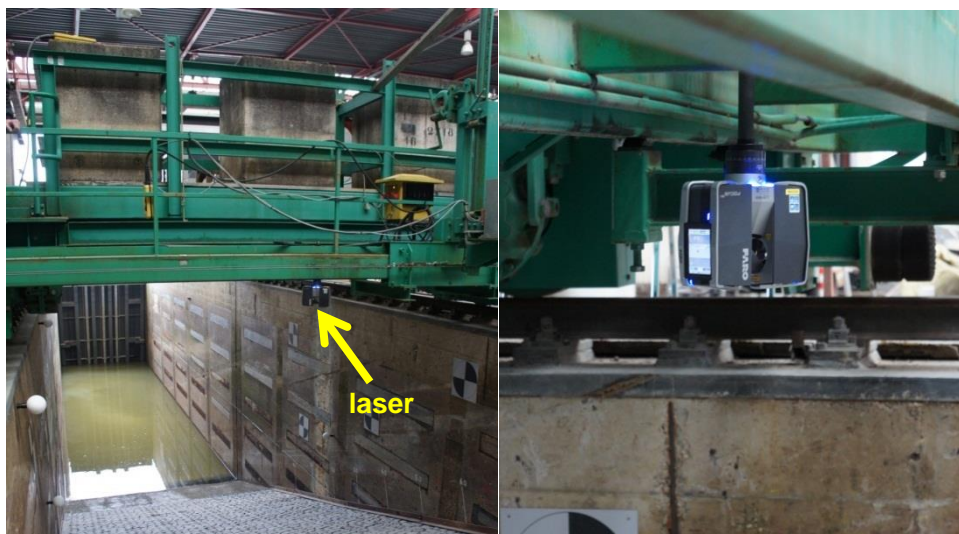
3.3.2 Profielmetingen

Het niveau van het taludoppervlak is gemeten en geanalyseerd met de *FARO Focus^{3D} Multi Sensor Laser Scanner* en de *SCENE 5.0* software, zie Figuur 3.6.

Het taludoppervlak kon tijdens het golven of als er water tegen het talud staat niet gemeten worden, en daarom is er alleen tussen de proeven gemeten als de waterstand is verlaagd (zie proevenprogramma). Het profiel werd dan niet alleen ingemeten met de laserscanner, maar ook geïnspecteerd en gefotografeerd.

Met behulp van de 3D laserscanner wordt een compleet 3D beeld van het talud gemaakt. De resulterende figuur is een verzameling van miljoenen ingemeten punten welke een digitale reproductie van het werkelijke taludoppervlak vormen. De laserscanner hangt tijdens de meting boven de goot (zie Figuur 3.6) en projecteert een laserstraal vanuit een draaiende spiegel richting de in te meten oppervlakte. Na terugkaatsing via het talud wordt de straal weer opgevangen door de scanner. Vervolgens kunnen de afstand tot het talud en de relatieve verticale en horizontale hoeken worden berekend. Deze data wordt vastgelegd ten behoeve van het genereren van een 3D profiel.

De laserscans zijn standaard uitgevoerd vanaf twee locaties boven de testsectie ($X = 184,20$ m en $X = 187,73$ m vanaf het golfschot, in het hart van de goot), waarna de resultaten van beide 3D scans zijn gecombineerd. Dit vergroot de nauwkeurigheid. Voorafgaand aan elke meting is op het talud liggend uitgespoeld inwasmateriaal eerst zoveel mogelijk verwijderd. De 3D resultaten van de laserscans zijn per proef weergegeven in bijlage C.



Figuur 3.6 Profielmeting met laser (voorbeeld)

Het verschilprofiel geeft de verandering van het niveau van het talud ten opzichte van het begin van de proevenserie (resulterende beweging van taludoppervlak).

Verder is het talud tijdens de proeven constant visueel in de gaten gehouden en gefilmd met een digitale camcorder.

3.3.3 Hoogteverschillen van taludoppervlak en uitspoeling

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

3.3.4 Wrijvingscoëfficiënt

Omdat ook de wrijvingscoëfficiënt belangrijk is voor de stabiliteit van de zuilen, en deze zou kunnen afwijken van die in werkelijkheid, is deze gemeten.

Proef	Wrijvingshoek φ [°]	Wrijvingscoëf. f [-]
1	30.81	0.60
2	32.46	0.64
3	28.91	0.55
4	30.86	0.60
5	30.33	0.59
6	32.17	0.63
7	31.92	0.62
8	30.57	0.59
9	33.24	0.66
10	33.79	0.67
11	36.05	0.73
12	33.39	0.66
13	31.68	0.62
14	32.12	0.63
15	29.43	0.56
16	27.65	0.52
17	30.57	0.59
18	33.34	0.66
19	31.34	0.61
20	28.82	0.55
21	34.09	0.68
22	27.60	0.52
23	28.16	0.54
24	30.29	0.58
Gemiddeld	31.23	0.61

Tabel 3.1 Wrijvingscoëfficiënten

De proeven zijn uitgevoerd door een zuil op een plank vast te maken en een andere zuil erop te leggen met een extra gewicht van 16,8 of 28,1 kg (met de zijkanten van de zuilen tegen elkaar). Vervolgens is de plank zo schuin gehouden totdat de bovenste zuil van de onderste

afschroef. De hoek van de plank is genoteerd. De tangens van deze hoek is de wrijvingscoëfficiënt.

De proeven zijn uitgevoerd met natte zuilen. De resultaten zijn te zien in Tabel 3.1. Uit de proefresultaten blijkt dat de wrijvingscoëfficiënt overeenkomt met die van normale betonzuilen in de praktijk (ongeveer 0.6).

3.4 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestond uit 3 testseries. De eerste 2 series bestonden uit korteduurproeven van maximaal ca. 1000 golven, waarbij de eerste is uitgevoerd met een golfsteilheid van 2% en de tweede met 4%. In een serie wordt de golfhoogte stap voor stap opgehoogd totdat de bekleding bezweken is of de limiet van het golfschot bereikt is.

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

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

Na elke proef van 1000 golven tijdens serie 1 en 2 is het uitgespoelde inwasmateriaal weer aangevuld en met een trilplaat aangetrild, zodat de afzonderlijke proeven als onafhankelijk van elkaar kunnen worden beschouwd. Ook zijn de eventueel verplaatste zetstenen voor zover mogelijk terug in het verband gedrukt. Vervormingen van het taludoppervlak door migratie van het filter (S-profiel) en vervormingen die geen invloed hebben op de stabiliteit van de steenzetting zijn niet hersteld. Tijdens serie 3 (langeduurproef) is de bekleding alleen aan het begin ingewassen en aangetrild, maar is dit niet tussentijds aangevuld. Deze serie is uitgevoerd in delen om tussentijds het talud te kunnen inspecteren. Vanwege de geringe vervormingen van het taludoppervlak was het niet nodig om na Serie 1 en 2 de steenzetting te herstellen.

SERIE	PROEF	PROEF CONDITIES					INKOMEND GOLF PARAMETERS						
		h [m]	N [-]	N _N [-]	Duur [h]	Cum. Duur [h]	H _{m0,i} [m]	H _{m0,i,N} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	T _{p,i} [s]	T _{p,i,N} [s]	ξ _{p,i} [-]	ξ _{p,i,N} [-]
Serie 1	C01	4.55	482	-	0.50	-	0.69	-	4.30	4.71	-	2.37	-
	C02	4.70	1001	-	1.25	-	1.00	-	5.27	5.65	-	2.35	-
	C03	4.70	1006	-	1.36	-	1.21	-	5.76	6.19	-	2.34	-
	C04	4.70	1039	-	1.46	-	1.38	-	6.10	6.58	-	2.33	-
	C05	4.70	1416	-	1.50	-	1.58	-	6.81	7.04	-	2.33	-
Serie 2	C06	4.70	1003	-	1.04	-	1.20	-	4.20	4.39	-	1.67	-
	C07	4.70	1026	-	1.12	-	1.35	-	4.45	4.65	-	1.67	-
	C08	4.70	1026	-	1.20	-	1.52	-	4.86	4.93	-	1.66	-
Serie 3	C09	4.70	1679	2705	2.00	3.16	1.55	1.54	4.91	5.13	5.05	1.72	1.70
	C10	4.70	1125	3830	1.29	4.45	1.49	1.52	4.88	4.94	5.02	1.68	1.69

Tabel 3.2 Proevenprogramma met gerealiseerde waarden

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

In Tabel 3.2 en bijlage A zijn de gerealiseerde golfcondities (in modelwaarden) weergegeven. De golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra zijn gepresenteerd in bijlage D.

In deze tabellen zijn de volgende parameters gebruikt:

h	= Waterstand (m)
N	= Aantal golven (-)
N_N	= Cumulatief aantal golven over beschouwde proeven (-)
$H_{m0,i,N}$	= Inkomende significante golfhoogte, gemiddeld over de beschouwde proeven (m)
$T_{m-1,0}$	= Spectrale golfperiode (s)
$T_{p,i,N}$	= Golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (inkomend) (s)
$\xi_{p,l}$	= $\tan\alpha/\sqrt{(H_s/(1,56T_p^2))}$ = brekerparameter op basis van piekperiode (-)
$\xi_{p,l,N}$	= Brekerparameter gemiddeld over de beschouwde proeven (-)

Omdat er tijdens serie 1 en 2 geen schade is opgetreden, ook niet tijdens de hoogst mogelijke golfcondities in de Deltagoot, is serie 3 uitgevoerd met de hoogst mogelijke golven. Na proef C08 is het inwasmateriaal niet aangevuld en is verder ook niets hersteld aan de bekleding, waardoor deze proef als onderdeel van de langeduurproef gezien kan worden.

Proefserie 3 (bestaand uit proeven C08, C09 en C10) is in verschillende delen uitgevoerd vanwege de langere duur van de proef. De golfcondities van elke proefdeel zijn weergegeven in tabel A.1 in bijlage A. Het berekenen van de golfcondities van de samengestelde proefdelen is gedaan op basis van het gewogen gemiddelde van de energie (energie maal aantal golven):

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i m_{-1i})}{\sum_{i=1}^n (N_i m_{0i})} \quad (6)$$

$$H_{sN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2)}{\sum_{i=1}^n N_i}} \quad (7)$$

$$T_{pN} = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i H_{si}^2 T_{pi})}{H_{sN}^2 \sum_{i=1}^n N_i} \quad (8)$$

waarbij

m_n = n-te moment van het spectrum.

De genoemde waarden in Tabel 3.2 zijn op schaal 2 in de Deltagoot. De overeenkomstige belastingduur van Serie 3 is in werkelijkheid $\sqrt{2}$ langer, dus in totaal $4,45 \cdot \sqrt{2} = 6,29$ uur.

4 Schadebeschrijvingen en observaties

4.1 Algemeen

De procedure die bij elke proef gevolgd is, was steeds dezelfde. Na een proef werd eerst het water weggepompt. Vervolgens is er op het droge talud een visuele inspectie gedaan van de toestand van de bekleding en is de mate van uitspoeling van inwasmateriaal en filtermateriaal vastgesteld. Na de inspectie werd het talud gescand met de laser ten behoeve van het vaststellen van vervormingen van het oppervlak. Bij de korteduurproeven zijn de voegen tussen de stenen dan opnieuw ingewassen met inwasmateriaal en is er met een trilplaat over de steenzetting gegaan om mogelijke vervormingen (en blokhoogteverschillen) zover mogelijk te verwijderen. Bij de langeduurproeven is er tussen de proeven niet opnieuw ingewassen en zijn de vervormingen niet hersteld.



Figuur 4.1 Beproeven van C-Star zuilen in de Deltagoot (Tijdens Proef 08)

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

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

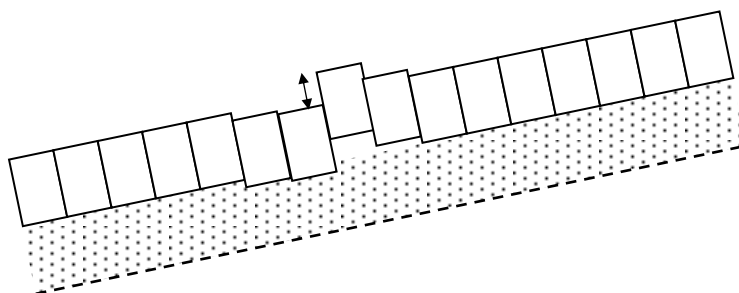


Figuur 4.2 Tijdens de golfneerloop is te zien dat er water uit de bekleding komt

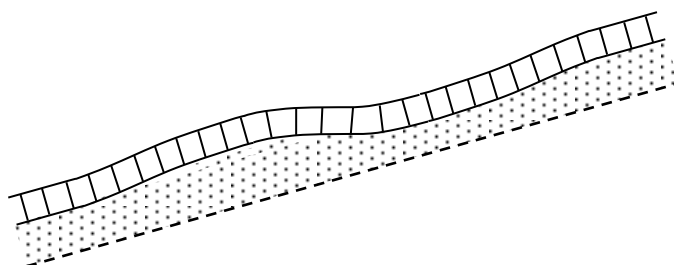
Hoewel sommige gaten tussen de zuilen ook bij lagere golfhoogtes zijn uitgespoeld was dat altijd beperkt tot 1 à 2 van de 8 gaten rond een zuil. In het algemeen was er dus nog voldoende klemming tussen de zuilen. Bij een golfhoogte van $H_s = 1,52$ m (bij de langeduur proeven met steile golven) is de uitspoeling echter sterk toegenomen en verdween het inwasmateriaal uit alle 8 gaten rondom sommige zuilen (geen klemming meer). In die gevallen is ook wat filtermateriaal van onder de steenzetting hier en daar uitgespoeld.

In het volgende worden de proefresultaten per proef bediscussieerd. In paragraaf 3.4 en bijlage A zijn de gerealiseerde waarden te vinden van de golfcondities en de gemeten

schade. Verder zijn hier de posities van alle zuilrijen weergegeven en ook alle metingen van de uitspoeling van inwas- en filtermateriaal. Voor een beeld van de uitspoeling op verschillende locaties wordt hiernaar verwezen.



Figuur 4.3 Verplaatsing van zetsteen ten opzichte van naastliggende zetsteen



Figuur 4.4 Vervorming tot S-profiel

Schadecategorieën

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

- a) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is kleiner dan 10 % van de dikte van de toplaag ($0,1 \cdot D$, met D = toplaagdikte) (zie Figuur 4.3), of als de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak, zie Figuur 4.5) is kleiner dan 20% van de toplaagdikte. In de praktijk is dan doorgaans nog geen waarneembare schade aanwezig.
- b) De verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is tussen 10% en 20% van de dikte van de toplaag, of de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is 20% à 30% van de toplaagdikte.
- c) Aan één van de volgende voorwaarden is voldaan:
 - de verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is tussen 20% en 50% van de dikte van de toplaag, of
 - de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is 30% à 50% van de toplaagdikte, of
 - er is zoveel filtermateriaal gemigreerd dat de toplaag over een lengte langs het talud van $8 \cdot D$ tot $15 \cdot D$ (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of
 - er is een zetsteen gebroken (mits de betonkwaliteit goed op schaal is).
- d) Aan één van de volgende voorwaarden is voldaan:
 - de verplaatsing van een zetsteen ten opzichte van een naastliggend zetsteen is meer dan 50% van de dikte van de toplaag, of
 - de amplitude van de vervorming (S-vormig taludoppervlak) is meer dan 50% van de toplaagdikte, of
 - er is zoveel filtermateriaal gemigreerd dat de toplaag over een lengte langs het talud van tenminste $15D$ (in het dwarsprofiel) net zoveel verzakt is als de dikte van de filterlaag, of

- er zijn meerdere zetstenen gebroken (mits de betonkwaliteit goed op schaal is). Meestal zijn dan één of meer zetstenen geheel en al uit de steenzetting verdwenen.

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

4.2 Serie 1, korteduurproeven, $s_{op}=0,02$ (Proeven C01 – C05)

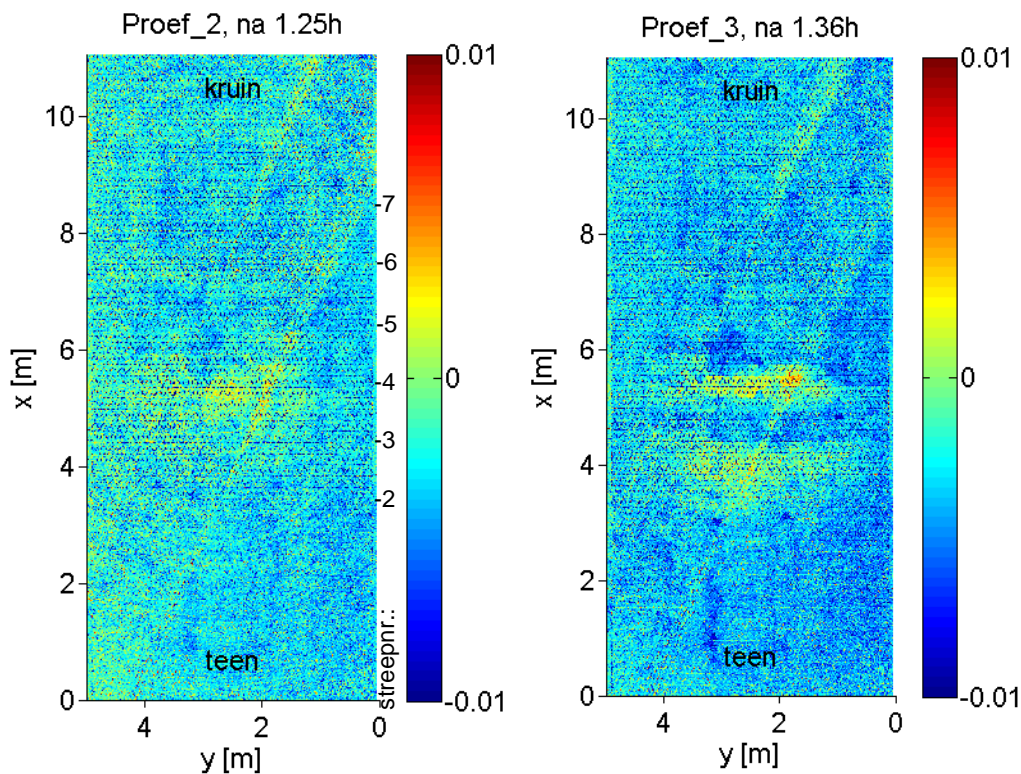
De locatie van de golfklappen van de golven is tijdens Serie 1 meestal tussen $z = 3,75$ m en $z = 4,2$ m (strepen 4 en 5,5) geconstateerd, met $z =$ hoogte boven de bodem (m).

Proef C01 (ingolven)

Tijdens deze proef is geen schade opgetreden. Hoogteverschillen tussen de zuilen waren nauwelijks te zien. Er is matige uitspoeling geconstateerd (met een maximum van 7 cm tussen $z = 3,75$ m en $z = 3,91$ m). De uitspoeling was regelmatig verdeeld over de gootbreedte. Onder $z = 3,75$ m is geen uitspoeling ontstaan (zie bijlage A voor alle uitspoelingsmetingen).

Proef C02

Na deze proef is geen schade geconstateerd. De onderlinge verplaatsing van de zuilen (zuilhoogteverschillen) was altijd minder dan 0,5cm. De uitspoeling van inwasmateriaal uit de spleten was beperkt tot een maximum van 8cm tussen $z = 3,75$ m en $z = 3,9$ m (er is wel één gat gevonden met een uitspoeling tot 16,5cm). Onder $z = 3,3$ m is geen uitspoeling opgetreden.



Figuur 4.5 Vervorming na Proef C02 en Proef C03 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C01) ($x=$ lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant van de zetting op $z = 2,0$ m; $y=$ lengte vanaf de gootwand aan de meetcabinezijde; legenda in [m])

Proef C03

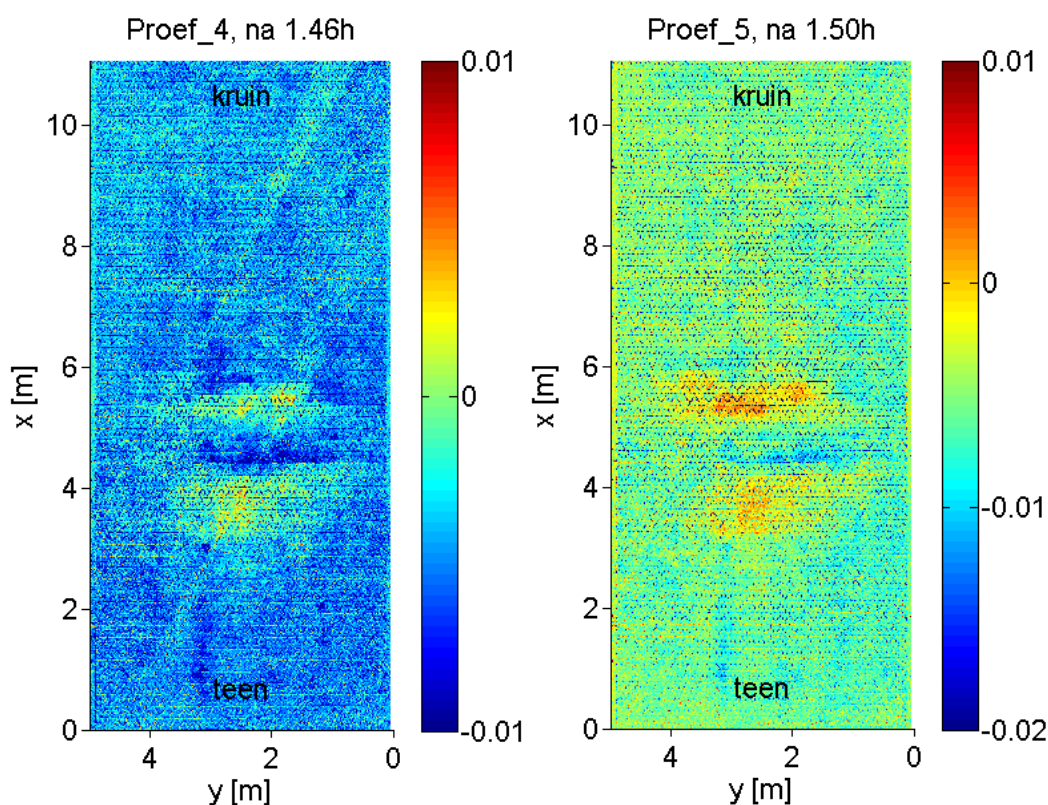
Na deze proef is geen schade geconstateerd. De onderlinge verplaatsing van de zuilen (hoogteverschillen) was overal minder dan 0,5cm. De globale vervorming van het taludoppervlak was zeer klein (amplitude van S-profiel $S=0,5\text{cm}$).

De maximaal gemeten uitspoeling was 9cm, gemeten tussen $z = 3,45\text{m}$ en $z = 3,6\text{m}$ (met uitzondering van twee gaten met 12,5cm en 15,5cm uitspoeling). Onder $z=3,3\text{m}$ is geen uitspoeling opgetreden.

Proef C04

Er is geen schade vastgesteld na de proef maar wel een beginnende zakking tussen $z = 3,4\text{m}$ en $z=3,6\text{m}$, zie Figuur 4.6 (amplitude van S-profiel $S = 0,5\text{cm}$). De eerste zuilenrij onder streep 3 ($z = 3,45\text{m}$) toont kleine hoogteverschillen tussen de zuilen van ca. 0,5cm.

De uitspoeling is vergelijkbaar met Proef C03 (met het maximum tussen $z=3,1\text{m}$ en $z=3,3\text{m}$, zie bijlage A). Hoewel er nu meerdere zuilen zijn gevonden waar één of twee gaten compleet zijn leeggespoeld, was de uitspoeling bij alle andere gaten rond de zuil duidelijk minder dan in de vorige proef. Onder $z=2,8\text{m}$ is geen uitspoeling opgetreden.



