

**Oude steenzetting overlagen
met zuilen op uitvullaag**



Oude steenzetting overlagen met zuilen op uitvullaag

Robert 't Hart
Guido Wolters

1205571-000

Titel

Oude steenzetting overlagen met zuilen op uitvullaag

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1205571-000	1205571-000-HYE-0007	33 + Bijl.

Trefwoorden

Steenzetting, dijkbekleding, zuilen, Deltagoot, overlagen

Samenvatting




Bij het renoveren van steenzettingen in de tijzone komt het in Zeeland voor dat onder een oude steenzetting een erg zachte ondergrond van klei zit. Voor aannemers is het lastig om hierop een nieuwe steenzetting te plaatsen, en dat komt terug in de prijs. Daarom overweegt Projectbureau Zeeweringen van Rijkswaterstaat Zeeland om op dergelijke locaties de oude steenzetting te laten zitten, en daarop een nieuwe steenzetting te laten plaatsen.

Voordelen in tijd en kosten kunnen bereikt worden doordat de oude steenzetting niet verwijderd hoeft te worden en ook geen grondverbetering nodig is omdat de oude steenzetting als fundering fungeert.

De oude steenzetting kan de stabiliteit van de nieuwe steenzetting beïnvloeden doordat hij de leklengte van de steenzetting vergroot. Om dit te verifiëren is in de Deltagoot op schaal 1:2 een Basaltonzetting op filter aangelegd op een basaltzetting op filter. Deze constructie is tot bezwijken toe belast. Met drukopnemers in de twee granulaire lagen is daarbij de invloed van de oude steenzetting gemeten.

Het onderzoek werd in oktober - december 2011 uitgevoerd.

De invloed van de onderste zetting op de stabiliteit van een overlaging is significant. Door de filterlaag onder de oude toplaag wordt een flink deel van het debiet aangevoerd wat door de bovenste toplaag de zetting verlaat. Hierdoor is er een groter stijghoogteverschil over de bovenste toplaag en spoelde het inwasmateriaal op grote schaal uit. De toplaag bezweek bij een aanzienlijk lagere belasting dan wanneer er geen onderliggende basaltzetting was geweest.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	feb. 2012	R. 't Hart, G. Wolters		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	
2.0	apr. 2012	R 't Hart G. Wolters		Mark Klein Breteler		Marcel van Gent	

Status

Definitief

Inhoud

Lijst van symbolen	iii
1 Inleiding	1
1.1 Doel van het onderzoek	1
1.2 Bezwijkmechanismen	1
1.2.1 Stabiliteit van de toplaag	2
1.2.2 Afschuiving	4
1.2.3 Materiaaltransport vanuit de onderlaag	4
1.2.4 Materiaaltransport vanuit de granulaire laag	4
1.2.5 Oplichten door statische wateroverdrukken	4
2 Schaalregels	7
3 Modelopstelling	11
3.1 Testlocatie	11
3.2 Modelopstelling	11
3.3 Meetinstrumenten	14
3.3.1 Golfhoogtemetingen	14
3.3.2 Profielmetingen	14
3.4 Proevenprogramma	15
4 Proefresultaten	17
4.1 Algemeen	17
4.2 Observaties tijdens proeven	18
4.3 Profielen	19
5 Analyse	21
5.1 Uitspoeling van inwasmateriaal	21
5.2 Stabiliteit bovenste toplaag volgens Steentoets	23
5.3 Evaluatie van gemeten stijghoogten	26
5.4 Nabeschouwing stabiliteit toplaag	30
6 Conclusies	33
Bijlage(n)	
Literatuur	
A Tabellen	
B Figuren	
C Golfhoogte overschrijdingskrommen	

D Verticale verplaatsingen van taludoppervlak op basis van profielmetingen

E Stijghoogten en debieten

F Foto's

Lijst van symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
b	(m)	Dikte van de filterlaag
b_j	(m)	Dikte van de filterlaag j
dx	(m)	Afstand tussen opeenvolgende drukopnemers
D	(m)	Dikte toplaag
D_{15}	(m)	Korrel diameter die door 15% (massa) van de korrels wordt onderschreden
D_{50}	(m)	Korrel diameter die door 50% (massa) van de korrels wordt onderschreden
D_{f15}	(m)	Korrel diameter van het filter die door 15% (massa) van de korrels wordt onderschreden
D_o	(m)	Dikte toplaag oude, onderste bekleding (basalt)
D_{open}	(m)	Diameter van open ruimtes in de toplaag
D_n	(m)	Dikte toplaag nieuwe, bovenste bekleding (Basalton)
F	(-)	Stabiliteitsparameter $(H_s/\Delta D) \cdot \xi_{50p}^{2/3}$
Fr	(-)	Froude-getal
g	(m/s ²)	Zwaartekrachtsversnelling
G	(m)	Gatdiameter
h	(m)	Waterstand in de Deltagoot
h_i	(m)	Stijghoogte in onderste filterlaag bij drukopnemer i
h_{ib}	(m)	Stijghoogte in bovenste filterlaag juist boven drukopnemer i
H	(m)	Golfhoogte (regelmatige golven)
H_{m0}	(m)	Significante golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum
H_{max}	(m)	Maximale golfhoogte
H_s	(m)	Significante golfhoogte, gemiddelde golfhoogte van de 1/3 hoogste golven
$H_s/\Delta D$	(-)	Belastingsparameter
l_i	(-)	Stijghoogte gradiënt over onderste zetting boven drukopnemer i
j	(-)	Teller voor filterlagen (index)

Symbol	Eenheid	Betekenis
i	(-)	Teller voor toplagen (index)
k	(m/s)	Doorlatendheid van de filterlaag
k'	(m/s)	Doorlatendheid van de toplaag
L	(m)	Lengtemaat
L_{op}	(m)	Golf lengte op diep water op basis van de piekperiode ($g \cdot T_p^2 / (2\pi)$)
M	(-)	Teller voor de doorsnede waar het debiet wordt bepaald (index)
n	(-)	Teller voor meetpunten (index)
n_v	(-)	Schaalfactor van variabele v gedefinieerd als v_p/v_m
N	(-)	Aantal golven
Q_i	(m ³ /s/m ¹)	Debiet loodrecht op talud door toplaag i
Q_{jm}	(m ³ /s/m ¹)	Debiet in filterlaag j door doorsnede m
Re	(-)	Reynolds getal
s_{op}	(-)	Golfsteilheid op basis van de piekperiode (H_s/L_{op})
$T_{m-1,0}$	(s)	Spectrale periodemaat
T_p	(s)	Periode bij de piek van het golfspectrum
t	(s)	Tijd
u	(m/s)	Stroomsnelheid van het water of voortplantingssnelheid van de golven
v_p	(-)	Waarde van variabele v in het prototype
v_m	(-)	Waarde van variabele v in het model
y	(m)	Horizontale coördinaat ten opzichte van gootwand Oost (meetcabine-zijde)
Y	(m)	Erosiediepte in een gat in de bekleding
x	(m)	Horizontale afstand vanaf snijpunt van talud met niveau $Z = +4,70\text{m}$
X	(m)	Horizontale afstand vanaf het golfschot
Z	(m)	Verticale afstand vanaf de gootbodem

Symbol	Eenheid	Betekenis
Δ	(-)	Relatieve dichtheid ten opzichte van het aanwezige water ($(\rho_{\text{materiaal}} - \rho_{\text{water}}) / \rho_{\text{water}}$)
φ_j	(m)	Stijghoogte in filterlaag j in meetpunt n
Λ	(m)	Leklengte
ρ	(kg/m ³)	Dichtheid
ν	(m ² /s)	Viscositeit (voor water ca. $1,2 \cdot 10^{-6}$)
ξ_{op}	(-)	Brekerparameter ($\tan(\alpha) / \sqrt{(s_{op})}$)
ℓ	(-)	Reciproque van het relatief open oppervlak van de bekleding

1 Inleiding

1.1 Doel van het onderzoek

Bij het renoveren van steenzettingen in de tijzone komt het in Zeeland voor dat onder een oude steenzetting een erg zachte ondergrond van klei zit. Voor aannemers is het lastig om hierop een nieuwe steenzetting te plaatsen, en dat komt terug in de prijs. Daarom overweegt PBZ om op dergelijke locaties de oude steenzetting te laten zitten, en daarop een nieuwe steenzetting te laten plaatsen.

In dat geval blijft de oude bekleding gewoon liggen, en wordt een nieuwe bekleding erop aangebracht. Projectbureau Zeeweringen van Rijkswaterstaat Zeeland heeft ruime ervaring met het overlagen door middel van breuksteen die gepenetreerd wordt met gietasfalt. Als alternatief wordt thans overwogen op de oude steenzetting een granulaire laag aan te brengen, en daarop een nieuwe zuilenbekleding te zetten.

Voordelen in tijd en kosten kunnen bereikt worden doordat de oude steenzetting niet verwijderd hoeft te worden en ook geen grondverbetering nodig is omdat de oude steenzetting als fundering fungeert.

De oude steenzetting kan de stabiliteit van de nieuwe toplaag beïnvloeden doordat de leklengte groter is dan zonder de oude zetting, zie paragraaf 1.2.1. Om dit te verifiëren is dit beproefd in de Deltagoot op schaal 1:2. Met drukopnemers in de twee granulaire lagen is de invloed van de oude steenzetting gemeten.

In dit rapport zijn de proeven omschreven en de resultaten samengevat. Het onderzoek werd in oktober - december 2011 uitgevoerd door ir Paul van Steeg en begeleid door ir Mark Klein Breteler. Een deel van de proeven is bijgewoond door de opdrachtgever, vertegenwoordigd door Yvo Provoost van Rijkswaterstaat Zeeland. De rapportage is afgerond door dr Guido Wolters en ir Robert 't Hart.

1.2 Bezwijkmechanismen

Door Deltares zijn de consequenties van het aanbrengen van een steenzetting op een oude steenzetting van tevoren in kaart gebracht (Klein Breteler, 2011A). Gefocust is op de stabiliteit bij golfaanval van een dergelijke constructie. De uitvoeringstechnische aspecten en ontwerp van overgangsconstructies zijn in de memo niet behandeld. De belangrijkste aspecten uit de memo zijn hieronder weergegeven.

De primaire functie van de steenzetting is het beschermen van het dijklichaam tegen de erosieve werking van golven en stroming, waarbij de belasting door golven op de primaire waterkeringen in Zeeland vrijwel altijd maatgevend is. De mogelijke bezwijkmechanismen van steenzettingen onder golfaanval zijn (Technisch Rapport Steenzettingen, TAW 2002):

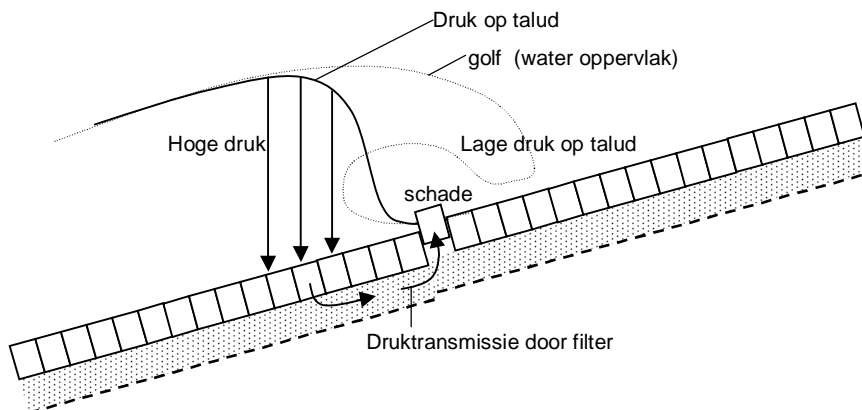
- Toplaaginstabiliteit
- Afschuiving
- Materiaaltransport vanuit de onderlaag
- Materiaaltransport vanuit de granulaire laag

Onderstaand worden deze bezwijkmechanismen achtereenvolgens behandeld. Aanvullend op (Klein Breteler, 2011A) is nog het bezwijkmechanisme "oplichten door statische water-overdrukken" opgenomen.

1.2.1 Stabiliteit van de toplaag

Toplaaginstabiliteit wordt veroorzaakt door drukgradiënten op de toplaag tijdens het breken van de golven op het talud. Deze kunnen een zodanig stijghoogteverschil over de toplaag veroorzaken, dat afzonderlijke stenen, of groepen stenen, uit de steenzetting worden gedrukt. Dit leidt tot een gat in de steenzetting, waarna het gat doorgaans snel groeit en de steenzetting bezwijkt.

Tijdens het breken van de golven op het talud zijn er specifieke momenten waarop op een deel van de steenzetting een hoge druk heerst, en daarnaast een lage druk (zie figuur 1). Deze hoge druk wordt door de toplaag en het filter doorgegeven naar de zone met lage druk. Daar ontstaat het stijghoogteverschil dat schade kan geven. De transmissie van hoge druk vindt in een normale steenzetting plaats in de granulaire lagen boven de klei (of het zand als er geen klei aanwezig is). De druktransmissie in het zand of de klei is te verwaarlozen, omdat de doorlatendheid van deze materialen veel kleiner is dan die van de granulaire vullaag.



Figuur 1.1 Druktransmissie door filter die leidt tot stijghoogteverschil en mogelijk schade

Als onder de granulaire laag weer een oude toplaag van gezette steen zit, ligt het aan de waterdoorlatendheid van deze oude toplaag of deze mee zal werken aan de druktransmissie of niet. De volgende situaties zijn daarbij denkbaar:

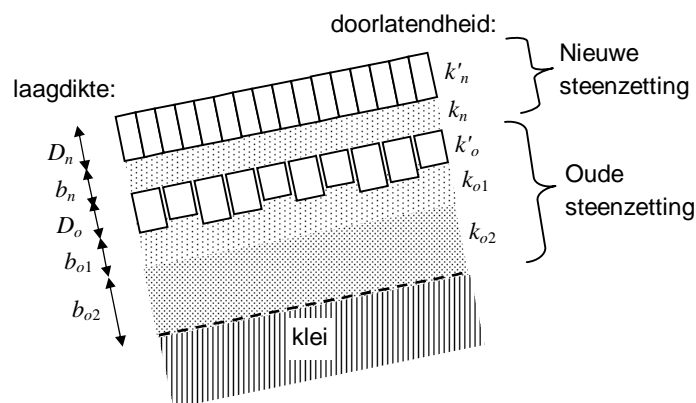
1. Als de oude steenzetting dichtgeslibd zit, is het niet te verwachten dat tijdens extreme omstandigheden het slib gaat uitspoelen. Het is immers ook niet weggespoeld tijdens directe golfaanval op de oude steenzetting in de situatie van voor de renovatie, waardoor aangenomen kan worden dat de inslibbing stevig vastzit. In dit geval is de doorlatendheid van de oude steenzetting zo laag dat deze niet meegeteld hoeft te worden bij het bepalen van de stabiliteit van de nieuwe toplaag.
2. Als de oude steenzetting is ingegoten met gietasfalt of beton, dan is de doorlatendheid gering. Dan hoeft de oude steenzetting niet meegeteld te worden bij het bepalen van de stabiliteit van de nieuwe toplaag. De onder de oude toplaag gelegen filterlaag doet in de druktransmissie niet mee, omdat deze door de weinig doorlatende oude steenzetting hydraulische gescheiden is van granulaire laag tussen de oude en nieuwe steenzetting.
3. Oude steenzettingen die niet zijn dichtgeslibd of ingegoten kunnen een aanzienlijke doorlatendheid hebben. Deze moet wel meegeteld worden bij het bepalen van de stabiliteit van de nieuwe steenzetting. Dat geldt eveneens voor de onder de oude steenzetting gelegen filterlagen.

Als de oude steenzetting met filterlaag moet worden meegeteld (situatie 3), dan heeft dit alleen consequenties voor de lek lengte. Voorlopig wordt aangenomen dat in geval van de overlaging de doorlatendheid van de oude toplaag in het vlak van het talud hetzelfde is als die in de richting haaks op het talud, zoals deze door Steentoets wordt berekend (zonder rekening te houden met de overlaging). De lek lengte van de constructie is dan als volgt (zie ook figuur 2):

$$\Lambda = \sqrt{\frac{D_n (b_n k_n + D_o k'_o + b_{o1} k_{o1} + b_{o2} k_{o2})}{k'_n}} \quad (1.1)$$

Met:

- Λ = totale lek lengte van de gerenoveerde constructie (m)
- D_n = dikte van de toplaag van de nieuwe steenzetting (m)
- k_n = doorlatendheid van de filterlaag van de nieuwe steenzetting (m/s)
- k'_n = doorlatendheid van de toplaag van de nieuwe steenzetting (m/s)
- D_o = dikte van de toplaag van de oude steenzetting (m)
- k'_o = doorlatendheid van de oude toplaag (m/s)
- b_{o1} = dikte van de bovenste filterlaag van de oude steenzetting (m)
- k_{o1} = doorlatendheid van de bovenste filterlaag van de oude steenzetting (m/s)
- b_{o2} = dikte van de onderste filterlaag van de oude steenzetting (als deze niet aanwezig is, dan vult men in de formule nul in) (m)
- k_{o2} = doorlatendheid van de onderste filterlaag van de oude steenzetting (m/s)



Figuur 1.2 Nieuwe steenzetting op oude steenzetting

Voordat de stabiliteit van de nieuwe toplaag kan worden berekend, zal men een berekening met Steentoets met de oude steenzetting en een berekening voor de nieuwe steenzetting (met fictieve kleilaag ter plaatse van de oude steenzetting en filterlagen) moeten maken. De berekening met de oude steenzetting levert de doorlatendheid van de toplaag en filterlagen. Hiervoor moeten de verborgen kolommen zichtbaar gemaakt worden met behulp van de toetscombinatie ctrl-shift-f12 (of ctrl-shift-f9). Vervolgens zijn de waarden van k'_o , k_{o1} en k_{o2} te vinden in respectievelijk de kolommen EU, FA en FT van het werkblad 'Toetsing', of de kolommen ED, EJ en FC van het werkblad 'Ontwerp'.

Op dezelfde wijze kunnen de doorlatendheden k'_n en k_n van de nieuwe steenzetting bepaald worden. Hiermee kan de lek lengte van de combinatie van oude en nieuwe steenzetting berekend worden met bovenstaande formule.

Voor de stabiliteitsberekening van de nieuwe toplaag wordt tenslotte de nieuwe zetting wederom berekend (met fictieve kleilaag ter plaatse van de oude steenzetting en de

eventuele filterlagen daaronder), maar moet de korrelgrootte van de nieuwe granulaire laag zodanig vergroot worden totdat de leklengte in kolom FV van het werkblad 'Toetsing' dezelfde waarde heeft als de berekende leklengte van de combinatie van oude en nieuwe steenzetting. Of als het werkblad 'Ontwerp' wordt gebruikt, dan kijkt men in kolom FE.

Of de bovenstaande werkwijze een veilig (conservatief) resultaat oplevert ten aanzien van de stabiliteit van de toplaag is onderwerp van onderzoek met de Deltagootproeven. Met het modelonderzoek moet vastgesteld worden of de filterlagen onder de oude toplaag wat minder meedoen in de druktransmissie, waardoor de stabiliteit wellicht iets hoger zou kunnen zijn.

1.2.2 Afschuiving

Het mechanisme afschuiving wordt bepaald door het gewicht van de lagen boven het zand waarin het afschuifvlak zou kunnen gaan optreden. Hierbij is aangenomen dat de teenconstructie voldoende stabiel is om zowel de oude als de nieuwe steenzetting voldoende te ondersteunen.

Het mechanisme afschuiving kan worden doorgerekend met Steentoets, als de oude steenzetting en filterlagen worden weergegeven als een extra granulaire laag. Normaal heeft een moderne steenzetting een toplaag en een (dunne) granulaire laag. De eigenschappen van de granulaire laag worden weergegeven in Steentoets bij 'bovenste filterlaag'.

Door een fictieve tweede filterlaag in te voeren kan rekening gehouden worden met het gunstige effect van de oude steenzetting met filterlagen. Een conservatief resultaat wordt verkregen als de fictieve tweede filterlaag dezelfde dikte gegeven wordt als de som van de dikte van de oude toplaag en de oude filterlagen samen.

Het is niet te verwachten dat er een glijvlak ontstaat tussen de nieuwe granulaire laag en de oude toplaag, ook niet als deze toplaag vrij glad is. Normaal wordt namelijk onder de granulaire laag een geotextiel aangebracht, en dat is ook vrij glad. Aanbevolen wordt een extreem gladde toplaag als gevolg van bijvoorbeeld algenaangroei of wieren eerst schoon te maken.

1.2.3 Materiaaltransport vanuit de onderlaag

Materiaaltransport vanuit de onderlaag betreft de migratie van zand en/of klei door de oude filterlagen en toplaag. Dit kan eenvoudig gecontroleerd worden door de oude steenzetting te toetsen met Steentoets, en te kijken of dit mechanisme zou kunnen optreden.

In het uitzonderlijke geval dat dit problemen zou kunnen geven, kan een geavanceerde toetsing uitgevoerd worden waarin ook de invloed van de nieuwe toplaag wordt meegenomen.

1.2.4 Materiaaltransport vanuit de granulaire laag

Het mechanisme 'materiaaltransport vanuit de granulaire laag' (door de toplaag) kan gecontroleerd worden met Steentoets, als daarin de werkelijke waarden van de nieuwe steenzetting en granulaire laag worden ingevoerd. Het is op voorhand moeilijk te zeggen of de onderste steenzetting dit mechanisme beïnvloedt. De extra waterbeweging in de ondergrond als gevolg van de aanwezigheid van de onderste steenzetting zou een sterkere naar buiten gerichte stroming kunnen veroorzaken die het inwasmateriaal en wellicht ook de granulaire laag kan doen uitspoelen. De Deltagootproeven zijn ook bedoeld om dit nader vast te stellen.

1.2.5 Oplichten door statische wateroverdrukken

Dit mechanisme is niet behandeld door Klein Breteler (2011A).

Voor de overlaging, waarvan wordt verondersteld dat het een niet-ingegoten steenzetting betreft, zal oplichten door statische wateroverdrukken onder de toplaag geen rol spelen. Maar de oude steenzetting kan relatief ondoorlatend zijn, doordat deze is ingegoten met gietasfalt of beton. Oplichten van deze onderste toplaag door statische wateroverdrukken vanuit het onderste filter is dan in theorie mogelijk.

Dat dit mechanisme na de overlaging met de nieuwe steenzetting volgens de rekenregels nog maatgevend zal zijn, is echter zeer onwaarschijnlijk, omdat de oude toplaag wordt geballast met de nieuwe filter- en toplaag.

Voorts moet worden opgemerkt dat de oude toplaag waarschijnlijk niet zodanig ondoorlatend is, dat zich een situatie voordoet waarbij opdrijven kan optreden: extreme grondwaterdrukken vallen al vrij snel weg bij kleine lekdebieten.

Ten slotte kan worden opgemerkt dat als er desondanks oplichten van de oude toplaag zou optreden, dat dit zal leiden tot beperkte vervormingen van het talud waarbij de waterdichtheid van de onderste toplaag zal worden verbroken, naar alle waarschijnlijkheid nabij de teen van de dijk.

Al met al zal dit mechanisme het functioneren van de bekleding onder maatgevende omstandigheden niet bedreigen en hoeft dus niet te worden beschouwd.

2 Schaalregels

Het onderzoek is uitgevoerd in de Deltagoot van Deltares. Hoewel de golven in deze faciliteit zeer hoog kunnen worden ($H_s \approx 1.6\text{m}$), zijn de golven langs de Nederlandse zeedijken vaak nog hoger. Voor de meeste dijken geldt dat bij toetscondities de significante golfhoogte in de range van 1,0 tot 2,5 m ligt. Er zijn echter enkele uitzonderingen met $H_s = 3$ tot 4m.

Daarom moet het modelonderzoek op schaal worden uitgevoerd. Omdat de resultaten van dit onderzoek toepasbaar moeten zijn op diverse locaties, met diverse golfcondities en taludafmetingen, is de schaal niet precies vast te stellen. Voor de meeste toepassingen is het de verwachting dat de schaal tussen 1:1,5 en 1:2,5 zal liggen.

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

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

Met:

u	= stroomsnelheid van het water of voortplantingssnelheid van de golven	(m/s)
g	= zwaartekrachtsversnelling	(m/s ²)
L	= lengtemaat	(m)

De schaalfactor voor een bepaalde variabele is de verhouding tussen de waarde in het prototype gedeeld door de waarde in het model:

$$n_v = \frac{v_p}{v_m} \quad (2.2)$$

Met:

n_v	= schaalfactor voor variabele v	(-)
v_p	= waarde van variabele v in het prototype	
v_m	= waarde van variabele v in het model	

Omdat $n_{Fr} = 1$ en $n_g = 1$ volgt uit bovenstaande formules:

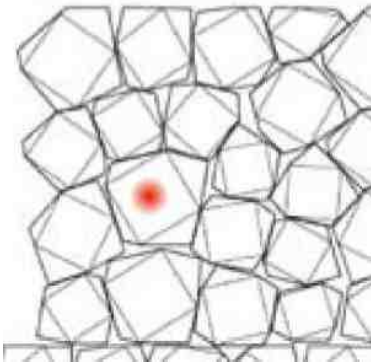
$$1 = \frac{(n_u)^2}{1 \cdot n_L} \Rightarrow n_u = \sqrt{n_L} \quad (2.3)$$

Gezien het feit dat de snelheid gelijk is aan de afgelegde afstand (L) gedeeld door de tijd (t) geldt ook het volgende:

$$n_u = \frac{n_L}{n_t} = \sqrt{n_L} \Rightarrow n_t = \sqrt{n_L} \quad (2.4)$$

In deze paragraaf wordt de schaling verder uitgewerkt voor het geval dat de lengteschaal ($n_L = L_p / L_m$) in dit model 2 is. Uit de bovenstaande schaalregel zijn dan de volgende belangrijke verbanden te leggen:

- 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.



Figuur 2.1 Standaard bochtenset van Basalton (de zuil met de rode stip is uit elke set van 1,2 m² verwijderd)

Breedte en lengte van de Basalton-zuilen zijn niet geschaald in het model omdat het maken van zuilen met deze maten op korte termijn niet mogelijk bleek. Hoewel de toplaagstabiliteit hierdoor volgens het rekenmodel slechts weinig wordt beïnvloed, is er wel een invloed op het uitspoelen van inwasmateriaal te verwachten. Niet alleen de zuilen zijn relatief groot, maar daardoor zijn de openingen tussen de zuilen ook relatief groot. Om dit nog enigszins te beperken, is ervoor gekozen om de grootste zuil uit elke set van 1,2 m² te verwijderen (zie Figuur 2.1).

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 prototype en model hetzelfde zijn. Het Reynolds getal wordt als volgt gedefinieerd:

$$\text{Re} = \frac{Lu}{\nu} \quad (2.5)$$

Met:

Re	= Reynoldsgetal	(-)
L	= lengte	(m)
u	= stroomsnelheid van het water	(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 schaalmodel helaas onmogelijk. Daarom moet het onderzoek op een zo groot mogelijke schaal worden uitgevoerd. Tot $n_L = 3$ (Bezuijen, Burger en Klein Breteler, 1990) is de invloed van de schaaffecten verwaarloosbaar. Het huidige onderzoek voldoet hier dus ruimschoots aan.

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

$$\Lambda = \sqrt{\frac{kbD}{k'}} \quad (2.6)$$

Met hierin:

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

De leklengte heeft de dimensie m en schaalt met de lengteschaal: $n_{\Lambda} = 2$. Met het rekenmodel STEENTOETS (Klein Breteler, 2011) is de leklengte in prototype-omstandigheden en in het model berekend. Uit de berekeningen is gebleken dat het filter een korrelgrootte van ca. $D_{15} = 15$ mm moet hebben met een laagdikte $b = 0,07$ m om goed overeen te komen met het gebruikelijke filter in werkelijkheid.

Het derde aspect van het schalen van de steenzetting betreft het mechanisme "materiaaltransport door de toplaag". Ook hier zijn ongewenste schaaffecten te verwachten, omdat de openingen in de toplaag op prototypeschaal zijn (echte Basalton). Bovendien is de korrelgrootte van de granulaire laag verkleind in verband met de Reynoldsschaal (leklengte). Het effect is dat in het model er meer granulair materiaal zal uitspoelen dan in het prototype.

3 Modelopstelling

3.1 Testlocatie

De Deltagoot is bij uitstek geschikt om de stabiliteit van steenzettingen te beproeven, omdat hierin een dijk op bijna prototypeschaal kan worden ingebouwd en tot bezwijken toe belast kan worden door grote golven. Door de grootte van deze golfgoot zijn de ongewenste schaafeffecten zeer beperkt.

De Deltagoot is 220 m lang, 7 m diep en 5 m breed en er kunnen golven opgewekt worden tot ruim 2,5 m hoogte. Door het golfschot kunnen golven opgewekt worden zoals die ook op zee voorkomen, waarbij elke golf een verschillende hoogte en lengte heeft. Deze zogenaamde onregelmatige golven worden gekarakteriseerd door een significante golfhoogte, die gedefinieerd is als het gemiddelde van het hoogste een derde deel van de golven. De maximale significante golfhoogte kan in de Deltagoot 1,6 m worden.

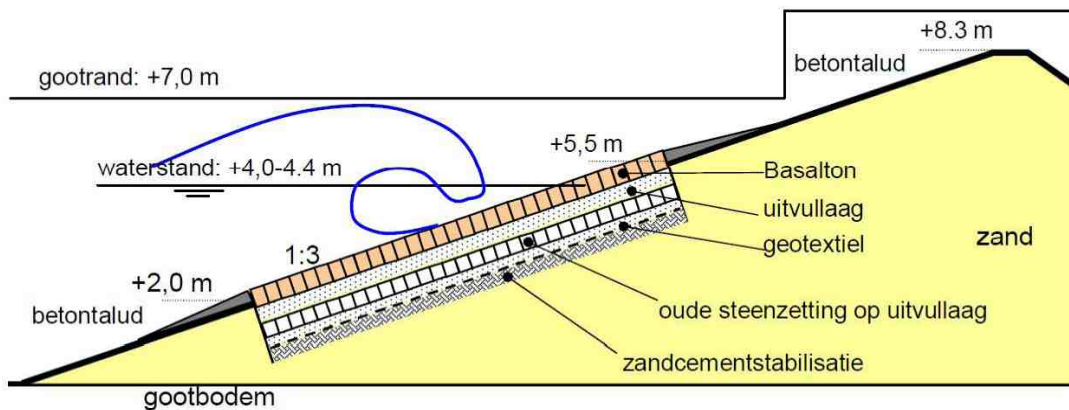


Figuur 3.1 Modelonderzoek in de Deltagoot tijdens proef 6 (rechts) en golfschot (links)

Het golfschot is verder uitgerust met een dynamisch reflectiecompensatie systeem, waardoor alle golven die van de constructie terugkomen automatisch geabsorbeerd worden. Hierdoor kan het golfveld in de Deltagoot perfect in de hand gehouden worden.

3.2 Modelopstelling

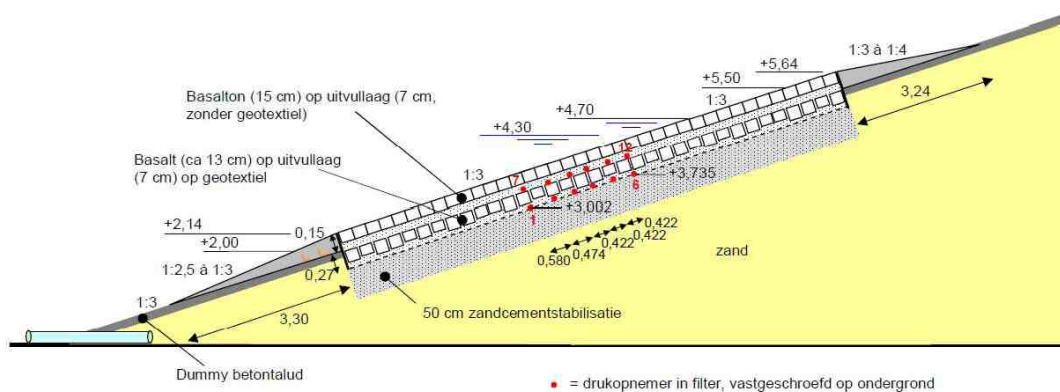
In de Deltagoot was al een dijk aanwezig die gebruikt is voorafgaande aan dit onderzoek. Deze dijk heeft een taludhelling van 1:3.



Figuur 3.2 Schematische doorsnede van dijk in de Deltagoot

De modelopstelling is schematisch weergegeven in Figuur 3.2 en Figuur 3.3 en Appendix B.

De kern van de dijk bestaat uit zand, met daarop een laag zandcementstabilisatie die een goede weergave is van de kleilaag die normaal in werkelijkheid wordt toegepast. Op de laag zandcementstabilisatie is een geotextiel aangebracht en daarop een laagje steenslag. Op het laagje steenslag is de oude steenzetting van basaltzuilen gezet (zie Foto 4, Bijlage F). Op de oude steenzetting is vervolgens een laagje steenslag en een toplaag van Basalton aangebracht (zie Foto 6).



Figuur 3.3 Gedetailleerde schets met locatie van drukmetingen

De in de Deltagoot ingebouwde constructie bestond uit de volgende materialen en afmetingen (zie Figuur 3.2 en Figuur 3.3):

- hoogte van de dijk ten opzichte van de bodem van de goot: 8,3 m
- taludhelling van 1:3
- steenzetting van 2,14 m boven de gootbodembodem tot 5,64 m boven de gootbodembodem
- een dummy bekleding van de gootbodembodem tot een hoogte van 2,14 m (zie Foto 1)
- een dummy bekleding vanaf 5,64 m boven de gootbodembodem tot de kruin van de dijk
- Basalton steenzetting met een hoogte van 15 cm en soortelijke massa van gemiddeld 2345 kg/m^3
- een filterlaag van steenslag van 7 cm dik (gelijk voor onder Basalton en onder basalt): $D_{f15}=15\text{mm}$, $D_{f50}=25\text{mm}$

- oude steenzetting van basaltzuilen, met toplaagdikte van 11 à 17 cm (gemiddeld 14 cm) op een filterlaag. Soortelijke massa van de basalt: 3068 kg/m^3
- inwasmateriaal met brede gradering ($D_{15} = 8 \text{ mm}$, $D_{50} = 17 \text{ mm}$, $D_{90} = 31 \text{ mm}$); voor beide steenzettingen (Basalton, basalt)
- geotextiel (PE 180 Geolon, alleen toegepast op de zandcementstabilisatie)
- zandcementstabilisatielaag (vervangt klei): 50 cm dik

De gehanteerde Basalton had een diameter in het vlak van het talud van 16 cm tot 25 cm met een zuilhoogte $D = 15 \text{ cm}$. De grootste zuilen (met diameter van orde 32 cm) zijn niet gebruikt voor de steenzetting (zie hoofdstuk 2).

