

**Fysiek modelonderzoek naar
golfoverslag conceptueel ontwerp
dijkverbetering Den Oever**



**Fysiek modelonderzoek naar
golfoverslag conceptueel ontwerp
dijkverbetering Den Oever**

ir. P. van Steeg

1207631-000

Titel

Fysiek modelonderzoek naar golfoverslag conceptueel ontwerp dijkverbetering Den Oever

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	1207631-000	1207631-000-HYE-0006	19 (excl. bijlagen)

Trefwoorden

Golfoverslagdebiet, invloedsfactor voor ruwheid, getrapt talud, Den Oever


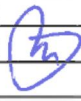

Samenvatting

Het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) onderzoekt de mogelijkheid om de Havendijk bij Den Oever te versterken. Deze dijk is onderdeel van de primaire waterkering in Dijkkringgebied Wieringen (Dijkkring 12) en bleek bij de landelijke toets op veiligheid een "onvoldoende" te scoren op het toetsspoor "Hoogte". Een oplossing wordt gezocht in ontwerpvarianten waarbij delen van de dijk een trapvormig talud bevatten. Op basis van eerder door Deltares uitgevoerd 2D fysiek modelonderzoek naar de invloed van een trapvormig talud op de golfoverslag is door het HHNK een conceptueel ontwerp voor de aangepaste dijk gemaakt. Vervolgens is dit conceptuele ontwerp getest in de Oosterscheldegoot van Deltares met een geometrische schaal 1:10. Dit rapport beschrijft de modelopzet en de analyse van deze testen.

Er zijn zes dwarsprofielen (2, 3A, 3C, 4A/4B, 5 en 6) getest op golfoverslag. Hierbij is de kruinhoogte gevarieerd totdat een golfoverslagdebiet van ongeveer 1 l/s/m is bereikt. Vervolgens is een analyse uitgevoerd waarbij de resultaten zijn geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd naar een waarde van exact 1 l/s/m en een golfhoogte conform de opgegeven golfhoogte. Hierbij is tevens een correctie uitgevoerd voor eventuele onzekerheden als gevolg van het onregelmatige karakter van golven. De benodigde kruinhoogten zijn weergegeven in Tabel 3.1 van dit rapport. De in dit rapport gegeven kruinhoogten zijn op basis van de door de opdrachtgever aangeleverde hydraulische randvoorwaarden en onder de aanname dat de constructie vormvast is (geen verzakkingen). Met behulp van het uitgevoerde modelonderzoek kan de benodigde kruinhoogte worden vastgesteld. De uitgevoerde proeven geven nog geen inzicht in de sterkte van de waterkering, of de sterkte van onderdelen van deze waterkering.

Referenties

Opdrachtverlening Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, registratienummer 12.5263, onderwerp: 'Opdracht uitvoering fysiek model Den Oever', datum: 18 februari 2013.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v1	mrt. 2013	P. van Steeg		Dr. M.R.A. van Gent		W.M.K. Tilmans	
v2	apr. 2013	P. van Steeg		Dr. M.R.A. van Gent		W.M.K. Tilmans	

Status

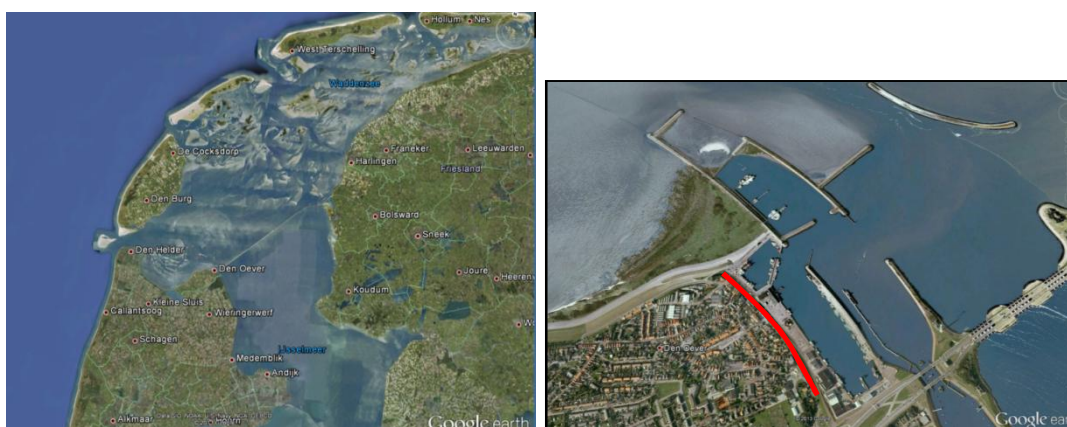
definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Opzet van het model	3
2.1	Faciliteit	3
2.2	Aanpak	3
2.3	Schaling	3
2.4	Opbouw constructie	4
2.5	Meetmethode	7
2.5.1	Golfhoogtemetingen	7
2.5.2	Kalibratiemetingen	7
2.5.3	Golfoverslagmetingen	7
2.5.4	Drukmetingen	8
2.6	Proevenprogramma en resultaten	8
3	Analyse	9
3.1	Beschrijving van de testen	9
3.2	Correctie van testresultaten met betrekking tot model en schaaleffecten	10
3.2.1	Model en schaaleffecten	10
3.2.2	Correctie voor statistische onzekerheid f_{so}	10
3.3	Correctie van meetresultaten	11
3.4	Voorspelmodel op basis van testresultaten	11
3.5	Analyse van de gemeten drukken	14
3.6	Belastingen op de stabiliteit van de kade en verticale wand	16
4	Conclusies	17
5	Literatuur	19
	Bijlage(n)	
A	Bepaling onzekerheidsfactor op basis van het aantal overslaande golven	A-1
A.1	Introduction	A-1
A.2	Overtopping volumes per wave	A-1
A.3	Wave overtopping discharge	A-1
A.4	Statistical uncertainty as function of number of overtopping waves	A-3
B	Tabellen	B-1
C	Figuren	C-1

1 Inleiding

Bij de landelijke toets op veiligheid is gebleken dat de primaire waterkering bij de haven aan de Waddenzee zijde van Den Oever “onvoldoende” scoort op het toetspoot “Hoogte” (HHNK, 2012). Deze locatie is aangegeven in Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Locatie Havendijk Den Oever (bron: Google Earth)

Om de hoeveelheid golfoverslag te beperken is een verkenning uitgevoerd naar een oplossing waarbij een trapvormig talud wordt toegepast. In opdracht van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier heeft Deltares in de zomer van 2012 op generiek niveau een fysiek modelonderzoek naar de invloed van een getrappt talud op golfoverslag uitgevoerd. Dit resulteerde in een zogenaamde invloedsfactor voor ruwheid (γ_f) ten aanzien van golfoverslag voor een getrappt talud. Dit onderzoek is gerapporteerd in Van Steeg (2012).

Op basis van het bovengenoemde onderzoek en de hierop aansluitende nieuwe berekeningen met PC-Overslag is door het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier een conceptueel ontwerp voor de aangepaste dijk gemaakt. In dit conceptuele ontwerp zitten aaneenschakelingen van dikelementen die invloed hebben op de golfoverslag, zoals een voorberm, damwand en een trapvormig talud. Van elk van deze elementen is redelijk goed bekend hoe zij de golfoverslag beïnvloeden. Echter, hoe dit werkt bij een aaneenschakeling van deze elementen is minder goed bekend. Daarnaast is het niet mogelijk om verticale wanden in de geometrie van de dijk op te nemen. De genoemde beperkingen resulteren in een relatief grote onzekerheid in het softwarepakket PC-Overslag en dit leidt mogelijk tot een overdimensionering van de benodigde kruinhoogte. Om deze reden heeft het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier Deltares gevraagd om het ontwerp te verifiëren. Met behulp van fysiek modelonderzoek kan de benodigde kruinhoogte worden vastgesteld. De verificatie is uitgevoerd met behulp van een fysiek modelonderzoek in de Oosterscheldegoot van Deltares. Het onderhavige rapport is een verslag van deze verificatie.

De gebruikte hydraulische randvoorwaarden aan de teen van de dijk zijn aangeleverd door de opdrachtgever. De opdrachtgever heeft aangegeven dat bij het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden aan de teen van de dijk, met behulp van het numerieke rekenpakket SWAN, de invloed van de kade op de golfhoogte is meegenomen. Indien de golfrichting een hoek > 30 graden met de normaal van de dijk maakte is de berekende golfhoogte gecorrigeerd voor deze hoek van inval. Dit is gedaan omdat in een 2D fysiek model geen

golfrichting kan worden gesimuleerd. De aangeleverde hydraulische randvoorwaarden aan de teen van de dijk zijn weergegeven in Tabel 1.1

Tabel 1.1 *Hydraulische randvoorwaarden aan de teen van de dijk (incl. correctie voor schuine golfaanval, bron: opdrachtgever)*

Dwarsprofiel	H _{m0} (m)	T _{m-1,0} (s)
2	1,34	4,80
3A	1,48	5,16
3C	1,49	5,06
4A/4B	0,89	4,47
5	0,82	4,54
6	0,91	4,57

Het onderzoek werd in februari en maart 2013 uitgevoerd door ir. P. van Steeg van Deltares die tevens auteur is van het onderhavige rapport. De kwaliteitsborging van het rapport is uitgevoerd door dr.ir. M.R.A. van Gent. De kwaliteitsborging van Appendix A is gewaarborgd door dr.ir. S. Caires. Namens de opdrachtgever heeft ir. J. Wouters verschillende fysieke proeven bijgewoond.

2 Opzet van het model

2.1 Faciliteit

Het model is in de Oosterscheldegoot van Deltares ingebouwd met een geometrische schaal van 1:10. De Oosterscheldegoot heeft een lengte van 55 m, een breedte van 1,00 m en een hoogte van 1,25 m. De goot is voorzien van een golfschot waarmee zowel regelmatige als onregelmatige golven kunnen worden opgewekt. Tevens is het golfschot voorzien van een systeem dat gereflecteerde golven compenseert zodat deze niet opnieuw in de richting van de constructie reflecteren.

Alle vermelde waarden in dit rapport zijn de waarden behorende bij het prototype (dit is de 1:1 werkelijkheid), tenzij anders is aangegeven.

2.2 Aanpak

Om de benodigde kruinhoogte t.o.v. de waterlijn, de zogenaamde relatieve kruinhoogte, van de verschillende dwarsprofielen te bepalen zijn er twee methodieken toegepast:

1. De relatieve kruinhoogte h_k aanpassen door verhogen of verlagen van de waterlijn.
2. De relatieve kruinhoogte h_k aanpassen door de kruin te verhogen of te verlagen.

Het praktische bezwaar van optie 2 is dat na iedere test het fysieke model aangepast dient te worden wat een arbeidsintensief proces is. Om deze reden is er in eerste instantie (Dwarsprofiel 5 en Dwarsprofiel 4A/4B) gekozen voor de eerstgenoemde methodiek. Hierbij zijn er per dwarsprofiel drie tot vier testen uitgevoerd waarbij de waterstand is gevarieerd en de absolute kruinhoogte gelijk bleef. Op deze manier is de relatieve kruinhoogte h_k gevarieerd. Op basis van de verkregen gegevens is met behulp van de methodiek zoals beschreven in TAW (2002) een zo goed mogelijke inschatting gemaakt van de benodigde kruinhoogte. Vervolgens is de absolute kruinhoogte in het fysieke model aangepast en is een verificatietest uitgevoerd met een correcte waterstand.

Tijdens de uitvoer van de proeven bleek dat de eerste methodiek lastig toepasbaar was en is besloten om de tweede methodiek, namelijk het aanpassen van de kruin zelf, toe te passen (deels bij Dwarsprofiel 4A/4B, geheel bij dwarsprofielen 6, 3C, 3A en 2).

2.3 Schaling

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

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

met:

Fr	=	Froude getal	[-]
u	=	snelheid	[m/s]
g	=	valversnelling als gevolg van de zwaartekracht	[m/s ²]
L	=	lengte	[m]

In deze paragraaf wordt de schaling verder uitgewerkt voor het geval dat de lengteschaal ($n_L = L_{\text{prototype}}/L_{\text{model}}$) in dit model gelijk is aan 10. Uit de bovenstaande schaalregel zijn dan de volgende verbanden te leggen:

- Tijdschaal: $n_t = \sqrt{n_L}$ in dit geval dus $\sqrt{10} \approx 3,2$
- Golfhoogte: $n_t = n_L$ in dit geval dus 10

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

2.4 Opbouw constructie

Er zijn zes verschillende constructies getest. Een overzicht is gegeven in Bijlage C, Figuur C.1. Iedere constructie bestond uit een kade en een dijkprofiel. Er zijn twee verschillende kades toegepast, een lange kade bij dwarsprofielen DP3A, DP3C, DP4A/4B, DP5 en DP6 en een korte kade bij dwarsprofiel DP2. Een impressie is gegeven in Foto 2.1.



Foto 2.1 Impressie van lange kade (links) en korte kade (rechts)

De (geschaalde) lengte van de kades in het fysieke model zijn gelijk aan of korter dan de werkelijke lengte van de kades. Er wordt geschat dat een eventuele geïntroduceerde modelfout zal leiden tot een marginaal effect in de testresultaten en kan worden beschouwd als conservatieve benadering; in werkelijkheid zal er minder golfoverslag optreden indien de kade in werkelijkheid langer is dan in het model.

Tijdens de kalibratieproeven bleek dat het niet altijd mogelijk was om de beoogde golfcondities aan de teen van de dijk te realiseren. Om deze golfcondities toch mogelijk te maken is, in overleg met de opdrachtgever, de kade in het model denkbeeldig verlaagd. Dit is gedaan door het gehele dijkprofiel en de waterstand te verhogen met een waarde Δy . De waarden van Δy zijn weergegeven in Tabel 2.1. Het ontstane hoogteverschil Δy tussen de kade en de teen van het dijkprofiel is geschematiseerd met een 1:1 talud met een hoogte van Δy . Dit talud is aan de zeewaartse zijde van het dijkprofiel aangebracht. De hoogte van de kade zoals deze in het model is gebouwd is met rood aangegeven in Figuur C.1. Ook deze aanpak zal leiden tot een conservatief resultaat aangezien een beperktere waterdiepte in werkelijkheid zal leiden tot een kleinere golfhoogte en daarmee een lager golfoverslagdebiet.

Tabel 2.1 Overzicht van de verlaging van de kade in het model (waarden in prototype).

dwars profiel	lengte kade tot aan uitvoerpunt*	verlaging kade	oorspr. hoogte	aangepaste hoogte	hoogte in model (modelwaarde)
	L_{kade} [m]	Δy [m]	[m+NAP]	[m+NAP]	[m+bodem goot]
2	8	0,00	1,97	1,97	0,48
3A	48**	0,50	2,18	1,68	0,50
3C	40	0,50	2,18	1,68	0,50
4A/4B	40	0,25	3,30	3,05	0,50
5	40	0,25	3,48	3,23	0,50
6	40	0,00	2,75	2,75	0,50

* Het uitvoerpunt is vrijwel gelijk aan de teen van de dijk. De precieze locatie is aangegeven in Figuur C.1.

** De lengte van de kade bij DP 3A is vanwege praktische redenen en in overleg met de opdrachtgever anders gekozen dan de lengtes van de kade bij dwarsprofielen 3C, 4A/4B, 5 en 6. De invloed hiervan op het gemiddelde overslagdebiet is naar verwachting verwaarloosbaar.

De constructie is uitgevoerd in hout. De dwarsprofielen 4A en 4B zijn als hetzelfde dwarsprofiel geschematiseerd en is in dit rapport benoemd als dwarsprofiel "4A/4B". Impressiefoto's zijn weergegeven in Foto 2.2 tot en met Foto 2.7.



Foto 2.2 Impressie modelopstelling Dwarsprofiel 2

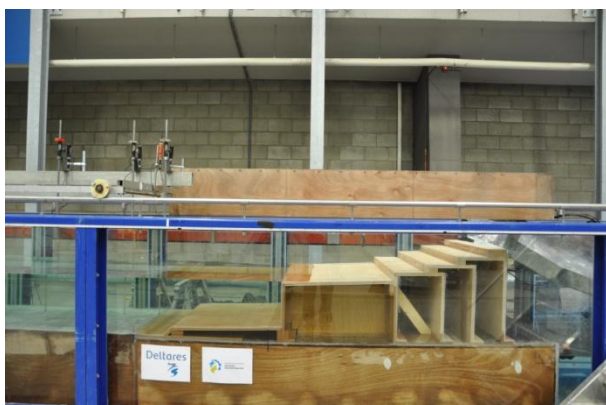


Foto 2.3 Impressie modelopstelling Dwarsprofiel 3A



Foto 2.4 *Impressie modelopstelling Dwarsprofiel 3C*



Foto 2.5 *Impressie modelopstelling Dwarsprofiel 4A/4B*

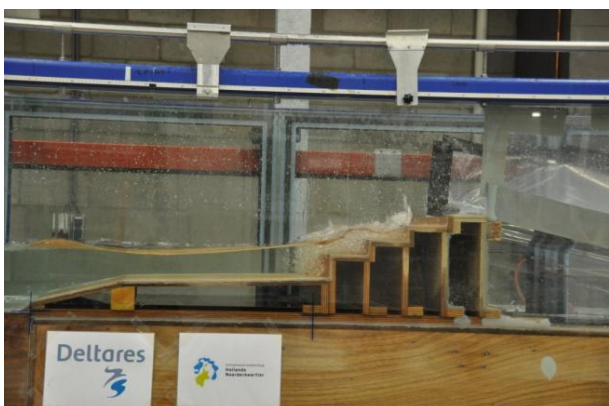


Foto 2.6 *Impressie modelopstelling Dwarsprofiel 5*



Foto 2.7 Impressie modelopstelling Dwarsprofiel 6

Achter iedere constructie is een aluminium tray en een opvangbak geplaatst. Het water dat over de kruin van de constructie sloeg werd in deze opvangbakken verzameld.