Figuur 4.6 Vervorming na Proef C04 en Proef C05 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C01)
(x = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant; y =lengte vanaf de meetcabinezijde;
legenda in [m])

Proef C05

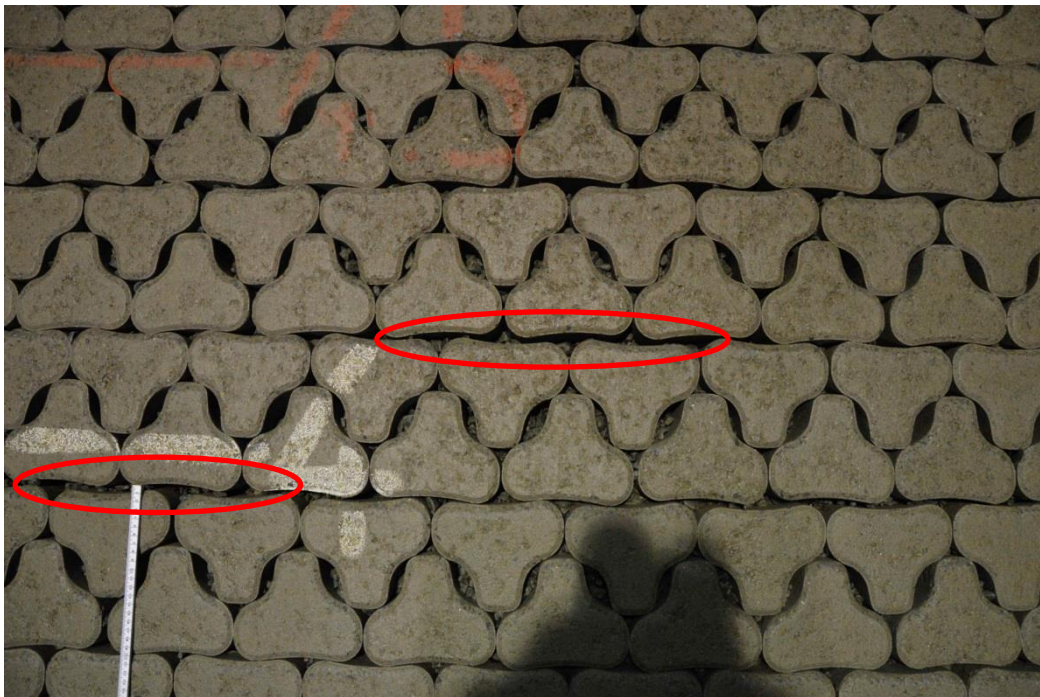
De C-Star heeft ook de laatste proef van Serie 1 goed doorstaan. Op Figuur 4.6 is te zien dat er vrijwel geen vervorming is opgetreden ($S=0,005$, schadecategorie a). De onderlinge verplaatsing van naast elkaar gelegen zuilen (zuilhoogteverschillen) is overal minder dan 0,5 cm.

Er is nauwelijks meer inwasmateriaal uitgespoeld dan tijdens de eerdere proeven (maximaal 5-7cm met uitzondering van een vijftal gaten die meer zijn uitgespoeld, zie bijlage A). Onder

$z=2,2\text{m}$ is geen uitspoeling opgetreden. Totaal gezien is de uitspoeling iets minder dan tijdens proef C04.

Het enige is dat het lijkt alsof de zetstenen in de golfklapzone een beetje ten opzichte van elkaar zijn gaan wijken. Er zijn spleten geconstateerd van maximaal 1cm breedte bij streep 4 ($z = 3,75\text{m}$), met een lengte over 6 zuilen. Aan de meetcabinezijde (rechter deel van het talud, gezien vanuit het golfschot) zijn nog 2 kleinere spleten over 2 tot 3 zuilen gevonden, zie Figuur 4.7. In de ontstane openingen tussen de zuiltjes zit nu inwasmateriaal en alles lijkt er nog muurvast in te zitten.

Na deze proef kon de golfhoogte niet verder verhoogd worden, gezien de capaciteit van de Deltagoot. De vervorming leek echter zo beperkt dat besloten is de steenzetting niet te repareren. Er is dus direct overgestapt naar Serie 2.



Figuur 4.7 Ontwikkeling van 2 spleten bij streep 4

Conclusies na Serie 1 ($s_{op} = 0,02$)

Volgens Steentoets zou deze steenzetting bezwijken bij $H_s = 1,3\text{ m}$ en $H_s/(\Delta D) = 5,5$ (als gerekend wordt met de gemiddelde soortelijke massa, Δ_{gem}). Tijdens de proeven trad geen bezwijken op (schade categorie a). De stabiliteit is dus duidelijk hoger dan de voorspelde stabiliteit volgens Steentoets voor $s_{op} = 0,02$.

Tijdens de proeven is een matige uitspoeling van inwasmateriaal geconstateerd. De klemming tussen de zuilen was altijd gewaarborgd omdat er bij elke zuil nog met inwasmateriaal gevulde gaten waren.

4.3 Serie 2, korteduurproeven, $s_{op} = 0,04$ (Proeven C06 – C08)

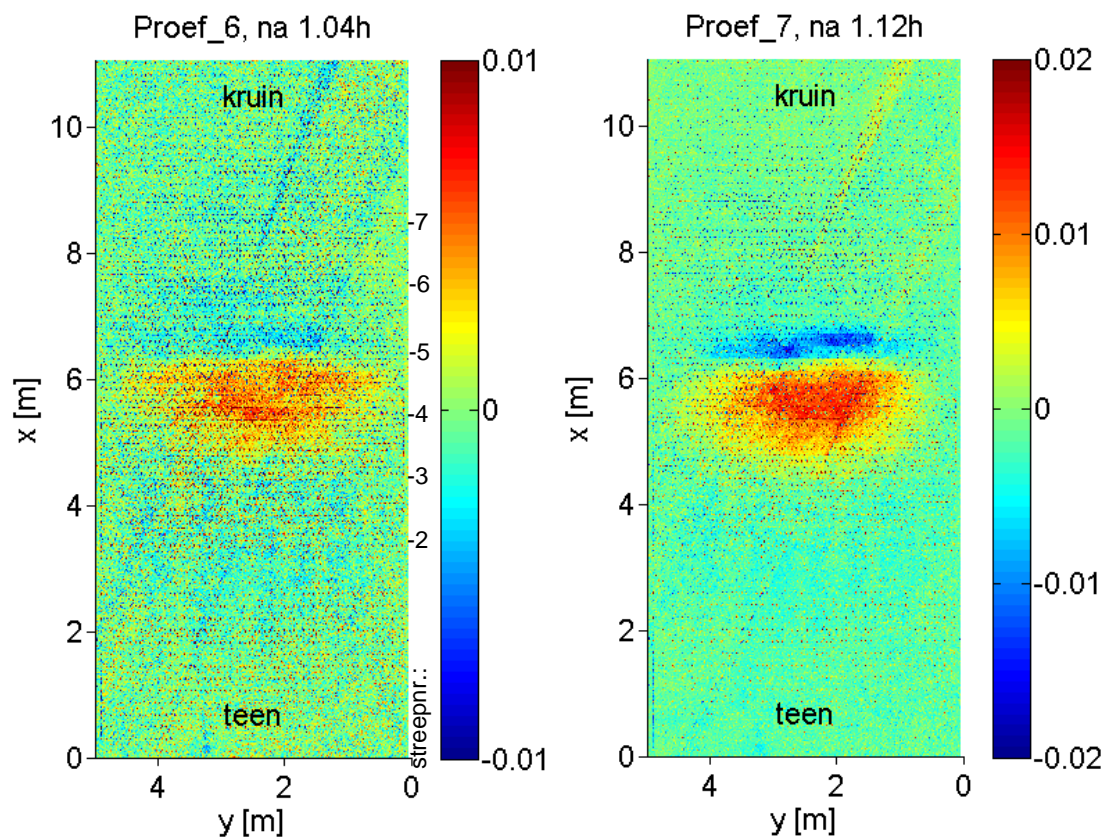
De locatie van de golfklappen tijdens Serie 2 was iets hoger (tussen strepen 5 en 6, $z = 4,0 - 4,4\text{m}$) maar strekte zich uit over een smallere zone dan tijdens Serie 1.

Proef C06

Na Proef C06 is geen toename van de vervorming vastgesteld ($S=0,005$). De hoogteverschillen tussen de zuilen waren nog steeds klein (~ 1 cm).

Er is een duidelijk sterkere uitspoeling geconstateerd, mogelijk omdat in deze proevenserie de golven een grotere golfsteilheid hadden. De uitspoeling is vooral aan de onderkant van de golfklapzone of net eronder geconstateerd (vooral tussen $z = 3,75$ m en $z = 4,1$ m met maximale uitspoeling bij streep $z = 3,97$ m). Bij vele zuilen zijn 1 of 2 gaten volledig leeggespoeld (17,5cm), maar geen enkele zuil is rondom leeggespoeld.

Het valt op dat zuilen in dit gebied vaak iets verdraaid zijn zodat een van de ovale gaten vergroot is (wat nu helemaal is uitgepoeld) terwijl het andere ovale gat verkleind is en nog vol met inwasmateriaal zat. Ondanks sterke uitspoeling was de klemming nog verzekerd en zaten alle zuilen muurvast. De uitspoeling was gelijkmatig over de gootbreedte. Onder $z=3,6$ m is geen uitspoeling opgetreden. De geconstateerde spleten in een paar rijen, die tijdens Proefserie 1 bij streep 4 zijn ontstaan, zijn onveranderd gebleven.



Figuur 4.8 Vervorming na Proef C06 en na Proef C07 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C05)
(x = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant; y =lengte vanaf de meetcabinezijde;
legenda in [m])

Proef C07

Tijdens Proef C07 is een lichte toename van de taludvervorming opgetreden (amplitude van S -profiel $S=1,8$ cm). Tussen $z = 3,6$ m en $z = 3,9$ m zijn zuilen omhoog gekomen (ca. 1,5cm), daarboven is een lichte zakking van 2cm ontstaan. Er is geen toename van de hoogteverschillen tussen de zuilen opgetreden. De geconstateerde spleten in een paar rijen, die tijdens Proefserie 1 bij streep 4 zijn ontstaan, zijn onveranderd gebleven.

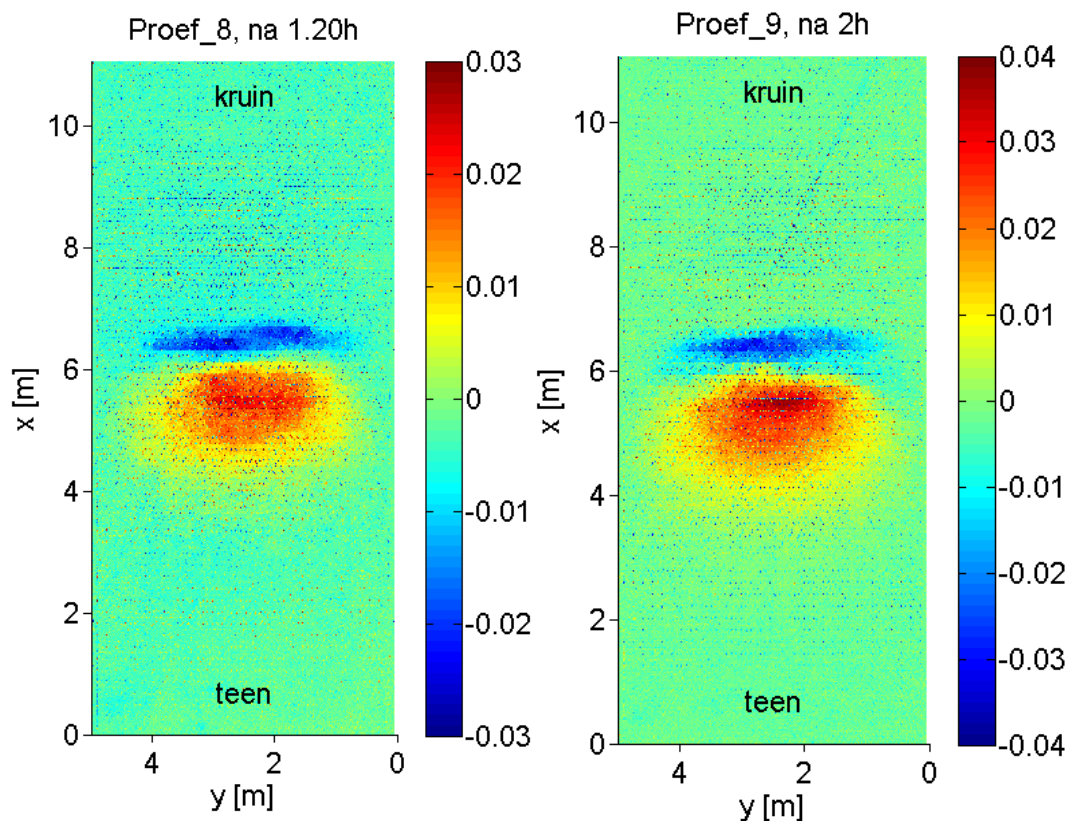
De uitspoeling is verder toegenomen. Er is ook een beetje uitspoeling van filtermateriaal vastgesteld. Plaatselijk is de maximale uitspoeling tot 18cm diepte (dus 0,5 cm onder de onderzijde van de toplaag) tussen $z = 3,75\text{m}$ tot $z = 4,1\text{m}$. Bij $z=3,95\text{m}$ zijn ook gaten van 19-20cm diepte gevonden. De klemming is echter nog steeds gewaarborgd (uitspoeling beperkt tot 1-2 gaten rond elke zuil). Onder $z = 3,45\text{m}$ is geen uitspoeling opgetreden.

Proef C08

Er is geen schade aan de steenzetting ontstaan. De vervorming van het talud ($S=0,025\text{m}$) en de maximale onderlinge verplaatsing van de zuilen ($\Delta z=0,017\text{m}$, bij streep 4,5, $z=3,91$) is iets toegenomen, zie ook Figuur 4.9, maar valt nog steeds binnen schadecategorie a. Een duidelijke opbolling is te zien tussen $z=3,4\text{m}$ en $z=3,9\text{m}$ en een zakkingsgebied tussen $z=3,9\text{m}$ en $z=4,2\text{m}$, maar het hoogteverschil is nog steeds gering.

De uitspoeling van het inwasmateriaal was ongeveer hetzelfde als bij Proef C07 (en nog steeds beperkt tot 1-2 gaten rond een zuil), zie bijlage A. Onder $z = 3,1\text{m}$ is geen uitspoeling opgetreden.

Na deze proef kon de golfhoogte niet verder verhoogd worden, gezien de capaciteit van de Deltagoot. Vanwege de beperkte vervorming is besloten direct door te gaan naar de langeduurproef, dus zonder verbouwing. De langeduurproef is uitgevoerd met dezelfde golfhoogte als Proef C08. Omdat na proef C08 het inwasmateriaal niet is aangevuld en verder ook niets is hersteld aan de bekleding, kan deze proef als onderdeel van de langeduurproef gezien worden.



Figuur 4.9 Vervorming na Proef C08 en Proef C09 ten opzichte van het referentieprofiel (referentieprofiel voor Proef C08: Proef C05; referentieprofiel voor Proef C09: Proef C07)
(x = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant; y =lengte vanaf de meetcabinezijde; legenda in [m])

Conclusies na Serie 2 ($s_{op}=0,04$)

Volgens Steentoets zou deze steenzetting bezwijken bij $H_s = 1,3$ m en $H_s/(\Delta D) = 5,5$ (als gerekend wordt met de gemiddelde soortelijke massa, Δ_{gem}). Tijdens de proeven trad geen bezwijken op (schade categorie a). De stabiliteit is dus duidelijk hoger dan de voorspelde stabiliteit volgens Steentoets voor $s_{op} = 0,04$.

Tijdens de proeven is een matige uitspoeling van inwasmateriaal geconstateerd. De klemming tussen de zuilen was echter steeds gewaarborgd.

4.4 Series 3, langeduurproef, $s_{op} = 0,04$ (Proeven C08 - C10)

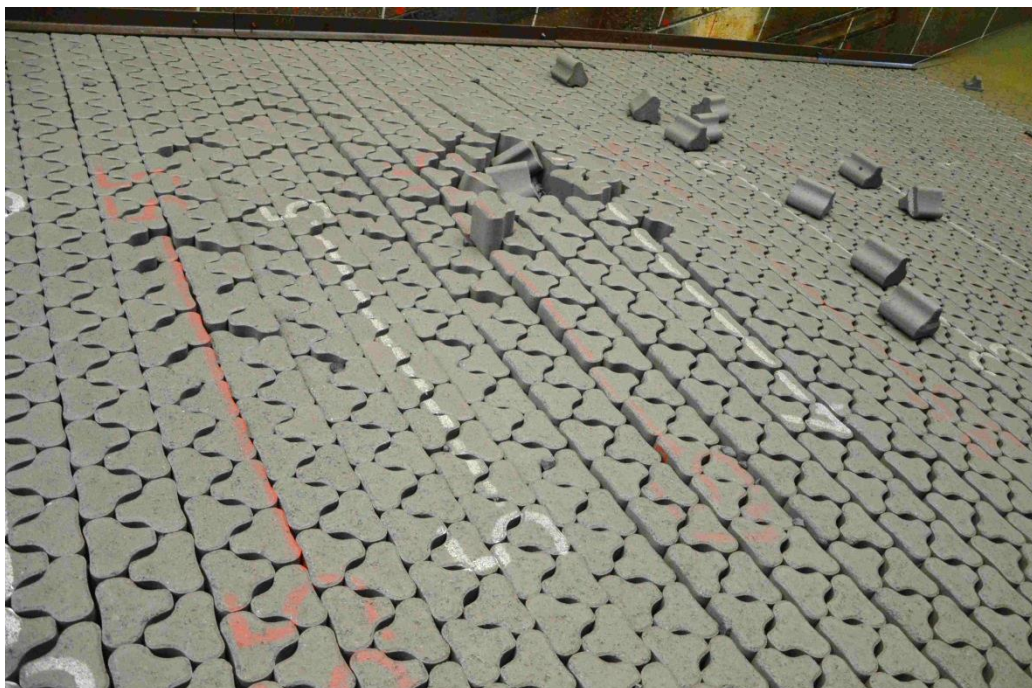
Proef C08 wordt als eerste deel van de langeduurproef beschouwd, zie paragraaf 4.3.

Proef C09

Na Proef C09 was de maximale vervorming van het tauldoppervlak in de orde van 4cm (amplitude van S-profiel $S=0,035$) en de onderlinge verplaatsing van de zuilen was maximaal rond 2,5cm (schade categorie b). Een duidelijke opbolling is te zien tussen $z=3,4$ m en $z=3,9$ m en een zakkingsgebied tussen $z=3,9$ m en $z=4,2$ m ten opzichte van de gootbodem.

De gemiddelde uitspoeling van het inwasmateriaal tussen $z=3,3$ m en $z=4,4$ m is tijdens Proef C09 verder toegenomen (met een maximum van 17-19cm, zie bijlage A). Hoewel de meeste zuilen nog klemming hadden, waren er ook enkele zuilen te zien (rond $z = 3,9$ m) waar rondom alle spleten vrijwel waren leeggespoeld. Onder $z = 3,0$ m is geen uitspoeling opgetreden.

Rond streep 4 ($z = 3,75$ m) is de spleet tussen de zuilen wat breder geworden. Tijdens de vorige proeven was dit lange tijd ca. 1 cm gebleven, maar nu is het toegenomen naar 2cm. Dit houdt verband met de opbolling ter plekke, veroorzaakt door de filtermigratie van hoger op het talud.



Figuur 4.10 Schade na Proef C10: Er is een duidelijke verzakkingsgebied tussen $z=4,2$ m en $z=3,9$ m te zien en een opengebarsten kattenrug eronder

Proef C10

Na 78min golven tijdens Proef C10 (dus 4,5 uur in totaal voor de langeduurproef) is de steenzetting bezweken. Meerdere zuilen zijn eruit gespoeld, zie Figuur 4.10 en Figuur 4.11.

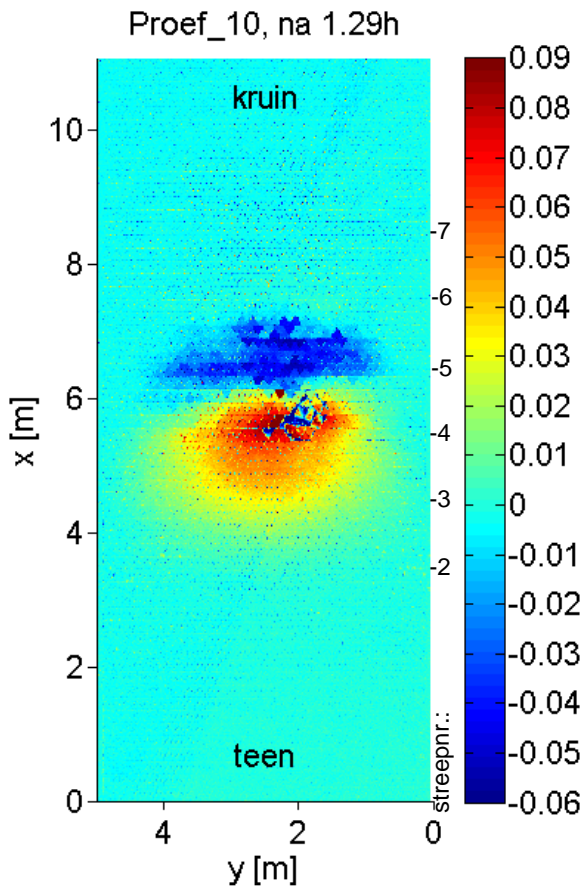
Het was duidelijk te zien dat na ca. 56 minuten golven er eerst een zakkingsgebied (en filtermigratie) net onder $z = 4,2\text{m}$ ontstond (beginnend met 3 zuilen en daarna de hele rij) gevolgd door een toenemende opbolling lager op het talud (kattenrug). Na 78min golven is de kattenrug opengebarsten. Eerst is een zuil uit het centrum van de kattenrug ($z=3,75\text{m}$) eruit gekomen, daarna binnen enkele seconden gevolgd door meerdere zuilen eromheen.



Figuur 4.11 Bezweken steenzetting (na Proef 10)

De maximaal gemeten vervorming was $S=0,075\text{m}$ (maximaal gemeten zakking: 6cm), zie ook Figuur 4.12. Bij de inspectie van het talud is geconstateerd dat boven het schadegebied, tussen $z=3,9\text{m}$ en $z= 4,2\text{m}$, het filter grotendeels was uitgespoeld (het witte filterdoek was duidelijk zichtbaar door de uitgespoelde gaten), zie ook bijlage A. Boven het schadegebied

zweefden de zuilen dus in de lucht door de nog aanwezige klemming tussen de zuilen. In het schadegebied zelf was geen klemming meer aanwezig tussen de zuilen.



Figuur 4.12 Vervorming na Proef C10 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C07)
 (x = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant; y =lengte vanaf de meetcabinezijde;
 legenda in [cm])

Conclusies na Serie 3

De C-Stars zijn bezweken na $t_{\text{cumulatief}} = 4,45$ uur golven (bij een golfhoogte van $H_{s,i,N} = 1,52$ m). Volgens Steentoets zou deze steenzetting bij een belasting van $H_s = 1,1$ m bezwijken na deze belastingduur, zie ook paragraaf 5.2.