De open ruimte van de Basalton is bepaald aan de hand van een steekproef van 1 m x 1 m. Van dat oppervlak is een foto omgezet in een AutoCAD. Het open oppervlak bleek 11%, wat iets kleiner is dan de gebruikelijke waarden van 12-13%. Als van de grootste gaten en spleten het oppervlak wordt teruggerekend naar dat van een cirkel, dan bedraagt de grootste equivalente diameter ca. 14 cm. De diameter van een bol, die in het grootste gat tussen de stenen van de zetting zou passen, bedroeg ca. 7,5 cm.

Doordat de steenzetting qua zuiloppervlak niet is geschaald, zijn de openingen tussen de zuilen relatief groot. Eigenlijk is het beter om ook de lengte/breedte-afmetingen van de zuilen te verkleinen in dezelfde verhouding als de zuilhoogte is verkleind. De openingen tussen de zuilen zullen alleen dan in dezelfde verhouding kleiner zijn. Helaas was dit in dit onderzoek niet uitvoerbaar met als consequentie dat de afmetingen van de openingen relatief groot zijn.

Om de meter is op het talud een markering met een letter aangebracht (beginnend aan de bovenkant van het talud, zie Foto 7). Dit vergemakkelijkt het identificeren van de locatie waar schade optreedt.

Het wordt opgemerkt dat de steenzetting voor de proeven niet met de trilplaat is aangetrild. De verse steenzetting, die doorgaans een geringere klemming heeft, kon niet worden aangetrild vanwege de drukopnemers. Normaal wordt dit wel in de Deltagoot gedaan als een soort kunstmatige veroudering.

De Basalton steenzetting is na elke proef opnieuw ingewassen voordat de volgende proef is gestart, zodat het resultaat van elke volgende proef niet beïnvloed is door de eventuele uitspoeling van inwasmateriaal uit de vorige proef. De proeven kunnen daardoor als vrijwel onafhankelijk beschouwd worden.

De diameter van de zuilen van de basalt lag tussen 14 cm en 25 cm met een zuilhoogte tussen 11-17 cm (gemiddeld 14 cm). Deze maten zijn vastgesteld door 30 zuilen op te meten. De ruwe zijde van de zuilen was steeds naar boven gericht en het zaagvlak naar onderen. Hoogteverschillen zijn in het onderste filter verwerkt, zodat de bovenzijde van de basaltzetting redelijk vlak was.

Zeefkrommes van het inwasmateriaal en het filtermateriaal zijn gegeven in Appendix B4 resp. B3. De uitvullaag onder de basalt is gemaakt met hetzelfde materiaal als onder de Basalton.

Om deze ruim 8 m hoge dijk in de Deltagoot te kunnen realiseren, is plaatselijk bij de kruin van de dijk de gootwand wat opgehoogd.

Tussen de gootwand en de Basalton is een strook rubber aangebracht zoals dat gebruikelijk is bij het beproeven van steenzettingen. Het voorkomt dat de steenzetting zich klem wigt tussen de starre gootwanden waardoor een overschatting van de stabiliteit verkregen wordt. 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.

Het dijklichaam was voorzien van drainage zodat eventuele snelle waterstandswisselingen in de goot niet zouden leiden tot het opbarsten van de dichte betonnen teen.

3.3 Meetinstrumenten

De volgende instrumentatie is in de modelopstelling toegepast:

- Drie golfhoogtemeters, waarmee de golfhoogte en het spectrum van de inkomende golven is gemeten, door ze te scheiden van de golven die reflecteren op de dijk.
- Een profielvolger, waarmee langs 3 raaien de vervorming van de steenzetting na elke proef is bepaald.
- Een videocamera, waarmee de eventuele schade aan de steenzetting tijdens de proef is vastgelegd.
- 12 drukopnemers in de twee filterlagen (6 in het onderste filter en 6 in het bovenste) om het stijghoogteverloop te bepalen. Op basis van deze metingen kan de invloed van de onderste steenzetting op de belasting op de bovenste steenzetting worden vastgesteld.

De coördinaten van de drukopnemers zijn aangegeven in Tabel A.3 (bijlage A), de locaties zijn ingetekend in bijlage B.2. De drukopnemers zijn gefixeerd op het geotextiel (onderste rij) respectievelijk op de bovenkant van de basalt (bovenste rij), zie foto 2 respectievelijk 5b in Appendix F.

Eén drukopnemer (Dro 6, bovenste locatie in granulaire laag onder basalt) bleek echter stuk na inbouw. Deze drukopnemer is niet gebruikt in de verdere analyse.

Verder is de uitspoeling van het inwas- en filtermateriaal gemonitord, zie bijvoorbeeld Foto 11.

Tijdens de proeven zijn opnamen gemaakt met een digitale home-camcorder.

De meetresultaten zijn onder andere terug te vinden in bijlage A (tabellen van golfkarakteristieken tijdens de proeven) en bijlagen C-E (overschrijdingskrommen, golfspectra, verticale verplaatsingen van het talud en drukgradiënten). In de volgende paragrafen wordt de methodiek van die metingen verder uitgelegd.

3.3.1 Golfhoogtemetingen

De golfhoogten zijn gemeten met drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit 2 parallel aan elkaar, verticaal gespannen draden, waarvan de onderlinge weerstand verandert met de oppervlakte-uitwijking van het water. De golfhoogtemeters hingen op achtereenvolgens 80 m, 85 m en 88 m van het golfschot.

Door het toepassen van 3 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 aan welke golfcondities tijdens de proef bereikt zijn. De kentallen zijn gerapporteerd in bijlage A.1 en in paragraaf 3.4. De overschrijdingskrommen en de golfspectra van de inkomende golven zijn gegeven in bijlage C.

3.3.2 Profielmetingen

Profielmetingen zijn uitgevoerd voorafgaande aan het proevenprogramma en na elke proef (alleen van de bovenste steenzetting, Basalton). Het niveau van het taludoppervlak is gemeten met de standaard profielvolger van de Deltagoot (zie Figuur 3.4). Dit apparaat

bestaat uit een wielje dat over het taludoppervlak rijdt en constant het niveau van het talud als functie van de locatie meet (zowel de horizontale als de verticale coördinaat van elk punt op het talud). Deze meting is over drie raaien gedaan. Raai 1 lag aan de meetcabine kant (tegen het talud aankijkend aan de rechterkant) van de goot op 1,25 m afstand van de gootwand, raai 2 lag in het midden van de goot op 2,5 m van beide wanden en raai 3 lag 1,25 m van de gootwand aan de kant van de bouwhal.



Figuur 3.4 De profielvolger vlak voor een meting.

De resultaten van deze profielmetingen zijn per proef gerapporteerd in bijlage D. De cumulatieve verplaatsing geeft de verandering van het niveau van het talud na afloop van de proef ten opzichte van het begin van de proevenserie; de verticale verplaatsing geeft de verandering van het niveau van het talud na afloop van de proef ten opzichte van het talud na afloop van de voorafgaande proef.

3.4 Proevenprogramma

Het proevenprogramma bestond uit 9 korteduur proeven. De proeven zijn uitgevoerd met golfhoogten tussen $H_{m0} = 0.48 - 1.07$ m en twee golfsteilheden ($s_{op} = 0,04$ en $s_{op} = 0,02$). De golfsteilheid is de verhouding tussen de golfhoogte en golflengte (op diep water).

Na elke proef is de bekleding geïnspecteerd om te zien of er schade is ontstaan. Eventuele schade aan de steenzetting is eerst gerepareerd voordat de volgende proef is uitgevoerd.

In tabel 1 is het proevenprogramma concreet weergegeven. In deze tabel zijn de volgende symbolen gebruikt:

$H_{m0,i}$	=	significante inkomende golfhoogte gebaseerd op het golfspectrum (m)
H_{max}	=	de maximaal gemeten golfhoogte (m)
T_p	=	golfperiode bij de piek van het spectrum (s)
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode gebaseerd op het 0-de en -1-e moment (s)
s_{op}	=	golfsteilheid op basis van diepwater golflengte en piekperiode (-)
ξ_{op}	=	brekerparameter op basis van diepwater golflengte en piekperiode (-)
$H_{m0}/(\Delta D)$	=	belastingsparameter (-)
F	=	stabiliteitsparameter ($H_{m0}/(\Delta D \cdot \xi_{op}^{-2/3})$) (-)

De proeven zijn uitgevoerd met een Pierson-Moskowitz spectrum omdat dit karakteristiek is voor de zeegang langs de Nederlandse kust. Elke korteduur proef duurde ongeveer 1000 golven, tenzij eerder schade is ontstaan.

proef nr.	waterstand (m)	$H_{m0,i}$ (m)	H_{max} (m)	T_p (s)	$T_{m-1.0}$ (s)	s_{op} (-)	ξ_{op} (-)	duur (h)	$H_{m0}/\Delta D$ (-)	F (-)
T1	4,20	0,80	1,243	3,513	3,425	0,041	1,64	0,65	3,90	5,42
T2	4,00	0,48	0,787	2,736	2,622	0,041	1,64	0,67	2,35	3,27
T3	4,25	0,51	0,961	3,854	3,507	0,022	2,24	0,93	2,51	4,31
T4	4,00	0,62	1,001	3,029	2,991	0,044	1,59	0,74	3,05	4,16
T5	4,30	0,63	1,153	4,235	3,898	0,023	2,22	1,04	3,08	5,24
T6	4,40	0,78	1,321	4,836	4,427	0,021	2,27	1,10	3,80	6,58
T7	4,40	0,78	1,327	4,881	4,422	0,021	2,29	1,02	3,81	6,62
T8	4,25	0,88	1,448	3,876	3,597	0,038	1,71	0,88	4,32	6,17
T9	4,23	1,07	1,468	4,156	3,982	0,040	1,67	0,56	5,25	7,37

Tabel 3.1 Proevenprogramma (op Deltagoot schaal)

In Tabel 3.1 en bijlage A.1 zijn de gerealiseerde condities (in modelwaarden) weergegeven. Voorbeelden van de golfhoogte-overschrijdingskrommen en energiedichtheids-spectra zijn gepresenteerd in bijlage C.

De procedure die bij elke proef gevolgd is, was steeds dezelfde. Na een proef werd het water weggepompt en werd de peiling van het taludoppervlak gedaan. Vervolgens werd er op het droge talud een visuele inspectie gedaan van de toestand van de bekleding en de mate van uitspoeling van inwasmateriaal en filtermateriaal vastgesteld. Na de inspectie werd eventuele schade hersteld en werden de lege voegen tussen de stenen opnieuw ingewassen met inwasmateriaal (er is dus sprake van afzonderlijke korteduur proeven) en het water vervolgens weer aangevuld.

4 Proefresultaten

4.1 Algemeen

Tijdens de proeven is gebleken dat de bovenste steenzetting veel zwakker is dan normaal. Kennelijk zorgt de oude steenzetting ervoor dat de stijghoogteverschillen over de toplaag toenemen. Daardoor spoelde het inwasmateriaal al vrij snel uit en daarna volgt er vrij snel schade aan de steenzetting. Tijdens de eerste proef is al gelijk schade opgetreden ($H_{m0} = 0,80$ m, $s_{op} = 0,04$). Daarna is bij een veel kleinere golfhoogte verdergegaan. De proeven P02 t/m P06 (met $s_{sp} = 0,02$ en $0,04$) toonden geen schade aan de steenzetting, maar wel veel uitspoeling van inwas- en filtermateriaal. Na proef 6 is lokaal gaas op het filter aangebracht (op een niveau ten opzichte van de bodem $Z = 3.5 - 4.25$ m), om te zorgen dat het filter niet uitspoelt. Deze maatregel heeft echter weinig invloed gehad op de golfhoogte bij schade: schade is bij ongeveer dezelfde golfhoogte ($H_s = 0,78$ m, $s_{op} = 0.02$) opgetreden tijdens proef 7.

Proef 8 en 9 zijn weer met de hoge golfsteilheid ($s_{op} = 0.04$) uitgevoerd. Uiteindelijk is het in P09 gelukt om tot een golfhoogte van net iets meer dan 1 m te komen ($H_{m0} = 1,07$ m, $s_{op} = 0,04$) voordat schade optrad.

De Basalton steenzetting is hetzelfde als de steenzetting die tijdens het reststerkte-onderzoek in 2010 is onderzocht (Wolters & Klein Breteler, 2011). Toen bezweek de steenzetting pas bij $H_s = 1,5$ m. Dat geeft aan hoe groot de invloed van de oude steenzetting eronder is.



Figuur 4.1 Tijdens proef P06

4.2 Observaties tijdens proeven

Proef T01 ($h = 4.2$ m, $H_{m0} = 0.8$ m, $s_{op} = 0.04$)

Lokaal bezwijken van de steenzetting is geconstateerd: 4 zuilen zijn eruit gekomen (Basalton, rij F, $Z = 3.75$ m). Na 2350 s is de proef gestopt, zie Foto 8a en 9a (zie bijlage F). Een groot deel van het uitgespoelde materiaal is onderaan de steenzetting terecht gekomen.

Na afloop van de proef zijn de zuilen, het inwasmateriaal en de granulaire laag lokaal vervangen ($Z = 3.5$ - 4.25 m), zie Foto 8b en 9b.

Proef T02 ($h = 4.0$ m, $H_{m0} = 0.48$ m, $s_{op} = 0.04$)

Er is geen bezwijken van de top laag geconstateerd, zie Foto 10. Tussen $Z = 3.5$ en 3.75 m is veel inwasmateriaal uitgespoeld (tot een diepte van 16 - 18.5 cm, dus ook 1 tot 3.5 cm van de filterlaag, zie Foto 11). Ook uitspoeling van onder de steenzetting is lokaal geobserveerd.

Proef T03 ($h = 4.25$ m, $H_{m0} = 0.51$ m, $s_{op} = 0.02$)

Geen bezwijken. Tussen ca. $Z = 3.7$ en 4 m is veel inwasmateriaal uitgespoeld (tot een diepte van 16 - 18.5 cm, dus inclusief 1 tot 3.5 cm van de filterlaag) zie Foto 12.

Proef T04 ($h = 4.0$ m, $H_{m0} = 0.63$ m, $s_{op} = 0.04$)

Geen bezwijken. Tussen ca. $Z = 3.7$ en 4 m is veel inwasmateriaal uitgespoeld, namelijk tot een diepte van 17 tot 20 cm, dus inclusief 1 tot 3.5 cm van de filterlaag, zie Foto 13.

Proef T05 ($h = 4.3$ m, $H_{m0} = 0.63$ m, $s_{op} = 0.02$)

Geen bezwijken, zie Foto 14.

Proef T06 ($h = 4.4$ m, $H_{m0} = 0.78$ m, $s_{op} = 0.02$)

De eerste zuilbeweging is visueel geconstateerd na 2800 s. Na de test bleek dat er 2 zuilen omhoog zijn gekomen (tot 7 cm, $Z = 4.0$ m). Eromheen zijn 2 volledig ondermijnde zuilen gevonden (filter/inwas weg). Ook elders op dit niveau is veel uitspoeling van inwas- en filtermateriaal geobserveerd ($Z = 3.5$ tot 4 m, zie Foto 16). Daardoor zijn de zuilen lokaal verzakt (zie profielmetingen).

Na deze proef is het profiel schoongeveegd van inwas-/filtermateriaal voordat de peiling is uitgevoerd.

Na deze proef is tussen $Z = 3.5$ - 4.25 m het filter opnieuw aangebracht met een gaas erop om het uitspoelen van filtermateriaal te voorkomen. In deze zone met schade is de Basalton herzet, zie Foto 17.

Proef T07 ($h = 4.4$ m, $H_{m0} = 0.78$ m, $s_{op} = 0.02$)

Ondanks het aangebrachte gaas is vergelijkbare schade als bij proef T06 ontstaan. Na 3675 s is de proef afgebroken omdat 3 zuilen omhoog zijn gekomen (ca. 4 tot 7 cm, $Z = 3.75$ m, rij F). De geconstateerde schade is te zien in Foto's 18 en 19. De zone met schade is na de proef herzet.

Proef T08 ($h = 4.25$ m, $H_{m0} = 0.88$ m, $s_{op} = 0.04$)

Geen bezwijken. Lokaal is wel meer dan 5 cm zakking gemeten (zie Foto's 20 en 21) en enkele zuilen zijn iets omhoog gekomen (2 à 3 cm).

Proef T09 ($h = 4.23$ m, $H_{m0} = 1.07$ m, $s_{op} = 0.04$)

Na 1900 s is beweging van zuilen geconstateerd. Na 1980 s is een zuil eruit gekomen. Na 2005 s is de proef gestopt (3 zuilen eruit, positie ca. $Z = 3.5$ m, rij G, zie Foto's 22 en 23).

4.3 Profielen

Op grond van de peilingen zijn per proef twee verschilgrafieken gemaakt die de vervormingen van het taludoppervlak laten zien: de verticale verplaatsingen van het oppervlak. Voor de eerste grafiek is als referentie de peiling voor aanvang van het proevenprogramma genomen. Voor de tweede grafiek is de referentie de peiling voor aanvang van de betreffende proef. Per proef worden dus getoond de vervorming van het talud als gevolg van alle proeven tot en met de betreffende proef (de cumulatieve vervorming) en de vervormingen die het gevolg zijn van de betreffende proef. Deze grafieken zijn opgenomen in bijlage D.

In de eerste proeven geeft de profielmeting (vooral op het ondertalud) lokaal een wat vertekend beeld, omdat er na de proef veel inwas- en filtermateriaal op de steenzetting lag (zie bijvoorbeeld figuur D.4 nabij $x = 183$). Pas in de loop van het proevenprogramma is na elke proef het talud schoongeveegd voordat de profielmeting is gedaan.

Proef (chronologisch)	$H_s/(\Delta D)$ (-)	ξ_{op} (-)	Mate van S-profiel (cm)	Blokbeweging (cm)	Schade klasse
T01	3,90	1,64	2 (a)	15 (d)	d
T02	2,35	1,64	0 (a)	(a)	a
T03	2,51	2,24	0 (a)	(a)	a
T04	3,05	1,59	0,5 (a)	(a)	a
T05	3,08	2,22	0,5 (a)	(a)	a
T06	3,80	2,27	1 (a)	7 (c)	c
T07	3,81	2,29	1 (a)	7 (c)	c
T08	4,32	1,71	5 (c)	2 à 3 (b)	c
T09	5,25	1,67	2 (a)	15 (d)	d

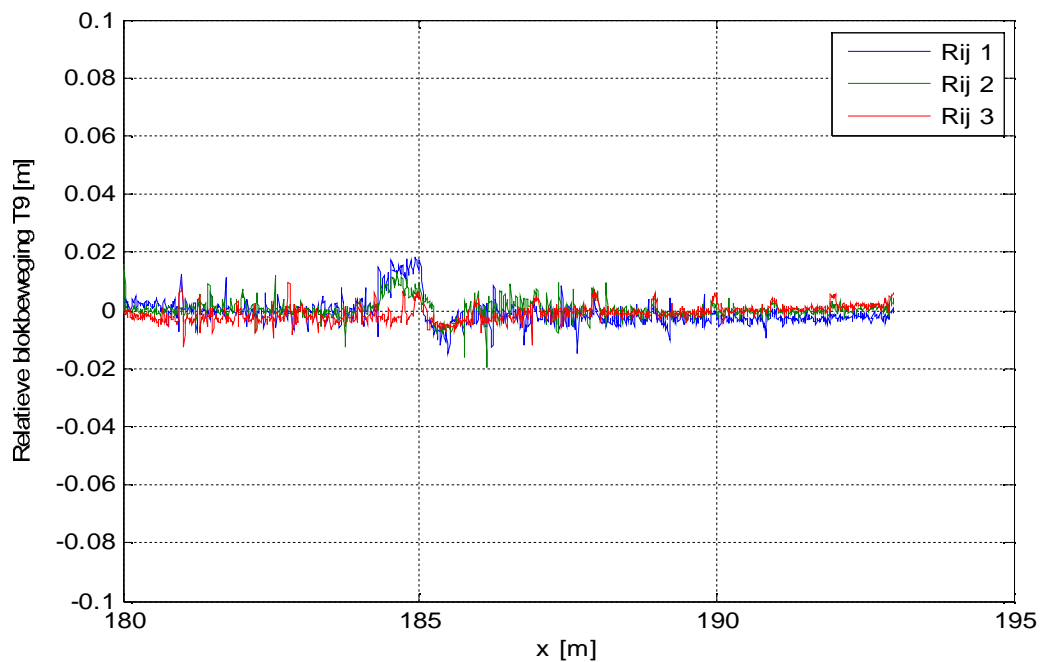
Tabel 4.1 Overzicht van geconstateerde schade

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

- Bij het ontstaan van een S-profiel, een wat geleidelijk verlopende vervorming van het talud, worden de volgende klassen onderscheiden:
 - a. Amplitude kleiner dan 20% van de blokdikte (20% van 15cm is 3 cm): geen of verwaarloosbare schade;
 - b. Amplitude tussen 20 en 30 % van de blokdikte (30% van 15cm is 4,5 cm): schade;
 - c. Amplitude tussen 30 en 50 % van de blokdikte (50% van 15 cm is 7,5 cm): ernstige schade;
 - d. Amplitude groter dan 50 % van de blokdikte: bezwijken.
- Voor het maximale verplaatsingsverschil tussen een omhoog gekomen steen en de naastliggende steen worden 4 schade-klassen gehanteerd:
 - a. Verplaatsingsverschil kleiner dan 10% van de blokdikte (10% van 15cm is 1,5 cm): geen of verwaarloosbare schade;
 - b. Verplaatsingsverschil tussen 10 en 20% van de blokdikte (20% van 15cm is 3 cm): schade;
 - c. Verplaatsingsverschil tussen 20 en 50% van de blokdikte (50% van 15 cm is 7,5 cm): ernstige schade;
 - d. Verplaatsingsverschil groter dan 50% van de blokdikte, wat er meestal op neerkomt dat het blok geheel uit de bekleding ligt: bezwijken.

De verplaatsingen en vervormingen die zijn gemeten/geobserveerd zijn opgenomen in Tabel 4.1.

Als voorbeeld is hier de relatieve zuilbeweging na proef 9 gegeven. De zakking van de zuilen is vooral in de golfimpactzone te zien (X=185 tot 186m), de opbolling, kattenrug juist daaronder (X=184 tot 185m).



Figuur 4.2 Niveau van het taludoppervlak over dwarsprofielen 1-3, Relatieve zuilbeweging (Proef T9)

5 Analyse

5.1 Uitspoeling van inwasmateriaal

Zoals al in hoofdstuk 4 is opgemerkt, is er tijdens de proeven veel inwasmateriaal en zelfs filtermateriaal uitgespoeld.

Voor wat betreft het inwasmateriaal is uitspoelen eigenlijk een normaal verschijnsel bij steenzettingen. Tijdens de storm spoelt altijd veel inwasmateriaal uit, vooral de steentjes die los in de spleten zitten (vooral in de grote gaten). De vastzittende steentjes langs de contactvlakken tussen de zuilen zullen doorgaans wel blijven zitten. Ze dragen bij aan de klemming (interactie tussen de stenen) van de steenzetting. Zodra gemiddeld meer dan de helft van de spleethoogte is uitgespoeld, gaat een beheerder doorgaans het inwasmateriaal in lopend onderhoud weer aanvullen.

In deze proeven is echter (zie sectie 4.2) binnen een uur doorgaans het hele inwasmateriaal en soms ook de hele filterlaag uitgespoeld in de golfklapzone ($Z = 3.5-4$ m) als gevolg van uittredend water uit de toplaag. Dit is in Bezuijen et al. (1990) gedefinieerd als uitspoelingmechanisme 1. Uitspoeling van filtermateriaal van betekenis als gevolg van over het talud stromend water (mechanisme 2) is niet vastgesteld.

De diepte tot waar uitspoelen van het granulaire materiaal optreedt, wordt door Bezuijen, Burger en Klein Breteler (1990) voor gatafmetingen kleiner dan 0,1 m op basis van proefresultaten beschreven door de volgende formule:

$$\frac{Y}{G} = 0,04 \ell^{0,75} \sqrt{H / D_{50}} \quad (5.1)$$

Waarin:

- Y = de erosiediepte in een gat in de bekleding (m)
- G = de gatdiameter (m)
- ℓ = de reciproque van het relatief open oppervlak van de bekleding (-)
- H = de golfhoogte (regelmatige golven) (m)
- D_{50} = de korrel diameter die door 50% (massa) van de korrels wordt onder-schreden (m)

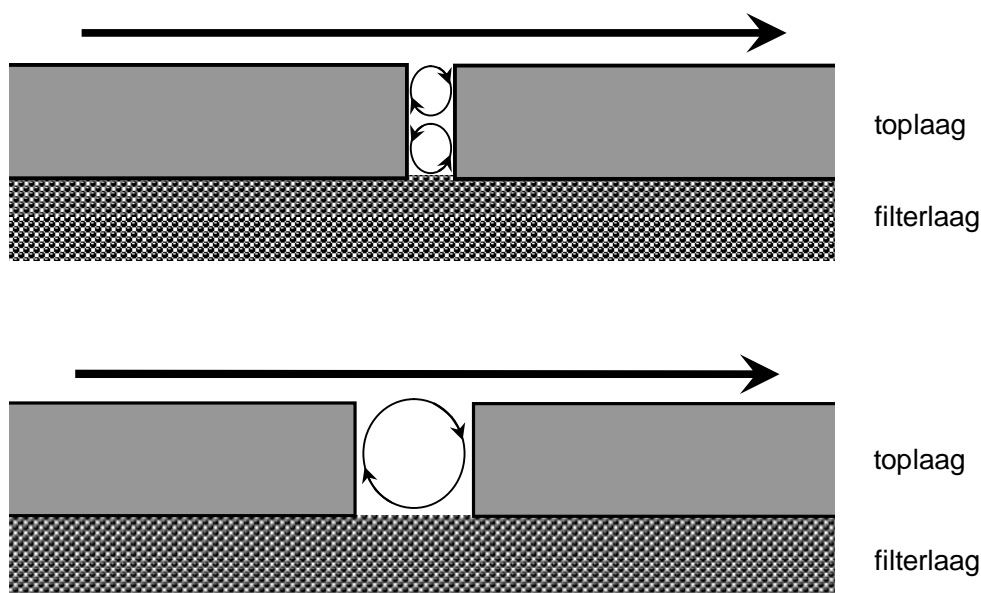
Voor gatafmetingen groter dan 0,1 m wordt, doordat de gaten relatief groot zijn, de opwaartse stroomsnelheid door de gaten relatief klein. Verondersteld wordt dat de opwaartse stroomsnelheid zelfs zo klein is dat deze niet meer in staat is de inwassing uit de spleten te spoelen. Uitspoelen volgens mechanisme 2, wat dus wordt geacht op te treden bij gaten groter dan 0,1 m, wordt beschreven door:

$$\frac{Y}{G} = 0,23 \left(H / D_{50} \right)^{0,33} \quad (5.2)$$

Bij het berekenen van de erosie met deze formules voor de uitgevoerde proeven zijn er twee parameters waarvoor er een arbitraire keuze wordt gemaakt, omdat de indertijd uitgevoerde proeven die ten grondslag liggen aan de formule niet overeenkomen met de huidige proeven.

Het eerste betreft de gatafmetingen die in het onderzoek indertijd vierkant waren, terwijl de nu beproefde zetting vrij willekeurige gaten en spleten kent.

Een representatieve gatdiameter voor gaten die ongeveer even lang als breed zijn, bedraagt voor de huidige standaard zuilenzetting ca. 7 cm. Als echter in detail naar het patroon van gaten en spleten in de toplaag wordt gekeken, dan moet worden geconstateerd dat er ook brievenbus-vormige en driehoekige spleten voorkomen die veel langer zijn. Als wordt aangenomen dat de uitspoeling uit een gat door mechanisme 2 beschreven kan worden door een 2D-verticale stromingssituatie, dan is de grootste gatafmeting voor de onderzochte bekleding veel eerder in de orde van 15 cm. Een gat met een gatafmeting in dezelfde orde als de bekledingsdikte heeft veel meer last van erosie door overtrekkende stroming dan een gat met een grootste afmeting die kleiner is dan de helft van de bekledingsdikte.



Figuur 5.1 Door overtrekkende stroming aangedreven neren in een gat met een afmeting in de orde van de halve toplaagdikte (boven) en met een afmeting in de orde van de hele toplaagdikte (onder)

Een tweede punt waarop de gegeven formules niet goed aansluiten bij het huidige onderzoek betreft het golfveld. Indertijd werden proeven gedaan met regelmatige golven, gekarakteriseerd met één golfhoogte H . Tegenwoordig wordt voor proeven een onregelmatig golfveld (veelal PM-spectrum) opgewekt, wat wordt gekarakteriseerd door de significante golfhoogte H_s . Tamelijk arbitrair wordt in de formule de golfhoogte voor de onregelmatige golven gebruikt waar die van regelmatige golven staat:

$$H = H_s \quad (5.3)$$

De achterliggende gedachte om de equivalente hoogte voor regelmatige golven gelijk te stellen aan de significante is de volgende: het gaat om een erosieproces waarbij vooral de grootste golven tot de grootste bijdrage aan de erosie leiden. Nu is de significante golfhoogte al een relatief forse binnen het onregelmatige golfveld, dus (veel) groter dan de significante lijkt niet reëel.

Overigens zijn deze formules ook in Steentoets geïmplementeerd voor de beoordeling van het materiaaltransport vanuit de granulaire laag, waarbij ook uitgegaan is van formule (5.3).

De erosiediepte wordt voor de eerste proef, waarbij al direct bezwijken optrad, berekend uitgaande van de volgende waarden:

$$\begin{aligned} G &= 0,07; 0,09; 0,11; 0,13 \text{ en } 0,15 \text{ m} \\ \ell &= 1/11\% = 9,1 [-] \\ H &= 0,8 \text{ [m]} \\ D_{50} &= 0,017 \text{ [m]} \end{aligned}$$

Gatdiameter	0,07 [m]	0,09 [m]	0,11 [m]	0,13 [m]	0,15 [m]
Formule 5.1	0,10 [m]	0,13 [m]	0,16 [m]	0,19 [m]	0,22 [m]
Formule 5.2	0,06 [m]	0,07 [m]	0,09 [m]	0,11 [m]	0,12 [m]
Maatgevend:	0,10 [m]	0,13 [m]	0,09 [m]	0,11 [m]	0,12 [m]

Tabel 5.1 Berekende erosiediepte met open oppervlak = 11%

Dit levert een maatgevende diepte voor de uitspoeling op die altijd uitkomt op waarden kleiner dan de toplaagdikte (0,15 m). Formule 5.1 levert echter voor de grotere gatdiameters waarden op die wel duidelijk groter worden dan de bekledingsdikte. Die formule wordt echter slechts maatgevend verondersteld voor gatdiameters kleiner dan 0,1 m. Voor grotere gaten wordt verondersteld dat het debiet uit de onderlaag onvoldoende is om de inwassing van onderuit het gat uit te “blazen”.

Overigens verwijst Steentoets (Klein Breteler, 2011) voor de toetsing naar “geavanceerd” zodra de erosiediepte groter is dan de helft van de bekledingsdikte. En dat is voor de beproefde constructie voor vrijwel alle berekende gatdiameters het geval.

Alhoewel een berekening met Steentoets leidt tot de waarschuwing dat de erosie door de toplaag weleens tot problemen kan leiden (“geavanceerd”), moet uit de berekeningen worden geconcludeerd dat de verwachtingswaarde voor de erosie door de toplaag kleiner is dan de in de proeven geconstateerde erosie. In het reststerkte-onderzoek (Wolters en Klein Breteler, 2011) is een vergelijkbare toplaag beproefd, ook die toplaag was alleen in de dikte verschaald. Bij die proef is toen geen voortijdig bezwijken door extreme erosie van inwas- en filtermateriaal vastgesteld. Maar die toplaag lag slechts op een enkelvoudig filter.

Al door Bezuijen et al. (1990) is aangegeven dat, als het proces wordt gedomineerd door uittredend water, de gegeven relaties (formules 5.1 en 5.2) met de nodige omzichtigheid moet worden toegepast.

Als de invloed van uittredend water dominant is, ligt het voor de hand rekening te houden met de lekengte van de bekleding. Maar die komt in de indertijd opgestelde relatie niet voor.

De nu beproefde bekleding betreft een zetting waarbij de dubbele filterlaag juist relatief grote debieten kan aanvoeren, waardoor uitspoelen door stroming loodrecht op het talud (formule 5.1) mogelijk ook bij grotere gaten nog dominant kan blijven.

Geconcludeerd kan worden, dat de geconstateerde diepte van de uitspoeling niet exact voorspeld wordt, maar dat de formules, zoals deze in Steentoets zijn geïmplementeerd, wel aangeven dat het uitspoelen mogelijk problematisch is.

5.2 Stabiliteit bovenste toplaag volgens Steentoets

De vroegtijdige schade aan de steenzetting bij $H_{m0} = 0,80 \text{ m}$ ($s_{op} = 0,041$, proef 1) is niet te verwachten op basis van het mechanisme toplaaginstabiliteit. Wetende dat Steentoets de sterkte van zettingen met ca. 15% onderschat, zou Steentoets een toelaatbare golfhoogte moeten berekenen van ca. 0,70 m. In Tabel 5.2 zijn resultaten van Steentoetsberekeningen gegeven voor verschillende grofstoffelijke schematisaties van de zetting.

Variant nr.	Filterdikte [m]	Ingewassen	Geklemd	Toelaatbaar H_s [m]
1	0,07	Ja	Ja	1,07 (1,23)
2	0,07	Nee	Nee	1,08 (1,24)
3	0,14	Ja	Ja	0,91 (1,05)
4	0,14	Nee	Nee	0,86 (0,99)
5	0,27	Ja	Ja	0,86 (0,99)
6	0,27	Nee	Nee	0,72 (0,83)
7	0,27	Ja	Nee	0,56 (0,64)

Tabel 5.2 Toelaatbare golfhoogten voor verschillende varianten berekend met Steentoets (tussen haakjes: resultaat Steentoets * 1,15 = verwachtingswaarde bezwijken)

Als de onderste steenzetting (basalt en filterlaag!) geheel als filterlaag wordt meegeschematiseerd, alleen dan komt de berekende stabiliteit min of meer overeen met de in de proef geconstateerde stabiliteit, maar dan moet er ook **niet** worden gerekend met klemming. Overigens is Steentoets voor bijzondere constructies, zoals zonder inwassing, minder betrouwbaar.

Naast deze grove schematisaties is ook de aanpak gevolgd die beschreven is in paragraaf 1.2.1. Daarvoor worden de doorlatendheden van de oude zetting (hulpberekening 1) en de nieuwe overlaging (hulpberekening 2) afzonderlijk bepaald en deze samengesteld tot één leklengte.

