

Invloed waterdiepte op golfoverslag

Numerieke studie



Invloed waterdiepte op golfoverslag

Numerieke studie

Titel

Invloed waterdiepte op golfverslag

Project

11203682-015

Kenmerk

11203682-015-ZWS-0001

Pagina's

29

Trefwoorden

Invloed waterdiepte, Golfverslagdebiet

Samenvatting

Op basis van Scheldegoot experimenten in 2018 is aangetoond dat de waterdiepte invloed heeft op het golfverslagdebiet. De uitgevoerde Scheldegoot testen zijn gedaan voor een variatie in golfsteilheid, kruinhoogte en waterdiepte. Om ook de invloed voor verschillende talud-hellingen te valideren, zijn numerieke sommen gebruikt. De resultaten van de fysieke experimenten zijn gebruikt als benchmarkdata om het numeriek model te kalibreren. Op basis van een gekalibreerd numeriek model zijn variaties in talud-hellingen gemodelleerd, waaruit volgt dat de invloed van de waterdiepte hierin ook aanwezig is. Om ook de fysica achter de invloed waterdiepte te begrijpen zijn meerdere hypothesen beschreven, waarbij het effect van de golfhoogteverdeling in detail is uitgewerkt. Uit deze analyse blijkt dat de volumes in de staart van de volumeverdeling lager zijn bij een ondiepte, maar dat dit verschil niet de verschillen in golfverslagdebieten kan verklaren voor de verschillende waterdieptes. Dit suggereert dat vooral een combinatie van factoren de invloed van de waterdiepte veroorzaakt. Tenslotte is een invloedsfactor voor de waterdiepte bepaald op basis van de dimensieloze golfhoogte (H_{m0}/d), welke gebruikt kan worden om de invloed van de waterdiepte te verdisconteren in de TAW (2002) formulering.

Referenties

KPP-VOW – HV02 2019 – Versterking Onderzoek Waterveiligheid

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	sept. 2019	M.P. de Ridder		M.R.A. van Gent		D.J. Walstra	
		P. van Steeg					
2.0	sept. 2019	M.P. de Ridder		M.R.A. van Gent		D.J. Walstra	
		P. van Steeg					
3.0	Okt. 2019	M.P. de Ridder		M.R.A. van Gent		D.J. Walstra	
		P. van Steeg					

Status

definitief

Inhoud

Summary

Lijst met Symbolen	i
1 Introductie	1
2 Numerieke experimenten	3
2.1 Introductie	3
2.2 Numerieke opstelling	3
2.3 Validatie	4
2.4 Productiesommen	4
2.5 Metingen	7
3 Analyse numerieke en fysieke experimenten	9
3.1 Fysieke resultaten	9
3.2 Numerieke resultaten	10
3.3 Aanpak implementatie invloed van waterdiepte in rekenmodel	11
3.4 Bepaling van invloedsfactor waterdiepte per test	12
3.5 Correlatie tussen invloedsfactor voor de waterdiepte (γ_d) en de randvoorwaarden	12
3.6 Projectie van invloedsfactor op dataset	15
4 Theoretische beschouwing resultaten	17
4.1 Invloed breking van golven op golfhoogteoverschrijdingskromme	17
4.2 Effect waterdiepte op de setup bij de teen	18
4.3 Niet-lineaire golfvorm	19
4.4 Spectrumvorm	20
5 Praktijkimpact van de invloed waterdiepte	23
6 Conclusies en aanbevelingen	25
6.1 Conclusies	25
6.2 Aanbevelingen	26
6.3 Vervolgstappen voor 2020	27
7 Referenties	29
Bijlage(n)	
A Model set-up OceanWave3D	A-1
B Model set-up OpenFoam	B-1
C Kalibratie Openfoam	C-1
D Validatie OpenFoam	D-1

E Resultaten Validatie OpenFoam	E-1
F Resultaten numerieke en fysieke experimenten	F-1
G Discussie: invloed inkomende spectrale periode $T_{m-1,0}$	G-1
H Invloed waterdiepte op golfoverslagvolumeverdeling	H-1

Summary

Based on Scheldt Flume experiments in 2018, it was shown that the water depth affects the wave overtopping discharge. During these tests, variations in wave steepness, crest height and water depth were studied. By using numerical simulations, the influence of the water depth on the wave overtopping is also verified for different dike slopes. The physical experiments were used as benchmark data to calibrate the numerical model. This calibrated model was used to model different variations in dike slopes, which showed that the effect of the water depth is also visible for a variation in the breaker parameter. To get a better understanding of the relation between the water depth and the overtopping discharge, multiple hypotheses are described.

Only the hypothesis of the volume distribution shape is studied quantitative. This analysis showed that the volume in the tail of the distribution is lower in shallow water, but that this deviation cannot explain the differences in mean overtopping discharge for the different water depths. To incorporate the effect of the water depth into the TAW (2002) equation, an influence-factor is determined as a function of the relative wave height (H_{m0}/d).

Lijst met Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
α	[°]	Helling van het talud.
γ_d	[-]	Invloedsfactor voor de waterdiepte
ξ_0	[-]	Breker parameter
d	[m]	Waterdiepte.
dx	[m]	Horizontale resolutie rekenrooster bij het talud.
H_{m0}	[m]	Spectrale golfperiode berekend als $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$.
$h_{2\%}$	[m]	2% overschrijdingswaarden van de laagdikte op het talud.
L	[m]	Golflengte.
m_0	[m ²]	Spectraal moment berekend als $m_0 = \int S df$ waarin S de energie dichtheid is en f de frequentie.
m_{-1}	[m ²]	Spectraal moment berekend als $m_{-1} = \int f^{-1} S df$ waarin S de energie dichtheid is en f de frequentie.
q_{TAW}	[l/s/m]	Gemiddeld golfoverslag debiet berekend met de TAW (2002) formulering
q	[l/s/m]	Gemiddeld golfoverslag debiet.
R_c	[m]	Kruinhoogte.
$s_{m-1,0}; s_0$	[-]	Diep water golfsteilheid.
$T_{m-1,0}$	[m]	Spectrale periode berekend als $T_{m-1,0} = m_{-1}/m_0$.

1 Introductie

In dit document zijn de werkzaamheden in 2019 van het project 'Invloed waterdiepte op golfoverslag' beschreven (onderdeel van het KPP project Versterking Onderzoek Waterveiligheid).

In Deltares (2018) zijn fysieke experimenten in de Scheldegoet beschreven waarin de invloed van de waterdiepte op het golfoverslagdebiet is onderzocht. De testen zijn uitgevoerd voor verschillende condities waarin de waterdiepte, golfsteilheid en de kruinhoogte is gevarieerd. Voor elke combinatie van golfsteilheid en kruinhoogte is de waterdiepte gevarieerd voor drie verschillende waterdieptes. Op basis van de verkregen resultaten is geconcludeerd dat er een significante invloed is van de waterdiepte voor brekende golven. Vergeleken met de TAW (2002) formulering gaven de testen met de lage waterstand een lager golfoverslagdebiet en de testen met een hoge waterstand een hoger golfoverslagdebiet. Er wordt daarbij opgemerkt dat er volgens de bestaande formuleringen (zoals de TAW, 2002) geen invloed aanwezig is.

Er is getracht de invloed te kwantificeren met een invloedsfactor in de TAW-formulering. Deze aanpak is gebruikelijk om aspecten zoals de ruwheid van het buitentalud, de invloed van de berm en de invloed van schuin invallende golven te verdisconteren. Deze invloedsfactor is naar verwachting afhankelijk van een dimensieloze waterdiepte. Voor brekende golven bleek er een correlatie aanwezig te zijn tussen de dimensieloze waterdiepte en de invloedsfactor in de TAW (2002) formulering. Echter, er is nog geen fysisch onderbouwde analyse uitgevoerd om de invloed van de waterdiepte te verklaren (causaal verband). Daarnaast zijn de testen in de golfgoot uitgevoerd in een beperkt bereik van de verschillende parameters en is het wenselijk om dit bereik te vergroten.

Om die reden zijn in 2019 aanvullende analyses uitgevoerd op basis van numerieke experimenten welke in voorliggend document worden beschreven. Hiertoe zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Validatie en productie sommen van het numerieke model (Hoofdstuk 2);
- Integrale analyse van de resultaten van de numerieke en fysieke experimenten (Hoofdstuk 3);
- Een theoretische beschouwing van de resultaten (Hoofdstuk 4);
- Een rekenvoorbeeld waarin het effect van de waterdiepte wordt gedemonstreerd (Hoofdstuk 5)
- Conclusies en aanbevelingen (Hoofdstuk 6).

2 Numerieke experimenten

2.1 Introductie

Om de golfoverslag numeriek te modelleren is het belangrijk om de oploop en het breken van de golven op het talud nauwkeurig te simuleren. Dit betekent dat het niet volstaat om alleen de oppervlakte uitwijking van het water te modelleren, zoals gedaan wordt in bijvoorbeeld SWASH, XBeach-nh of OceanWave3D. Om ook overslaande golven te modelleren kan gebruik worden gemaakt van een Volume-of-Fluid (VOF) model, waarin per roosterpunt de 'hoeveelheid' water wordt gemodelleerd. Op deze manier kan een brekende golf ook lucht omsluiten in het numerieke model.

Om de numerieke experimenten te valideren is gebruik gemaakt van de fysieke experimenten welke in 2018 in de Scheldegoot van Deltares zijn uitgevoerd. Die experimenten zijn gebruikt als benchmarkdata om de numerieke experimenten te valideren. Hierbij is de volgende aanpak gehanteerd:

- De numerieke opstelling is ontworpen waarbij als uitgangspunt de fysieke modelopstelling in de Scheldegoot is gehanteerd. (Paragraaf 2.2);
- De numerieke opstelling is gevalideerd door de numerieke resultaten te vergelijken met de resultaten welke zijn verkregen in de fysieke testen (Paragraaf 2.3);
- Er zijn numerieke productiesommen uitgevoerd waarbij is gevarieerd met de kruinhoogte, talud-hellingen en waterdiepte (Paragraaf 2.4);
- De golfhoogte, spectrale periode en gemiddelde golfoverslagdebiet is gemeten (Paragraaf 2.5);

2.2 Numerieke opstelling

Voor de numerieke modelopstelling zijn de fysieke experimenten welke in 2018 in de Scheldegoot zijn uitgevoerd als uitgangspunt gehanteerd. De 'numerieke Scheldegoot' is opgedeeld in twee domeinen die apart worden doorgerekend om de rekentijd te beperken (Figuur 2.1). Voor de golftransformatie in de goot is gebruikt gemaakt van OceanWave3D (Paulsen et al., 2014), hierna beschreven als OCW. Voor de golfoverslag is het VOF model, OpenFoam, gebruikt met de Waves2Foam module (Jacobsen et al., 2012).