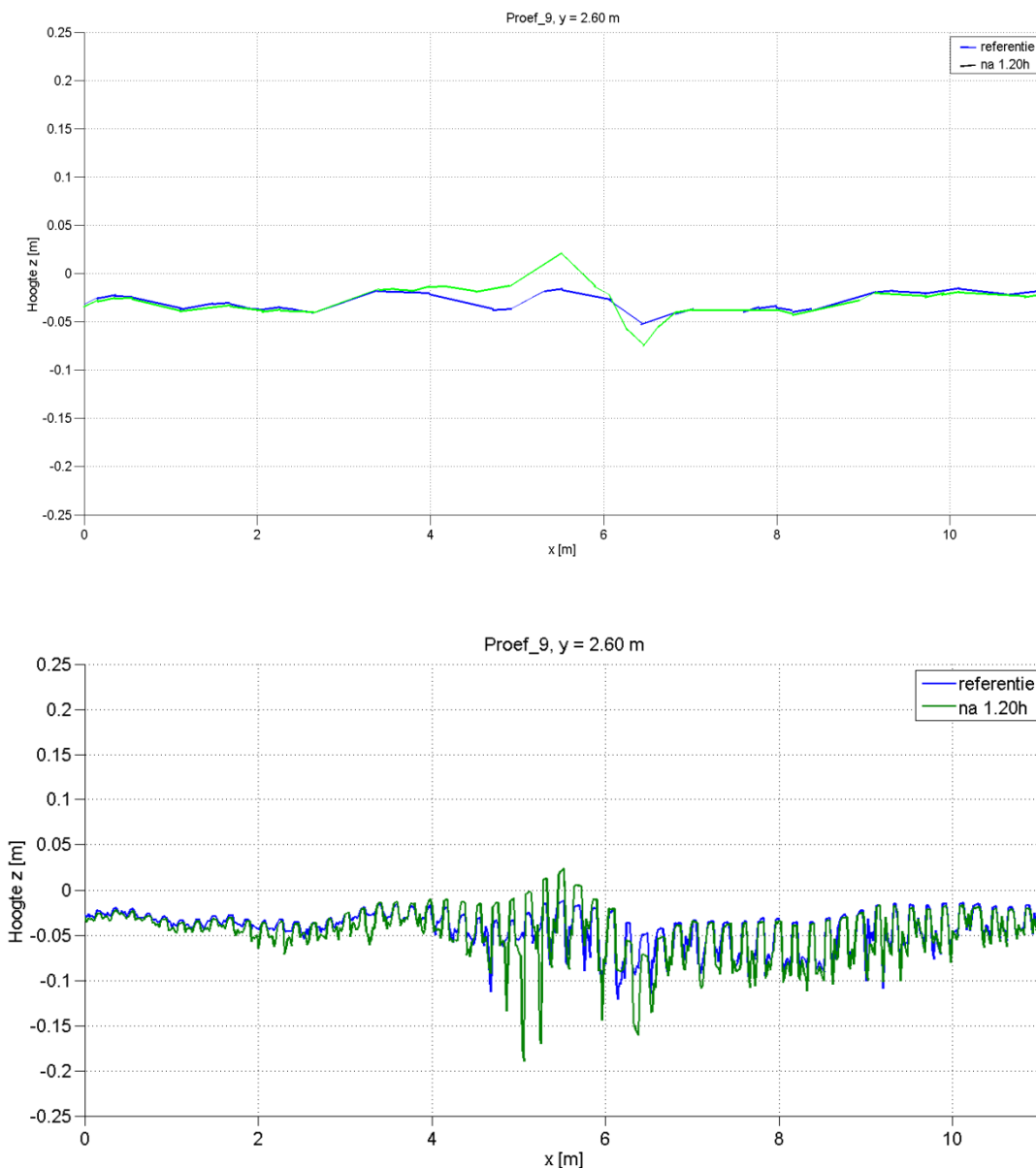
4.5 Dwarsprofielen

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

Voor een beschrijving van de schade per individuele proef (lasermeting van het oppervlak) wordt verwezen naar paragraaf 4.2. Als voorbeeld van een typische vervorming wordt hier het dwarsprofiel na proef C09 (serie 3) ten opzichte van na proef C07 (begin langeduurproef) getoond, zie Figuur 4.13.

Zoals al beschreven in paragraaf 4.4 is na Proef C09 een S-profiel met maximaal hoogteverschil tussen het diepste en hoogste punt in de meest vervormde raai van ca. 7 cm (amplitude van het S-profiel: $S = 3,5$ cm) vastgesteld tussen $z = 3,4$ m en $z = 4,2$ m met een zakkingsgebied tussen $z = 3,9$ m en $z = 4,2$ m (maximale zakking van 3,5 cm ten opzichte van het referentieprofiel).

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



Figuur 4.13 Hoogte taludoppervlak na Proef C09 ($y=2,6$ m, groene lijn) en referentie (na proef C07, blauwe lijn waarbij de taludhelling reeds van beide lijnen is afgetrokken); boven: taludoppervlak van de zetstenen, beneden: dwarsprofiel waarin ook de lokale uitspoelingen uit de spleten zijn te zien

5 Analyse van de proefresultaten

5.1 Uitspoeling van inwasmateriaal en filter

Uitspoeling van het inwasmateriaal is vastgesteld tijdens alle proefseries (Series 1-3). Uitspoeling van het filter is vooral waargenomen tijdens Serie 3, toen de erosiediepte in de gaten tussen de zetstenen meer was dan de toplaagdikte (17,5 cm). Een overzicht van alle metingen is gegeven in Appendix A.

Tijdens Serie 1 was de uitspoeling van het inwasmateriaal grotendeels beperkt gebleven tot ca. 5-7 cm (geen uitspoeling van filtermateriaal). In Serie 2 is de uitspoeling van het inwasmateriaal bij de proeven met de grootste golven toegenomen tot ca. 18cm (met enkele gaten tot 20cm) en is dus lokaal een beetje filtermateriaal uitgespoeld. In Series 3 is na 4,45 uur beproeven met $H_{m0} = 1,52$ m een groot deel van de filterlaag uitgespoeld en lokaal zelfs al het filtermateriaal (7 cm, d.w.z. een erosiediepte van $Y = \text{zuilhoogte} + \text{filterhoogte} = 0,245\text{m}$).

5.2 Stabiliteit steenzetting

De C-Star steenzetting heeft de eerste twee series met korteduurproeven goed doorstaan. Tijdens de langeduurproef (na een belastingsduur van 4,45 uur met een golfsteilheid van $s_{op} \approx 0,04$) is de steenzetting bezwaken.

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

serie	Proef nr.	s_{om} (-)	H_s (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	N_{proef} (-)	t_{proef} (uur)	ξ_{om} (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	Schade		
									verpl. (cm)	S (cm)	cate- gorie
1	C01	0.024	0.69	4.30	482	0.50	2.16	2.87	0.0	0.0	a
	C02	0.023	1.00	5.27	1001	1.25	2.19	4.21	0.0	0.0	a
	C03	0.023	1.21	5.76	1006	1.36	2.18	5.09	0.0	0.5	a
	C04	0.024	1.38	6.10	1039	1.46	2.16	5.80	0.5	0.5	a
	C05	0.022	1.58	6.81	1416	1.50	2.25	6.63	0.5	0.5	a
2	C06	0.044	1.20	4.20	1003	1.04	1.60	5.03	1.0	0.5	a
	C07	0.044	1.35	4.45	1026	1.12	1.60	5.65	1.0	1.8	a
	C08	0.041	1.52	4.86	1026	1.20	1.64	6.39	1.7	2.5	a
3	C08-C10	0.041	1.52	4.88	3830	4.45	1.65	6.40	17.5	7.5	d

Tabel 5.1 Overzicht van het proevenprogramma met de gerealiseerde golfcondities en de gemeten schade.

Serie	s_{om} [-]	N [-]	H_s [m]	T_p [s]	ξ_{om} [-]	$H_s/(\Delta D)$ [-]
1	0,022	1000	1,30	6,63	2,23	5,53
2	0,041	1000	1,29	4,86	1,64	5,47
3	0,041	3820	1,07	4,43	1,64	4,55

Tabel 5.2 Resultaten van de berekeningen met Steentoets (grens van stabiel en instabiel)

De resultaten van de proeven zijn samengevat in Tabel 5.1 (zie ook Tabel A.1, Appendix A). In de tabel is ook de waarde van de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ gegeven, die hier berekend is met de gemiddelde soortelijke massa van de zuilen. Er is gebruik gemaakt van het gemiddelde, omdat doorgaans de schade geïnitieerd is door de vervorming van een groep zuilen tot een kattenrug en niet door een individuele zuil. Daardoor is de gemiddelde soortelijke massa relevanter dan de extreme waarden. Proef C08 hoort zowel bij serie 2 als bij serie 3.

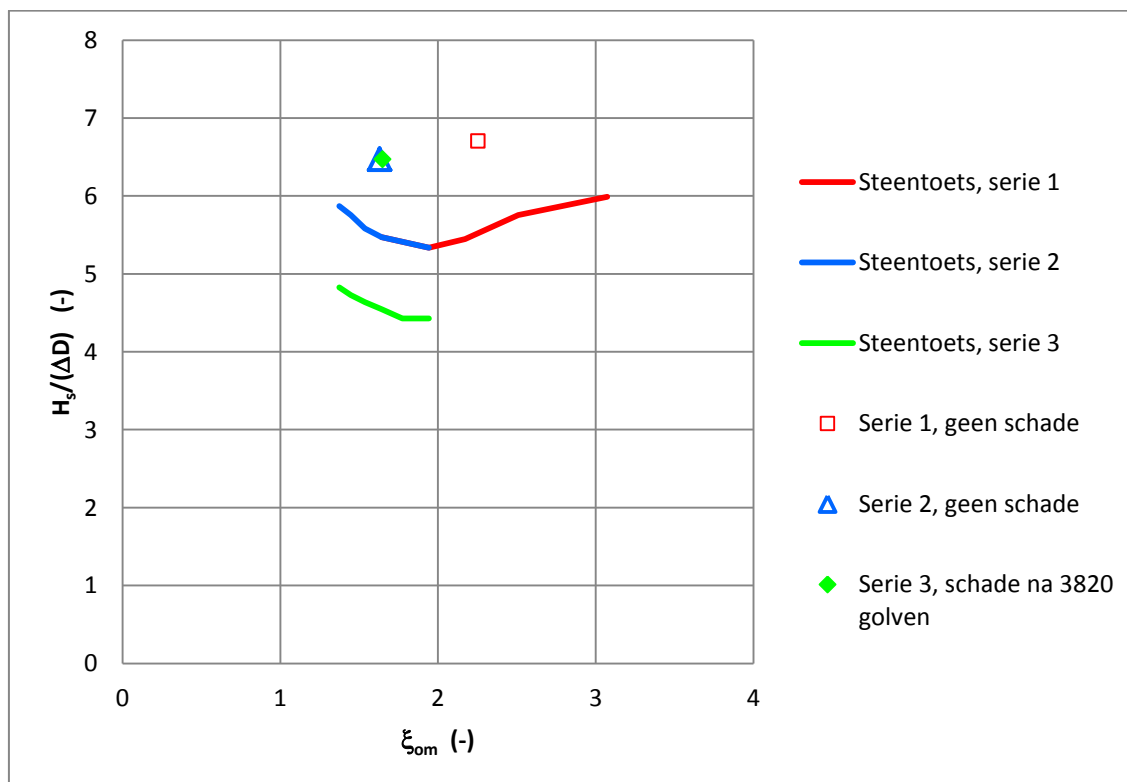
De schade in de tabel is weergegeven als het grootste aantal centimeters verplaatsing tussen naast elkaar gelegen zuilen (verpl. in cm), de amplitude van de vervorming in de vorm van een S-profiel (S in cm) en de schadecategorie.

In Tabel 5.2 is per serie de bezwijkgolfhoogte volgens Steentoets gegeven.

De belangrijkste proefresultaten zijn samen met Steentoets weergegeven in Figuur 5.1. In deze figuur staat op de horizontale as de brekerparameter op basis van de spectrale golfperiode: $\xi_{om} = \tan\alpha \cdot \sqrt{s_{om}}$ met $s_{om} = H_s / (g T_{m-1,0}^2 / (2\pi))$. Op de verticale as staat de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ op basis van de gemiddelde soortelijke massa.

Uit serie 1 en 2 is de proef gegeven met de grootste golfhoogte uit de serie en van serie 3 is de proef gegeven die uiteindelijk na 3820 golven de steenzetting deed bezwijken. De meetpunten met de open symbolen betreffen proeven waarbij de steenzetting nog niet is bezweken (schadecategorie a), terwijl voor de dichte symbolen dat wel het geval is (schadecategorie d).

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



Figuur 5.1 Belangrijkste proefresultaten en rekenresultaten met Steentoets2014

In deze figuur valt op dat de meetpunten uit serie 1 en 2, toen nog geen schade was opgetreden, ruim boven de lijnen liggen die berekend zijn met Steentoets. Bij serie 3 is het verschil tussen het Deltagootresultaat en Steentoets nog groter. Dit betekent dat de C-Star een veel hogere stabiliteit heeft dan berekend wordt met Steentoets.

5.3 Stabiliteitsfactor

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

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

- **Serie 1:**
Wanneer tijdens een korteduurproevenserie schade ontstaat, is conform de procedure uit bijlage F aangehouden dat $H_{s,bezwijk}$ gelijk is aan het gemiddelde van de golfhoogte waarbij daadwerkelijk bezwijken is opgetreden (schadecategorie c of d) en de golfhoogte van de proef met de hoogste golfhoogte in dezelfde serie waarbij nog geen bezwijken is opgetreden (schadecategorie a of b).
Tijdens serie 1 was echter geen schade ontstaan ondanks een maximale golfhoogte $H_s = 1,58$ m. Als tijdens de korteduurproeven bij de maximale golfhoogte nog geen schade is opgetreden, wordt er een fictieve proef toegevoegd met een 15% hogere golfhoogte, omdat het gebruikelijk is om in het proevenprogramma met golfhoogte-stappen van ongeveer 15% te werken. Conform de procedure wordt aangenomen dat bij die fictieve proef wél schade aan de steenzetting zou zijn opgetreden, dus bij $H_s = 1,82$ m. Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk} = (1,58+1,82)/2 = 1,70$ m.
- **Serie 2:**
Ook bij serie 2 is geen schade opgetreden bij de hoogst mogelijke golven ($H_s = 1,52$ m), waardoor ook hier een fictieve proef is toegevoegd met 15% hogere golfhoogte. Conform de procedure wordt aangenomen dat bij die fictieve proef wél schade aan de steenzetting zou zijn opgetreden, dus bij $H_s = 1,75$ m. Dat resulteert in een bezwijkgolfhoogte $H_{s,bezwijk} = (1,52+1,75)/2 = 1,64$ m.
- **Serie 3:**
Voor de langeduurproef (proef C08, C09 en C10) geldt naast de significante golfhoogte en golfperiode van de proef het aantal golven tot bezwijken als het resultaat van de

proef. De gemiddelde golfhoogte was $H_{s,bezwijk} = 1,52$ m en dat leidde na $N = 3830$ golven tot schade. Hier wordt de totale duur van proef C08, C09 en C10 opgeteld.

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

- D_{ST} eigen gewicht = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met alleen het eigen gewicht, dus zonder klemming, met stabiliteitsfactor = 1), bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m)
- $D_{Steentoets}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc., met stabiliteitsfactor = 1), bij de bezwijkgolfhoogte van de betreffende serie (m)
- $D_{in\ modelproeven}$ = de toplaagdikte die toegepast is in de Deltagoot (m), dus $D_{in\ modelproeven} = 0,175$ m

De benodigde toplaagdiktes D_{ST} eigen gewicht en $D_{Steentoets}$ volgen uit Steentoetsberekeningen. Hiervoor is gebruikgemaakt van Steentoets2014 versie v14.1.2.1 (Klein Breteler, 2014). In de berekeningen zijn de tijdens het Deltagootonderzoek geconstateerde bezwijkgolfhoogtes als uitgangspunt genomen. Voor elke proevenserie is met Steentoets (rekenend met de geconstateerde bezwijkgolfhoogte en met stabiliteitsfactor = 1) de toplaagdikte berekend die volgens Steentoets bij de geconstateerde bezwijkgolfhoogte nog net voldoende is. Voor het berekenen van $D_{Steentoets}$ is gerekend mét klemming en voor het berekenen van D_{ST} eigen gewicht is gerekend zónder klemming.

De Steentoetsberekening (met stabiliteitsfactor = 1) zijn uitgevoerd met de waarden zoals gemeten in het model, dus op schaal. Er is gerekend met de gemeten gemiddelde soortelijke massa van het beton, de gemeten karakteristieke korrelgrootte D_{f15} van het filter (D_{f15} = korrelgrootte die door 15% op basis van gewicht wordt onderschreden), de gemeten dikte van de filterlaag, de gemeten golfcondities, de gemeten taludhelling, et cetera. Voor de dikte van de steenzetting is de hoogte van de zetstenen aangehouden.

Conform de procedure wordt de stabiliteitsfactor vervolgens voor elke serie afzonderlijk bepaald met formule (9).

$$f_{stab} = \left(\frac{D_{Steentoets}}{D_{in\ modelproeven}} - \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \right) / \gamma + \frac{D_{Steentoets}}{D_{ST\ eigen\ gewicht}} \quad (9)$$

Met:

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

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

- Drie proevenseries: $\gamma = 1,1 + 1,89 \cdot \sigma$ (10)

Met:

σ = standaardafwijking in de proefresultaten (-)

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

Proevenserie	$N_{\text{langeduur}}$ [-]	$H_{s,\text{bezwijk}}$ [m]	$H_s/(\Delta D)$ [-]	$D_{\text{in modelproeven}}$ [m]	$D_{\text{Steentoets}}$ [m]	$D_{\text{ST eigen gewicht}}$ [m]
Serie 1, $s_{om} = 0,022$	n.v.t.	1,70*	7,21	0,175	0,220	0,344
Serie 2, $s_{om} = 0,041$	n.v.t.	1,64*	6,96	0,175	0,212	0,312
Serie 3, $s_{om} = 0,041$	3830	1,52	6,47	0,175	0,222	0,330

Tabel 5.3 Geschatte $H_s/(\Delta D)$ bij begin van bezwijken conform de procedure uit bijlage F, de beproefde toplaagdikte en de resultaten van berekeningen met Steentoets (* geschatte waarde, omdat geen bezwijken is opgetreden tijdens de proeven)

Proevenserie	$D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{in modelproeven}}$ [-]			$D_{\text{Steentoets}}/D_{\text{ST eigen gewicht}}$ [-]	f_{stab} [-]
	μ	σ	γ	μ	
Serie 1, $s_{om} = 0,022$	1,257			0,640	1,16
Serie 2, $s_{om} = 0,041$	1,211			0,679	1,13
Serie 3, $s_{om} = 0,041$	1,269			0,673	1,18
Serie 1 t/m 3	1,25	0,03	1,16		1,17

Tabel 5.4 Berekende stabiliteitsfactor, veiligheidsfactor en enkele tussenresultaten (* de standaardafwijking is kleiner dan 0,05, en daarom is de minimumwaarde aangehouden).

Conform de met Rijkswaterstaat afgesproken procedure (zie bijlage F) resulteren de Deltagootproeven in de volgende stabiliteitsfactor voor C-Star: $f_{\text{stab}} = 1,17$.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met C-Star van 35 cm hoog (op schaal 1:2, dus 17,5 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 17 cm tot 70 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

6 Conclusies

Om de stabiliteit van een steenzetting van C-Stars onder golfaanval te onderzoeken is er een ruim 8 m hoge dijk met een talud van 1:3 opgebouwd in de Deltagoot in de Noordoostpolder en voorzien van een bekleding met de volgende eigenschappen:

- Type steenzetting: C-Star (volledig op schaal 1:2)
- Dikte toplaag: $D = 0,175$ m
- Open oppervlak in de toplaag: gemiddeld 10,3%
- Soortelijke massa: $\rho_{C-Star} = 2346$ kg/m³ (gemiddeld)
- Dikte filter: $b = 0,070$ à $0,077$ m met gemiddelde waarde: $0,073$ m
- Karakteristieke korrelgrootte filter: $D_{15} = 11$ mm.
- Karakteristieke korrelgrootte van het inwasmateriaal: $D_{15} = 8$ mm

Deze steenzetting is getest door middel van 2 series korteduurproeven met oplopende golfhoogten en gelijkblijvende golfsteilheid (s_{op}) en een serie langeduurproeven met constante golfhoogte en -periode.

De resultaten van de proeven zijn samengevat in Tabel 5.1 in paragraaf 5.2 en Tabel A.1 in Appendix A.

De eerste twee series met gelijkblijvende golfsteilheid heeft de steenzetting goed doorstaan (geen schade). Tijdens de langeduurproeven (Serie 3) met golfsteilheid van $s_{op} \approx 0,04$ en golfhoogte van $H_s = 1,52$ m is de steenzetting bezweken bij een belastingsduur van 4,45 uur.

Deze proeven zijn ook nagerekend met Steentoets. Dit heeft voor de drie series een bezwijkgolfhoogte opgeleverd van 1,3 m. Hieruit blijkt dat de steenzetting beter gepresteerd heeft dan voorspeld wordt met Steentoets.

Op basis van de proefresultaten is de stabiliteitsfactor bepaald (zie paragraaf 5.3). Hoe beter de steenzetting presteert, hoe hoger deze factor is. De resultaten leiden tot de volgende waarde van de stabiliteitsfactor: $f_{stab} = 1,17$ (in combinatie met Steentoets2014 versie v14.1.2.1, Klein Breteler, 2014). Deze factor is opgenomen in Steentoets2015.

Hoewel de proeven zijn uitgevoerd met C-Star van 35 cm hoog (op schaal 1:2, dus 17,5 cm hoog in de Deltagoot) is de afgeleide stabiliteitsfactor toepasbaar in een brede range van zuilhoogtes, namelijk van 17 cm tot 70 cm hoog. Daarbij geldt als voorwaarde dat de vorm van de zetstenen niet wezenlijk mag worden aangepast bij het wijzigen van de zuilhoogte. Het toepassingsgebied strekt zich daardoor, afhankelijk van de omstandigheden, uit tot een significante golfhoogte van maximaal ca. 4,5 m.

