

Stabiliteit van taludbekleding met Hillblocks bij golfaanval

Grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot



Stabiliteit van taludbekleding met Hillblocks bij golfaanval

Grootschalig modelonderzoek in de Deltagoot

ir. P. van Steeg

1202901-000

Titel

Stabiliteit van taludbekleding met Hillblocks bij golfaanval

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Hill Innovations B.V. / RWS- Waterdienst	1202901-000	1202901-000-HYE-0014	25 (Excl. bijlagen)

Trefwoorden

Hillblock, Slimblock, Basisblock, dijkbekleding, steenzetting, Deltagoot

Samenvatting

Hillblock is een nieuw, innovatief type taludbekleding voor toepassing als toplaag op waterbouwkundige constructies zoals dijken, kribben en oevers. Om de stabiliteit bij golfaanval van het bekledingssysteem te bepalen is er grootschalig onderzoek uitgevoerd in de Deltagoot. Hierbij is de goot in twee secties verdeeld: op één sectie de variant Basisblock en op de andere sectie de variant Slimblock. De schaal van dit onderzoek was 1:2. De Hillblocks hadden een dikte van 20 cm. De constructie was voorzien van een filterlaag met een dikte van 7 cm ($D_{f15} = 12$ mm), een geotextiel en een laag cementstabilisatie.




De constructie is beproefd met drie proevenseries. De eerste twee series bestonden uit korteduurproeven met in iedere serie een gelijkblijvende brekerparameter. De derde serie bestond uit in totaal 29 uur aan langeduurproeven met gelijkblijvende belasting. Na iedere proef is de vervorming en eventuele schade aan het talud geregistreerd.

Uit de Deltagootproeven is gebleken dat de bekleding bestaande uit een Basisblock of een Slimblock een stabiliteit heeft die voldoet aan de stabiliteitseis van zuilen zoals berekend met STEENTOETS. Daarbij wordt als dikte van de toplaag de afstand aangehouden tussen het bovenvlak en het ondervlak van de steenzetting.

Het onderzoek is voor 50% gefinancierd door Hill Innovations BV en voor 50 % door het Innovatie Test Centrum van Rijkswaterstaat.

Referenties

Samenwerkingsovereenkomst betreffende het onderzoek "Modelproeven van Hillblock taludbescherming", RWS zaaknummer 31058835

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	nov. 2011	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	
2	dec. 2011	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		ir. W.M.K. Tilmans	
3	jan. 2012	ir. P. van Steeg		ir. M. Klein Breteler		Dr. ir. M.R.A. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

Lijst van Tabellen	iii
Lijst van Figuren	v
Lijst van Foto's	vii
Lijst van Symbolen	ix
1 Inleiding	1
1.1 Doel van het onderzoek	1
1.2 Opdracht	2
1.3 Projectorganisatie	2
2 Schaling	3
2.1 Faciliteit	3
2.2 Schaling	3
3 Modelopstelling	7
3.1 Algemeen	7
3.2 Plaatsing toplaagelement Hillblock	8
3.3 Meetinstrumenten	8
3.3.1 Golfhoogtemetingen	8
3.3.2 Profielmetingen	10
3.3.3 Metingen inwasmateriaal	10
3.3.4 Golfoploopmetingen	11
3.4 Proevenprogramma	11
4 Proefresultaten	15
4.1 Algemeen	15
4.2 Serie 1, korteduurproeven, $s_{op} = 0,02$	16
4.3 Serie 2, korteduurproeven, $s_{op} = 0,04$	17
4.4 Serie 3, langeduurproeven, $s_{op} = 0,04$	17
5 Analyse van de proefresultaten	19
5.1 Stabiliteit	19
5.2 Uitspoeling inwasmateriaal	20
5.3 Uitspoeling filtermateriaal	20
5.4 Reststerkte Hillblock na initiële schade	20
5.5 Bepaling reductiecoëfficiënt golfoploop	20
5.5.1 Bepaling golfoploophoogte van een Hillblock taludbescherming	21
5.5.2 Bepaling golfoploophoogte glad talud op basis van TAW (2002)	21
5.5.3 Vergelijking van Hillblock taludbescherming met glad talud	22
6 Conclusies	23
7 Literatuur	25

Bijlage(n)

A Tabellen

B Figuren

C Overschrijdingskrommen

D Profielmetingen

E Foto's

Lijst van Tabellen

In tekst

Tabel 1.1	Verschillen tussen blokken en zuilen, TAW (2003).....	1
Tabel 3.1	Proevenprogramma met gerealiseerde waarden.....	12
Tabel 5.1	Overzicht reductiefactoren voor ruwheid voor een glad talud op basis van TAW (2002) en gemeten waarden voor Hillblock taludbescherming.....	22

In bijlagen

Tabel A.1	Proevenprogramma met gerealiseerde waarden.....	
-----------	---	--

Lijst van Figuren

In tekst

Figuur 1.1	Indruk van Hillblock (Slimblock, Basisblock, Basisblock (links) en Slimblock (rechts) in verband gezet)	1
Figuur 3.1	Schematische doorsnede van dijklichaam in de Deltagoot	7
Figuur 3.2	Ligging van de Hillblocks in de Deltagoot (links Basisblock, rechts Slimblock)...	9
Figuur 3.3	De profielvolger tijdens een profielmeting	10
Figuur 3.4	Schematische weergave van inwasmateriaal tussen de voet van het Hillblock (verticale doorsnede).....	11
Figuur 4.1	Beproeven van de Hillblocks in de Deltagoot	15
Figuur 4.2	Kunstmatig aangebrachte schade voor Test T015 (v.l.n.r.: overzicht, detail Basisblock, detail Slimblock, de middelste en rechter foto zijn 180° gedraaid t.o.v. de linkerfoto).....	18
Figuur 4.3	Situatie na Test T015 (v.l.n.r.: detail Basisblock, detail Slimblock, detail Slimblock ingezoomd)	18
Figuur 5.1	Vergelijking STEENTOETS en proefresultaten Hillblock (korteduurproeven)...	19
Figuur 5.2	Vergelijking STEENTOETS en proefresultaten Hillblock (langeduurproeven) ..	20
Figuur 5.3	Overschrijdingskrommen van de golfploophoogte R_u dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte H_s	21

In bijlagen

Figuur B.1	Overzicht modelopstelling	
Figuur B.2	Zeefkrommen filter en inwasmateriaal	
Figuur B.3	Overzicht talud.....	
Figuur B.4	Metingen inwasmateriaal (Basisblock).....	
Figuur B.5	Metingen inwasmateriaal (Slimblock).....	
Figuur B.6	Vergelijking metingen met STEENTOETS	
Figuur B.7	Afmetingen Hillblock.....	
Figuur C.1	Test T1a, T2, T3, T4, T5 (korte duur, sop=2%)	
Figuur C.2	Test T6, T7, T8 (langeduur, sop = 4%)	
Figuur C.3	Test T14 (Jonswap).....	
Figuur D.1	Profielmeting raai 1 en raai 2	
Figuur D.2	Profielmeting raai 3 en raai 4	

Lijst van Foto's

In bijlagen

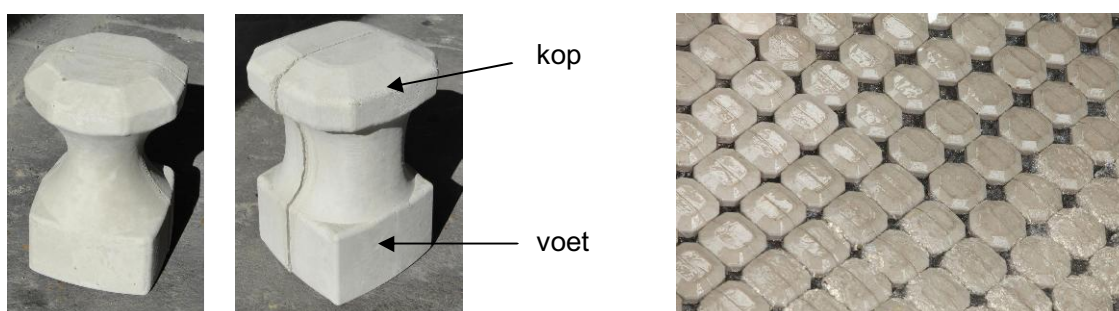
Foto E.1	Aanbrengen en verdichten zand
Foto E.2	Verdichten zand en aanbrengen betonnen dummysecties.....
Foto E.3	Aanbrengen filterlaag
Foto E.4	Aanbrengen Hillblock bekleding.....
Foto E.5	Hillblock bekleding direct na aanbrengen
Foto E.6	Golfaanval tijdens testen (1).....
Foto E.7	Golfaanval tijdens testen (2).....
Foto E.8	Talud na test T011.....
Foto E.9	Inwasmateriaal na testen

Lijst van Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
D	(m)	Dikte toplaag gedefinieerd als de afstand tussen de bovenzijde en onderzijde van het Hillblock
D_{15}	(m)	Karakteristieke korrelgrootte (zeefdiameter)
F	(-)	Stabiliteitsparameter ($H_s/(\Delta D)$): $\xi_{op}^{2/3}$
Fr	(-)	Froude getal
h	(m)	Waterdiepte
H	(m)	Golfhoogte
H_{max}	(m)	Maximale golfhoogte
H_{m0}	(m)	Significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum
$H_s/(\Delta D)$	(-)	Belastingparameter: verhouding tussen de golfbelasting (H_s) en de relatieve dichtheid Δ en dikte D van de steenbekleding
L	(m)	Lengtemaat
L_{op}	(m)	Golfhoogte op diep water op basis van de piekperiode ($gT_p^2/(2\pi)$)
N	(-)	Aantal golven
Re	(-)	Reynolds getal
$T_{m-1.0}$	(s)	Spectrale periodemaat
T_p	(s)	Periode bij de piek van het golfspectrum
b	(m)	Dikte van de filterlaag
g	(m/s ²)	Versnelling als gevolg van de zwaartekracht
k	(m/s)	Doorlatendheid van de filterlaag
k'	(m/s)	Doorlatendheid van de toplaag
n_x	(-)	Schaalfactor van x gedefinieerd als $x_{prototype}/x_{model}$
s_{op}	(-)	Golfsteilheid op basis van de piekperiode (H_{m0}/L_{op})
t	(s)	Tijd
u	(m/s)	Snelheid
V	(-)	Variatiecoëfficiënt
x	(m)	Horizontale afstand vanaf de teen van de constructie
z	(m)	Verticale afstand vanaf de gootbodem
Δ	(-)	Relatieve dichtheid ten opzichte van het water ($\rho_{materiaal} - \rho_{water}$) / ρ_{water}
Λ	(m)	Leklengte
ρ	(kg/m ³)	Dichtheid
ν	(m ² /s)	Viscositeit (voor water ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$)
ξ_{op}	(-)	Brekerparameter ($\tan(\alpha)/\sqrt{s_{op}}$)
σ	(varieert)	Standaardafwijking bij normale verdeling
μ	(varieert)	Gemiddelde bij normale verdeling

1 Inleiding

Hillblock is een nieuw type steenzetting dat op een filterlaag kan worden toegepast om dijken en oevers te beschermen tegen golfaanval en stromingsbelasting. Er zijn twee varianten van het Hillblock getest in de Deltagoot van Deltares en beschreven in dit rapport: het Basisblock en het Slimblock. Figuur 1.1 geeft een indruk van de vorm van de Hillblocks en het uiterlijk op een dijk.



Figuur 1.1 Indruk van Hillblock (Slimblock, Basisblock, Basisblock (links) en Slimblock (rechts) in verband gezet)

Aangezien de stabiliteit van steenbekledingen onder golfaanval wordt bepaald door de vorm en afmetingen van de bekledingselementen, de vorm en afmetingen van de open ruimte tussen de bekledingselementen en de interactie tussen de bekledingselementen is het voor dit nieuwe type steenzetting noodzakelijk dat de stabiliteit in een grootschalige golfgoot wordt vastgesteld alvorens het op dijken kan worden toegepast. De Deltagoot is bij uitstek geschikt om het Hillblock te beproeven, omdat hierin een dijk op bijna prototypeschaal (1:2 à 1:1) kan worden ingebouwd en kan worden belast met grote golven. Door de grootte van deze golfgoot zijn er geen ongewenste schaalearselen te verwachten.

1.1 Doel van het onderzoek

Het doel van het onderhavige onderzoek is het vaststellen van de stabiliteit van het bekledingssysteem onder golfbelasting en het kunnen vaststellen dat het Hillblock stabiel is dan de minimale stabiliteitseis voor zuilen zoals deze door STEENTOETS wordt bepaald.

In TAW (2003) wordt onderscheid gemaakt in blokken en zuilen. Er is geen precieze definitie van blokken en zuilen. In Tabel 1.1 zijn de verschillen tussen zuilen en blokken weergegeven zoals deze staan beschreven in TAW (2003).

Tabel 1.1 Verschillen tussen blokken en zuilen, TAW (2003)

	Blokken	Zuilen
Spleetbreedte	Constant	Variabel
Vorm	Regelmatig vierkant, rechthoekig, zeshoekig	Onregelmatig (soms regelmatig), veelhoekig
Open ruimte	Meestal minder dan bij zuilen	Meestal meer dan bij blokken
Samenhang	Meestal minder dan bij zuilen	Meestal meer dan bij blokken
Toplaaginstabiliteit	Meestal minder dan bij zuilen	Meestal meer dan bij blokken

De stabiliteit van de toplaag wordt uitgerekend met behulp van het rekenmodel (software) STEENTOETS (opvolger van Anamos). Bij het gebruik van STEENTOETS dient de gebruiker

het type bekleding aan te geven. Zuilen zijn volgens de STEENTOETS berekening stabielere dan blokken.

1.2 Opdracht

Hill Innovations B.V. en het Innovatie Testcentrum (ITC) van de Waterdienst van Rijkswaterstaat hebben Deltares verzocht onderzoek te doen naar de stabiliteit van Hillblock als taludbekleding voor dijken. Deze opdracht is vastgelegd in een overeenkomst (Samenwerkingsovereenkomst betreffende het onderzoek "Modelproeven van Hillblock taludbescherming", zaaknummer 31058835). Om de hydraulische stabiliteit vast te stellen is besloten tot het uitvoeren van grootschalige proeven in de Deltagoot. In dit rapport zijn de proeven omschreven en de resultaten samengevat.

1.3 Projectorganisatie

Het onderzoek werd in september-oktober 2011 uitgevoerd door Dr. ir. G. Wolters en ir. P. van Steeg. De kwaliteitsborging is verzorgd door ir. M. Klein Breteler.

2 Schaling

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

Het model in de Deltagoot is ingebouwd met als uitgangspunt een geometrische schaal van 1:2. In het schaalmodel is gebruik gemaakt van Hillblocks met een toplaagdikte van 20 cm, en horizontale afmetingen van 12,5 cm x 12,5 cm. Gegeven deze schaal komt dat dus overeen met Hillblocks met een toplaag dikte van 40 cm, en de gebruikelijke horizontale afmetingen van 25 cm x 25 cm.

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

2.1 Faciliteit

De proeven zijn uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. De Deltagoot heeft een lengte van 240 m, een breedte van 5 m en een diepte van 7 m. De goot is voorzien van een golfschot waarmee zowel regelmatige als onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. Tevens is het golfschot voorzien van een systeem dat gereflecteerde golven compenseert zodat deze niet opnieuw bij het golfschot in de richting van de constructie reflecteren.

Afhankelijk van de waterdiepte en golfperiode kan het golfschot onregelmatige golven opwekken tot ongeveer $H_s = 1,50$ m. Met deze golfhoogte is het mogelijk de maximale golfcondities op beschutte locaties in estuaria en binnenwateren op volle schaal te reproduceren. Op veel plaatsen langs de Nederlandse kust zijn de maatgevende golven echter tot wel tweemaal zo hoog. Daarom is het onderhavige onderzoek uitgevoerd op schaal. Gekozen is voor een schaal van 1:2. Bij deze schaling is de maximale significante golfhoogte die kan worden geproduceerd op prototype schaal gelijk aan $H_s = 3$ m.

2.2 Schaling

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

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

Met:

u	=	snelheid	(m/s)
g	=	zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
L	=	lengte	(m).

In deze paragraaf wordt de schaling verder uitgewerkt voor het geval dat de lengteschaal ($n_L = L_{\text{prototype}} / L_{\text{model}}$) in dit model gelijk is aan 2. Uit de bovenstaande schaalregel zijn dan de volgende verbanden te leggen:

- Tijdschaal : $n_t = \sqrt{n_L}$ in dit geval dus $\sqrt{2} \approx 1,4$
- Golfhoogte : $n_H = n_L$ in dit geval dus 2

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

De dikte van de toplaag is bepaald met de belastingparameter (en afhankelijk van de maximale golfcondities in de goot), welke is gedefinieerd als $H_s/(\Delta D)$. De belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ kan worden gezien als de verhouding tussen de belasting (de golfhoogte H_s) en de sterkte (relatieve soortelijke massa Δ en dikte D).

In de belastingparameter wordt gebruik gemaakt van de volgende symbolen:

H_s	=	significante golfhoogte	(m)
Δ	=	relatieve soortelijke massa van Hillblocks ten opzichte van het water $(\rho_{\text{Hillblock}} - \rho_{\text{water}}) / \rho_{\text{water}}$	(-)
D	=	dikte van de Hillblock toplaag gedefinieerd als de afstand tussen de bovenzijde en de onderzijde	(m)
ρ	=	soortelijke massa	(kg/m ³)

De belastingparameter in prototype dient gelijk te zijn aan de belastingparameter in het model.

De schaling van 1:2 is voor alle lengte eenheden van het Hillblock toegepast.