Het domein van OceanWave3D start op de locatie van het golfschot ($x = 0 \text{ m}$) en loopt door tot het einde van de goot ($x = 42 \text{ m}$). Tijdens de fysieke experimenten was er een voorland met een verhoging van 9 mm aanwezig in de goot welke tevens in het numerieke model is gesimuleerd. De golftransformatie over dit voorland is berekend met OCW. Het domein van OpenFoam begint op ongeveer 1,5 golflengtes vanaf de constructie ($x = 30 \text{ m}$) en loopt door tot het einde van de goot ($x = 42 \text{ m}$). De locatie van de constructie is gelijk aan de locatie in de fysieke experimenten. In OpenFoam is een in de ruimte variërend rekenrooster gebruikt om de rekentijd te reduceren (Zie Bijlage A voor de model setup van OCW en Bijlage B voor de model set-up van OpenFoam). Een kalibratie is uitgevoerd op de viscositeit om de turbulentie correct te modelleren en daarmee de golfoverslag (zie Bijlage C).

Figuur 2.1 Numerieke opstelling van het domein in OCW en OpenFoam. Dit is een schematische tekening en niet op schaal.



2.3 Validatie

Voor de validatie zijn de meetresultaten van de zes fysieke Scheldegoot testen met de steilste golven gebruikt, aangezien deze testen het meest representatief zijn voor stormcondities. Dit zijn testen met dezelfde golfreën (er is dezelfde stuurfile gebruikt waarmee het golfschot wordt aangestuurd), maar met drie verschillende waterdieptes en twee verschillende kruinhoogtes. Daarnaast zijn er twee testen met een lage golfsteilheid gemodelleerd, zodat er twee type breking mechanisme in de validatie aanwezig zijn. Dit zijn twee testen met dezelfde waterdiepte, maar verschillende kruinhoogtes.

Op basis van deze testen is een toepasbaarheidsbereik bepaald. Deze toepasbaarheid is uitgedrukt in de ratio van de representatieve laagdikte en een representatieve roostergrootte (dx). Als representatieve laagdikte is de laagdikte die door 2% van de golfoplopen (ten opzichte van het aantal golven aan de teen van de dijk) wordt overschreden ($h_{2\%}$). In Bijlage D is onderbouwd dat de fout ten aanzien van het gemiddelde golfoverslagdebiet kleiner is dan een factor 2 voor een $h_{2\%}/dx$ groter of gelijk aan 2. Op basis van dit toepasbaarheidsbereik zijn de productiesommen opgezet.

2.4 Productiesommen

De numerieke variatie sommen hebben als doel om de invloed van de waterdiepte te bepalen voor verschillende brekerparameters. De brekerparameter $\xi_{m-1,0}$ is de ratio tussen de taludhelling ($\tan\alpha$) en de wortel van de golfsteilheid ($s_{m-1,0}$):

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_{m-1,0}}} \quad (1)$$

In de fysieke experimenten is de breker parameter gevarieerd door de golfsteilheid te variëren. Bij de numerieke experimenten wordt de brekerparameter tevens gevarieerd door de taludhelling te variëren.

Aangezien het niet mogelijk is om alle combinaties door te rekenen, is er voor gekozen om alleen variaties met steile golven door te rekenen. Deze condities zijn vooral van belang tijdens extreme condities en hebben daarom de meeste impact met betrekking tot waterveiligheid. Daarnaast vallen deze condities in de categorie brekende golven (waar de invloed van de waterdiepte significant bleek). De sommen zijn uitgevoerd op dezelfde schaal als de fysieke experimenten, zodat dezelfde model set-up als de validatie gebruikt kan worden.

Het testprogramma is gebaseerd op de condities met een golfsteilheid van $s_{m-1,0} = 0,0414$. Vergelijkbaar met de fysieke experimenten zijn de variaties doorgevoerd voor drie verschillende waterdieptes (zie Tabel 2.1). Dit zijn dezelfde waterdieptes als in de fysieke experimenten, wat

betekent dat ook dezelfde stuurfiles gebruikt kunnen worden. Naast de waterdiepte is er een variatie in de taludhelling en de kruinhoogte. Taludhellingen van 1:3, 1:4 en 1:6 zijn doorgerekend. Om het effect van de golfoverslagverdeling te bepalen zijn er per waterdiepte en taludhelling twee kruinhoogtes doorgerekend. De kruinhoogte is bepaald aan de hand van de TAW (2002) formule met een overslagdebiet van 2 en 10 l/s/m op prototype schaal (respectievelijk 0,06325 en 0,31623 l/s/m op schaal). Deze waarden zijn gekozen zodat de $h_{2\%}/dx$ (zie Paragraaf 2.3) binnen het toepasbaarheidsbereik vallen. De eigenschappen van de 18 sommen zijn weergegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Variatie voor productiesommen . De waarden in de tabel zijn de target waarden en kunnen dus afwijken van de gemeten waarden.

Variatie in	waarden	Combinaties
Golfoverslagdebiet volgens TAW (2002) q_{TAW} [l/s/m]	2* 10*	2
Taludhelling $\cot \alpha$ [m]	3 4 6	3
Waterdiepte aan de teen van de dijk d [m]	0,6 0,455 0,375	3
Significante golfhoogte aan de teen van de dijk H_{m0} [m]	0,138	1
Spectrale golfperiode aan de teen van de dijk $T_{m-1,0}$ [s]	1,46	1
Totaal		18

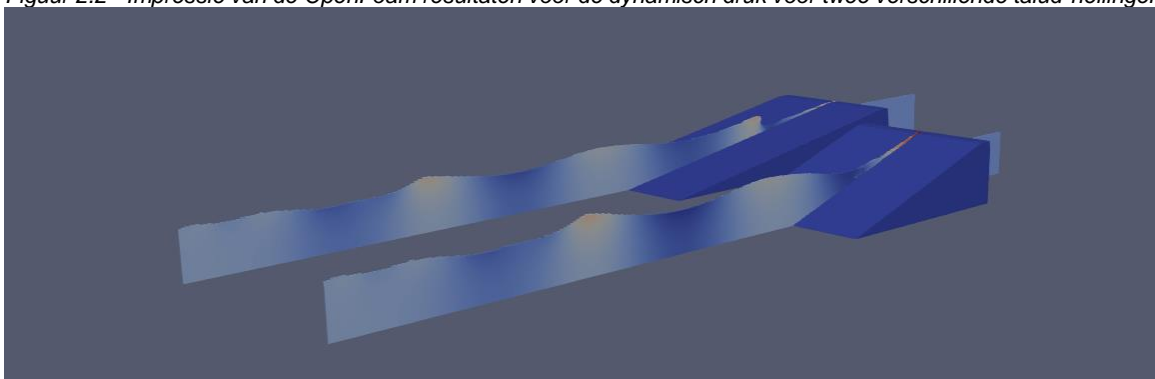
* bij een aangenomen geometrische schaal van $n_L = 10$. De werkelijke overslagdebieten zijn een factor $n_L^{3/2} = 31,6$ kleiner.

Tabel 2.2 Test programma van de numerieke sommen met de doelwaarden. Er wordt benadrukt dat de uiteindelijke gemeten waarden enigszins kunnen afwijken van de hier gegeven doelwaarden. De gemeten waarden zijn weergegeven in Hoofdstuk 4. In de tabel zijn de waterdiepte (d), kruinhoogte (R_c), spectrale golfhoogte (H_{m0}), spectrale periode ($T_{m-1,0}$), taludhelling (α) en golfoverslagdebiet op basis van TAW (2002) weergegeven (q_{TAW}).

naam	d [m]	R_c [m]	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	$\cot \alpha$	q_{TAW} [l/s/m]
T114_1	0,6	0,294	0,138	1,46	3	0,06325
T114_2	0,6	0,215	0,138	1,46	4	0,06325
T114_3	0,6	0,139	0,138	1,46	6	0,06325
T214_1	0,6	0,217	0,138	1,46	3	0,31623
T214_2	0,6	0,158	0,138	1,46	4	0,31623
T214_3	0,6	0,100	0,138	1,46	6	0,31623
T116_1	0,455	0,294	0,138	1,46	3	0,06325
T116_2	0,455	0,215	0,138	1,46	4	0,06325
T116_3	0,455	0,139	0,138	1,46	6	0,06325
T216_1	0,455	0,217	0,138	1,46	3	0,31623
T216_2	0,455	0,158	0,138	1,46	4	0,31623
T216_3	0,455	0,100	0,138	1,46	6	0,31623
T112_1	0,375	0,294	0,138	1,46	3	0,06325
T112_2	0,375	0,215	0,138	1,46	4	0,06325
T112_3	0,375	0,139	0,138	1,46	6	0,06325
T212_1	0,375	0,217	0,138	1,46	3	0,31623
T212_2	0,375	0,158	0,138	1,46	4	0,31623
T212_3	0,375	0,100	0,138	1,46	6	0,31623

Het gebruikte rekenrooster tijdens deze productiesommen is gelijk aan het rekenrooster dat is gebruikt bij de validatie van het numerieke model (zie Paragraaf 2.3 en Figuur 2.2 voor een impressie). Alleen voor de sommen met een taludhelling van 1:6 en een waterdiepte van 0,6 m, is het domein vergroot (Test T114_3 en Test T214_3). In plaats van een domein van 11 m is het domein bij die twee numerieke testen 1 meter langer, omdat de constructie anders niet binnen het domein past. Verder zijn alle eigenschappen (resolutie en sponslagen) gelijk gebleven.