Literatuur

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

Klein Breteler, M., 2014, *Documentatie Steentoets2014, Excel-programma voor het berekenen van de stabiliteit van steenzettingen*, rapport 1208045-009-HYE-0008, versie 4.1.1, Deltares, juli 2014

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

A Tabellen

SERIES	PROEF PROEF CONDITIES				INKOMEND GOLF PARAMETERS										GEMETEN VERVORMING							
	h [m]	N [-]	N _k [-]	Duur [h]	Cum. Duur [h]	H _{m0,i} [m]	H _{m0,iN} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	T _{p,i} [s]	T _{p,iN} [s]	ξ _{p,i} [-]	ξ _{p,iN} [-]	H _s /AD [-]	H _{s,N} /AD [-]	F [-]	F _N [-]	R _{M+F} [-]	Max. Δz [m]	% toplaag [-]	Max. S [m]	% toplaag [-]	Type
Serie 1	C01	4.55	482	-	0.50	-	0.69	4.30	4.71	2.37	-	2.87	2.87	5.11	-	0.45	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	a
	C02	4.70	1001	-	1.25	-	1.00	5.27	5.65	2.35	-	4.21	4.21	7.44	-	0.48	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	a
	C03	4.70	1006	-	1.36	-	1.21	5.76	6.19	2.34	-	5.09	5.09	8.97	-	0.48	0.000	0.00	0.005	0.03	0.03	a
	C04	4.70	1039	-	1.46	-	1.38	6.10	6.58	2.33	-	5.80	5.80	10.20	-	0.48	0.005	0.03	0.005	0.03	0.03	a
	C05	4.70	1416	-	1.50	-	1.58	6.81	7.04	2.33	-	6.63	6.63	11.66	-	0.58	0.005	0.03	0.005	0.03	0.03	a
Serie 2	C06	4.70	1003	-	1.04	-	1.20	4.20	4.39	1.67	-	5.03	5.03	7.07	-	0.27	0.010	0.06	0.005	0.03	0.03	a
	C07	4.70	1026	-	1.12	-	1.35	4.45	4.65	1.67	-	5.65	5.65	7.95	-	0.27	0.010	0.06	0.018	0.10	0.10	a
	C08	4.70	1026	-	1.20	-	1.52	4.86	4.93	1.66	-	6.39	6.39	8.98	-	0.29	0.017	0.10	0.025	0.14	0.14	a
Serie 3	C09	4.70	1679	2705	2.00	3.16	1.55	4.91	5.13	5.05	1.72	1.70	6.49	6.45	9.30	9.18	0.30	0.025	0.14	0.035	0.20	b
	C10	4.70	1125	3630	1.29	4.45	1.49	4.88	4.94	5.02	1.68	1.69	6.26	6.40	8.85	9.09	0.30	0.175	1.00	0.075	0.43	d

Tabel A.1

h: Waterstand

N: Aantal golven

N_k: Aantal golven, gemiddeld over beschouwde proevenH_{m0,iN}: Inkomende significante golfhogte, gemiddeld over de beschouwde proevenT_{p,iN}: Golfperiode bij de piek van het spectrum, gemiddeld over de beschouwde proeven (Inkomend)ξ_{p,iN}: Brekingsparameter gemiddeld over de beschouwde proevenF: stabiliteitsparameter (H_s/A_{max}D)^{2/3}R_{M+F}: Reflectiecoëfficiënt volgens MANSARD & FUNKE

D: Dikte van de toplaag

Max. Δz: maximale verplaatsing van een zelsteen l.o.v. de naastliggende zelsteen

Max. S: maximale amplitude van de vervorming

Streep	z	y = 4m	y = 3m	y = 2m	y = 1m
7,5	4.86	7.0	7.0	7.3	7.2
6	4.39	7.3	7.3	7.0	7.5
5	4.07	7.0	7.1	7.5	7.3
4	3.75	7.0	7.0	7.2	7.3
3	3.43	7.6	7.6	7.2	7.7
1	2.80	7.2	7.0	7.3	7.5
Gemiddeld		7.3			

Tabel A.2 Gemeten filterdiktes in [cm]

Proef	Wrijvingshoek ϕ [°]	Wrijvingscoëf. f [-]
1	30.81	0.60
2	32.46	0.64
3	28.91	0.55
4	30.86	0.60
5	30.33	0.59
6	32.17	0.63
7	31.92	0.62
8	30.57	0.59
9	33.24	0.66
10	33.79	0.67
11	36.05	0.73
12	33.39	0.66
13	31.68	0.62
14	32.12	0.63
15	29.43	0.56
16	27.65	0.52
17	30.57	0.59
18	33.34	0.66
19	31.34	0.61
20	28.82	0.55
21	34.09	0.68
22	27.60	0.52
23	28.16	0.54
24	30.29	0.58
Gemiddeld	31.23	0.61

Tabel A.3 Wrijvingscoëfficiënten (nat)

Streep	Z	X	Y (m vanaf meetcabinezijde)																	
			4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5
9.5	5.510	11.1	gemiddeld 3.0																	
9	5.344	10.6	gemiddeld 2.5																	
8.5	5.187	10.1	gemiddeld 3.5																	
8	5.032	9.6	3	3	3	3	3	3	3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3.5	3.5	3.5	3.5	4
7.5	4.869	9.1	3	3	3	2.5	2.5	2.5	2.5	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
7	4.699	8.6	3.5	3	2.5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5
6.5	4.536	8.1	4	4	4	3.5	3.5	3	3	3	3	3	2	2	2	2	4	4	4	4
6	4.388	7.6	4.5	3.5	4.5	3.5	4	4.5	3	2.5	3.5	2.5	3	3.5	3.5	4	4	4	4.5	4.5
5.5	4.223	7.1	5	3.5	4	3	2.5	2.5	2	1	1	2.5	2.5	3	2.5	3.5	3.5	4	4.5	5.5
5	4.063	6.6	6	4.5	5.5	5	5	4.5	5	3.5	5	5	4.5	4	3.5	3.5	4.5	5	5.5	6
4.5	3.910	6.1	5.5	5.5	6.5	6.5	6.5	5	3.5	5.5	5.5	5	4.5	6	3	5.5	6.5	5.5	7	8
4	3.751	5.6	7.5	16.5	7	6.5	6.5	5	4.5	4	5.5	2.5	3.5	3.5	3	4.5	4.5	5	5.5	6.5
3.5	3.597	5.1	5.5	5.5	2.5	3.5	4	3.5	2	2.5	2.5	2	3.5	2.5	2.5	3	3	3.5	3.5	6
3	3.445	4.6	5	5.5	2	3	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	2.5	2	3
2.5	3.288	4.1	4.5	2	2	2	2	2.5	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2.5	4
2	3.137	3.6	VOL MET INWASMATERIAAL																	
1.5	2.972	3.1																		
1	2.803	2.6																		
0.5	2.651	2.1																		
0	2.497	1.6																		
-0.5	2.342	1.1																		
-1	2.187	0.6																		

Tabel A.4.1 Uitspoeling (Proef 2, in cm)

Streep	Z	X	Y (m vanaf meetcabinezijde)																		
			4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
9.5	5.510	11.1	gemiddeld 3.0																		
9	5.344	10.6	gemiddeld 2.5																		
8.5	5.187	10.1	gemiddeld 2.5																		
8	5.032	9.6	gemiddeld 3.0																		
7.5	4.869	9.1	gemiddeld 3.0																		
7	4.699	8.6	gemiddeld 2.5																		
6.5	4.536	8.1	gemiddeld 2.5																		
6	4.388	7.6	gemiddeld 3.0																		
5.5	4.223	7.1	gemiddeld 4.0																		
5	4.063	6.6	gemiddeld 2.0																		
4.5	3.910	6.1	gemiddeld 3.0																		
4	3.751	5.6	gemiddeld 5.0																		
3.5	3.597	5.1	6	9	7	5.5	6	7	4	12.5	4.5	3	2.5	2	1.5	2	2.5	3	3	4.5	2.5
3	3.445	4.6	8.5	6	6	5.5	4.5	5.5	6	6	5	4	4	3.5	1.5	0	1	1	3	5.5	4
2.5	3.288	4.1	3.5	5	5	5	4	5	4.5	6.5	2.5	2	5	5	2	3.5	3.5	2.5	4	3.5	4.5
2	3.137	3.6	VOL MET INWASMATERIAAL																		
1.5	2.972	3.1																			
1	2.803	2.6																			
0.5	2.651	2.1																			
0	2.497	1.6																			
-0.5	2.342	1.1																			
-1	2.187	0.6																			

Tabel A.4.2 Uitspoeling (Proef 3, in cm)

Streep	Z	X	Y (m vanaf meetcabinezijde)																		
			4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25
9.5	5.510	11.1	gemiddeld 3.0																		
9	5.344	10.6	gemiddeld 2.5																		
8.5	5.187	10.1	gemiddeld 3.0																		
8	5.032	9.6	gemiddeld 2.5																		
7.5	4.869	9.1	gemiddeld 2.5																		
7	4.699	8.6	gemiddeld 2.5																		
6.5	4.536	8.1	gemiddeld 2.5																		
6	4.388	7.6	5	5	5.5	4	6	4.5	3	3	3	3	3.5	2.5	2	2	3	4	4.5	5	
5.5	4.223	7.1	6	4.5	3.5	3	3	2.5	2.5	2.5	3	3	2	1	1	3.5	1	2	3	4	5.5
5	4.063	6.6	5	3.5	3	4	4.5	3	2.5	3	2.5	2	1	1	1	2	2	2.5	4.5	4.5	
4.5	3.910	6.1	6.5	5	5	5.5	3	3	2	2	1	2	2	2	3	3.5	3	3.5	5	4	4.5
4	3.751	5.6	7.5	5.5	4.5	4	2	3	1.5	2	1	1	1	2	3.5	4	3	2.5	3.5	5	5
3.5	3.597	5.1	6	4.5	5	4	4	3.5	3	3	0.5	0	1	1	1	3	3	3.5	4	5.5	5
3	3.445	4.6	9	6	7	4	4	4	6	3	1	0	1	0	1	3.5	5	5	3.5	4.5	5
2.5	3.288	4.1	7	15.5	6	4.5	4	4	3.5	4	3	6.5	4.5	6.5	5	5	7	7.5	5.5	13	5
2	3.137	3.6	7	9.5	4	4	2	1.5	1.5	1	0	0	2	2.5	1.5	1	1	2	3.5	3	16.5
1.5	2.972	3.1	6.5	7.5	6.5	3	3	2.5	1	0.5	0	1	0.5	1	1	2	2.5	2	3	3	3
1	2.803	2.6	3.5	3	4.5	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	1	1.5	1.5	3
0.5	2.651	2.1	VOL MET INWASMATERIAAL																		
0	2.497	1.6																			
-0.5	2.342	1.1																			
-1	2.187	0.6																			

Tabel A.4.3 Uitspoeling (Proef 4, in cm)

Streep	Z	X	Y (m vanaf meetcabinezijde)																			
			4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	
9.5	5.510	11.1	gemiddeld 2.5																			
9	5.344	10.6	gemiddeld 2.5																			
8.5	5.187	10.1	gemiddeld 2.5																			
8	5.032	9.6	gemiddeld 2.5																			
7.5	4.869	9.1	gemiddeld 3.0																			
7	4.699	8.6	gemiddeld 3.0																			
6.5	4.536	8.1	gemiddeld 3.0																			
6	4.388	7.6	gemiddeld 3.5																			
5.5	4.223	7.1	gemiddeld 3.5																			
5	4.063	6.6	gemiddeld 2.0																			
4.5	3.910	6.1	gemiddeld 4.0																			
4	3.751	5.6	4	11.5	4	4	3.5	4	5	6	5.5	4.5	4	5	3.5	4.5	6.5	3.5	4.5	5	4.5	
3.5	3.597	5.1	6	3.5	6	4	5	5	5	5	3.5	3.5	5	4.5	4	4.5	3	3.5	4	4.5	12.5	
3	3.445	4.6	4	3	3	3	4	4.5	3.5	2.5	3	3.5	3.5	5	4.5	3.5	3.5	4	4	4	4.5	
2.5	3.288	4.1	2	2	2	1.5	1.5	2	2	3.5	2.5	2.5	5.5	3.5	2.5	2	2	3	3	3	6	
2	3.137	3.6	4.5	1.5	1.5	1.5	2	2	3	1.5	3	1	1	2	4	2.5	1	2	2	3.5	15.5	
1.5	2.972	3.1	1.5	0.5	1.5	1	1.5	1.5	1	0.5	1	1	0.5	1	1	2	1	1	2	2	2	
1	2.803	2.6	1	0.5	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	2	2	1.5	1	1	1	1	2.5	
0.5	2.651	2.1	4.5	2.5	4	3	4	3.5	3.5	3	3	2.5	3	3	3	3	3	3	4	2.5	1.5	
0	2.497	1.6	3	2	3	1	2	1.5	2	1.5	2.5	2	2	1	2	3	2.5	3	2.5	2.5	2.5	
-0.5	2.342	1.1	gemiddeld 1.0																			
-1	2.187	0.6	VOL MET INWASMATERIAAL																			

Tabel A.4.4 Uitspoeling (Proef 5, in cm)

Streep	Z	X	Y (m vanaf meetcabinezijde)																			
			4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	
9.5	5.510	11.1	gemiddeld 3.0																			
9	5.344	10.6	gemiddeld 3.0																			
8.5	5.187	10.1	gemiddeld 3.0																			
8	5.032	9.6	gemiddeld 3.5																			
7.5	4.869	9.1	gemiddeld 4.0																			
7	4.699	8.6	gemiddeld 5.0																			
6.5	4.536	8.1	gemiddeld 5.0																			
6	4.388	7.6	gemiddeld 6.0																			
5.5	4.223	7.1	16.5	6.5	6.5	5	5	6	5	5	4.5	6.5	6	5	4	15	6	5	5.5	5	5	
5	4.063	6.6	13.5	17	7	17	17	8	7.5	6	7	17.5	8	6	7	14	9	6	6	7.5	8.5	
4.5	3.910	6.1	17	17.5	17.5	13.5	18.5	6	5.5	14.5	17.5	13.5	4	17.5	17.5	18	17	17	17	18.5	10	
4	3.751	5.6	15.5	17	5	6	3	3.5	11	3	2	2.5	2	2	2	12	3.5	2.5	4	13.5	4	
3.5	3.597	5.1	2	3.5	2	2												1	1.5	2.5	3	
3	3.445	4.6	VOL MET INWASMATERIAAL																			
2.5	3.288	4.1																				
2	3.137	3.6																				
1.5	2.972	3.1																				
1	2.803	2.6																				
0.5	2.651	2.1																				
0	2.497	1.6																				
-0.5	2.342	1.1																				
-1	2.187	0.6																				

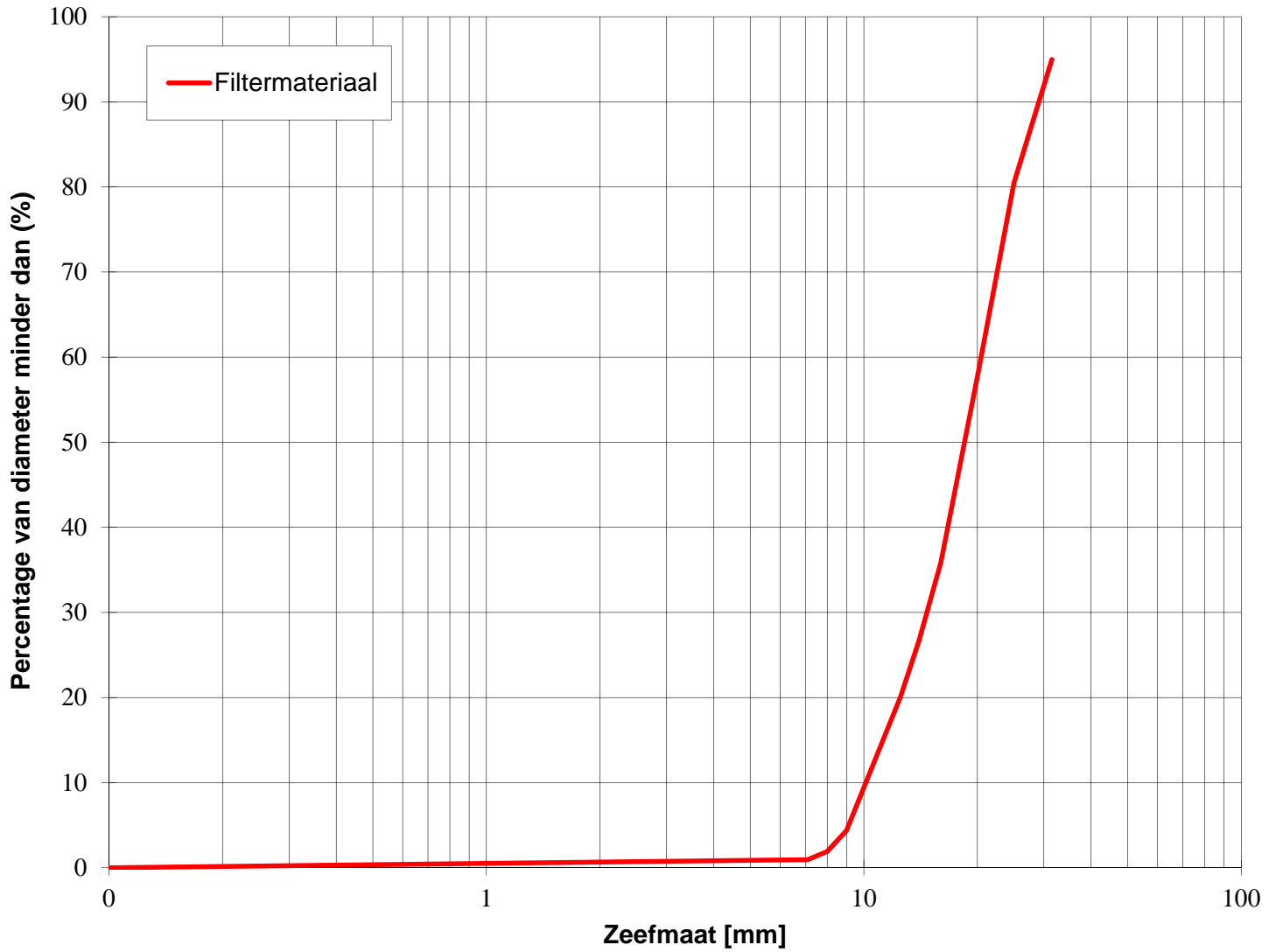
Tabel A.4.5 Uitspoeling (Proef 6, in cm)

Streep	Z	X	Y (m vanaf meetcabinezijde)																			
			4.75	4.5	4.25	4	3.75	3.5	3.25	3	2.75	2.5	2.25	2	1.75	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.25	
9.5	5.510	11.1	gemiddeld 3.0																			
9	5.344	10.6	gemiddeld 3.0																			
8.5	5.187	10.1	gemiddeld 3.5																			
8	5.032	9.6	gemiddeld 4.0																			
7.5	4.869	9.1	gemiddeld 4.5																			
7	4.699	8.6	gemiddeld 4.5																			
6.5	4.536	8.1	gemiddeld 5																			
6	4.388	7.6	6	8	6.5	7	7	7.5	7.5	6	4.5	4.5	4.5	4.5	6	6	5.5	5	6.5	5.5	6.5	
5.5	4.223	7.1	17	18	7.5	7	6.5	5	6	6	5.5	5	4.5	6	6	7	6.5	6	6	7	7	
5	4.063	6.6	13.5	18.5	9	7.5	14	18	16.5	4.5	18	15.5	4	6	15	15.5	5	4.5	7.5	7	5	
4.5	3.910	6.1	17.5	18	18	18	17	18	14.5	18	7	16	16	17.5	17	17	15.5	18.5	18	18	8.5	
4	3.751	5.6	17.5	17	17	5.5	16.5	6.5	9.5	15.5	8.5	5	10.5	6.5	6.5	8.5	17	6	7.5	15.5	16	
3.5	3.597	5.1	7.5	7	7	3	2	2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	3	3	16.5	3	
3	3.445	4.6	5	6	5	2	5.5	8	5	1	1	3.5	1.5	3	13	1	1	1	1.5	5	3	
2.5	3.288	4.1	VOL MET INWASMATERIAAL																			
2	3.137	3.6																				
1.5	2.972	3.1																				
1	2.803	2.6																				
0.5	2.651	2.1																				
0	2.497	1.6																				
-0.5	2.342	1.1																				
-1	2.187	0.6																				

Tabel A.4.6 Uitspoeling (Proef 7, in cm)

B Zeefkrommes

Korrelverdeling volgens NEN5104



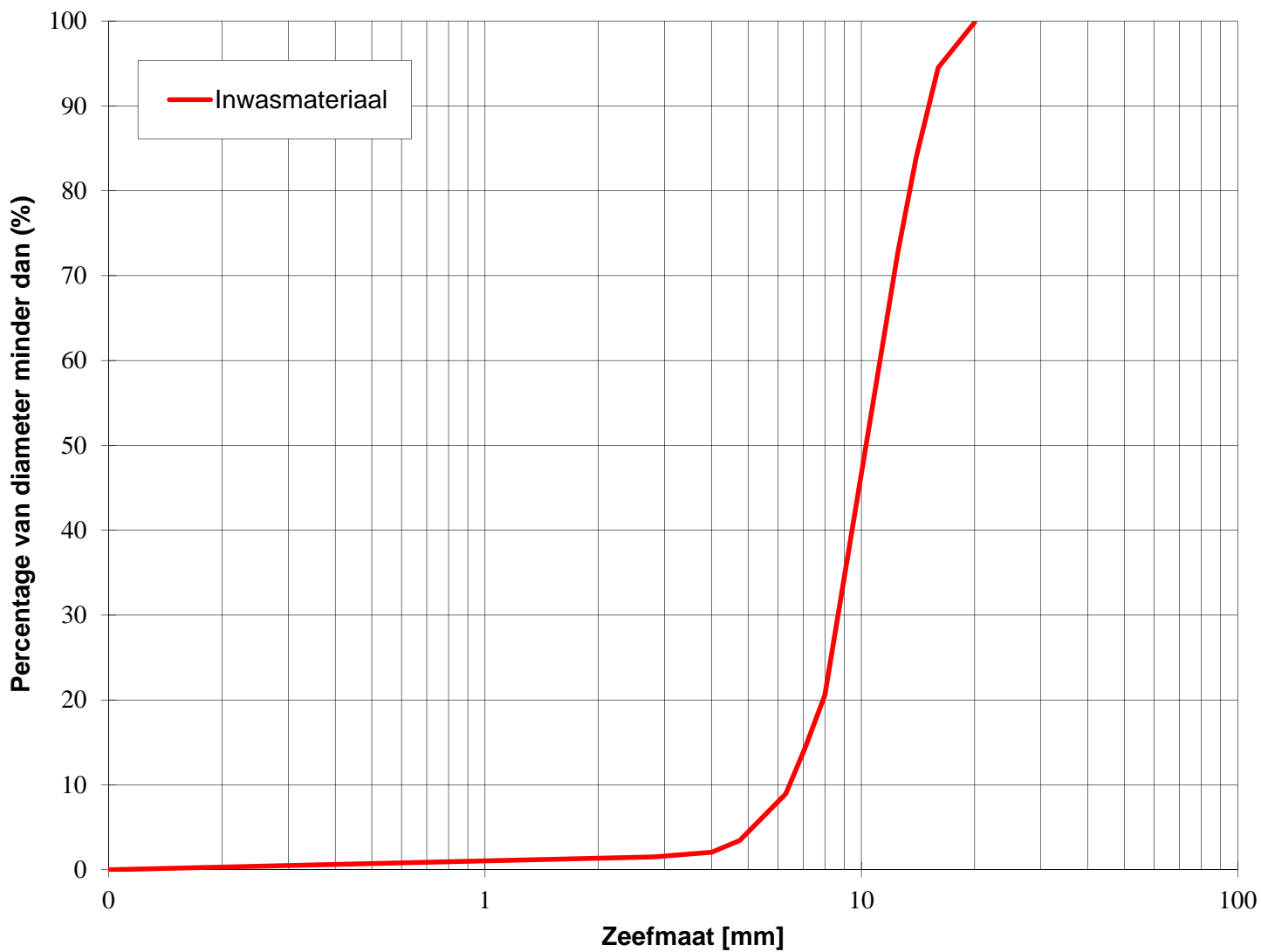
Zeefkromme filtermateriaal (C-Star)

Deltares

1208618

Fig. B.1

Korrelverdeling volgens NEN5104



Zeefkromme inwasmateriaal (C-Star)