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

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

Met:

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

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

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

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

Met:

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

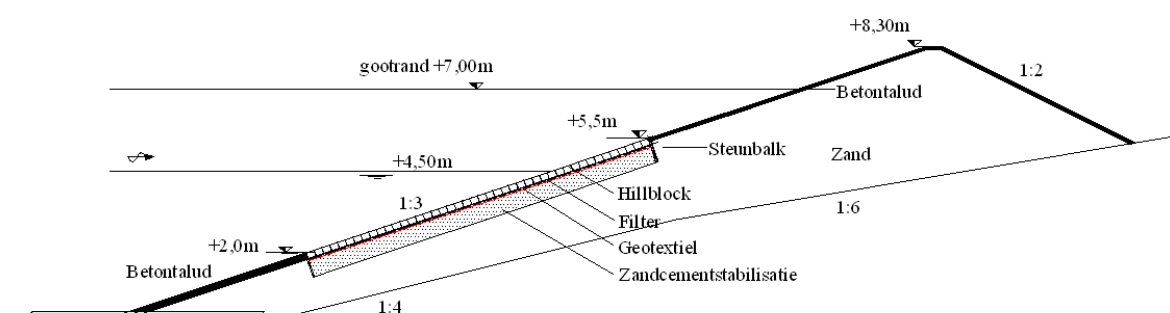
De leklengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal: $n_\lambda = n_L = 2$. Met het rekenmodel STEENTOETS (Klein Breteler, 2009) is de leklengte in prototype omstandigheden en in het model berekend. Uit de berekeningen is gebleken dat het filter een korrelgrootte $D_{f15} = 12-13$ mm dient te hebben met een laagdikte $b = 7$ cm om goed overeen te komen met het gebruikte filter in werkelijkheid.

Hoewel de beproefde Hillblocks (Basisblock en Slimblock) één specifieke maat hadden, namelijk de op schaal gereproduceerde elementen van 40 cm hoogte, wordt met het onderzoek voldoende specifieke kennis opgedaan over de werking van het systeem, dat met de proefresultaten ook uitspraken gedaan kunnen worden over de stabiliteit van Hillblocks met andere toplaagdiktes. Belangrijke aspecten van de stabiliteit, zoals de klemming, het optreden van stijghoogte verschillen over de toplaag en het uitspoelen van inwasmateriaal zullen niet wezenlijk anders zijn als de afmetingen van de Hillblocks wat anders zijn. Zoals dat gebruikelijk is bij steenzettingen, worden de proefresultaten representatief geacht voor toplaagdiktes tussen 15 cm en 50 cm. Voor alle steenzettingen geldt dat de meeste ervaring is opgedaan met steenzettingen met relatief dunne toplaag. Extrapolatie van die kennis is wel mogelijk, maar er is geen vertrouwen in dergelijke extrapolatie voor toplaagdiktes boven de 50 cm.

3 Modelopstelling

3.1 Algemeen

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



Figuur 3.1 Schematische doorsnede van dijklichaam in de Deltagoot

De dwarsdoorsnede van de modelopstelling is gegeven in Figuur 3.1 en Figuur B.1. De opstelling bestaat uit een dijklichaam van zand waarop de kleilaag is gesimuleerd met een laag zand-cementstabilisatie. Bovenop de stabilisatielaag is een geotextiel toegepast tegen het uitspoelen van het zand. Op het geotextiel is een filterlaag aangebracht met een dikte van 7 cm. Het gebruikte filtermateriaal heeft een D_{f15} van 12 mm en een D_{f90} van 30 mm. Op de filterlaag is de laag Hillblocks aangebracht. Hierbij is het talud in twee secties opgesplitst. Aan de westzijde van het talud zijn Hillblocks van het type Basisblock aangebracht, aan de oostzijde van het talud zijn Hillblocks van het type Slimblock toegepast. De toplaag is ingewassen met gebroken steenslag (hoekig): $D_{15} = 5$ mm, $D_{50} = 8,5$ mm en $D_{90} = 11$ mm. Het inwasmateriaal is alleen aangebracht ter hoogte van de voet van de Hillblocks (onderste 7 à 8 cm van de toplaag).

De proefopstelling heeft de volgende afmetingen:

- Hoogte van de dijk ten opzichte van de bodem van de goot: 8,3 m
- Taludhelling: 1:3
- Een filterlaag van steenslag van 7 cm dik
- Hillblocks (Slimblock en Basisblock) met een hoogte van $D = 20$ cm en een soortelijke massa van gemiddeld 2372 kg/m^3 . De afmetingen zijn weergegeven in Figuur B.7.
- Hillblocks 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 boven de gootbodem.
- Een dummy bekleding (beton) van 5,5 m boven de gootbodem tot de kruin van de dijk.

- Alle stabiliteitsproeven (Test T001 tot en met Test T014) zijn uitgevoerd met een waterstand van 4,5 m boven de gootbodem. De golfoploopprouwen (Test T016 tot en met Test T019) zijn uitgevoerd met een waterstand van 3,1 m boven de gootbodem.

Om deze dijk in de Deltagoot te kunnen bouwen zijn de gootwanden ter plaatse van de kruin wat opgehoogd. Het dijklichaam is tevens voorzien van drainage zodat eventuele snelle waterstandwisselingen in de goot niet zouden leiden tot het opbarsten van de dichte betonnen teen.

Tussen de gootwand en de bekleding is een strook celrubber aangebracht zoals dat gebruikelijk is bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klemwigt tussen de starre gootwand waardoor een overschatting van de stabiliteit zou worden verkregen. Tevens zijn langs de gootwanden hoekstalen aangebracht die ervoor zorgen dat er geen schade optreedt langs de wanden als gevolg van de overgang van de Hillblocks naar het rubber en van het rubber naar de gootwand. Bij de overgang tussen de Slimblocks en de Basisblocks zijn geen additionele maatregelen getroffen. Deze Hillblocks zijn tegen elkaar aan geplaatst.

3.2 Plaatsing toplaagelement Hillblock

De Hillblocks zijn in de Deltagoot geplaatst door personeel van Deltares. De ligging van de Hillblocks is verduidelijkt door het markeren van verschillende rijen. Dit vergemakkelijkt het identificeren en benoemen van rijen waar eventuele schade optreedt. Bij de proeven met Hillblocks is er echter geen schade door de golfbelasting ontstaan.

In Figuur 3.2 is het plaatsingspatroon van de Hillblocks weergegeven: de Hillblocks zijn per rij geplaatst. Hierbij is de 'naad' tussen twee aansluitende Hillblocks verticaal gekozen. Inklemming van het Hillblock is alleen mogelijk aan de kop of aan het voetstuk. Het voetstuk is om deze reden ingewassen met inwasmateriaal. De hoogte van het inwasmateriaal is circa 7 cm (gelijk aan de hoogte van de voet). Dit is zodanig gedaan dat het gedeelte boven het voetstuk van het Hillblock bij aanvang van een testserie niet is gevuld met inwasmateriaal (uitzondering Serie 3: zie Paragraaf 4.4).

3.3 Meetinstrumenten

Tijdens de proeven zijn golfhoogtemetingen uitgevoerd en na elke proef zijn profielmetingen gedaan. De resultaten zijn weergegeven in Bijlage A (tabellen van golfkarakteristieken tijdens de proeven), Bijlage C (overschrijdingskrommen van de golfhoogten en golfspectra) en Bijlage D (verschilprofielen van het talud). In de volgende paragrafen wordt de methodiek van deze metingen toegelicht.

3.3.1 Golfhoogtemetingen

De golven zijn gemeten met drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit twee parallel aan elkaar, verticaal gespannen draden, waarvan de onderlinge weerstand verandert met de oppervlakte-uitwijking van de waterspiegel. De golfhoogtemeters hingen op respectievelijk 80 m, 85 m en 87 m van het golfschot.



Figuur 3.2 Ligging van de Hillblocks in de Deltagoot (links Basisblock, rechts Slimblock)

Door het toepassen van drie golfhoogtemeters op bepaalde afstanden van elkaar kunnen de inkomende en de door de constructie gereflecteerde golven worden bepaald met de methode van Mansard en Funke (1980). Dit gebeurt met het standaard Deltares software pakket voor golfanalyse: AUKE-PC. Deze uitwerking geeft vervolgens aan welke golfcondities tijdens de proef zijn bereikt. De overschrijdingskrommen van de inkomende golven zijn bepaald door de gemiddelde waarden van de totale overschrijdingskromme per golfhoogtemeter te nemen en deze te corrigeren met de gemeten reflectiecoëfficiënt C_r :

$$H_i = \frac{H_t}{\sqrt{1+C_r^2}} \quad (3.1)$$

Waarbij

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

3.3.2 Profielmetingen

Het niveau van het taludoppervlak is gemeten met de standaard profielvolger van de Deltagoot (zie Figuur 3.3). Dit apparaat bestaat uit een wieltje dat over het taludoppervlak rijdt en constant het niveau van het talud meet (zowel de horizontale als de verticale coördinaat van elk punt op het talud). Deze meting is over vier raaien uitgevoerd. Raai 1 lag op een afstand van 0,80 m van de westelijke gootwand. Raai 2 lag op een afstand van 1,90 m van de westelijke gootwand. Raai 1 en Raai 2 reden dus over de Basisblocks. Raai 3 lag op een afstand van 1,86 m van de oostelijke gootwand. Raai 4 lag op een afstand van 0,85 m van de oostelijke gootwand. Raai 3 en Raai 4 lagen dus op de Slimblocks.



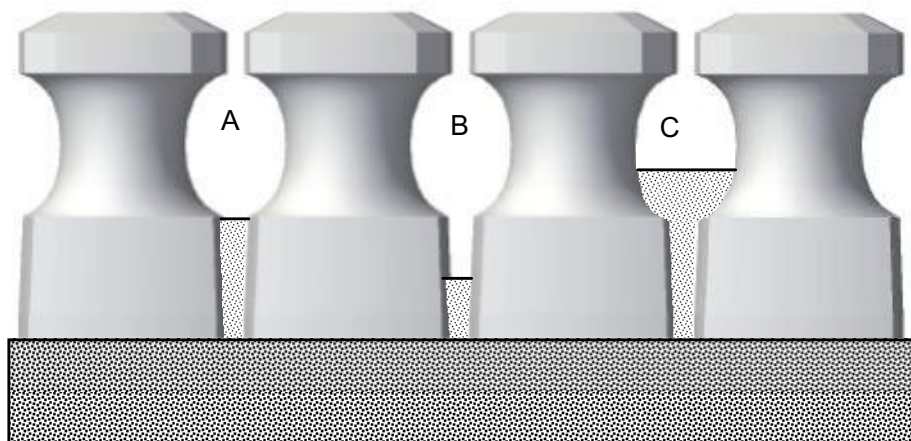
Figuur 3.3 De profielvolger tijdens een profielmeting

De verschilprofielen zijn gerapporteerd in Bijlage D. Het verschilprofiel geeft de verandering aan van het niveau van het talud ten opzichte van het niveau van het talud direct nadat dit is gebouwd. Vanwege de vorm van de kop van de Hillblocks en de aanwezigheid van enkele kleine steentjes op het talud, ontstond een verstorend beeld in de verschilprofielen. Om deze reden zijn deze verstoringen uit de verschilprofielen gefilterd. Dit is gedaan door op elke positie het gemiddelde verschil over een lengte van 10 cm te bepalen (voortschrijdend gemiddelde).

3.3.3 Metingen inwasmateriaal

Na iedere proef is op enkele locaties voor zowel het Slimblock als het Basisblock een handmeting uitgevoerd naar de mate waarin het inwasmateriaal is uitgespoeld. Het inwasmateriaal is gemeten omdat dit voor de meeste typen steenbekledingen van belang is voor de mate van inklemming. Een betere inklemming van de steenbekleding draagt bij aan een hogere stabiliteit. De meting is uitgevoerd ter plaatse van het midden van de grote openingen in het taludoppervlak, die gevormd worden door de afgeschuinde hoeken van de Hillblocks. Het is daarom mogelijk dat er elders in de openingen nog steeds steentjes

aanwezig zijn ook al blijkt dit niet uit de metingen. Daardoor kan er nog steeds een goede klemming zijn ook al is er uitspoeling gemeten. Resultaten van de metingen zijn weergegeven in Figuur B.4 en Figuur B.5, uitgedrukt in het aantal centimeters inwasmateriaal dat is geërodeerd. Een indruk van het inwasmateriaal na een test is weergegeven in Foto E.9. Een schematisatie van erosie en ophoping van inwasmateriaal is weergegeven in Figuur 3.4. De resultaten worden beschreven in Hoofdstuk 4 en geanalyseerd in Hoofdstuk 5.



A = beginnsituatie (in werkelijkheid staan de Hillblocks dichter tegen elkaar aan dan hier aangegeven)
 B = erosie van inwasmateriaal
 C = ophoping van inwasmateriaal

Figuur 3.4 Schematische weergave van inwasmateriaal tussen de voet van het Hillblock (verticale doorsnede).

3.3.4 Golfploopmetingen

Tijdens vier testen (Test T16, T17, T18 en T19) zijn er golfploopmetingen uitgevoerd. De oploophoogten voor iedere golfploop is visueel waargenomen. Dit is uitgevoerd voor de zijde waar Basisblocks zijn aangebracht. Hiertoe zijn horizontale strepen op het talud aangebracht. Het resultaat is een overschrijdingscurve voor de dimensieloze golfploop R_v/H_{m0} zoals weergegeven in Figuur 5.3. Hierbij wordt opgemerkt dat het overschrijdingspercentage is gedefinieerd als het aantal oplopen gedeeld door het aantal inkomende golven (en niet het totaal aantal golfplopen). Een analyse van de resultaten is weergegeven in Hoofdstuk 5.

3.4 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestaat uit drie testseries. De eerste twee testseries zijn uitgevoerd met korteduurproeven met een duur van circa 1000 golven om de stabiliteit van de steenzetting vast te stellen bij twee verschillende golfsteelheden. Hiertoe was het plan om de significante golfhoogte in elke serie stap voor stap op te hogen totdat de bekleding bezwijkt of totdat, zoals in deze testseries het geval was, de maximum capaciteit van de golfgenerator wordt bereikt.

Binnen deze testseries zijn tevens testen uitgevoerd waarbij er een ander golfspectrum (Jonswap) is toegepast en zijn er testen gedaan waarbij de golfploophoogte is bepaald.

Na de korteduurproeven (Serie 1 en Serie 2) zijn er langeduurproeven uitgevoerd (Serie 3). Deze proeven geven inzicht in de sterkte van de bekleding tijdens een lang aanhoudende storm. Dit is belangrijk in gebieden als de Oosterschelde en het IJsselmeer waar het waterniveau tijdens een storm vrij constant kan zijn, waardoor steeds dezelfde strook van het talud wordt belast. Tevens is er binnen deze testserie een proef uitgevoerd waarbij er voor aanvang van de test een kunstmatige schade is aangebracht door zowel aan de sectie met Slimblocks als aan de sectie met Basisblocks een half Hillblock handmatig te verwijderen. Op

deze manier wordt inzicht verschaft in het gedrag van de bekleding na initiële schade. De locatie van deze aangebrachte schade is weergegeven in Figuur B.3.

De golfcondities van de proeven worden gekarakteriseerd door de significante golfhoogte (H_{m0}) en de piekperiode (T_p). De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz spectrum of een JONSWAP spectrum. Deze spectra zijn karakteristiek voor de Nederlandse wateren.

In Tabel 3.1 zijn de gerealiseerde condities (in modelwaarden) weergegeven. De golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheidspectra zijn weergegeven in Bijlage C.