Invoergegevens hulpberekening 1: toplaag **basalt**

$$D_o = 0,14 \text{ m}$$

$$\text{Open oppervlak} = 11 \%$$

Inwassing

$$D_{15} = 8 \text{ mm}$$

Filterlaag

$$b_o = 0,07 \text{ m}$$

$$D_{f15} = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Porositeit} = 0,4 \text{ (-)}$$

Deze invoer levert de volgende doorlatendheden op:

$$k_o = 0,180 \text{ m/s}$$

$$k_o' = 0,0511 \text{ m/s}$$

Invoergegevens hulpberekening 2: toplaag **basalt**

Dezelfde invoergegevens als bij hulpberekening 1, met uitzondering van de laagdikte:

$$D_n = 0,15 \text{ m}$$

Deze invoer levert de volgende doorlatendheden op:

$$k_n = 0,180 \text{ m/s}$$

$$k_n' = 0,0515 \text{ m/s}$$

Met formule 2.1 wordt vervolgens de leklengte van de samengestelde constructie berekend:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{D_n (b_n k_n + D_o k'_o + b_{o1} k_{o1} + b_{o2} k_{o2})}{k'_n}}$$

$$= \sqrt{\frac{0,15 (0,07 * 0,18 + 0,14 * 0,0511 + 0,07 * 0,18)}{0,0515}} = 0,307 \text{ m}$$

Deze leklengte van de samengestelde constructie kan worden gerealiseerd door de nieuwe bekleding (toplaag + filter) gelegd op een ondoorlatende ondergrond uit te rekenen door de volgende (alles behalve realistische) korreldiameter voor het filter te kiezen: $D_{f15} = 90 \text{ mm}$.

Deze berekening levert volgens Steentoets een bezwijkgolffhoogte op van $H_s = 0,88 \text{ m}$ ($s_{op} = 0,041$). Opgemerkt moet worden dat hetzelfde resultaat wordt verkregen als de gewenste leklengte wordt gerealiseerd door de filterlaagdikte aan te passen in plaats van de korreldiameter van het filter. De equivalente filterlaagdikte bedraagt $0,172 \text{ m}$. Rekening houdend met de 15% die Steentoets gemiddeld de sterkte onderschat, zou de bezwijkgolffhoogte dus ca. $1,01 \text{ m}$ moeten bedragen.

Overigens maakt het voor de toelaatbare golffhoogte in verband met de toplaagstabiliteit niet veel uit of deze berekening wordt uitgevoerd met inwassing en goede klemming ($H_s = 0,88 \text{ m}$), of dat zonder inwassing en klemming wordt gerekend ($H_s = 0,85 \text{ m}$). Uiteraard levert de berekening met inwassing, maar zonder klemming een lagere stabiliteit op: $H_s = 0,68 \text{ m}$.

De klemming in vers gezette steenzettingen is doorgaans nog niet optimaal. Dat is een ervaring uit de Deltagoot, maar is ook in de praktijk geconstateerd. De normale werkwijze in de Deltagoot is dat na het aanbrengen van de steenzetting en de inwassing het geheel wordt aangetrild met een trilplaat. Hiermee wordt het proces gesimuleerd dat de steenzetting op de duur zijn optimale klemming moet geven. Zonder dat dit expliciet is onderzocht, is de ervaring in de Deltagoot hiermee goed.

Omdat in de huidige modelopstelling er drukopnemers vrij dicht onder de toplaag zaten, is besloten om deze keer geen trilplaat te gebruiken. Dat kan er toe bijgedragen hebben dat juist in de eerste proef de klemming nog vrij beroerd was en ook het inwasmateriaal vrij gemakkelijk kon uitspoelen. Dat zou mede kunnen verklaren waarom de steenzetting al in de eerste proef bezweek.

Voor het mechanisme "materiaaltransport vanuit de granulaire laag door de toplaag" geeft Steentoets aan dat hier mogelijk een probleem ligt. Het toetsoordeel voor de beproefde bekleding is voor dit mechanisme "geavanceerd".

In de laatste proeven van het programma is door het afdekken van het filter met gaas het mechanisme "materiaaltransport vanuit de granulaire laag door de toplaag" voorkomen. De aldus geprepareerde bekleding is uiteindelijk bezweken gedurende een proef (T9) met $H_s = 1,07 \text{ m}$ na ca. 2000 s. Dit komt redelijk overeen met het resultaat van de berekening als beschreven in paragraaf 1.2.1 ($H_s = 1,01 \text{ m}$). Daar moet bij worden aangetekend dat het voorafgaande belastingsniveau waarbij nog net geen bezwijken is opgetreden wel flink wat lager lag: $H_s = 0,88 \text{ m}$. De stapgrootte waarmee het belastingsniveau tijdens een proevenprogramma wordt opgehoogd, bepaalt mede de onzekerheid in de gevonden bezwijkgolffhoogte.

De theorie die is ontwikkeld door Klein Breteler (2005) kan worden gebruikt om een idee te krijgen in welke mate bezwijken vóór het einde van de korteduurproef (ca. 1000 golven) betekent dat de werkelijke sterkte kleiner is dan de opgelegde belasting. Daarvoor moet de voor de langduursterkte ontwikkelde trend worden geëxtrapoleerd naar een sterkte voor

proeven korter dan 1000 golven. Daartoe zijn de factoren f_s en f_B berekend voor zuilenzettingen ($c_1 = 0,2$; $c_2 = 0,8$) voor al de proeven die voortijdig zijn afgebroken in verband met het bezwijken van de zetting. De resultaten van die berekening zijn opgenomen in tabel A.4. Het blijkt volgens deze extrapolatie dat voor de laatste bezwijkproef (T9) de sterkte door de kortere duur (553 golven) toch 10% kleiner is, dan wanneer de zetting de volle 1000 golven had kunnen weerstaan. De opgelegde golfhoogte ($H_s = 1,07$ m), waarbij na ca. 553 golven bezwijken optrad, komt dus overeen met een bezwijkgolfhoogte van $H_s = 0,97$ m (= $1,07 / 1,10$).

Uit tabel A.4 blijkt dat de eerste proef (T1) waarbij ook voortijdig bezwijken optrad, een bezwijksterkte heeft die grofweg 4% lager ligt dan de in die proef opgelegde golfrandvoorwaarde: $H_s = 0,80/1,04 = 0,77$ m.

Door het mechanisme “uitspoelen door de toplaag” te verhinderen met gaas is het aanvankelijke gat tussen de toplaagstabiliteit volgens Steentoets en de bij de eerste proef gevonden bezwijkgolfhoogte echter grotendeels gedicht. De inschatting van de bezwijkgolfrandvoorwaarde voor de beproefde zetting blijkt 4% lager dan de met Steentoets berekende sterkte.

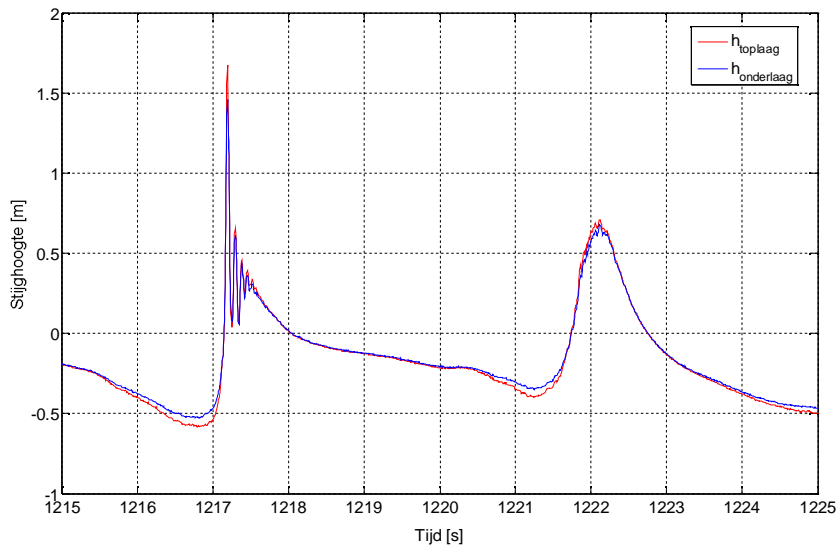
Hierbij moet worden opgemerkt dat bezwijken is opgetreden door het uitspoelen van het inwasmateriaal. Alhoewel niet wordt geadviseerd om voor zuilenzettingen af te gaan op berekeningsresultaten zonder inwassing en klemming, moet worden geconstateerd dat het rekenresultaat in dit specifieke geval uitkomt op een verwachtingswaarde van de bezwijksterkte $H_s = 0,85 * 1,15 = 0,98$ m. Deze waarde komt verrassend goed overeen met het profresultaat.

5.3 Evaluatie van gemeten stijghoogten

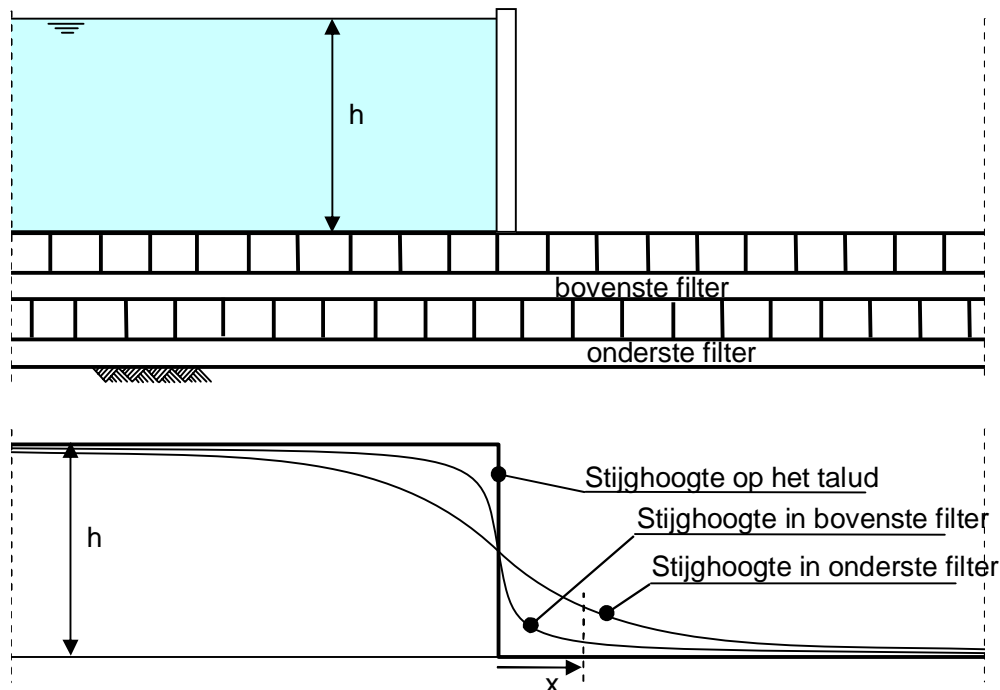
In beide filterlagen zijn 6 drukopnemers aangebracht om het stijghoogteverloop in de filterlagen te meten (zie Figuur 3.3). Een voorbeeld van het verloop van de stijghoogte als functie van de tijd is voor twee drukopnemers gegeven in Figuur 5.2. De ene drukopnemer zat in het bovenste filter en de andere in de onderste, beide op een lijn haaks op het talud.

Als gekeken wordt naar de stijghoogten gemeten in de twee filterlagen, dan blijken deze in boven elkaar gelegen punten vrijwel op elkaar te liggen (zie Figuur 5.2). Op het moment van de grootste piekdruk, veroorzaakt door golfklappen is er geen sprake van een faseverschuiving: de drukopbouw en terugval lopen synchroon in beide filters. Wel is er een beperkt maar systematisch verschil in de fase van de golfterugtrekking. In de seconde voorafgaand aan de golfklap blijkt het signaal van de opnemer in de onderste filterlaag eerder op te lopen dan in de bovenste filterlaag.

In de onderste filterlaag manifesteert de invloed van het zich opbouwende stijghoogtefront, op het moment van de maximale golfterugtrekking, zich dus eerder dan in de bovenste filterlaag. Deze constatering lijkt merkwaardig, omdat de bovenste filterlaag immers dicht bij de bron zit (namelijk de golven) dan de onderste filterlaag. Uit een analogie met een elementaire belastingscase, zie Figuur 5.3, kan echter duidelijk worden gemaakt dat de constatering verklaarbaar is met de leklengtheorie.



Figuur 5.2 Stijghoogte gemeten in proef 9 in het filter tussen de oude zetting en de toplaag van de nieuwe zetting (h_{toplaag}) en in het filter gelegen onder de oude zetting ($h_{\text{onderlaag}}$)



Figuur 5.3 theoretische situatie met statische belasting op een gestapelde zetting op ondoorlatende ondergrond (boven), met bijbehorende geschematiseerde stijghoogteverlopen (onder)

Volgens de lek lengtetheorie zal het stijghoogteverloop in de filterlagen de stijghoogte min of meer vloeiend volgen. Naarmate de filterlaag dieper ligt, zal het verloop meer gladgestreken zijn. Dat wat gladdere verloop in de dieper gelegen filterlaag is ook terug te zien in de metingen. Bijlage E1 toont het verloop van de stijghoogten als functie van de afstand tot het golfschot, zoals deze gemeten zijn in de onderste en de bovenste filterlaag. De figuren geven de situatie op het moment gedurende een golf waarop het opwaarts-stijghoogteverschil over

de onderste toplaag maximaal is. De golf die is geselecteerd betreft degene waarbij dat maximale stijghoogteverschil in 5% van de golven nog wordt overschreden.

De stijghoogte op een afstand x van de stap in de belasting (die model staat voor het stijghoogtefront) is in de onderste filterlaag groter dan in de bovenste filterlaag, zoals te zien is in Figuur 5.3. Dat komt, in analogie, overeen met de observatie dat de toename van de stijghoogte in het onderste filter in de fase voorafgaande aan de golfklap voorloopt bij de toename van de stijghoogte in het bovenste filter.

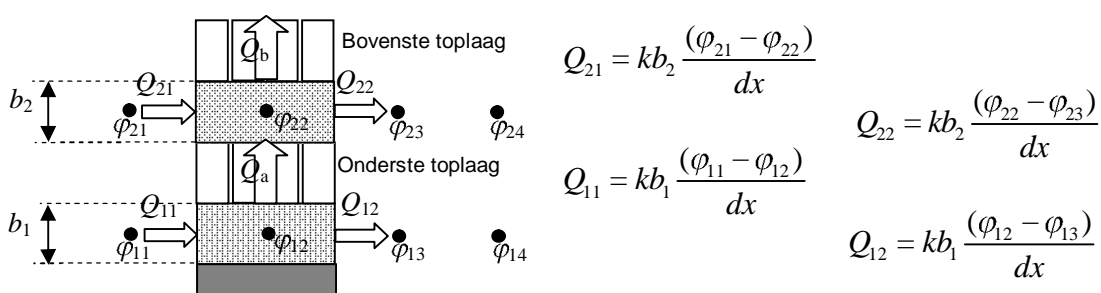
Uit de observatie moet geconcludeerd worden dat de weerstand van de onderste toplaag kennelijk wel zo groot is, dat dit zich uit in een beperkt, maar systematisch verschil in de drukopbouw in de fase van de maximale golfsterkte.

De gemeten extreme drukken (stijghoogten) in de granulaire laag beneden de Basaltonzuilen (bovenste toplaag) en beneden de Basaltonzuilen tonen verschillen in de orde van 10 tot 15%, zie bijlage E2. Uit dit beperkte verschil blijkt dat de onderste steenzetting mee doet in de druktransmissie en daarom ook moet worden meegeteld in de lek lengte.

Dit is te verklaren doordat het drukverloop in de bovenste granulaire laag al sterk vervlakt is in vergelijking met de belasting op het talud. Een verdere grote afvlakking is dus niet te verwachten in de tweede filterlaag (onder het basalt). Alle drukpieken zijn al afgevlakt.

De maximale belasting op de bovenste toplaag en zijn inwassing wordt voor een groot deel bepaald door het maximale opwaartse stijghoogteverschil over de toplaag. Voor de toplaagstabieleit is ook de lengte waarover de belasting opwaarts is gericht een belangrijke belastingsparameter, maar die is nog even buiten beschouwing gelaten. Daarop wordt nog teruggekomen.

In de uitwerking zoals opgenomen in Figuur 5.4 wordt uitgegaan van de schematisatie volgens de lek lengte-theorie, waarbij in de filterlagen een stroming evenwijdig aan het talud wordt verondersteld en in de (oude en nieuwe) toplaag alleen een stroming loodrecht op het talud.



$$Q_a = Q_{11} - Q_{12} = kb_1 \left(\frac{(\varphi_{11} - \varphi_{12})}{dx} - \frac{(\varphi_{12} - \varphi_{13})}{dx} \right)$$

$$Q_b = Q_a + Q_{21} - Q_{22}$$

$$= kb_1 \left(\frac{(\varphi_{11} - \varphi_{12})}{dx} - \frac{(\varphi_{12} - \varphi_{13})}{dx} \right) + kb_2 \left(\frac{(\varphi_{21} - \varphi_{22})}{dx} - \frac{(\varphi_{22} - \varphi_{23})}{dx} \right)$$

Figuur 5.4 Beschrijving van de stroming door het verhang en de continuïteit van de stroming

In de formules in Figuur 5.4 hebben de gebruikte symbolen de volgende betekenis:

b_j	= dikte van filterlaag j (m);
dx	= afstand tussen opeenvolgende drukopnemers (m);
k	= doorlatendheid van het filtermateriaal (m/s);
Q_i	= debiet loodrecht op talud door toplaag i ($m^3/s/m^1$);
Q_{jm}	= debiet in filterlaag j door doorsnede m ($m^3/s/m^1$);
φ_n	= stijghoogte in filterlaag j in meetpunt n (m).

Het stijghoogteverschil over de bovenste toplaag is grofweg evenredig met het debiet Q_b door de betreffende laag. Dit debiet Q_b kan worden benaderd uitgaande van de gemeten stijghoogten in de beide filterlagen en de continuïteitsvergelijking (debiet).

In Figuur 5.4 zijn daartoe de benodigde formules gegeven.

Q_a kan worden opgevat als het aandeel van de onderste filterlaag aan de belasting. Om na te gaan wat de bijdrage is van de onderste filterlaag, is daarom voor extreme waarden van Q_b nagegaan hoe groot verhoudingsgewijs Q_a is.

Omdat voor de toplaagstabieleit ook de afstand waarover een groot stijghoogteverschil werkt belangrijk is voor geklemde zettingen, is naast de hierboven gegeven set vergelijkingen ook nog een variant hierop geëvalueerd. Bovenstaande vergelijking berekent in feite de uittredende debieten uit de lokale kromming van de verhanglijn in de filters. Een groot verhang over de bovenste toplaag wordt gerealiseerd als de kromming ergens in een punt groot is; een groot verhang over een grote lengte van de toplaag wordt gerealiseerd als de kromming over een wat grotere afstand maximaal is. Daarom is ook de volgende set formules gebruikt, waarbij de kromming wordt berekend door de verandering in het verhang in het filter te berekenen uitgaande van verhangen op wat grotere afstand van elkaar.

$$Q_a = Q_{11} - Q_{12} = kb_1 \left(\frac{(\varphi_{11} - \varphi_{12})}{dx} - \frac{(\varphi_{13} - \varphi_{14})}{dx} \right) \quad (5.4)$$

$$Q_b = Q_a + Q_{21} - Q_{22} \\ = kb_1 \left(\frac{(\varphi_{11} - \varphi_{12})}{dx} - \frac{(\varphi_{13} - \varphi_{14})}{dx} \right) + kb_2 \left(\frac{(\varphi_{21} - \varphi_{22})}{dx} - \frac{(\varphi_{23} - \varphi_{24})}{dx} \right) \quad (5.5)$$

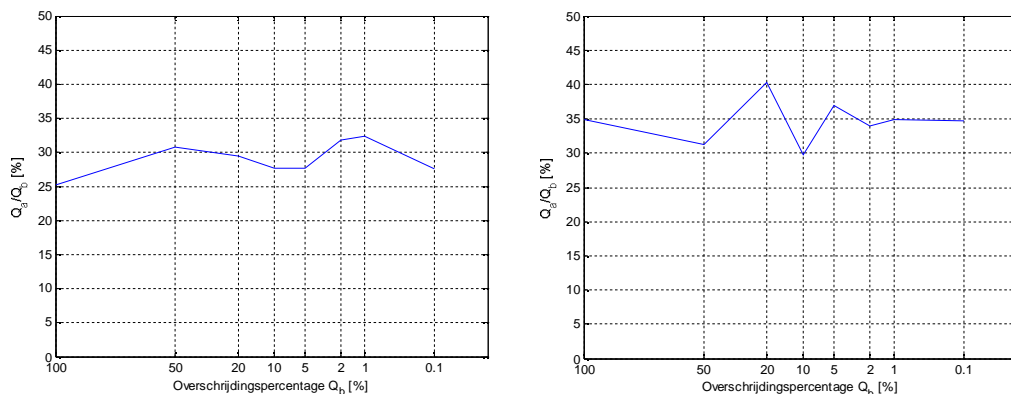
Omdat beide filterlagen in de proefopstelling bestaan uit hetzelfde materiaal en dat de filterlagen even dik zijn, wordt de verhouding tussen de debieten door de oude en de nieuwe toplaag gegeven door:

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{\left(\frac{(\varphi_{11} - \varphi_{12})}{dx} - \frac{(\varphi_{13} - \varphi_{14})}{dx} \right)}{\left(\frac{(\varphi_{11} - \varphi_{12})}{dx} - \frac{(\varphi_{13} - \varphi_{14})}{dx} \right) + \left(\frac{(\varphi_{21} - \varphi_{22})}{dx} - \frac{(\varphi_{23} - \varphi_{24})}{dx} \right)} \quad (5.6)$$

Uit de verwerking van de gemeten stijghoogten blijkt dat op de momenten dat het debiet door de bovenste toplaag maximaal is, ca. 25 tot 40% van dat debiet wordt geleverd door de onderste filterlaag, zie Figuur 5.5 voor een tweetal voorbeelden en bijlage E.3 en E.4 voor het totale overzicht.

Merk op dat de grafieken soms wat springerig zijn. Dat komt doordat elk punt in de grafiek is gebaseerd op een enkele golf die gekozen is op basis van de overschrijdingskans van het

debiet door de bovenste toplaag. Door toevalligheden blijkt het debiet door de afgedekte toplaag soms wat hoger, soms wat lager uit te vallen.



Figuur 5.5 Verhouding van debiet door oude toplaag (Q_a) en nieuwe toplaag (Q_b) als functie van het overschrijdingspercentage van het debiet door de bovenste toplaag; links: locale waarde (gemiddelde voor één opnemerafstand, volgens figuur 5.3), rechts: over zone gemiddelde waarde (gemiddelde voor dubbele opnemerafstand berekend met formule 5.6). Gegevens van Proef T1.

Beide filterlagen zijn even dik. Maar het verloop van de stijghoogten als functie van de plaats in de onderste filterlaag is, zoals mag worden verwacht, nog wat vloeiender dan in de bovenste toplaag, zoals ook bleek uit Bijlage E.1. Daarom is het logisch dat het aandeel van de onderste filterlaag aan het debiet door de bovenste filterlaag ook wat minder is dan de helft van het geheel. Maar de metingen tonen overduidelijk aan dat de onderste filterlaag, zolang deze doorlatend is, nooit mag worden verwaarloosd.

5.4 Nabeschuiving stabiliteit toplaag

De vroegtijdige schade aan de steenzetting in de Deltagoot is het gevolg van het feit dat de inwassing gemakkelijk uitspoelde en vervolgens het filtermateriaal kon uitspoelen. Daarvoor zijn de volgende oorzaken:

- 1 De relatief grote openingen tussen de Basalton zuilen. De steenzetting is op schaal gemaakt, maar daarbij is alleen de dikte verkleind, en de horizontale maat niet wezenlijk aangepast, slechts de elementen met de grootste diameter zijn achterwege gelaten. Daardoor zijn de gaten in de steenzetting relatief groot.
- 2 Relatief dunne laag van Basalton (15cm).
- 3 Effectief was er een dikke filterlaag omdat beide filterlagen een debiet toeleveren. Daardoor is de stroming door de bovenste toplaag relatief krachtig.
- 4 Door de Reynoldsschaling is filtermateriaal toegepast wat, na uitspoelen van de inwassing, ook kan uitspoelen. Bij constructies op ware grootte zijn er ontwerpregels die deze uitspoeling verhinderen. Het feit dat het filtermateriaal ook is uitgespoeld, is dus typisch een modeffect.
- 5 Door uitspoelen van filtermateriaal wijkt de gedegradeerde constructie dusdanig af van de in de berekening schematiseerde constructie dat vroegtijdige toplaaginstabiliteit optreedt.

In Deltagootproeven op zuilenzettingen zijn eerder bekledingen onderzocht die in grote lijnen overeenkwamen met de nieuwe steenzetting, maar die zettingen lagen dan op een relatief ondoorlatende ondergrond. Bij die zettingen, waarbij de combinatie van oorzaak 1 en 2 ook

aanwezig waren, is niet die extreme uitspoeling geconstateerd. Oorzaak 3 is dus een essentiële oorzaak voor het bezwijken van de overlagingconstructie.

In de proeven waarbij het filter was opgesloten met kippengaas is uitspoeling van het filtermateriaal voorkomen. De proefresultaten van deze proef tonen aan dat de lagere stabiliteit niet alleen een modeffect (het lokaal uitspoelen van het filtermateriaal) betreft. De 'oude' onderliggende zuillaag leidt tot snelle uitspoeling van het inwasmateriaal en dus verlies aan klemming. Hij beïnvloedt daarmee de stabiliteit van de nieuwe toplaag in belangrijke mate. Er mag dus niet worden aangenomen dat de invloed van de oude onderlaag verwaarloosbaar is als deze niet echt ondoorlatend is.

Een praktische aanpak bij het overlagen van een oude zetting met een nieuwe zetting is de onderliggende steenzetting zo ondoorlatend als mogelijk te maken. Het toepassen van een waterdicht folie op een groot deel van de steenzetting is een optie (of het overgieten met gietasfalt, of het inwassen met zand of bentonietkorrels en vervolgens afdekken met geotextiel). Wel is het verstandig om ervoor te zorgen dat de onderste paar meter van het af te dichten talud open blijven, zodat statische overdrukken weg kunnen. Alhoewel overdrukken niet snel tot schade zullen leiden, zie paragraaf 1.2.5, kunnen de beperkte vervormingen die mogelijk toch kunnen optreden bij een volledige afdichting, maar beter worden voorkomen. Overigens zal het in de praktijk soms nodig zijn om het bestaande talud plaatselijk aan te vullen met grond o.i.d. om kleine depressies op te vullen en de ondergrond uit te vlakken.

6 Conclusies

Bij het renoveren van steenzettingen wordt overwogen de oude steenzetting te laten zitten, en daarop een nieuwe steenzetting aan te brengen. De stabiliteit van dit soort constructie onder golfaanval is getest in de Deltagoot met een nieuwe Basalton-steenzetting (talud 1:3) die op een oude basalt-steenzetting is geplaatst en beproefd is op schaal 1:2. Met drukopnemers in de twee granulaire lagen is de invloed van de oude steenzetting bepaald.

Uit de proeven kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het bij geringe golfbelastingen bezwijken van de modelopstelling heeft een aantal redenen:
 - Allereerst had de bekleding door de dubbele filterlaag een grote watertransportcapaciteit onder de toplaag, waardoor er tijdens golfaanval ook een relatief groot debiet door de toplaag stroomt.
 - Slechts de dikte van de zuilen is geschaald en niet de overige afmetingen. Daardoor had de bekleding relatief brede ondiepe spleten waardoor het inwasmateriaal relatief gemakkelijk kon uitspoelen.
 - Doordat het filtermateriaal moest worden verschaald om de schaling van de stroming door de constructie goed te realiseren, was het filtermateriaal relatief fijn ten opzichte van de gaten in de toplaag.
 - De verse steenzetting, die doorgaans een geringere klemming heeft, kon niet worden aangetrild vanwege de drukopnemers. Normaal wordt dit wel in de Deltagoot gedaan als een soort kunstmatige veroudering, waardoor de klemming toeneemt en ook het inwasmateriaal zich beter vastzet.

Per saldo spoelde het inwasmateriaal snel uit en dat geldt ook voor een deel van het filtermateriaal.

- Het oordeel van Steentoets ten aanzien van het mechanisme “materiaaltransport vanuit granulaire laag door toplaag” moet serieus worden genomen. Uitspoelen van het inwasmateriaal en vervolgens het filtermateriaal blijkt tot voortijdig bezwijken van de toplaag te kunnen leiden. Rekenen op klemming voor de toplaagstabiliteit blijkt tot een overschatting van de toplaagstabiliteit te leiden als het oordeel ten aanzien van het mechanisme “materiaaltransport vanuit granulaire laag door toplaag” niet goed is.
- Als overlagen van een oude steenzetting op een filter met een nieuwe steenzetting op een filter wordt overwogen dan is de doorlatendheid van de oude steenzetting een item om terdege rekening mee te houden. Als de oude steenzetting niet gegarandeerd **on**doorlatend is, of wordt gemaakt, dan kan deze het beste als extra doorlatende filterlaag worden geschematiseerd. Dit reduceert de toplaagstabiliteit van de overlaging aanzienlijk ten opzichte van de aanname dat de oude bekleding ondoorlatend is.

Als overlagen van een oude steenzetting op filter met een nieuwe steenzetting op filter wordt overwogen, dan ligt het voor de hand om de stroming door de oude steenzetting te blokkeren, zodat voor de overlaging er geen rekening hoeft te worden gehouden met een reductie van de toplaagstabiliteit van de nieuwe zetting.

Literatuur

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

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

Klein Breteler, M., W.D. Eysink, 2005. *Langeduursterkte van steenzettingen. Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen*, WL|delft hydraulics H4475, november 2005.

Klein Breteler, M., 2011. *Documentatie STEENTOETS2008 en STEENTOETS2010*, Deltares rapport 1202551-006-HYE-0025, februari 2011.

Klein Breteler, M., 2011. *Oude steenzetting overlagen met zuilen op uitvullaag*, Deltares Memo 1204727-015-HYE-0001, 9 juni 2011.

TAW, 1989. *Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken. Dl. 2: Benedenrivierengebied*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 's-Gravenhage, 1989, ISBN 90-212-3168-9.

TAW, 2002. *Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, mei 2002.

TAW, 2003. *Technisch Rapport Steenzettingen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, ISBN 90-369-5551-3.

Wolters, G., en M. Klein Breteler, 2011, *Reststerkte van een dijk met steenzetting op een kleilaag: meetverslag Deltagootproeven SBW-Reststerkte*. Deltares rapport 1202122-002, april 2011.

A Tabellen

- A.1 Proevenprogramma, gerealiseerde golfcondities
- A.2 Coördinaten van oppervlak steenzetting (Basalton)
- A.3 Posities van de drukopnemers
- A.4 Evaluatie van de “langeduur”factoren voor de proeven die voortijdig zijn afgebroken in verband met bezwijken van de zetting

proef	waterstand	$H_{m0,i}$	H_{max}	T_p	$T_{m-1.0}$	s_{op}	ζ_{op}	duur	$H_{m0}/\Delta D$	F
(-)	(m)	(m)	(m)	(s)	(s)	(-)	(-)	(h)	(-)	(-)
T1	4,20	0,80	1,243	3,513	3,425	0,041	1,64	0,65	3,90	5,42
T2	4,00	0,48	0,787	2,736	2,622	0,041	1,64	0,67	2,35	3,27
T3	4,25	0,51	0,961	3,854	3,507	0,022	2,24	0,93	2,51	4,31
T4	4,00	0,62	1,001	3,029	2,991	0,044	1,59	0,74	3,05	4,16
T5	4,30	0,63	1,153	4,235	3,898	0,023	2,22	1,04	3,08	5,24
T6	4,40	0,78	1,321	4,836	4,427	0,021	2,27	1,10	3,80	6,58
T7	4,40	0,78	1,327	4,881	4,422	0,021	2,29	1,02	3,81	6,62
T8	4,25	0,88	1,448	3,876	3,597	0,038	1,71	0,88	4,32	6,17
T9	4,23	1,07	1,468	4,156	3,982	0,040	1,67	0,56	5,25	7,37

Tabel A.1 Proevenprogramma, gerealiseerde golfcondities.

X (m)	Z (m)
191,28	5,64
190,86	5,50
189,36	5,00
187,86	4,50
186,36	4,00
184,86	3,50
183,36	3,00
181,86	2,50
180,36	2,14

Tabel A.2 Coördinaten van oppervlak steenzetting (Basalton).

DRO Nr	Z boven de gootbodembodem [m]	x t.o.v. snijpunt van talud met Z=+4,70m [m]	onderlinge afstand langs talud [m]	X t.o.v. golfschot [m]	y t.o.v. oostzijde [m]
1	3,002	1,567		184,563	2,170
2	3,185	1,967	0,422	185,120	2,170
3	3,335	2,367	0,422	185,580	2,170
4	3,468	2,767	0,422	185,995	2,170
5	3,602	3,217	0,474	186,380	2,170
6	3,735	3,767	0,580	186,785	2,170
7	3,202	1,630		184,485	2,233
8	3,397	2,030	0,422	185,050	2,165
9	3,543	2,430	0,422	185,505	2,161
10	3,677	2,830	0,422	185,933	2,271
11	3,802	3,280	0,474	186,315	2,145
12	3,945	3,830	0,580	186,698	2,200

Tabel A.3 Posities van de drukopnemers (DRO).