2.5 Meetmethode

2.5.1 Golfhoogtemetingen

De golven zijn gemeten met drie sets van drie golfhoogtemeters. Deze golfhoogtemeters (weerstandstype) bestaan uit twee parallel aan elkaar, verticaal gespannen staven, waarvan de onderlinge weerstand verandert met de oppervlakte uitwijking van de waterspiegel. Eén set golfhoogtemeters (WHM 1,2,3) is dicht bij het golfschot geplaatst, één set golfhoogtemeters (WHM 4, 5, 6) is vlak voor de kade geplaatst en één set golfhoogtemeters (WHM 7, 8, 9) is vlak voor de constructie geplaatst. De set golfhoogtemeters vlak voor de kade (WHM 7,8,9) is na de kalibratietesten in het model geplaatst. De exacte locaties van de golfhoogtemeters kan per dwarsprofiel variëren en is weergegeven in Tabel B.3 (diep water, testen en kalibratietesten) Tabel B.4 (teen, kalibratietesten), Tabel B.5 (teen, testen) en Tabel B.6 (voor de kade, testen).

Door het toepassen van drie golfhoogtemeters op bepaalde afstanden van elkaar kan de inkomende golf worden bepaald met de methode van Mansard en Funke (1980). Dit gebeurt met het standaard Deltares softwarepakket: Auke-PC. Deze uitwerking geeft vervolgens aan welke golfcondities tijdens de proef zijn bereikt.

2.5.2 Kalibratiemetingen

De doelwaarden van de golfcondities, uitgedrukt in H_{m0} en $T_{m-1,0}$, zijn opgelegd aan de teen van de dijk. Aangezien het niet mogelijk is om tijdens de testen zelf bij de teen te meten zijn er voorafgaande aan de werkelijke proeven kalibratietesten uitgevoerd. De gemeten waarden van de kalibratietesten (WHM 4, 5, 6) zijn leidend in het bepalen van de golfcondities aan de teen. De resultaten van de kalibratietesten zijn weergegeven in Tabel B.1 en samengevat in Tabel B.2. De afwijking van de gemeten golfhoogte H_{m0} tijdens de kalibratietesten ten opzichte van de doelwaarden is bij alle toegepaste kalibratieproeven kleiner dan 3,5 %. De afwijking van de spectrale periodemaat $T_{m-1,0}$ is bij alle toegepaste kalibratieproeven kleiner dan 2,5 %.

2.5.3 Golfoverslagmetingen

Het gemiddelde golfoverslagdebiet is bepaald door de hoeveelheid water dat over de kruin heen slaat in de golfoverslagbak op te vangen en te meten. Het meten gebeurt met een golfhoogtemeter (beschreven in Paragraaf 2.5.1). Tevens is voor een aantal testen het aantal

overslaande golven bepaald door deze tijdens de test te tellen. Daarnaast is voor een aantal testen het aantal overslaande golven bepaald met behulp van een golfhoogtemeter die in de overtoppingstray is geplaatst.

2.5.4 Drukmetingen

Bij dwarsprofiel 2 zijn er op twee verschillende locaties twee drukopnemers in het talud aangebracht. Deze zijn aangebracht in het verticale gedeelte van de onderste traprede (DRO1 en DRO 2: NAP + 5,44 m) en de op één na onderste traprede (DRO 3 en DRO 4: NAP + 5,90 m). De drukopnemers zijn op een afstand van 0,33 m van de gootwand en op een onderlinge afstand van 0,33 m geplaatst. Tijdens test P104 zijn de drukken opgenomen met een bemonsteringsfrequentie van 1000 Hz. De gerapporteerde waarden zijn de maximum gemeten drukken in kN/m^2 tijdens deze test.

2.6 Proevenprogramma en resultaten

In Bijlage B, Tabel B.7 is het gerealiseerde proevenprogramma inclusief metingen weergegeven. Hier zijn de volgende parameters gebruikt:

h_{kade}	=	waterstand op de kade	[m]
h_{k}	=	vrije kruinhoogte boven de stilwaterlijn	[m]
$H_{m0,i}$	=	inkomende golfhoogte $H_{mo} = 4\sqrt{m_0}$	[m]
m_0	=	nulde moment van het spectrum	$[\text{m}^2]$
$T_{m-1,0}$	=	spectrale golfperiode	[s]
Q_{meting}	=	gemeten gemiddeld golfoverslagdebiet	$[\text{l/s/m}]$

De golfperiode $T_{m-1,0}$ is de meest geschikte golfperiode om processen zoals golfoploop, golfoverslag en golfreflectie te beschrijven (zie o.a. Van Gent 1999, 2001).

Golfhoogteoverschrijdingskrommen en gemeten golfspectra zijn gegeven in Bijlage C, Figuur C.2 (kalibratietesten) en Figuur C.3 tot en met Figuur C.8 (testen van de zes afzonderlijke dwarsprofielen).

3 Analyse

3.1 Beschrijving van de testen

Van iedere test zijn video opnamen gemaakt. In deze paragraaf wordt een beknopte omschrijving van de proeven gegeven.

Op diep water treedt bij sommige testen breken van golven op. Boven de kade trad bij vrijwel iedere testsectie zwaar breken op. Dit brekingsproces leek zich vooral op de eerste 10 à 15 m op te treden (Foto 3.1). In het geval van een aanwezige berm (die hoger ligt dan de kade) trad additioneel breken op (Foto 3.2).

Er was veel golfreflectie bij de constructie, met name bij Dwarsprofiel 3A en 3C. Dit kan worden verklaard door de hier aanwezige verticale muur.

De reducerende werking van de traptreden op de golfloop was duidelijk zichtbaar (Foto 3.3).



Foto 3.1 Breken van golven op de kade (Test P504)



Foto 3.2 Breken van golven op de berm (Test P504)

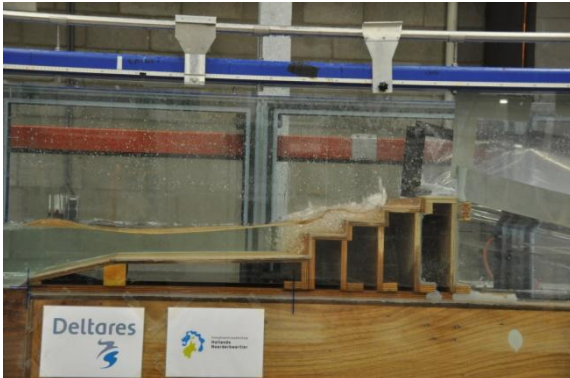


Foto 3.3 Invloed van getrappt talud (Test P504)

3.2 Correctie van testresultaten met betrekking tot model en schaaleardeffecten

Er zijn verschillende model- en schaaleardeffecten mogelijk. Deze zullen hieronder worden behandeld. Vervolgens is een correctievoorschrift met betrekking tot de meetresultaten voorgesteld.

3.2.1 Model en schaaleardeffecten

Een mogelijk schaaleardeffect kan eventueel veroorzaakt worden door de ruwheid van het talud. Als in werkelijkheid het talud perfect glad is, terwijl in het model wel enige ruwheid aanwezig is, kan een lager debiet gemeten worden. In het geval van de beproefde geometrieën is er in werkelijkheid geen perfect glad talud aanwezig in de oploopzone en kan de eventuele onderschatting van de ruwheid dus worden verwaarloosd.

Bij de testen wordt voldaan aan de theoretische schaalregels met betrekking tot golven (Froude schaling zoals beschreven in Paragraaf 2.1). Er is echter niet veel bekend over schaaleardeffecten die eventueel in de praktijk worden waargenomen bij brekende golven op een talud met ruwheidselementen. Hoewel theoretisch bij een schaal van 1:10 (dit project), nagenoeg geen schaaleardeffecten te verwachten zijn wordt toch de CLASH methodiek beschouwd om eventueel te corrigeren voor de schaaleardeffecten. Deze methodiek is hieronder behandeld.

Correctiefactor volgens CLASH: f_{CLASH}

In het EU-project Clash is een correctiefactor voor model- en schaaleardeffecten gesuggereerd. De methodiek om deze correctiefactor te bepalen is toegelicht in EurOtop (2007). Er wordt aangegeven dat de methodiek gebaseerd is op een beperkte dataset en dat de methode beschouwd dient te worden als een eerste aanzet. Het is een opvallend hiaat dat de schaal zelf geen invoerparameter is voor deze methodiek. Volgens deze Clash-methode is bij een (prototype waarde van het) golfoverslagdebiet van 1 l/s/m de zogenaamde 'adjustment factor f_{CLASH} for model effects and scale effects' altijd gelijk aan $f_{CLASH} = 1$. Indien lagere overslagdebieten worden gemeten dan kan dit een grotere factor worden. Aangezien in dit model het beoogde overslagdebiet gelijk is aan 1 l/s/m (en de beperkte geldigheid van deze correctiefactor) is aangenomen dat er geen correctiefactor hoeft te worden toegepast.

3.2.2 Correctie voor statistische onzekerheid f_{so}

Een mogelijk effect is de statistische onzekerheid met betrekking tot het golfoverslagdebiet. Dit komt door het onregelmatige karakter van de golfbelasting. Deze onzekerheid wordt kleiner naarmate het overslagdebiet wordt gevormd door meer overslaande golven. Om de statistische onzekerheid met betrekking tot het gemiddelde overslagdebiet tot nul te

reduceren is er in theorie een test nodig met een oneindig aantal golven. Uiteraard is dit niet mogelijk en is er gekozen om te testen met circa 1000 inkomende golven.

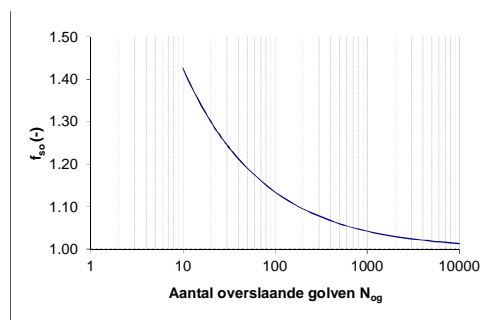
Een eerste inschatting van de statistische onzekerheid is geanalyseerd en beschreven in Bijlage A van dit rapport. Uit deze analyse blijkt dat de statistische onzekerheid kan worden beschreven als functie van het aantal overslaande golven N_{og} . Om deze reden is het aantal overslaande golven N_{og} die tijdens de testen optraden daarom ook bepaald. Vervolgens kan een correctiefactor worden toegepast die afhankelijk is van de keuze van de gewenste betrouwbaarheid. De gekozen betrouwbaarheid voor de ontwerpformules in TAW (2002), dit zijn de formules waar het softwarepakket PC-Overslag is gebaseerd, is gelijk aan 1 standaardafwijking (ontwerpformule vs. beschikbare data). Op basis hiervan is in dit rapport gekozen om tevens 1 standaardafwijking als acceptabele grens te kiezen.

De correctiefactor voor het aantal golven (proefduur) wordt als volgt toegepast:

$$q_{corr,so} = f_{so} \cdot q_{meting} \quad (3.1)$$

Waarbij $q_{corr,so}$ = gecorrigeerde waarde met betrekking tot statistische onzekerheid van het golfoverslagdebiet, f_{so} = correctiefactor zoals bepaald in Bijlage A van dit rapport.

Het verband tussen het aantal overslaande golven N_{og} en de correctiefactor voor statistische onzekerheid f_{so} is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Gecorrigeerde waarde voor statistische onzekerheid als functie van het aantal overslaande golven N_{og}

3.3 Correctie van meetresultaten

De meetresultaten zijn als volgt gecorrigeerd:

$$q_{corr} = f_{so} \cdot q_{meting} \quad (3.2)$$

Waarbij q_{corr} gelijk is aan de gecorrigeerde waarde met betrekking tot model en schaafeffecten [l/s/m], f_{so} de correctiefactor is voor statistische onzekerheid [-] en q_{meting} de gemeten waarde van het overslagdebiet [l/s/m].

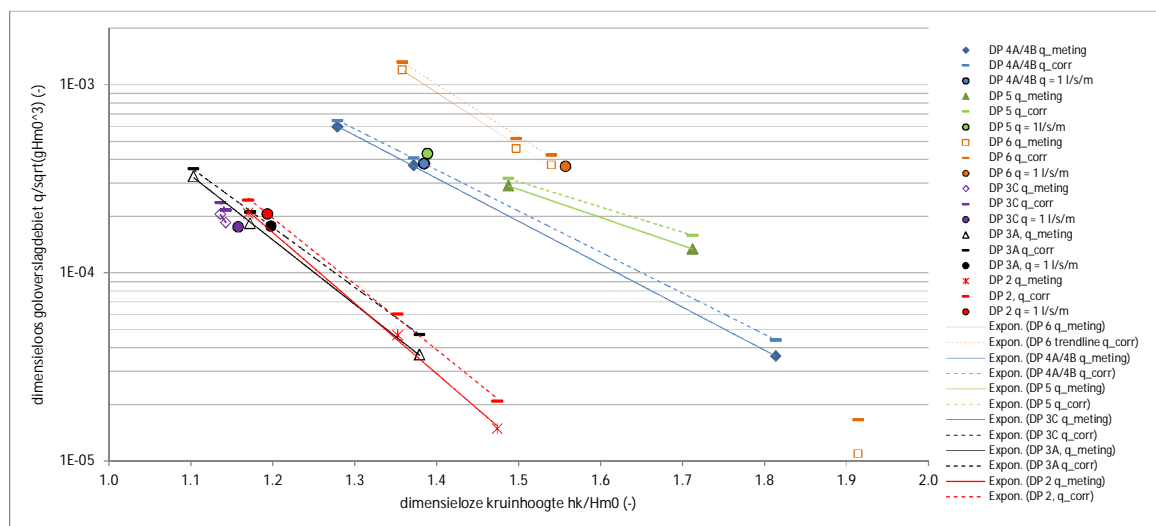
3.4 Voorspelmodel op basis van testresultaten

In deze paragraaf wordt een voorspelmodel op basis van de testresultaten beschreven. Met behulp van dit voorspelmodel wordt de benodigde kruinhoogte bepaald. Hierbij worden de volgende aannames en uitgangspunten gehanteerd:

- Een golfoverslagdebiet van $q = 1.0$ l/s/m.
- Significante golfhoogte conform de doelwaarde $H_{m0,doel}$ aan de teen, zoals gegeven in Tabel B.8.

- Een exponentiële trendlijn gebaseerd op de metingen die zijn gecorrigeerd conform de beschrijving in Paragraaf 3.3 van dit rapport.
- Een vormvaste constructie zoals gemodelleerd en weergegeven in dit verslag.

De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Resultaten dimensioneel gepresenteerd

Figuur 3.2 wordt hieronder in detail toegelicht.

De horizontale as representeert de kruinhoogte h_k dimensioneel gemaakt met de significante golfhoogte H_{m0} . De (logaritmisch verdeelde) verticale as is het golfoverslagdebiet q dimensioneel gemaakt met de valversnelling als gevolg van de zwaartekracht g en de significante golfhoogte H_{m0} .

In de figuur is de volgende data af te lezen:

- 1 **Gemeten waarde (aangegeven met 'ruit', 'driehoek', 'vierkant' en 'asterisk').**
Dit betreft de gemeten waarde van het golfoverslagdebiet q_{meting} . De golfhoogte H_{m0} is gebaseerd op de gekalibreerde waarden van H_{m0} (weergegeven in Tabel B.1). Bij een aantal proeven is de waterstand gevarieerd (P502, P503, P402 en P404). Het blijkt dat deze proefresultaten niet altijd goed overeenkomen met de overige proeven waarbij de waterstand op hetzelfde niveau (NAP+5.05 m) is gehouden. Dit wordt als volgt verklaard:
 - Door het toepassen van een andere waterstand treedt er meer of minder breken op bij de kade. Dit resulteert in een andere waarde van H_{m0} . Aangezien deze specifieke testen niet zijn gekalibreerd is deze waarde van H_{m0} daarom ook niet bekend.
 - Door het toepassen van andere waterstand treedt er meer of minder breken op bij een aanwezige bermen. Dit heeft invloed op de hoeveelheid golfoverslag.

De proeven P502, P503, P402 en P404 zijn niet meegenomen in de verdere analyse van de proefresultaten. Volledigheidshalve wordt hier vermeld dat deze proefresultaten tijdens de uitvoering van de proeven noodzakelijk waren om de benodigde kruinhoogte van de opvolgende testen in te schatten.

- 2 *Gecorrigeerde waarden (aangegeven met een liggend streepje)*
Dit betreft de gecorrigeerde waarden van het golfoverslagdebiet q_{corr} conform de theorie gegeven in Paragraaf 3.3. De golfhoogte H_{m0} is gebaseerd op de gekalibreerde waarden van H_{m0} (weergegeven in Tabel B.1).
- 3 *Een (exponentiële) trendlijn gebaseerd op de gemeten waarden (aangegeven met een doorgetrokken lijn).*
Deze trendlijn is als volgt beschreven:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = ae^{-b\left(\frac{h_k}{H_{m0}}\right)} \quad (3.3)$$

Waarbij

q	=	golfoverslagdebiet (q_{meting} of q_{corr})	$[m^3/s/m]$
g	=	versnelling als gevolg van de zwaartekracht	$[m/s^2]$
H_{m0}	=	significante golfhoogte	$[m]$
a	=	te bepalen coëfficiënt	$[-]$
b	=	te bepalen coëfficiënt	$[-]$
h_k	=	kruinhoogte ten opzichte van de stilwaterlijn	$[m]$

De coëfficiënten a en b kunnen worden bepaald door een zo goed mogelijke exponentiële fit te bepalen. De gevonden waarden van deze coëfficiënten zijn weergegeven in Bijlage B, Tabel B.8. Bij het bepalen van deze waarde is het resultaat behorende bij Proef P601 niet meegenomen aangezien het overslagdebiet daar zeer beperkt was (en dus mogelijk onderhevig is aan schaaffecten).