Figuur 2.2 Impressie van de OpenFoam resultaten voor de dynamisch druk voor twee verschillende talud-hellingen.



2.5 Metingen

De gemeten parameters zijn het golfoverslagdebiet en de golfcondities aan de teen.

Golfoverslagdebiet

Voor elk van de numerieke testen is het gemiddelde golfoverslagdebiet bepaald op de kruin van het talud. De metingen zijn gedaan voor een periode van circa 1000 golven, waarbij de eerste 60 seconden van de simulatie niet zijn gebruikt zodat opstart effecten geen effect hebben op de resultaten.

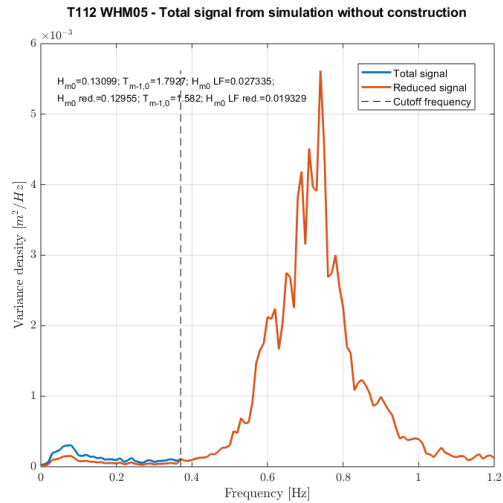
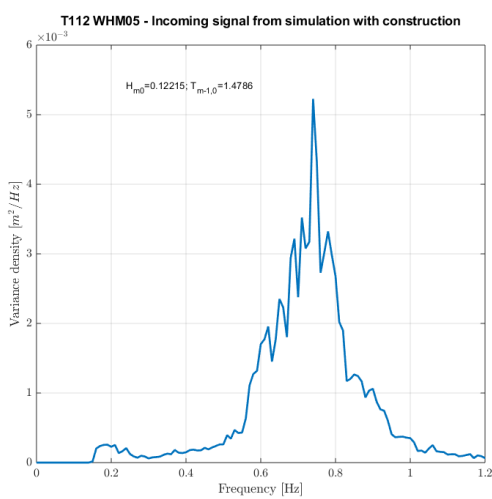
Golfcondities aan de teen

De golfcondities aan de teen worden uitgedrukt in de inkomende significante golfhoogte H_{m0} en de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$. Om de *inkomende* condities te filteren uit de totale condities (inkomend en gereflecteerde golven) zijn twee methodieken gebruikt:

- 1 Een splitsing op basis van lineaire golftheorie met meerdere golfhoogte meters (Zelt & Skjelbreia, 1993). Voor frequenties waarbij geen splitsing mogelijk is de energie van inkomende signaal op 0 gezet (zie linker paneel Figuur 2.3). Deze methode komt overeen met de gebruikte methode in de fysieke experimenten welke zijn beschreven in Deltares (2018). Naast de methode, zijn ook de dezelfde instellingen en locaties van de waterstandsmeters gebruikt als de analyse van de fysieke experimenten.
- 2 Een extra simulatie zonder constructie is gebruikt om de inkomende condities te bepalen. Bij deze manier wordt verondersteld dat de inkomende golfcondities gelijk zijn aan de totale golfcondities aangezien er geen reflecties optreden. Hierbij is de sponslaag aan het einde van de numerieke goot verlengd (4 m), zodat de meeste golven worden geabsorbeerd. Alleen voor de lange golven is de sponslaag wellicht te kort om reflecties te voorkomen. Om hiervoor te corrigeren is een reflectie coëfficiënt van 0,5 aangenomen voor alle golven in het golfspectrum met een frequentie kleiner dan $f_p/2$ (zie rechter paneel in Figuur 2.3).

Methode 2 heeft de voorkeur omdat in ondiep water er veel energie aanwezig is bij de lange golven en deze energie in Methode 1 niet wordt meegenomen. Daarnaast zijn de golven in ondiep water niet lineair, waardoor een splitsing op lineaire theorie waarschijnlijk niet geldig meer is. De analyse is daarom uitgevoerd op basis van de resultaten verkregen bij Methode 2. De vergelijking met de TAW (2002) voor deze twee methodes is weergegeven in Bijlage G.

Figuur 2.3 Spectrum verkregen volgens de twee verschillende methodes. Links is op basis van een splitsing op basis van lineaire golftheorie in een simulatie met de constructie. Rechts is het spectrum weergegeven van het totale signaal in een simulatie zonder constructie en sponslaag bij het eind van de goot. Daarnaast is voor het laagfrequentie deel een reflectie coëfficiënt van 0,5 aangenomen.

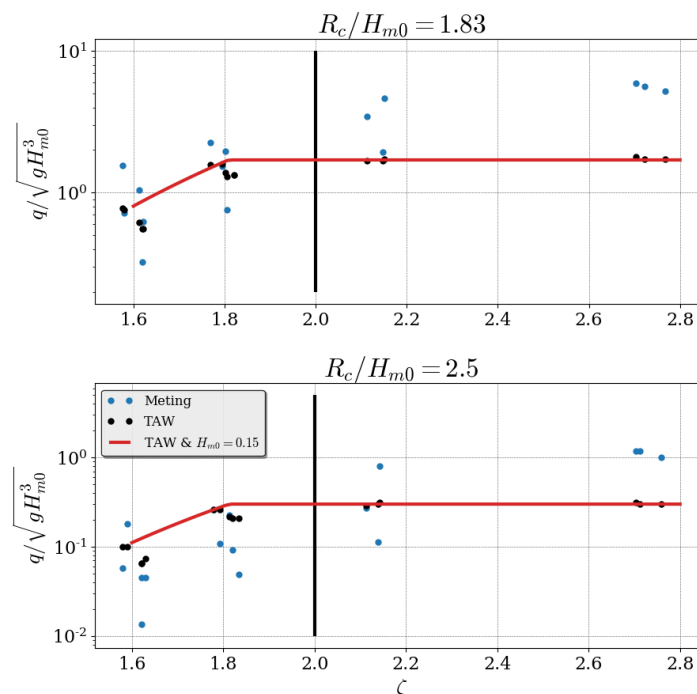


3 Analyse numerieke en fysieke experimenten

3.1 Fysieke resultaten

In Deltares (2018) is aangetoond dat er een invloed van de waterdiepte is. Nu is de vraag hoe deze invloed kan worden geïmplementeerd bij gebruikmaking van de TAW (2002) formulering voor golfoverslag. De hieronder beschouwde dataset bestaat uit testen welke volgens TAW (2002) onder de categorie 'brekende golven' vallen aangevuld met de Testen T115, T215 en T211. In plaats van het onderscheid volgens de TAW (2002) is de een golfsteilheid van 0,0277 gebruikt als onderscheid (dit komt overeen met een breker parameter van 2 voor een taludhelling van 1:3). Alle datapunten met een golfsteilheid groter dan 0,0277 zijn gebruikt in de categorie brekende golven. Deze testen vallen strikt genomen net onder de categorie 'niet-brekende golven'. Vanwege de vrijwel verwaarloosbare afwijking in de twee berekeningsmethoden voor deze testen zijn deze testen ook beschouwd als zijnde de categorie 'brekende golven' (zie Figuur 3.1).

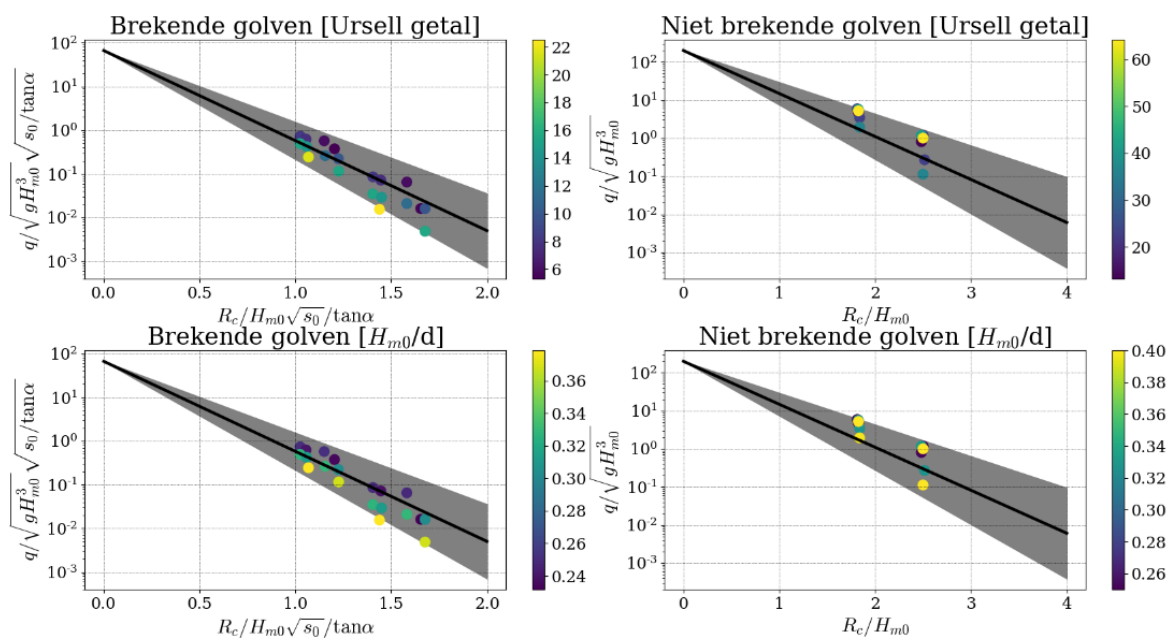
Figuur 3.1 Onderscheid tussen de categorie brekende en niet brekende golven. Op de horizontale as staat de brekerparameter en het dimensieloze golfoverslagdebiat staat weergegeven op de verticale as. De verticale lijn is de gebruikte verdeling van brekende en niet-brekende golven ($s_{m-1,0} > 0,0277$ of $\xi < 2$). De rode lijn geeft de TAW (2002) formulering weer op basis van een H_{m0} van 0,15 m. De blauwe punten zijn de metingen en de zwarte punten de TAW (2002) voorspelling van de meetpunten.