Tabel 3.1 Proevenprogramma met gerealiseerde waarden

omschrijving serie	proef	Series	proefcondities				inkomende golf parameters							
			h (m)	Spectrum	N (-)	Duur (h)	H_{m0} (m)	H_{max} (m)	T_p (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	$F(-)$ (-)
korteduur sop = 2%	T001	Series 1	4.50	PM	1102	1.2	0.80	1.32	5.1	4.5	0.020	2.4	2.9	5.1
	T002	Series 1	4.50	PM	1117	1.3	1.01	1.60	5.6	5.1	0.020	2.3	3.7	6.5
	T003	Series 1	4.50	PM	1086	1.4	1.21	1.92	6.1	5.6	0.021	2.3	4.4	7.7
	T004	Series 1	4.50	PM	1129	1.6	1.38	2.03	6.7	6.0	0.020	2.4	5.0	9.0
	T005	Series 1	4.50	PM	1077	1.5	1.49	1.96	6.9	6.2	0.020	2.4	5.4	9.6
korte duur sop = 4%	T006	Series 2	4.50	PM	949	0.9	0.98	1.42	4.2	3.9	0.035	1.8	3.6	5.2
	T007	Series 2	4.50	PM	1049	1.1	1.23	1.80	4.6	4.3	0.037	1.7	4.5	6.5
	T008	Series 2	4.50	PM	1007	1.2	1.46	1.98	5.1	4.9	0.035	1.8	5.3	7.8
lange duur proeve n	T009	Series 3	4.50	PM	4201	4.8	1.43	1.90	5.1	4.8	0.036	1.8	5.2	7.6
	T010	Series 3	4.50	PM	7149	8.6	1.42	1.92	5.0	4.8	0.036	1.8	5.2	7.5
	T011	Series 3	4.50	PM	10702	12.0	1.42	1.93	5.0	4.8	0.036	1.8	5.2	7.6
schade, spectrum, overslag	T014	Series 2	4.50	J	986	1.2	1.50	1.98	5.3	5.2	0.034	1.8	5.5	8.2
	T015	Series 3	4.50	PM	1017	1.2	1.45	1.83	5.2	4.9	0.035	1.8	5.3	7.8
	T016	Series 2	3.10	J	953	0.8	0.74	1.11	3.3	3.1	0.043	1.6	2.7	3.7
	T017	Series 1	3.10	J	1038	1.0	0.81	1.15	4.5	4.2	0.026	2.1	2.9	4.8
	T018	Series 1	3.10	J	1061	1.1	0.94	1.54	4.9	4.8	0.025	2.1	3.4	5.7
	T019	Series 2	3.10	J	960	0.9	0.91	1.34	3.8	3.8	0.040	1.7	3.3	4.7

PM = Pierson Moskowitz, J = JONSWAP

Hierbij zijn de volgende parameters gebruikt:

D	=	dikte van de toplaag	(m)
$E(f)$	=	energiedichtheid als functie van f	($m^2 s$)
f	=	golffrequentie = $1/T$	(Hz)
h	=	waterdiepte	(m)
H_{m0}	=	significante inkomende golfhoogte	(m)
H_{max}	=	grootste gemeten golfhoogte	(m)
$H_s/(\Delta D)$	=	belastingparameter	(-)
H_s	=	inkomende significante golfhoogte. In dit rapport gedefinieerd als H_{m0}	(m)
L_{op}	=	golfdiepte op diep water ($gT_p^2/(2\pi)$)	(m)
m_0	=	nulde moment van de energiedichtheid = $\int E(f)df$	(m^2)
N	=	aantal golven tijdens de proef	(-)
s_{op}	=	golfsteilheid op basis van de piekperiode (H_{m0}/L_{op})	(-)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum	(s)
$T_{m-1.0}$	=	spectrale periodemaat	(s)
α	=	taludhelling	($^\circ$)
Δ	=	relatieve soortelijke massa van de steenzetting $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$	(-)
ξ_{op}	=	brekerparameter ($\tan(\alpha)/\sqrt{(s_{op})}$)	(-)
ρ_s	=	soortelijke massa van bekleding	(kg/m^3)
ρ_w	=	soortelijke massa van water	(kg/m^3)

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

In Tabel 3.1 is te zien dat de golfsteilheid (s_{op}) tijdens Serie 1 lager is dan tijdens Serie 2, omdat de lagere golfsteilheid een relatief zware belasting geeft op de bekleding. Daardoor is de verwachting dat reeds bij een kleinere golfhoogte schade ontstaat. Het proevenprogramma van Serie 3 is uitgevoerd met de hoogst mogelijke golfcondities aangezien er tijdens Serie 1 en Serie 2 geen schade was ontstaan.

De genoemde waarden in Tabel 3.1 zijn op schaal 2 in de Deltagoot. De totale overeenkomstige belastingduur van de langeduurproeven (Proef T008 – T015) in werkelijkheid is $\sqrt{2}$ groter, dus in totaal 29 uur $\times \sqrt{2} = 41$ uur.

Tijdens de proeven is steeds de waterstand aangehouden zoals weergegeven in Tabel 3.1. Na elke proef is de waterstand verlaagd en de bekleding geïnspecteerd om te zien of er schade is ontstaan. Met de 'profiler' wordt het profiel op vier rijen ingemeten (paragraaf 3.3.2) en wordt met een handmeting de erosiediepte van het inwasmateriaal bepaald (zie paragraaf 3.3.3). Tijdens de proeven zijn opnamen gemaakt met een digitale videocamera.

4 Proefresultaten

4.1 Algemeen

Bij elke proef is steeds dezelfde procedure gevolgd. Na een proef is een peiling van het taludoppervlak uitgevoerd zoals beschreven in paragraaf 3.3.2. Vervolgens is het water weggepompt zodat op het droge talud een visuele inspectie uitgevoerd kon worden van de toestand van de bekleding, het inwasmateriaal en het filtermateriaal. Tevens is de diepte in de spleten opgemeten om te bepalen hoeveel inwasmateriaal er is verdwenen of bijgekomen. Dit is uitgevoerd op van tevoren vastgestelde locaties. Deze meting is toegelicht in paragraaf 3.3.3. Het inwasmateriaal is niet aangevuld tenzij hieronder anders is beschreven.

In de volgende paragrafen zal eerst het algemene beeld van de constructie tijdens de proeven worden besproken waarna vervolgens iedere proevenserie afzonderlijk nog aan bod zal komen. Een analyse van de proefresultaten wordt gegeven in Hoofdstuk 5.



Figuur 4.1 Beproeven van de Hillblocks in de Deltagoot

Op het gebied van de stabiliteit heeft de constructie goed gepresteerd onder de opgelegde testcondities, aangezien er geen schade en geen begin van schade is opgetreden. Er zijn geen individuele bewegingen van Hillblocks ten opzichte van naastgelegen Hillblocks

waargenomen. De maximale gemeten amplitude van de vervorming van het talud lag ver onder de schadegrens. Dit is hieronder gekwantificeerd.

Bij drie testen (T001, T003 en T008) brak er één kop per test van een halve Hillblock af. Bij Test T001 en Test T003 betrof dit een Slimblock, bij Test T008 betrof dit een Basisblock. De locaties hiervan zijn weergegeven in Figuur B.3. Tijdens Test T001 trad dit op na circa 10 minuten na aanvang van de test. De locatie was in de golfploopzone. De test is toen stopgezet om dit Slimblock te vervangen. Tijdens Test T003 trad dit op na circa 40 minuten na aanvang van de test. De locatie was in het lagere gedeelte van de golfimpactzone. Test T003 is niet stopgezet. Tijdens T008 is de kop van een half Basisblock afgebroken. De locatie was onder de golfimpactzone. Dit is waargenomen nadat de test was afgelopen.

Na Test T003 en Test T008 zijn de omliggende Hillblocks vastgezet met tie-rips om te voorkomen dat er schade zou optreden als gevolg van dit modeffect. Achteraf gezien was dit waarschijnlijk niet nodig geweest, aangezien in Test T015 er geen uitbreiding van de kunstmatig aangebrachte schade is opgetreden. Toen was kunstmatig schade aangebracht aan de bekleding door een half Hillblock te verwijderen. Bij deze test bleek er geen verdere schade op te treden (zie ook Paragraaf 4.4 en Paragraaf 5.4).

Het afbreken van de koppen van de Hillblocks wordt beschouwd als een modeffect, aangezien het een proefproductie betrof.

Tijdens de testen spoelde relatief weinig van het inwasmateriaal weg ten opzichte van vergelijkbare steenzettingen. De metingen zijn weergegeven in Figuur B.4 en Figuur B.5. Hoe de metingen zijn uitgevoerd is beschreven in Paragraaf 3.3.3. Een deel van het aanwezige inwasmateriaal dat na een test aanwezig was lag geklemd tussen de steenzetting, een gedeelte lag ook los. Een verdere analyse van het inwasmateriaal is weergegeven in Hoofdstuk 5.

Voor het beoordelen van de staat van de bekleding na elke proef zijn de volgende criteria aangehouden:

- Bij het ontstaan van een S-profiel met een amplitude van 5 cm wordt er gesproken van begin van schade, indien de amplitude 10 cm of meer is wordt er gesproken van bezwijken.
- Indien een individueel Hillblock 2 tot 5 cm uit de bekleding steekt ten opzichte van de omliggende stenen wordt dit als begin van schade aangemerkt, en indien het Hillblock helemaal uit de bekleding is, wordt dit gekwalificeerd als bezwijken.

In de volgende paragrafen worden de proefresultaten per series beschreven.

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

Tijdens Serie 1 is er geen schade en geen begin van schade opgetreden. De maximale gemeten amplitude van de opgetreden vervorming van het taludoppervlak was gering en bedroeg slechts 0,7 cm (zetting) en 0,4 cm (opbolling). De metingen zijn beschreven in Paragraaf 3.3.2 en weergegeven in Figuur D.1 en Figuur D.2. Een verdere analyse van het uitspoelen van het inwasmateriaal is weergegeven in Hoofdstuk 5.

Na Test T001 bleek er enige sprake van uitwassing van het inwasmateriaal te zijn (zie Figuur B.4 en Figuur B.5). Dit is opnieuw aangevuld. Na Test T002 en Test T003 zijn alleen de bovenste drie rijen opnieuw ingewassen. Bij de Basisblocks bleek dat het inwasmateriaal vlak onder de waterlijn zich ophoopte (na Test T005 maximaal circa 5 cm ophoping) in de open ruimten van de Hillblocks. Onder en boven de waterlijn was er sprake van enige uitspoeling

(maximaal circa 2 cm). Bij de Slimblocks was er over het gehele profiel sprake van uitspoeling (0 cm tot 6 cm). De metingen zijn weergegeven in Figuur B.4 en Figuur B.5. Hoe de metingen zijn uitgevoerd is beschreven in Paragraaf 3.3.3.

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

Tijdens Serie 2 is er geen schade en geen begin van schade opgetreden. De totale maximale amplitude van de opgetreden vervorming van het taludoppervlak ten opzichte van de beginsituatie (dus de zetting van Series 1 en Series 2 samen) was zeer gering en bedroeg slechts 0,7 cm (zetting) en 0,5 cm (opbolling). De metingen zijn beschreven in Paragraaf 3.3.2 en weergegeven in Figuur D.1 en Figuur D.2.

Voordat de eerste test van Serie 2 werd uitgevoerd is het inwasmateriaal hersteld. Op locaties waar ophopingen waren is er met behulp van een stofzuiger inwasmateriaal weggezogen en op locaties waar inwasmateriaal is verdwenen, is opnieuw inwasmateriaal aangebracht. Op deze manier is er dus weer sprake van een beginsituatie. Tussen iedere test is er geen inwasmateriaal meer aangebracht of weggezogen.

Bij de Basisblocks was er boven de waterspiegel lichte uitspoeling van inwasmateriaal (erosiediepte van circa 1,5 cm). Vlak onder de waterspiegel was er enige ophoping (na Test T008 circa 4 cm). Bij de Slimblocks was er over het gehele talud sprake van uitspoeling van inwasmateriaal (erosiediepte van circa 1 tot 3 cm). De metingen zijn weergegeven in Figuur B.4 en Figuur B.5. Hoe de metingen zijn uitgevoerd is beschreven in Paragraaf 3.3.3.

Na Test T008 is er geen inwasmateriaal aangebracht of weggezogen. Op deze manier vormt Test T008 zowel onderdeel van Series 2 en Series 3 (langeduurproeven).

Test T014 is uitgevoerd om, in plaats van een Pierson-Moskowitz spectrum, een JONSWAP spectrum toe te passen. Test T014 is uitgevoerd zodat aangetoond kon worden dat de Hillblock bekleding ook met de maximale significante golfhoogte in de Deltagoot met een JONSWAP spectrum stabiel is.

4.4 Serie 3, langeduurproeven, $s_{op} = 0,04$

Tijdens Serie 3 is er geen schade en geen begin van schade opgetreden. De totale maximale amplitude van de opgetreden vervorming van het taludoppervlak ten opzichte van de beginsituatie (dus de zetting van Series 1, Series 2 en Series 3 samen) was gering en bedroeg slechts 1,1 cm (zetting) en 1,0 cm (opbolling). De metingen zijn beschreven in Paragraaf 3.3.2 en weergegeven in Figuur D.1 en Figuur D.2.

De totale tijd, dat er is gegolfd met de maximale significante golfhoogte, bedroeg 29 uur. Test T008 maakt zowel deel uit van Series 2 als van Series 3. Na Test T008 is het inwasmateriaal dan ook niet teruggebracht in de oorspronkelijke conditie.

Het inwasmateriaal bij de Basisblocks was onder de waterlijn circa 1 cm uitgespoeld. Boven de waterlijn was dit circa 2 cm. Het inwasmateriaal bij de Slimblocks was overal deels uitgespoeld met een maximum tot circa 6 cm. De metingen zijn weergegeven in Figuur B.4 en Figuur B.5. Hoe de metingen zijn uitgevoerd is beschreven in Paragraaf 3.3.3.

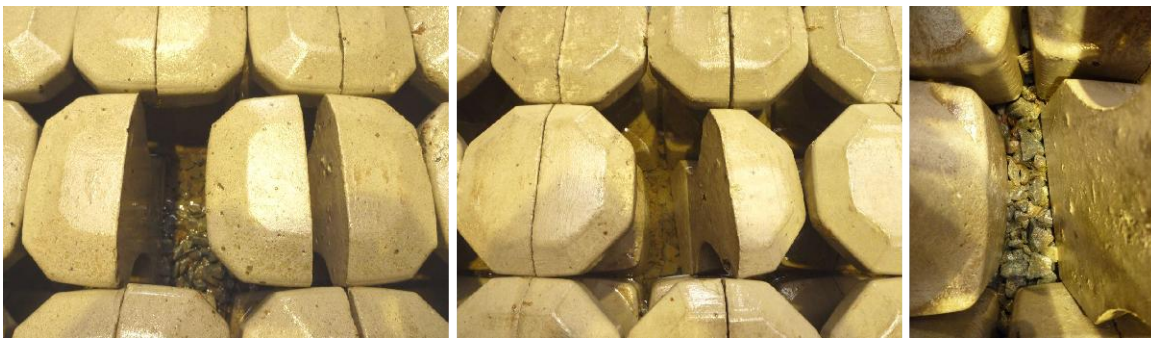
Na afloop van de langeduurproeven is er kunstmatig schade aangebracht om een eerste indruk van de reststerkte van een Hillblock taludbescherming te verkrijgen. Daartoe is er, voordat Test T015 is gestart, handmatig een half Basisblock en een half Slimblock uit het talud verwijderd. Dit is gedaan daar waar, op basis van een analyse met STEENTOETS, een

maximaal stijghoogteverschil valt te verwachten. De locatie van deze Hillblocks is aangegeven in Figuur B.3. Een indruk is weergegeven in Figuur 4.2.



Figuur 4.2 Kunstmatig aangebrachte schade voor Test T015 (v.l.n.r.: overzicht, detail Basisblock, detail Slimblock, de middelste en rechter foto zijn 180° gedraaid t.o.v. de linkerfoto)

Tijdens Test T015 is geen additionele schade opgetreden. De situatie na Test T015 is weergegeven in Figuur 4.3. Te zien valt dat de naastgelegen Hillblocks enigszins zijn verschoven maar dat er geen sprake is van additionele schade. Ook met betrekking tot de zetting van de Hillblocks is er geen noemenswaardig verschil opgetreden.



Figuur 4.3 Situatie na Test T015 (v.l.n.r.: detail Basisblock, detail Slimblock, detail Slimblock ingezoomd)

5 Analyse van de proefresultaten

5.1 Stabiliteit

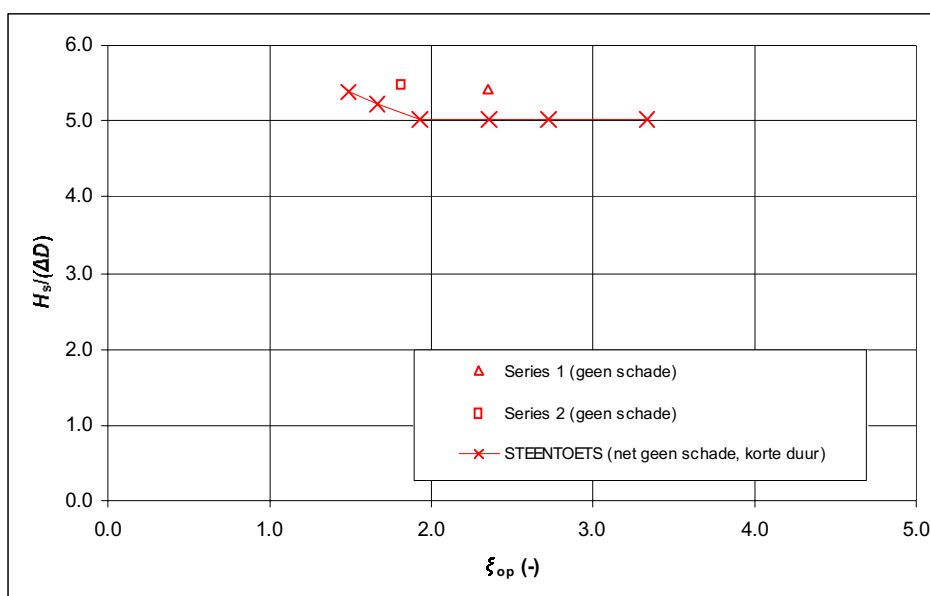
In Figuur 5.1, Figuur 5.2 en Figuur B.6 zijn de huidige resultaten zoals beschreven in dit rapport vergeleken met de criteria voor zuilen zoals berekend met STEENTOETS. Deze criteria zijn gebaseerd op TAW (2003). In Figuur 5.1 is dit weergegeven voor de korteduurproeven, in Figuur 5.2 zijn de resultaten weergegeven voor de langeduurproeven. In deze figuren zijn alleen de zwaarste golfcondities binnen een testserie weergegeven. Een overzicht van alle golfcondities is weergegeven in Figuur B.6.

In de figuren is op de horizontale as de brekerparameter ξ_{op} weergegeven. Op de verticale as is de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ weergegeven. Uit de figuren valt af te leiden dat de aangetoonde stabiliteit van de Hillblocks hoger ligt dan het schadecriterium zoals berekend met STEENTOETS. Dit geldt voor zowel een korte duurbelasting als een lange duurbelasting, Tijdens de langeduurproeven bleek de stabiliteit zelfs ruim 30% hoger te liggen dan berekend met STEENTOETS (uitgedrukt in de waarde van de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$).