- 4 *Een (exponentiële) trendlijn gebaseerd op de gecorrigeerde waarden (aangegeven met een onderbroken lijn).*
De trendlijn is beschreven door Vergelijking (3.3) waarbij $q = q_{\text{corr}}$. De gevonden waarden van deze coëfficiënten zijn weergegeven in Tabel B.8.
- 5 *Het voorgestelde uitgangspunt ter bepaling van de benodigde kruinhoogte gebaseerd op de gecorrigeerde waarden (aangegeven met een cirkel).*
Het is nu mogelijk om de benodigde kruinhoogte te bepalen. Hiervoor zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:
- De kalibratiecoëfficiënten a en b gebaseerd op de gecorrigeerde metingen: q_{corr}
 - De doelwaarden van de significante golfhoogte, $H_{m0,\text{doel}}$
 - De doelwaarde van het golfoverslagdebiet: $q_{\text{doel}} = 1 \text{ l/s/m}$ ($= 0,001 \text{ m}^3/\text{s/m}$)
 - Vergelijking (3.3). Deze is als volgt omschreven:

$$h_k = \frac{H_{m0,\text{doel}}}{b} \cdot \left(\frac{q_{\text{doel}}}{a\sqrt{gH_{m0,\text{doel}}^3}} \right) \quad (3.4)$$

Waarbij q_{doel} gelijk is aan de doelwaarde van het golfoverslagdebiet (in dit project $q_{\text{doel}} = 1 \text{ l/s/m}$) en $H_{m0,\text{doel}}$ de doelwaarde van de significante golfhoogte (zoals aangegeven in Tabel 1.1).

Rekenkundig is Vergelijking (3.4) tevens toegepast op de ongecorrigeerde metingen (resultierend in andere kalibratiecoëfficiënten a en b). Dit leidt tot een iets lagere kruinhoogte. De gevonden benodigde kruinhoogten bij 1 l/s/m en bij de doelwaarden H_{m0} zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Benodigde kruinhoogte bij $q = 1$ l/s/m en $H_{m0} = H_{m0,doel}$

dwars profiel	meting	gecorrigeerde
	(m + NAP)	meting (m+NAP)
2	6.62	6.65
3A	6.79	6.82
3C	6.76	6.78
4A/4B	6.27	6.28
5	6.18	6.19
6	6.45	6.47

De 2^e kolom in Tabel 3.1 geeft de benodigde kruinhoogte aan indien wordt uitgegaan van de metingen zonder een correctie voor statistische onzekerheid. De 3^e kolom in Tabel 3.1 geeft de benodigde kruinhoogte aan indien wordt uitgegaan van de metingen waarbij een correctie voor statistische onzekerheid wel is toegepast.

3.5 Analyse van de gemeten drukken

Op basis van de metingen is voor iedere drukopnemer de maximaal gemeten druk bepaald en weergegeven in Tabel 3.2.

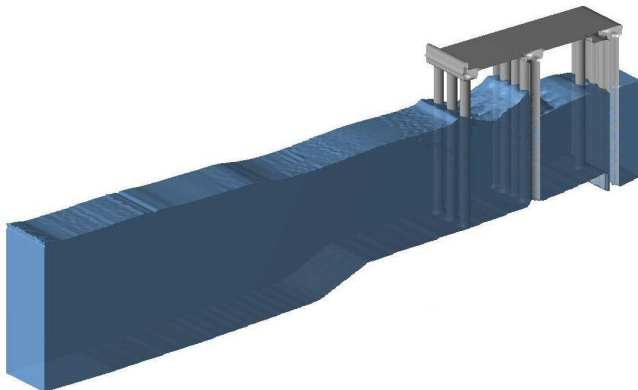
Tabel 3.2 Maximum gemeten drukken (prototype waarden)

Drukopnemer	Maximumdruk (kN/m ²)
DRO01	99
DRO02	119
DRO03	110
DRO04	66

De gemeten drukken geven een eerste indicatie van de krachten die op de constructie aangrijpen. Echter, om de stabiliteit van de constructie aan te kunnen tonen worden deze proeven niet als toereikend beschouwd. Dit vanwege de volgende redenen:

- De proeven zijn slechts bij één constructie (Dwarsprofiel 2) uitgevoerd.
- De metingen zijn slechts op twee locaties op het talud uitgevoerd. Het is onduidelijk of dit de locatie is waar de maximale belasting valt te verwachten.
- De metingen zijn alleen op de buitenzijde van het talud uitgevoerd. Afhankelijk van hoe de constructie gebouwd wordt, is er eventueel ook inzicht nodig in de drukken in de constructie zelf (voorbeeld: een bekleding bestaande uit een steenzetting op een granulaire laag (filter) wordt door de druk die in het filter onder de steenzetting optreedt omhoog gedrukt; in dit geval zijn de optredende drukken op en onder de steenzetting benodigd).

Om een beter inzicht van de drukken op de constructie op te bepalen (d.w.z. de belasting op de constructie) zou een detailhydrodynamisch softwarepakket zoals bijvoorbeeld ComFLOW toegepast kunnen worden. Een impressie van het softwarepakket ComFLOW is weergegeven in Figuur 3.3. Een beschrijving waarbij dit softwarepakket in dergelijke toepassingen wordt gebruikt is gegeven in Wenneker *et al* (2010).



Figuur 3.3 Impressie van het softwarepakket ComFLOW (project waarbij de krachten van de golven op de constructie worden bepaald)

Het uiteindelijke doel van het bepalen van de drukken zal zijn om de stabiliteit van de constructie of elementen van de constructie aan te tonen (d.w.z. de sterkte van de constructie). De manier waarop de stabiliteit aangetoond kan worden is sterk afhankelijk van hoe de constructie zal worden gebouwd. Indien de analogie met bestaande bekledingen wordt getrokken, kan onderscheid worden gemaakt in waterdichte bekledingen (zoals asfalt) en open bekledingen (zoals steenzettingen). Hierbij dienen betonnen elementen die stijf tegen elkaar worden geplaatst te worden geschematiseerd als een open bekleding. In het geval van een dichte bekleding zal een bureaustudie / numerieke studie waarschijnlijk volstaan. In het geval van een open bekleding is de belasting een zeer gecompliceerd proces aangezien de waterdrukken zich door de bekleding bewegen en de bekleding van onderuit omhoog kunnen drukken. De kwantificering van dit proces is niet of nauwelijks meer met een bureaustudie te bepalen. Een mogelijke manier om dergelijke vraagstukken aan te pakken is het fysiek modelleren in een grootschalige golfgoet. In Nederland is het gebruikelijk om een nieuw type steenzetting, alvorens het in de praktijk wordt toegepast, in een grootschalige golfgoet te testen.

Afhankelijk van hoe de bekleding wordt ontworpen, kan worden overwogen om de stabiliteit aan te tonen met een experiment op grote schaal (1:1 schaal) in een grote golfgoet zoals de Deltagoet. Deze goet is speciaal voor dit soort toepassingen gebouwd en wordt hier dan ook veelvuldig voor toegepast. In deze 5 meter brede goet is het mogelijk om de constructie op werkelijke schaal in te bouwen en golven met een hoogte tot circa $H_s = 1,6$ m op te wekken. Een indruk van de Deltagoet is weergegeven in Foto 3.4.



Foto 3.4 *Impressie van de Deltagoot van Deltares (project waarbij de krachten van een golfimpact op een verticale wand wordt gemeten).*

3.6 Belastingen op de stabiliteit van de kade en verticale wand

Tijdens de experimenten viel het op dat vlak voor de dijk er een zware waterbeweging vlak boven de kade optrad. Indien de kade tijdens een storm zou eroderen kan dit mogelijkwijs leiden tot instabiliteit van de dijk maar ook tot een grotere golfbelasting op de dijk wat resulteerd in een hoger overslagdebiet. Ook bij de verticale wand in de constructie trad een zware waterbeweging op. Aanbevolen wordt om in het ontwerpproces aandacht te besteden aan de stabiliteit van deze onderdelen en de aantoonbaarheid daarvan.

4 Conclusies

Op basis van fysiek modelonderzoek in een golfgoot is de benodigde kruinhoogte voor de primaire waterkering bij de haven aan de Waddenzee zijde van Den Oever bepaald. Hierbij zijn de door de opdrachtgever aangeleverde hydraulische randvoorwaarden gebruikt. Bij de bepaling van de benodigde kruinhoogte is geen rekening gehouden met eventuele vervormingen van de constructie (bijvoorbeeld klink) of 3-dimensionale effecten.

De benodigde kruinhoogten die in het onderzoek zijn bepaald zijn weergegeven in Tabel 3.1. Er wordt aanbevolen om de waarden toe te passen waarbij de statistische onzekerheid als gevolg van het onregelmatige karakter van golven is inbegrepen. De invloed van deze onzekerheid op de benodigde kruinhoogte is klein (< 4 cm, prototypewaarde).

Tevens is een eerste indruk gekregen van optredende golfkrachten op de dijk door bij één van de geteste dwarsdoorsneden de optredende drukken als gevolg van golfimpacts te meten. De maximum gemeten piekdrukken zijn weergegeven in Tabel 3.2. vanwege de zeer beperkte hoeveelheid gegevens wordt benadrukt dat deze resultaten slechts als indicatief kunnen worden gezien.

Het huidige onderzoek is gericht geweest op de benodigde kruinhoogte. Het onderzoek heeft tevens aangetoond dat de golfbeweging op de constructie zwaar en dynamisch is. Het onderzoek is niet gericht geweest op de sterkte van de constructie. Om de stabiliteit van de constructie te bepalen wordt aanbevolen om gebruik te maken van het rekenpakket ComFLOW om de golfbelasting op de constructie en onderdelen van de constructie te bepalen. Voor het aantonen van de sterkte van deze innovatieve constructie, en onderdelen van de constructie zoals bekledingen, is onderzoek in een grootschalig fysiek model noodzakelijk.

5 Literatuur

EurOtop, 2007, "*Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*", August 2007

HHNK, 2012, "*Offerte schaalmodelonderzoek in golfsloot; Dijkversterking Den Oever*", Registratienummer 12.53787, 18 December 2012.

Mansard, E.P.D. en Funke, E.R., 1980, "*The method of incident waves and reflected spectra using a least squares method*", 17th Int. Conf. of Coastal Engineering, Sydney.

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

Van Gent, M.R.A., 1999, "*Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores; 2D model tests with single and double peaked wave energy spectra*", Delft Hydraulics Report H3608, December 1999, Delft

Van Gent, M.R.A., 2001, "*Wave run-up on dikes with shallow foreshores*", ASCE, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.127, No 5, pp. 254-262, September/October 2001 issue.

Van Steeg, P., 2012, "*Invloedsfactor voor ruwheid van een getrapt talud bij golfoverslag bij dijken, verslag fysieke modeltesten en analyse*", Deltares rapport 1206984, Augustus 2012.

Wenner, I., Wellens, P., and Gervelas, R., 2010, "*Volume-of-Fluid model ComFLOW simulations of wave impact on a dike*" Coastal Engineering 2010, Proceedings of the 32th international conference on coastal engineering, Shanghai, China, June 30-July 5, 2010

A Bepaling onzekerheidsfactor op basis van het aantal overslaande golven

De bepaling van de factor f_{so} , zoals beschreven in Paragraaf 3.2.2, is gebaseerd op de onderstaande theorie. (Hierbij is de parameter voor de vrije kruinhoogte weergegeven met respectievelijk R_c , dit is dezelfde parameters als h_k in dit rapport).

A.1 Introduction

To measure the average wave overtopping discharge q in a hydraulic laboratory it is common practice to have a test duration of 500 – 3000 waves. However, due to irregularity of the incident waves, only a part of the wave run-ups actually produces overtopping. The volumes of the overtopping waves are also irregular. Assuming a test duration of infinite length and assuming no model effects the ‘true’ wave overtopping discharge can be determined. In this memo, it is assumed that the model is ideal (unaffected by model and scale effects) but has a finite length of N waves. A test with a finite length will give a statistical uncertainty to the measurement. This memo gives a first estimate of this statistical uncertainty.

A.2 Overtopping volumes per wave

The overtopping volume per wave can be described by a Weibull distribution with a shape factor $k = 0.75$ and a scale factor λ (TAW, 2002). For this project it is assumed that this approach can also be used for reshaped wave spectra (for example due to heavy breaking)

The mean and variance of the overtopping volume per wave can be expressed as (based on the Weibull distribution):

$$\mu_V = E(V) = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (1.1)$$

$$\sigma_V^2 = Var(V) = \lambda^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (1.2)$$

where V is the volume for each overtopping wave, Γ is the gamma function, λ is the scale factor and k is the shape factor.

Since k is given as a fixed value, Eq. (1.1) and Eq. (1.2) can be rewritten as:

$$\mu_V = 1.19 \cdot \lambda \quad (1.3)$$

$$\sigma_V = \sqrt{2.596 \cdot \lambda^2} = 1.61 \cdot \lambda \quad (1.4)$$

A.3 Wave overtopping discharge

The wave overtopping discharge q is defined as follows:

$$q = \frac{V_{total}}{t_{test}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ow}} V_i}{N_w T_m} \quad (\text{since } t_{test} = N_w \cdot T_m) \quad (1.5)$$

With t_{test} is test duration (s), N_w is number of incident waves during a test (-), N_{ow} is total number of overtopping waves during a test (-), T_m is mean wave period (s), V_{total} is total

volume of overtopping waves during the test (m^3/m) and V_i is overtopping volume per event (m^3/m).

The mean value of q is computed as follows:

$$\mu_q = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ow}} \mu_{V,i}}{N_w \cdot T_m} \quad (1.6)$$

or

$$\mu_q = \frac{N_{ow} \cdot \mu_V}{N_w \cdot T_m} \quad (1.7)$$

The variance $Var(q)$ and standard deviation σ_q of the overtopping discharge q is determine as follows:

$$Var(q) = Var\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{ow}} V_i}{N_w \cdot T_m}\right) = \left(\frac{1}{N_w \cdot T_m}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N_{ow}} Var(V_i) = \left(\frac{1}{N_w \cdot T_m}\right)^2 \cdot N_{ow} \cdot Var(V) \quad (1.8)$$

$$\sigma_q = \sqrt{Var(q)} \quad (1.9)$$

$$\sigma_q = \frac{\sqrt{N_{ow}}}{N_w \cdot T_m} \sigma_V \quad (1.10)$$

Combining Eq. (1.3), Eq. (1.4), Eq. (1.7) and Eq. (1.10) gives the coefficient of variation (CoV):

$$CoV = \frac{\sigma_q}{\mu_q} = \frac{1}{\sqrt{N_{ow}}} \cdot \frac{\sigma_V}{\mu_V} = \frac{1}{\sqrt{N_{ow}}} \cdot \frac{1.61 \cdot \lambda}{1.19 \cdot \lambda} = \frac{1.35}{\sqrt{N_{ow}}} \quad (1.11)$$

Now it is possible to calculate the values corresponding to a certain confidence bound. Using the normal distribution, it can be derived that:

$$q_{95\%} = \mu_q + 1.645 \cdot \sigma_q \text{ for one-side 95\% confidence bound} \quad (1.12)$$

Which can be rewritten as:

$$q_{95\%} = (1 + 1.645 \cdot CoV) \mu_q \quad (1.13)$$

or

$$\frac{q_{95\%}}{\mu_q} = 1 + 1.645 \cdot CoV \quad (1.14)$$

This can be done in an identical way for the 5% confidence bound resulting in:

$$\frac{q_{5\%}}{\mu_q} = 1 - 1.645 \cdot CoV \tag{1.15}$$

A.4 Statistical uncertainty as function of number of overtopping waves

Suppose the number of overtopping waves is determined. In this case Eq. (1.11) and Eq. (1.14) can be combined resulting in:

$$\frac{q_{95\%}}{\mu_q} = 1 + \frac{2.22}{\sqrt{N_{ow}}} \tag{1.16}$$

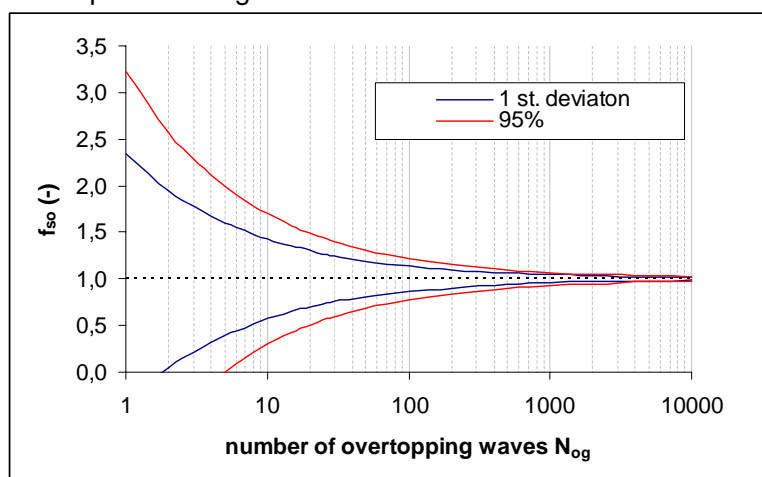
This can also be done for the 5% lower confidence bound resulting in:

$$\frac{q_{5\%}}{\mu_q} = 1 - \frac{2.22}{\sqrt{N_{ow}}} \tag{1.17}$$

Or for 1 standard deviation:

$$f_{so} = \frac{\mu_q + \sigma_q}{\mu_q} = 1 + \frac{1.35}{\sqrt{N_{ow}}} \tag{1.18}$$

This is plotted in Figuur A.1.