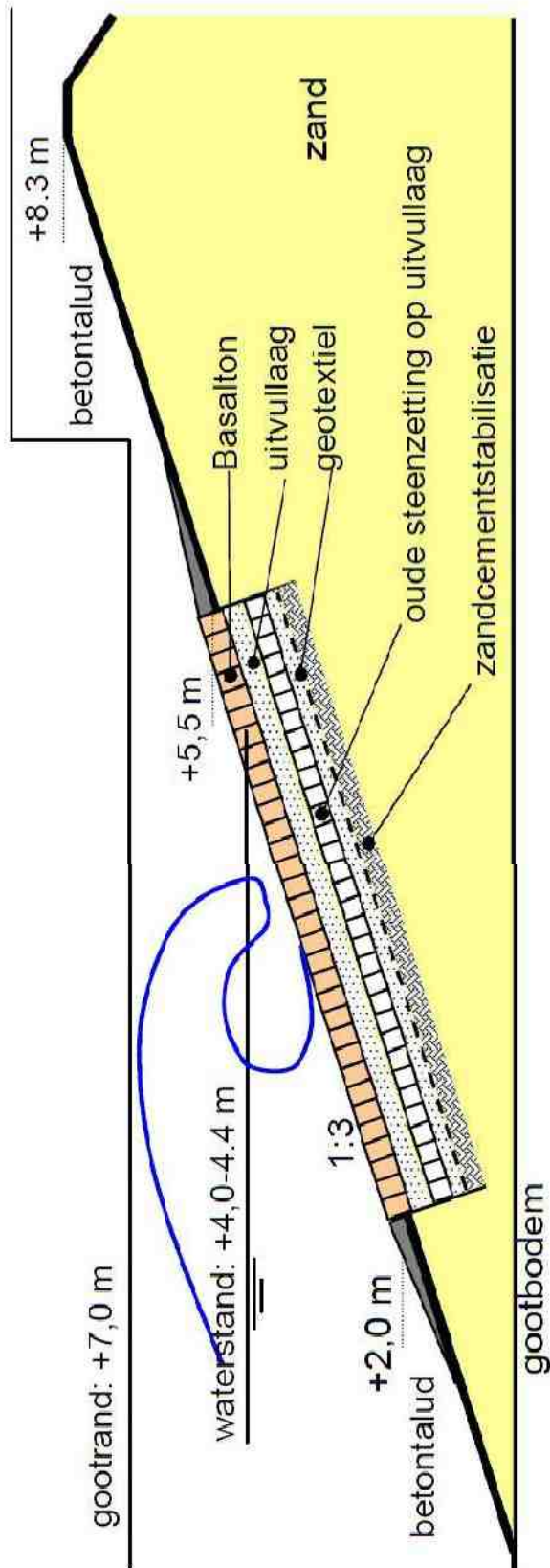
Proef nr.	Proefduur tijd (s)	Golfperiode T_p (s)	Aantal golven N (-)	Langeduurfactoren		
				f_B (-)	f_S (-)	$f_S \cdot f_B$ (-)
T1	2350	3,513	769	1,02	1,02	1,04
T7	3675	4,881	866	1,01	1,01	1,02
T9	2000	4,156	553	1,05	1,05	1,10

Tabel A.4 Evaluatie van de “langeduur”factoren voor de proeven die voortijdig zijn afgebroken in verband met bezwijken van de zetting (Aantal golven berekend op basis van $T_m = T_p/1,15$; deze verhouding is genoemd in TRG&G (TAW, 2002) en Leidraad Rivierdijken (TAW, 1989))

B Figuren

Overzicht figuren in bijlagen B:

- B.1 Opzet proefopstelling in de Deltagoot (langsdoorsnede)
- B.2 Gedetailleerde schets met locatie van drukmetingen
- B.3 Zeefkromme filtermateriaal
- B.4 Zeefkromme inwasmateriaal



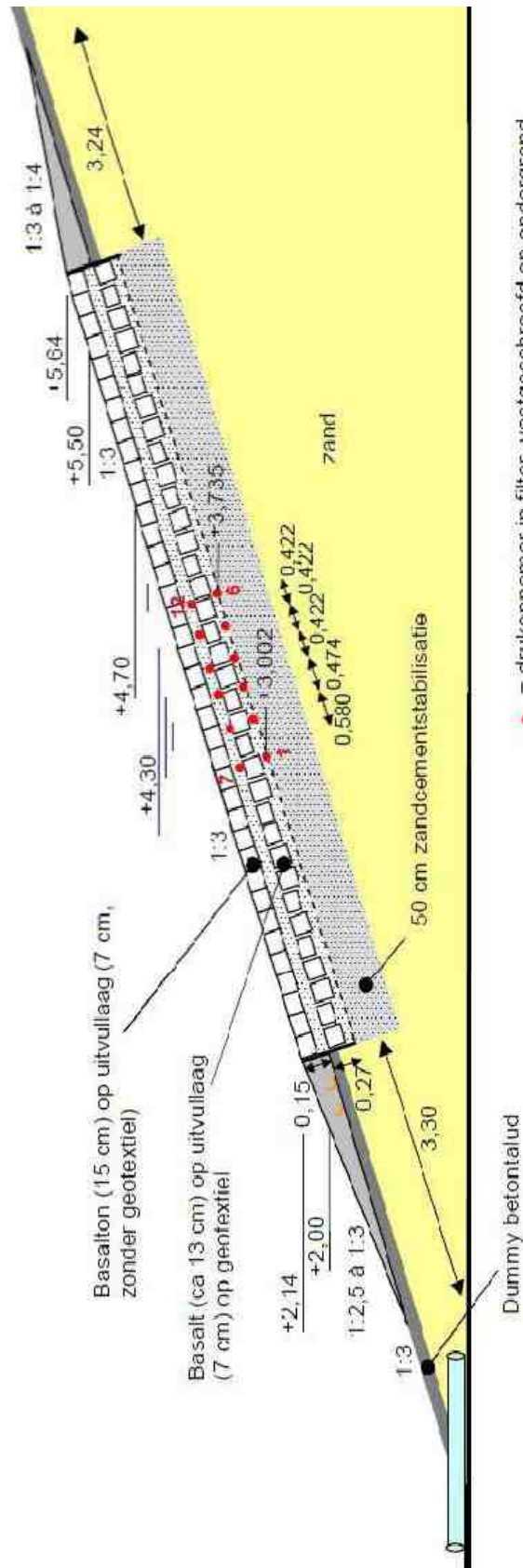
Dubbele steenzetting - Deltagootproeven

Opzet proefopstelling in de Deltagoot (langsdoorsnede)

Deltares

1205571

Fig. B.1



• - drukopnemer in filter, vastgeschroefd op ondergrond

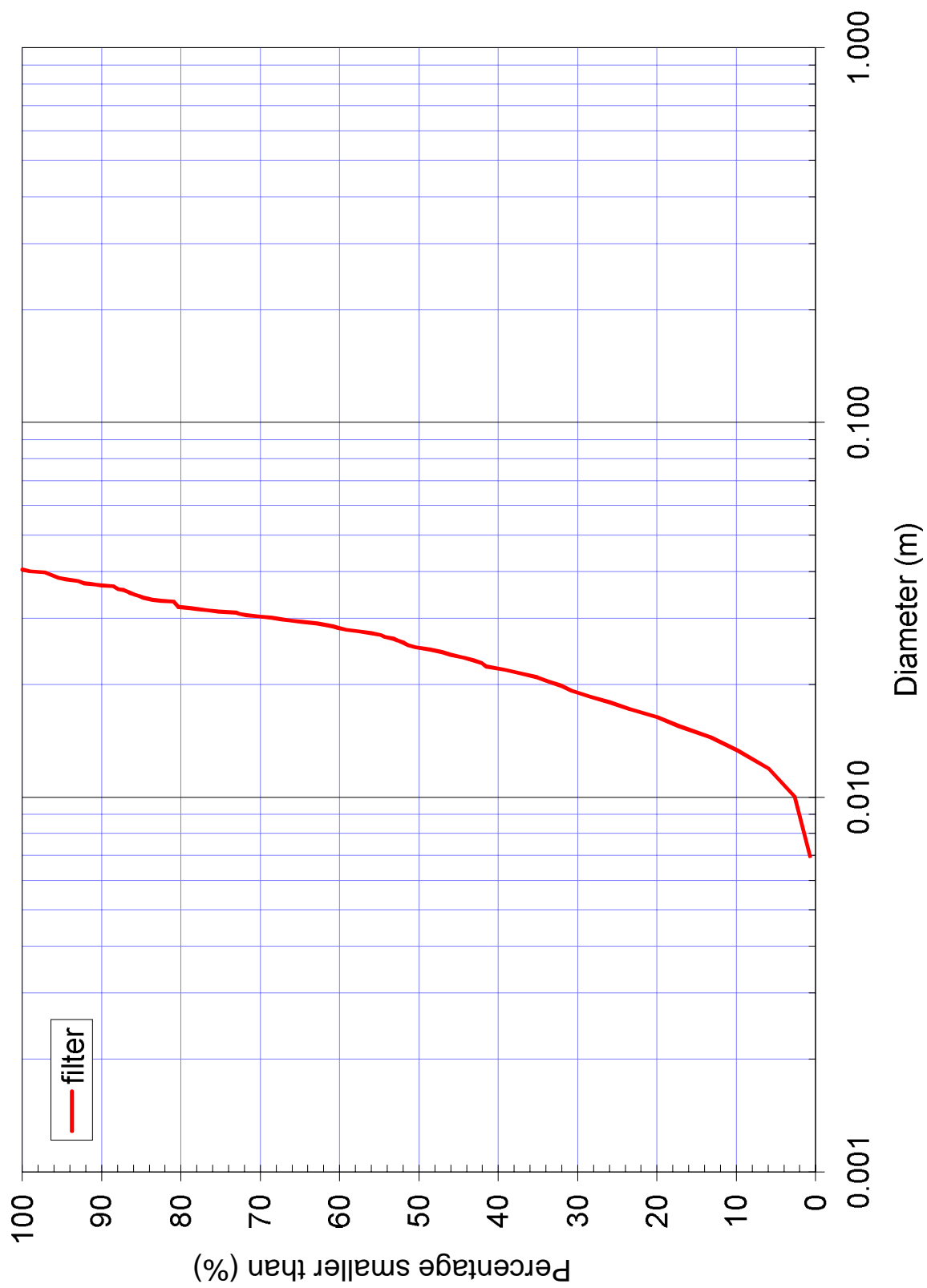
Dubbele steenzetting - Deltagootproeven

Gedetailleerde schets met locatie van drukmetingen

Deltares

1205571

Fig. B.2



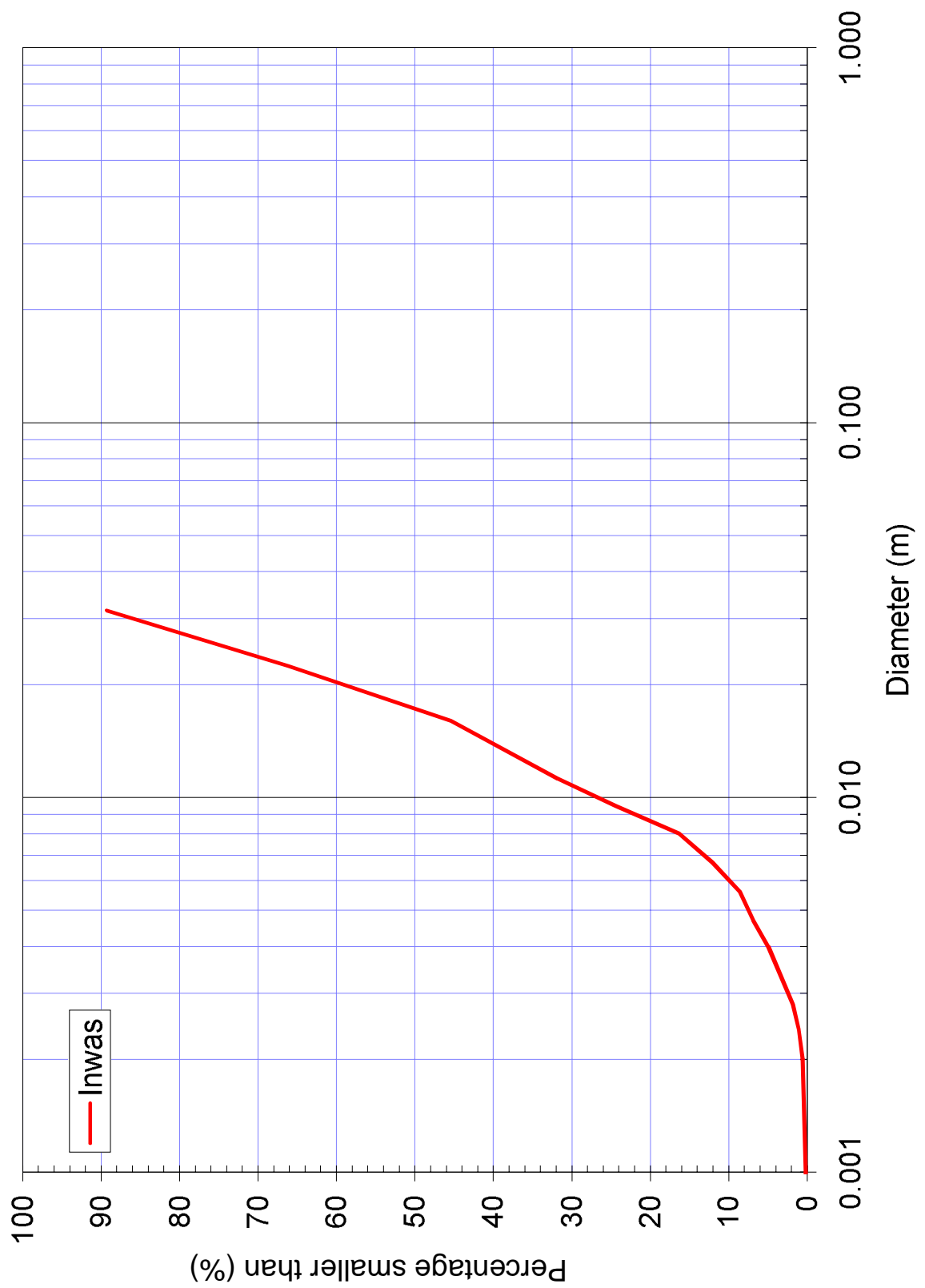
Dubbele steenzetting - Deltagootproeven

Zeefkromme filtermateriaal

Deltares

1205571

Fig. B.3



Dubbele steenzetting - Deltagootproeven

Zeefkromme inwasmateriaal

Deltares

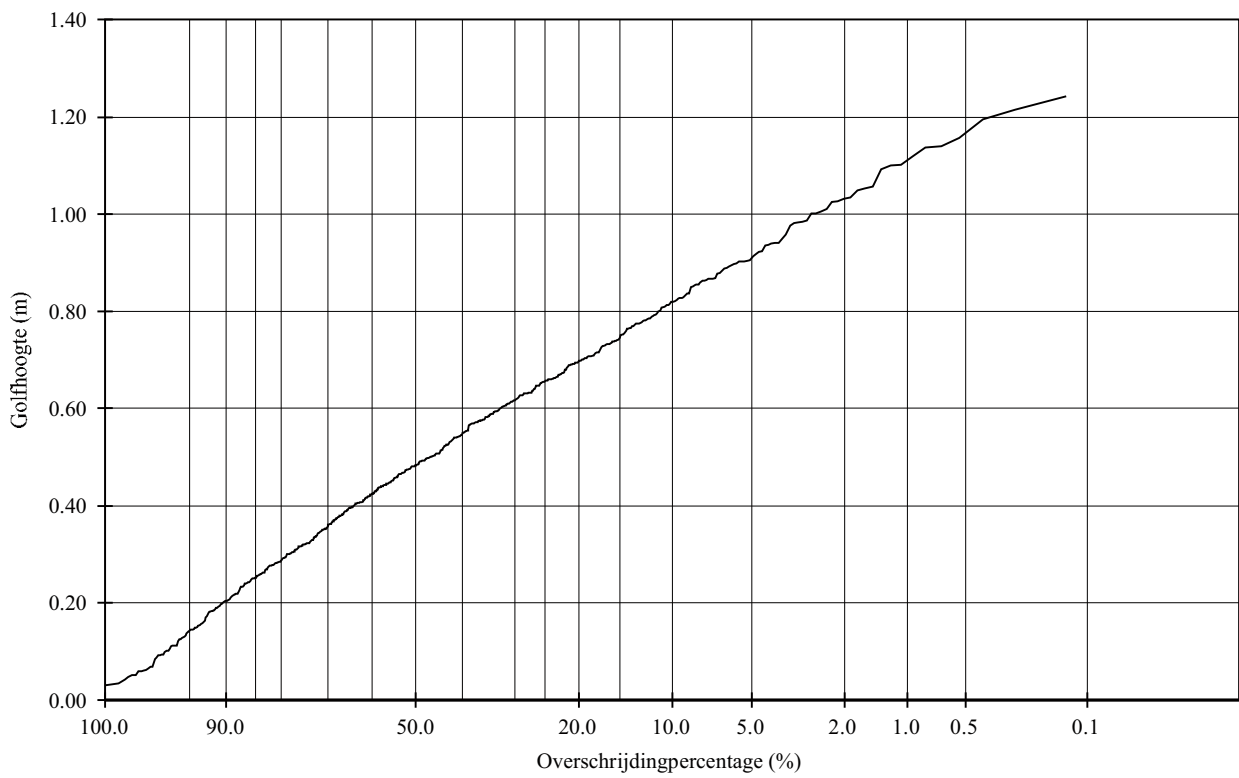
1205571

Fig. B.4

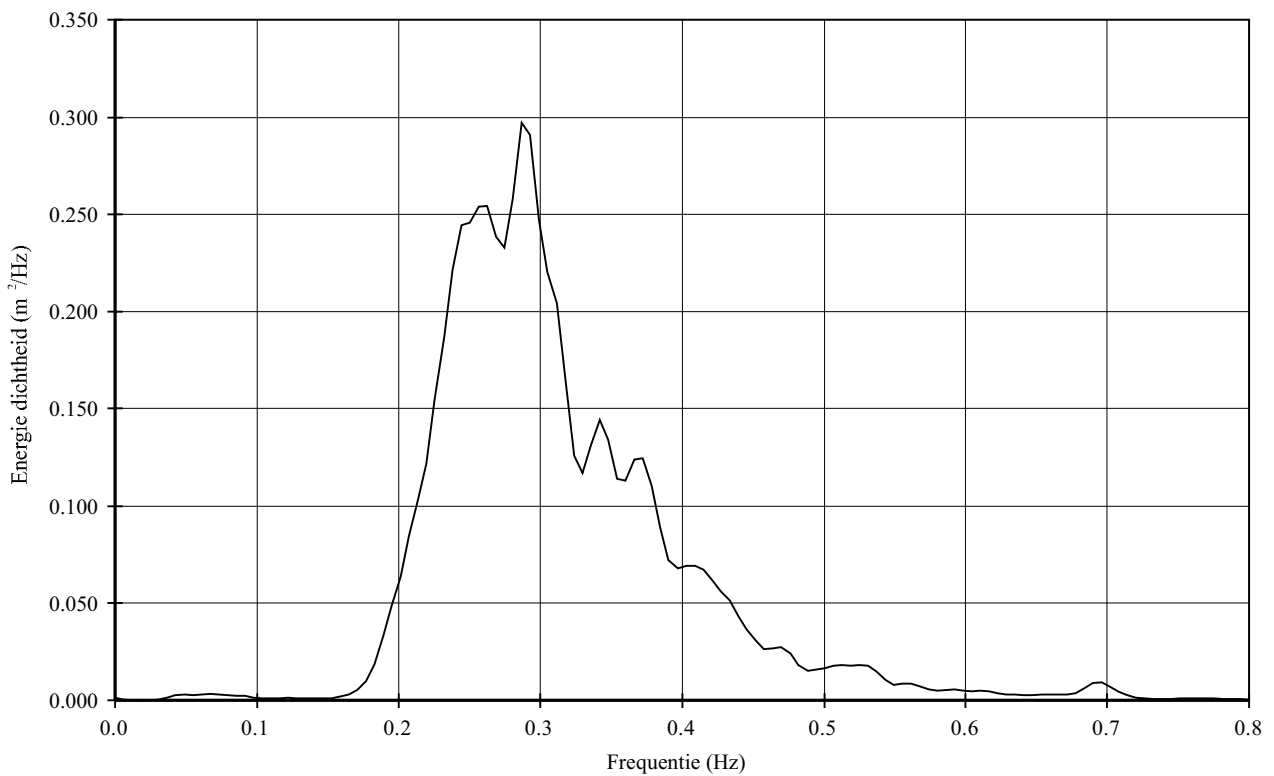
C Golfhoogte overschrijdingskrommen

Overzicht figuren in bijlage C:

- C.1 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T1
- C.2 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T2
- C.3 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T3
- C.4 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T4
- C.5 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T5
- C.6 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T6
- C.7 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T7
- C.8 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T8
- C.9 Golfhoogte overschrijdingskromme en energie dichtheidsspectrum, proef T9



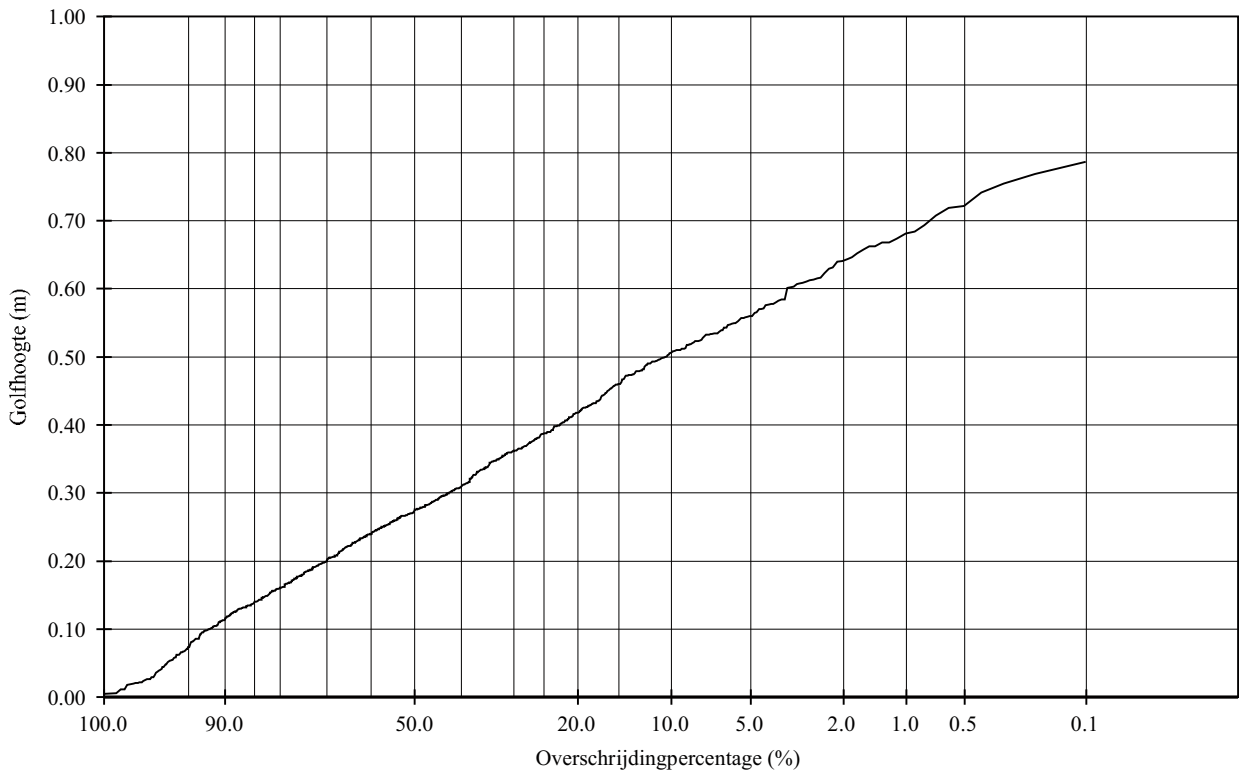
— Inkomend



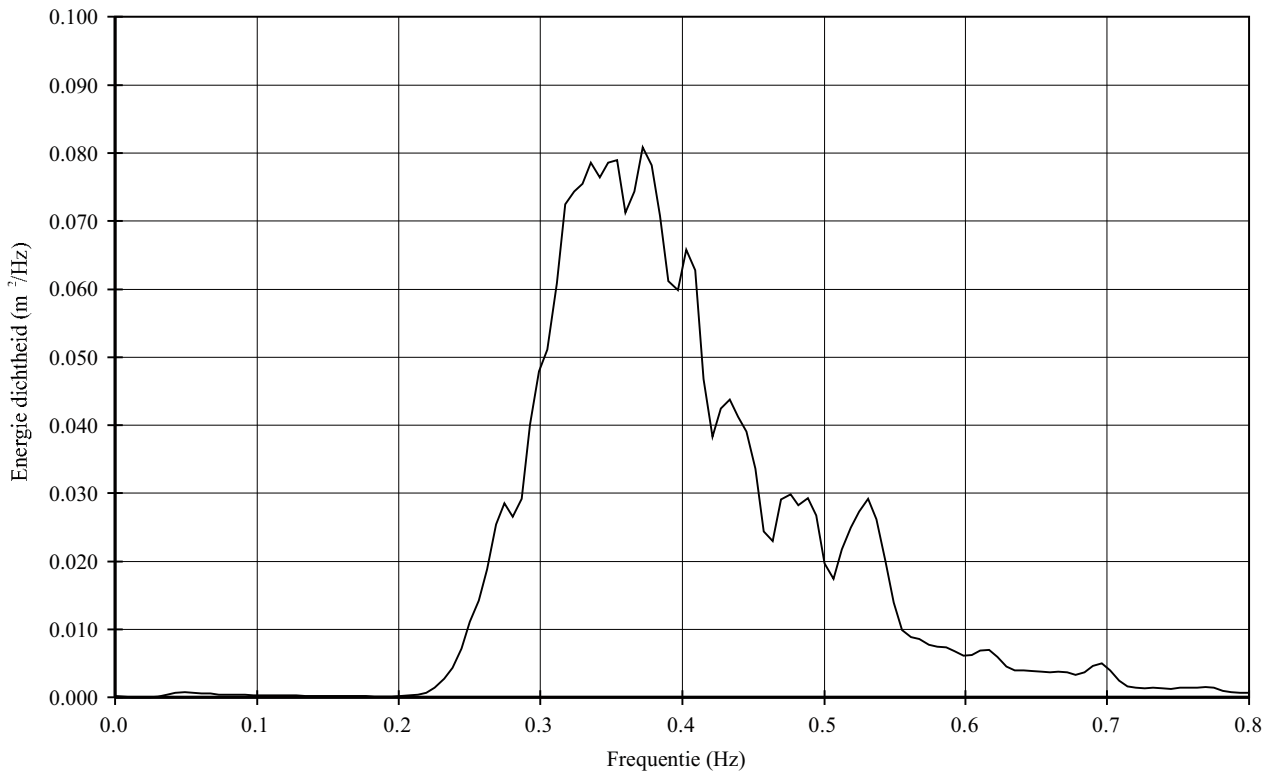
golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

#p01

Inkomend



— Inkomend



golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

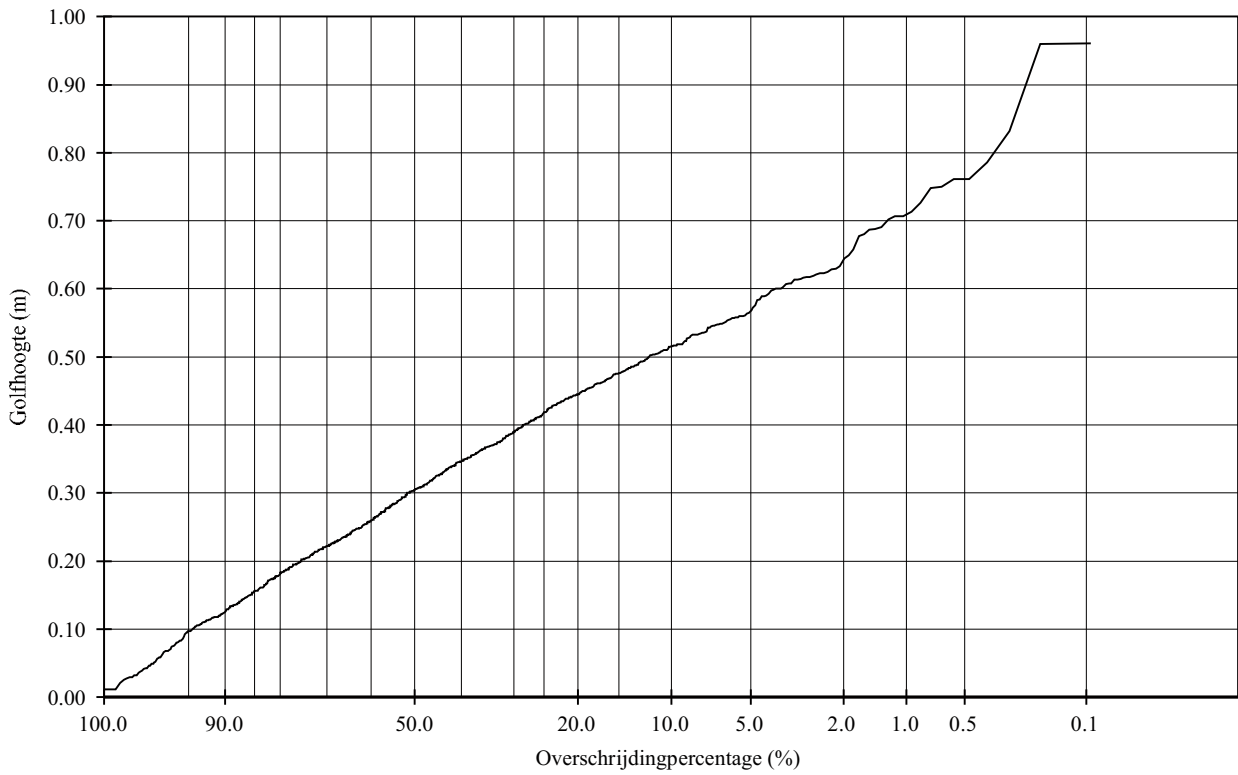
#p02

Inkomend

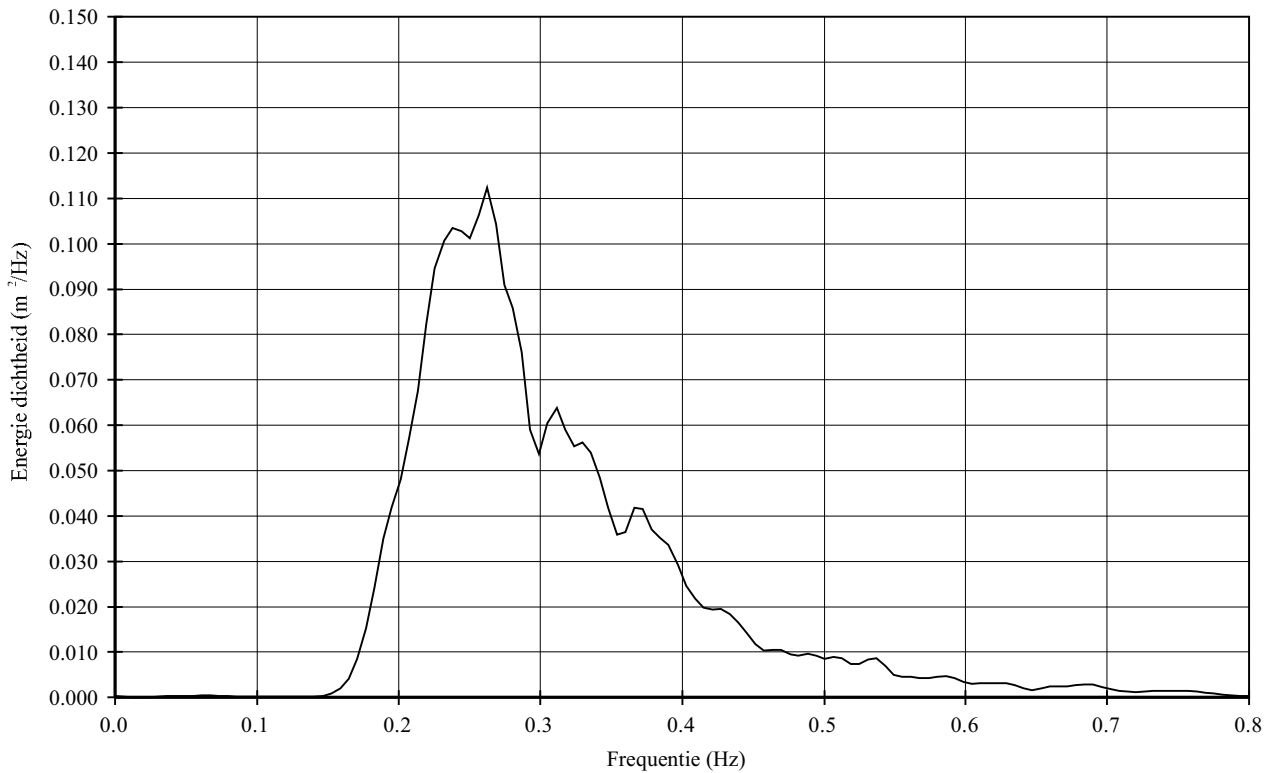
Deltares | Delft Hydraulics

1205571

FIG. C.2



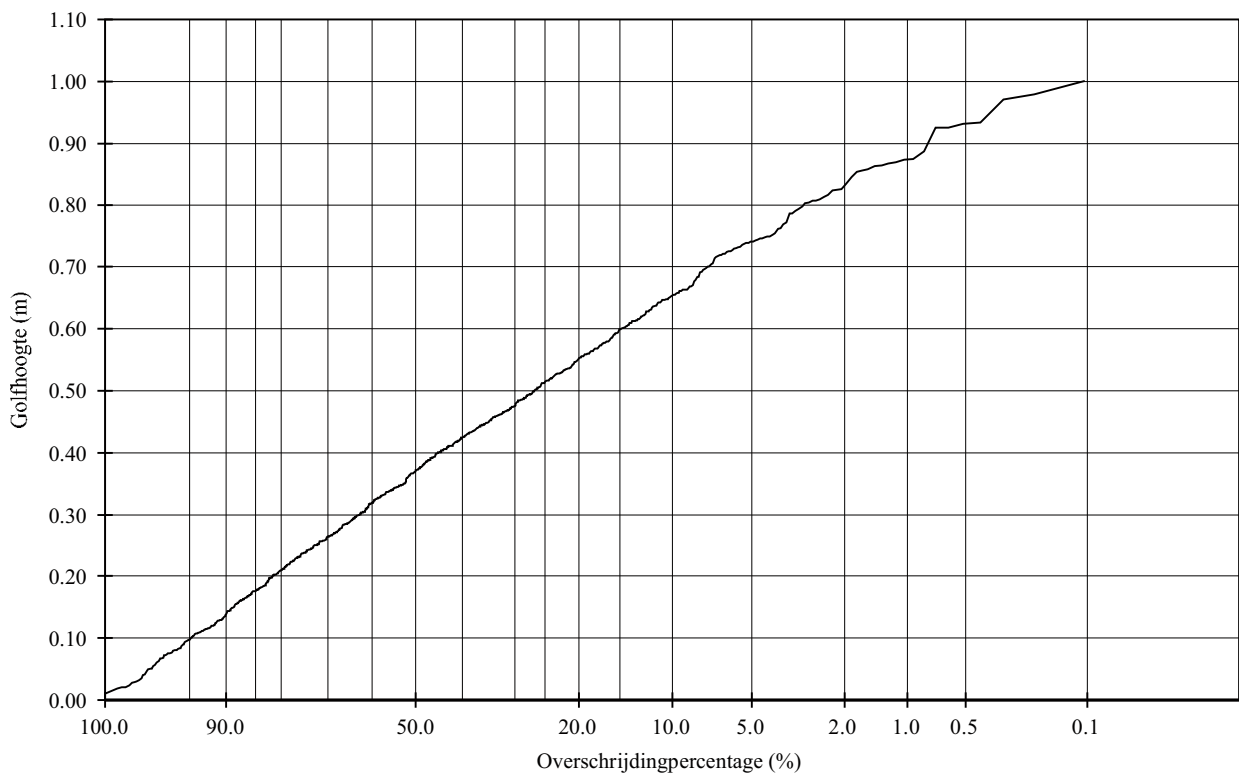
— Inkomend



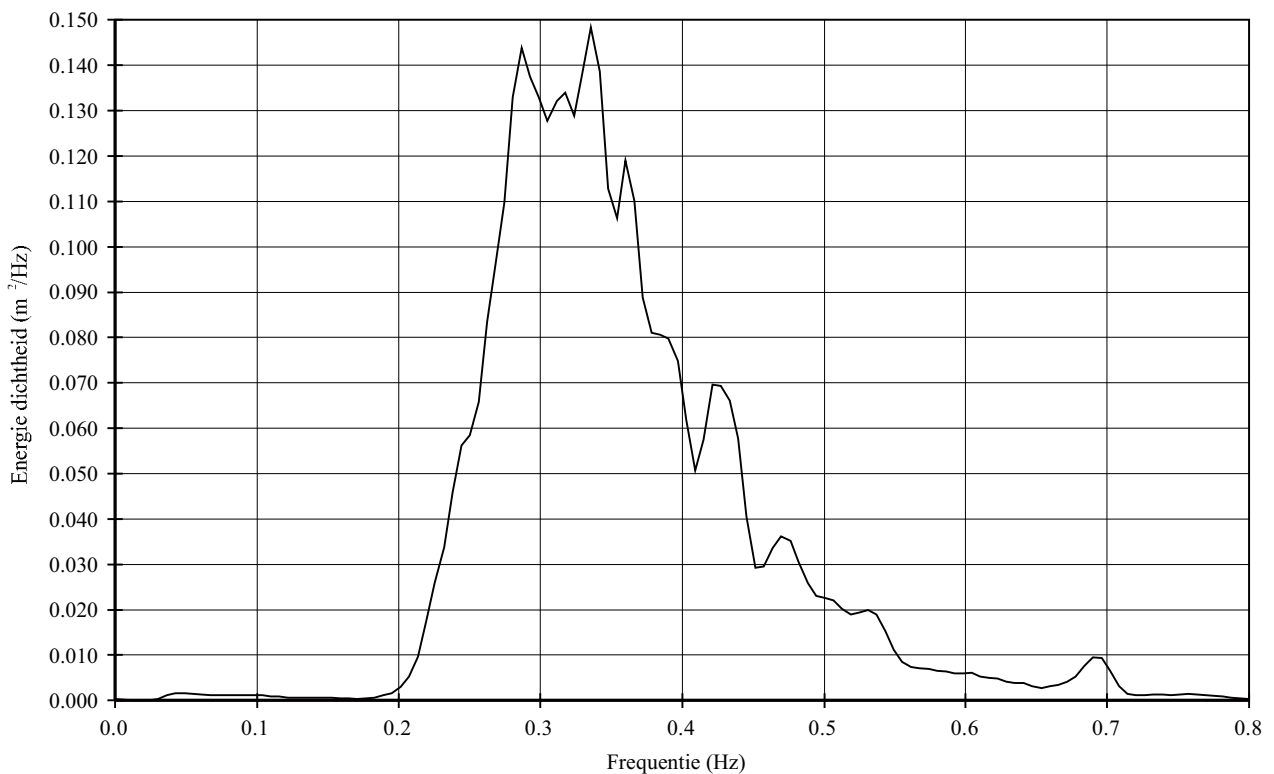
golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