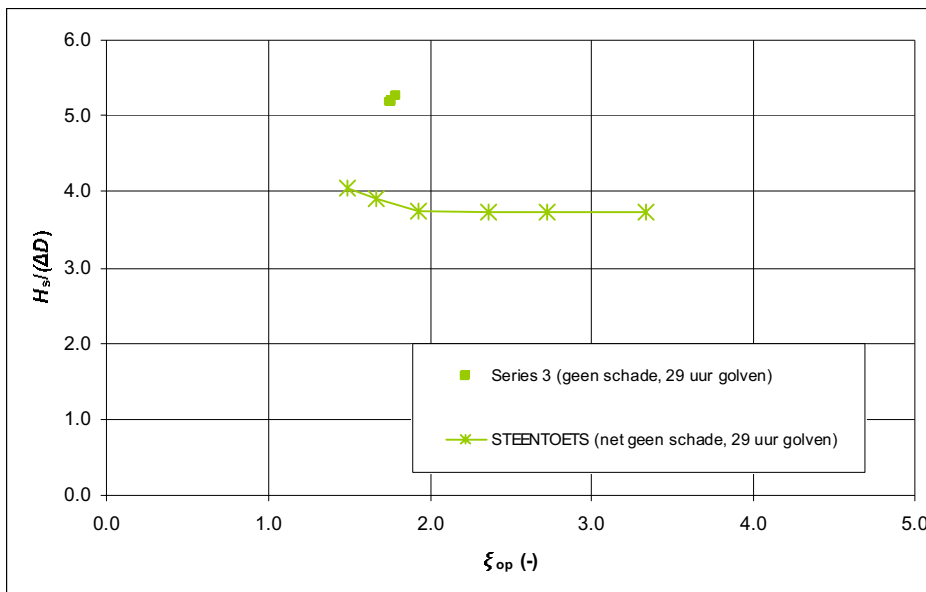
In de STEENTOETS berekening wordt als dikte van de toplaag de afstand aangehouden tussen het bovenvlak en het ondervlak van de Hillblocks. Bij de proeven met de zwaarste belasting was de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ gelijk aan 5,4, 5,5 en 5,2 voor respectievelijk Series 1, Series 2 en Series 3.

Aangezien er aan de steenzetting geen schade is opgetreden kan worden gesteld dat de werkelijke stabiliteit hoger is dan de waarde die hier is aangetoond. Om de werkelijke stabiliteit aan te tonen dienen er proeven uitgevoerd te worden met een hogere golfbelasting of proeven waarbij de proefopstelling op een kleinere schaal wordt gebouwd.

Er wordt geconcludeerd dat een steenzetting met Hillblocks een stabiliteit heeft die voldoet aan de stabiliteitseisen van een zuilenbekleding zoals is berekend met STEENTOETS.



Figuur 5.1 Vergelijking STEENTOETS en proefresultaten Hillblock (korteduurproeven)



Figuur 5.2 Vergelijking STEENTOETS en proefresultaten Hillblock (langeduurproeven)

5.2 Uitspoeling inwasmateriaal

Uit de metingen van de erosiediepte van het inwasmateriaal is nooit een erosiediepte groter dan de dikte van de voet van de toplaag gebleken (zie Paragraaf 3.3.3 en Hoofdstuk 4). Het inwasmateriaal dat geklemd zit tussen de steenzetting draagt bij aan de mate van inklemming van een steenzetting. Bij een hogere mate van inklemming is de bekleding stabiel. Losliggend inwasmateriaal tussen de steenzetting heeft geen invloed op de inklemming.

5.3 Uitspoeling filtermateriaal

Op basis van de visuele observaties, de geringe opgetreden gemeten zettingen (zie Paragraaf 3.3.2) en het feit dat het inwasmateriaal nooit volledig is uitgespoeld (zie Paragraaf 5.2), wordt geconcludeerd dat er geen filtermateriaal is uitgespoeld. Dit is van belang omdat uitspoelend filtermateriaal kan leiden tot bezwijken van de steenzetting.

5.4 Reststerkte Hillblock na initiële schade

De reststerkte is een maat voor de mate waarin een kleine schade groeit tot grote omvang. Een constructie heeft een kleine reststerkte als het als een kaartenhuis instort. De reststerkte van de steenzetting is beoordeeld door op een paar plaatsen een half Hillblock te verwijderen. Gezien de constatering dat deze beginnende schade geen verdere uitbreiding van schade geeft, maakt dat er een bepaalde mate van reststerkte in de bekleding aanwezig is gebleven. Kennelijk blijft de klemming in de overige Hillblocks nog behouden als er een halve Hillblock is verdwenen.

Het filter is niet uitgespoeld door het kunstmatig aangebrachte gat in de toplaag. Dit is in overeenstemming met de daarvoor beschikbare formules.

5.5 Bepaling reductiecoëfficiënt golfoploop

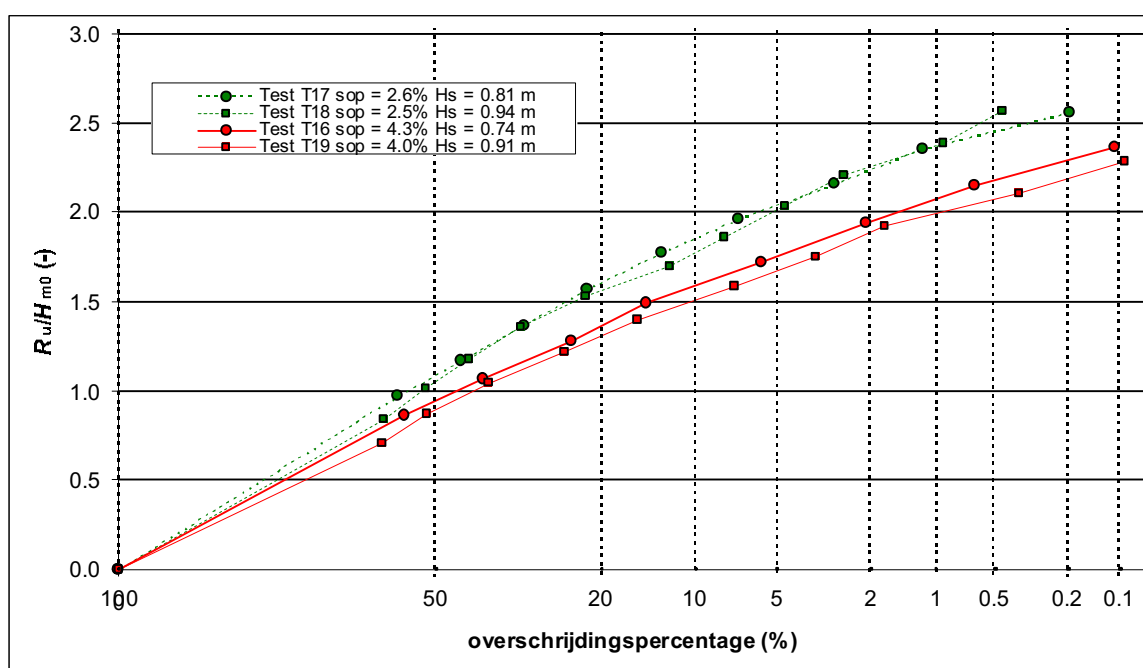
Om de golfoploopreductie van Hillblocks te bepalen zijn er een drietal stappen doorlopen.

- 1 Bepaling golfoploophoogte van een Hillblock taludbescherming
- 2 Bepaling golfoploophoogte van een glad talud op basis van TAW (2002)
- 3 Vergelijking van Hillblock taludbescherming met glad talud

5.5.1 Bepaling golfploophoogte van een Hillblock taludbescherming

De golfploophoogte wordt in TAW (2002) gedefinieerd als de verhouding tussen het 2% golfploopniveau boven de stilwaterlijn ($R_{u,2\%}$) en de significante golfhoogte H_{m0} . Deze definitie wordt ook in dit rapport aangehouden.

De 2% golfploophoogte is bepaald voor Test T16 tot en met Test T19. De overschrijdingskrommen van de golfploophoogte zijn weergegeven in Figuur 5.3. Hierbij is de horizontale (Rayleigh verdeelde) as het overschrijdingspercentage waarbij het aantal overschrijdingen is gedefinieerd ten opzichte van het totale aantal gemeten golven (en niet het aantal golflopen). De verticale as is de golfploophoogte R_u dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte H_s .



Figuur 5.3 Overschrijdingskrommen van de golfploophoogte R_u dimensieloos gemaakt met de significante golfhoogte H_s

5.5.2 Bepaling golfploophoogte glad talud op basis van TAW (2002)

Ten einde de reductie van de golfploophoogte te bepalen is er een vergelijking nodig met een situatie waarbij er geen Hillblock taludbescherming is maar een glad talud. Om deze vergelijking te kunnen maken is er voor gekozen om de golfploop formule uit TAW (2002) te gebruiken:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \min \left[1.65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0}, \gamma_f \cdot \gamma_\beta \left(4.0 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \right] \quad (5.1)$$

Met

$R_{u2\%}$ = golfploop niveau, verticaal gemeten ten opzichte van de stilwaterlijn, waarbij het aantal oplopen dat dit niveau overschrijdt 2% is van het aantal inkomende golven.

H_{m0} = significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum

- γ_b = invloedfactor voor een berm
- γ_f = invloedfactor voor de ruwheid van het talud
- γ_β = invloedfactor voor scheve golfaanval
- $\xi_{m-1,0}$ = brekerparameter gebaseerd op de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$

In dit onderzoek is er geen sprake van bermen of scheve golfaanval zodat de parameters γ_b en γ_f gelijk zijn aan 1.

In TAW (2002) wordt aangegeven dat vergelijking (5.1) statistisch gezien geen perfecte verwachtingswaarde betreft. Er wordt daarom in dit rapport, conform de definitie in TAW (2002) gesproken over een 'gemiddelde'. Rondom het gemiddelde zoals dit wordt bepaald met vergelijking (5.1) ligt een spreiding. De spreiding van extreme waarden wordt beschreven met een variatiecoëfficiënt (standaardafwijking, gedeeld door het gemiddelde) ten opzicht van het gemiddelde en bedraagt: $V = \sigma / \mu = 0,07$ waarbij:

- V = variatiecoëfficiënt
- σ = standaardafwijking bij normale verdeling
- μ = gemiddelde bij normale verdeling

5.5.3 Vergelijking van Hillblock taludbescherming met glad talud

Een overzicht van de relatieve golfploophoogte voor de verschillende testen is weergegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Overzicht reductiefactoren voor ruwheid voor een glad talud op basis van TAW (2002) en gemeten waarden voor Hillblock taludbescherming

	Test T16 $\xi_{op} = 1,6$ $H_s = 0,74$ m	Test T17 $\xi_{op} = 2,1$ $H_s = 0,81$ m	Test T18 $\xi_{op} = 2,1$ $H_s = 0,94$ m	Test T19 $\xi_{op} = 1,7$ $H_s = 0,91$ m
$(R_{u2\%,glad} / H_s)_{TAW, gemiddeld}$	2,49	2,92	2,95	2,68
$(R_{u2\%,glad} / H_s)_{TAW, 95\% \text{ bovengrens}}$	2,83	3,32	3,35	3,04
$(R_{u2\%,glad} / H_s)_{TAW, 95\% \text{ ondergrens}}$	2,15	2,52	2,55	2,31
$(R_{u2\%,glad} / H_s)_{Hillblock}$	1,95	2,25	2,25	1,90
$\gamma_{Hillblock, gemiddeld}$	0,78	0,77	0,76	0,71
$\gamma_{Hillblock, 95\% \text{ bovengrens}}$	0,91	0,89	0,88	0,82
$\gamma_{Hillblock, 95\% \text{ ondergrens}}$	0,69	0,68	0,67	0,62

De gemiddelde waarde van de reductiecoëfficiënt van een Hillblock taludbescherming in dit onderzoek varieert tussen $\gamma_f = 0,71 - 0,78$. Hierbij dient er rekening gehouden te worden met het feit dat de resultaten vergeleken zijn met de theoretische gemiddelden van de golfploop op een glad talud maar dat er rondom deze gemiddelden een spreiding ligt zoals aangegeven in Tabel 5.1.

6 Conclusies

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

- Type steenzetting: Hillblock (Basisblock en Slimblock)
- Dikte toplaag: $D = 20$ cm
- Soortelijke massa: $\rho_{\text{Hillblock}} = 2372$ kg/m³
- Dikte filter: $b = 7$ cm
- Karakteristieke korrelgrootte filter: $D_{f15} = 12$ mm

Deze constructie is getest door middel van twee series korteduurproeven met oplopende golfhoogten (tot $H_s = 1,49$ m) en gelijkblijvende brekerparameter ξ_{op} en een serie langeduurproeven met constante golfhoogte en periode. De serie met de lange duurbelasting was uitgevoerd met $H_s = 1,42$ m, $T_p = 5,1$ s en duurde in totaal 29 uur ($H_s/(\Delta D) = 5,2$, $\xi_{op} = 1,8$). Er is tijdens de proeven geen schade en geen begin van schade vastgesteld terwijl er sprake was van een zware belasting met $H_s/(\Delta D) = 2,7 - 5,5$. Aan de hand van de geringe vervormingen aan het eind van de proeven kan geconcludeerd worden dat de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$ bij het bezwijken waarschijnlijk nog een stuk hoger is dan 5,5. Tijdens de langeduurproeven bleek de stabiliteit zelfs ruim 30% hoger te liggen dan berekend met STEENTOETS (uitgedrukt in de waarde van de belastingparameter $H_s/(\Delta D)$). Hierbij wordt opgemerkt dat STEENTOETS een veiligheid heeft in de vorm van een factor op de toplaagdikte van gemiddeld 1,2 à 1,3.

Een Hillblock taludbekleding bevat 30 % minder beton dan een conventionele zuilenbekleding met een gelijke toplaagdikte. De hoge stabiliteit is bereikt ondanks het relatief lage gewicht per vierkante meter oppervlak ten opzichte van andere steenzettingen.

Het filtermateriaal is gedurende het proevenprogramma niet uitgespoeld. Het inwasmateriaal is ten dele uitgespoeld.

De gemeten golfploopreductie ligt tussen $\gamma = 0,71$ en $\gamma = 0,78$ zoals gedefinieerd in het Technisch Rapport "Golfploop en Golfverslag op Dijken" (TAW 2002). Hierbij wordt opgemerkt dat dit is bepaald door de gemeten golfploop op een Hillblock taludbekleding te vergelijken met de theoretische golfploophoogten op een glad talud (vergelijking (5.1)).

Er wordt geconcludeerd dat een steenzetting met een Hillblock bekleding een stabiliteit onder golfaanval heeft die voldoet aan de stabiliteitseisen van de categorie zuilen zoals berekend met STEENTOETS. Daarbij wordt als dikte van de toplaag de afstand aangehouden tussen het bovenvlak en het ondervlak van de Hillblocks.

7 Literatuur

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

Klein Breteler, M., 2009. Documentatie STEENTOETS 2008 en STEENTOETS 2010, Deltares verslag 1200193-001

Mansard, E. en E. Funke, 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least-square method. Proc. ICCE'80, ASCE pp154-172, Sydney.

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

TAW, 2002, Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag op Dijken

A Tabellen

Tabel A.1 Proevenprogramma met gerealiseerde waarden

omschrij ing serie	proef	Series	proefcondities				inkomende golf parameters						$H_s/(\Delta D)$ (-)	$F(-)$ (-)
			h (m)	Spectrum	N (-)	Duur (h)	H_{m0} (m)	H_{max} (m)	T_p (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)		
korteduur sop= 2%	T001	Series 1	4.50	PM	1102	1.2	0.80	1.32	5.1	4.5	0.020	2.4	2.9	5.1
	T002	Series 1	4.50	PM	1117	1.3	1.01	1.60	5.6	5.1	0.020	2.3	3.7	6.5
	T003	Series 1	4.50	PM	1086	1.4	1.21	1.92	6.1	5.6	0.021	2.3	4.4	7.7
	T004	Series 1	4.50	PM	1129	1.6	1.38	2.03	6.7	6.0	0.020	2.4	5.0	9.0
	T005	Series 1	4.50	PM	1077	1.5	1.49	1.96	6.9	6.2	0.020	2.4	5.4	9.6
korte duur sop = 4%	T006	Series 2	4.50	PM	949	0.9	0.98	1.42	4.2	3.9	0.035	1.8	3.6	5.2
	T007	Series 2	4.50	PM	1049	1.1	1.23	1.80	4.6	4.3	0.037	1.7	4.5	6.5
	T008	Series 2	4.50	PM	1007	1.2	1.46	1.98	5.1	4.9	0.035	1.8	5.3	7.8
lange duur proeve n	T009	Series 3	4.50	PM	4201	4.8	1.43	1.90	5.1	4.8	0.036	1.8	5.2	7.6
	T010	Series 3	4.50	PM	7149	8.6	1.42	1.92	5.0	4.8	0.036	1.8	5.2	7.5
	T011	Series 3	4.50	PM	10702	12.0	1.42	1.93	5.0	4.8	0.036	1.8	5.2	7.6
schade, spectrum, overslag	T014	Series 2	4.50	J	986	1.2	1.50	1.98	5.3	5.2	0.034	1.8	5.5	8.2
	T015	Series 3	4.50	PM	1017	1.2	1.45	1.83	5.2	4.9	0.035	1.8	5.3	7.8
	T016	Series 2	3.10	J	953	0.8	0.74	1.11	3.3	3.1	0.043	1.6	2.7	3.7
	T017	Series 1	3.10	J	1038	1.0	0.81	1.15	4.5	4.2	0.026	2.1	2.9	4.8
	T018	Series 1	3.10	J	1061	1.1	0.94	1.54	4.9	4.8	0.025	2.1	3.4	5.7
	T019	Series 2	3.10	J	960	0.9	0.91	1.34	3.8	3.8	0.040	1.7	3.3	4.7