Figuur A.1 statistical uncertainty as function of number of overtopping waves

B Tabellen

Tabel B.1 Resultaten kalibratietesten

kade	d.profiel	Test	diepte bij kade (m)	diep water		boven kade		opmerking
				Hm0,i [m]	Tm-1.0,i [s]	Hm0,i [m]	Tm-1.0,i [s]	
korte kade	2	T101	3.08	1.27	4.9	1.17	4.6	
korte kade	2	T102	3.08	1.45	5.0	1.32	4.9	T102 is stuurfile voor DP 2
lange kade	3A	T201	2.87	1.85	5.2	1.21	5.2	
lange kade	3A	T202	2.87	2.39	5.5	1.25	5.4	
lange kade	3A	T203	2.87	2.67	5.7	1.27	5.7	
lange kade	3A (-0,50m)	T204	3.37	2.41	5.5	1.45	5.5	
lange kade	3A (-0,50m)	T205	3.37	2.46	5.3	1.49	5.3	*
lange kade	3A (-0,50m)	T215	3.37	2.42	5.1	1.45	5.2	T215 is stuurfile voor DP 3A
lange kade	6	T601	2.30	1.23	4.6	0.94	4.7	T601 is stuurfile voor DP 6
lange kade	5	T501	1.82	1.63	4.7	0.80	4.6	T501 is stuurfile voor DP 5
lange kade	4A/4B	T401	2.00	1.48	4.6	0.86	4.6	T401 is stuurfile voor DP 4A/4B
lange kade	3C	T301	3.37	2.40	5.0	1.47	5.2	T301 is stuurfile voor DP 3C

* Bij de kalibratie van testserie t200 stonden de golfhoogtemeters niet op de correcte locatie. Om deze reden is deze conditie opnieuw gekalibreerd (testserie t210, test t215)

Tabel B.2 Samenvatting Kalibratietesten

(afmetingen in modelwaarden)

Dwarsprofiel	verlaging Δy [m]	stuurfile	afwijking t.o.v. doelwaarden	
			H _{m0} (%)	T _{m-1.0} (%)
2	0.00	t102	-1.8	1.3
3A	0.50	t215	-1.9	1.7
3C	0.50	t301	-1.1	2.4
4A/4B	0.25	t401	-3.4	2.3
5	0.25	t501	-2.0	1.6
6	0.00	t601	2.7	2.4

Tabel B.3 Positie golfhoogtemeters op diep water (WHM 1,2,3) tijdens kalibratietesten en testen

(afmetingen in modelwaarden)

serie	X1	X2	X3
	(m+schoot)	(m+schoot)	(m+schoot)
t100	10.00	10.25	11.05
t200	10.00	10.25	11.05
t600	10.00	10.25	11.05
t500	10.00	10.25	11.05
t400	10.00	10.25	11.05
t300	10.00	10.25	11.05
t210	10.00	10.25	11.05

Tabel B.4 Positie golfhoogtemeters aan de teen (WHM 4,5,6) tijdens kalibratietesten

serie	X4	X5	X6
	(m+schoot)	(m+schoot)	(m+schoot)
t100	37.80	38.35	38.60
t200*	37.00	37.55	37.80
t210	37.80	38.35	38.60
t600	37.00	37.55	37.80
t500	37.00	37.55	37.80
t400	37.00	37.55	37.80
t300	37.00	37.55	37.80

* Bij de kalibratie van testserie t200 stonden de golfhoogtemeters niet op de correcte locatie. Om deze reden is deze conditie opnieuw gekalibreerd (testserie t210, test t215)

Tabel B.5 Positie golfhoogtemeters aan de teen (WHM 4,5,6) tijdens testen

serie	X4	X5	X6
	(m+schot)	(m+schot)	(m+schot)
t100	36.24	36.79	37.04
t210	36.24	36.79	37.04
t600	36.04	36.59	36.84
t500	36.04	36.59	36.84
t400	36.04	36.59	36.84
t300	36.04	36.59	36.84

Tabel B.6 Positie golfhoogtemeters voor de kade (WHM 7,8,9) tijdens testen

serie	X7	X8	X9
	(m+schot)	(m+schot)	(m+schot)
t100	29.7	30.25	30.5
t210	29.7	30.25	30.5
t600	29.7	30.25	30.5
t500	29.7	30.25	30.5
t400	29.7	30.25	30.5
t300	29.7	30.25	30.5

Tabel B.7 Gerealiseerd proevenprogramma en resultaten

Tabel B.7a: Resultaten Dwarsprofiel 5 (prototypewaarden)

Test	geometrie						gecalibreerde golfcondities				gemeten golfcondities				golfoverslag					
	dwars-profiel	kade	waterstand	diepte bij kade	kruinhoogte	kruinhoogte	bij golfschot		bij teen		bij golfschot		voor kade		bij teen		Q _{meting} [l/s/m]	N _{og} [-]	f _{so} [-]	Q _{corr} [l/s/m]
				h _{kade} [m]			h _k [m]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]					
P501	5	lange kade	5,05	1,82	6,42	1,37	1,63	4,7	0,80	4,6	1,65	4,7	-	-	0,84	4,5	0,30	>55	1,18	0,35
P502	5	lange kade	5,35	2,12	6,42	1,07	-	-	-	-	1,06	4,6	-	-	0,86	4,4	1,34	-	-	-
P503	5	lange kade	5,20	1,97	6,42	1,22	-	-	-	-	1,22	4,6	-	-	0,87	4,3	0,72	-	-	-
P504	5	lange kade	5,05	1,82	6,24	1,19	1,63	4,7	0,80	4,6	1,65	4,7	-	-	0,84	4,5	0,65	207	1,09	0,71

Tabel B.7b: Resultaten Dwarsprofiel 4A/4B (prototypewaarden)

Test	geometrie						gecalibreerde golfcondities				gemeten golfcondities				golfoverslag					
	dwars-profiel	kade	waterstand	diepte bij kade	kruinhoogte	kruinhoogte	bij golfschot		bij teen		bij golfschot		voor kade		bij teen		Q _{meting} [l/s/m]	N _{og} [-]	f _{so} [-]	Q _{corr} [l/s/m]
				h _{kade} [m]			h _k [m]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]					
P401	4A/4B	lange kade	5,05	2,00	6,61	1,56	1,48	4,6	0,86	4,6	1,50	4,6	1,45	4,6	0,94	4,5	0,09	>38	1,22	0,11
P402	4A/4B	lange kade	5,55	2,50	6,61	1,06	-	-	-	-	1,15	4,6	1,11	4,6	0,98	4,6	1,71	-	-	-
P403	4A/4B	lange kade	5,35	2,30	6,61	1,26	-	-	-	-	1,15	4,6	1,11	4,6	0,95	4,5	0,32	-	-	-
P404	4A/4B	lange kade	5,51	2,46	6,61	1,10	-	-	-	-	1,11	4,6	1,06	4,6	0,95	4,6	1,08	-	-	-
P405	4A/4B	lange kade	5,05	2,00	6,15	1,10	1,48	4,6	0,86	4,6	1,50	4,7	1,45	4,6	0,93	4,4	1,49	280	1,08	1,61
P406	4A/4B	lange kade	5,05	2,00	6,23	1,18	1,48	4,6	0,86	4,6	1,50	4,7	1,45	4,6	0,93	4,5	0,93	200	1,10	1,02

Tabel B.7c: Resultaten Dwarsprofiel 6 (prototypewaarden)

Test	geometrie						gecalibreerde golfcondities				gemeten golfcondities				golfoverslag					
	dwars-profiel	kade	waterstand	diepte bij kade	kruinhoogte	kruinhoogte	bij golfschot		bij teen		bij golfschot		voor kade		bij teen		Q _{meting} [l/s/m]	N _{og} [-]	f _{so} [-]	Q _{corr} [l/s/m]
				h _{kade} [m]			h _k [m]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]					
P601	6	lange kade	5,05	2,30	6,84	1,79	1,23	4,6	0,94	4,7	1,24	4,6	1,19	4,6	0,97	4,5	0,03	7,0	1,51	0,05
P602	6	lange kade	5,05	2,30	6,32	1,27	1,23	4,6	0,94	4,7	1,24	4,6	1,19	4,6	0,97	4,5	3,40	≈186	1,10	3,74
P603	6	lange kade	5,05	2,30	6,45	1,40	1,23	4,6	0,94	4,7	1,24	4,6	1,19	4,6	0,97	4,5	1,30	108	1,13	1,47
P604	6	lange kade	5,05	2,30	6,49	1,44	1,23	4,6	0,94	4,7	1,24	4,6	1,19	4,6	0,98	4,5	1,06	112	1,13	1,20

Tabel B.7d: Resultaten Dwarsprofiel 3C (prototypewaarden)

Test	geometrie						gecalibreerde golfcondities				gemeten golfcondities				golfoverslag					
	dwars-profiel	kade	waterstand	diepte bij kade	kruinhoogte	kruinhoogte	bij golfschot		bij teen		bij golfschot		voor kade		bij teen		Q _{meting} [l/s/m]	N _{og} [-]	f _{so} [-]	Q _{corr} [l/s/m]
				h _{kade} [m]			h _k [m]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]					
P303	3C	lange kade	5,05	3,37	6,72	1,67	2,40	5,0	1,47	5,2	2,42	5,1	2,31	5,1	1,52	5,2	1,14	73	1,16	1,32
P304	3C	lange kade	5,05	3,37	6,73	1,68	2,40	5,0	1,47	5,2	2,42	5,1	2,31	5,1	1,52	5,2	1,03	64	1,17	1,20

Tabel B.7e: Resultaten Dwarsprofiel 3A (prototypewaarden)

Test	geometrie						gecalibreerde golfcondities				gemeten golfcondities				golfoverslag					
	dwars-profiel	kade	waterstand	diepte bij kade	kruinhoogte	kruinhoogte	bij golfschot		bij teen		bij golfschot		voor kade		bij teen		Q _{meting} [l/s/m]	N _{og} [-]	f _{so} [-]	Q _{corr} [l/s/m]
				h _{kade} [m]			h _k [m]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]					
P201	3A	lange kade	5,05	3,37	7,05	2,00	2,42	5,1	1,45	5,2	2,46	5,2	2,35	5,2	1,60	5,5	0,20	22	1,29	0,26
P201	3A	lange kade	5,05	3,37	6,65	1,60	2,42	5,1	1,45	5,2	2,46	5,2	2,35	5,2	1,61	5,5	1,78	≈189	1,10	1,95
P203	3A	lange kade	5,05	3,37	6,75	1,70	2,42	5,1	1,45	5,2	2,46	5,2	2,35	5,2	1,61	5,5	1,00	81	1,15	1,15

Tabel B.7f: Resultaten Dwarsprofiel 2 (prototypewaarden)

Test	geometrie						gecalibreerde golfcondities				gemeten golfcondities				golfoverslag					
	dwars-profiel	kade	waterstand	diepte bij kade	kruinhoogte	kruinhoogte	bij golfschot		bij teen		bij golfschot		voor kade		bij teen		Q _{meting} [l/s/m]	N _{og} [-]	f _{so} [-]	Q _{corr} [l/s/m]
				h _{kade} [m]			h _k [m]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]	H _{m0,i} [m]	T _{m-1,0,i} [s]					
P101	2	korte kade	5,05	3,08	6,59	1,54	1,45	5,0	1,32	4,9	1,48	5,1	1,43	5,1	1,41	5,2	0,98	60	1,17	1,15
P102	2	korte kade	5,05	3,08	6,83	1,78	1,45	5,0	1,32	4,9	1,48	5,1	1,43	5,1	1,42	5,2	0,22	21	1,29	0,28
P103	2	korte kade	5,05	3,08	6,99	1,94	1,45	5,0	1,32	4,9	1,48	5,1	1,43	5,1	1,42	5,2	0,07	11	1,41	0,10

Tabel B.8 Coëfficiënten en dimensieloze parameters

	Kalibratie coëfficiënten		Doelwaarden		kruinhoogte		dimensieloze parameters	
	a	b	Q _{doel}	H _{m0,doel}	h _k	h _k /H _{m0,doel}	Q _{doel} /√(gH _{m0,doel} ³)	
	(-)	(-)	(m ³ /s/m)	(m)	(m)	(m+NAP)	(-)	(-)
DP5 meting	0.05	-3.44	0.001	0.82	1.13	6.18	1.37	4.3E-04
DP5 correctie	0.03	-3.09	0.001	0.82	1.14	6.19	1.39	4.3E-04
DP4A/4B meting	0.50	-5.26	0.001	0.89	1.22	6.27	1.37	3.8E-04
DP4A/4B correctie	0.40	-5.03	0.001	0.89	1.23	6.28	1.38	3.8E-04
DP6 meting	8.51	-6.54	0.001	0.91	1.40	6.45	1.54	3.7E-04
DP6 correctie	7.58	-6.38	0.001	0.91	1.42	6.47	1.56	3.7E-04
DP3C meting	4671	-14.92	0.001	1.49	1.71	6.76	1.15	1.8E-04
DP3C correctie	1157	-13.56	0.001	1.49	1.73	6.78	1.16	1.8E-04
DP3A meting	1.94	-7.89	0.001	1.48	1.74	6.79	1.18	1.8E-04
DP3A correctie	1.14	-7.32	0.001	1.48	1.77	6.82	1.20	1.8E-04
DP2 meting	5.24	-8.64	0.001	1.34	1.57	6.62	1.17	2.1E-04
DP2 correctie	3.08	-8.05	0.001	1.34	1.60	6.65	1.19	2.1E-04

C Figuren

Figuur C.1 Overzicht dwarsdoorsneden

Figuur C.2 Golfspectra en overschrijdingskrommen kalibratietesten

Figuur C.3 Golfspectra en overschrijdingskrommen Dwarsprofiel 2

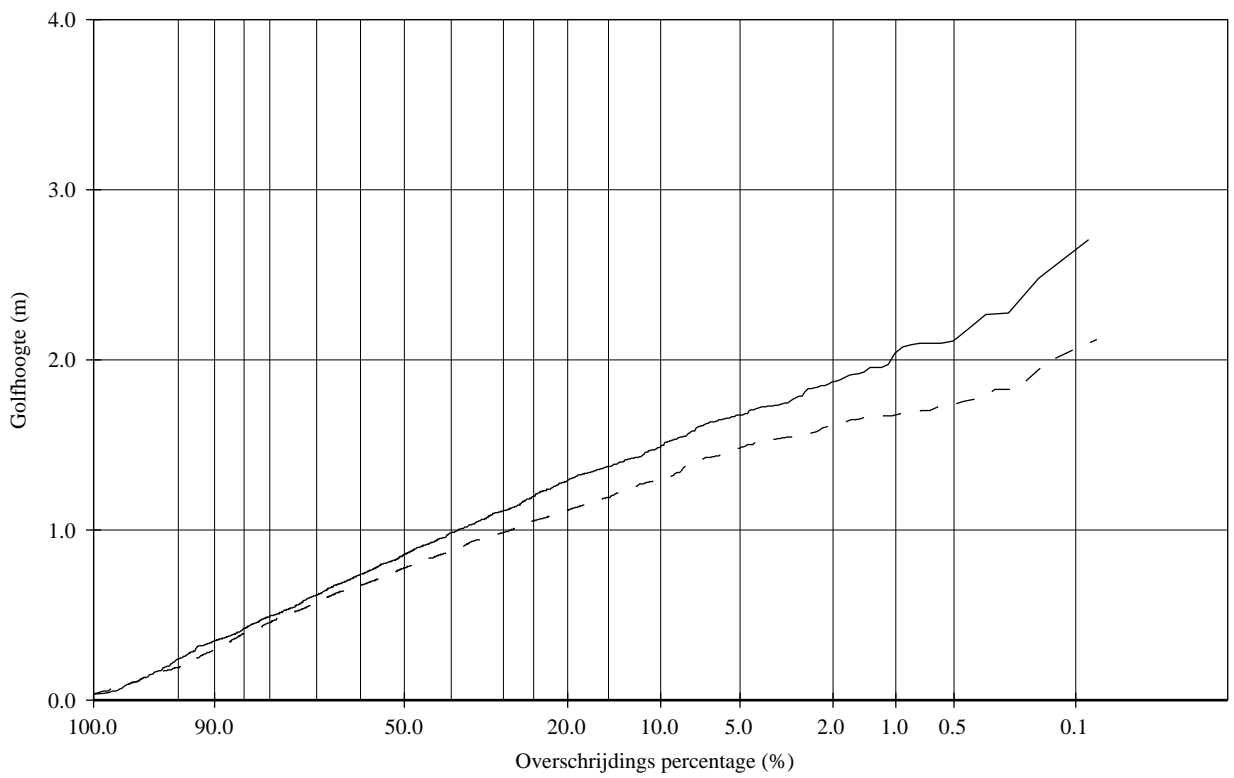
Figuur C.4 Golfspectra en overschrijdingskrommen Dwarsprofiel 3A

Figuur C.5 Golfspectra en overschrijdingskrommen Dwarsprofiel 3C

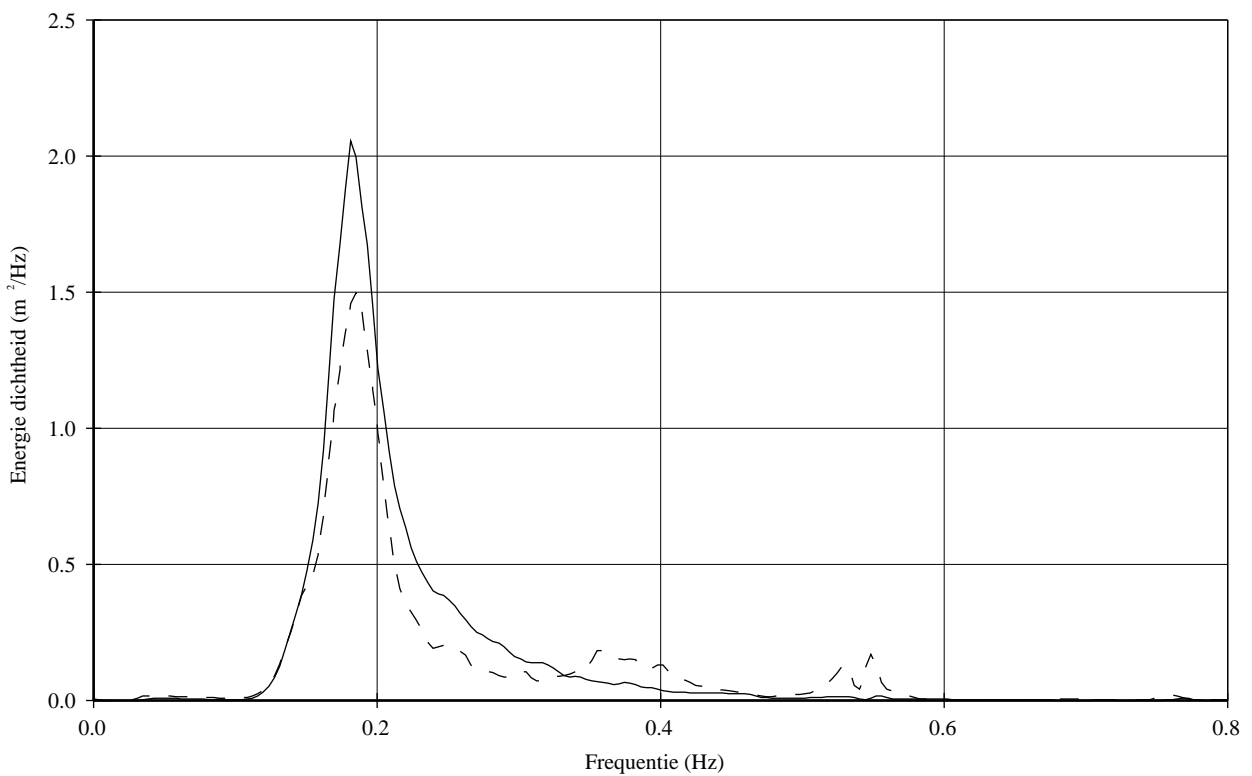
Figuur C.6 Golfspectra en overschrijdingskrommen Dwarsprofiel 4A/4B