#p03

Inkomend



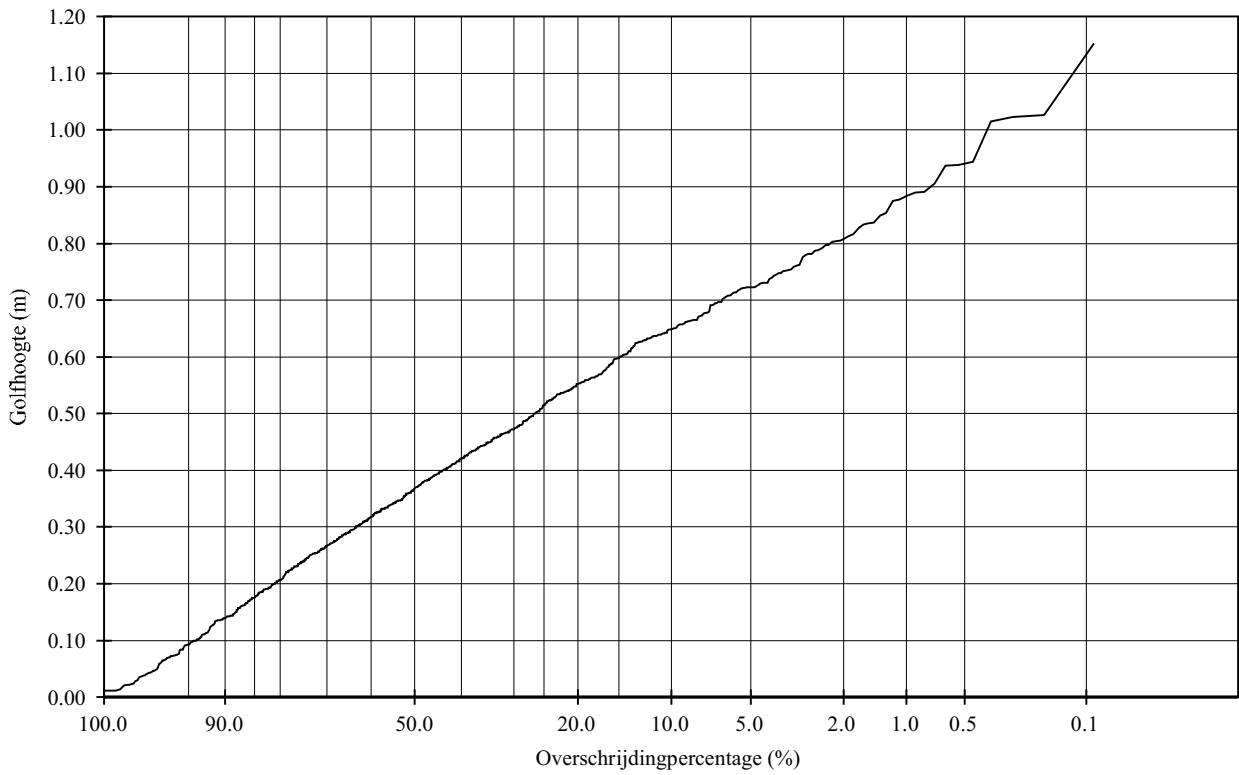
— Inkomend



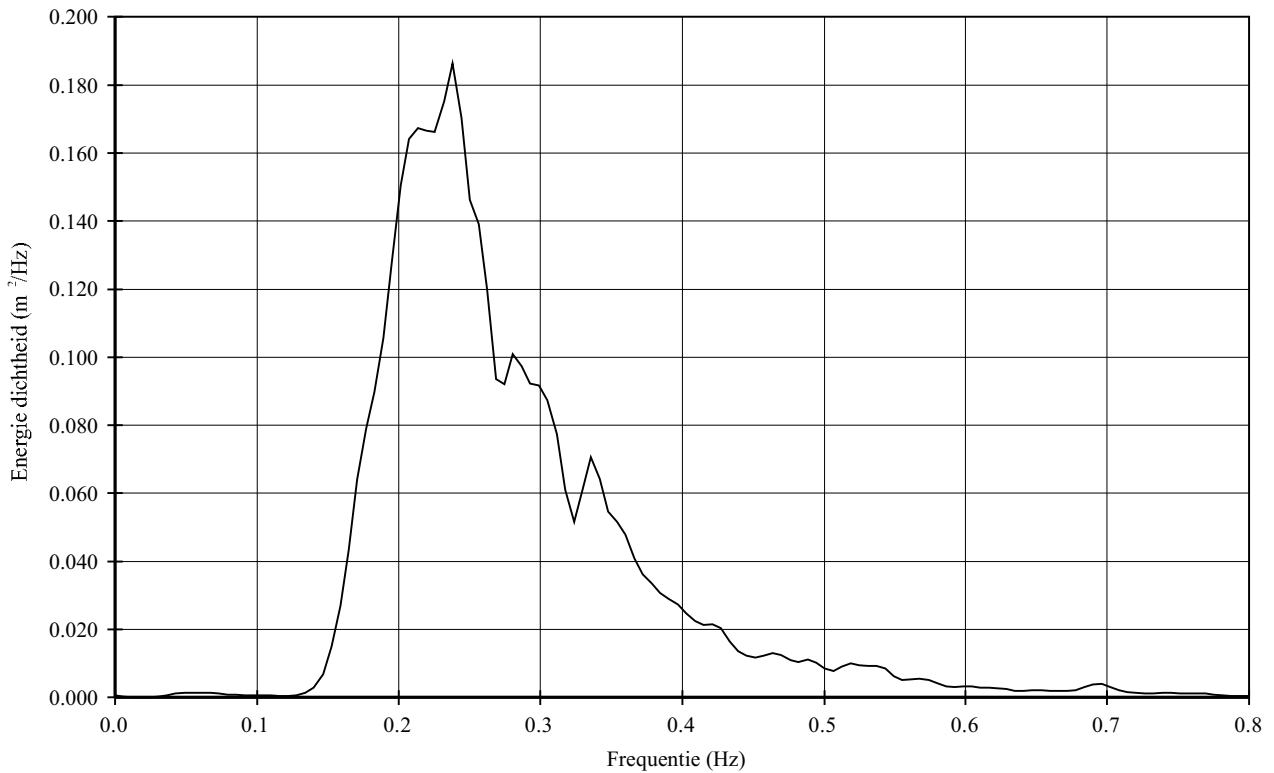
golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

#p04

Inkomend



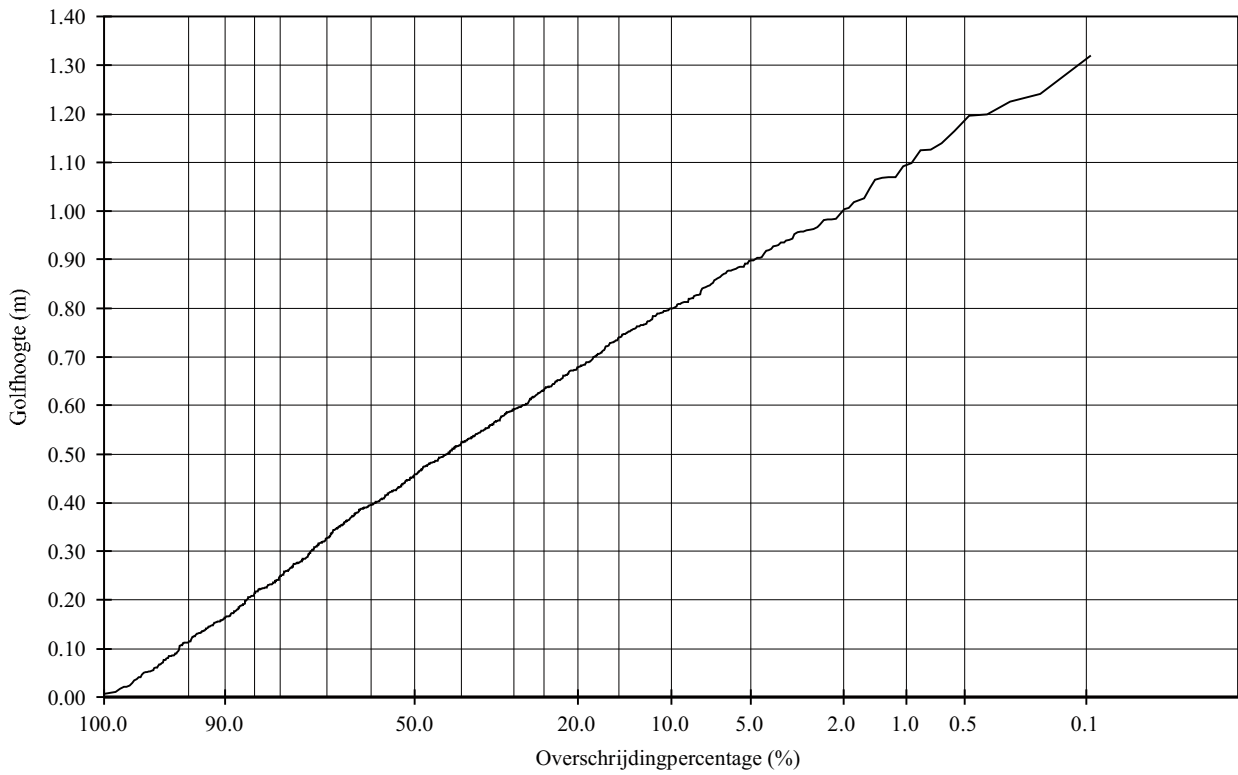
— Inkomend



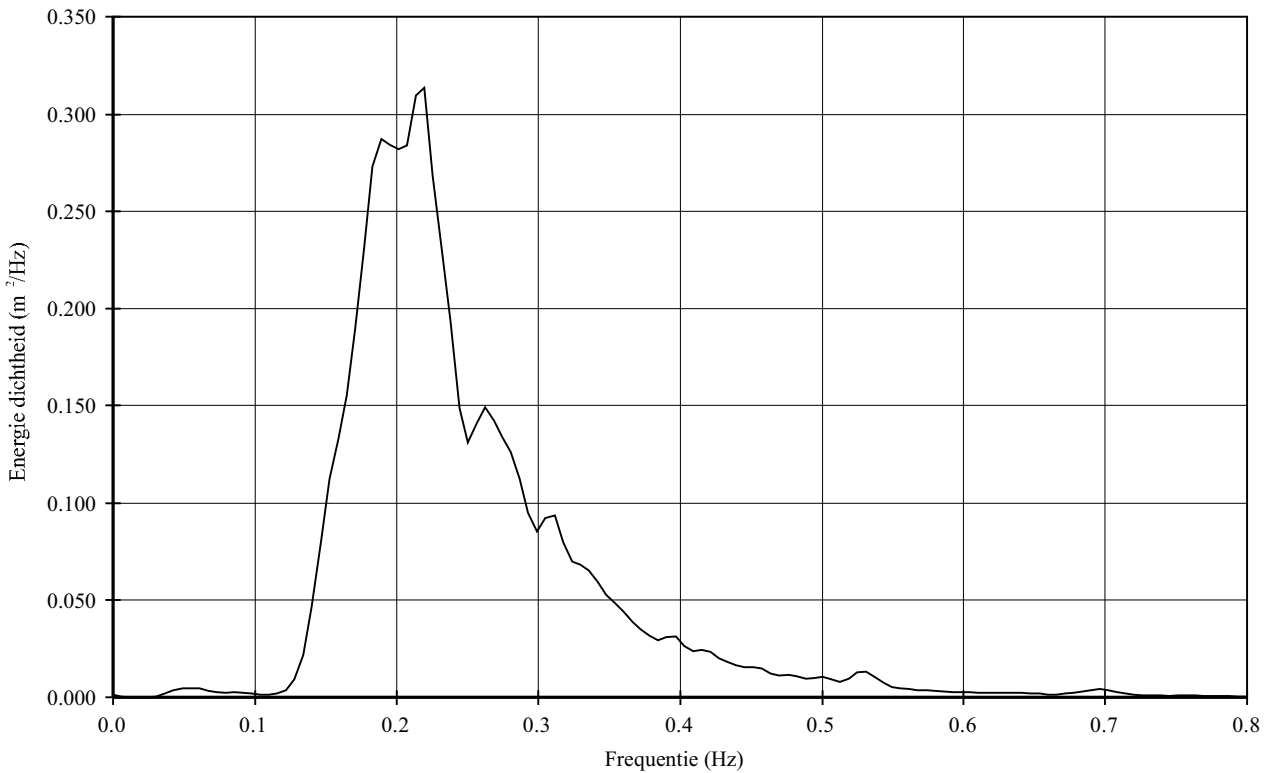
golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

#p05

Inkomend



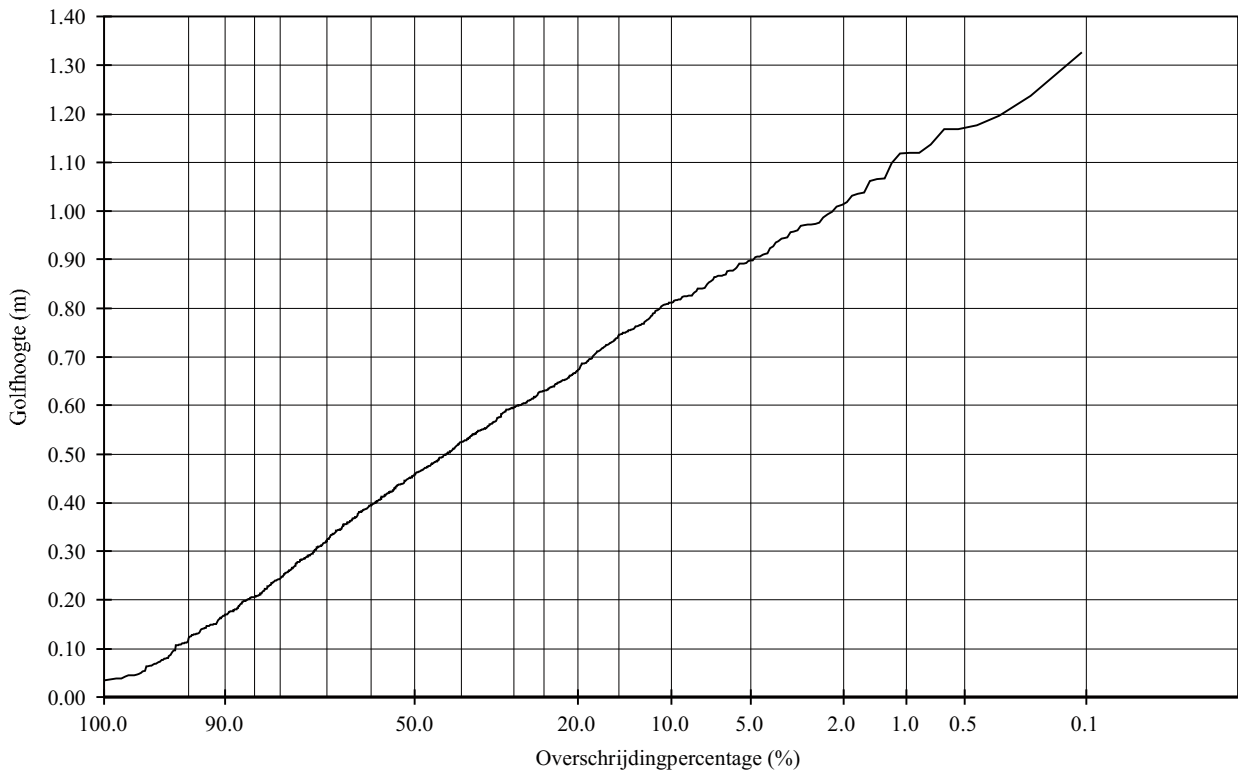
— Inkomend



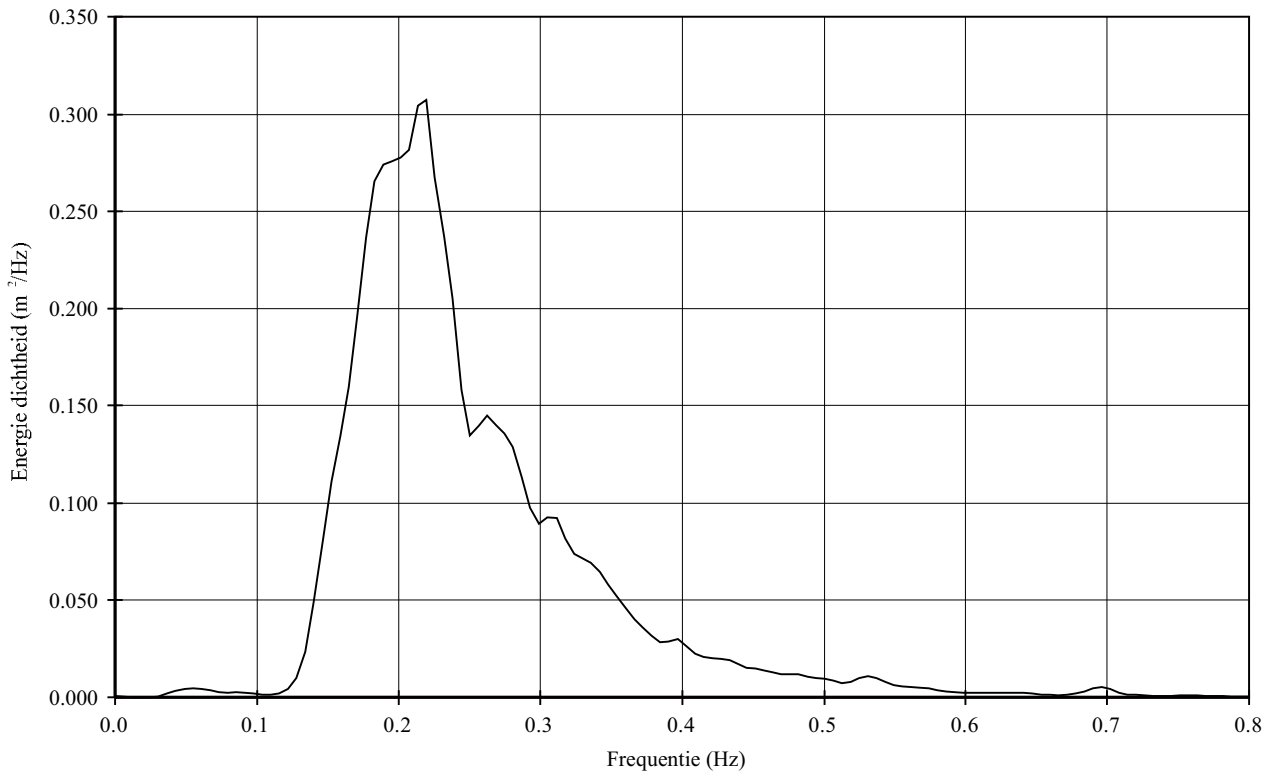
golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

#p06

Inkomend



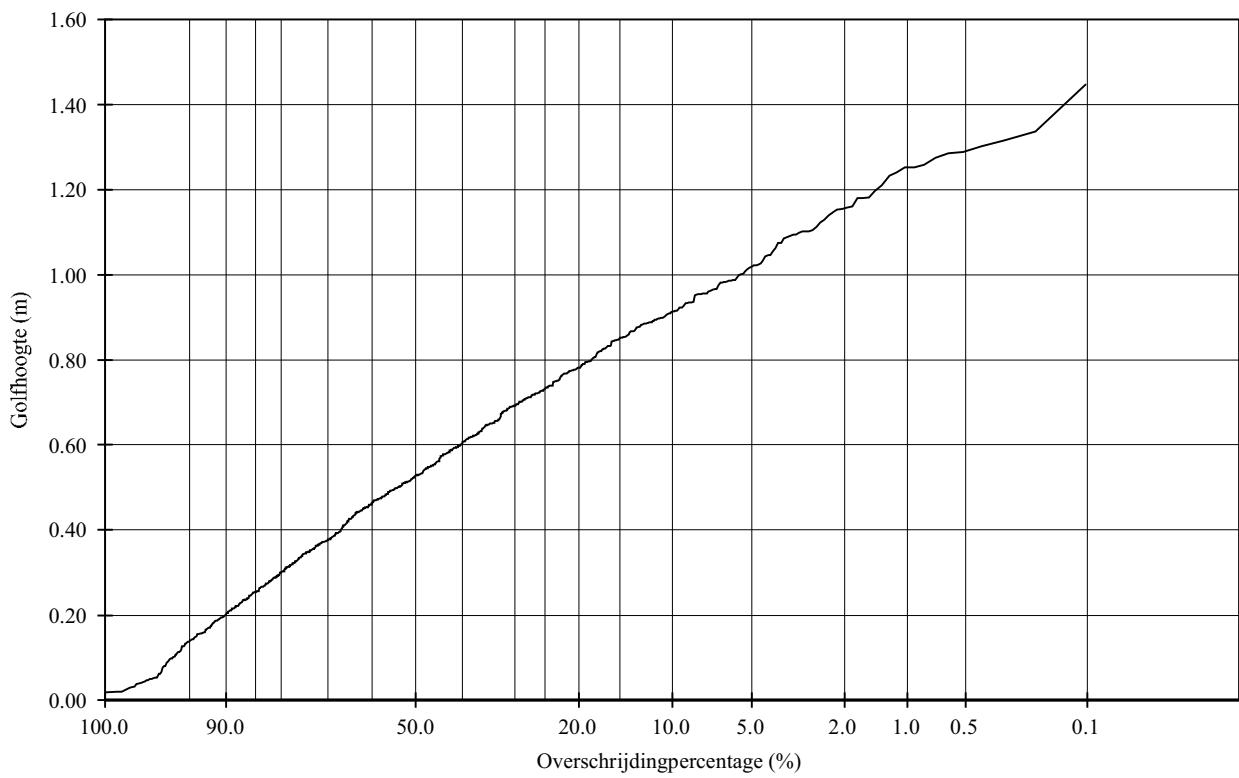
— Inkomend



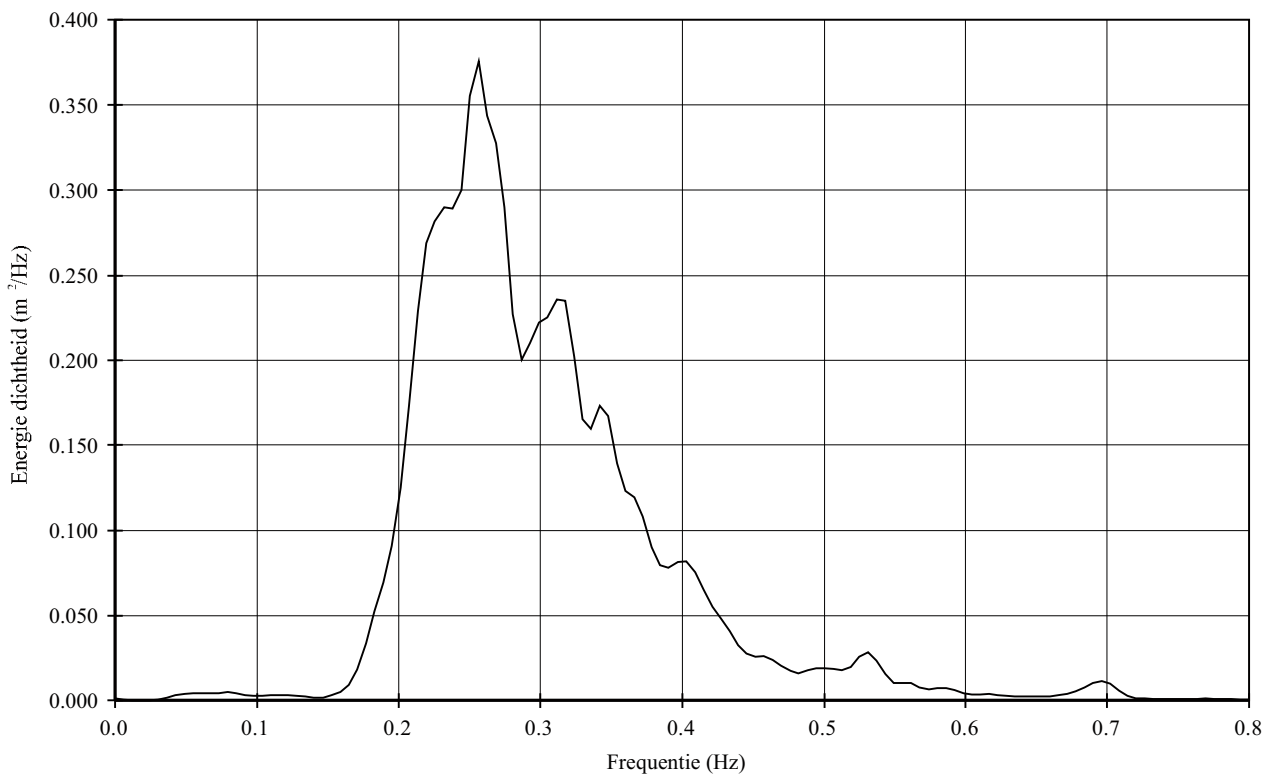
golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