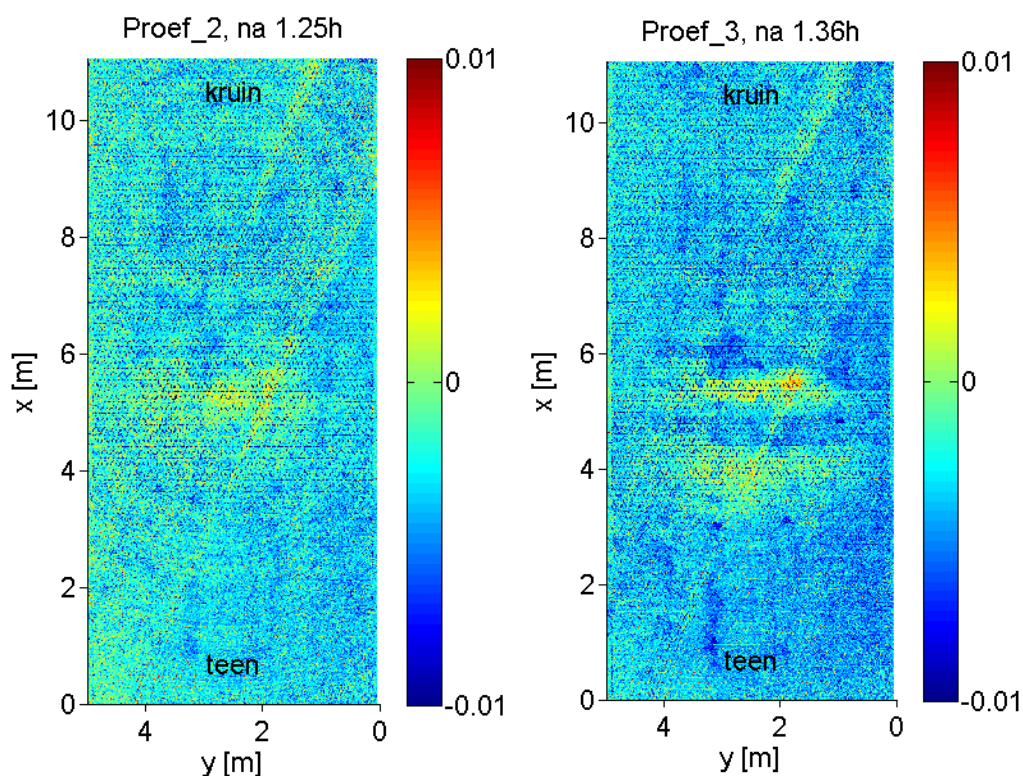
Deltares

1208618

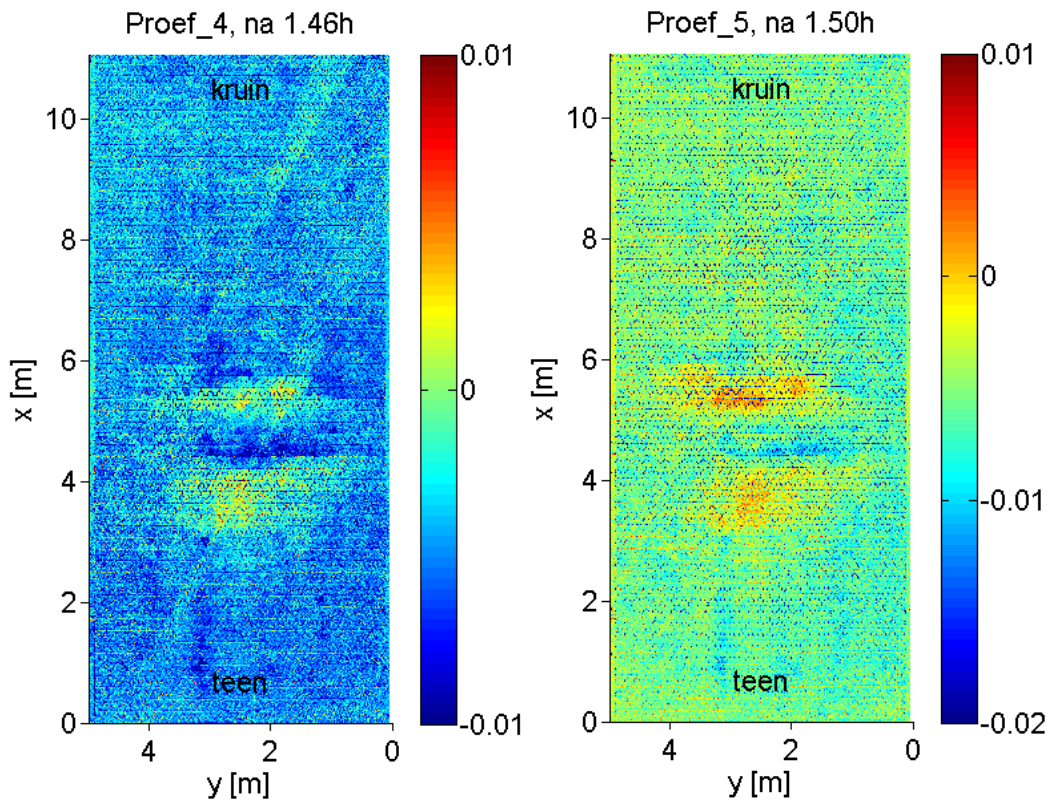
Fig. B.2

C Lasermetingen en dwarsprofielen

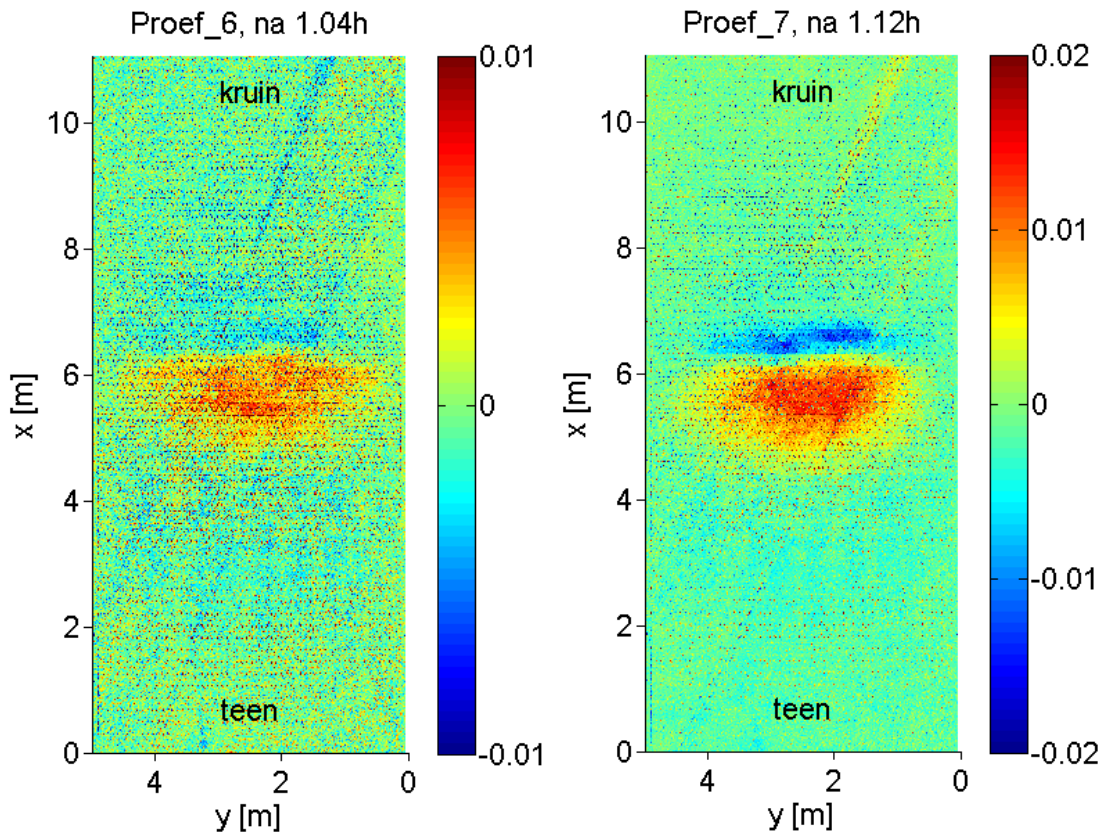
C.1 Lasermetingen



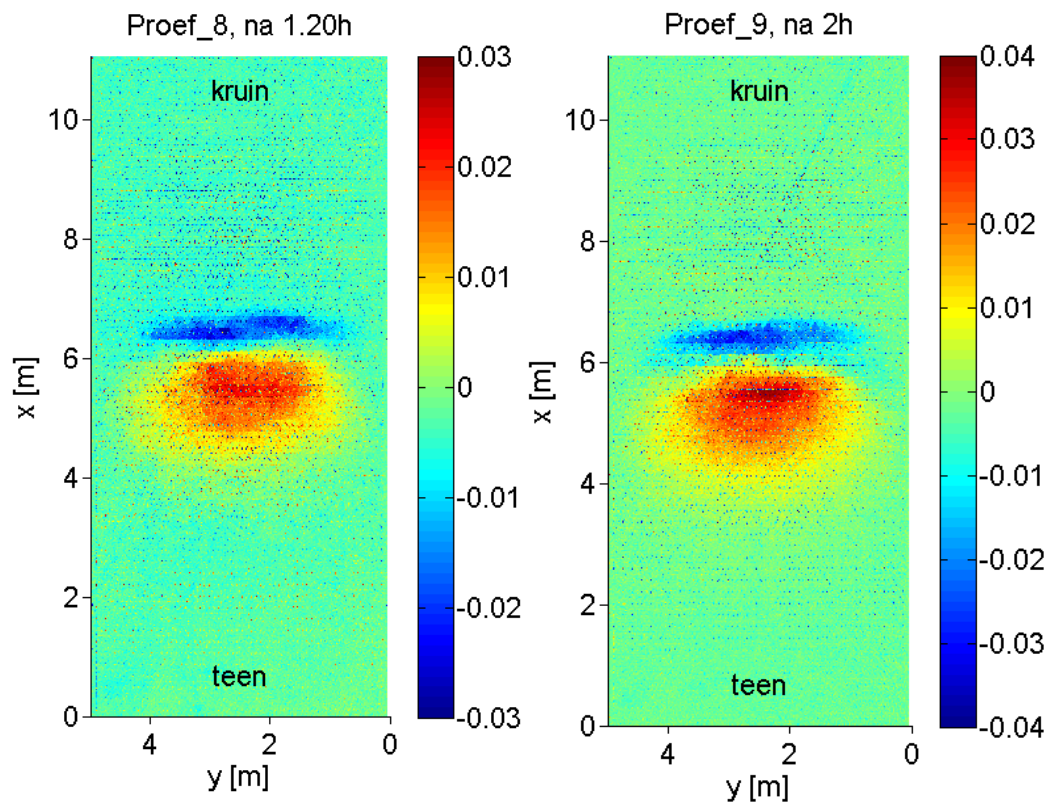
Figuur C.1 Schade na Proef C02 en Proef C03 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C01)
 (x = lengte langs de steenzetting, gemeten van de onderkant; y =lengte in gootdwarsrichting gemeten van meetcabinezijde; legenda in [m])



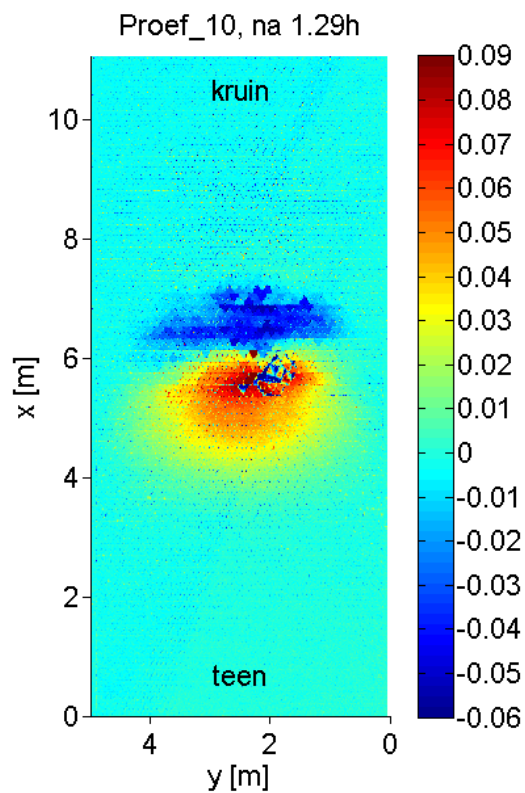
Figuur C.2 Schade na Proef C04 en Proef C05 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C01)



Figuur C.3 Schade na Proef C06 en Proef C07 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C05)



Figuur C.4 Schade na Proef C08 en Proef C09 ten opzichte van het referentieprofiel (referentieprofiel voor Proef C08: na Proef C05; referentieprofiel voor Proef C09: na Proef C07)

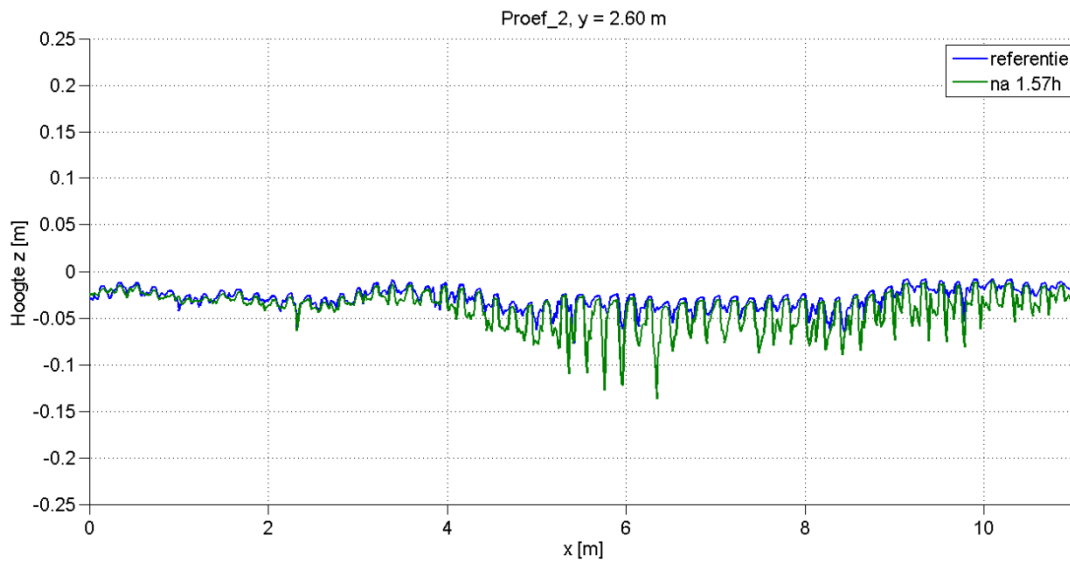


Figuur C.5 Schade na Proef C10 ten opzichte van het referentieprofiel (na Proef C07)

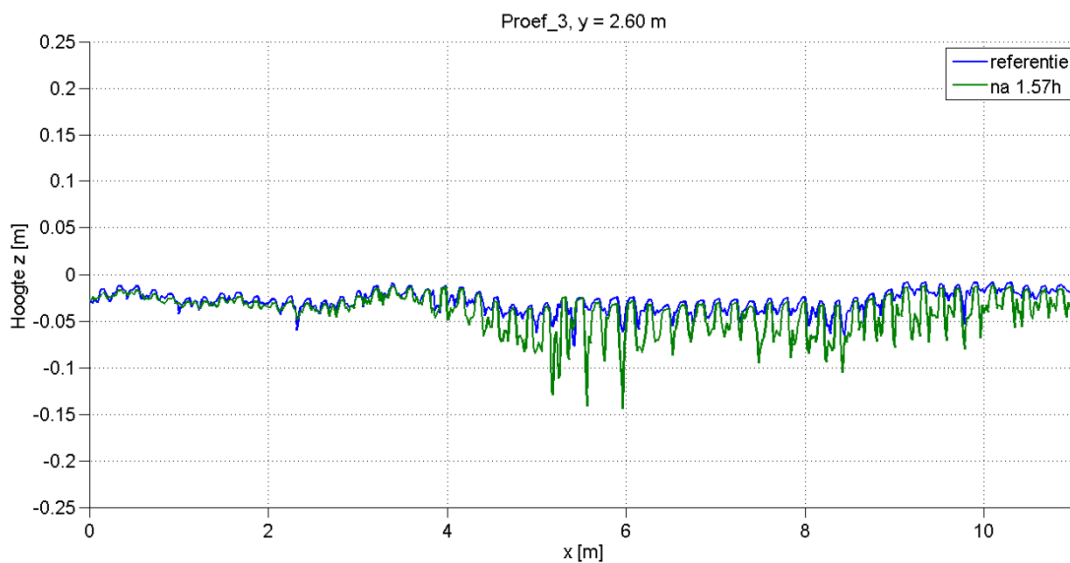
C.2 Dwarsprofielen

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

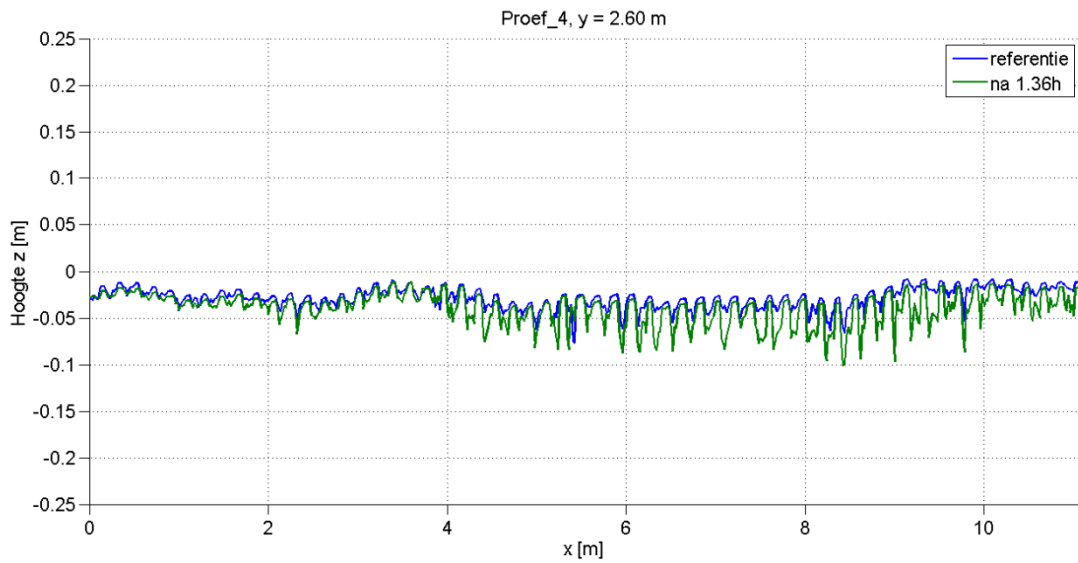
Steeds is eerst de taludhelling van de registraties afgetrokken, en daarna is de lijn voor de figuur gegenereerd..



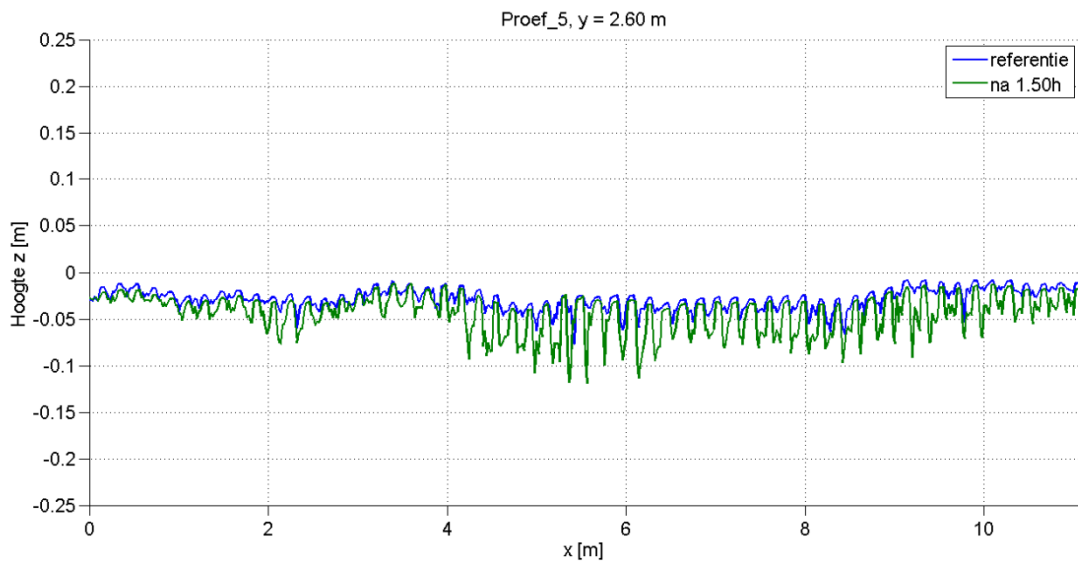
Figuur C.6 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C02 ($y=2,6m$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



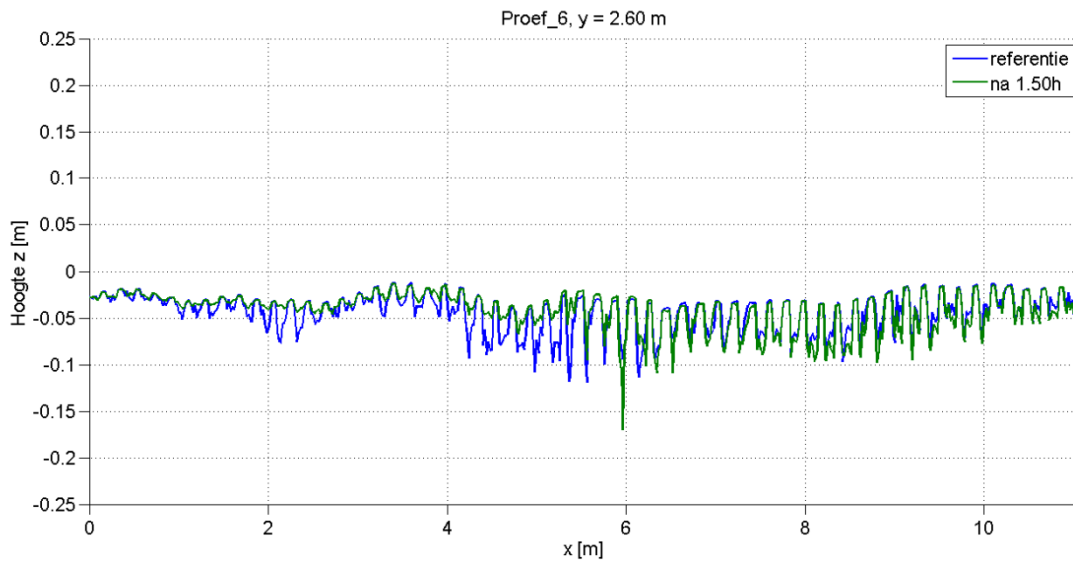
Figuur C.7 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C03 ($y=2,6m$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



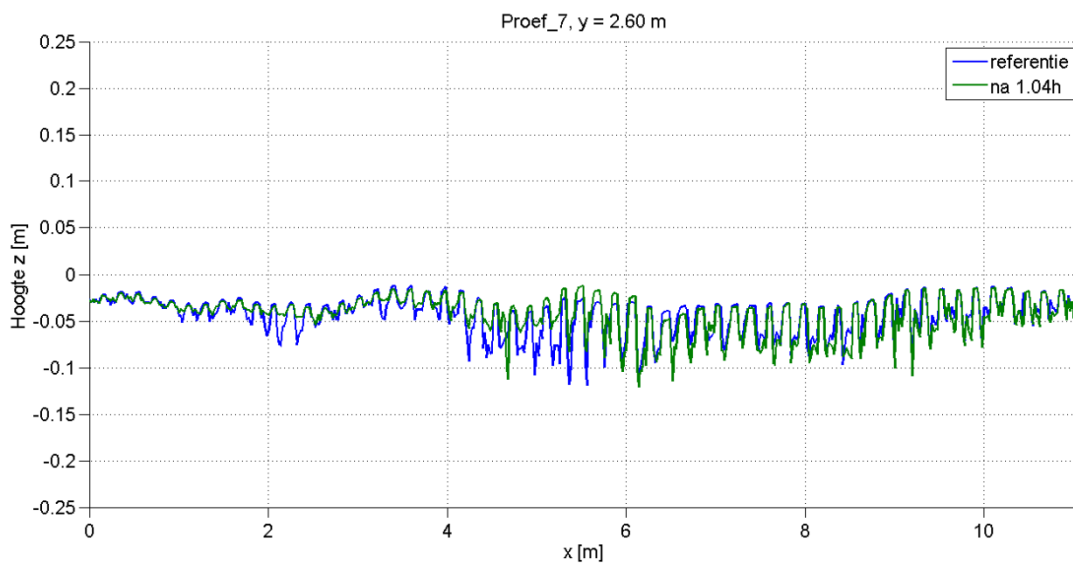
Figuur C.8 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C04 ($y=2,6m$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