PM = Pierson Moskowitz

J = JONSWAP

B Figuren

Figuur B.1 Overzicht modelopstelling

Figuur B.2 Zeefkrommen filter en inwasmateriaal

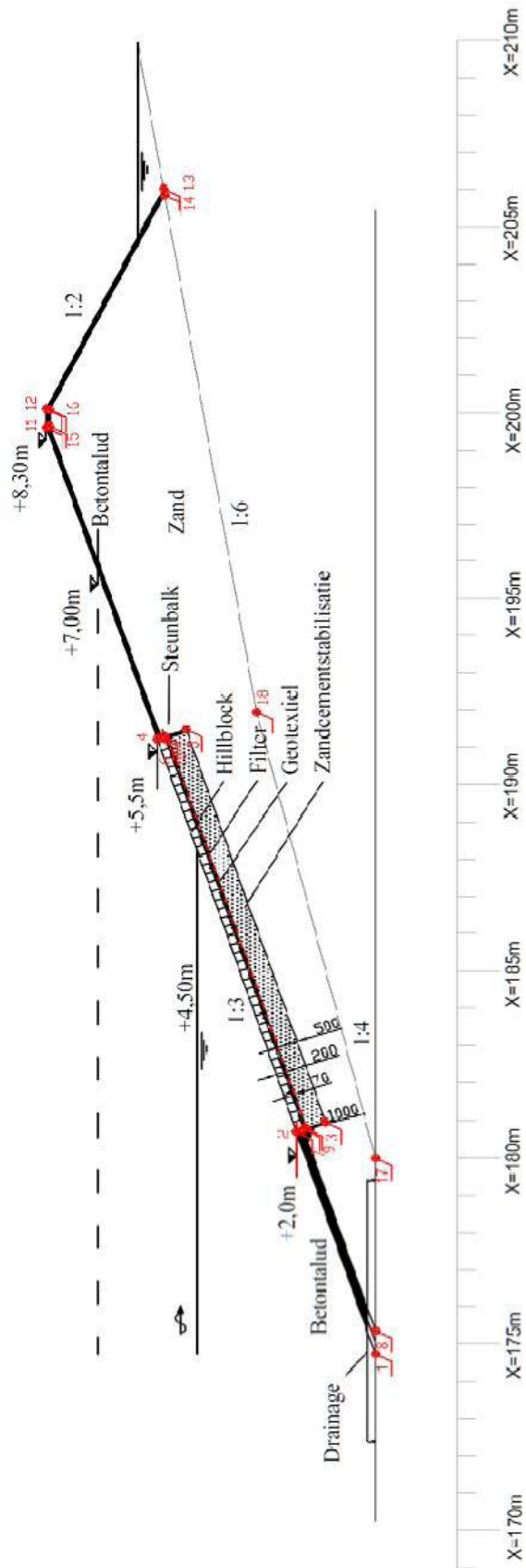
Figuur B.3 Overzicht talud

Figuur B.4 Metingen inwasmateriaal (Basisblock)

Figuur B.5 Metingen inwasmateriaal (Slimblock)

Figuur B.6 Vergelijking metingen met STEENTOETS

Figuur B.7 Afmetingen Hillblock



modelopstelling

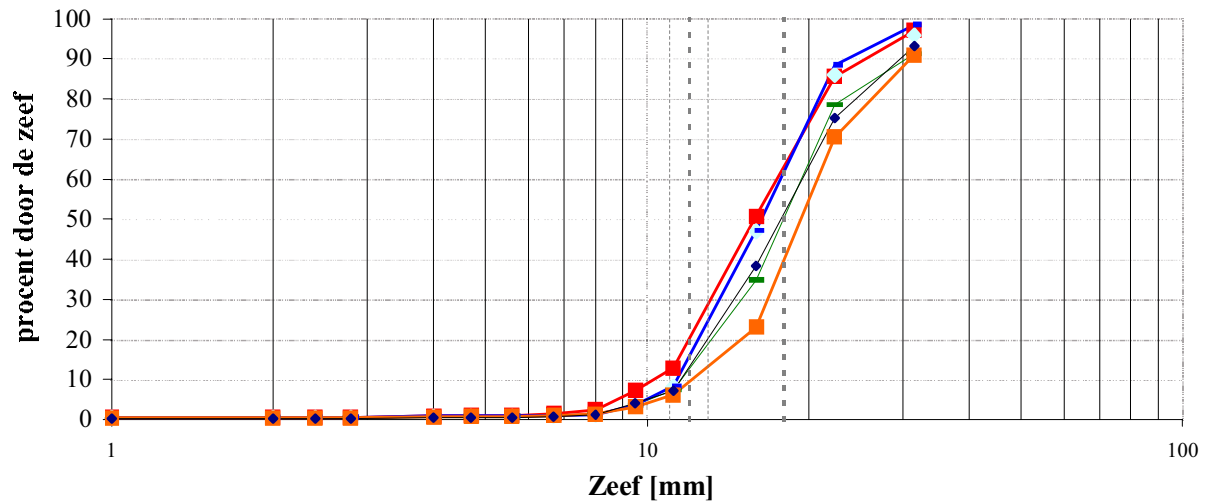
Deltares

1202901

Fig. B.1

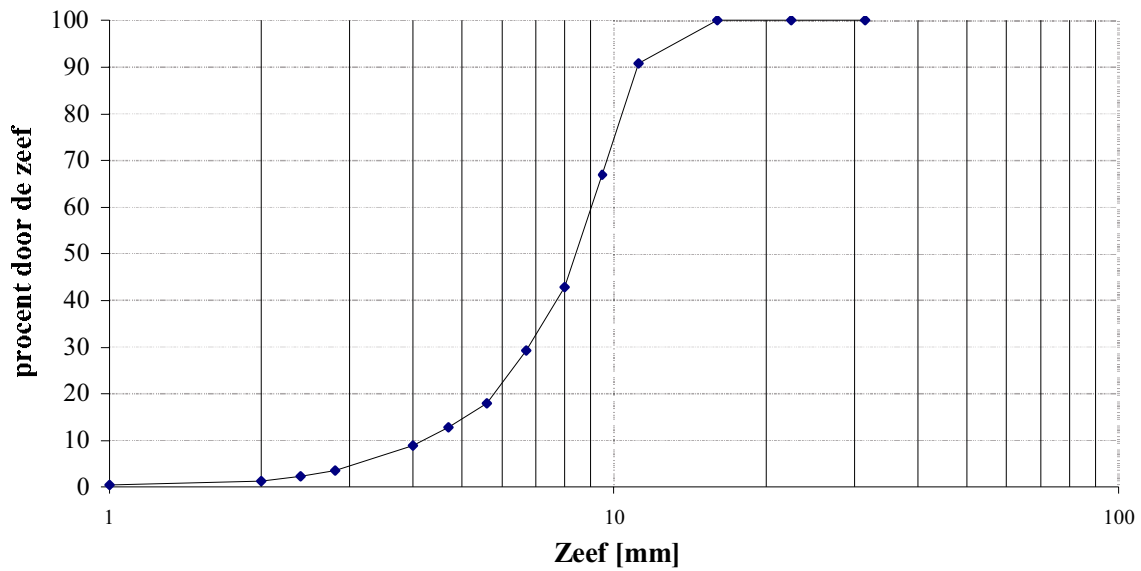
Filtermateriaal

Korrelverdeling volgens NEN5104



inwasmateriaal

Korrelverdeling volgens NEN5104



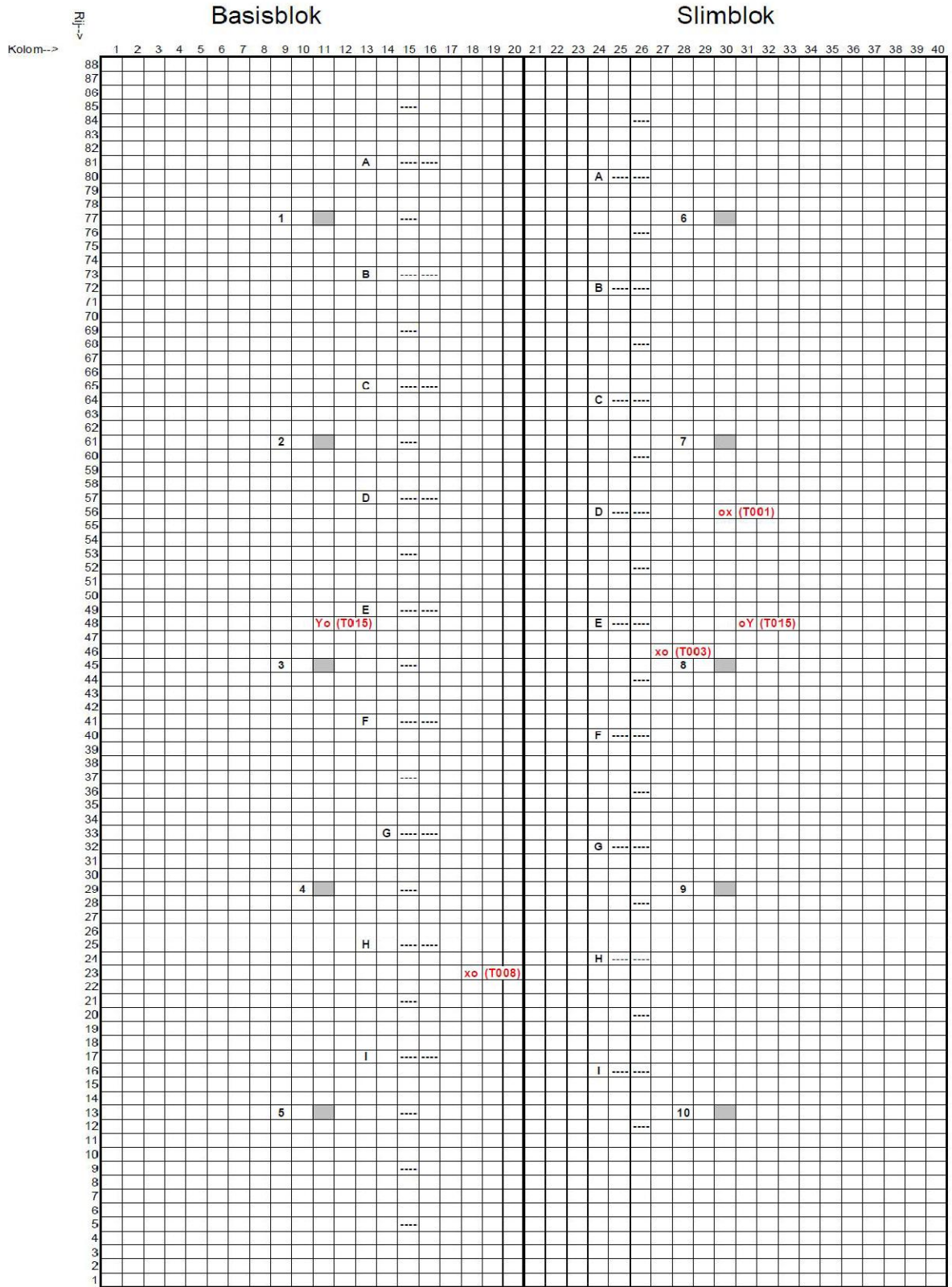
Zeefkrommen

Filtermateriaal en inwasmateriaal

Deltares

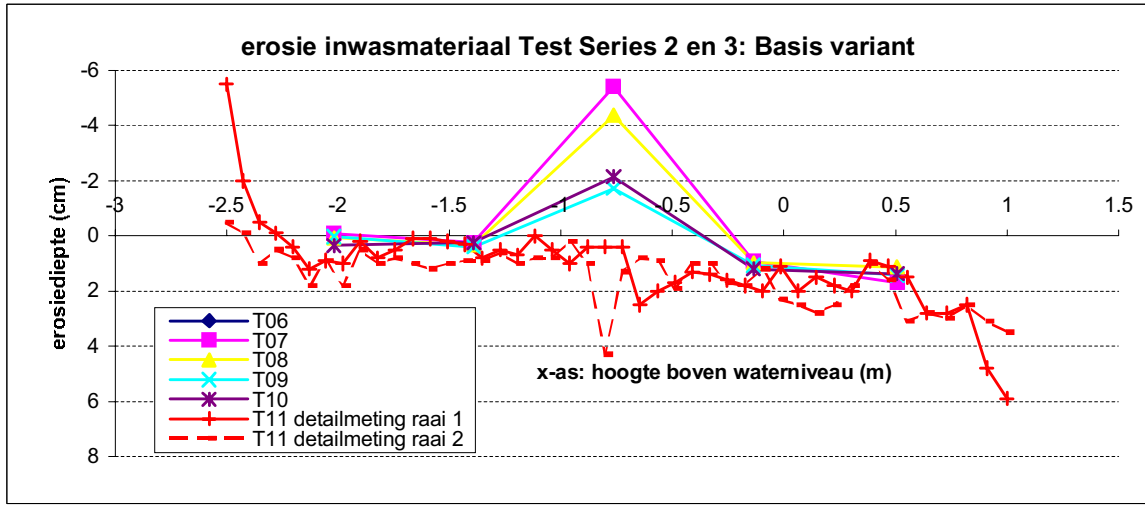
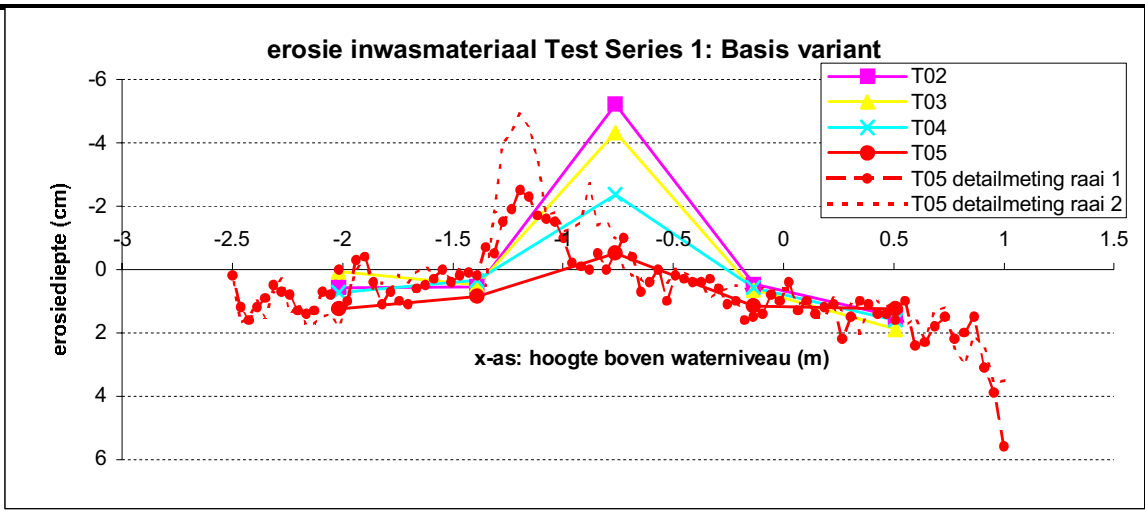
1202901

Fig. B.2

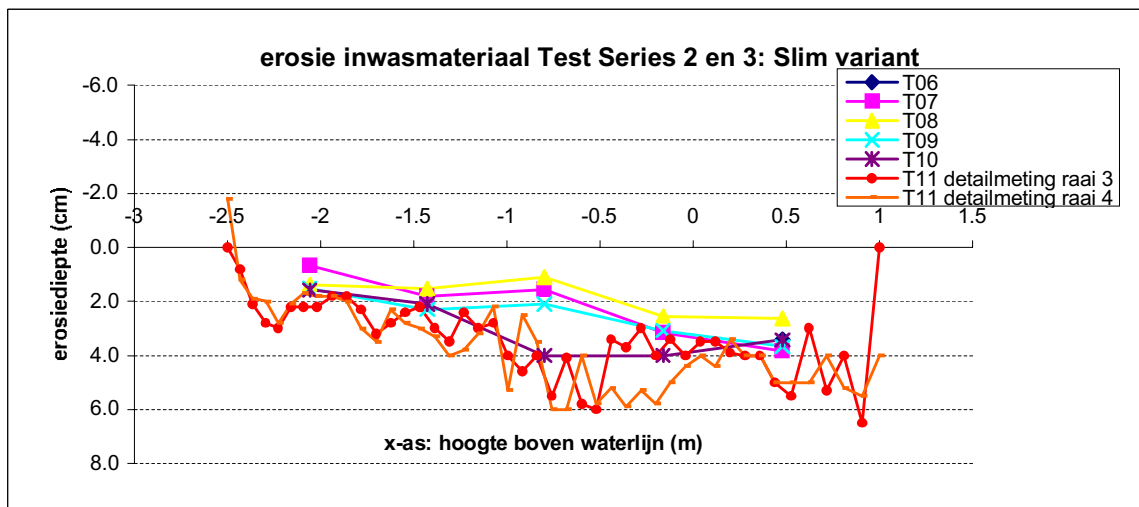
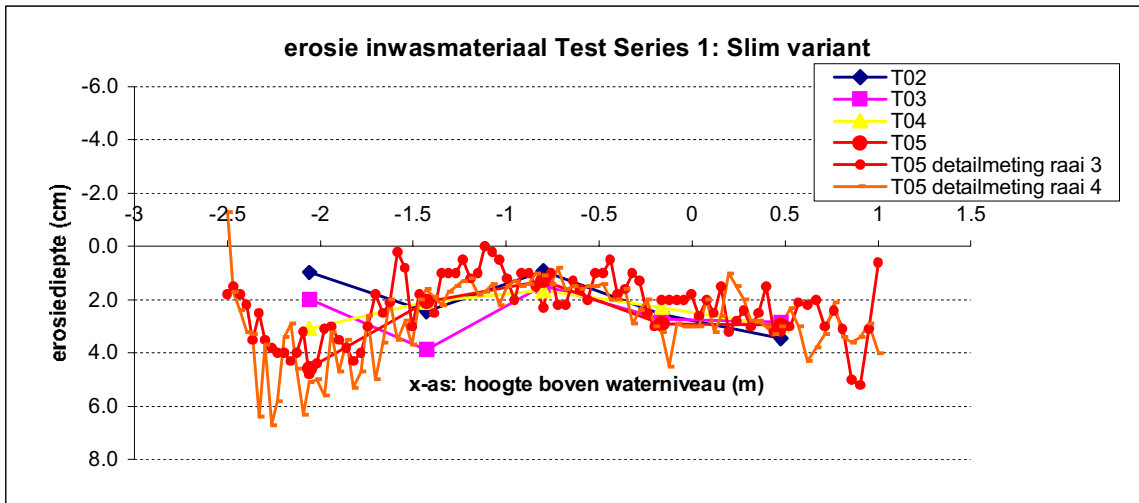


xo (links afgebroken kop), ox (rechts afgebroken kop)
 Yo (linker helft van Hillblok handmatig verwijderd voor de test)
 oY (rechter helft van Hillblok handmatig verwijderd voor de test)
 Afgebroken kop tijdens T001, T003 en T008
 Bij T015 is schade voor de test kunstmatig aangebracht