#p07

Inkomend



— Inkomend



golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

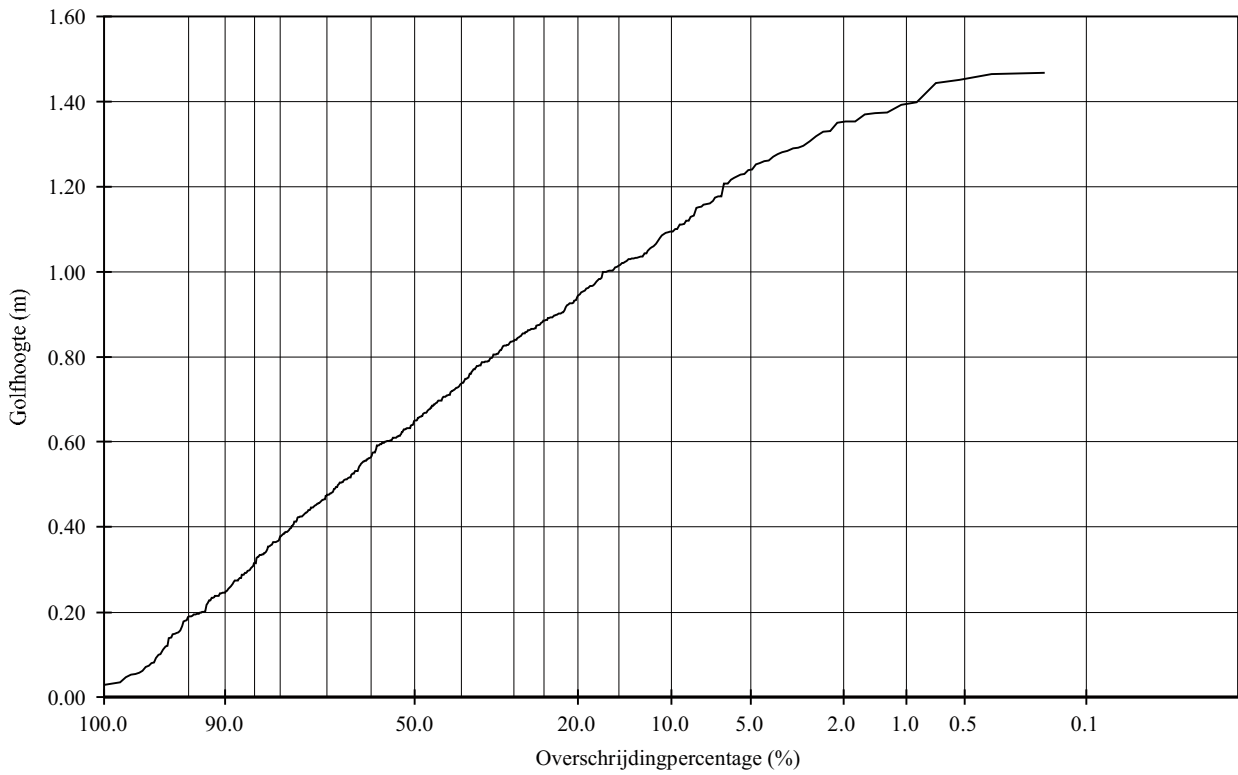
#p08

Inkomend

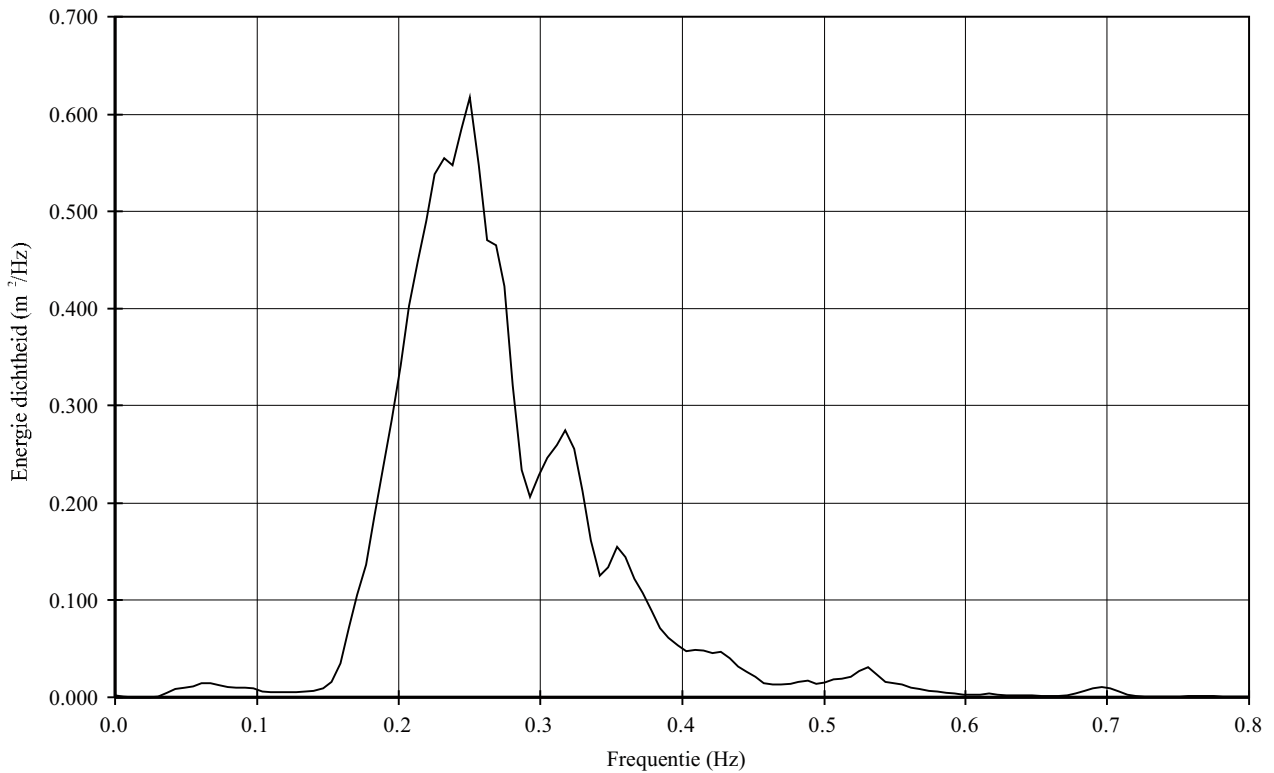
Deltares | Delft Hydraulics

1205571

FIG. C.8



————— Inkomend



golfhoogte overschrijdingskrommen en
energie dichtheidsspectra

#p09

Inkomend

Deltares | Delft Hydraulics

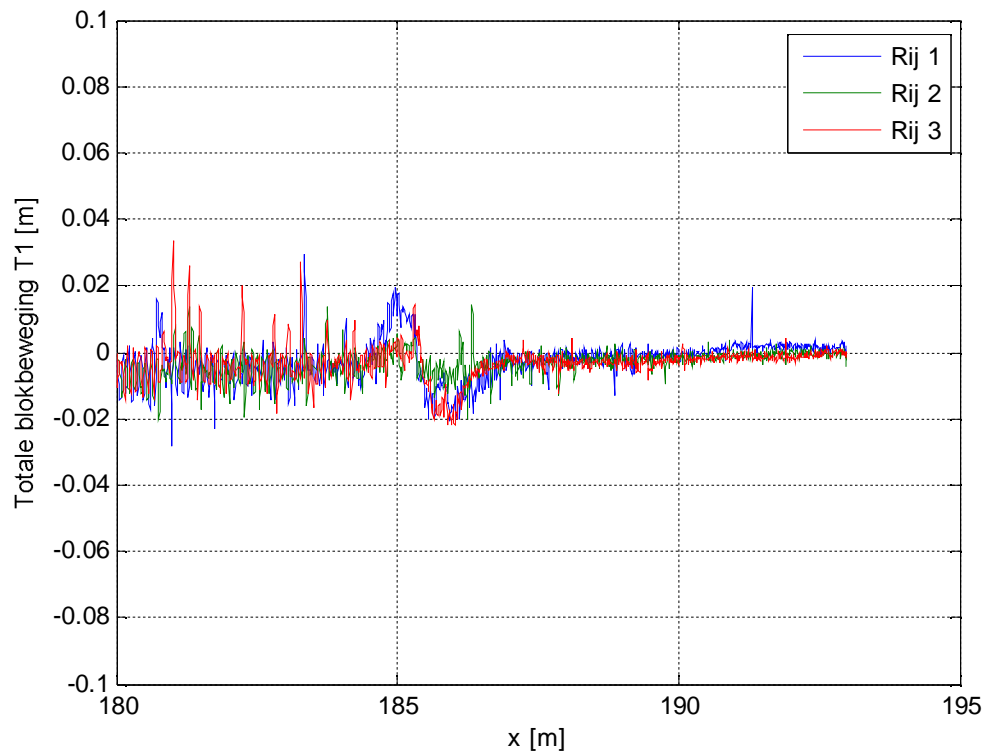
1205571

FIG. C.9

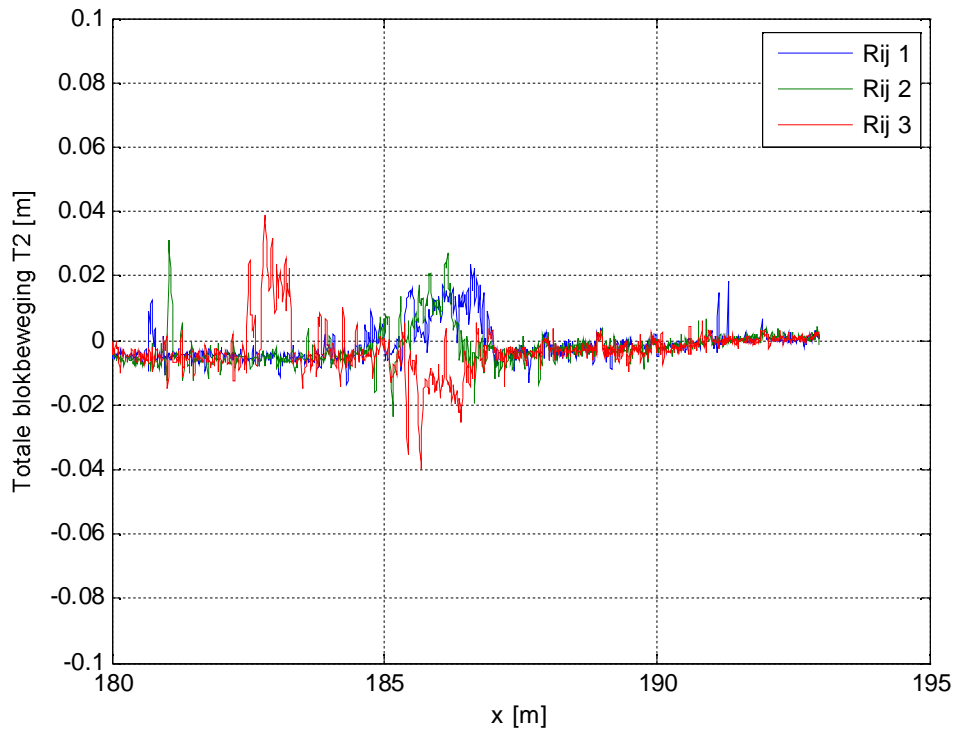
D Verticale verplaatsingen van taludoppervlak op basis van profielmetingen

Overzicht figuren in bijlage D:

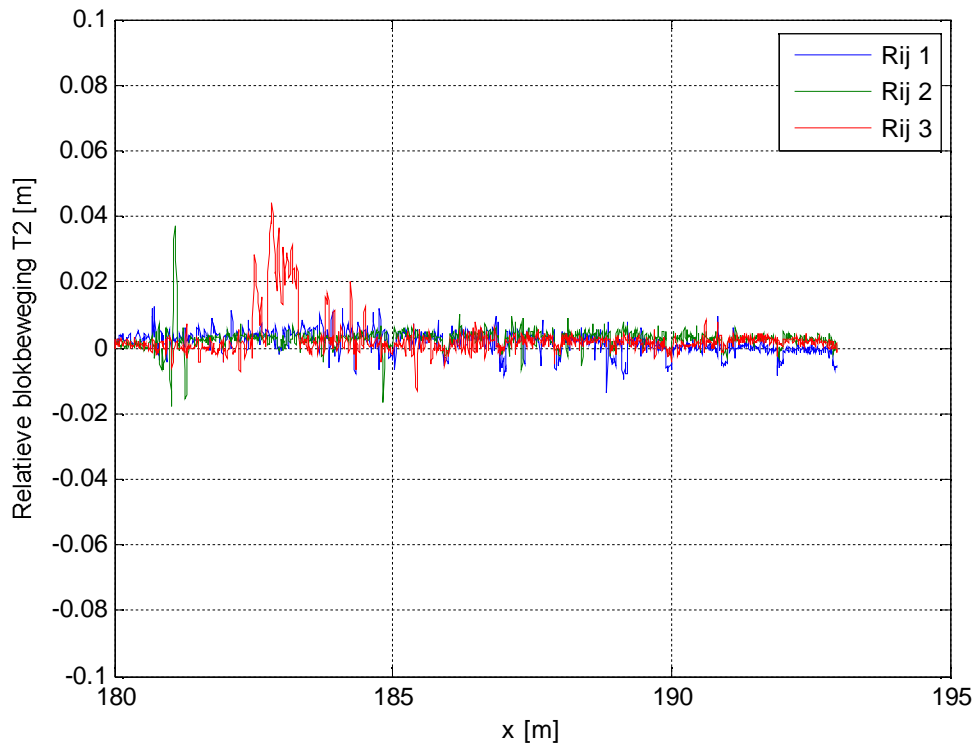
- D.1 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T1
- D.2 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T2
- D.3 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T2
- D.4 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T3
- D.5 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T3
- D.6 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T4
- D.7 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T4
- D.8 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T5
- D.9 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T5
- D.10 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T7
- D.11 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T6
- D.12 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T7
- D.13 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T7
- D.14 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T8
- D.15 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T8
- D.16 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T9
- D.17 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T9



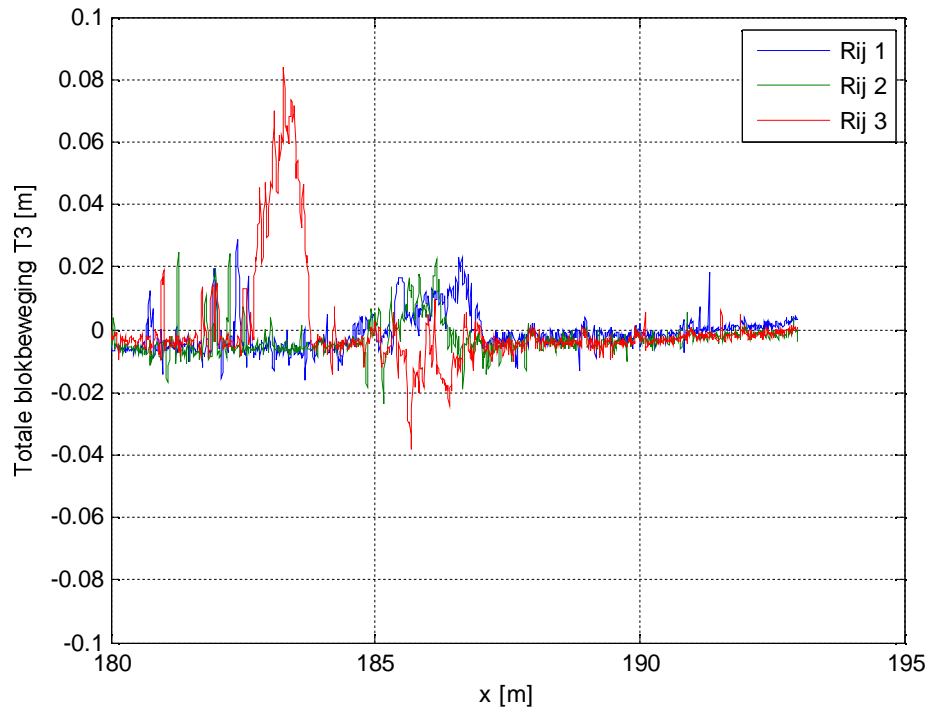
Figuur D.1 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T1



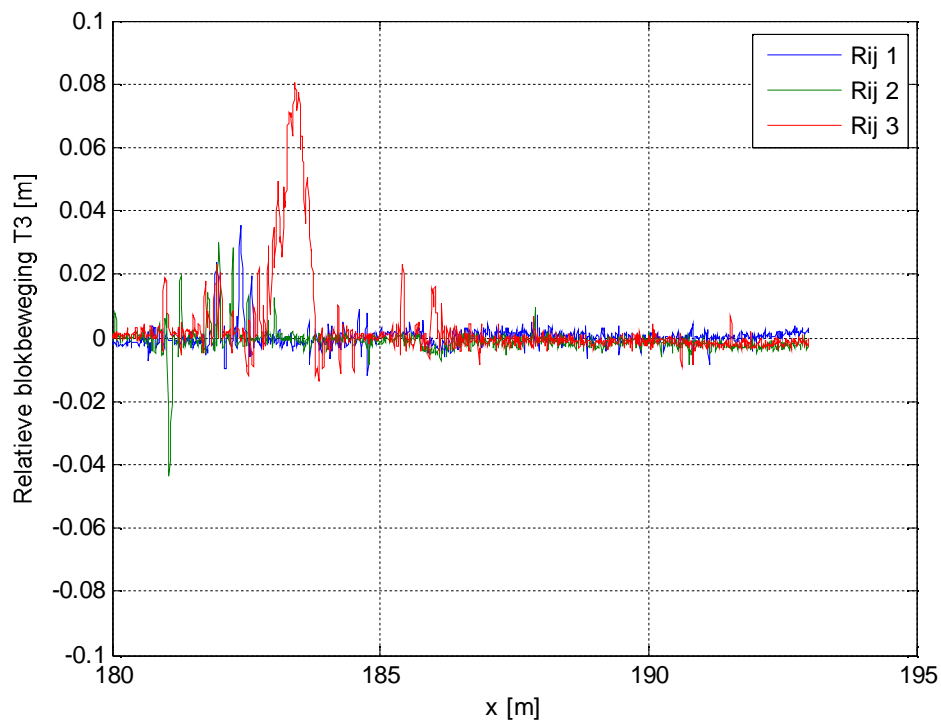
Figuur D.2 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T2



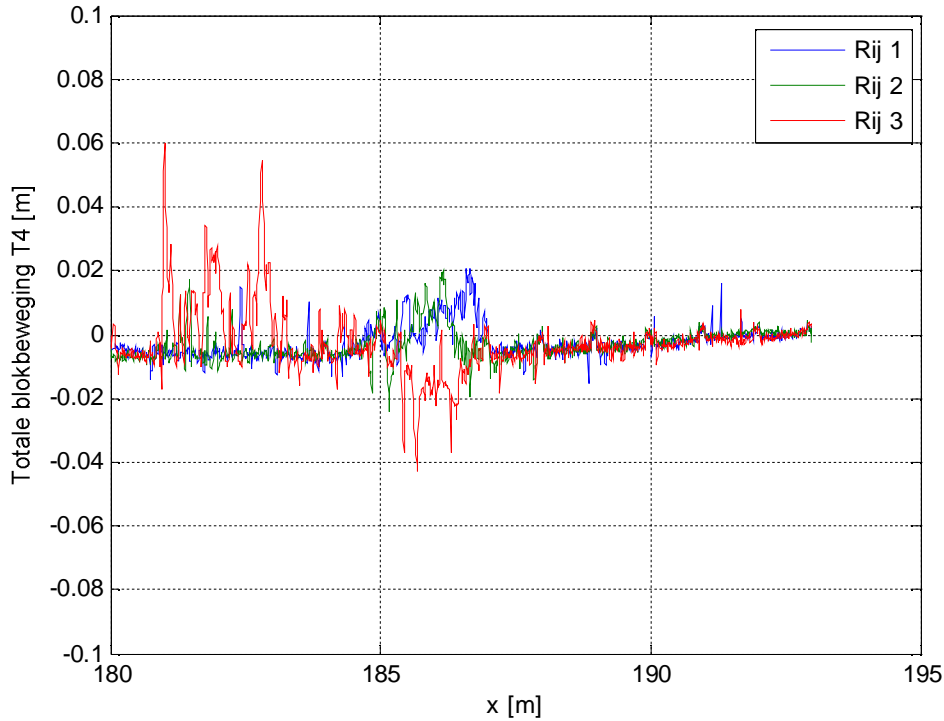
Figuur D.3 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T2



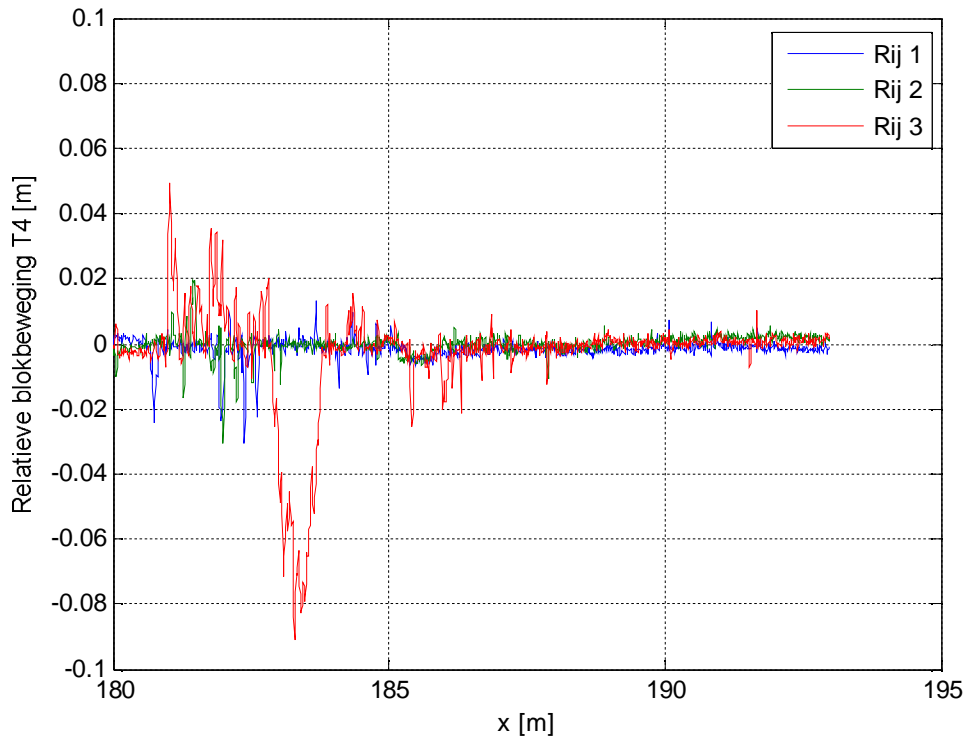
Figuur D.4 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T3



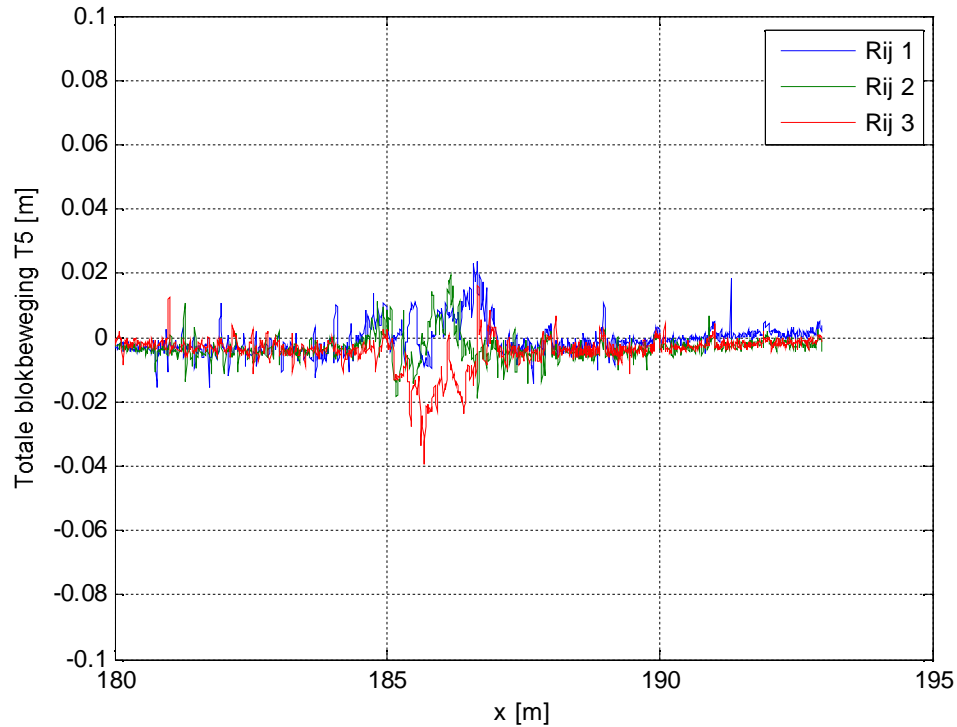
Figuur D.5 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T3



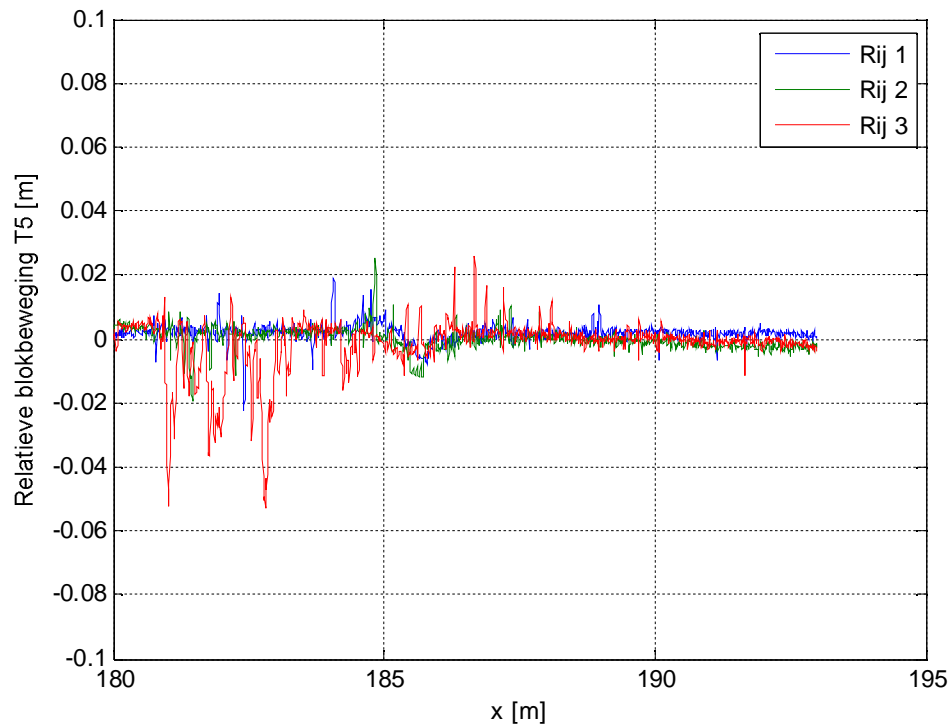
Figuur D.6 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T4



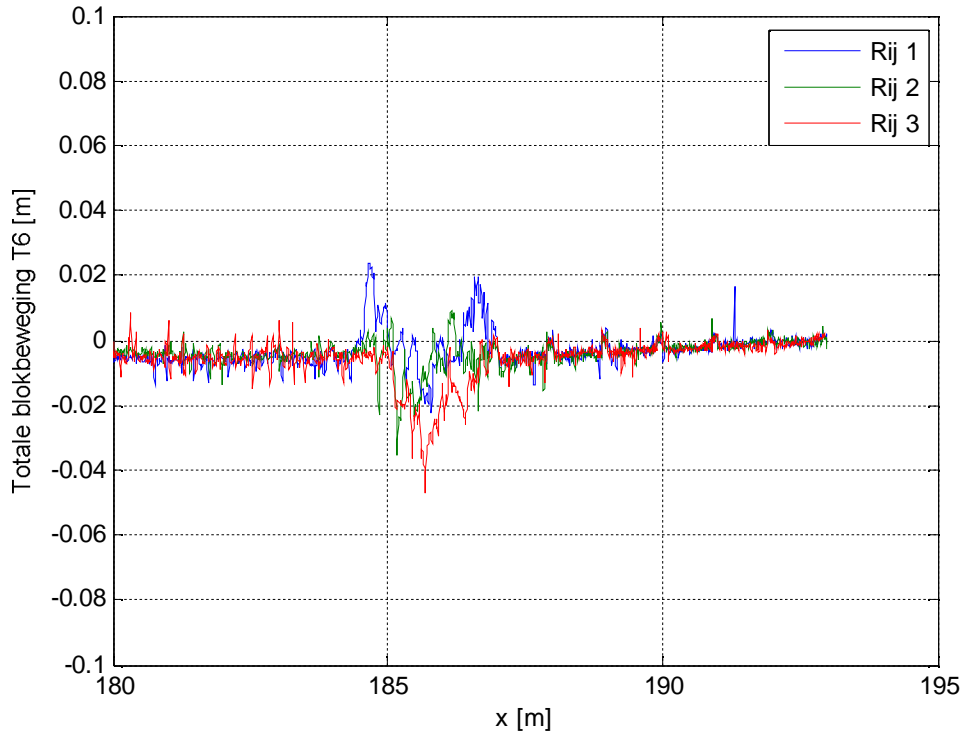
Figuur D.7 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T4



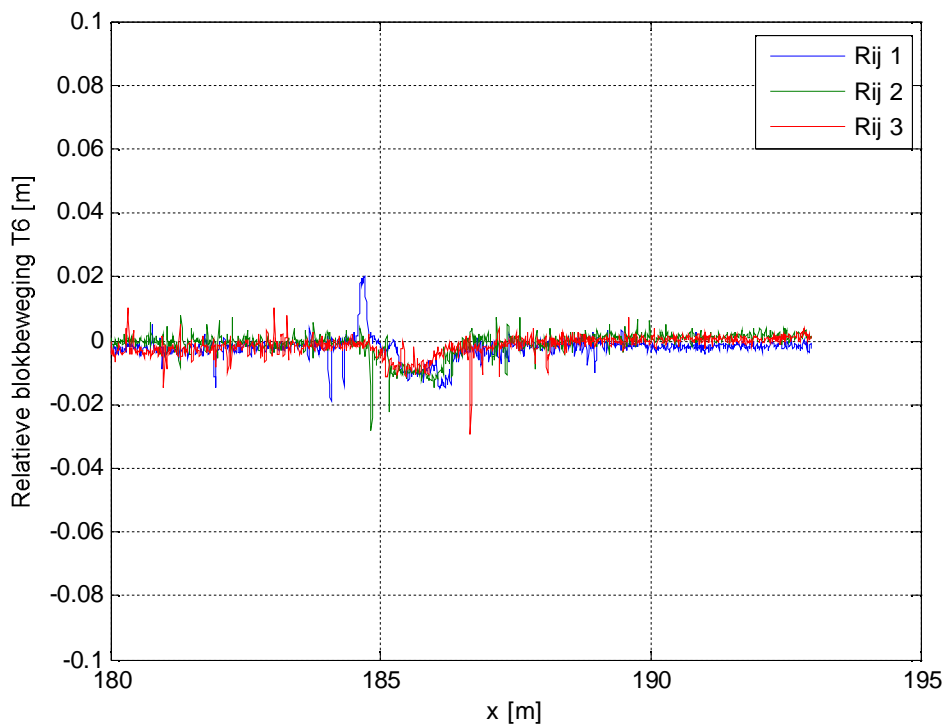
Figuur D.8 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T5



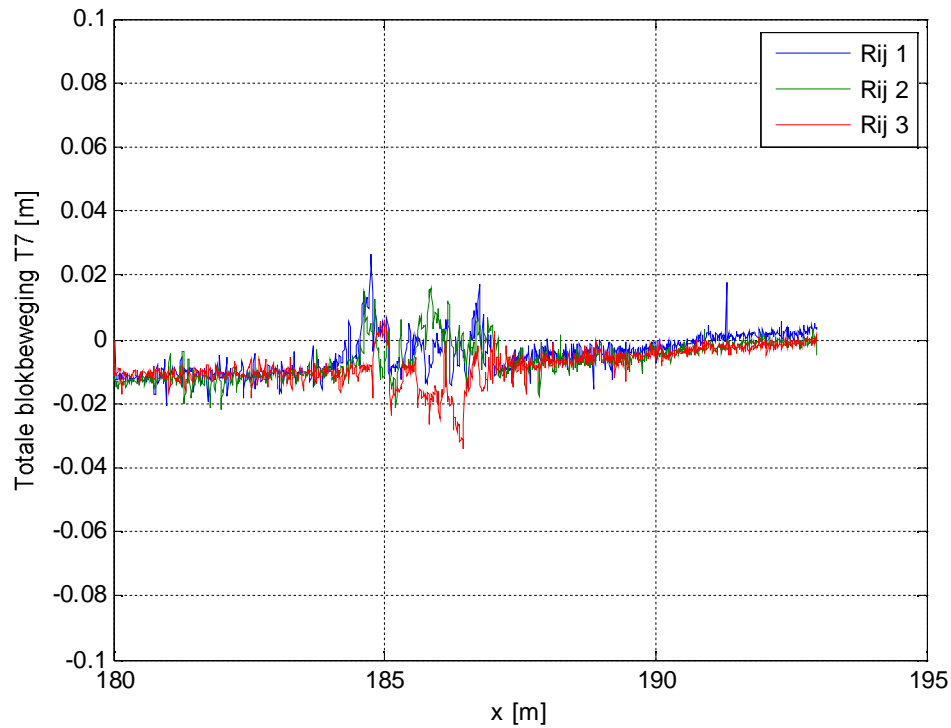
Figuur D.9 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T5



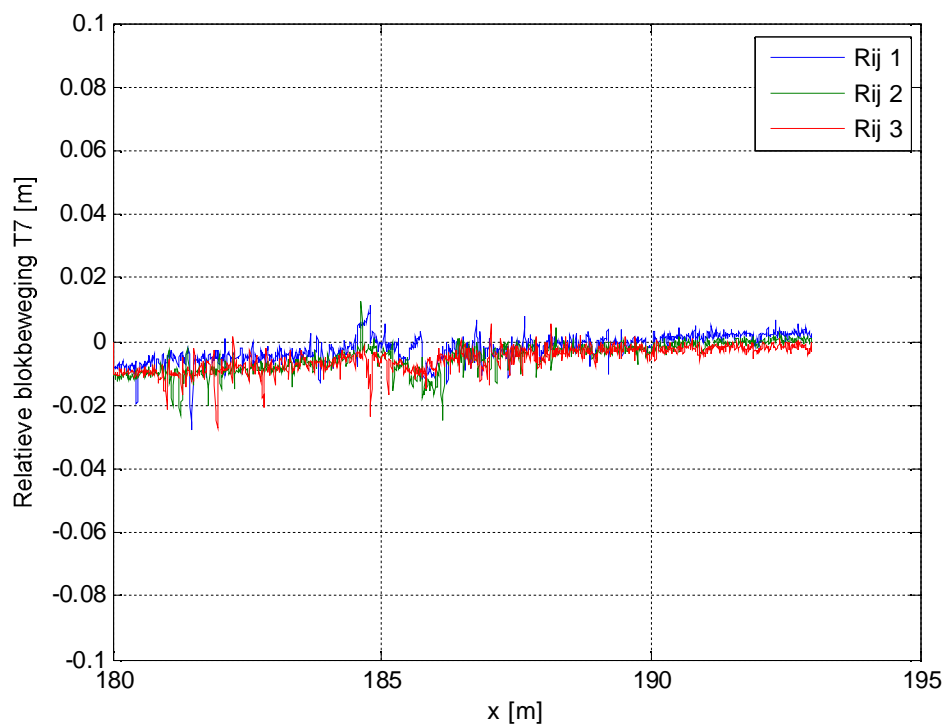
Figuur D.10 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T6



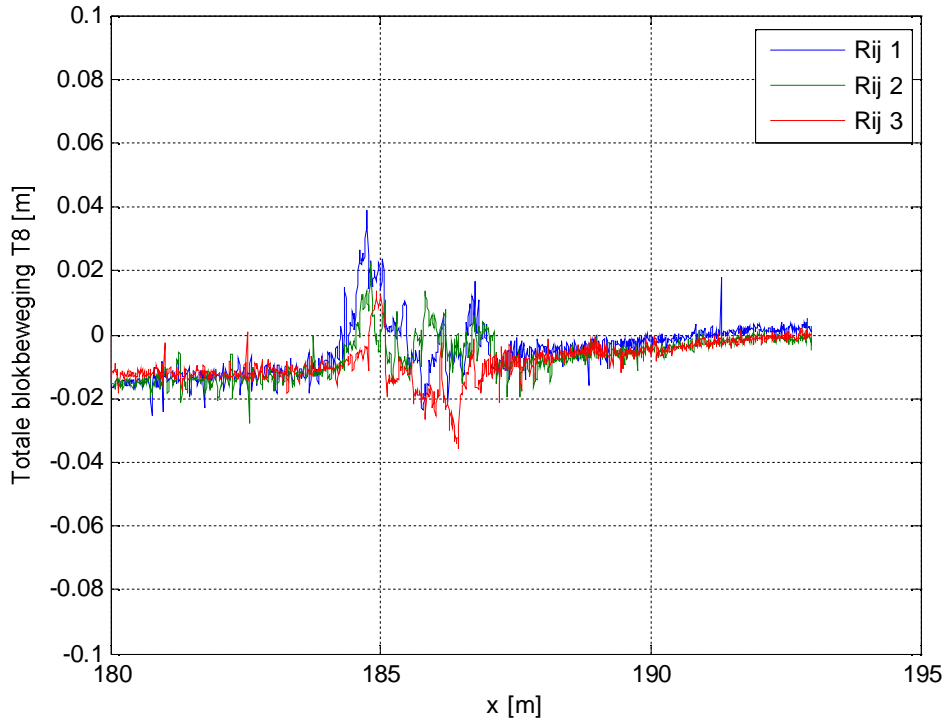
Figuur D.11 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T6



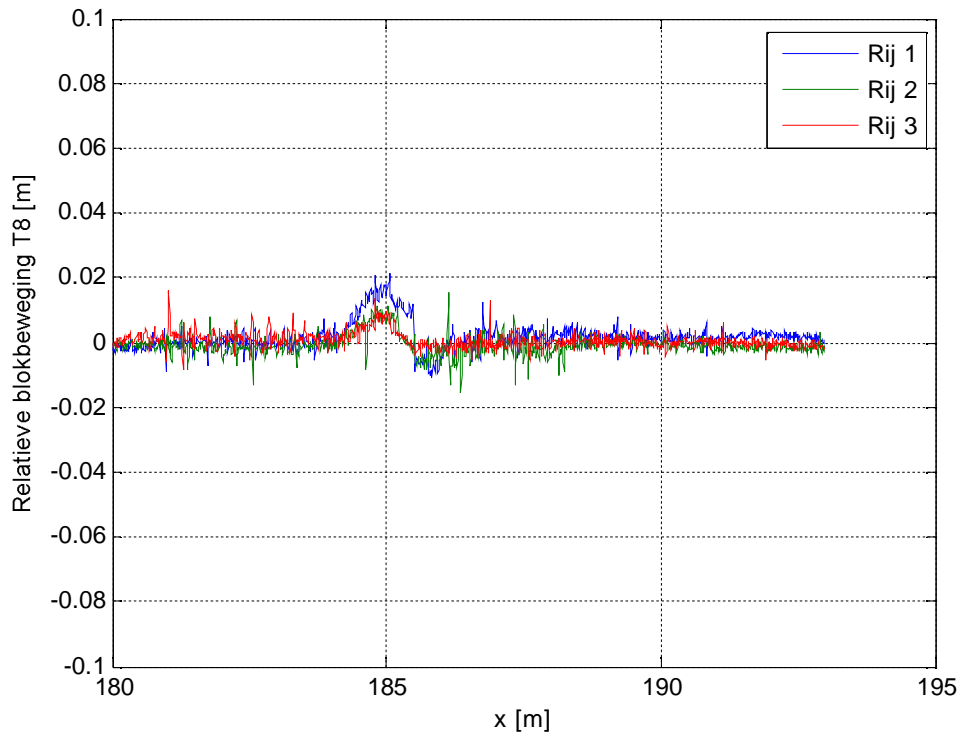
Figuur D.12 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T7