Wanneer de gemeten waarden dimensieloos worden geplot samen met de TAW (2002) formulering voor brekende golven, is duidelijk zichtbaar dat de relatief ondiepe testen minder overslag geven dan de relatief diepere testen (Figuur 3.2). In het geval van de Ursell parameter (bovenste paneel Figuur 3.2) representeren hoge Ursell waarden een ondiepte en lage Ursell waarden diep water. De kleur van het datapunt geeft aan welke Ursell waarde bij het betreffende datapunt hoort, waarbij donker blauw lage Ursell waarde weergeeft en geel een

hoge Ursell waarde. Hetzelfde geldt voor de dimensieloze golfhoogte (onderste paneel Figuur 3.2), waar donkerblauw een lage dimensieloze golfhoogte weergeeft en geel een hoge dimensieloze golfhoogte. Voor hoge waarden van de relatieve diepte of Ursell parameter, beide karakteristieke voor de ondiepte, is de dimensieloze golfoverslag lager dan de TAW (2002). Een uitgebreide beschrijving van de ondiepte parameters, inclusief de Ursell parameter, is gegeven in Paragraaf 3.4. Een deel van de spreiding in de TAW (2002) formulering kan dus worden veroorzaakt door de invloed van de waterdiepte.

Figuur 3.2 Resultaten van de fysieke experimenten. De dimensieloze kruinhoogte is uitgezet tegenover het dimensieloze golfoverslagdebiet. Het linker paneel laat de TAW (2002) formulering van brekende golven ($s_{m-1,0} > 0,027$) zien en het rechter paneel voor niet brekende golven ($s_{m-1,0} < 0,027$). In kleuren zijn de waarden van de Ursell parameter en de dimensieloze waterdiepte (H_{m0}/d) weergegeven. De 5% betrouwbaarheidsintervallen conform de TAW (2002) formulering zijn weergegeven met een grijs vlak.

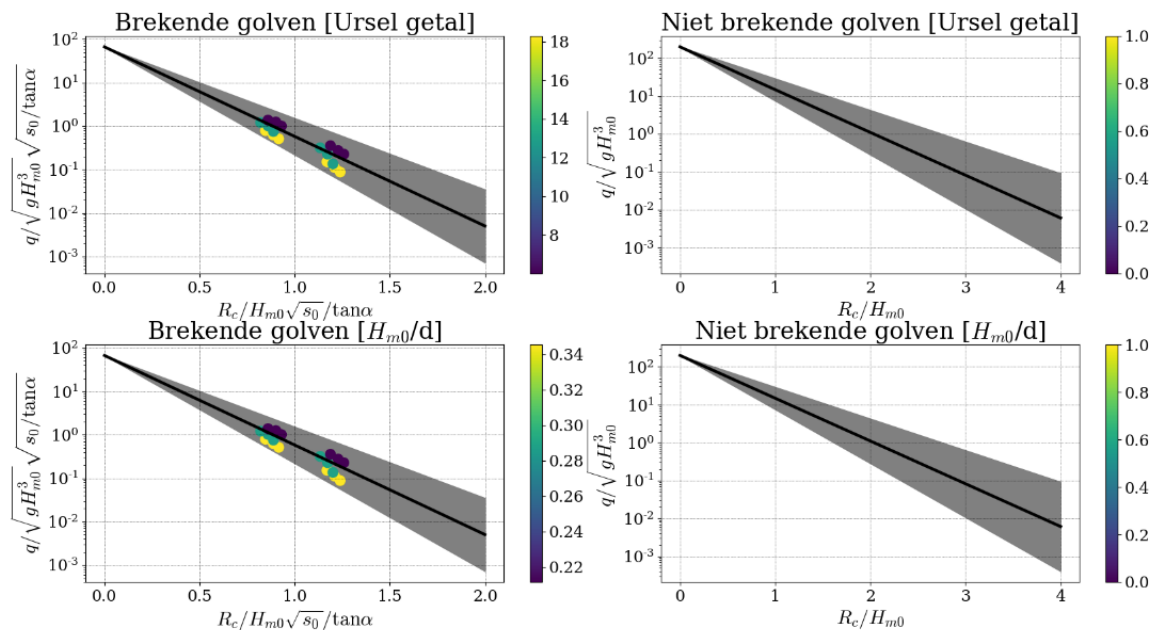


3.2 Numerieke resultaten

De resultaten van de numerieke sommen zijn grafisch weergegeven in Figuur 3.3. Dit is gedaan conform de omschrijving in Paragraaf 3.1. De numerieke waarden zijn weergegeven in Bijlage F.

Ook hier geldt dat de testen met relatief ondiep water leiden tot minder golfoverslag vergeleken met de testen in dieper water.

Figuur 3.3 Resultaten van de numerieke experimenten. De manier van weergave is conform de TAW (2002) en is toegelicht in Paragraaf 3.1.



3.3 Aanpak implementatie invloed van waterdiepte in rekenmodel

Er zijn twee datasets verkregen, waarvoor de invloed van de waterdiepte bepaald kan worden (numerieke dataset en fysieke dataset). Deze twee datasets worden apart beschouwd aangezien de data op twee verschillende manieren zijn verkregen en er daarom ook een afwijking tussen de twee datasets kan bestaan.

Om tot een praktische implementatie te komen wordt de TAW (2002) formulering gebruikt, aangezien deze formulering ook gebruikt wordt binnen het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI). Door een extra parameter aan de TAW (2002) formulering toe te voegen, gerelateerd aan de waterdiepte, kan de spreiding van de TAW (2002) formulering mogelijk verlaagd worden.

De bestaande TAW (2002) formulering is een empirische formule gebaseerd op data welke in golfgoten en bassins zijn verkregen. Deze data bestaan uit data verkregen met verschillende waterdieptes. Deze formule is mogelijk dus niet alleen voor zeer diep water van toepassing maar ook voor situaties met relatief ondiep water (wat mogelijk een oorzaak is van de spreiding van de TAW (2002) formulering). Om een aangepaste TAW (2002) formulering, waarin voor de waterdiepte wordt verdisconteerd, te verkrijgen zijn er twee mogelijkheden:

1. De bestaande TAW (2002) formulering wordt gehanteerd en hier wordt een invloedsfactor aan toegevoegd;
2. De bestaande TAW (2002) formulering wordt zodanig aangepast dat deze alleen voor 'oneindig diep water' van toepassing is. Vervolgens wordt een invloedsfactor toegepast.

Hoewel Optie 2 strikt genomen correcter is wordt vanwege praktische aspecten gekozen voor Optie 1. Indien voor Optie 2 gekozen zou worden dient de bestaande TAW (2002) formulering herijkt te worden.

Het centrale uitgangspunt bij de gekozen methodiek is om per test de gemeten waarde gelijk te stellen aan de waarde zoals berekend met de TAW (2002) waarbij een invloedsfactor voor de waterdiepte (γ_d) wordt gehanteerd. Bij deze aanpak wordt de discrepantie tussen de gemeten waarde en de waarde conform TAW (2002) volledig verdisconteerd door de invloedsfactor voor waterdiepte γ_d . Hieruit volgt per test de waarde van γ_d .

3.4 Bepaling van invloedsfactor waterdiepte per test

Om een invloedsfactor voor de waterdiepte te bepalen is een γ_d geïntroduceerd in de TAW (2002) formulering die het verschil tussen de meting en de TAW (2002) predictie verdisconteerd. De TAW formule kan worden herschreven in de volgende vorm,

$$q = ae^{-bx} \quad (2)$$

Er is voor gekozen om de invloedsfactor alleen in de parameter b toe te voegen, conform de verdiscontering van andere aspecten zoals de invloedsfactor voor ruwheid van het buitentalud (γ_f) en de invloedsfactor voor de golfinvallshoek (γ_β). Er is ook gekeken naar een fit waarbij de invloedsfactor is toegevoegd aan de parameter a , maar dat resulteerde niet in een significant beter resultaat.

Voor elke test is een γ_d bepaald zodanig dat het golfoverslagdebiet gelijk is aan de verwachtingswaarden van de TAW (2002) formule. Hiervoor is eerst de TAW (2002) formulering gebruikt om te bepalen of de test in de categorie brekende golven of de categorie niet-brekende golven past. Om het aantal punten voor de fit in de categorie brekende golven te vergroten, zijn de condities met een golfsteilheid groter dan 0,027 gebruikt voor de fit van de invloedsfactor (als berekende golven gecategoriseerd). Dit betekent dat 3 punten van de categorie niet-brekende golven naar brekende golven gaan (zie in Figuur 3.1). Daarna is een invloedsfactor voor de waterdiepte γ_d toegevoegd aan de categorie brekende golven, zodat de volgende formules worden verkregen (waarbij de overige invloedsfactoren γ_β , γ_f , γ_v en γ_b gelijk zijn aan 1,0 en daarom niet zijn weergegeven):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \xi_0 \exp\left(-4,75 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \gamma_d}\right) \quad (3)$$

met als maximum:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \exp\left(-2,6 \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \quad (4)$$

De verkregen waarden van γ_d per test zijn weergegeven in Bijlage F.