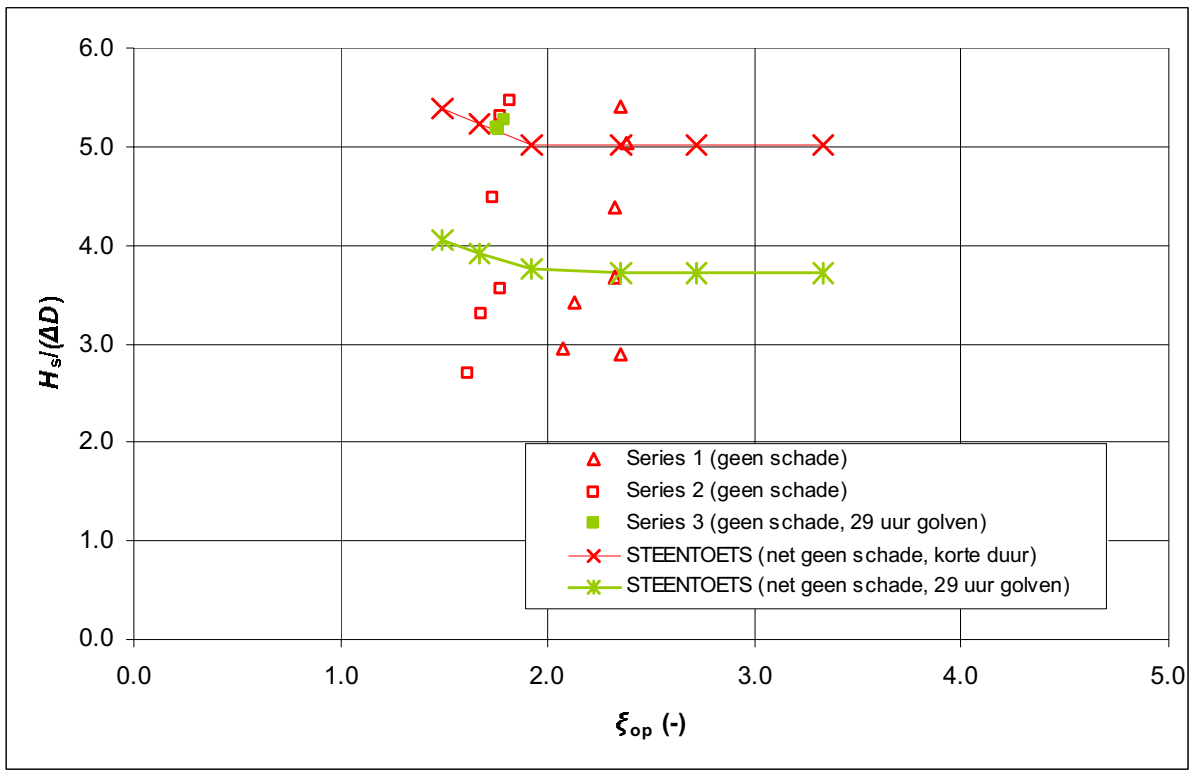
Overzicht talud		
Deltares	1202901	Fig. B.3



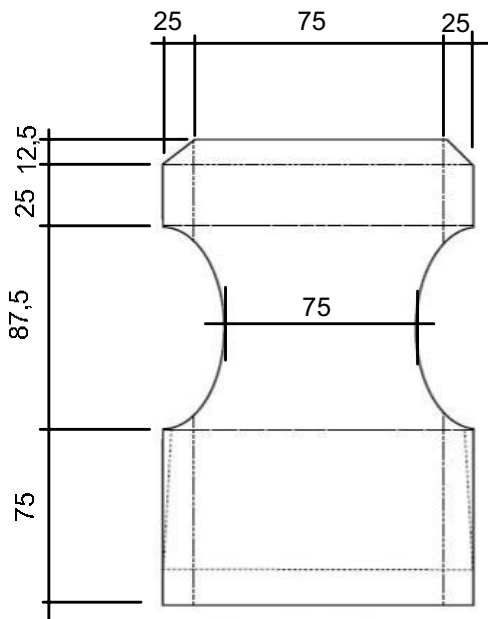
Metingen inwasmateriaal (Basisblock)		
Deltares	1202901	Fig. B.4



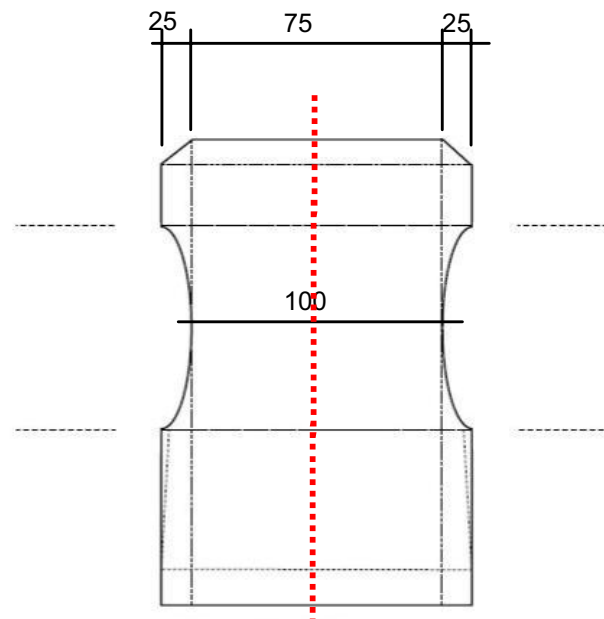
Metingen inwasmateriaal (Slimblock)



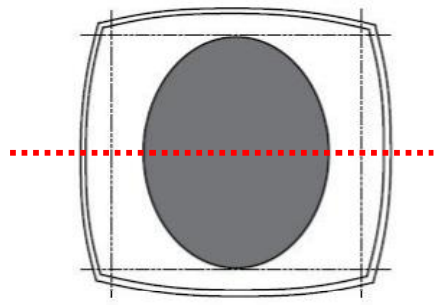
Vergelijking metingen met STEENTOETS



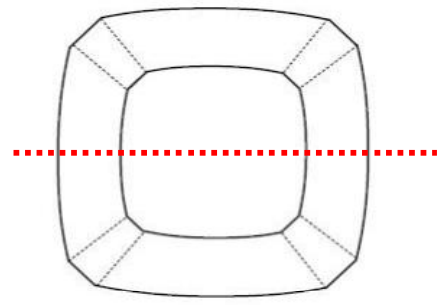
voor aanzicht



zij aanzicht



dwars doorsnede



boven aanzicht

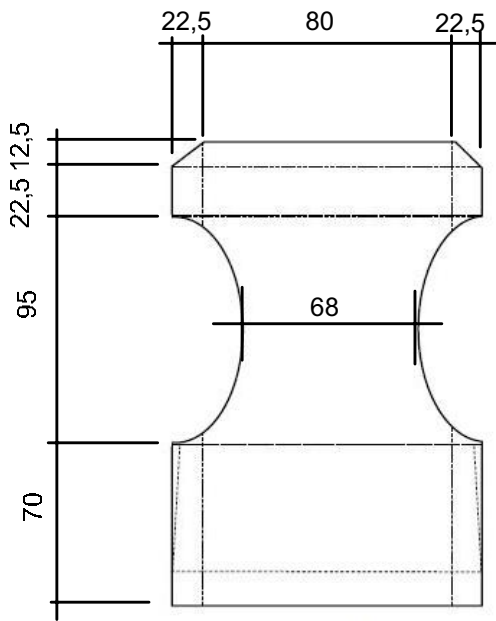
Afmetingen Hillblock (Basisblock)

Afmetingen in mm in modelschaal

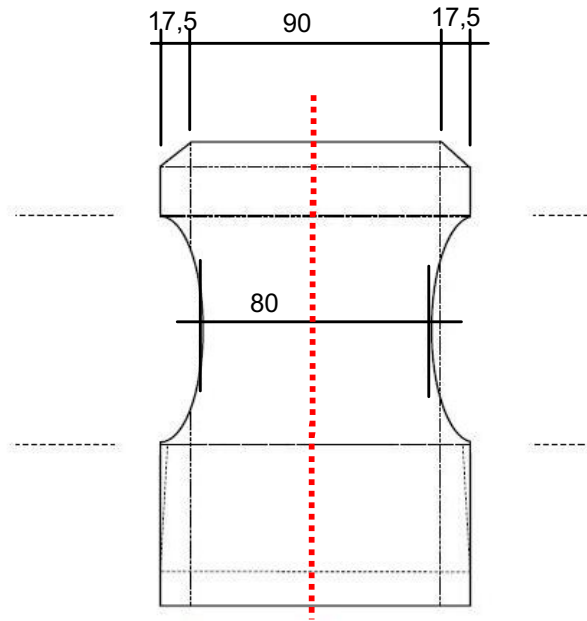
Deltares

1202901

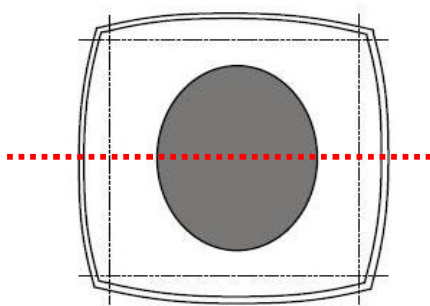
Fig. B.7a



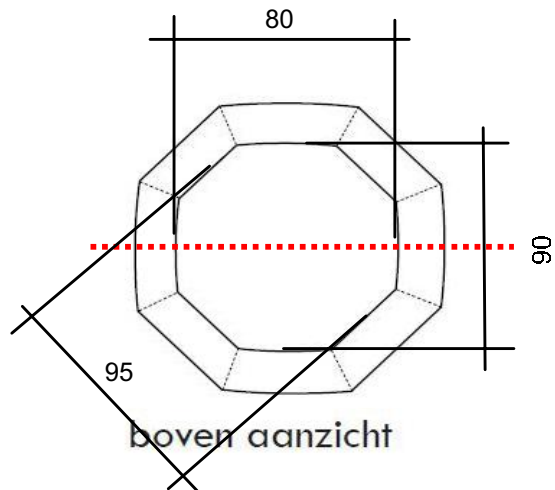
voor aanzicht



zij aanzicht



dwars doorsnede



boven aanzicht

Afmetingen Hillblock (Slimblock)

Afmetingen in mm in modelschaal

Deltares

1202901

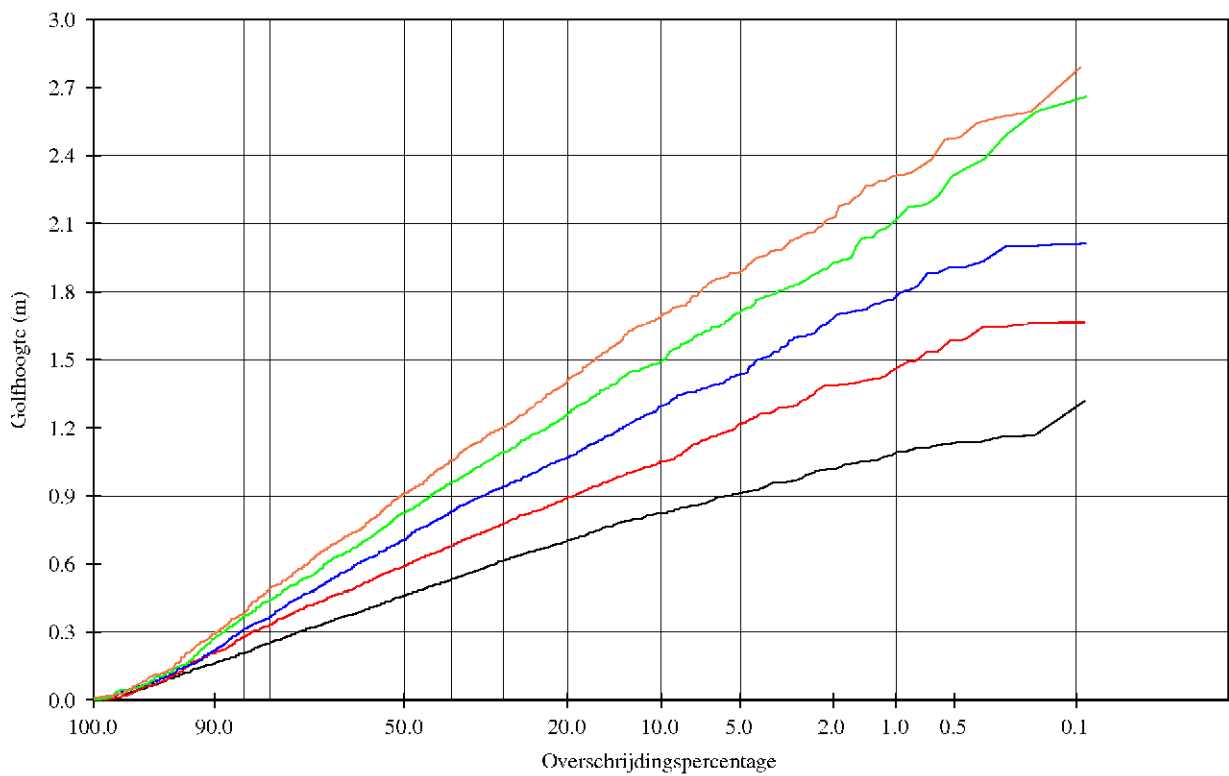
Fig. B.7b

C Overschrijdingskrommen

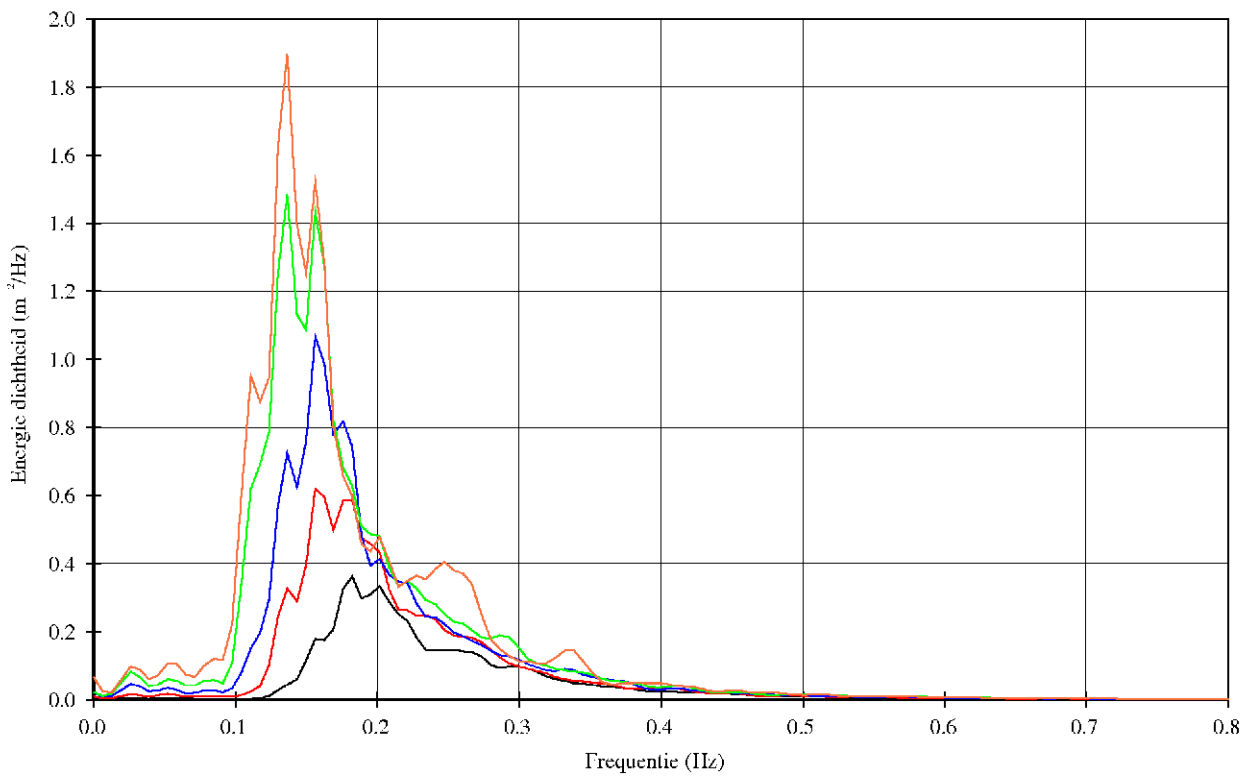
Figuur C.1 Test T1a, T2, T3, T4, T5 (korte duur, sop=2%)