Figuur C.7 Golfspectra en overschrijdingskrommen Dwarsprofiel 5

Figuur C.8 Golfspectra en overschrijdingskrommen Dwarsprofiel 6



— Inkomend(WHM,1,2,3)
 - - - Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
 ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

T102

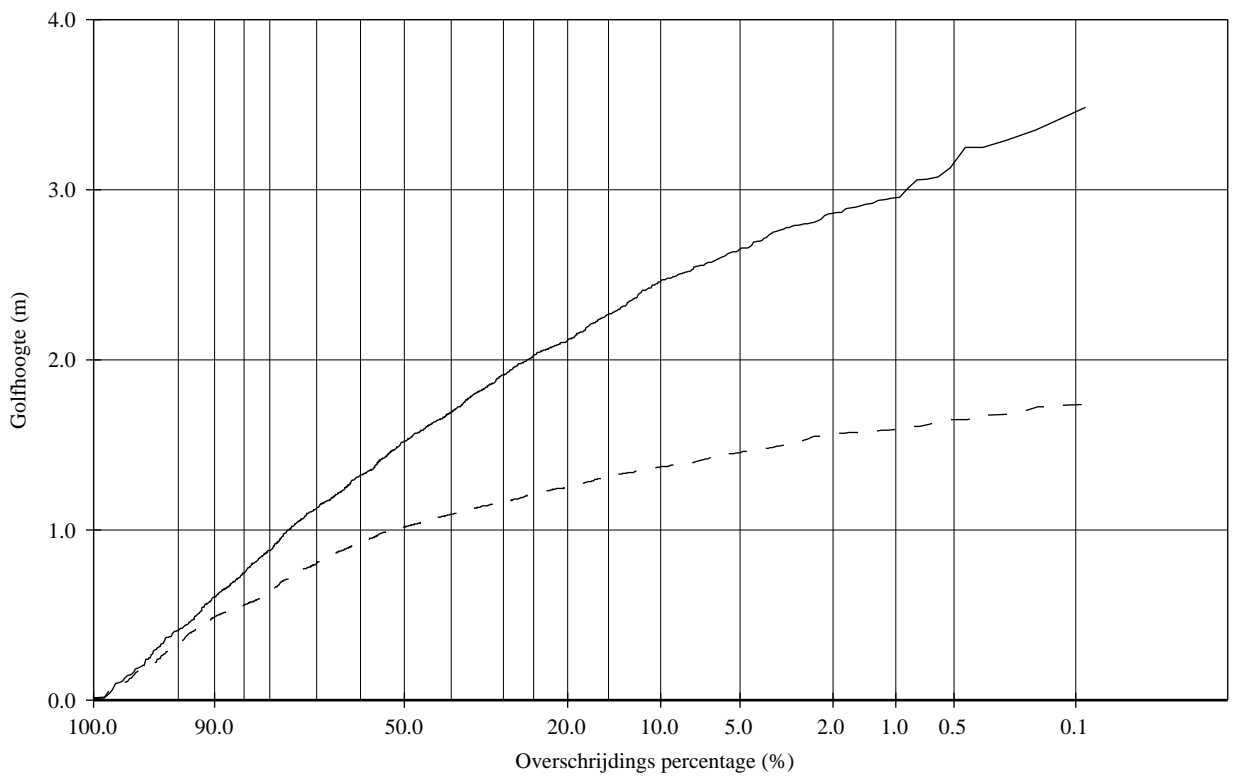
DP2

Inkomend

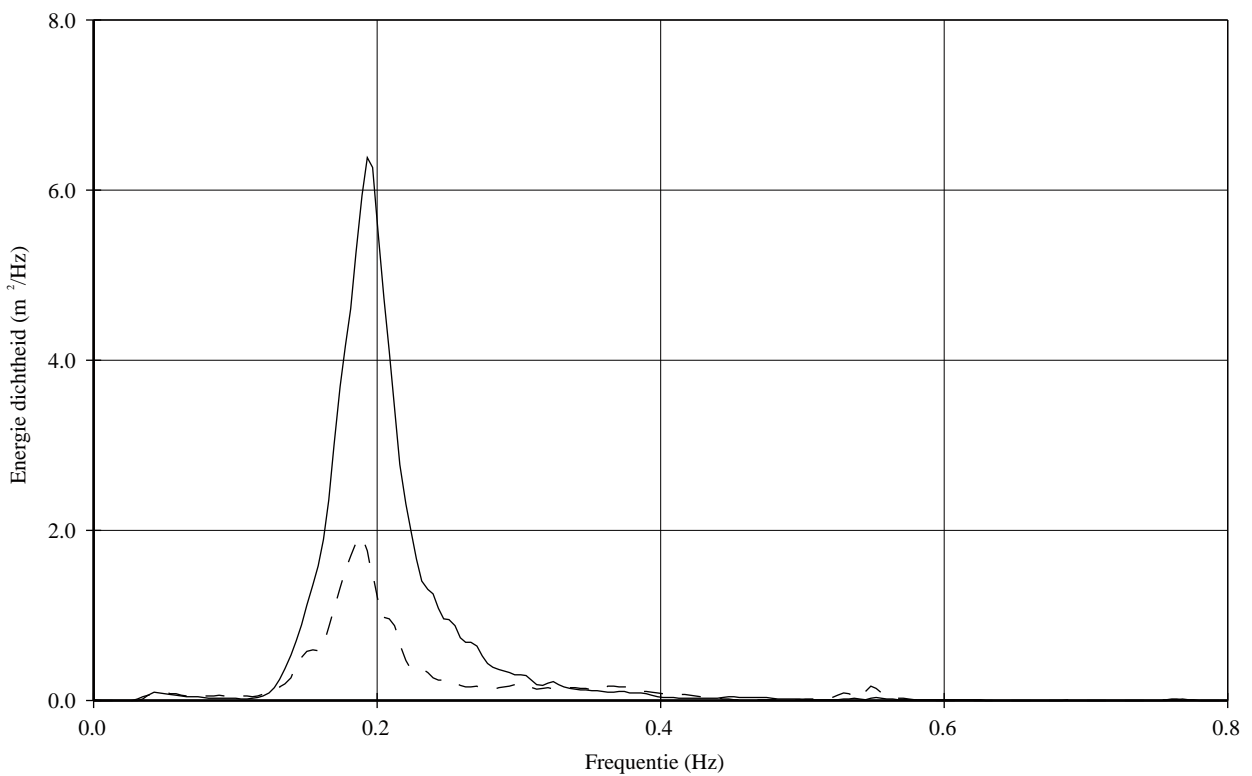
Deltares

1207631

FIG. C.2.a



————— Inkomend(WHM,1,2,3)
 - - - - - Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
 ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

T215

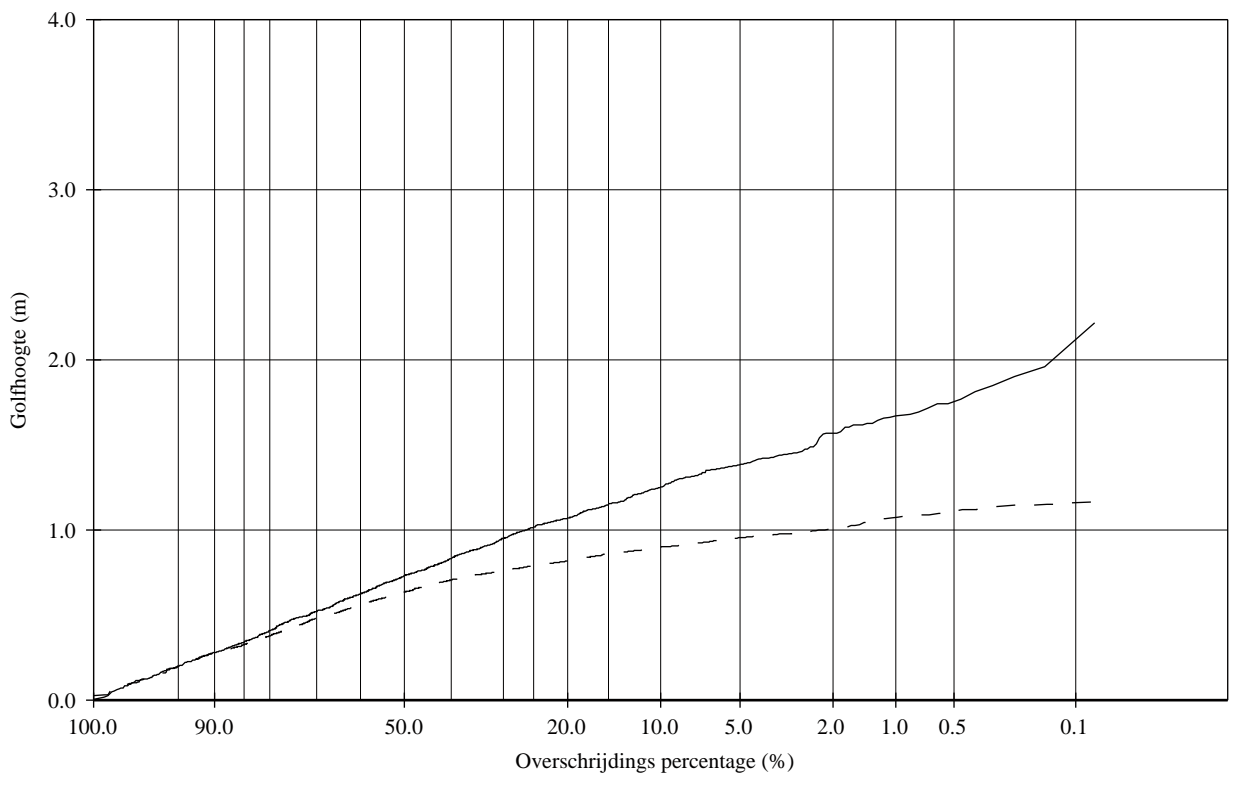
DP3A

Inkomend

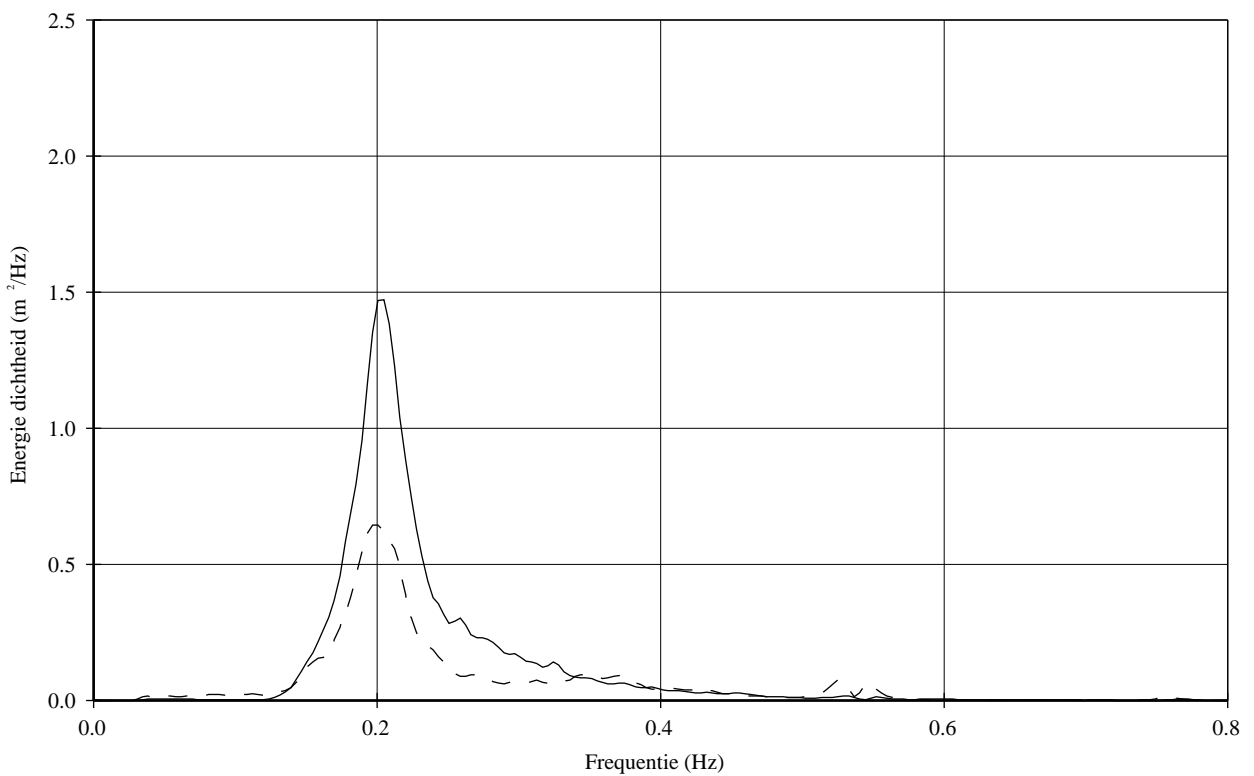
Deltares

1207631

FIG. C.2.b



————— Inkomend(WHM,1,2,3)
 - - - - - Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
 ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

T601

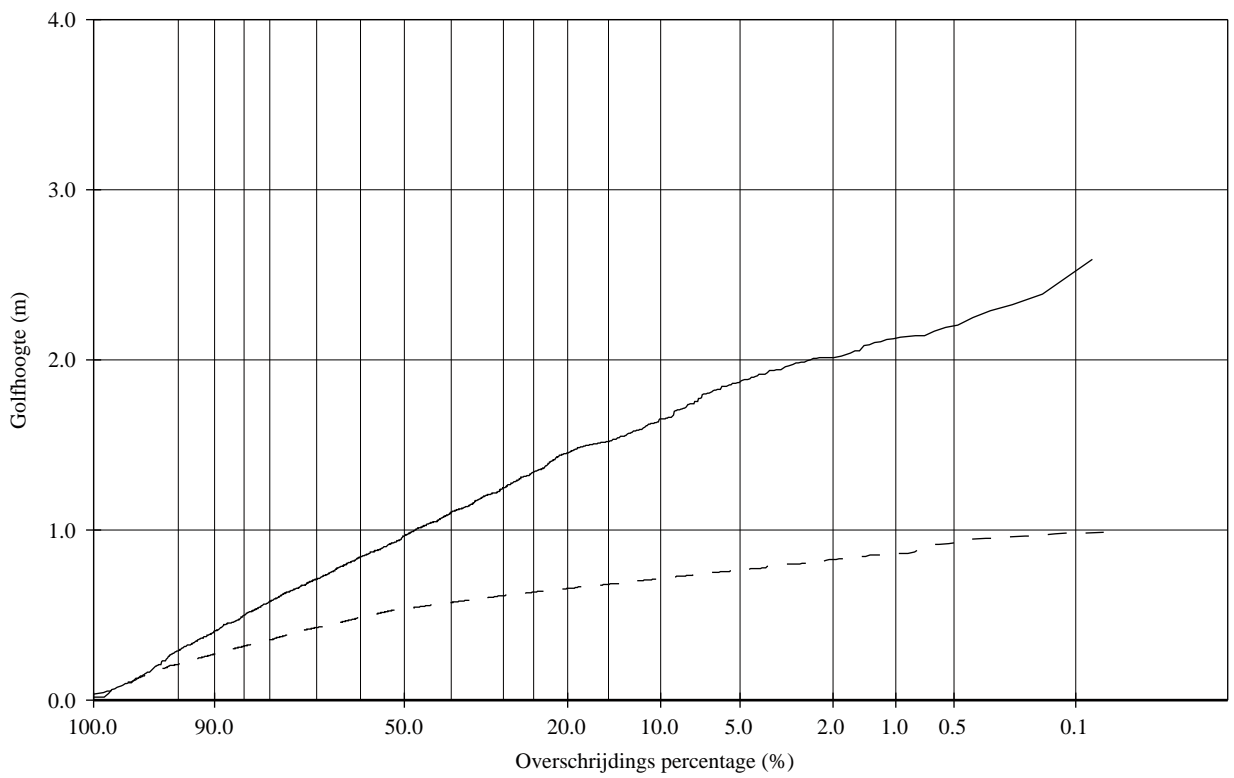
DP6

Inkomend

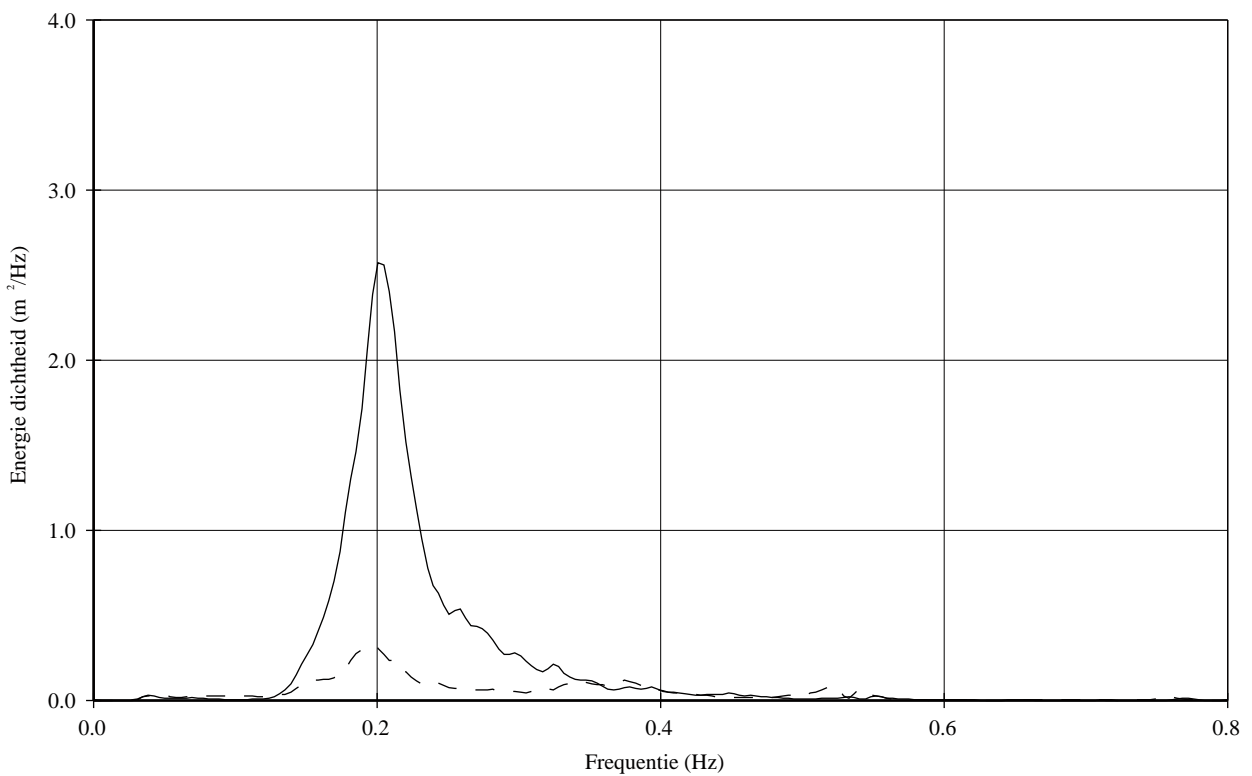
Deltares

1207631

FIG. C.2.c



— Inkomend(WHM,1,2,3)
 - - - Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
 ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