3.5 Correlatie tussen invloedsfactor voor de waterdiepte (γ_d) en de randvoorwaarden

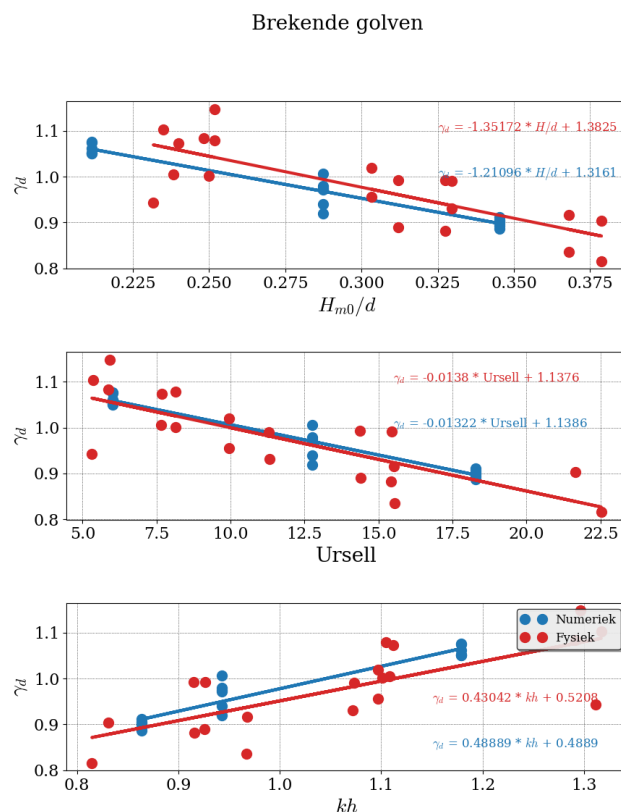
In de vorige paragraaf zijn per test de waarden bepaald van de invloedsfactor voor de waterdiepte γ_d . Een vervolgstap is om een voorspelmodel te maken van deze invloedfactor. Hiertoe zijn correlaties gezocht tussen enerzijds de invloedsfactor voor de waterdiepte γ_d en anderzijds:

- de dimensieloze golfhoogte H_{m0}/d ,
- het Ursell getal $U_r = \frac{H_{m0}L^2}{d^3}$
- de relatieve waterdiepte kh .

waarbij L de golflengte is die berekend is op basis van de dispersierelatie met behulp van de spectrale golfperiode ($T_{m-1,0}$). De verhouding H_{m0}/d is vooral een maat voor de niet-lineariteit van de golf. Het Ursell getal is de verhouding van de dimensieloze golfhoogte (H_{m0}/d) gedeeld door de relatieve golflengte (d^2/L^2) (Dingemans, 1997). Dit is een verhouding van de niet-lineariteit van de golf over het dispersieve gedrag van de golf. In ondiep water is het dispersieve gedrag minder van belang en de niet-lineariteit wel belangrijk. Ten slotte is ook de relatieve diepte uitgezet (kh). De relatieve waterdiepte is een veel gebruikte parameter om het dispersieve gedrag te bepalen. Voor een $kh \ll 1$ gelden bijvoorbeeld de ondiepwater condities van lineaire golf theorie. Dus, de Ursell parameter is eigenlijk een combinatie van de dimensieloze golfhoogte en de relatieve diepte.

Wanneer de invloedfactor tegen over de drie dimensieloze parameters wordt uitgezet, is er een trend zichtbaar (Figuur 3.4).

Figuur 3.4 Invloedfactor waterdiepte voor numerieke (blauw) en fysieke testen (rood). De datapunten met een golfsteilheid groter dan 0,027 zijn getoond.



Door de punten van de numerieke en fysieke testen is een lineaire lijn geplot met de volgende formule:

$$\gamma_d = ax + b \quad (5)$$

waarin x een dimensieloze parameter is (Ursell, H_{m0}/d en kh) en a en b twee coëfficiënten. De fit is gemaakt voor de data van de fysieke experimenten en de numerieke experimenten. De numerieke testen zijn gebruikt om het toepasbaarheidsbereik te vergroten en de gevonden

relatie te valideren. De waarden van a en b en de R^2 waarden voor de drie parameters zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Resultaten van een lineaire fit door de datapunten van de fysieke experimenten.

Fysiek	a	b	R²
Ursell	-0,0138	1,1376	0,61
H_{m0}/d	-1,352	1,383	0,61
kh	0,430	0,521	0,55
Numeriek	a	b	R²
Ursell	-0,132	1,137	0,93
H_{m0}/d	-1,210	1,316	0,93
kh	0,4888	0,488	0,90

De correlatie is het hoogst voor het Ursell getal en de dimensieloze golfhoogte (H_{m0}/d). Aangezien de Ursell parameter afhankelijk is van de dispersierelatie, welke iteratief opgelost moet worden, is de dimensieloze golfhoogte gebruikt als invloedsfactor. De fit op basis van de numerieke testen is erg vergelijkbaar met de fit op basis van de fysieke testen. Dit betekent dat er voor beide datasets een vergelijkbare trend is gevonden. Wel is de determinatie coëfficiënt (R^2) veel hoger voor de numerieke testen. In de volgende paragraaf is duiding gegeven voor dit grote verschil wanneer de gevonden theorie wordt geprojecteerd op de complete dataset.

In diep water condities is de invloedsfactor groter dan 1, wat betekent dat het golfoverslagdebiet toeneemt in diep water ten opzichte van de huidige TAW (2002) formulering. Deze waarneming komt overeen met de bevindingen in Van Steeg (2016) en Szmytkiewicz (1994) waar een hogere oploophoogte is gevonden ten opzichte van de TAW (2002) formulering in diep water. Op basis van deze waarneming kan worden geconstateerd dat de proeven die ten grondslag liggen aan de TAW (2002) gemiddeld genomen niet in diep water zijn uitgevoerd.

De volgende formulering is dus gevonden als invloedsfactor voor de waterdiepte,

$$\gamma_d = -\frac{1,35 \cdot H_{m0}}{d} + 1,38 \quad (6)$$

waarbij γ_d is gelimiteerd van 0,8 tot 1,1. Deze beperking is niet gebaseerd op fysica, maar op het bereik van de empirische data. De verwachting is dat er een asymptoot aanwezig is in diep water, waar de invloedsfactor een constante waarde heeft. Voor sterk diepte-gelimiteerde condities is de verwachting dat de invloedsfactor verder zal afnemen. Deze formulering is tot stand gekomen op basis van testen onder de volgende condities:

- Golfsteilheid $0,015 < s_{m-1,0} < 0,045$
- Taludhelling $\cot(\alpha) \approx 1/3$
- Relatieve waterdiepte $0,25 < H_{m0}/d < 0,4$
- Relatieve kruinhoogte $1,813 < R_c/H_{m0} < 2,5$

De numerieke resultaten tonen daarnaast aan dat de invloed ook aanwezig is voor de volgende condities:

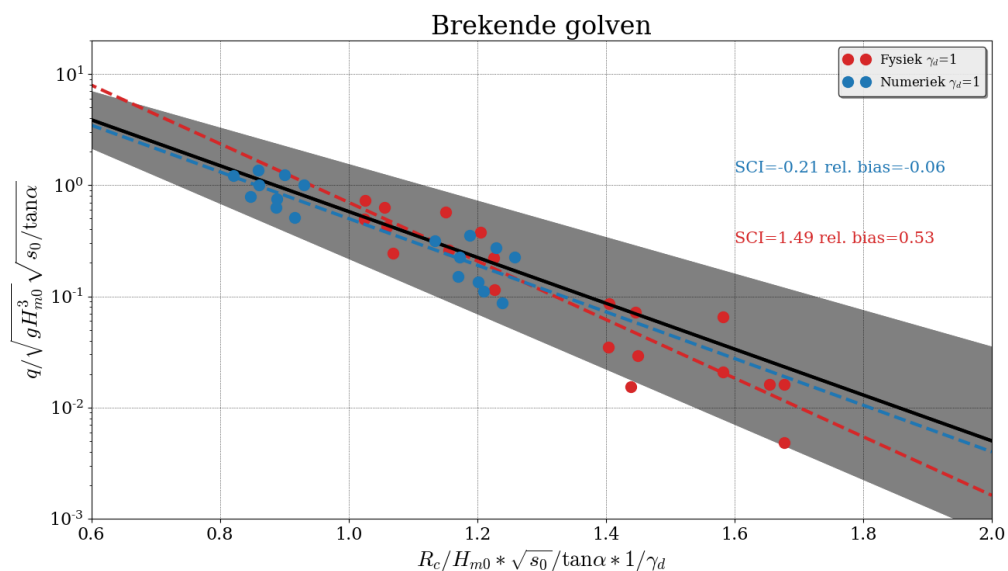
- Golfsteilheid $s_{m-1,0} \approx 0,045$
- Brekerparameter $0,82 < \xi_{m-1,0} < 1,64$
- Taludhelling $3 < \cot(\alpha) < 6$
- Relatieve waterdiepte $0,25 < H_{m0}/d < 0,4$
- Relatieve kruinhoogte $1,813 < R_c/H_{m0} < 2,5$

3.6 Projectie van invloedsfactor op dataset

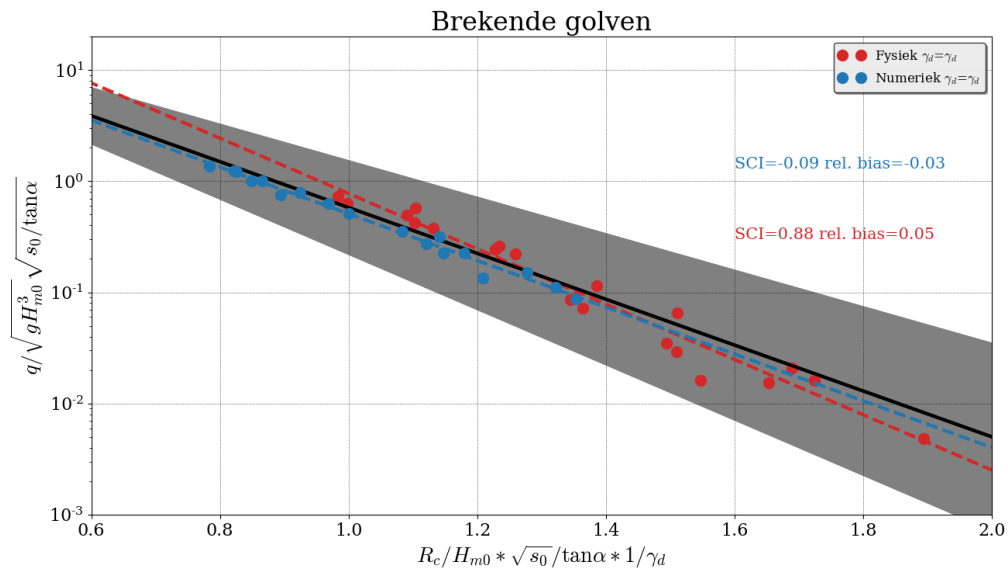
Gegeven de gevonden invloedsfactor is het mogelijk om de spreiding in de TAW (2002) formule te reduceren. Dit kan worden berekend door de data uit de fysieke en numerieke testen dimensieloos weer te geven samen met de TAW (2002) formule (Figuur 3.5 en Figuur 3.6).