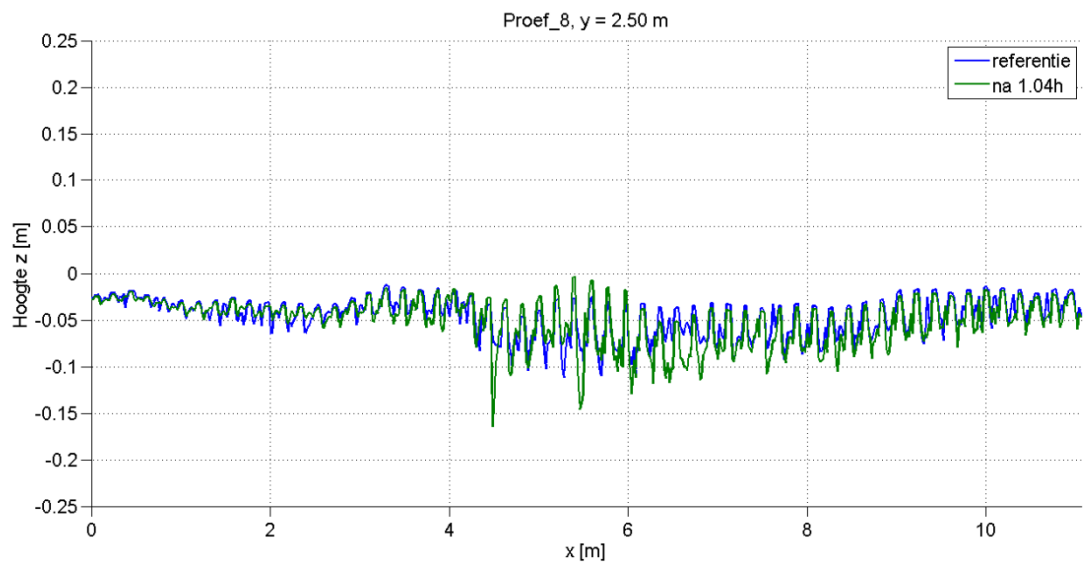
Figuur C.9 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C05 ($y=2,6m$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



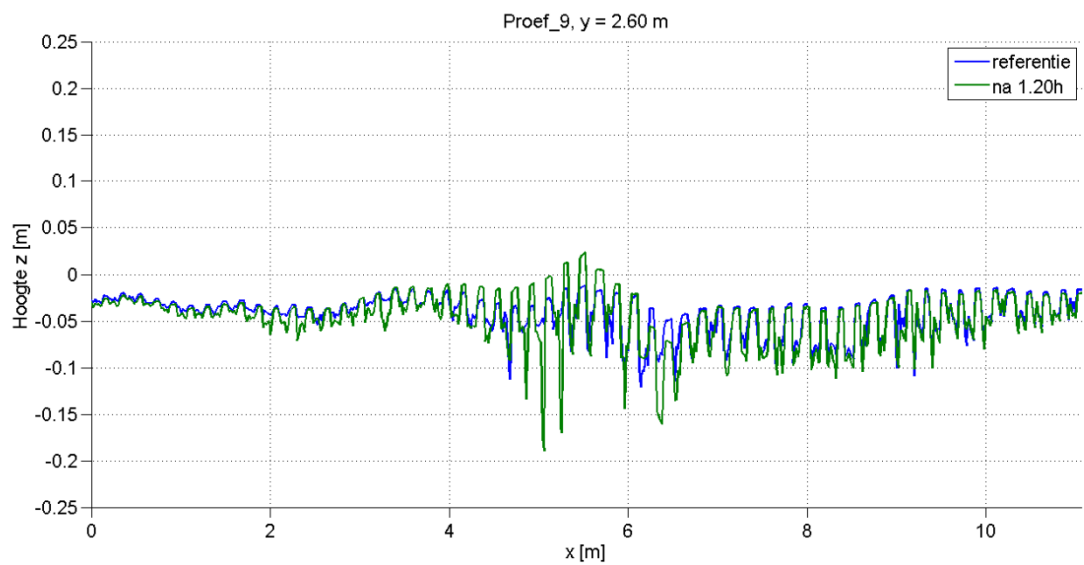
Figuur C.10 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C06 ($y=2,6m$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



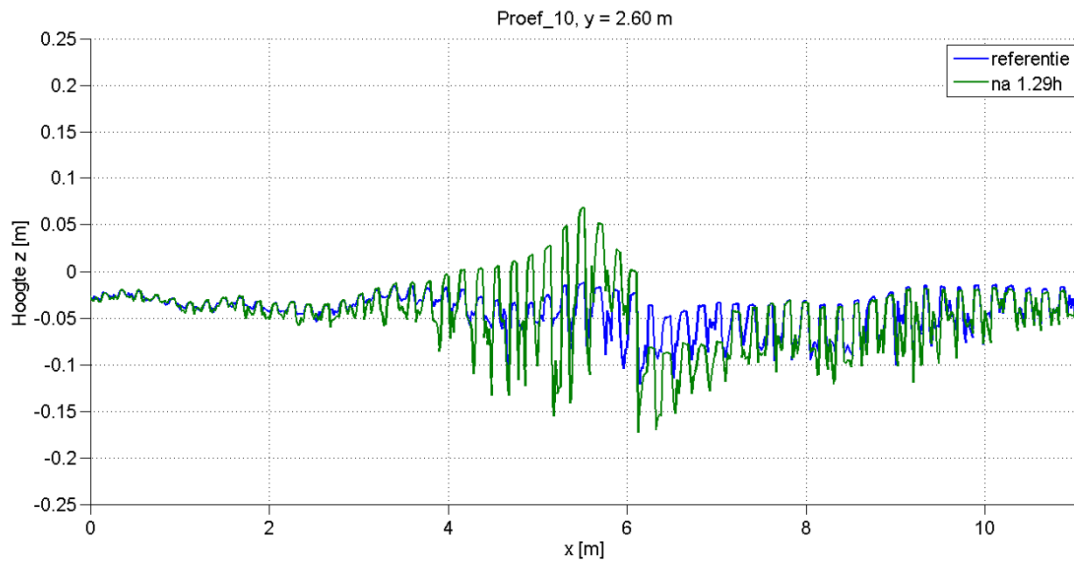
Figuur C.11 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C07 ($y=2,6m$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud



Figuur C.12 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C08 ($y=2,5\text{m}$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud

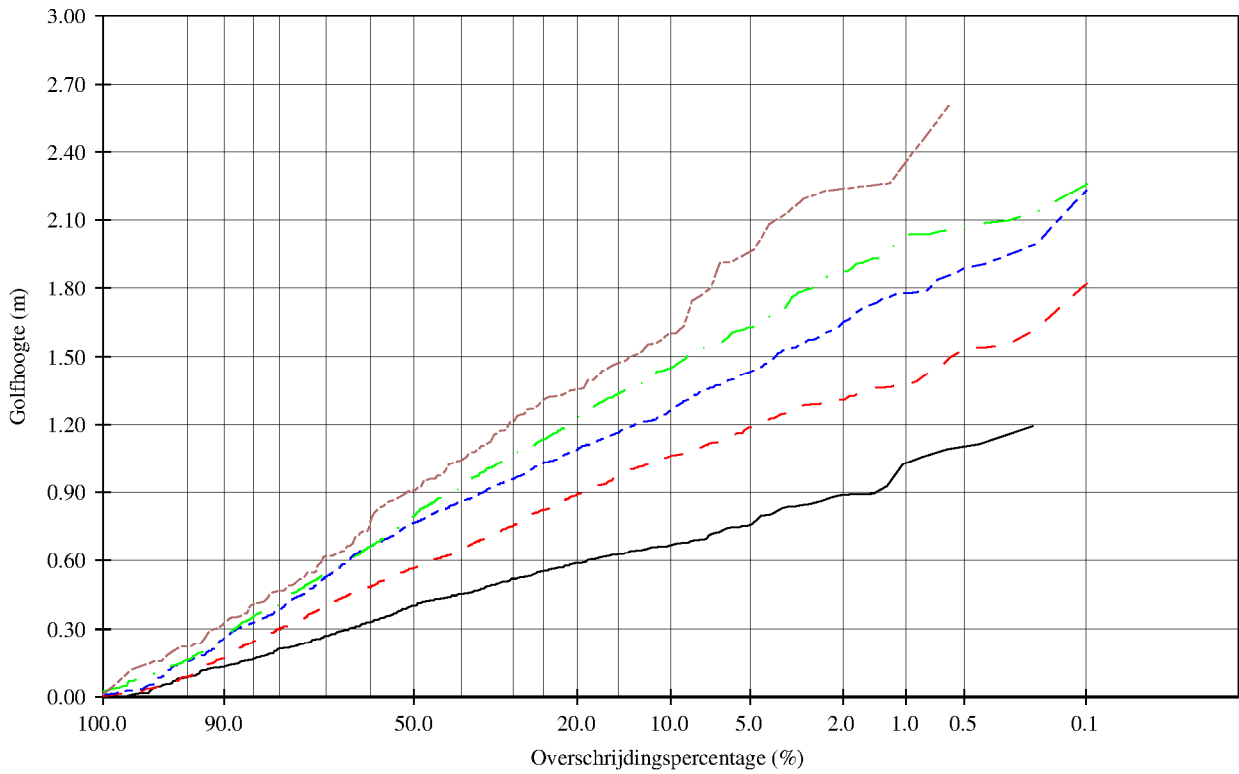


Figuur C.13 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C09 ($y=2,6\text{m}$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud

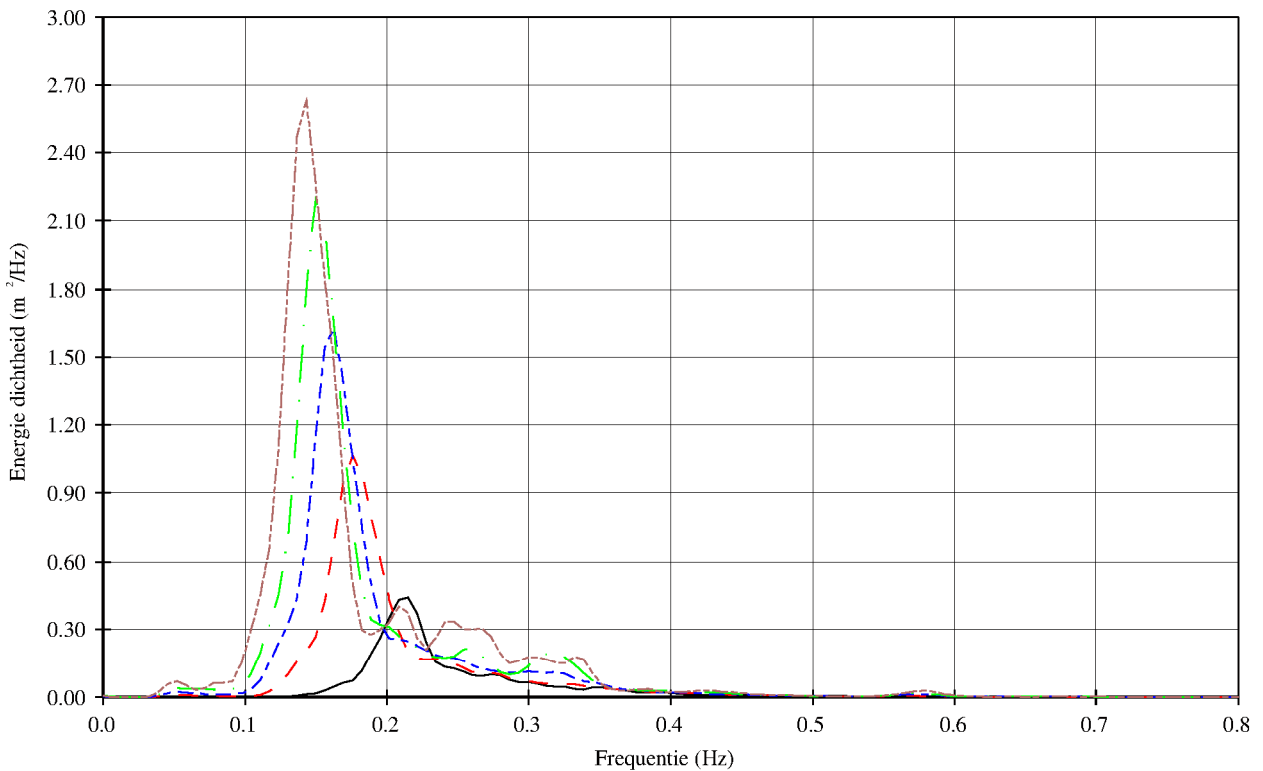


Figuur C.14 Hoogte van het taludoppervlak na Proef C10 ($y=2,6m$) (groene lijn) en referentie (na de ingolfproef) ten opzichte van een recht 1:3 talud

D Overschrijdingskrommes golfhoogte



- Serie 1 C01 ($H_{m0} = 0.685$ m) ($T_p = 4.71$ s) ($w.s = 4.55$ m)
- - - Serie 1 C02 ($H_{m0} = 1.003$ m) ($T_p = 5.65$ s) ($w.s = 4.70$ m)
- - - Serie 1 C03 ($H_{m0} = 1.213$ m) ($T_p = 6.19$ s) ($w.s = 4.70$ m)
- - - Serie 1 C04 ($H_{m0} = 1.383$ m) ($T_p = 6.58$ s) ($w.s = 4.70$ m)
- - - Serie 1 C05 ($H_{m0} = 1.583$ m) ($T_p = 7.01$ s) ($w.s = 4.70$ m)



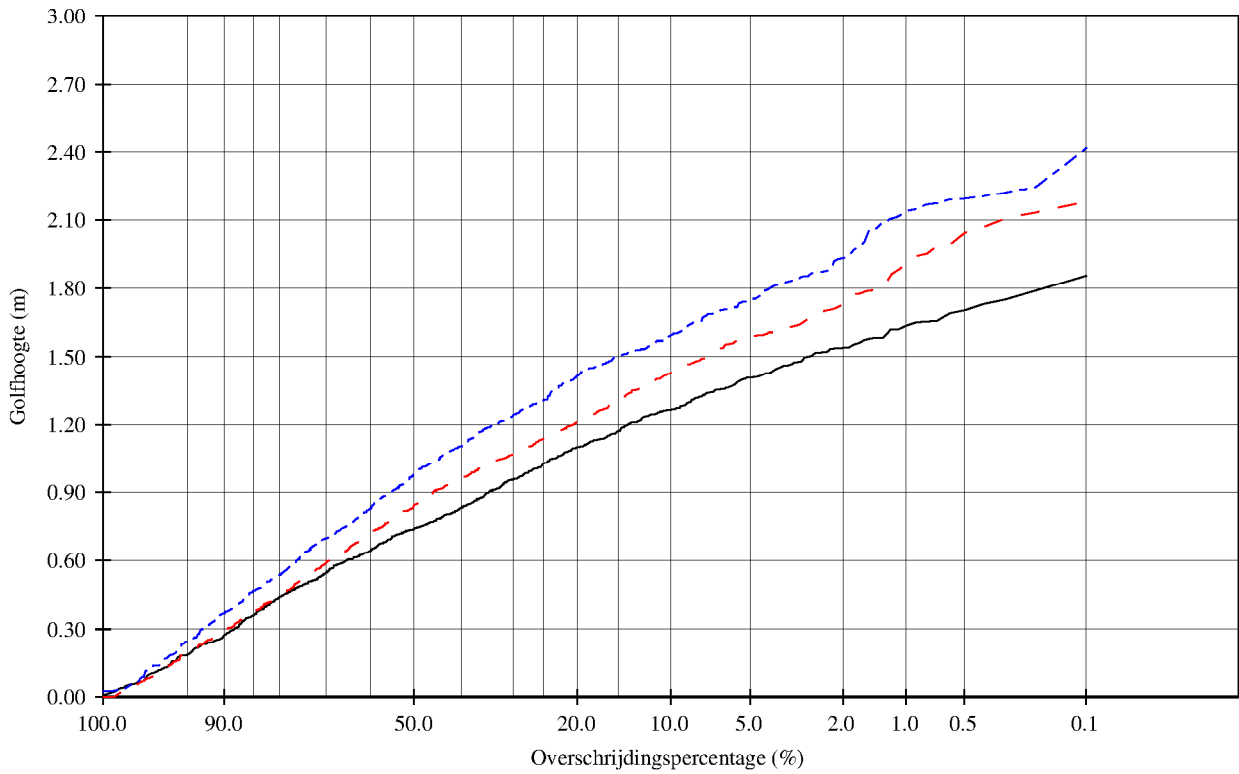
Golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

Serie 1 (proeven C01, C02, C03, C04, C05)

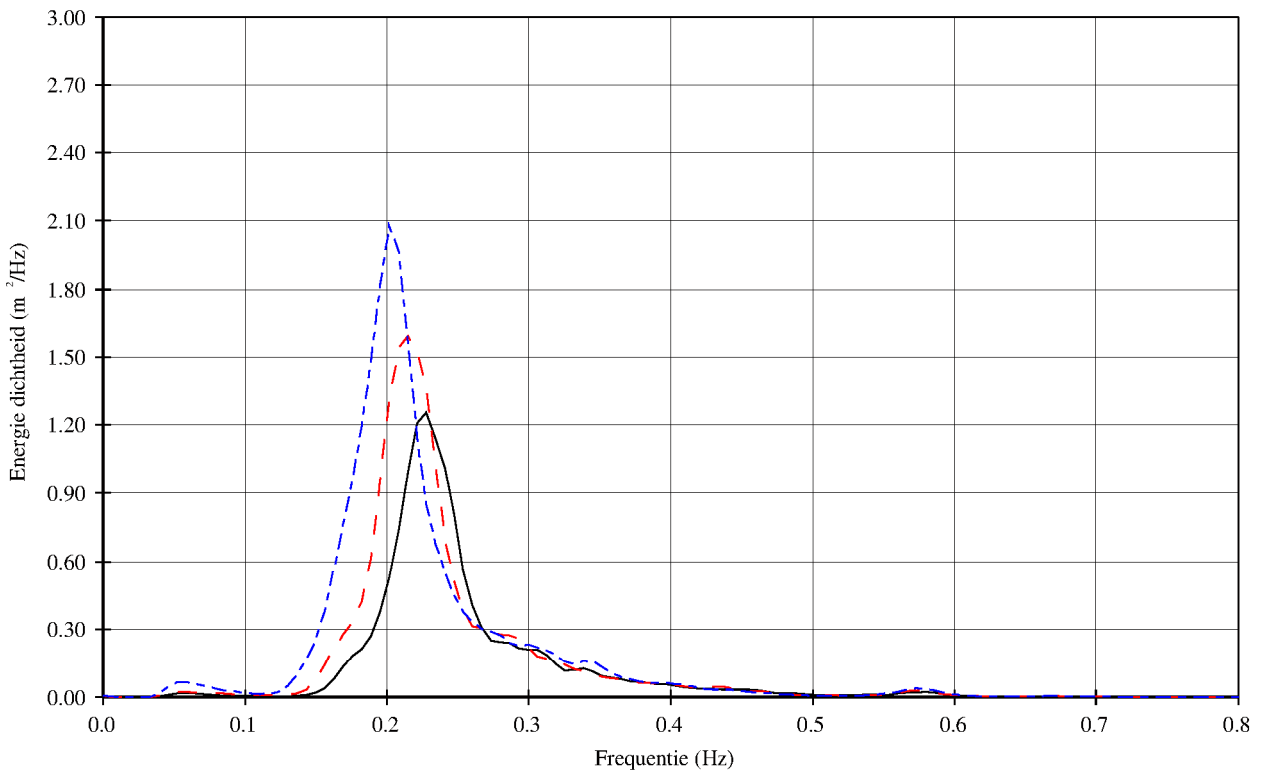
Inkomende golven

Deltares

1208618.016 FIG. D.1



- Serie 2 C06 (Hm0 = 1.199 m) (Tp = 4.38 s) (w.s = 4.70 m)
- - - Serie 2 C07 (Hm0 = 1.347 m) (Tp = 4.64 s) (w.s = 4.70 m)
- - - Serie 2 C08 (Hm0 = 1.524 m) (Tp = 4.93 s) (w.s = 4.70 m)



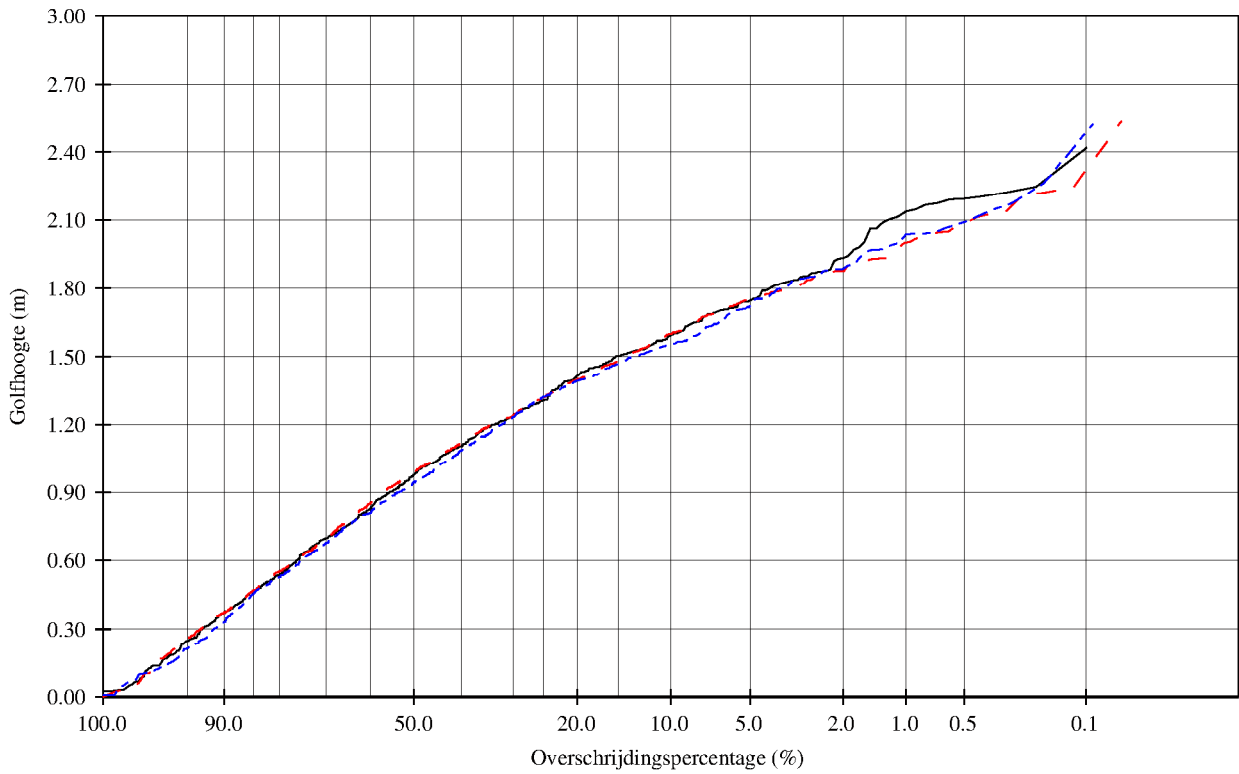
Golffhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

Serie 2 (proeven C06, C07, C08)