T501

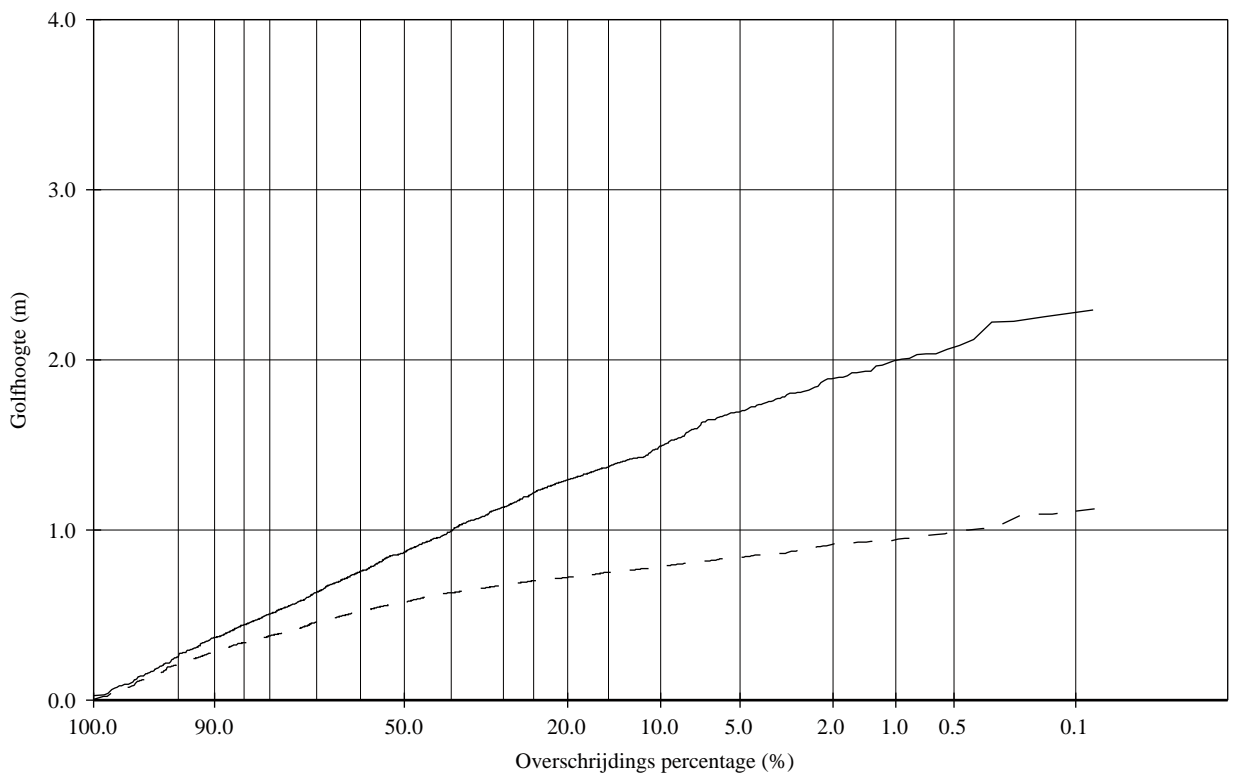
DP5

Inkomend

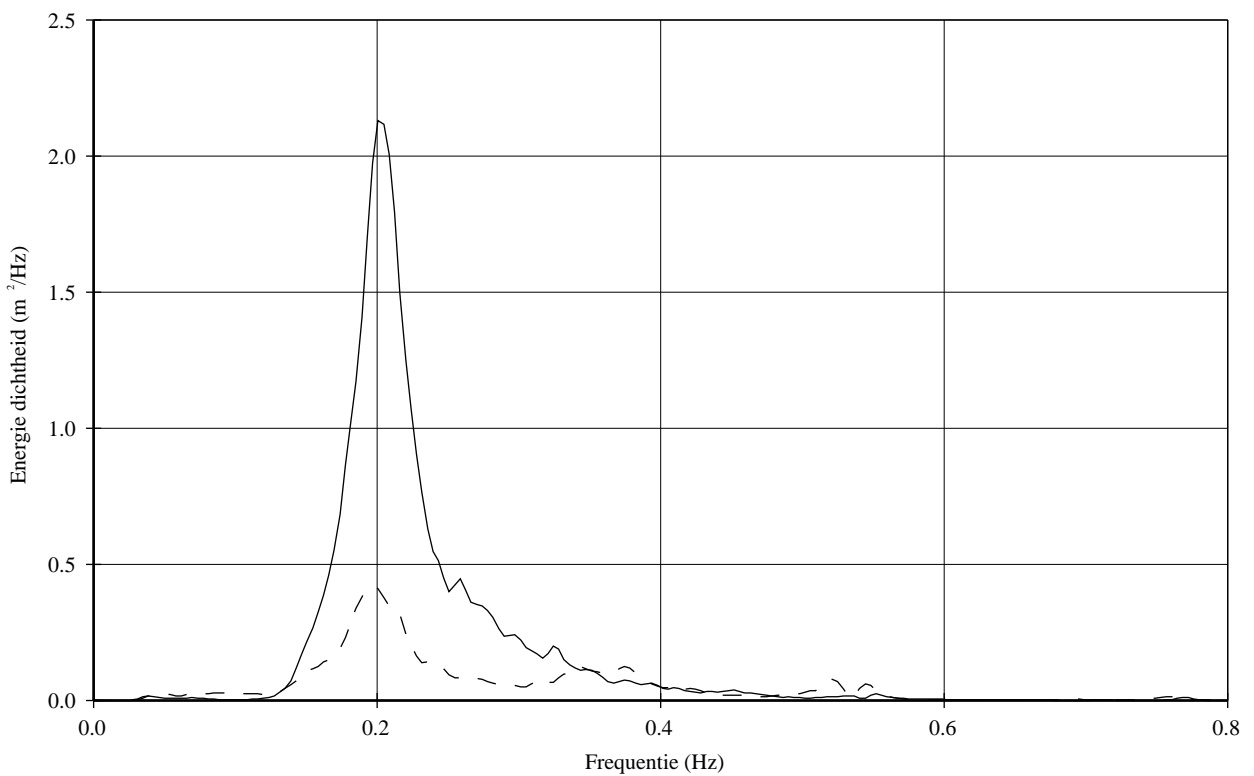
Deltares

1207631

FIG. C.2.d



— Inkomend(WHM,1,2,3)
 - - - Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
 ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

T401

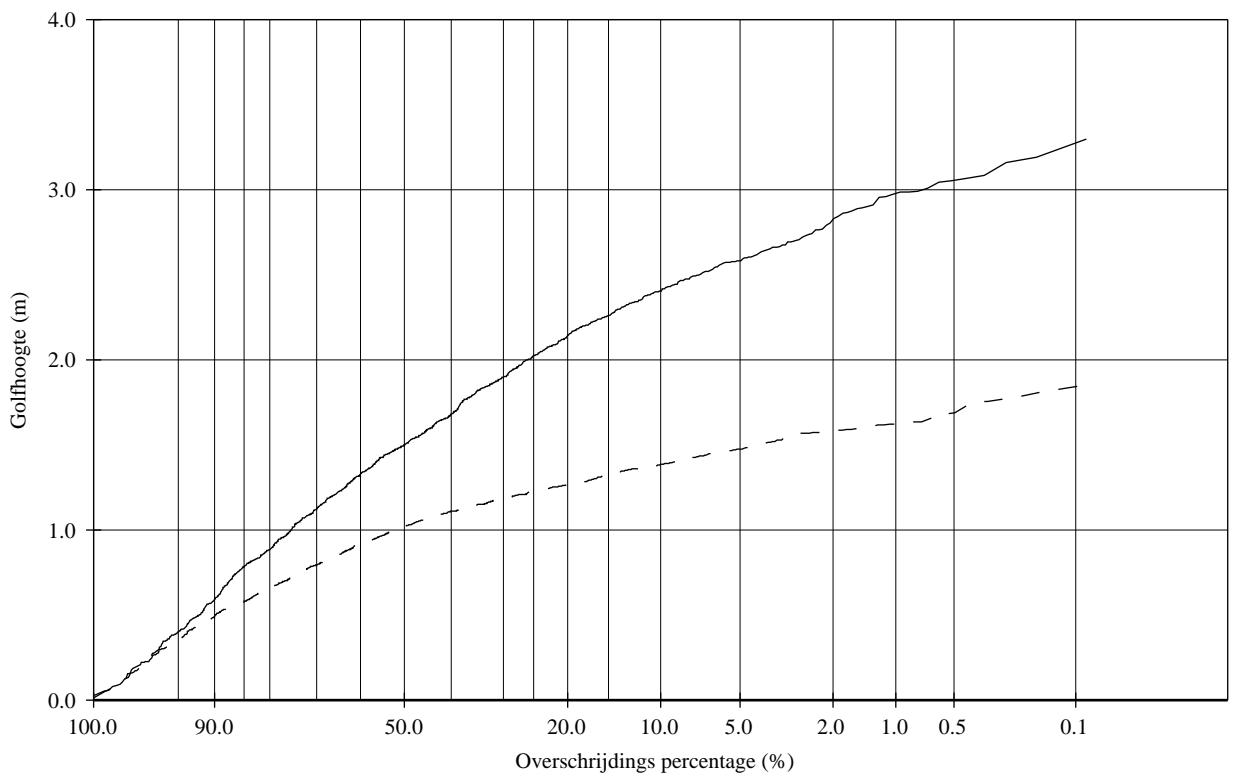
DP4A/4B

Inkomend

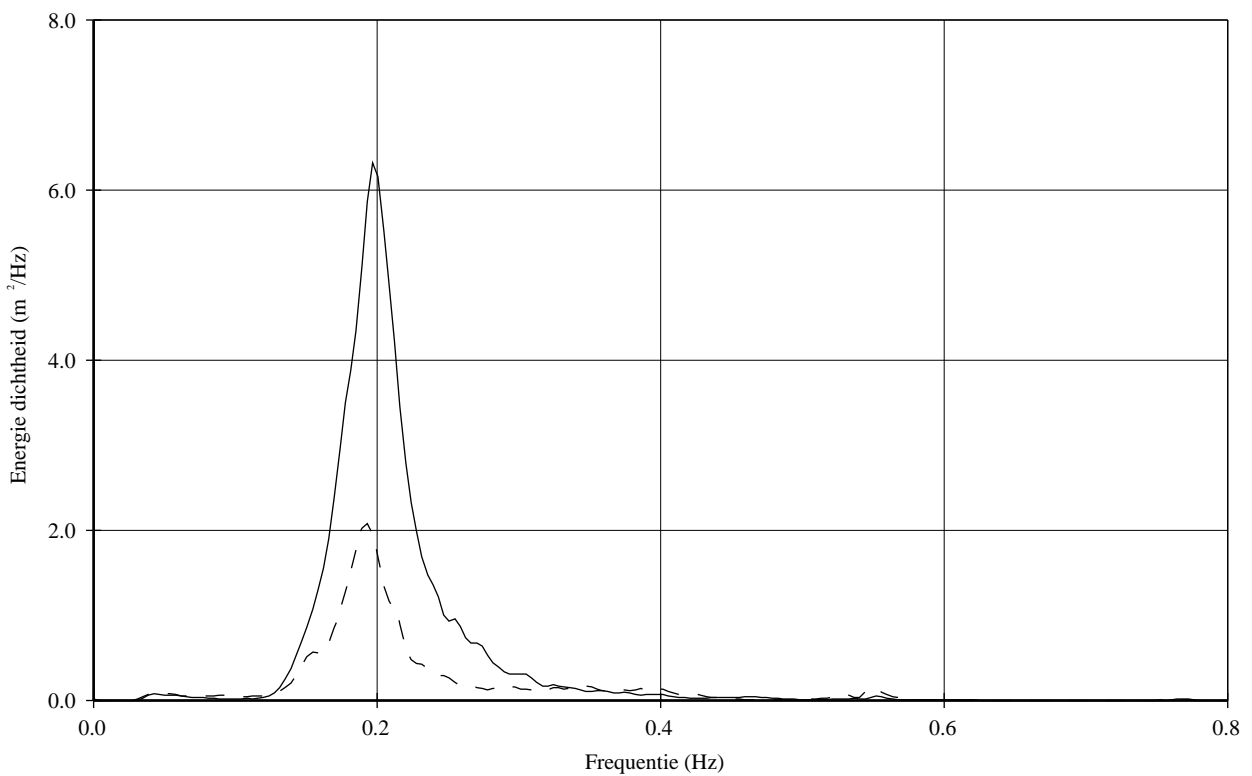
Deltares

1207631

FIG. C.2.e



— Inkomend(WHM,1,2,3)
 - - - Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
 ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

T301

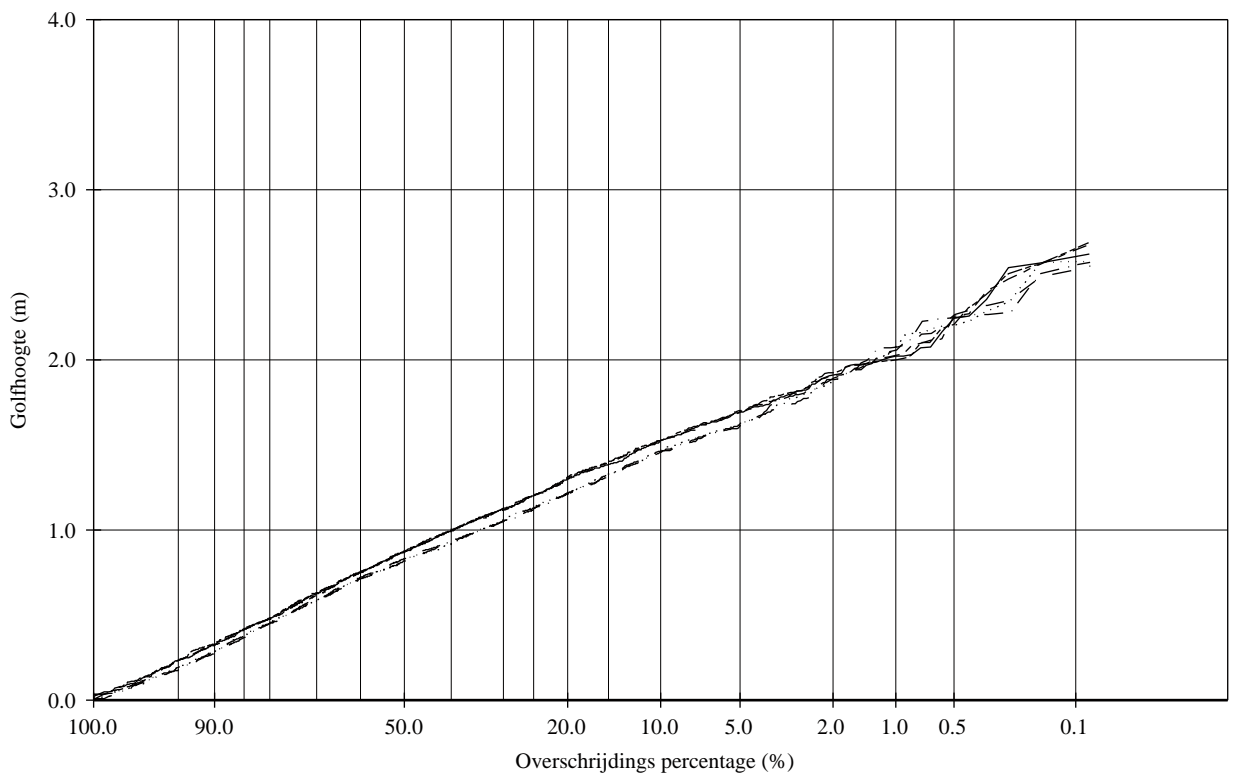
DP3C

Inkomend

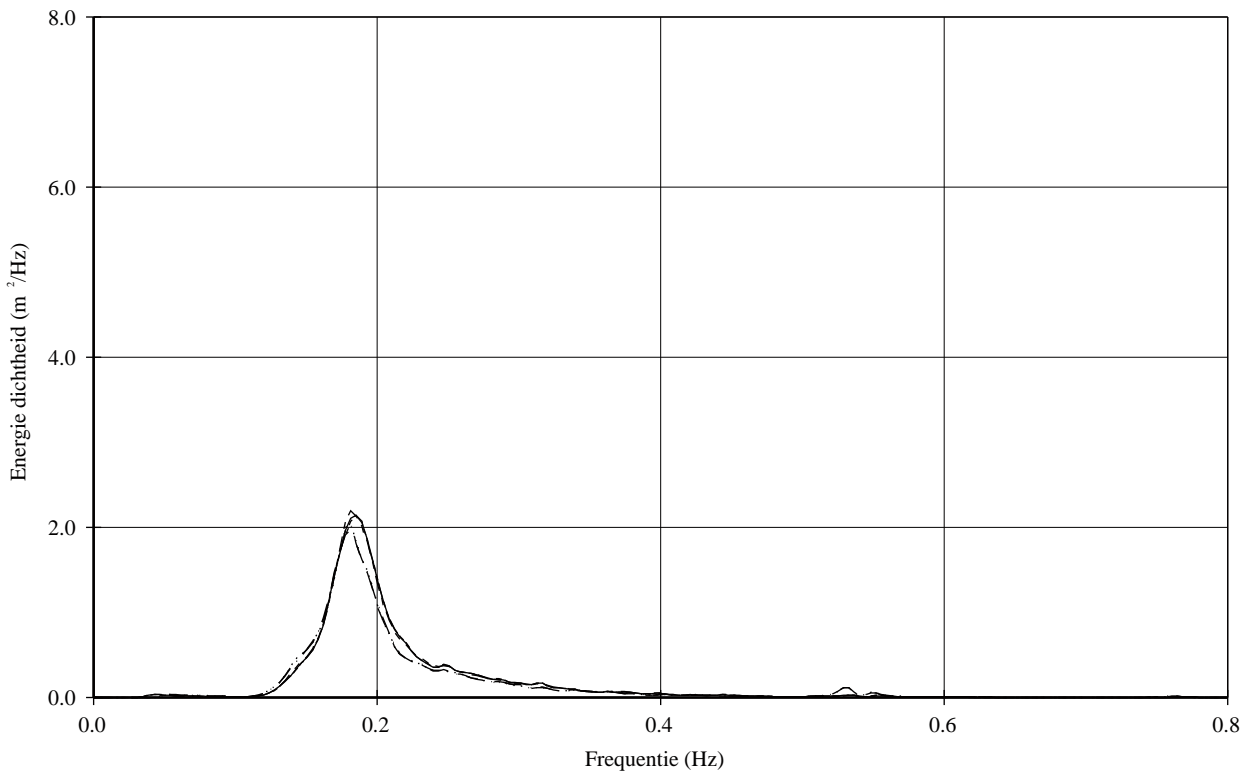
Deltares

1207631

FIG. C.2.f



- P101 Inkomend(WHM,1,2,3)
- P102 Inkomend(WHM,1,2,3)
- P103 Inkomend(WHM,1,2,3)
- - - - - P101 Inkomend(WHM,4,5,6)
- · - · - P102 Inkomend(WHM,4,5,6)
- · · · · P103 Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