De statistische parameters (relatieve bias en scatter index) zijn berekend met de log van het golfoverslagdebiet, zodat de statistiek niet alleen wordt bepaald door de datapunten met veel golfoverslag. Het is duidelijk zichtbaar dat de statische scores beter worden wanneer de invloed waterdiepte wordt meegenomen in de TAW (2002) formulering. De spreiding die nog aanwezig is kan in het geval van de fysieke testen veroorzaakt worden door de variatie in golfsteilheid en kruinhoogte. Voor de numerieke testen zijn de kruinhoogte en taludhelling gevarieerd, wat betekent dat de spreiding ook kan worden veroorzaakt door variaties in deze parameters. Daarnaast zal ook een deel van de spreiding, vooral bij weinig golfoverslag, worden veroorzaakt door de tijdduur van de test. In het geval van weinig golfoverslag events, kan het gemiddelde golfoverslagdebiet nog veel variëren. Er zijn geen onzekerheidsbanden weergegeven om de gemeten datapunten, omdat het niet mogelijk is om de onzekerheid van de huidige dataset te vergelijken met de onzekerheid van de TAW (2002) formule. Binnen de TAW (2002) formule zijn er meer parameters gevarieerd (bijvoorbeeld bermen, voorlanden en ruwheden), waardoor de onzekerheid in de TAW (2002) formule groter zal zijn. Om de reductie in onzekerheid door de invloed van de waterdiepte vast te stellen, zal de huidige theorie geprojecteerd moeten worden op de data die ten grondslag ligt aan de TAW (2002) formule.

Figuur 3.5 Numerieke en fysieke datapunten waarbij geen correctie is toegepast voor de invloed van de waterdiepte (dus conform de huidige TAW (2002) methode).



Figuur 3.6 Numerieke en fysische datapunten waarbij er wel correctie is toegepast voor de invloed van de waterdiepte.



4 Theoretische beschouwing resultaten

Naast de empirie is het ook van belang om de fysica achter de invloed waterdiepte te begrijpen. De volgende hypothesen zijn opgesteld om de invloed van de waterdiepte te verklaren:

1. Door de ondiepte breken golven waardoor de golfhoogten niet meer Rayleigh verdeeld zijn. Daardoor zijn de grotere golfoverslagvolumes relatief kleiner geworden.
2. Door de wave set-down verandert de waterstand wat invloed heeft op het golfoverslagdebiet.
3. Niet-lineaire vorm van de golven. Een andere vorm van de golf kan leiden tot een ander gedrag tijdens het breken en de golfloop.
4. Vorm van het spectrum verandert zodanig door de ondiepte dat er meer golven met een lagere frequentie aanwezig zijn.

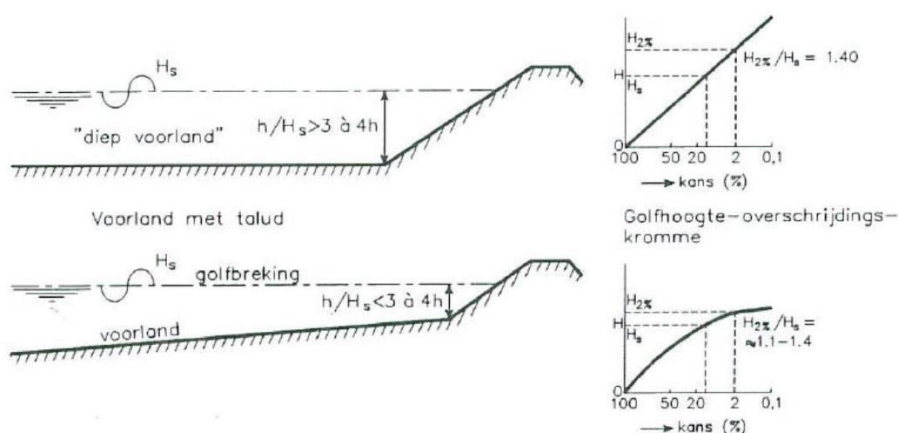
Hieronder zijn de verschillende hypothesen kwalitatief beschreven. De invloed van de golfhoogteverdeling (Hypothese 1) is ook kwantitatief onderzocht. Deze bevindingen zijn beschreven in een aparte memo, welke is toegevoegd in Bijlage H. Er wordt opgemerkt dat het ook mogelijk is dat het een combinatie van meerdere processen van belang is en er niet 1 hypothese kan worden aangemerkt als de verklaring van de invloed van de waterdiepte.

In Deltares (2015) is het effect van de waterdiepte op het golfoverslagdebiet beargumenteerd op basis van de verdeling van de golfhoogte (Hypothese 1) en de momentumflux theorie (Hypothese 3). In Paragraaf 4.1 is Hypothese 1 geverifieerd aan de hand van de volumeverdelingen. Het is niet mogelijk om de momentumflux theorie te valideren op basis van de huidige metingen, aangezien deze theorie 1) uit gaat van een enkele golf terwijl in de testen een random golfveld is gebuikt en 2) de theorie is gebaseerd op de oploophoogte in plaats van golfoverslag. Wel is in Paragraaf 4.3 een koppeling gemaakt tussen de metingen en de momentumflux theorie.

4.1 Invloed breking van golven op golfhoogteoverschrijdingskromme

Als gevolg van een lage waterdiepte bij de teen breken de hoge golven op het voorland. Hierdoor zal de golfhoogteoverschrijdingskromme veranderen. Voor diep water geldt dat de overschrijdingskromme gegeven is door een Rayleigh verdeling, maar in ondiep water zal dit niet meer het geval zijn. Dit is geïllustreerd in Figuur 4.1.

Figuur 4.1 Illustratie van de golfoverschrijdingskromme voor diep en ondiep water.



Om dit effect te onderzoeken zijn de golfhoogteoverschrijdingskromme van de verschillende testen waarin de waterdiepte is gevarieerd vergeleken. Voor alle testen is een duidelijk verschil in de staart van de verdeling zichtbaar. Deze bevindingen staven de kwantitatieve voorspelling van de golfhoogteverdeling beschreven in Deltares (2015), waarin is aangetoond dat de $H_{2\%}$ kleiner wordt naarmate de waterdiepte afneemt. Een overschrijdingskromme waarin de golfhoogte in de staart lager is hoeft niet per se te resulteren in een lager golfoverslagdebiet. Dit hangt af van hoeveel golven tot golfoverslag zorgen en hoeveel elke golf bijdraagt aan het totale golfoverslagdebiet. Het zou kunnen dat het golfoverslagdebiet vooral wordt bepaald door de bijdrage van relatief veel kleine golven en dat enkele hoge golven weinig invloed hebben. Op basis van de numerieke sommen zijn de volumes van de individuele overslag events bepaald, waarmee een volumeoverschrijdingskromme opgesteld kan worden. Echter, het verschil in golfoverslagvolume kan niet volledig verklaard worden op basis van de golfhoogte verdeling (zie Bijlage H). De volumes in de staart van de verdeling zijn kleiner in het geval van een ondiepte, maar dit verschil verklaart niet de verschillende golfoverslagdebieten voor de drie waterdieptes. Het blijkt dat de overige overslagvolumes in de verdeling ook minder worden bij een ondiepte, wat in z'n totaliteit meer volume vertegenwoordigt dan de afname van het volume in de staart van de verdeling.

De theorie gepresenteerd in Deltares (2015) maakt het aannemelijk dat de oploophoogteverdeling verandert naarmate de waterdiepte afneemt. Er zijn geen metingen van de oploophoogte, dus het is niet bekend hoe de waterdiepte de oploophoogte beïnvloedt. Wel kan op basis van de volumeverdeling indirect worden aangetoond dat de verandering van de golfhoogteverdeling en/of oploophoogteverdeling niet volledig de invloed van de waterdiepte kan verklaren. Er is in Bijlage H aangetoond dat de vorm van de volumeverdeling niet significant anders is voor verschillende waterdieptes. Dit lijkt te suggereren dat de vorm van de golfhoogteverdeling of oploophoogteverdeling niet de oorzaak van de invloed van de waterdiepte is voor de huidige geteste condities. Dit is wel onder de aanname dat de grootste volumes ook worden veroorzaakt door de hoogste golven.

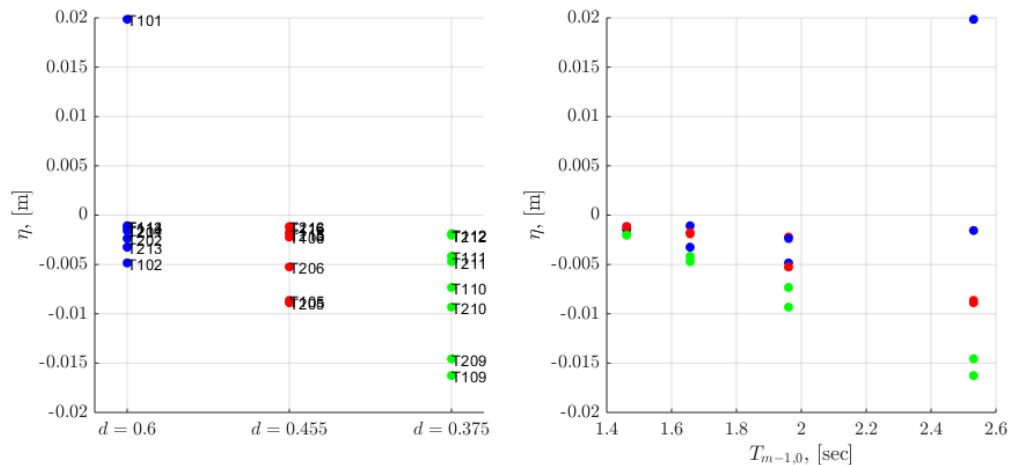
Om een beter begrip te krijgen van de invloed van de waterdiepte op de verschillende verdelingen zou het nuttig kunnen zijn om ook oploophoogtes te analyseren. Uit de numerieke sommen is het mogelijk om de oploophoogte te bepalen. Op basis van deze gegevens kan een vergelijking gemaakt worden tussen de golfhoogteverdeling, oploophoogteverdeling en de volumeverdeling.