Figuur C.2 Test T6, T7, T8 (lange duur, sop = 4%)

Figuur C.3 Test T14 (Jonswap)



- INKOMEND T01A
- INKOMEND T02
- INKOMEND T03
- INKOMEND T04
- INKOMEND T05

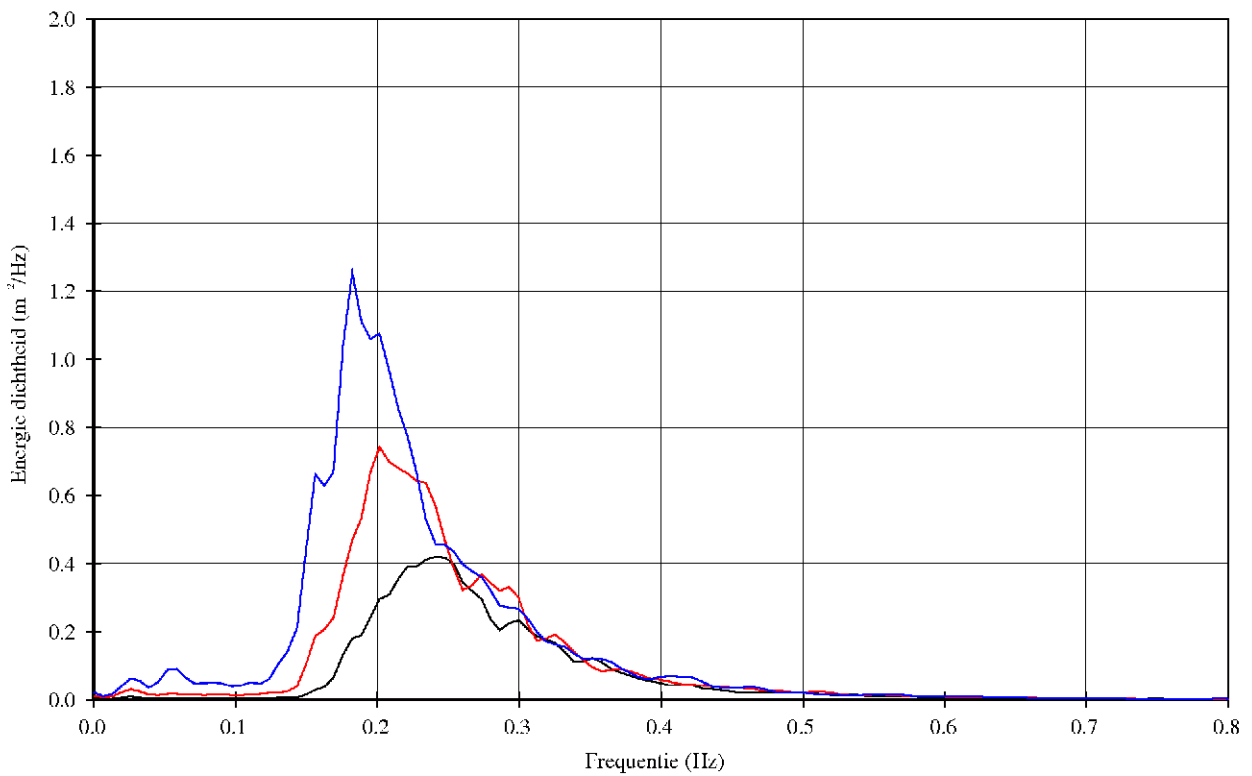
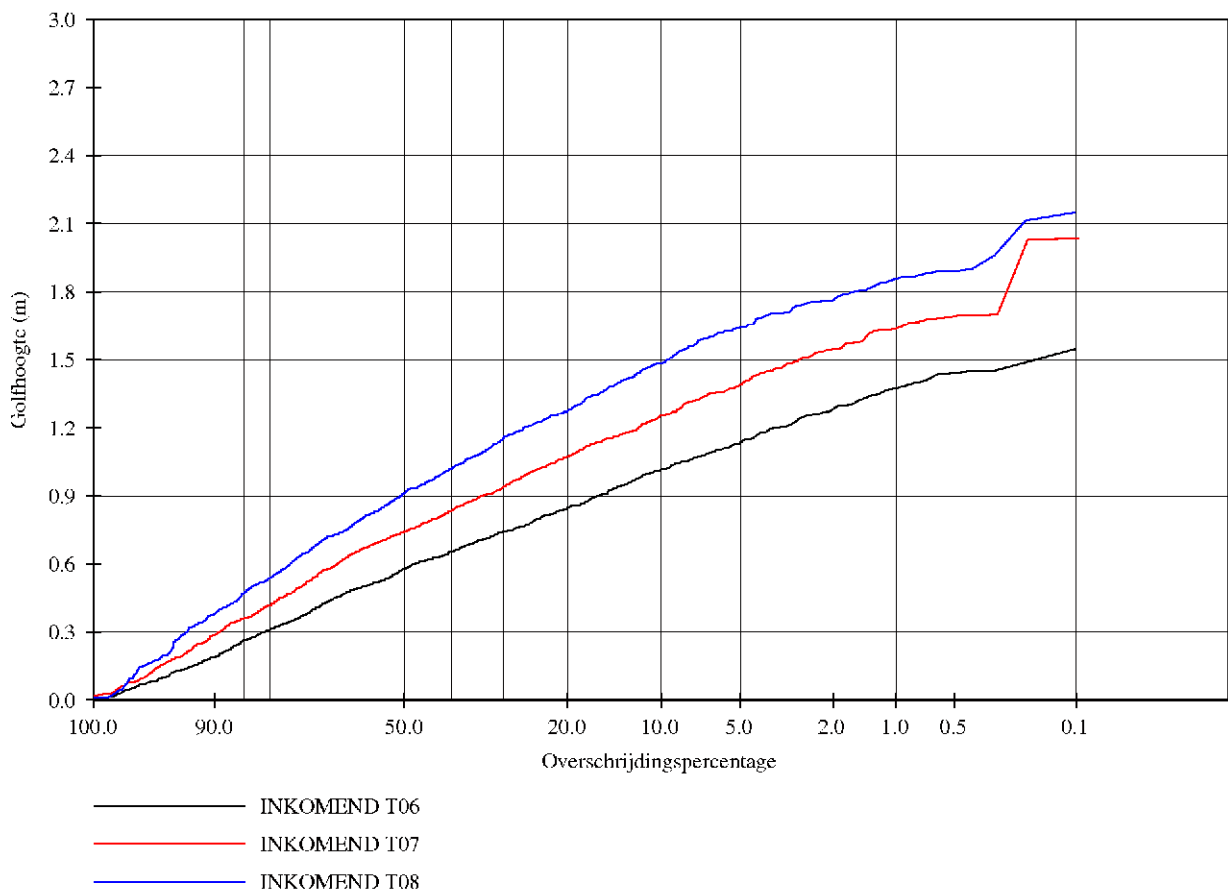


golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

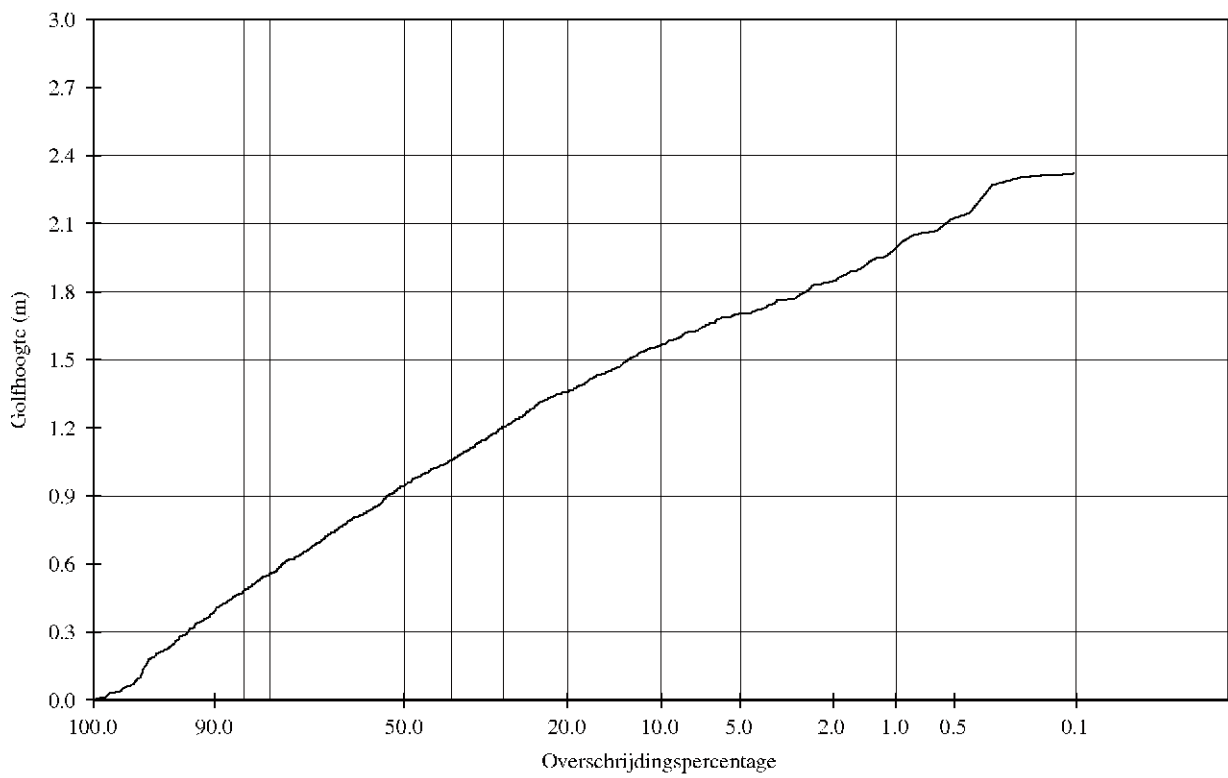
Deltares

1202901

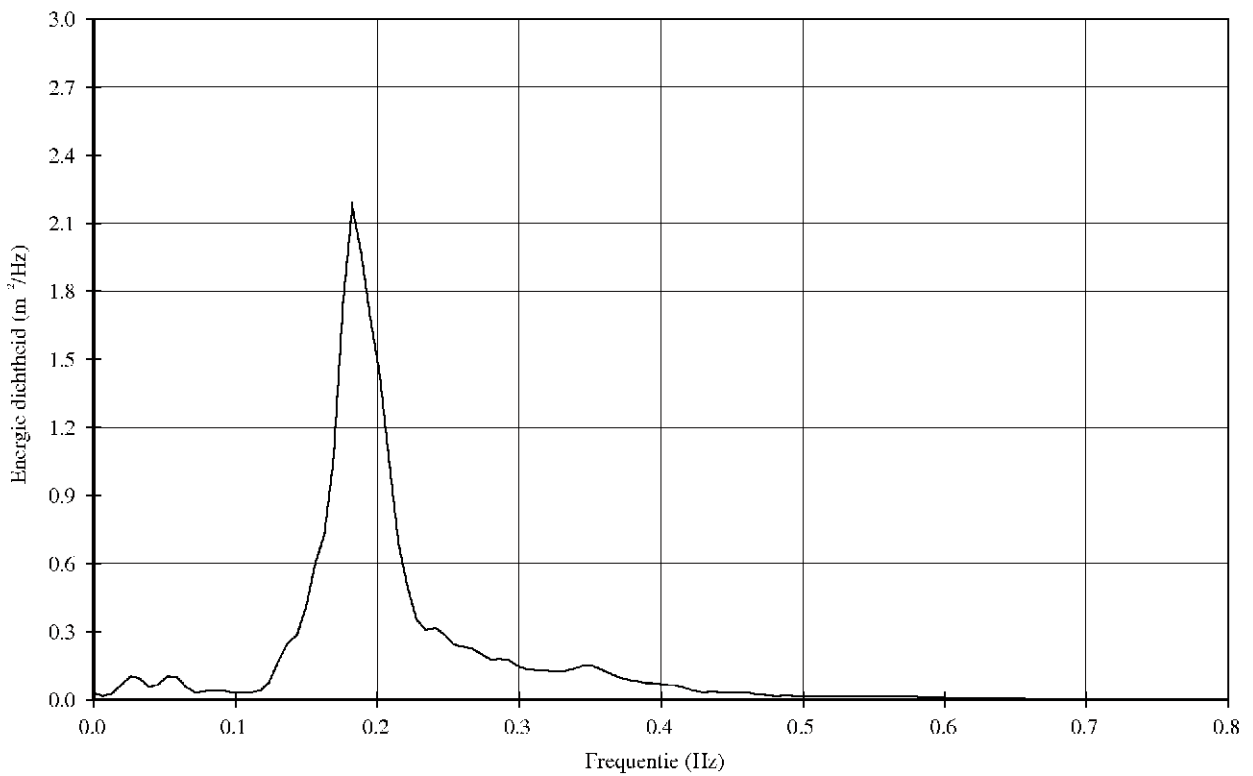
FIG. C1



golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra



— INKOMEND T14



golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

Deltares

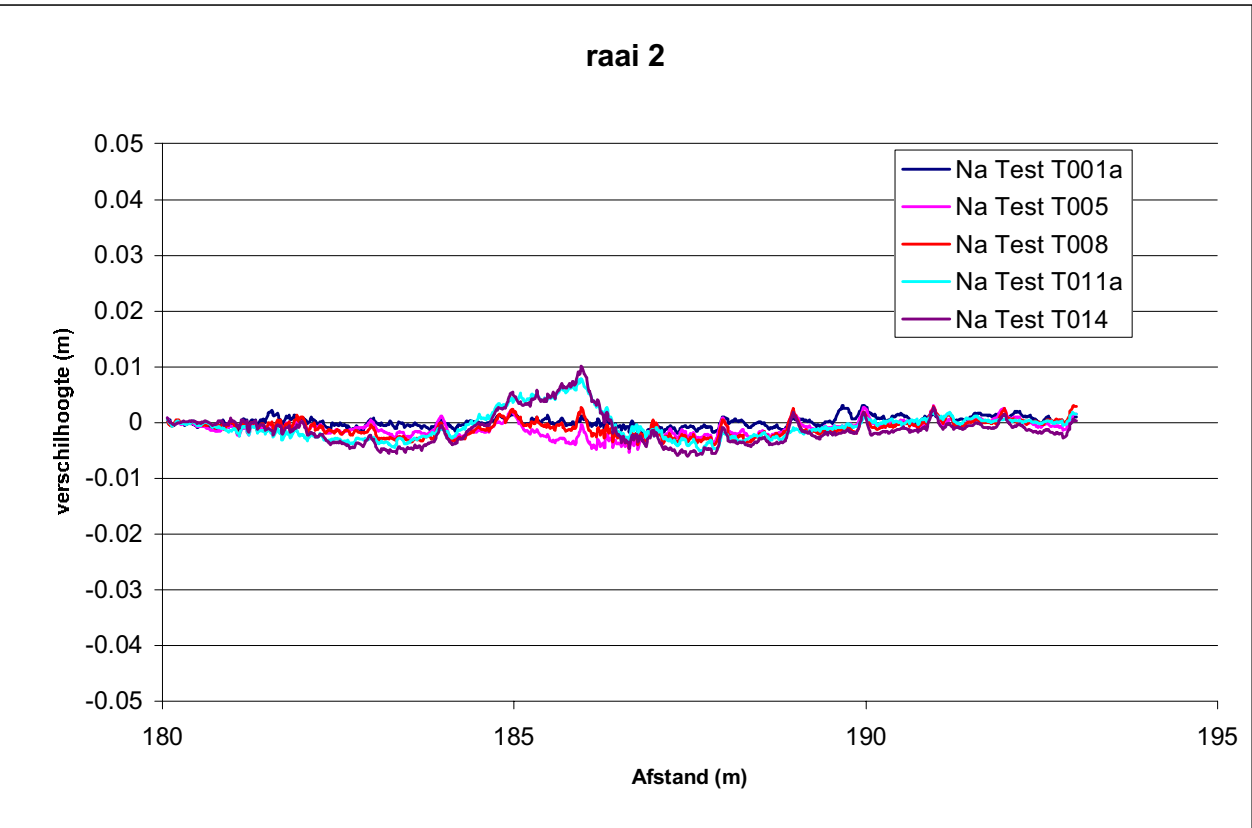
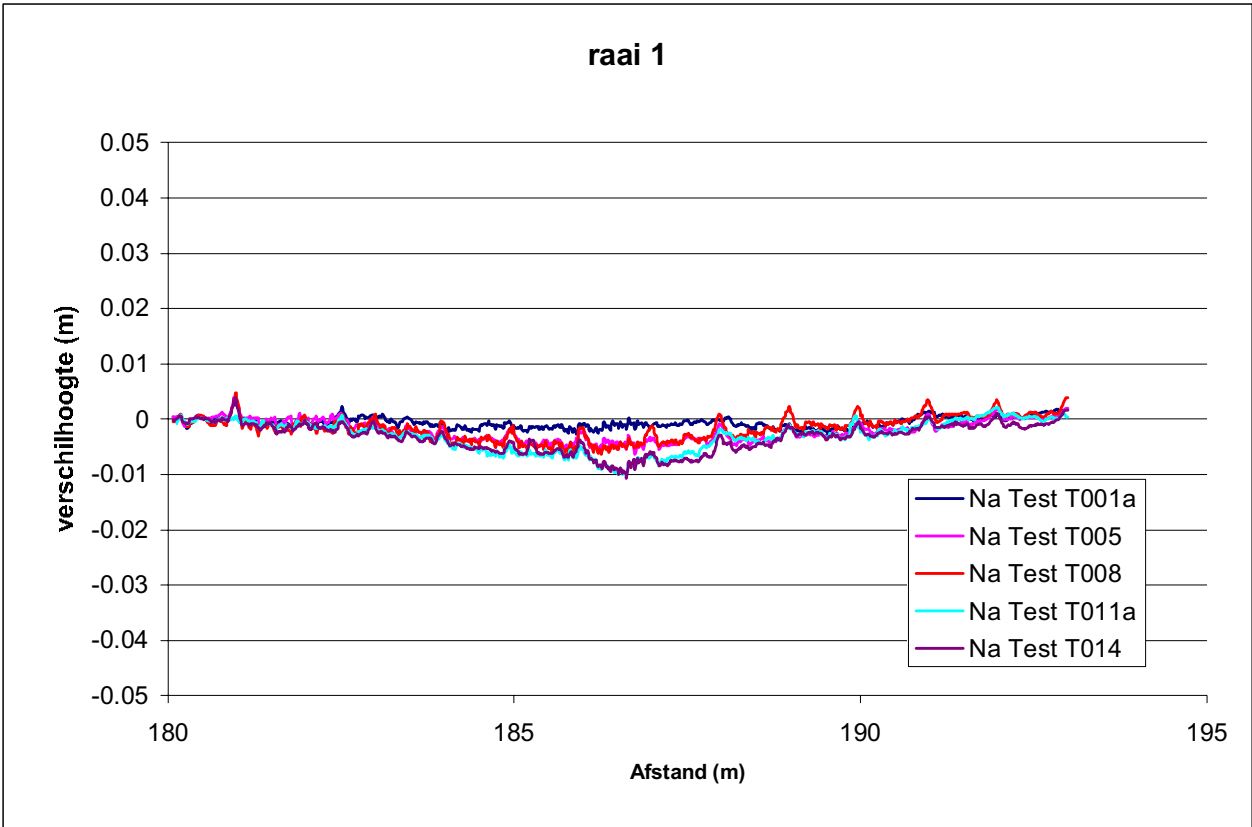
1202901