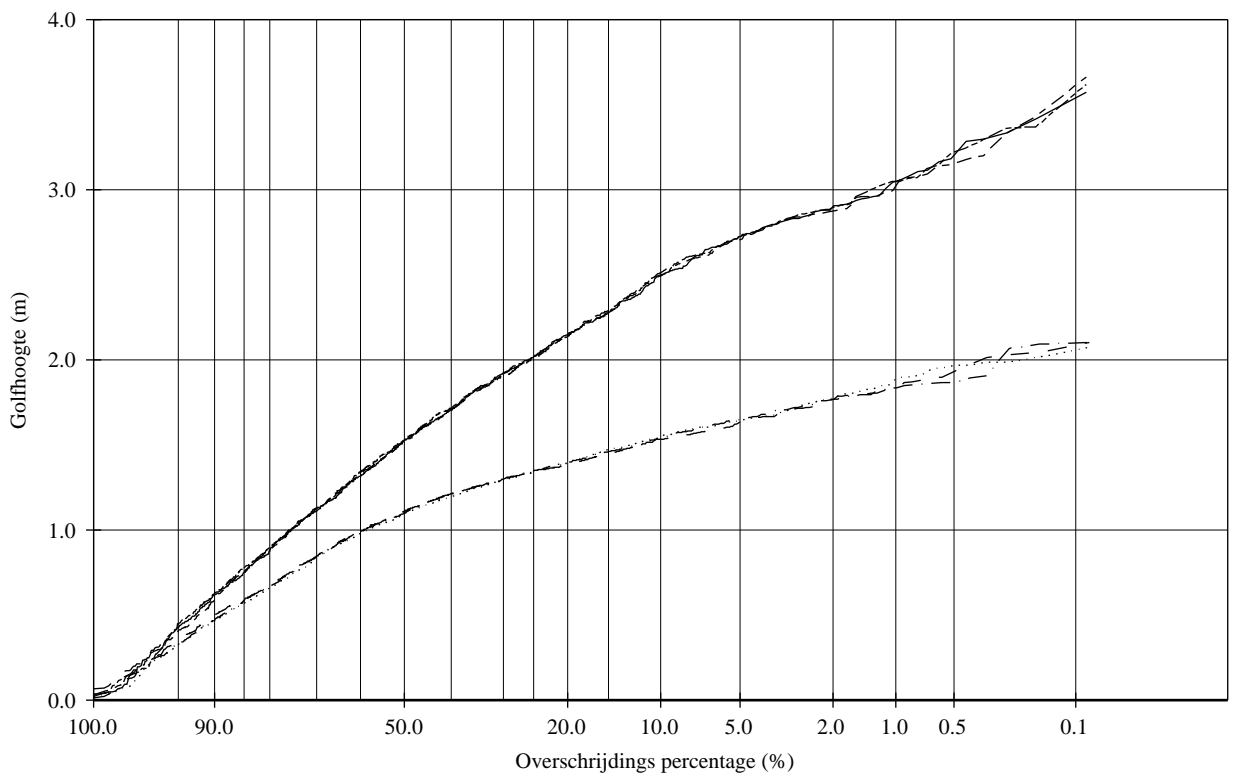
DP2

Inkomend

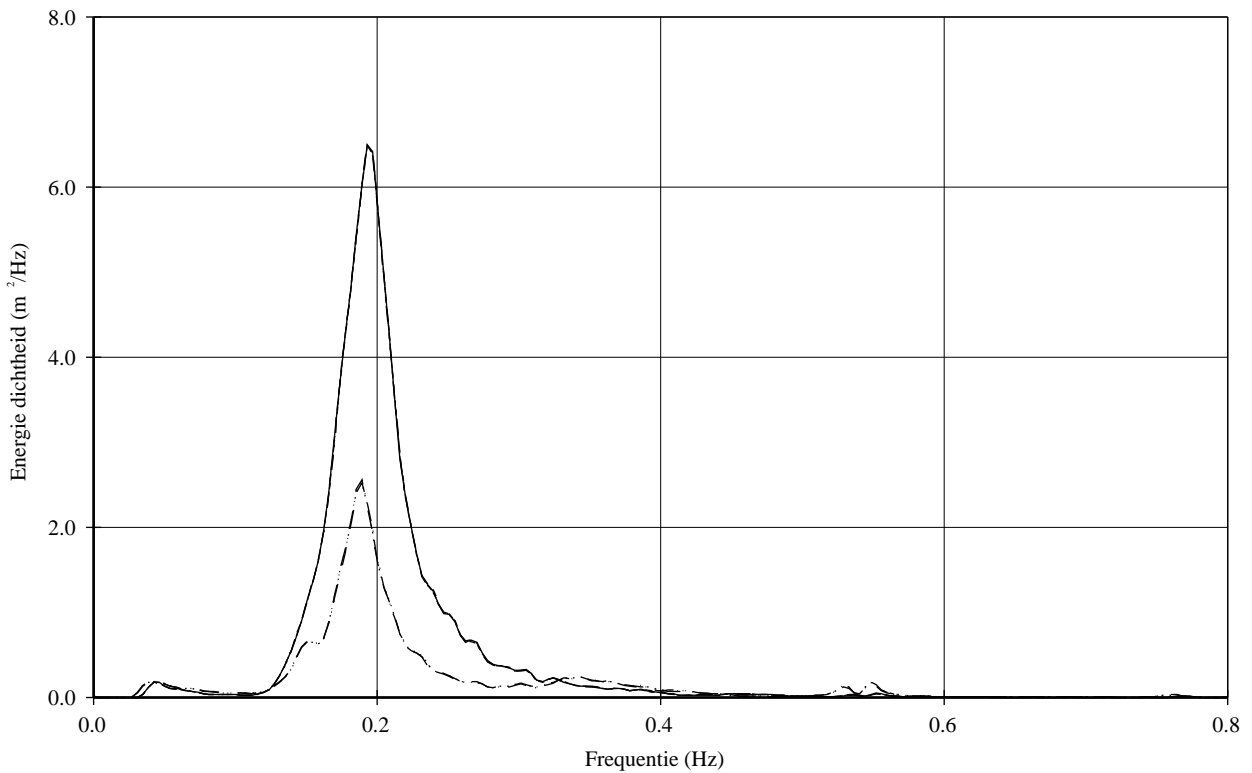
Deltares

1207631

FIG. C.3



————— P201 Inkomend(WHM,1,2,3) - - - - - P201 Inkomend(WHM,4,5,6)
 - - - - - P202 Inkomend(WHM,1,2,3) - · - · - P202 Inkomend(WHM,4,5,6)
 ······· P203 Inkomend(WHM,1,2,3) ······· P203 Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

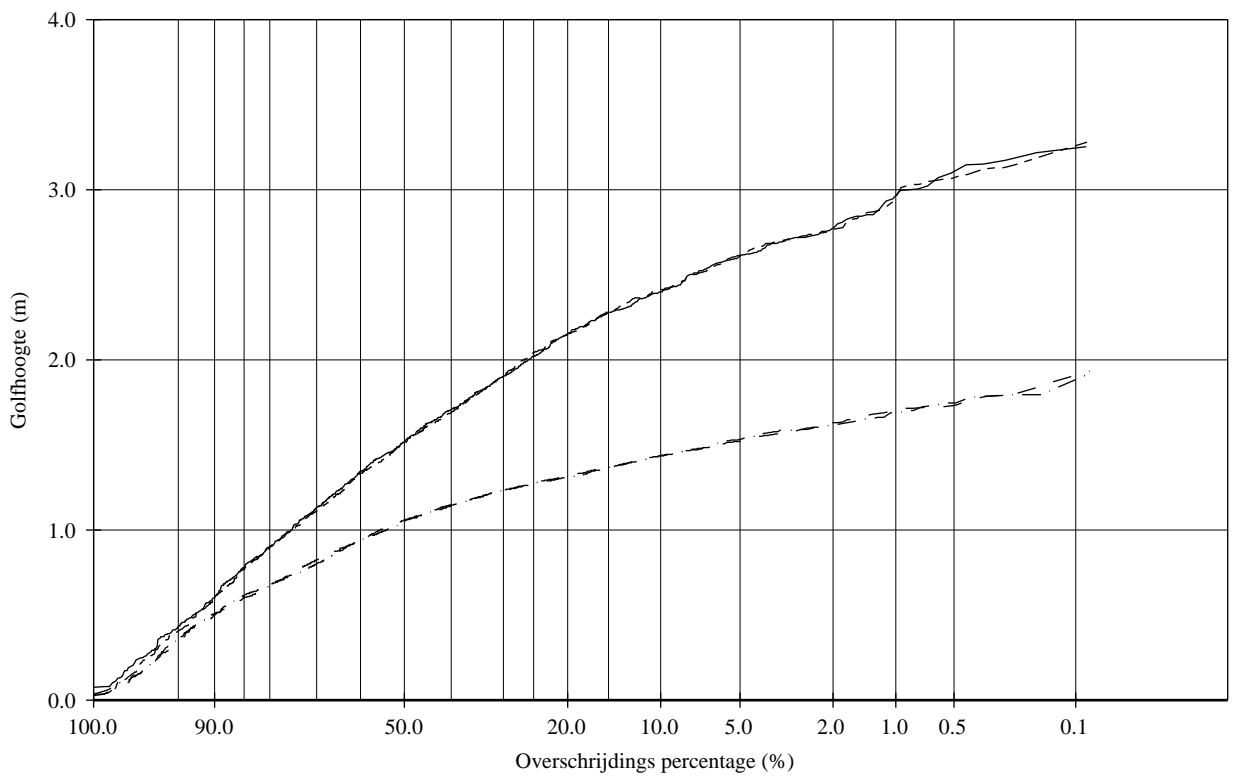
DP3A

Inkomend

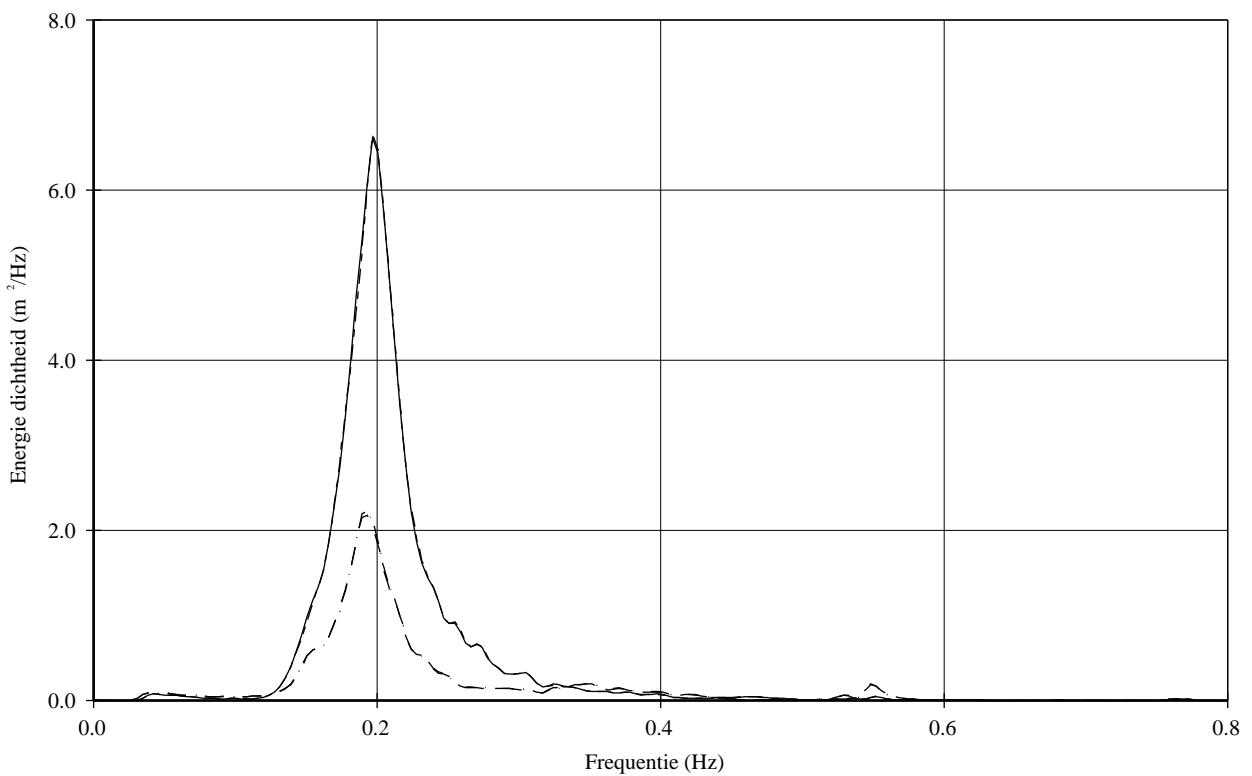
Deltares

1207631

FIG. C.4



————— P303 Inkomend(WHM,1,2,3) - - - - - P303 Inkomend(WHM,4,5,6)
 - - - - - P304 Inkomend(WHM,1,2,3) - · - · - P304 Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