4.2 Effect waterdiepte op de setup bij de teen

Door het breken van golven treedt er een verhoging van de waterstand (setup) op in brandingszone en een verlaging van de waterstand in de shoaling zone (setdown) (Longuet-Higgins and Steward, 1962). Deze veranderde waterstand zou ook invloed kunnen hebben op het golfoverslagdebiet. Tijdens de experimenten is er een waterstandsmeter op het talud geplaatst. Op basis van deze metingen is de invloed van de setup bepaald.

In Figuur 4.2 is de gemiddelde waterstand weergegeven voor de verschillende testen. In het linker paneel staat de gemiddelde waterstand uitgezet tegenover de waterdiepte. Voor alle testen is de gemiddelde waterstand negatief, wat betekent dat er een setdown is op de locatie van de waterstandsmeter. Test T101 is verder niet beschouwd, aangezien het lijkt dat er in deze test een afwijking in de opnemer zat. Het is duidelijk zichtbaar dat de variatie in de setdown groter wordt voor ondieper water. In het rechter paneel staat de setup uitgezet tegenover de spectrale periode. Dit figuur laat zien dat de setdown het grootst is voor de langere golven in ondiep water.

Figuur 4.2 Wave set-up voor de verschillende testen. In het rechter paneel staat de gemiddelde waterstand uitgezet tegenover de waterdiepte. In het rechter paneel is de gemiddelde waterstand uitgezet tegenover de spectrale periode. De kleuren van de bolletjes geven de waterdiepte aan.



Het verschil in setup kan niet worden veroorzaakt door het water dat in de overslagbak terecht komt, aangezien het volume in overslagbak gelijk staat aan enkele millimeters waterstandsverschil (varieert van 1 tot 4 mm). Theoretisch gezien kan er ook een setdown verwacht worden. Op basis van lineaire golftheorie kan de setup en setdown worden berekend voor een monochromatische golf (Longuet-Higgins and Steward, 1962). Op basis van het gegeven profiel zijn vergelijkbare waarden van de setdown gevonden als de gemeten (orde grote centimeters).

Nu deze waterstandsverschillen zijn opgemerkt is het interessant wat de invloed zou zijn op het golfoverslagdebiet. Deels zal dit effect al impliciet aanwezig zijn in de TAW-formule, aangezien er ook een relatie is tussen de $T_{m-1,0}$ en de gemiddelde waterstand. Om toch het effect van een waterstandsafwijking te verifiëren is een berekening met de TAW-formulering gedaan voor de conditie met de langste golf periode. Dit resulteert in een relatieve afwijking van z'n 20 % in het golfoverslagdebiet. Voor de meeste testen is de invloed van de waterdiepte meer dan 20%, wat betekent dat de setdown niet enige oorzaak is van het verlaagde overslagdebiet. Daarnaast is er ook geen verband zichtbaar wanneer de afname in het golfoverslagdebiet door de waterdiepte wordt uitgezet tegenover de setdown.

4.3 Niet-lineaire golfvorm

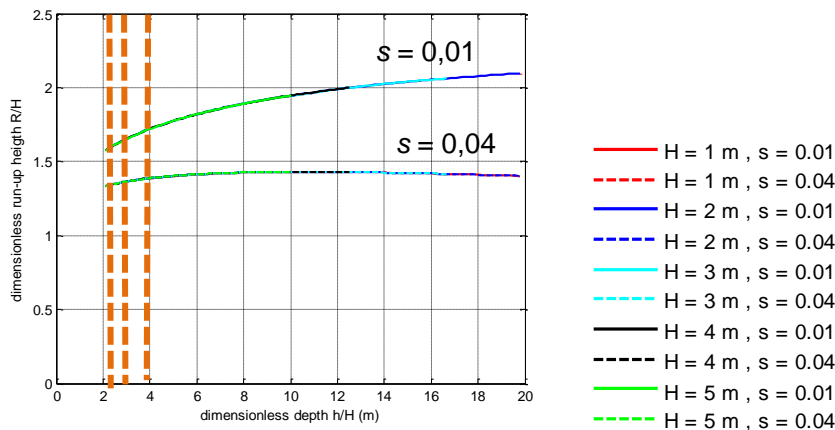
In ondiep water beweegt de top van de golf sneller dan het dal. Dit betekent dat de golf asymmetrisch wordt in ondiep water. De periode waarin het water daalt is korter dan de periode waarin het water stijgt. Dit kan ook een effect op de overslag hebben en dit kan leiden tot een ander brekingsmechanisme op het talud.

In Deltares (2015) is met behulp van de momentum-flux theorie aannemelijk gemaakt dat golfoverslag minder is voor ondiep-water golven. Deze theorie gaat nog wel uit van lineaire golven, maar laat wel het effect van de waterdiepte op de golfvorm zien. Het is niet mogelijk om deze theorie kwantitatief te vergelijken met de metingen, aangezien 1) de theorie uitgaat van een enkele golf en 2) de theorie het effect van de waterdiepte op de oploophoogte beschrijft in plaats van het effect op de golfoverslag.

Wel is het mogelijk om een kwalitatieve vergelijking te maken. Een conclusie die volgt uit de momentumflux theorie is bijvoorbeeld dat de invloed van de waterdiepte meer invloed heeft op

de oploophoogte voor niet steile golven (zie Figuur 4.3). Onder de aanname van een één op één relatie tussen de oploophoogte en de overslagvolumes, volgt dat het effect van de waterdiepte groter is voor niet steile golven. Echter, uit de metingen volgt het tegenover gestelde resultaat. Juist voor steile golven is de invloed van de waterdiepte significant. Een reden voor dit verschil zou de aanname van een lineaire enkele golf kunnen zijn. In werkelijkheid zijn de meeste golven niet-lineair, waardoor ook andere processen van belang zijn (bijv. brekingsmechanisme op het talud). Vooral de steile golven zullen uiteindelijk breken op het talud wat leidt tot een ander olopgedrag dan voorspeld met de momentumflux theorie op basis van een lineaire golf vorm. De momentum flux theorie lijkt dus ontoereikend te zijn om de invloed van de waterdiepte te verklaren.

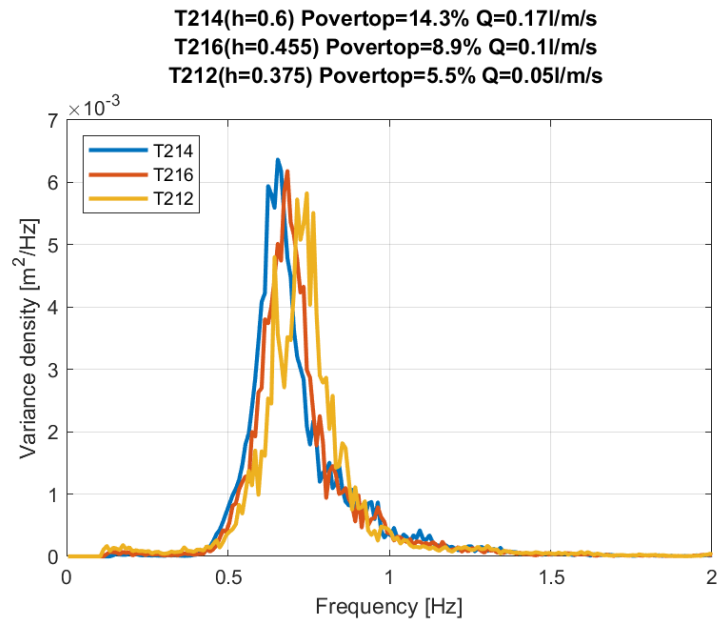
Figuur 4.3 Dimensieloze oploophoogte (R/H) als functie van de dimensieloze diepte (h/H) voor verschillende golfsteilheden. De gestippelde oranje lijnen geven de geteste dimensieloze dieptes aan van de fysische experimenten.



4.4 Spectrumvorm

Ook de spectrale vorm kan een invloed hebben op het golfoverslagdebiet. Naarmate de waterdiepte kleiner wordt, komt er meer energie bij de lange golven terecht doormiddel van golfinteracties (Herber et al, 1995). Dit betekent dat de $T_{m-1,0}$ groter wordt. Dus, om dezelfde $T_{m-1,0}$ voor verschillende waterdieptes te krijgen moet de piek van het spectrum verschuiven (zie Figuur 4.4). Het zou kunnen dat doordat de golven rond de piek (primaire golven) verschuiven naar en kleinere periode, het golfoverslagdebiet naar beneden gaat. Het is bekend dat golven met een korte periode minder golfoverslag geven dan langere golven. In andere woorden: doordat de $T_{m-1,0}$ is vastgezet in de TAW (2002) verschuiven de meeste golven naar hogere frequenties, wanneer de waterdiepte kleiner wordt, wat zou kunnen leiden tot minder golfoverslag.

Figuur 4.4 Spectrum voor drie testen met verschillende waterdieptes gemeten tijdens de fysieke testen. In de titel staan naast de waterdiepte ook het golfoverslagdebiet en het aantal golven dat tot golfoverslag leidt weergegeven.