FIG. C3

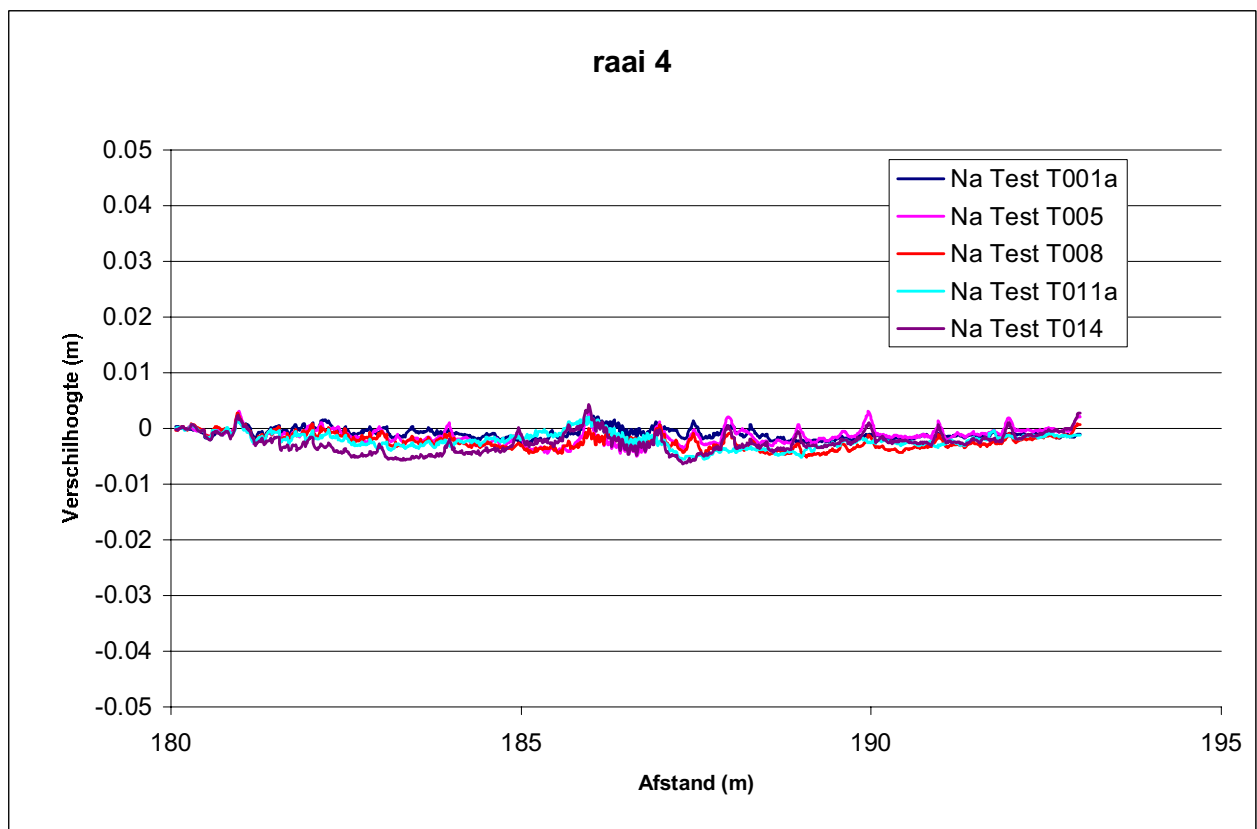
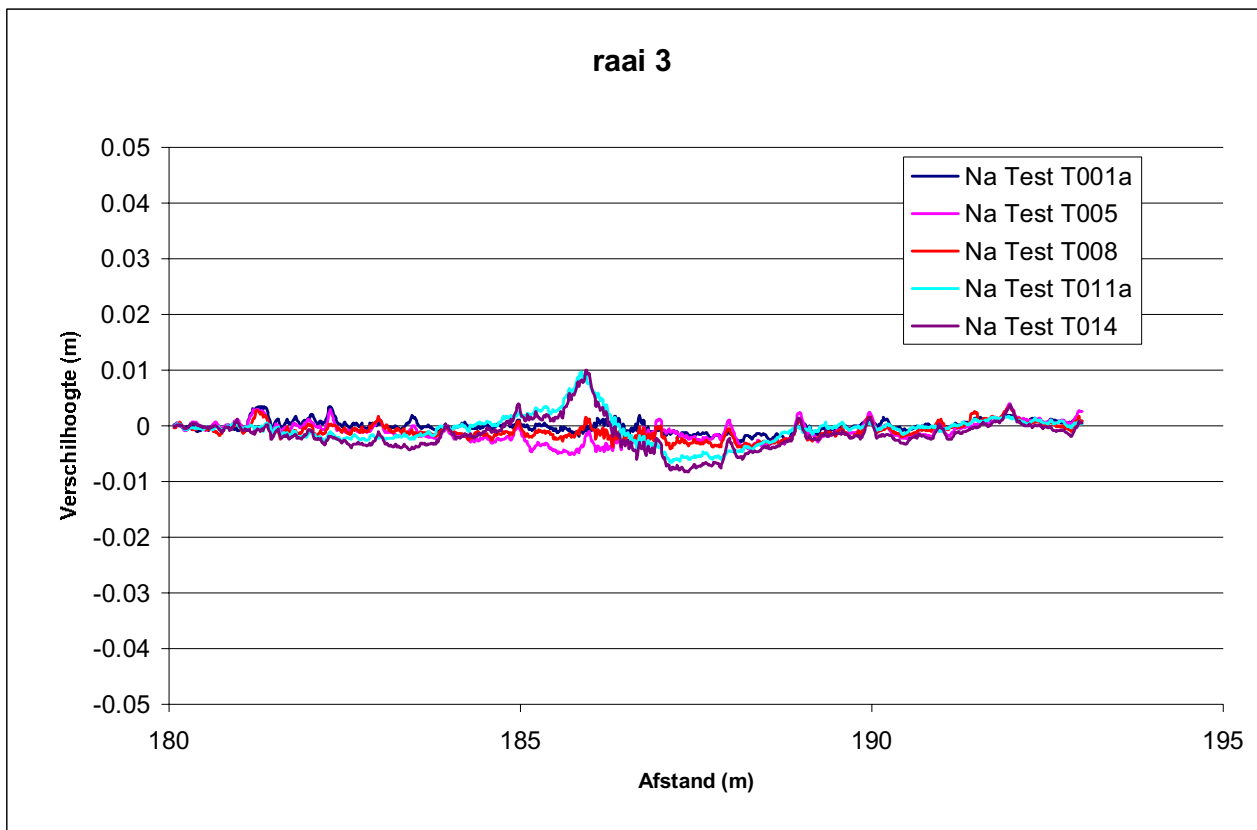
D Profielmetingen

Figuur D.1 Profielmeting raai 1 en raai 2

Figuur D.2 Profielmeting raai 3 en raai 4



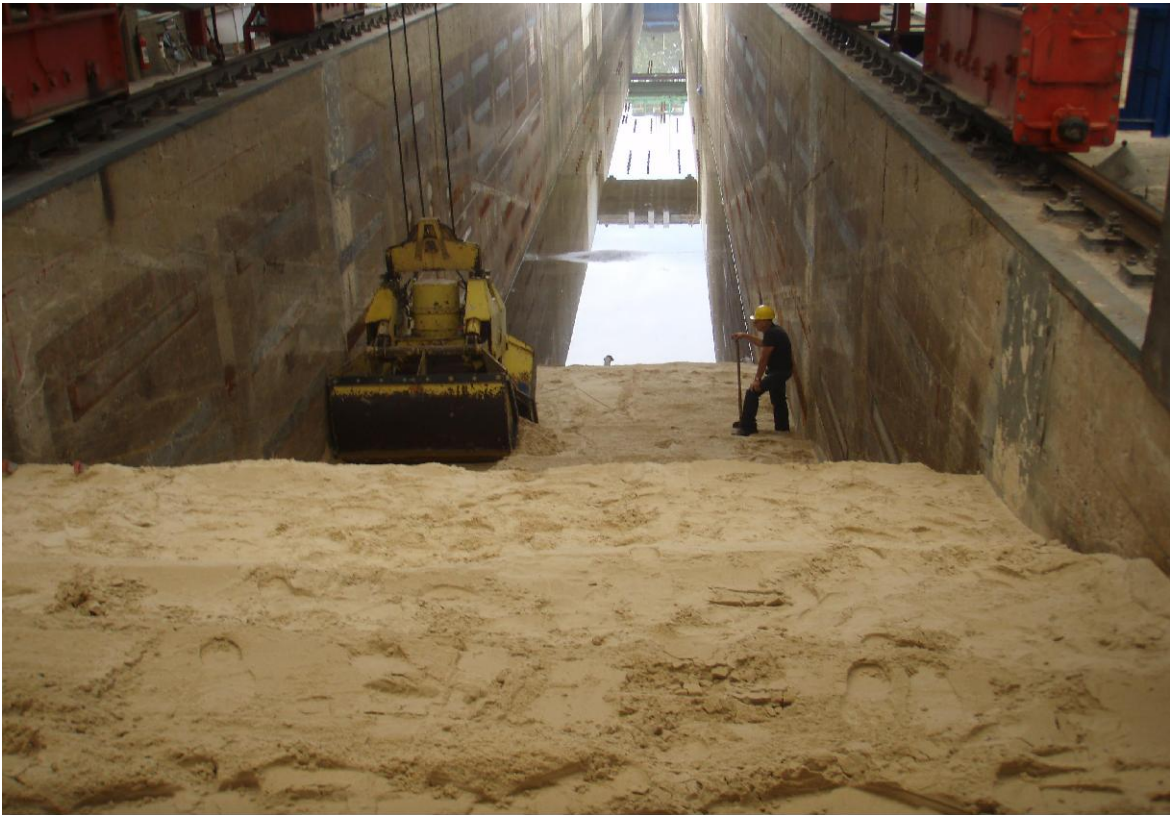
Profiel in raai 1 en raai 2 (Basisblock)



Profiel in raai 2 (Basisblock)

E Foto's

- Foto E.1* Aanbrengen en verdichten zand
- Foto E.2* Verdichten zand en aanbrengen betonnen dummysecties
- Foto E.3* Aanbrengen filterlaag
- Foto E.4* Aanbrengen Hillblock bekleding
- Foto E.5* Hillblock bekleding direct na aanbrengen
- Foto E.6* Golfaanval tijdens testen (1)
- Foto E.7* Golfaanval tijdens testen (2)
- Foto E.8* Talud na test T011
- Foto E.9* Inwasmateriaal na testen



Aanbrengen en verdichten zand

Deltares

1202901

Fig. E.1



Verdichten zand en aanbrengen betonnen dummysecties



Aanbrengen filterlaag

Deltares

1202901

Fig. E.3



Aanbrengen Hillblock bekleding



Hillblock bekleding direct na aanbrengen

Deltares

1202901

Fig. E.5



Golfaanval tijdens testen (1)

Deltares

1202901

Fig. E.6



Golfaanval tijdens testen (2)



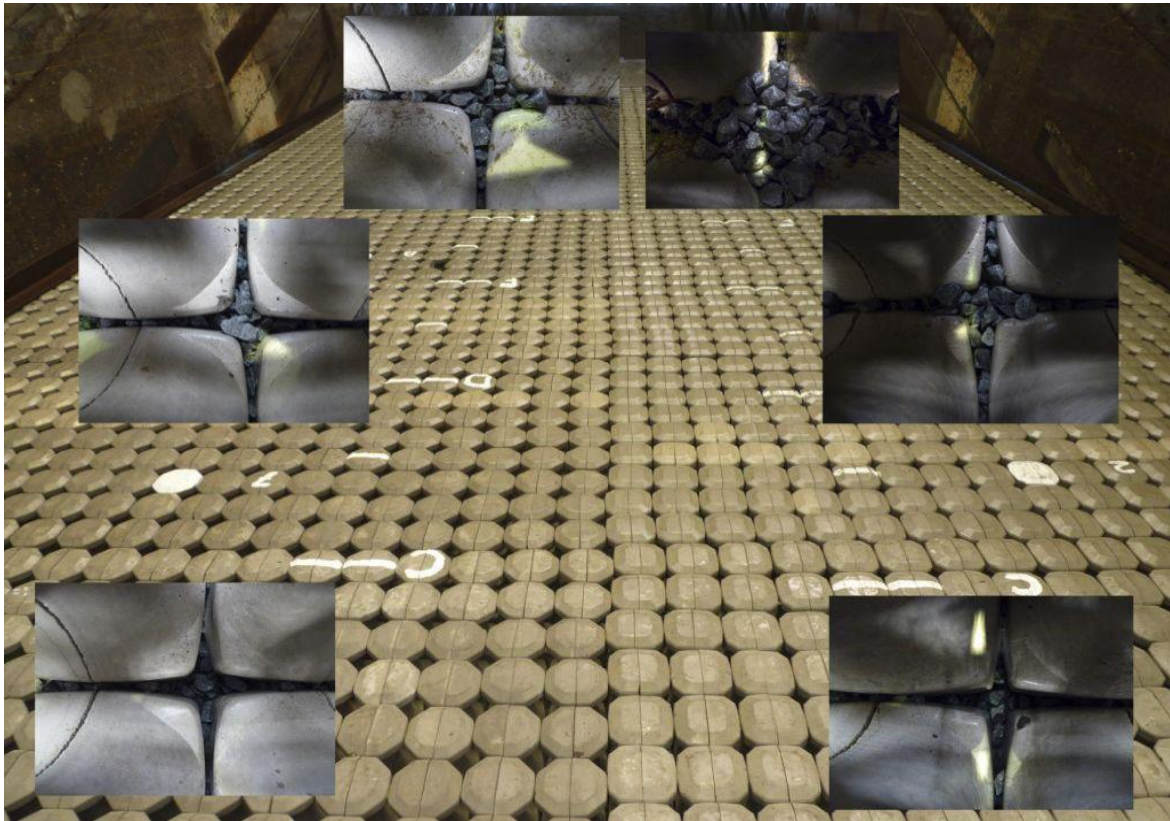
Talud na test T011

Deltares

1202901

Fig. E.8

teen van de constructie



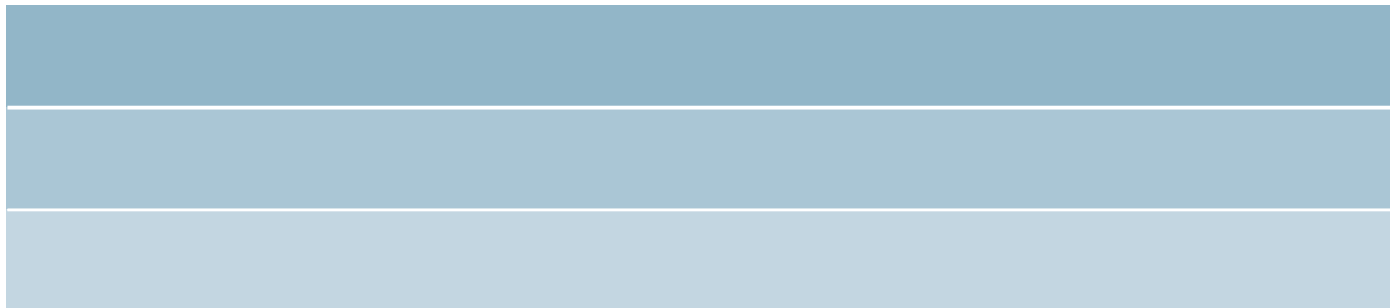
kruin van de constructie

Inwasmateriaal na testen

Deltares

1202901

Fig. E.9



Deltares