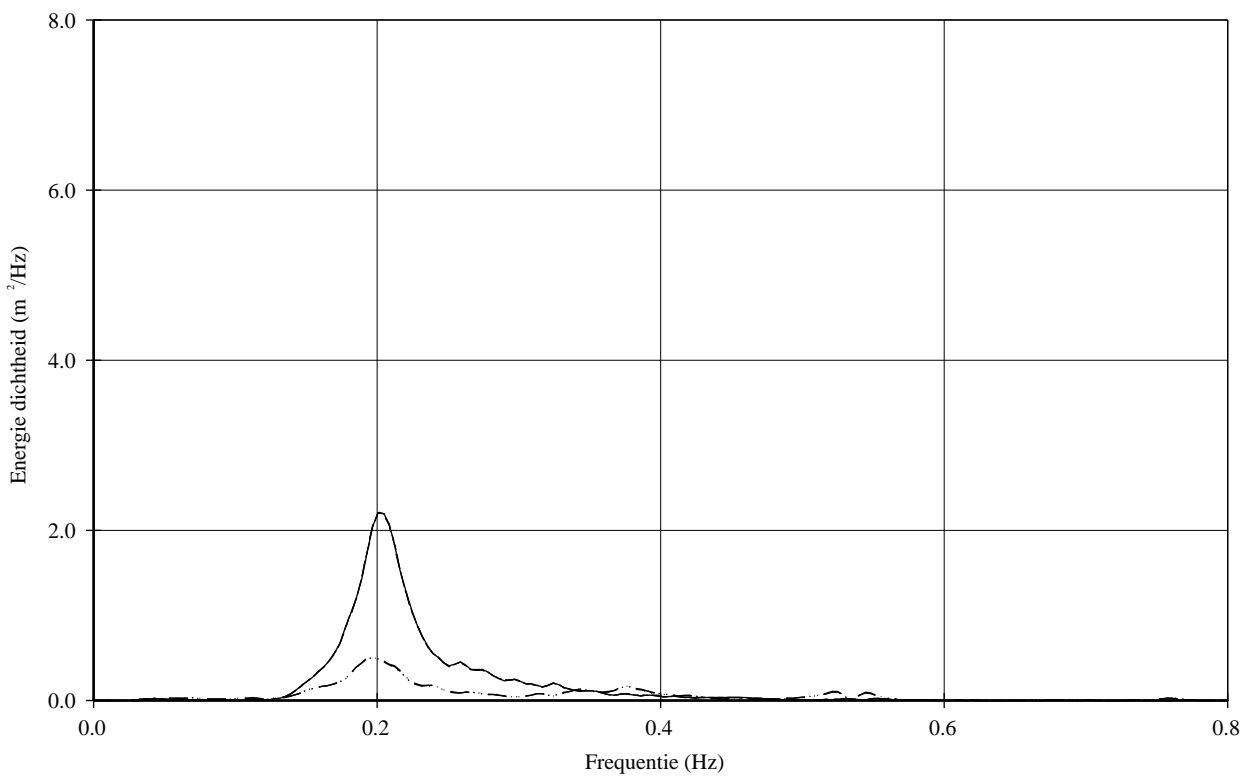
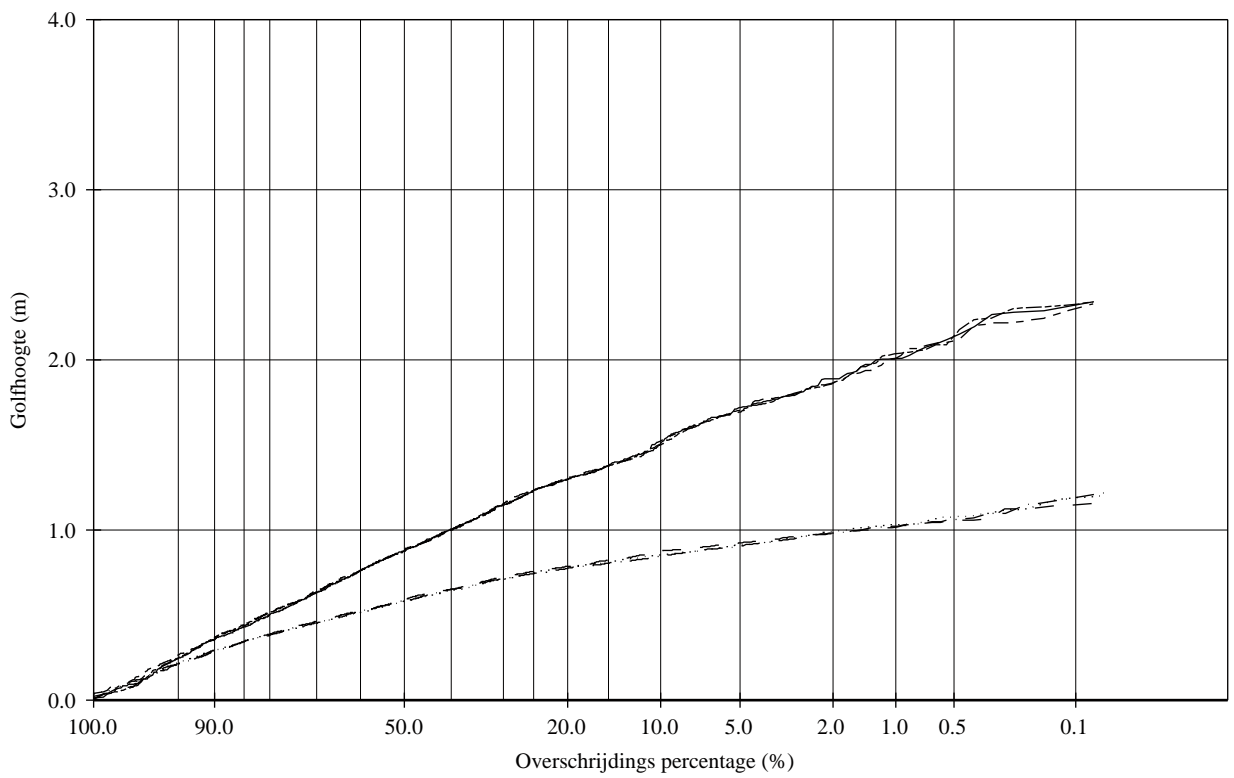
DP3C

Inkomend

Deltares

1207631

FIG. C.5



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

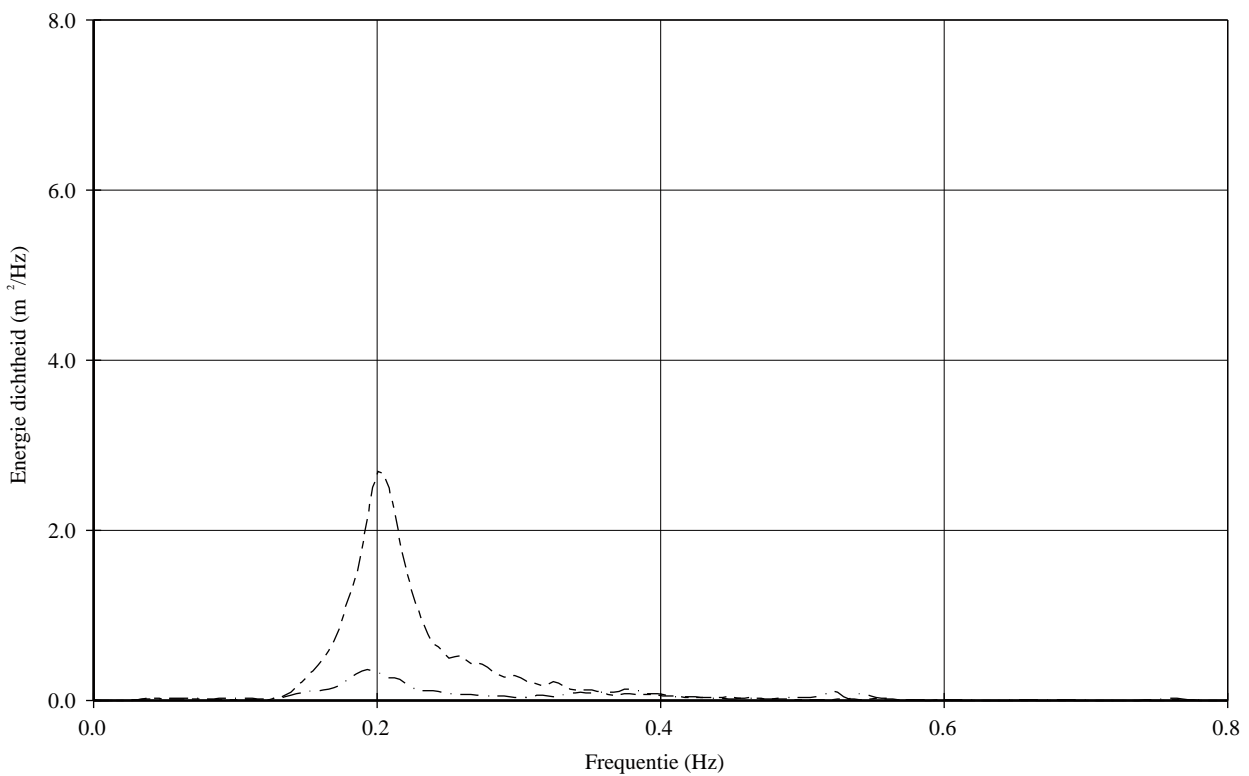
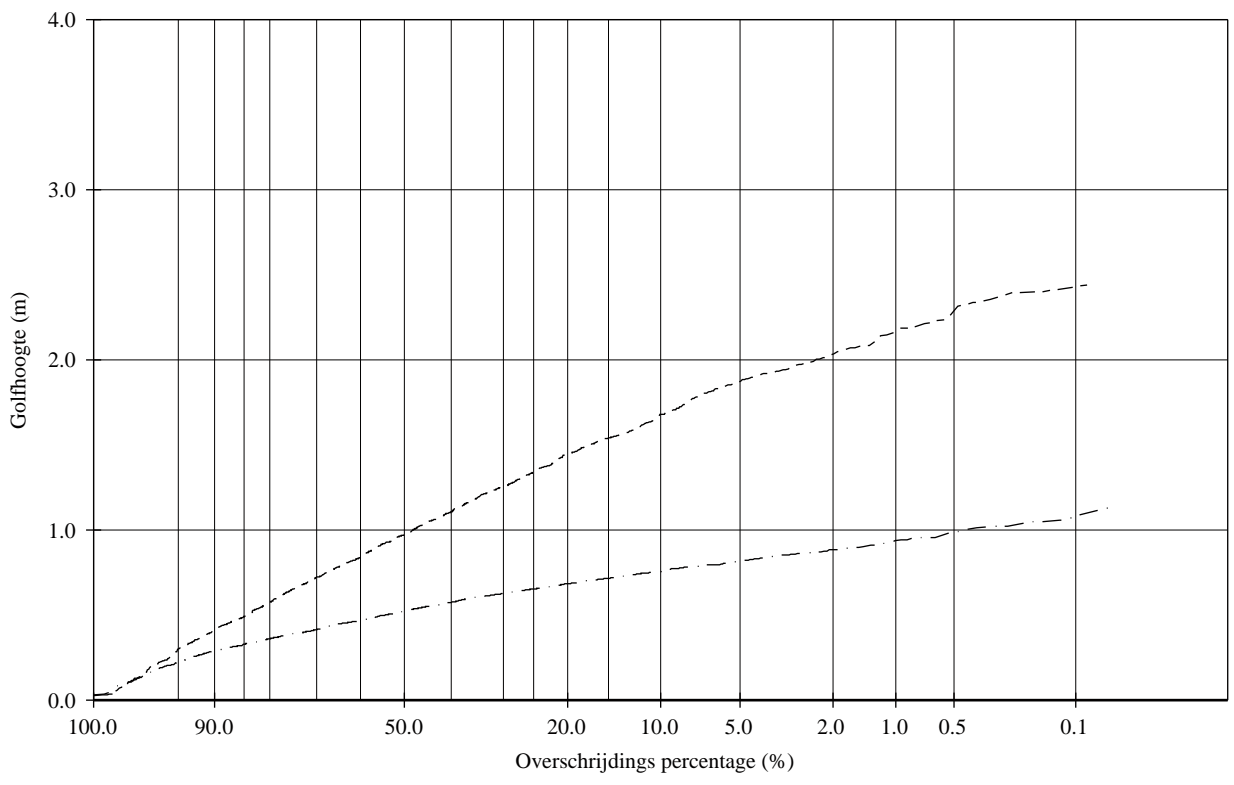
DP4A/4B

Inkomend

Deltares

1207631

FIG. C.6



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

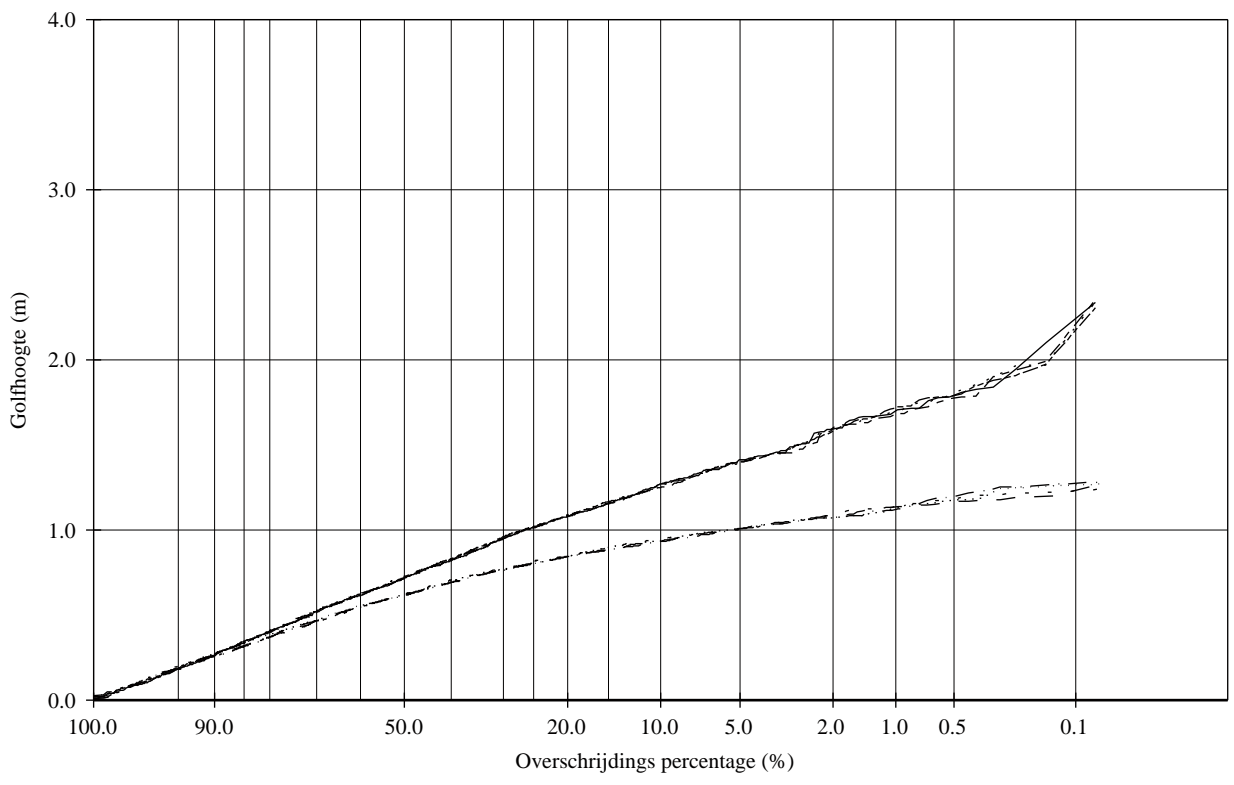
DP5

Inkomend

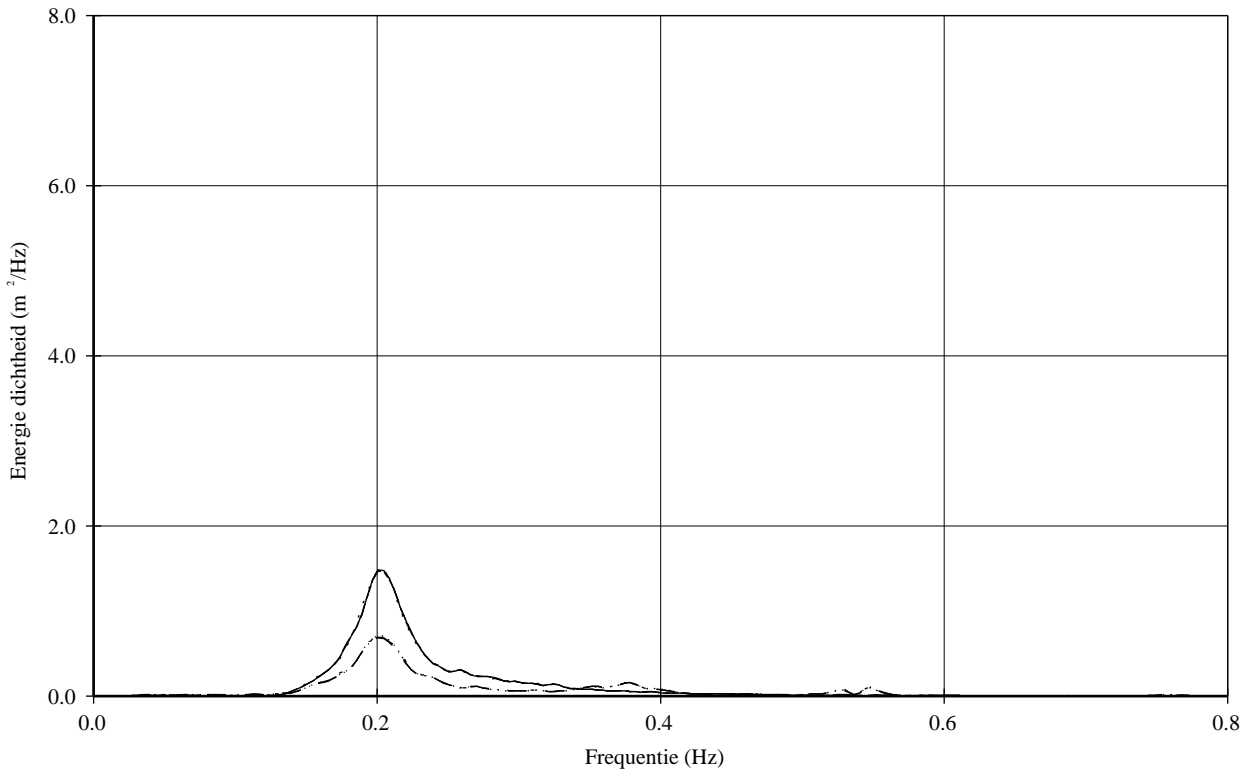
Deltares

1207631

FIG. C.7



- P601 Inkomend(WHM,1,2,3)
- P602 Inkomend(WHM,1,2,3)
- - - - - P603 Inkomend(WHM,1,2,3)
- P604 Inkomend(WHM,1,2,3)
- - - - - P601 Inkomend(WHM,4,5,6)
- P602 Inkomend(WHM,4,5,6)
- P603 Inkomend(WHM,4,5,6)
- P604 Inkomend(WHM,4,5,6)



OVERSCHRIJDINGS KROMMES EN
ENERGIEDICHTHEIDS SPECTRA

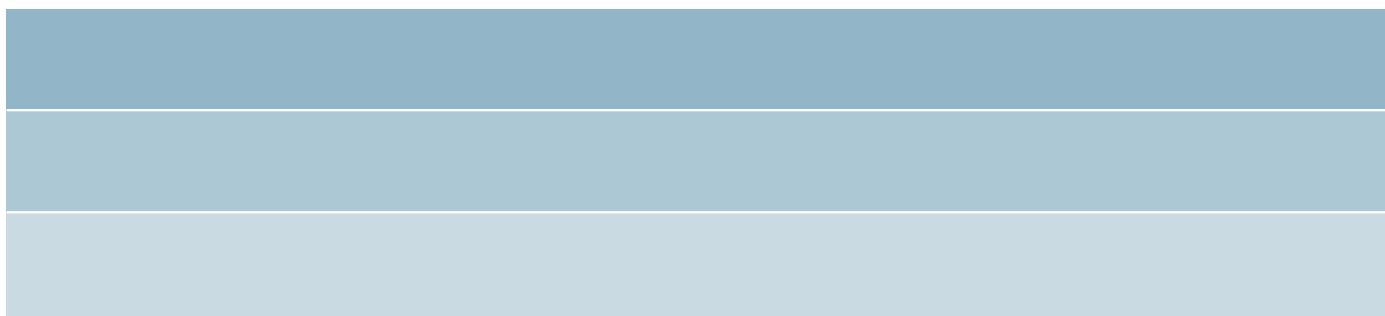
DP6

Inkomend

Deltares

1207631

FIG. C.8



Deltares