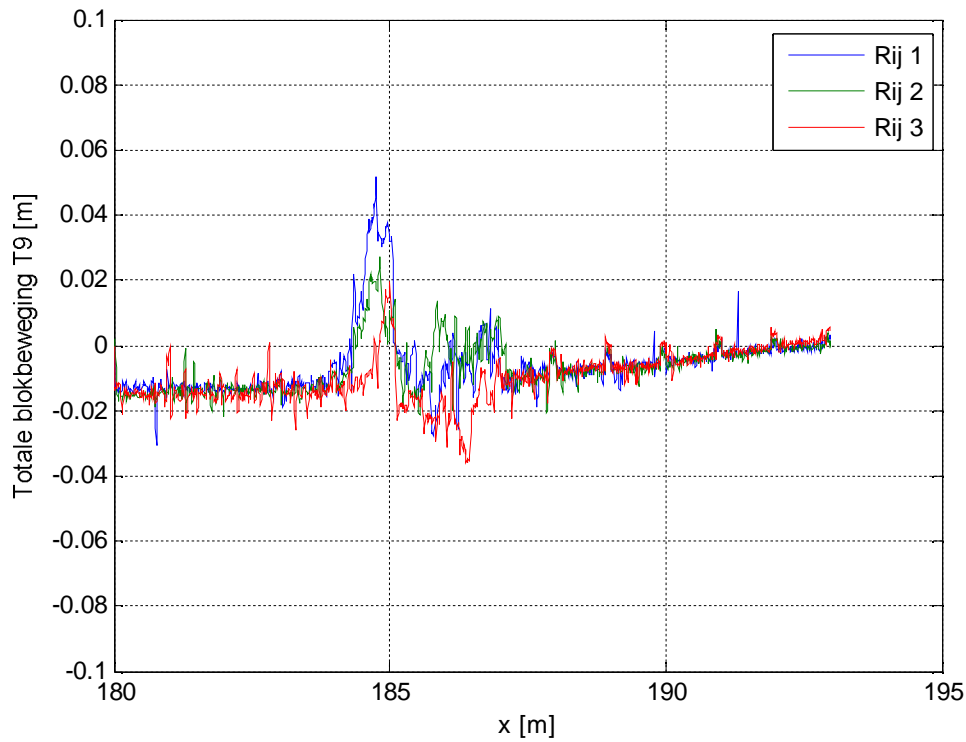
Figuur D.13 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T7



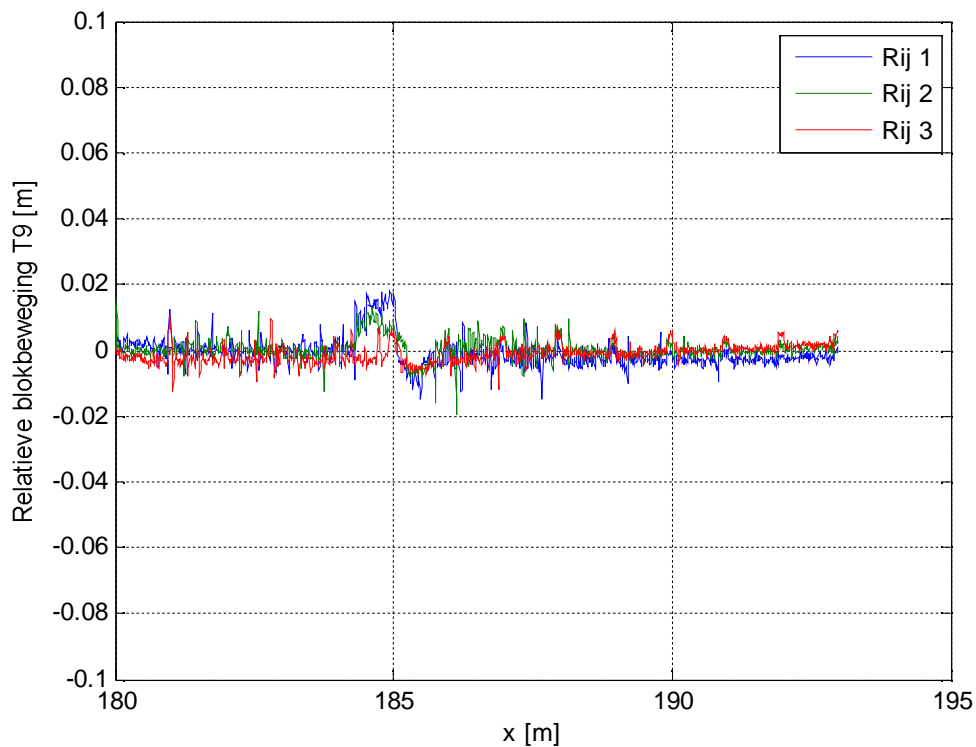
Figuur D.14 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T8



Figuur D.15 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T8



Figuur D.16 Cumulatieve verticale verplaatsing van het taludoppervlak in de dwarsprofielen 1-3, van voor proef T1 tot na proef T9

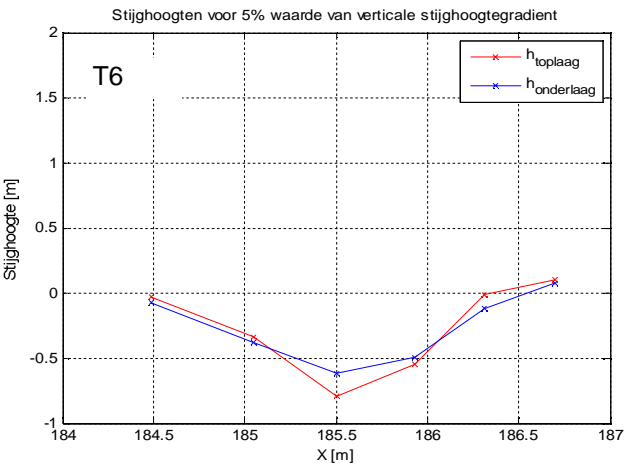
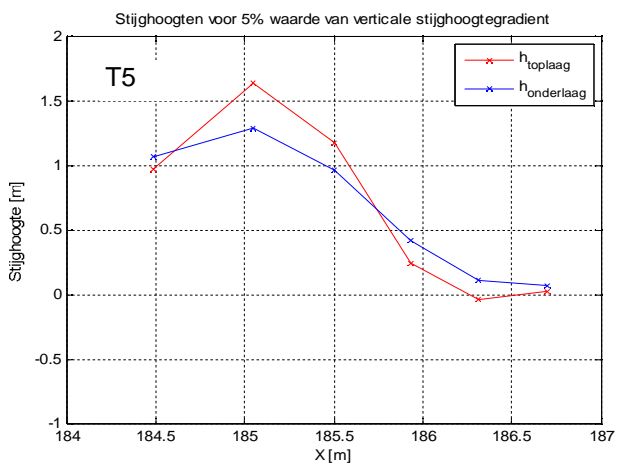
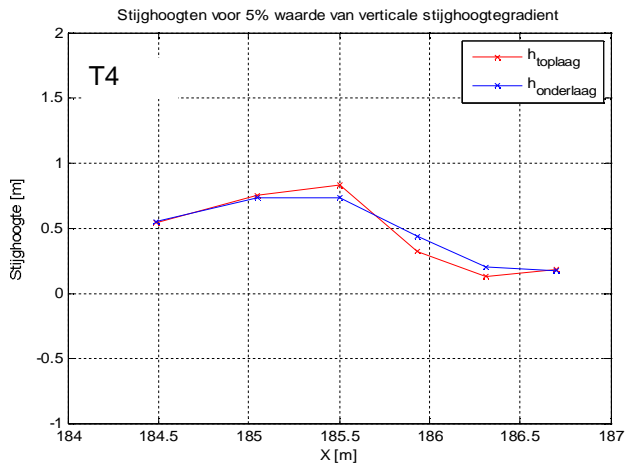
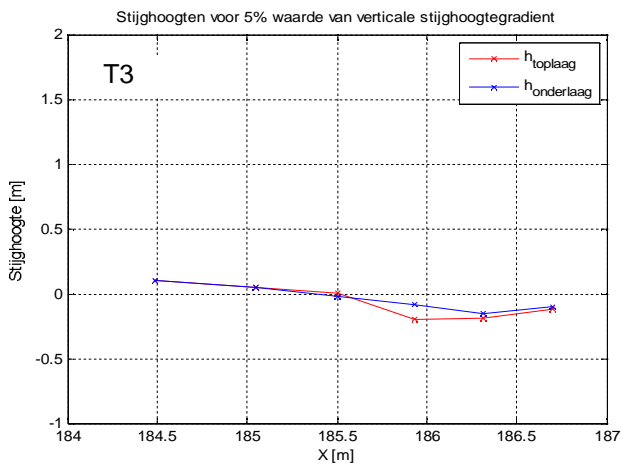
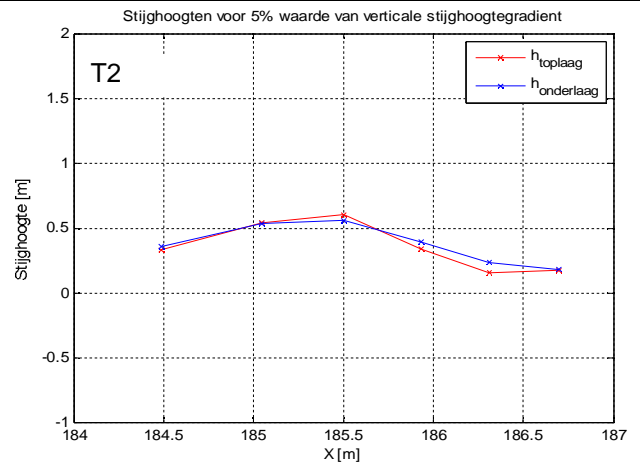
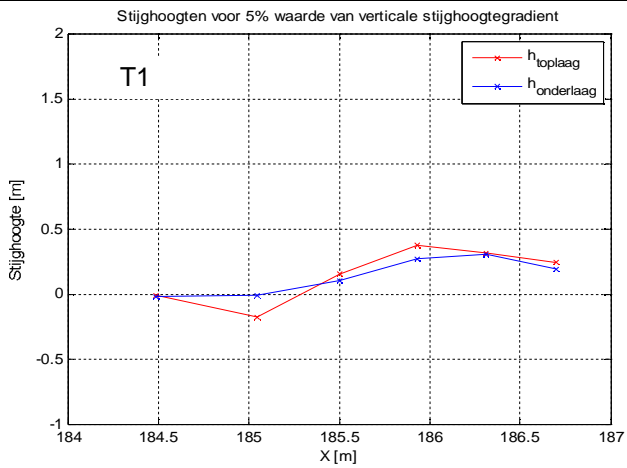


Figuur D.17 Verticale verplaatsing van het taludoppervlak in dwarsprofielen 1-3, opgetreden gedurende Proef T9

E Stijghoogten en debieten

Overzicht figuren in bijlage E:

E.1 en E.1a	Stijghoogten bij stijghoogtegradiënt (opwaarts) die in 5% wordt overschreden.
E.2 t/m E.2d	Overschrijdingskrommen stijghoogten en stijghoogtegradiënten
E.3 en E.3a	Verhouding debieten (oude / nieuwe toplaag) als functie van overschrijdingskans debiet door nieuw toplaag (DRO 2-3-4)
E.4 en E.4a	Verhouding debieten (oude / nieuwe toplaag) als functie van overschrijdingskans debiet door nieuw toplaag (DRO 2-3-4-5)

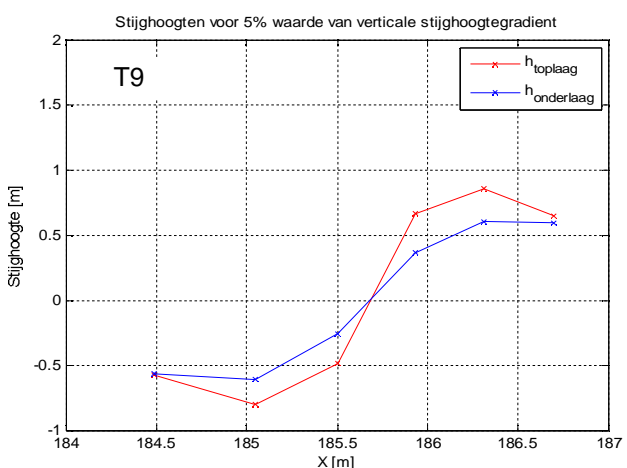
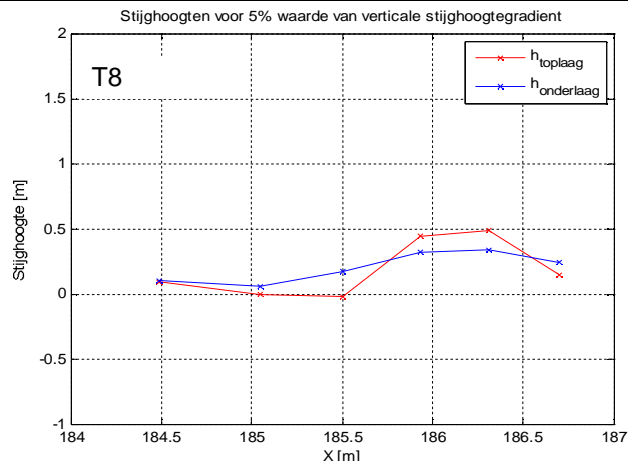
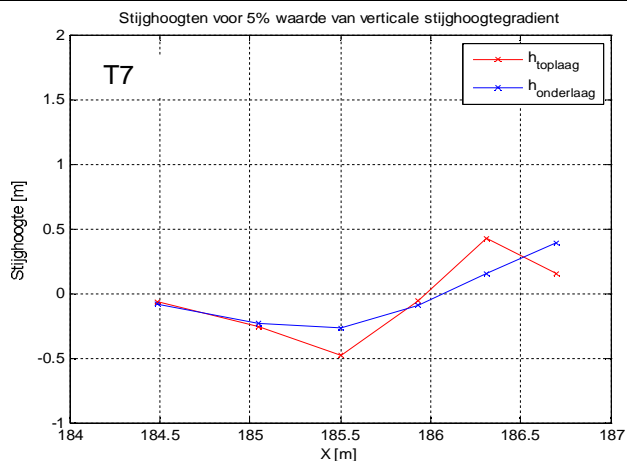


Stijghoogten bij stijhoogtegradiënt (opwaarts) die in 5% wordt overschreden. Resultaat voor proef T1 t/m T6

Deltares

1205571

E.1

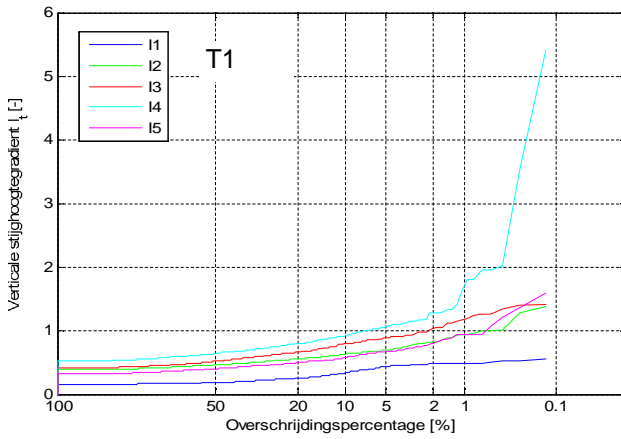
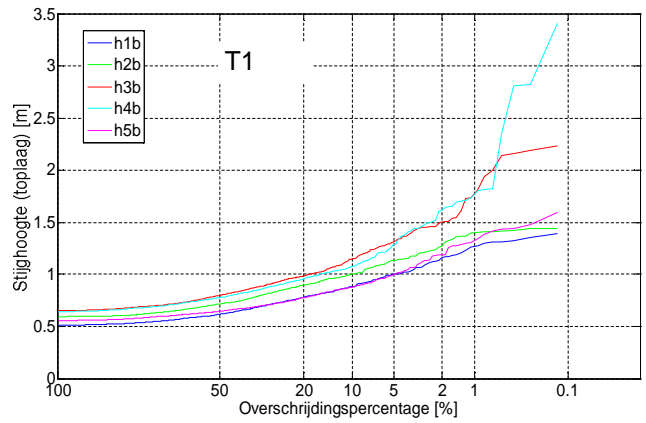
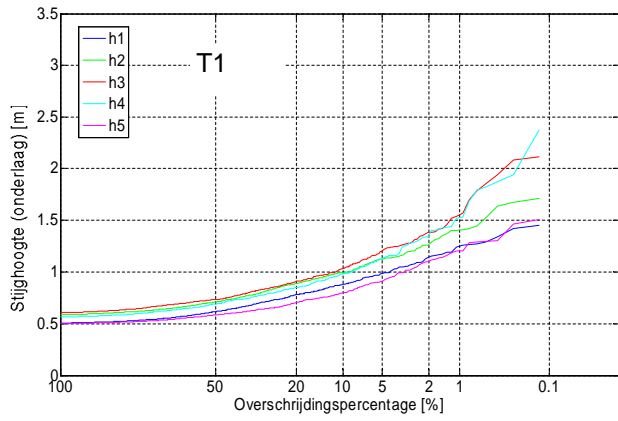


Stijghoogten bij stijhoogtegradiënt (opwaarts) die in 5% wordt overschreden. Resultaat voor proef T7 t/m T9

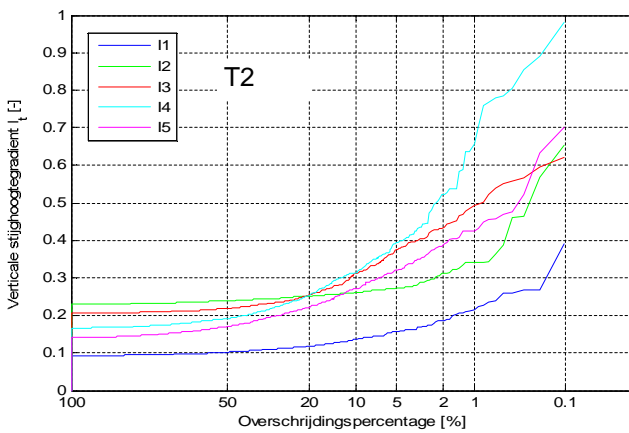
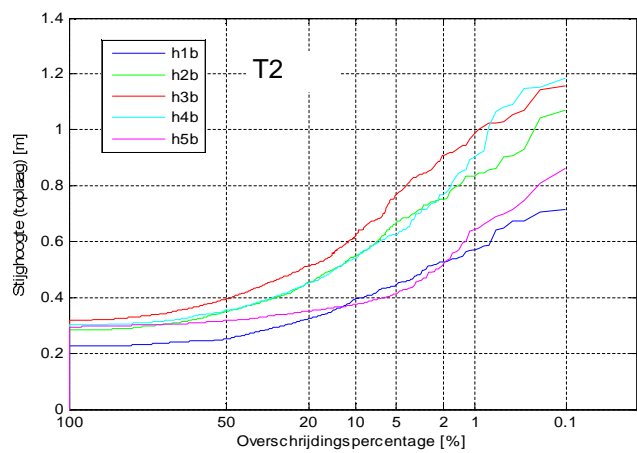
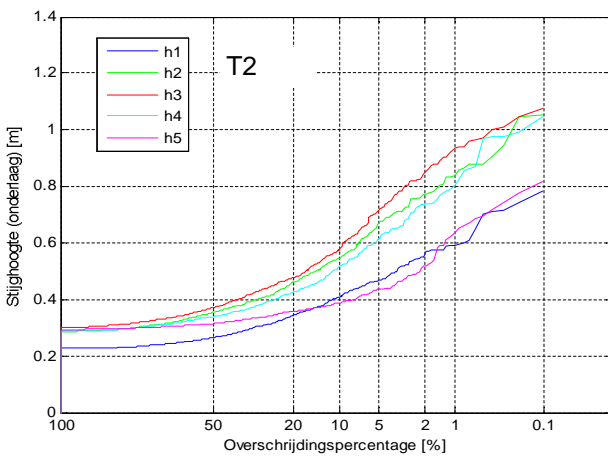
Deltares

1205571

E.1a



h_i = stijghoogte in onderste filterlaag bij drukopnemer i
 h_{ib} = stijghoogte in bovenste filterlaag juist boven drukopnemer i
 I_i = stijghoogte gradiënt over onderste zetting boven drukopnemer i

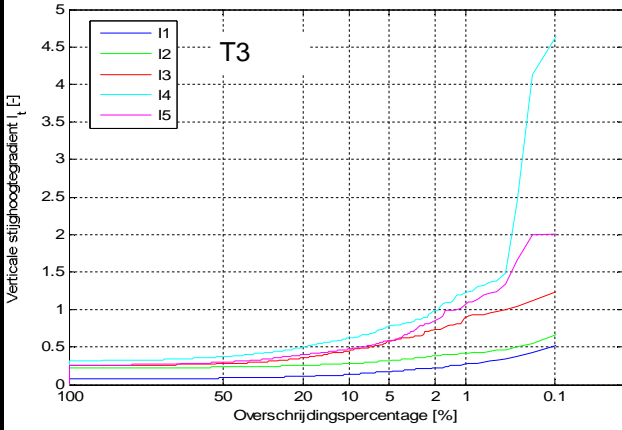
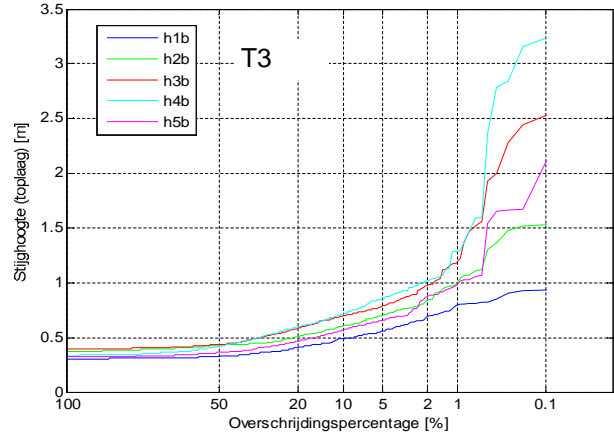
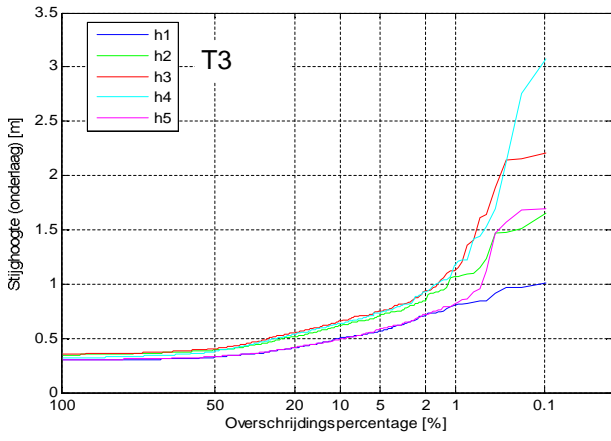


Overschrijdingskrommen stijghoogten en stijghoogtegradiënten
 Proef T1 en T2

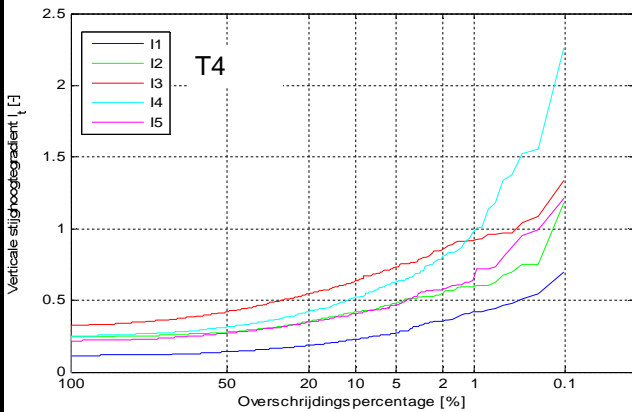
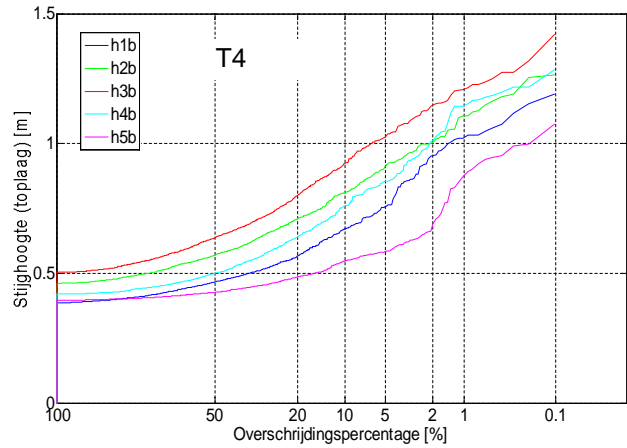
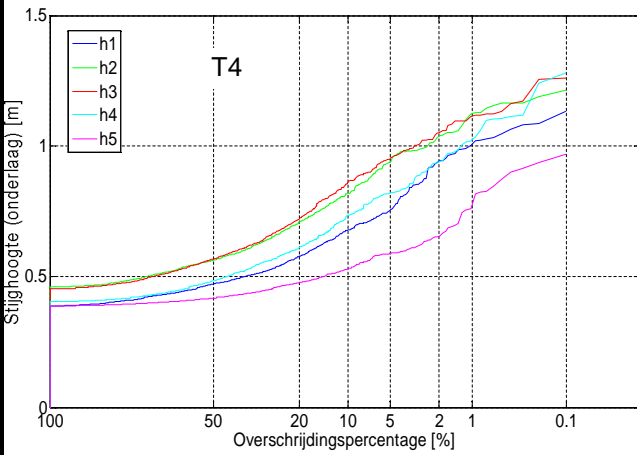
Deltares

1205571

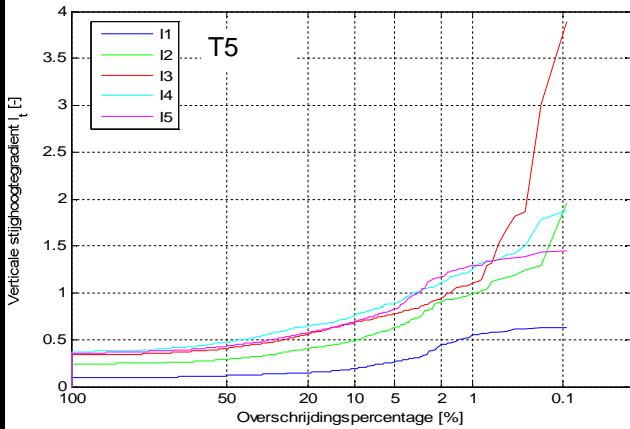
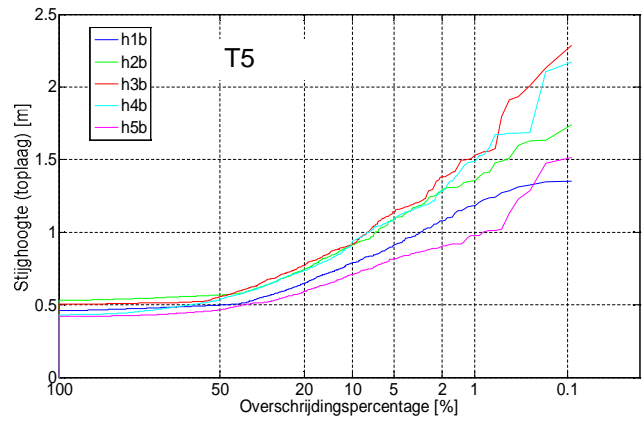
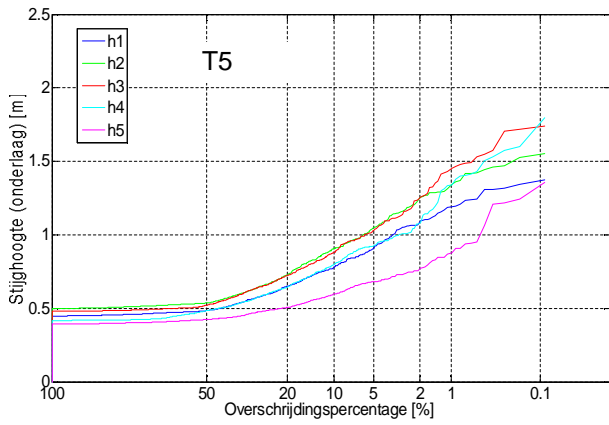
E.2



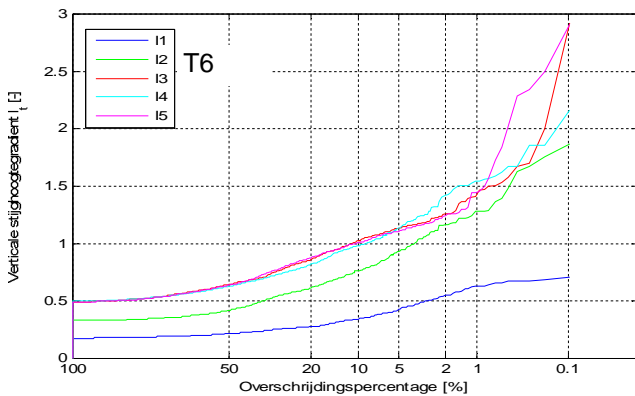
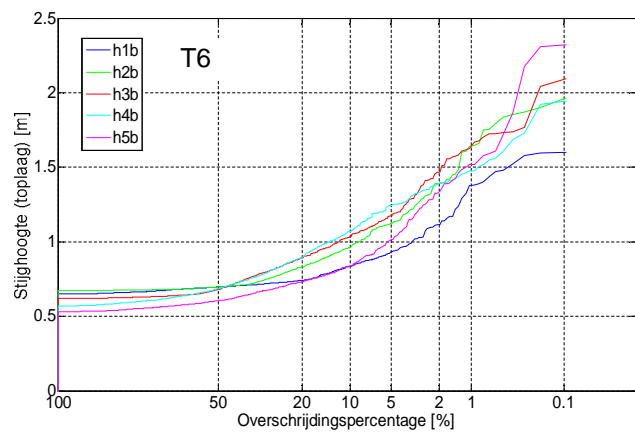
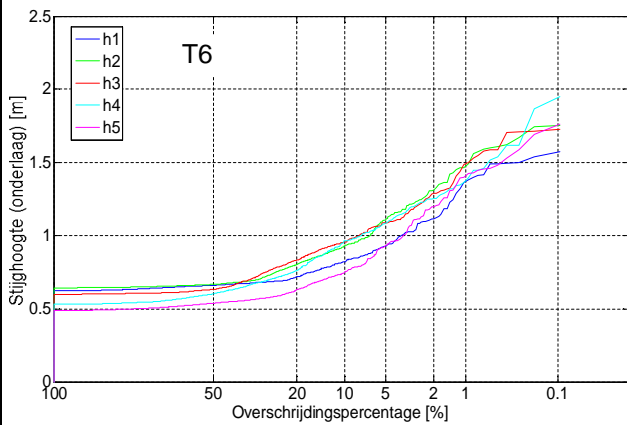
h_i = stijghoogte in onderste filterlaag bij drukopnemer i
 h_{ib} = stijghoogte in bovenste filterlaag juist boven drukopnemer i
 I_i = stijghoogte gradiënt over onderste zetting boven drukopnemer i



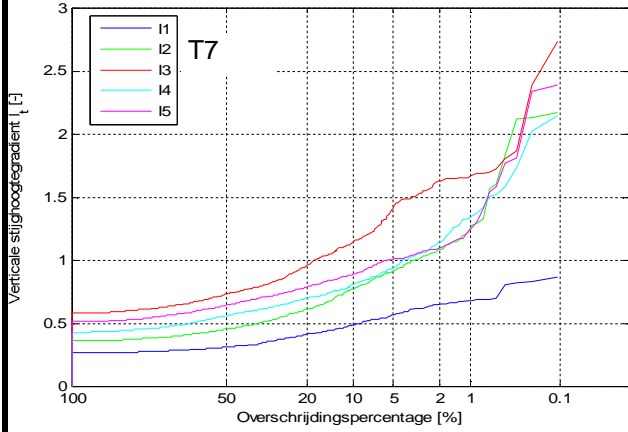
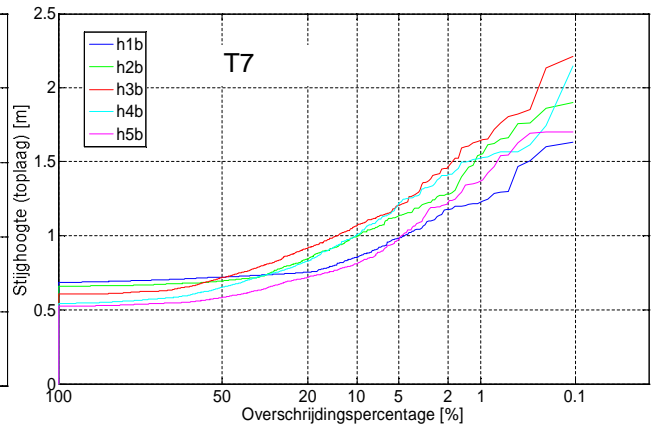
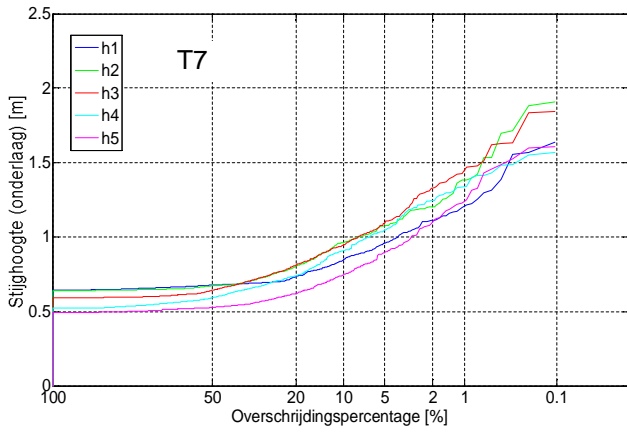
Overschrijdingskrommen stijghoogten en stijghoogtegradiënten
 Proef T3 en T4