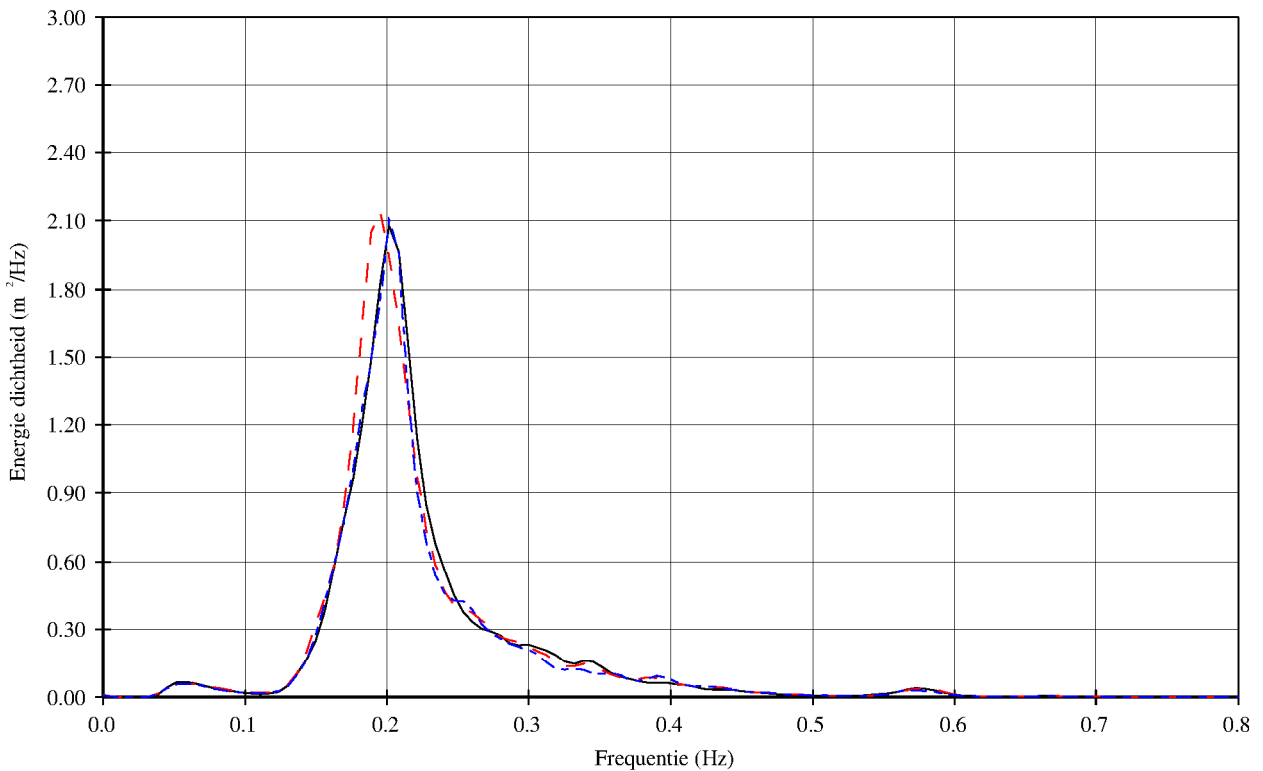
Inkomende golven

Deltares

1208618.016 FIG. D.2



- Serie 3 C08 (Hm0 = 1.524 m) (Tp = 4.93 s) (w.s = 4.70 m)
- - - Serie 3 C09 (Hm0 = 1.547 m) (Tp = 5.12 s) (w.s = 4.70 m)
- - - Serie 3 C10 (Hm0 = 1.491 m) (Tp = 4.93 s) (w.s = 4.70 m)



Golffhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidsspectra

Serie 3 (proeven C08, C09, C10)

Inkomende golven

Deltares

1208618.016 FIG. D.3

E Foto's



a) Opbouw model: afwerken van talud (1)



b) Opbouw model: afwerken van talud (2)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 1



a) Opbouw model: afwerken van talud (3)



b) Opbouw model: plaatsen van filterlaag

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 2



a) Opbouw model: plaatsen van filterlaag (2)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 3



a) Opbouw model: plaatsing van steenzetting (1)



b) Opbouw model: plaatsing van steenzetting (2)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 4



a) Opbouw model: plaatsens van steenzetting (3)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 5



a) Opbouw model: ingewassen steenzetting voor Proef 1

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting



a) Na Proef 2



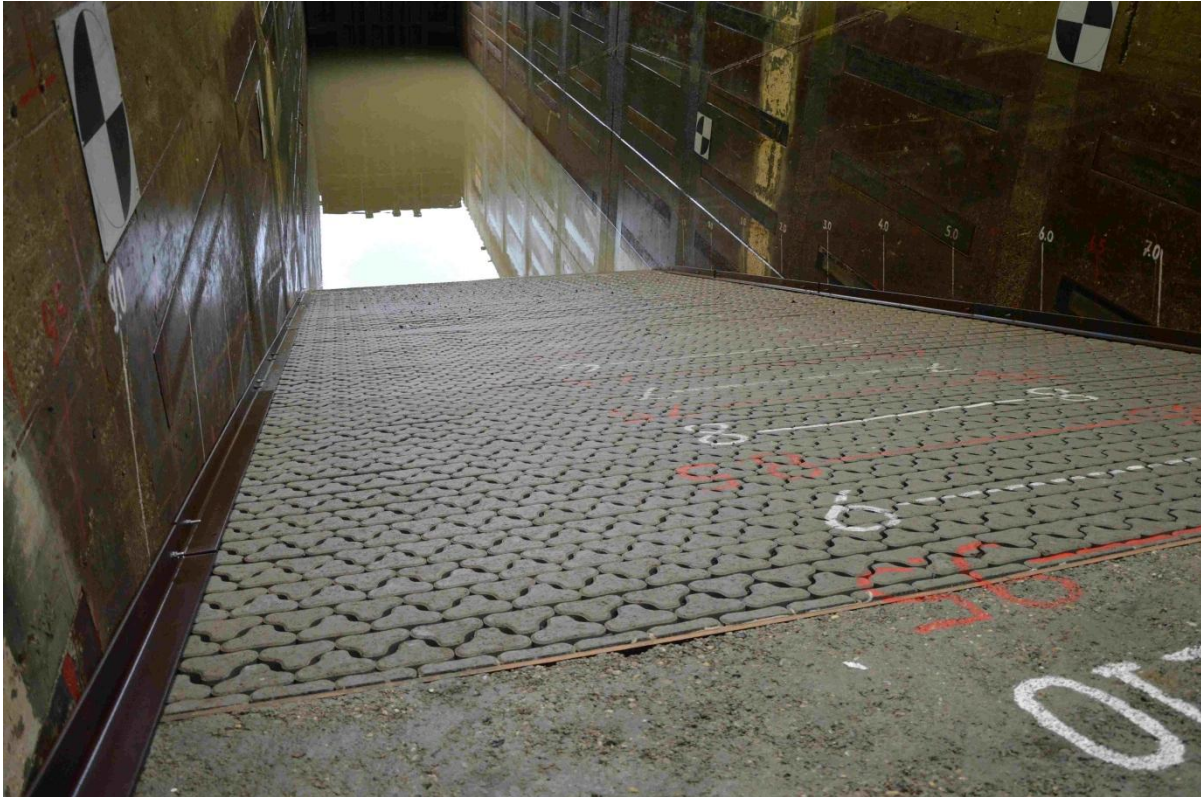
b) Na Proef 3

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

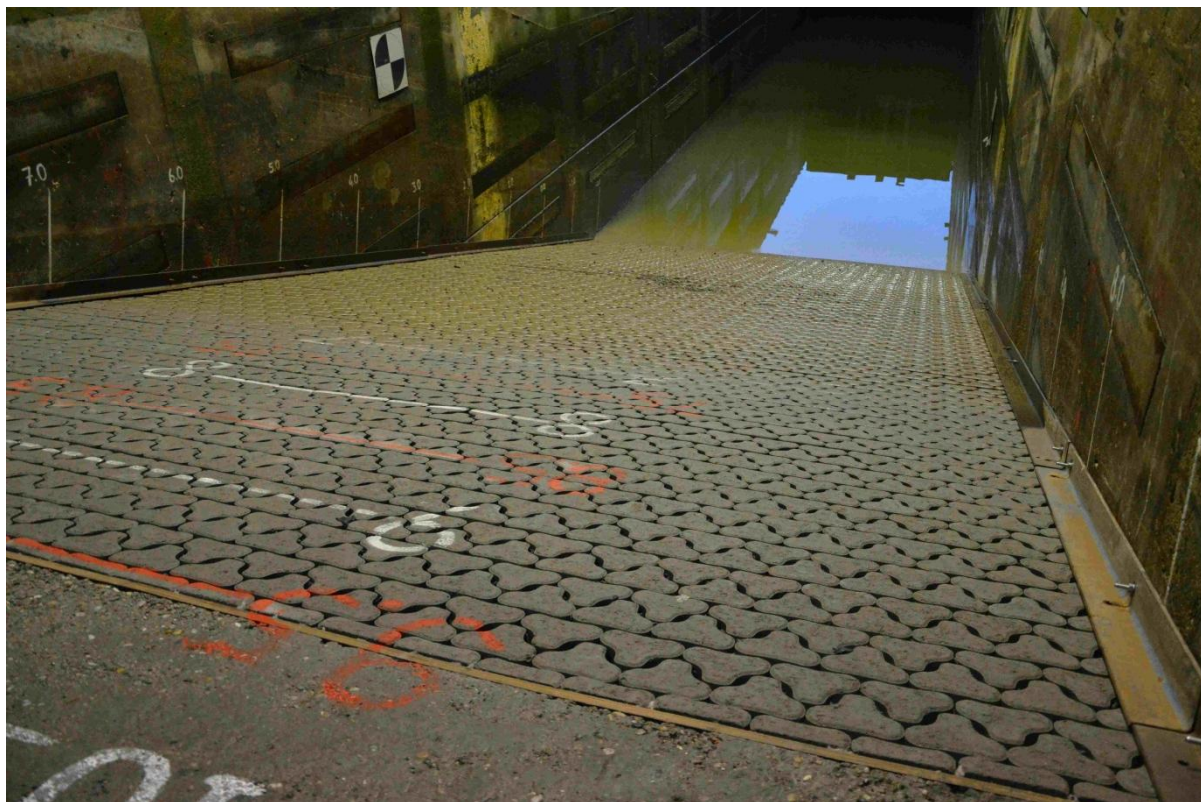
DELTARES

1208618

Foto 7



a) Na Proef 3 (2)



b) Na Proef 4 (1)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 8



a) Na Proef 4 (2)



b) Na Proef 5 (1)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

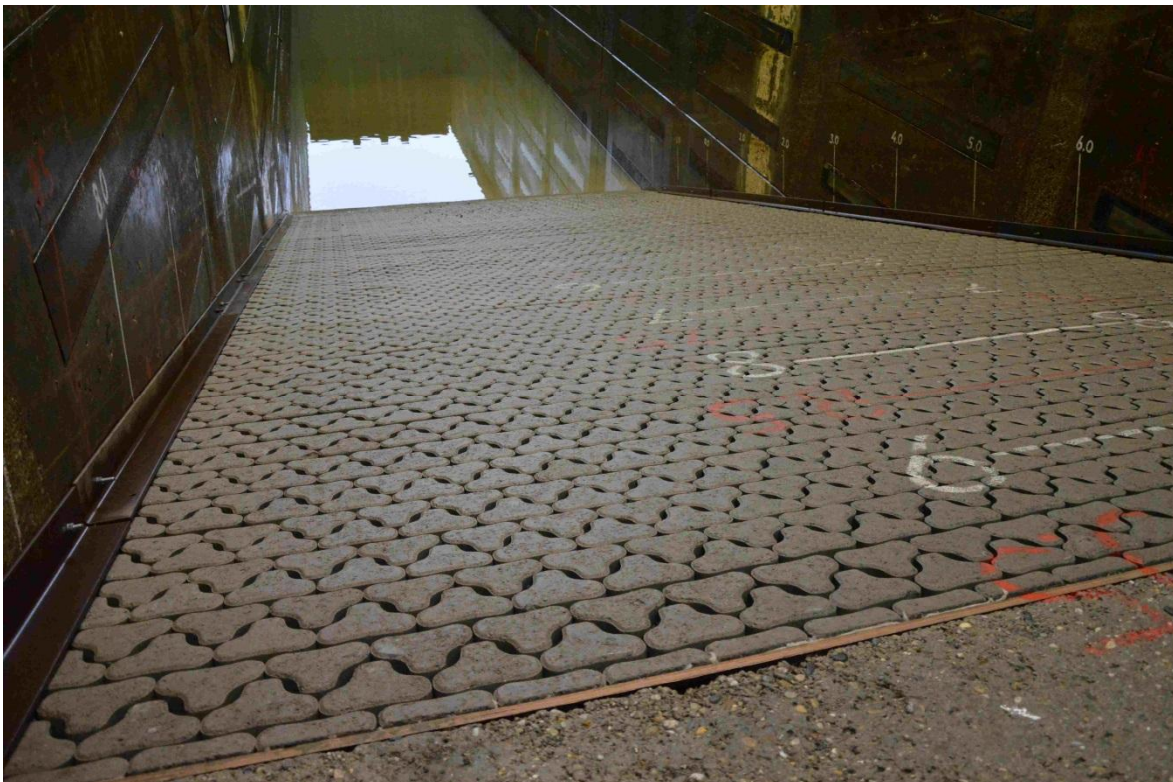
DELTARES

1208618

Foto 9



a) Na Proef 5 (2)



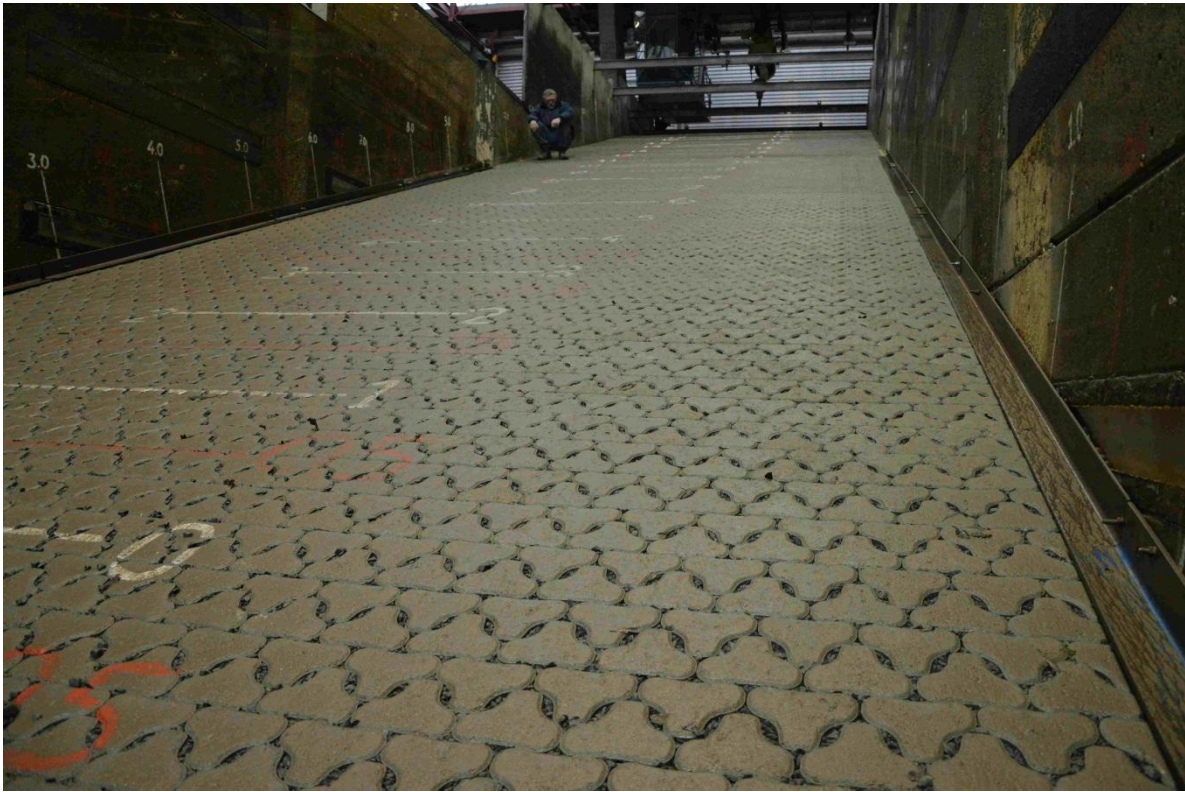
b) Na Proef 6 (1)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 10



a) Na Proef 6 (2)



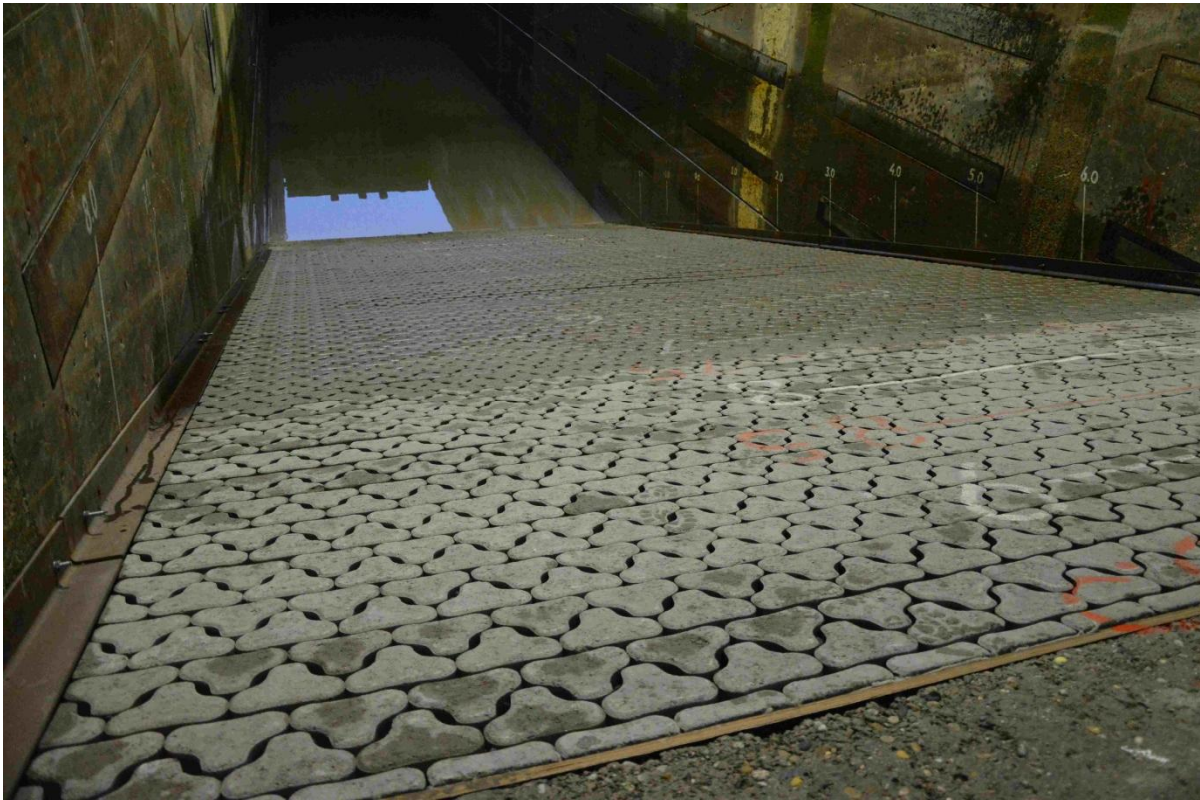
b) Na Proef 6 (3)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 11



a) Na Proef 7 (1)



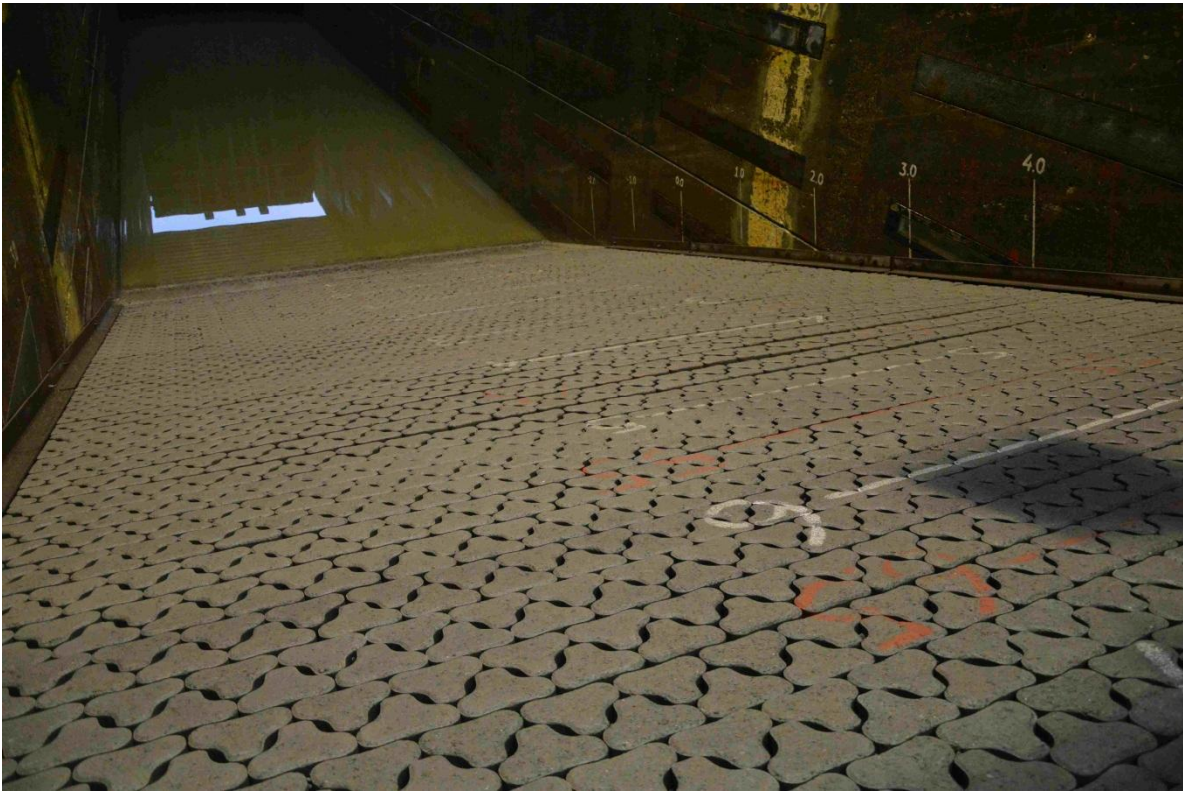
b) Na Proef 7 (2)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 12



a) Na Proef 8 (1)



b) Na Proef 8 (2)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

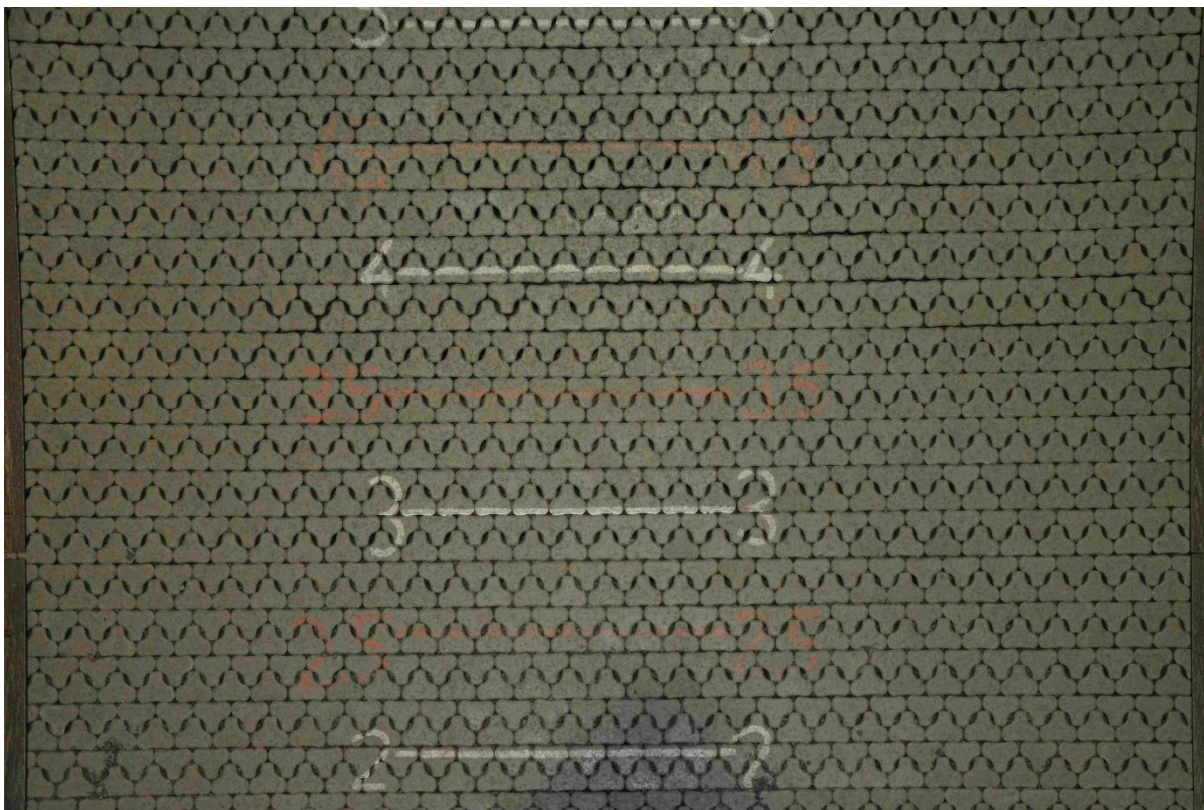
DELTARES

1208618

Foto 13



a) Na Proef 8 (3)



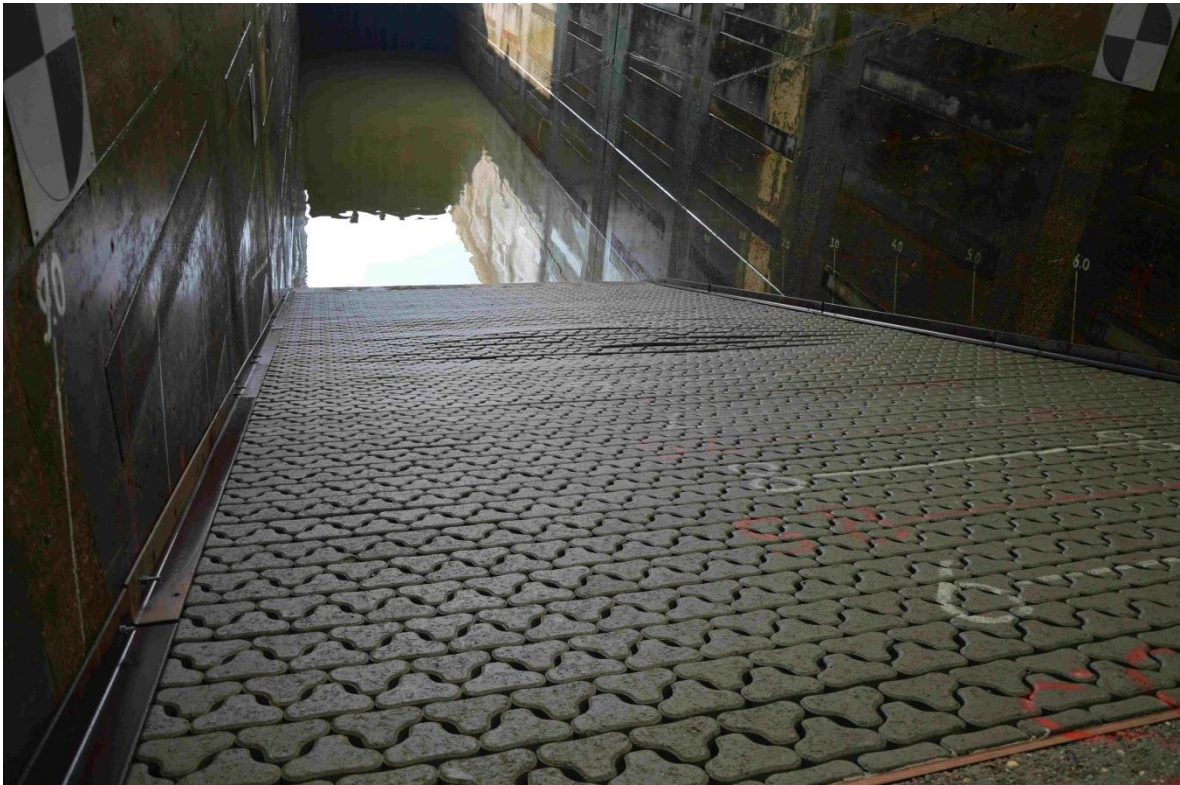
b) Na Proef 8 (4)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

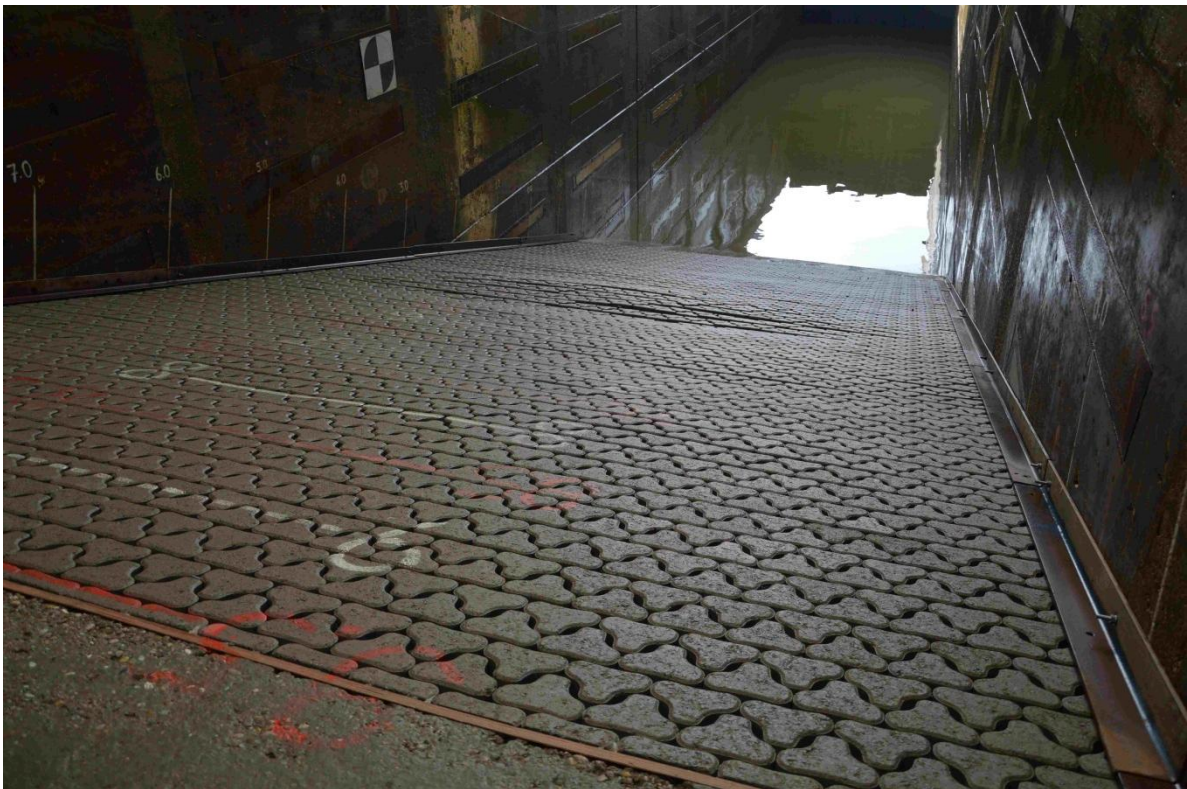
DELTARES

1208618

Foto 14



a) Na Proef 9 (1)



b) Na Proef 9 (2)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

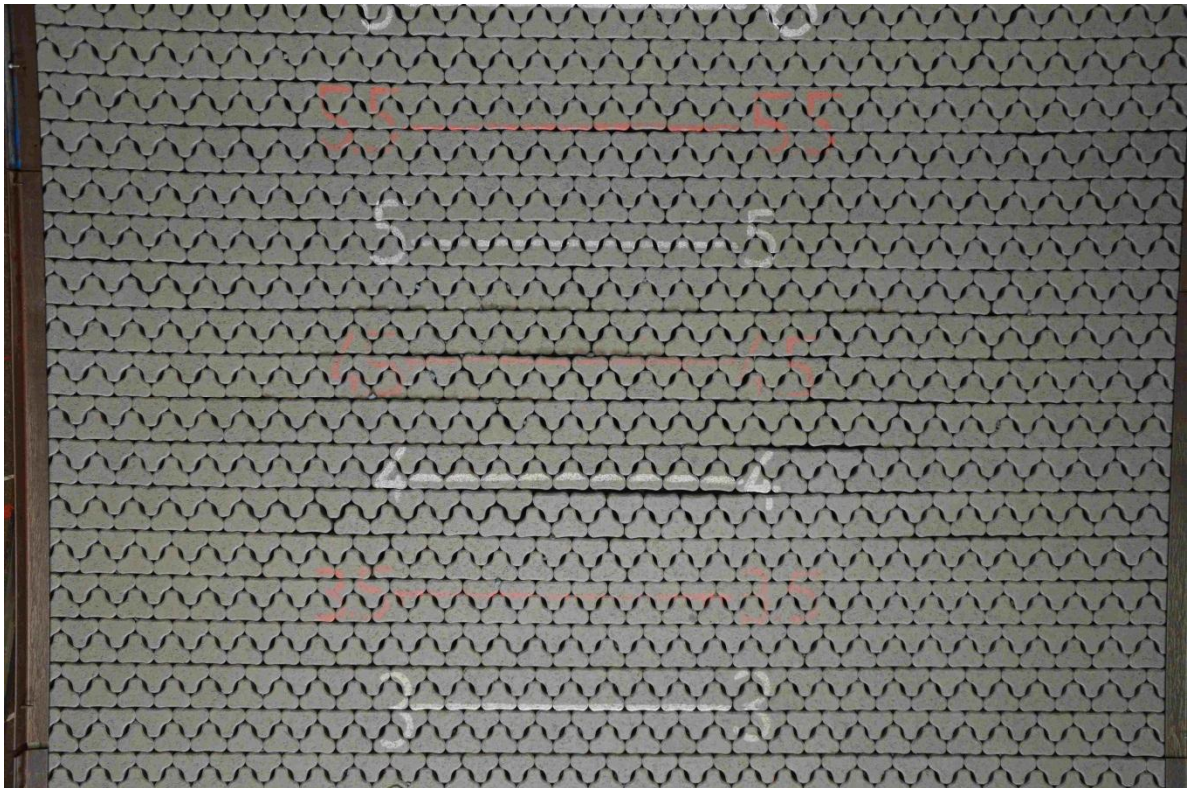
DELTARES

1208618

Foto 15



a) Na Proef 9 (3)



b) Na Proef 9 (4)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 16



a) Na Proef 9 (5)



b) Na Proef 9 (6)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

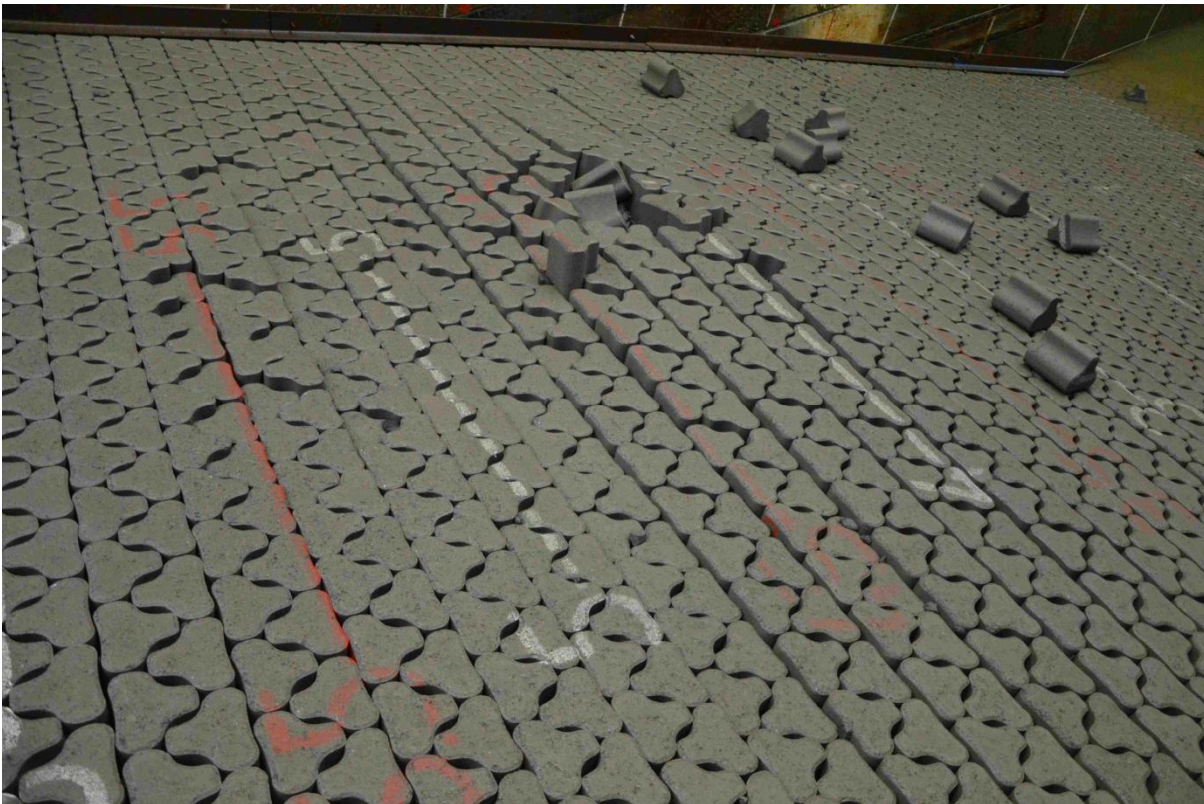
DELTARES

1208618

Foto 17



a) Na Proef 10 (1)



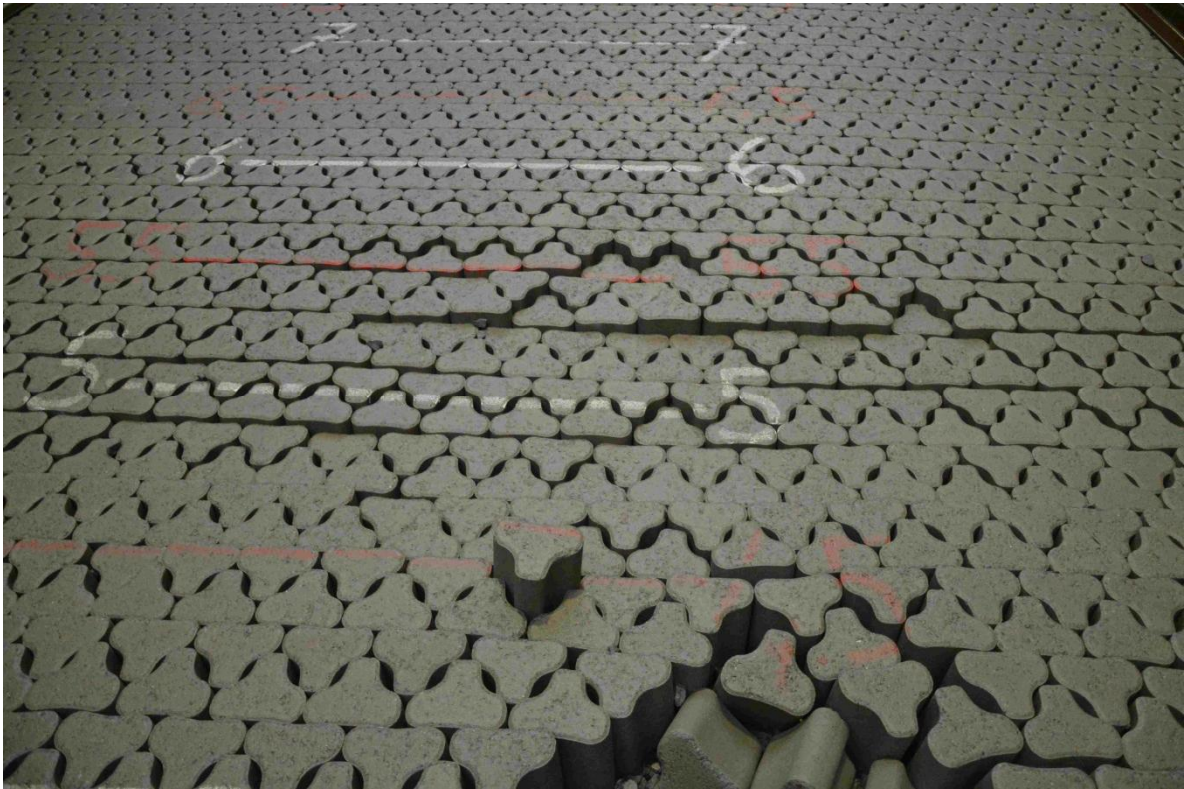
b) Na Proef 10 (2)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 18



a) Na Proef 10 (3)



b) Na Proef 10 (4)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 19



a) Na Proef 10 (5)

Stabiliteitsproeven met C-Star steenzetting

DELTARES

1208618

Foto 20

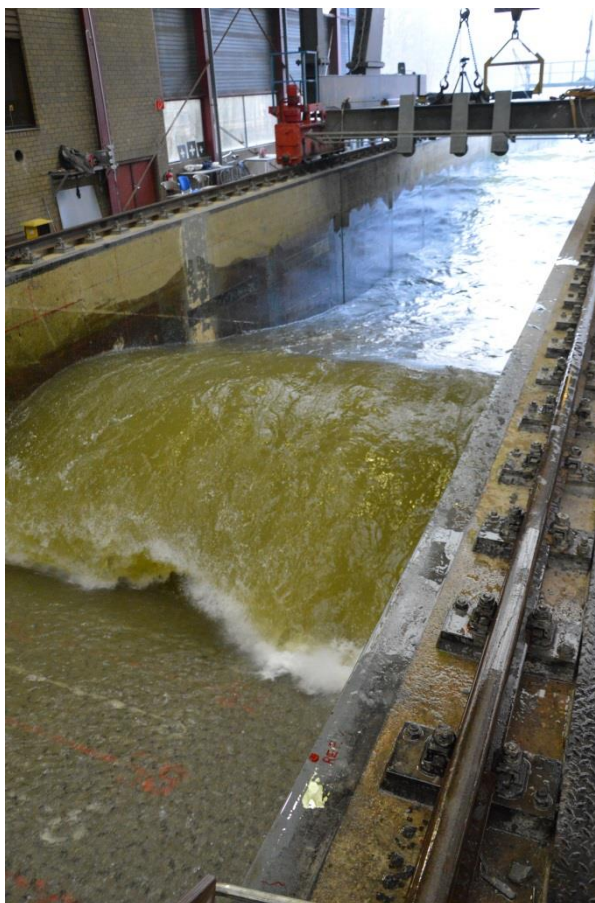
F Procedure voor het bepalen van de stabiliteitsfactor

F.1 Inleiding

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

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

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



Figuur F.1 Golfaanval op testsectie van C-Star.

F.2 Interpretatie van de proeven

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

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

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

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

Omdat vanwege de beperkte golfhoogte in de Deltagoot het denkbaar is dat het niet lukt om schade te krijgen aan de steenzetting, is de procedure voor het bepalen van de bezwijkgolfhoogte verder uitgedetailleerd (zie paragraaf 4.1 voor omschrijving schadecategorieën):

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

F.3 Bepaling stabiliteitsfactor

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

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

Bij het stap voor stap groter maken van de golfbelasting zal er namelijk in eerste instantie geen vrees zijn dat de steenzetting gaat bezwijken. Pas als de golfhoogte ten opzichte van de afmetingen van de toplaag groot begint te worden, kan er schade gaan optreden. Aangenomen kan worden dat er schade zou kunnen gaan optreden als de golfhoogte groter is dan de 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.

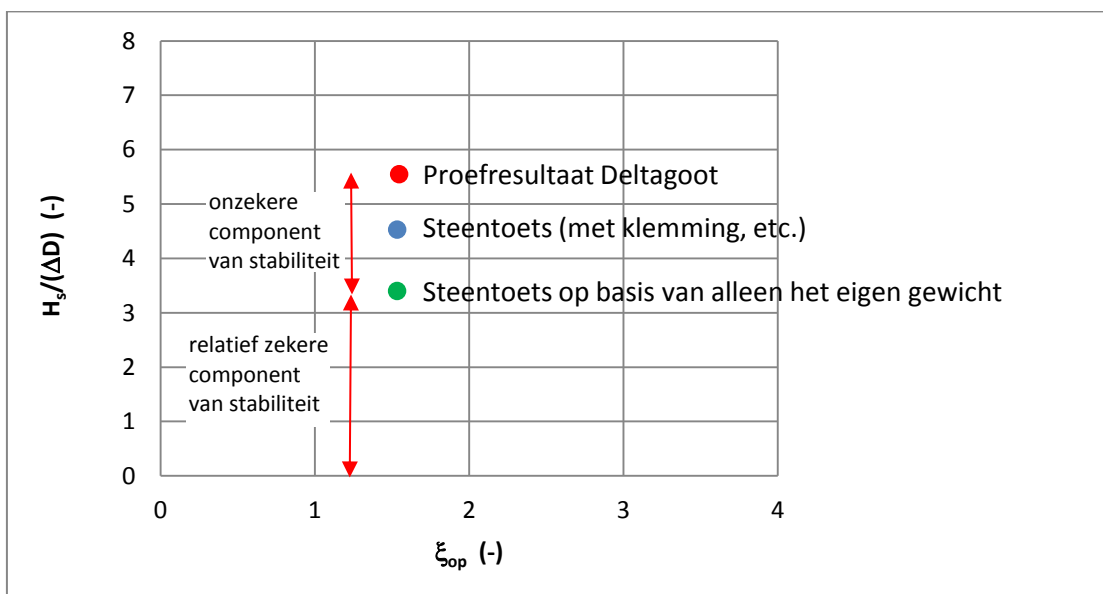
Meestal zal de steenzetting bij een veel grotere golfhoogte bezwijken. Dat is vooral te danken aan de bijzonder goede werking van de klemming, maar kan ook liggen aan andere bijzondere aspecten. Dit kan gezien worden als het 'hightech' deel van het systeem, terwijl de stabiliteit zonder klemming en kanalen 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 Figuur F.2.

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), bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot (het gemiddelde tussen wel schade en geen schade)
- $D_{Steentoets}$ = de benodigde toplaagdikte volgens Steentoets (als gerekend wordt met klemming, etc.) bij een golfhoogte gelijk aan die toegepast is in de Deltagoot
- $D_{in \text{ modelproeven}}$ = de toplaagdikte (zuilhoogte) die toegepast is in de Deltagoot



Figuur F.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.

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 F.2) en het zekere deel van de stabiliteit (groene stip in Figuur F.2). Dit kan op de volgende wijze worden bereikt:

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

Met:

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

γ = veiligheidsfactor (-)

Dit kan vereenvoudigd worden tot:

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

De stabiliteitsfactor wordt eerst voor elke proevenserie bepaald. Het gemiddelde van de stabiliteitsfactoren van de afzonderlijke proevenseries betreft de stabiliteitsfactor die voor het beproefde steenzettingtype wordt aangehouden als eindresultaat.

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

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

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

Met:

σ = 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, omdat er maar bij één proevenserie bezwijken is opgetreden, zodat de standaardafwijking niet goed bepaald kan worden. In dat geval wordt er gerekend met de minimumwaarde voor de standaardafwijking, namelijk 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.