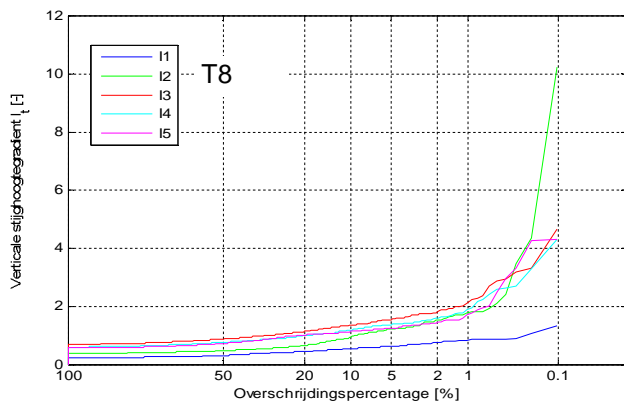
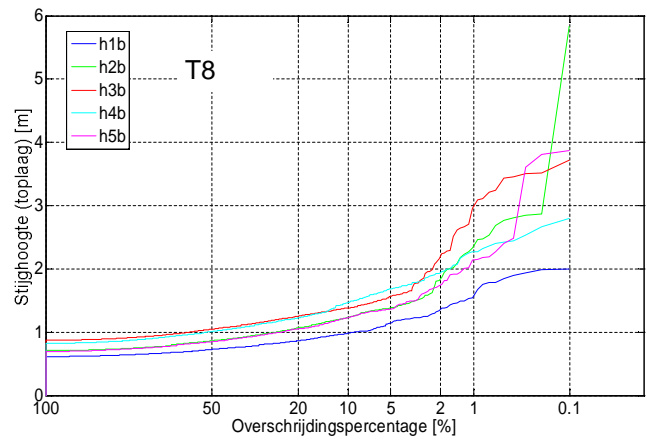
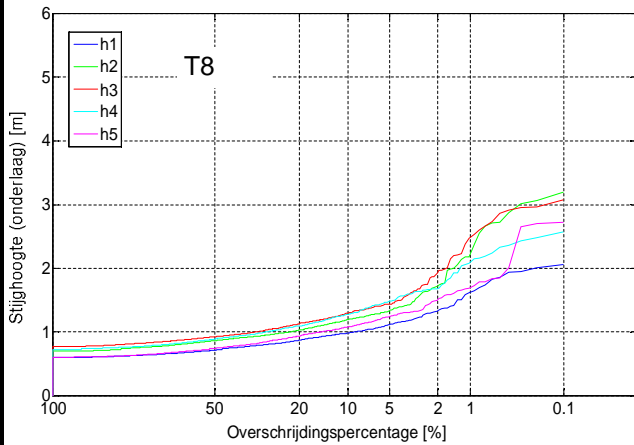
h_i = stijghoogte in onderste filterlaag bij drukopnemer i
 h_{ib} = stijghoogte in bovenste filterlaag juist boven drukopnemer i
 l_i = stijghoogte gradient over onderste zetting boven drukopnemer i



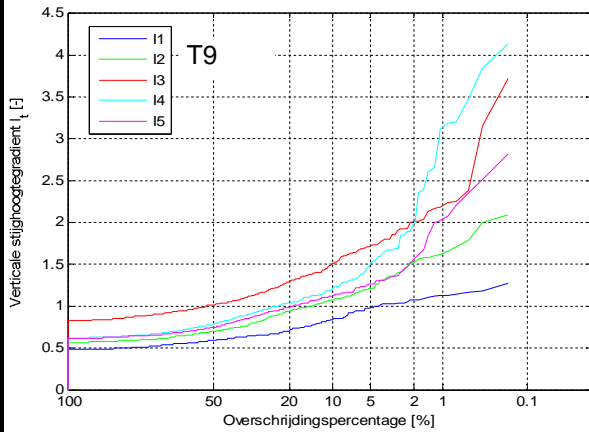
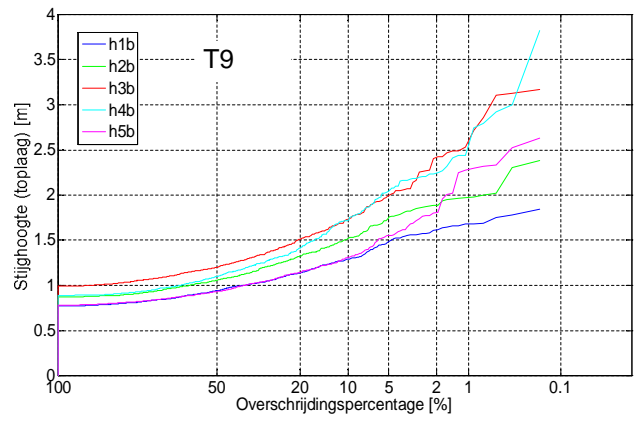
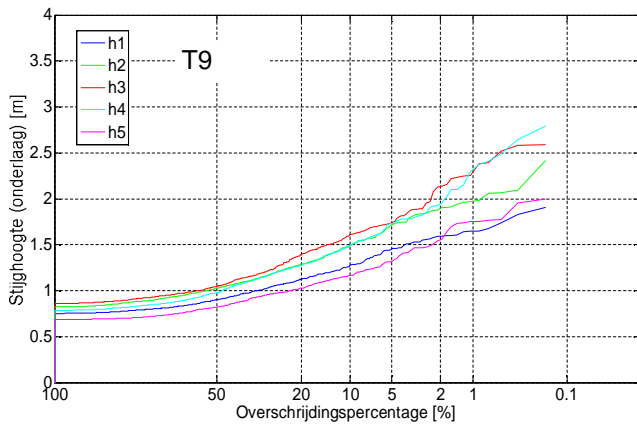
Overschrijdingskrommen stijghoogten en stijghoogtegradiënten
 Proef T5 en T6



h_i = stijghoogte in onderste filterlaag bij drukopnemer i
 h_{ib} = stijghoogte in bovenste filterlaag juist boven drukopnemer i
 I_i = stijghoogte gradiënt over onderste zetting boven drukopnemer i



Overschrijdingskrommen stijghoogten en stijghoogtegradiënten
 Proef T7 en T8



hi = stijgthoogte in onderste filterlaag bij drukopnemer i

hib = stijgthoogte in bovenste filterlaag juist boven drukopnemer i

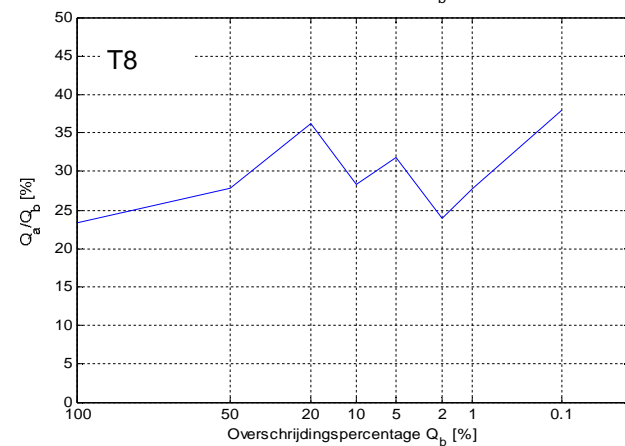
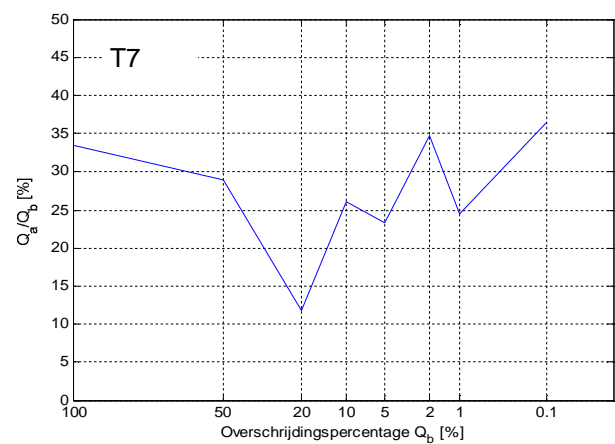
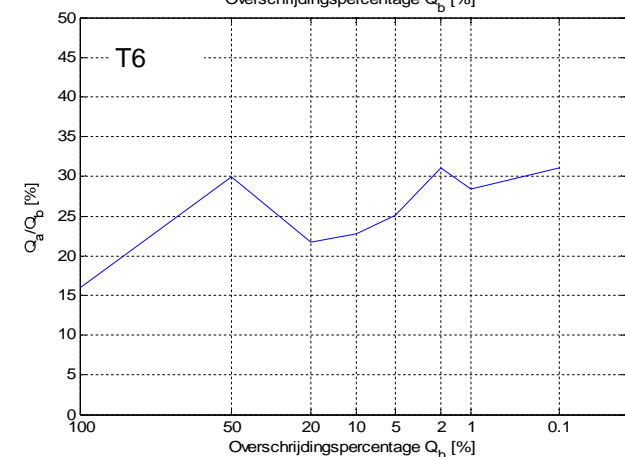
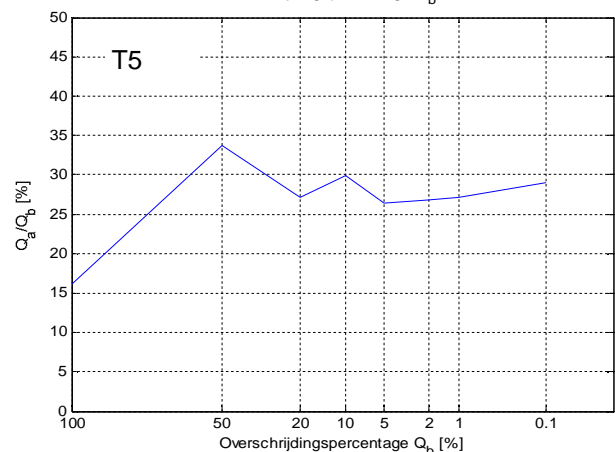
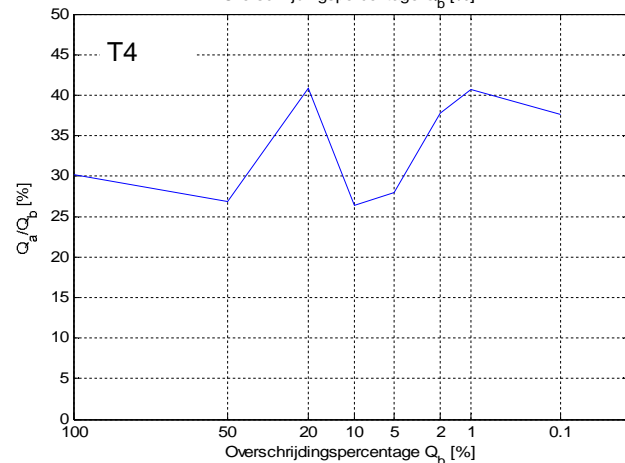
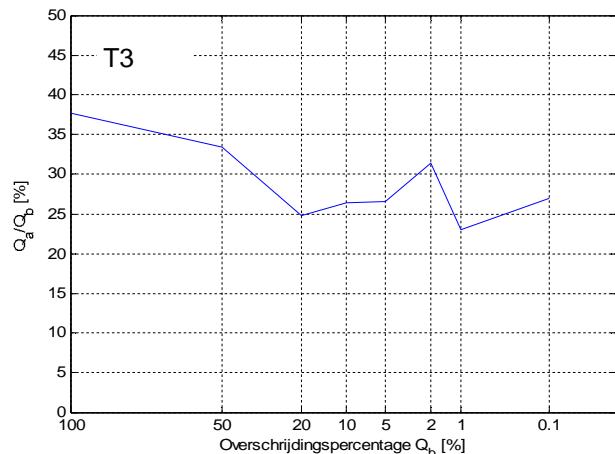
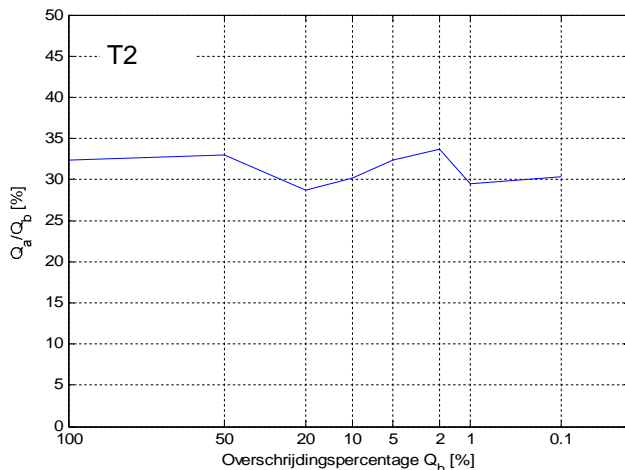
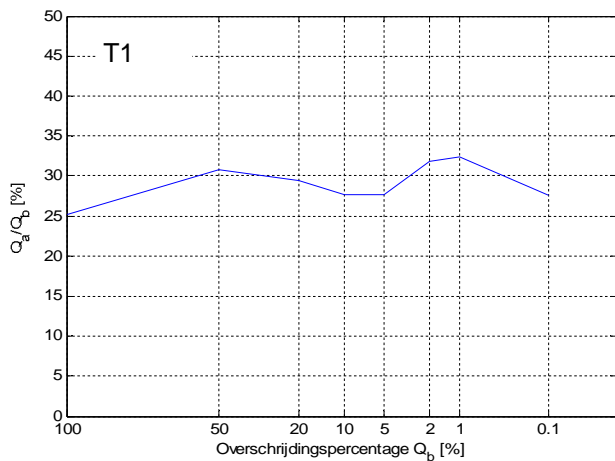
li = stijgthoogte gradiënt over onderste zetting boven drukopnemer i

Overschrijdingskrommen stijgthoogten en stijgthoogtegradiënten
 Proef T9

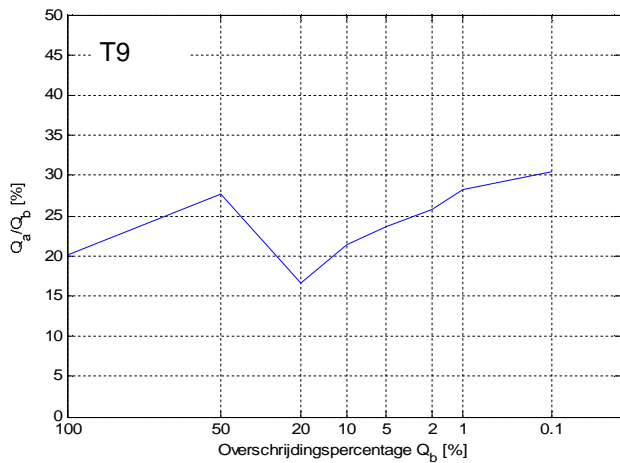
Deltares

1205571

E.2d



Verhouding debieten (oude / nieuwe toplaag) als functie van overschrijdingskans debiet door nieuw toplaag (DRO 2-3-4)

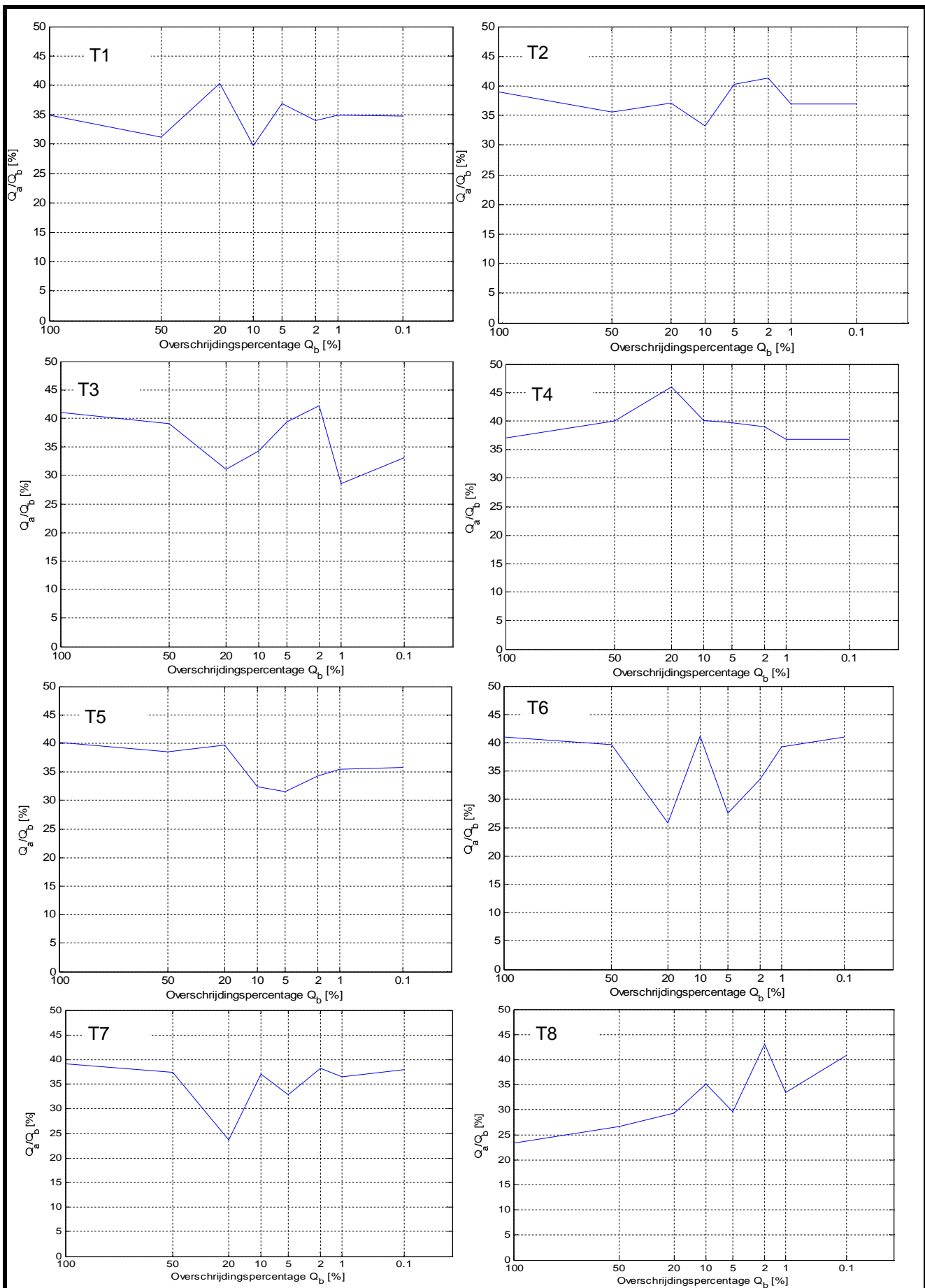


Verhouding debieten (oude / nieuwe toplaag) als functie van
overschrijdingskans debiet door nieuw toplaag (DRO 2-3-4)

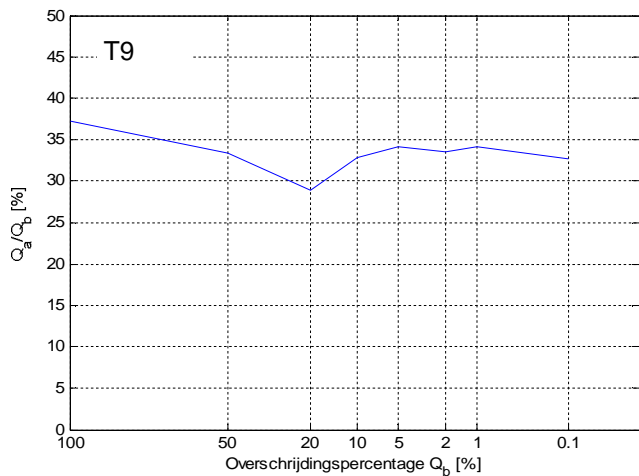
Deltares

1205571

E.3a



Verhouding debieten (oude / nieuwe toplaag) als functie van overschrijdingskans debiet door nieuw toplaag (DRO 1-2-3-4)



Verhouding debieten (oude / nieuwe toplaag) als functie van overschrijdingskans debiet door nieuw toplaag (DRO 1-2-3-4)

Deltares

1205571

E.4a

F Foto's

Overzicht foto's in bijlage F:

- Foto 1 Opbouw meetsectie in de Deltagoot
- a) Constructie overgang betonnen sectie (1)
 - b) Constructie overgang betonnen sectie (2)
- Foto 2 Opbouw meetsectie in de Deltagoot
- a) Drukopnemers in de onderste filterlaag (1)
 - b) Drukopnemers in de onderste filterlaag (2)
- Foto 3 Opbouw meetsectie in de Deltagoot
- a) Aanbrengen onderste filterlaag (1)
 - b) Aanbrengen onderste filterlaag (2)
- Foto 4 Opbouw meetsectie in de Deltagoot
- a) Aanbrengen basalt (1)
 - b) Aanbrengen basalt (2)
- Foto 5 Opbouw meetsectie in de Deltagoot
- a) Basaltlaag na inwassen
 - b) Drukopnemers in de tweede filterlaag
- Foto 6 Opbouw meetsectie in de Deltagoot
- a) Filter onder Basalton
 - b) Aanbrengen Basalton
- Foto 7 Opbouw meetsectie in de Deltagoot
- Meetsectie na inbouw
- Foto 8 Proeven
- a) Na proef 1
 - b) Vervangen van inwas- en filtermateriaal na proef 1
- Foto 9 Proeven
- a) Schade na proef 1
 - b) Hersteld profiel (voor proef 2)
- Foto 10 Proeven. Na proef 2
- Foto 11 Proeven
- a) Schade na proef 2 (1)
 - b) Schade na proef 2 (2)

- Foto 12 Proeven
a) Na proef 3
b) Schade na proef 3
- Foto 13 Proeven
a) Na proef 4
b) Schade na proef 4
- Foto 14 Proeven
a) Na proef 5
b) Schade na proef 5
- Foto 15 Proeven. Na proef 6
- Foto 16 Proeven
a) Schade na proef 6 (1)
b) Schade na proef 6 (2)
- Foto 17 Proeven
a) Herstel na proef 6 (aanbrengen gaas)
b) Hersteld profiel na proef 6
- Foto 18 Proeven
a) Na proef 7
b) Schade na proef 7 (1)
- Foto 19 Proeven
a) Schade na proef 7 (2)
b) Schade na proef 7 (3)
- Foto 20 Proeven
a) Na proef 8
b) Schade na proef 8 (1)
- Foto 21 Proeven
a) Schade na proef 8 (2)
b) Schade na proef 8 (3)
- Foto 22 Proeven. Na proef 9
- Foto 23 Proeven
a) Schade na proef 9 (1)
b) Schade na proef 9 (2)



a) Constructie overgang betonnen sectie (1)



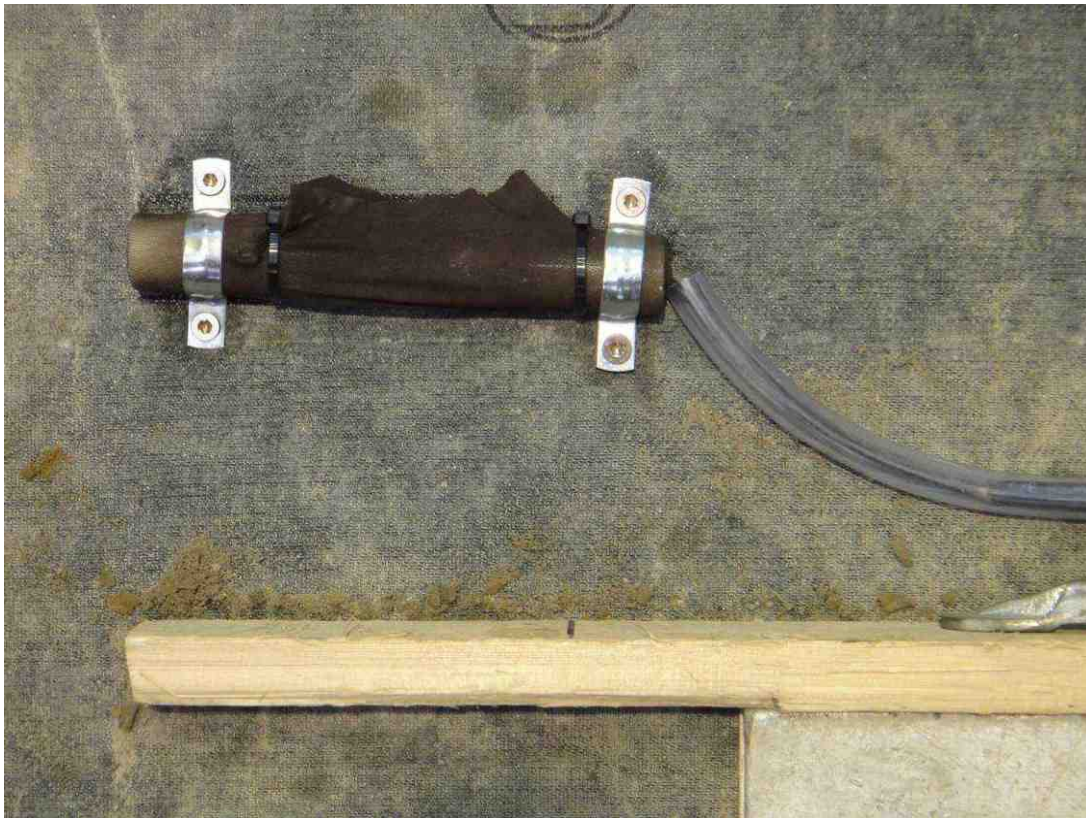
b) Constructie overgang betonnen sectie (2)

Opbouw meetsectie in de Deltagoot

DELTARES

1205571

Foto 1



a) Drukopnemers in onderste filterlaag (1)



b) Drukopnemers in onderste filterlaag (2)

Opbouw meetsectie in de Deltagoot

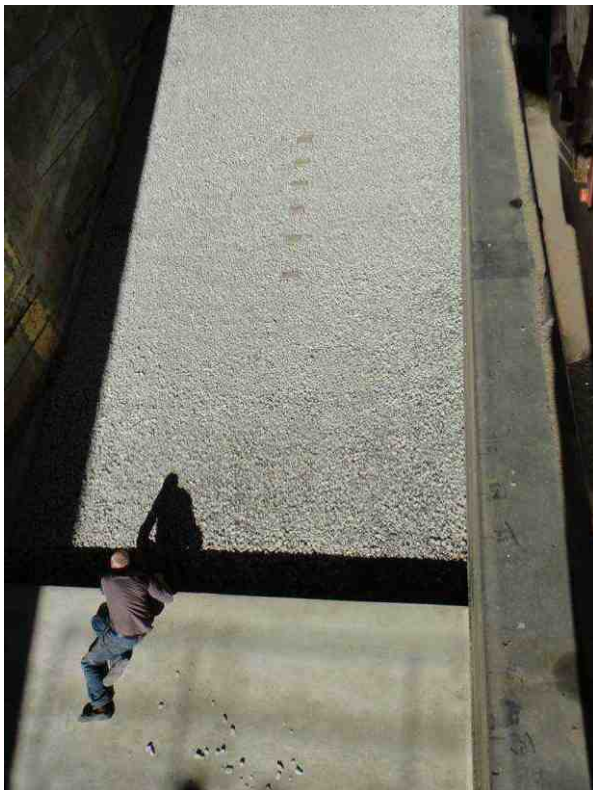
DELTARES

1205571

Foto 2



a) Aanbrengen onderste filterlaag (1)



b) Aanbrengen onderste filterlaag (2)

Opbouw meetsectie in de Deltagoot

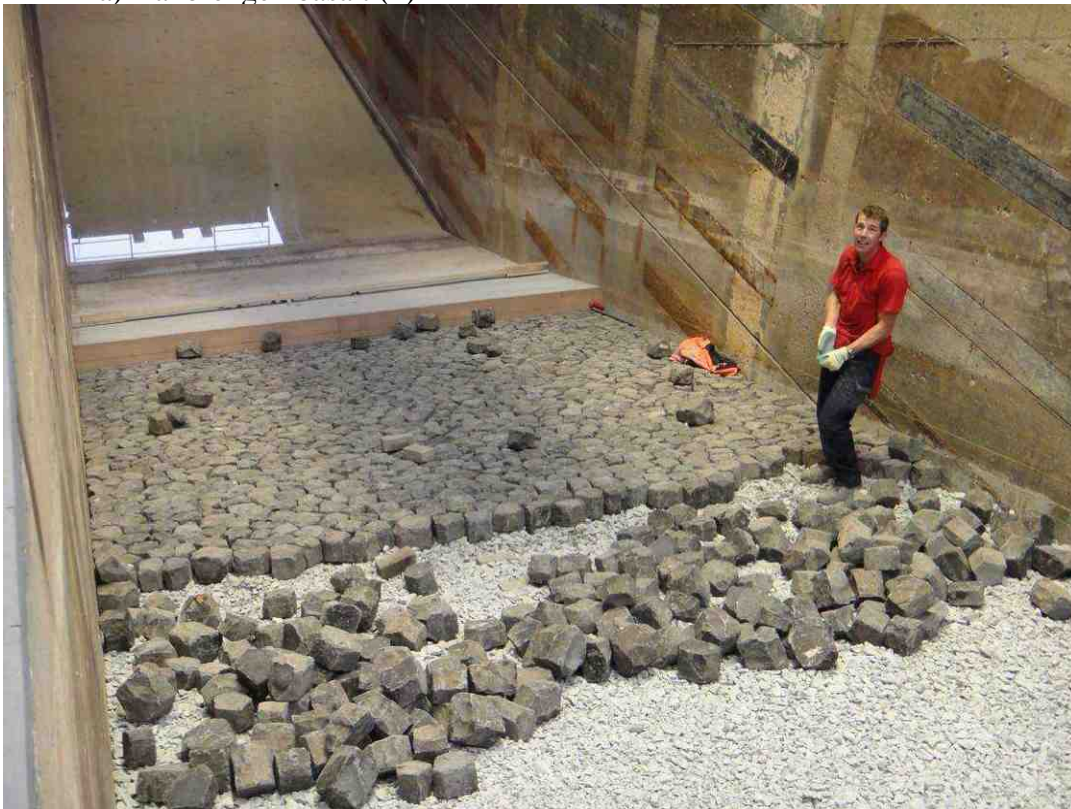
DELTARES

1205571

Foto 3



a) Aanbrengen basalt (1)



b) Aanbrengen basalt (2)

Opbouw meetsectie in de Deltagoot

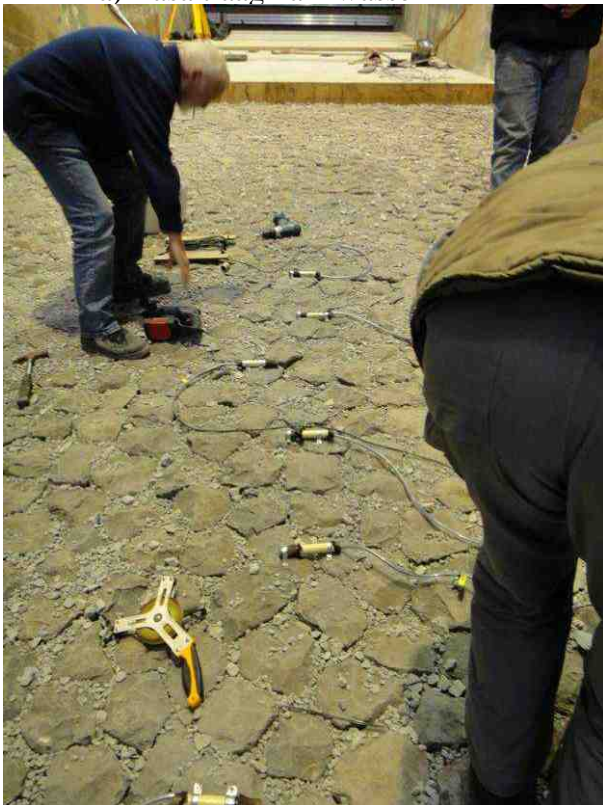
DELTARES

1205571

Foto 4



a) Basaltlaag na inwassen



b) Drukopnemers in de tweede filterlaag

Opbouw meetsectie in de Deltagoot

DELTARES

1205571

Foto 5



a) Filter onder Basalton



b) Aanbrengen Basalton

Opbouw meetsectie in de Deltagoot

DELTARES

1205571

Foto 6



Meetsectie na inbouw

Opbouw meetsectie in de Deltagoot

DELTARES

1205571

Foto 7



a) Na proef 1



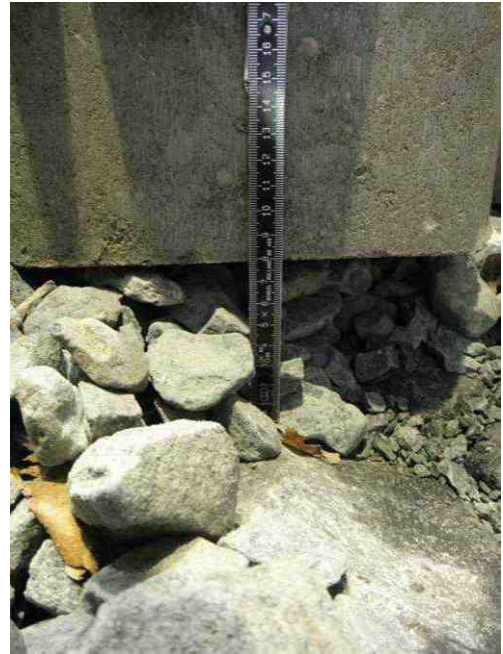
b) Vervangen van inwas- en filtermateriaal na proef 1

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 8



a) Schade na proef 1



b) Hersteld profiel (voor proef 2)

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 9



b) Na proef 2

Proeven

DELTA RES

1205571

Foto 10



a) Schade na proef 2 (1)



b) Schade na proef 2 (2)

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 11



a) Na proef 3



b) Schade na proef 3

Proeven		
DELTARES	1205571	Foto 12



a) Na proef 4

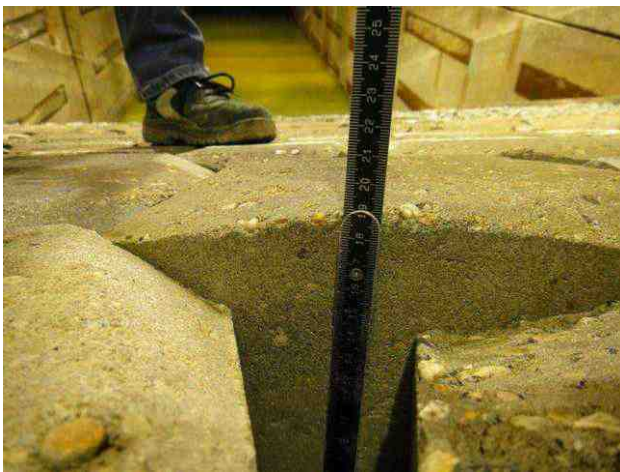


b) Schade na proef 4

Proeven		
DELTARES	1205571	Foto 13



a) Na proef 5



b) Schade na proef 5

Proeven		
DELTARES	1205571	Foto 14



Na proef 6

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 15



a) Schade na proef 6 (1)



b) Schade na proef 6 (2)

Proeven		
DELTARES	1205571	Foto 16



a) Herstel na proef 6 (aanbrengen gaas)



b) Hersteld profiel na proef 6

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 17



a) Na proef 7



b) Schade na proef 7 (1)

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 18



a) Schade na proef 7 (2)



b) Schade na proef 7 (3)



Proeven

DELTARES

1205571

Foto 19



a) Na proef 8



b) Schade na proef 8 (1)

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 20



a) Schade na proef 8 (2)



b) Schade na proef 8 (3)

Proeven		
DELTARES	1205571	Foto 21



a) Na proef 9

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 22



a) Schade na proef 9 (1)



b) Schade na proef 9 (2)

Proeven

DELTARES

1205571

Foto 23