5 Praktijkimpact van de invloed waterdiepte

Indien we de verkregen methode gebruiken om de kruinhoogte te bepalen voor een kritisch golfoverslagdebiet van 10 l/s/m en 1 l/s/m voor twee waterdieptes, dan volgt daaruit een forse reductie van de kruinhoogte voor de kleine waterdiepte ten opzichte van de grotere waterdiepte. Ter illustratie is een casus gebruikt om de praktijkimpact te demonstreren. Deze casus is ten dele gebaseerd op de Oesterdam en dient slechts ter illustratie (de waarden kunnen dus niet daadwerkelijk gebruikt worden voor projecten gerelateerd aan de Oesterdam). Er is een versimpeld profiel gebruikt om aan het parameterbereik van de invloedsfactor waterdiepte te voldoen. Het profiel bestaat uit een talud met een helling van 1:4 zonder ruwheid en voorland. De golfcondities bij de teen zijn geschat op basis van een HBN-bekeringen met Hydra-NL bij de Oesterdam voor een overschrijdingskans van 1:30.000 (signaleringskans voor de Oesterdam). Gegeven een kritiek golfoverslagdebiet van 1 en 10 l/s/m en een talud van 1:4 volgt een golfhoogte van 2,3 m en een spectrale periode van 5,7 s. Het golfoverslagdebiet is berekend voor een waterdiepte van 6 en 9 meter bij de teen van de dijk. Een waterdiepte van 4,5 meter is een representatieve waarde voor de Oesterdam, maar om aan het parameterbereik te voldoen is een waterdiepte van 6 en 9 m gebruikt. Dit voorbeeld geeft een indicatie van de invloed van de waterdiepte, maar is door de aanpassingen in hydraulische condities en geometrie niet representatief voor de Oesterdam. Voor de hierboven gegeven condities is de verwachtingswaarde van het golfoverslagdebiet uitgerekend. Dit is gedaan met behulp van de probabilistische TAW (2002) formule waarin de invloedsfactor voor de waterdiepte is geïncorporeerd. Deze methodiek is niet geheel in lijn met de ontwerpmethodieken maar geeft een degelijke eerste indruk van het effect.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \xi_0 \exp\left(-4,75 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \gamma_d}\right) \quad (7)$$

met als maximum,

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0,2 \exp(-2,6 \frac{R_c}{H_{m0}}) \quad (8)$$

De invloedsfactor voor de diepte is berekend met:

$$\gamma_d = -\frac{1,35 * H_{m0}}{d} + 1,38 \quad (9)$$

Met een minimum van 0,8 en een maximum van 1,1. Voor een kritisch golfoverslagdebiet van 1 l/s/m is er een reductie van 75 cm en met een kritische golfoverslagdebiet van 10 l/s/m is er een reductie van 50 cm (Tabel 5.1) wanneer de waterdiepte afneemt van 9 m naar 6 meter. Vergeleken met de oorspronkelijke formulering ($\gamma_d = 1$), is er ook behoorlijke reductie in het geval van een kleine waterdiepte bij de teen.

De bovengenoemde getallen kunnen in een kans-effect-context worden geplaatst door deze te vergelijken met de decimeringshoogte (dit is een factor 10 in terugkeertijd). In dit geval bleek de decimeringshoogte circa 0,75 m te zijn volgens een Hydra-NL berekening met de huidige TAW (2002) formulering. Dit betekent dat de gevonden kruinhoogtereductie van 0,57 m (bij een q van 10 l/s/m) t.o.v. de oorspronkelijke formulering bij een ondiepte gelijk staat aan minder dan een factor 10 in terugkeertijd.

Omgekeerd is een hogere kruinhoogte nodig wanneer de oorspronkelijke formulering wordt vergeleken met de diep water conditie. Bij een waterdiepte van 9 m is op basis van de herziene berekeningsmethodiek de benodigde kruinhoogte ongeveer 10 cm hoger.

Bij een deterministische rekensom is er een behoorlijke reductie te behalen in de benodigde kruinhoogte. Als ook de spreiding van de golfoverslagformule (in dit geval de TAW-formule) gereduceerd zou worden door de invloed van de waterdiepte mee te nemen, dan is nog meer winst te behalen bij gebruikmaking van een probabilistische som. Het is niet mogelijk om een voorspelling te maken van de reductie in de spreiding door de invloed van de waterdiepte, aangezien de spreiding in de TAW (2002) is gebaseerd op meer condities dan getest in de dit rapport (bermen, voorlanden en ruwheden). Alleen door de invloed van de waterdiepte te projecteren op de data achter de TAW (2002) formulering, kan een nieuwe spreidingsmaat worden aangegeven.

Tabel 5.1 Rekenvoorbeeld voor de invloed van de waterdiepte bij een golfsteilheid van 0,045, golfhoogte van 2.3 m en een talud van 1:4.

Waterdiepte	Golfoverslagdebiet	R_c [m]	Vershil R_c t.o.v. bestaande methodiek	Vershil R_c t.o.v. diep water (d=9m)
$d = 6\text{ m}$	$Q = 1\text{ l/s/m}$	3,67	0,57 m lager	0,73 lager
	$Q = 10\text{ l/s/m}$	2,52	0,42 m lager	0,5 lager
$d = 9\text{ m}$	$Q = 1\text{ l/s/m}$	4,40	0,16 m hoger	-
	$Q = 10\text{ l/s/m}$	3,03	0,07 m hoger	-
$\gamma_d = 1$	$Q = 1\text{ l/s/m}$	4,24	-	0,16 lager
	$Q = 10\text{ l/s/m}$	2,94	-	0,09 lager

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Op basis van de verkregen data kan worden geconcludeerd dat er een significante invloed van de waterdiepte is op het golfoverslagdebiet, waarbij een kleinere waterdiepte leidt tot minder golfoverslag. De invloed van de waterdiepte is gevonden voor variaties in kruinhoogte, golfsteilheid en taludhelling, waarbij de invloed minimaal bleek voor lage golfsteilheden (welke vallen in de categorie niet-brekende golven). Als verklaring zijn verschillende hypothesen benoemd, waarin in deze studie is aangetoond dat de afname van het golfoverslagdebiet voor lagere waterdiepte niet volledig verklaard kan worden door het aftoppen van de golfhoogteverdeling in ondiep water of door een lokale waterstandsverlaging (set-down) door golfbreking. Deze processen kunnen, al dan niet in combinatie, wel een rol spelen.

Door het toevoegen van een invloedsfactor voor de waterdiepte, γ_d , is het mogelijk een beter passende voorspelling van het golfoverslagdebiet te krijgen op basis van de formules uit TAW (2002). Naar verwachting zal nader onderzoek ook kunnen leiden tot een minder brede spreidingsband bij de TAW-formules. Deze invloedsfactor waterdiepte is afhankelijk gemaakt van de dimensieloze waterdiepte (H_{m0}/d) en is alleen van toepassing in de categorie brekende golven.

De invloed waterdiepte voor brekende golven is beschreven met een invloedsfactor gegeven door,

$$\gamma_d = -\frac{1,35 \cdot H_{m0}}{d} + 1,38 \quad (10)$$

met een minimum van 0,8 en een maximum van 1,1. Deze formulering is tot stand gekomen op basis van testen onder de volgende condities:

- Golfsteilheid $0,015 < s_{m-1,0} < 0,045$
- Taludhelling $\cot(\alpha) \approx 3$
- Relatieve waterdiepte $0,25 < H_{m0}/d < 0,4$
- Relatieve kruinhoogte $1,813 < R_c/H_{m0} < 2,5$
- Geen aanwezigheid van bermen, ruwheidselementen, schuine golfaanval of kruinelementen

Daarnaast tonen de numerieke resultaten aan dat de invloed ook aanwezig is voor de volgende condities:

- Golfsteilheid $s_{m-1,0} \approx 0,045$
- Brekerparameter $0,82 < \xi_{m-1,0} < 1,64$
- Taludhelling $3 < \cot(\alpha) < 6$
- Relatieve waterdiepte $0,25 < H_{m0}/d < 0,4$
- Relatieve kruinhoogte $1,813 < R_c/H_{m0} < 2,5$
- Geen aanwezigheid van bermen, ruwheidselementen, schuine golfaanval of kruinelementen

Verder is geconstateerd dat het van belang is om in ondiep water bij de teen de laag frequente golven bij de teen van de dijk nauwkeurig te bepalen, aangezien de laag frequente energie hier een relatief grote bijdrage heeft aan de totale energie en daarmee op de golfoverslag.

6.2 Aanbevelingen

Op basis van dit onderzoek wordt het volgende aanbevolen:

- De analysemethode van de Scheldegoot experimenten uit 2018 is niet conform de gebruikte analysemethode voor de numerieke sommen. Tijdens de numerieke sommen is opgemerkt dat de splitsingsmethode van inkomende en gereflecteerde golven op basis van lineaire golf theorie een afwijking geeft in ondiep water. Het zou daarom beter zijn om de data uit de experimenten te heranalyseren op basis van de kalibratieproeven zonder constructie.
- De huidige dataset laat een forse reductie van de spreiding van data rond de TAW-formule voor golfoverslag zien als er een invloedsfactor voor de waterdiepte wordt toegevoegd. Echter, om de spreiding rond de TAW-formule voor golfoverslag te verminderen zal de invloedsfactor moeten worden geprojecteerd op alle beschikbare data binnen het geldigheidsbereik van de TAW-formule. Op basis van het gebruik van een grotere dataset dan de hier gebruikte data zou een reductie in de spreidingsband rond de TAW-formule kunnen worden gerealiseerd.
- In het huidige rapport is de invloed van de waterdiepte aangetoond voor een aantal condities. Om het toepassingsbereik te vergroten zouden nog kleinere waterdieptes gemodelleerd kunnen worden ($H_{m0}/d \approx 0,5$). Daarnaast zou het goed zijn om ook extreme dieptes ($\frac{H_{m0}}{d} < 0,1$) te testen, zodat de limiet van de invloedsfactor bepaald kan worden. Het belang van een groter geldigheidsbereik is met name groot omdat er langs de Nederlandse waterkeringen veel situaties voorkomen met een kleine waterdiepte.
- De testen zijn uitgevoerd met een horizontaal voorland, terwijl er in werkelijkheid veelal een voorland met een helling aanwezig is. Met de numerieke sommen zou het mogelijk zijn om het effect van verschillende voorlanden (bijvoorbeeld 1:10, 1:20, 1:50, 1:100 en 1:250) op het golfoverslagdebiet te bepalen. Dit zou op basis van de huidige numerieke sommen kunnen door de teen van de dijk te verschuiven over het talud en een hellend voorland toe te voegen aan het profiel.
- Om de impact van de gevonden theorie te bepalen zou het goed zijn om de invloed op de overstromingskansen en de benodigde hoogte van keringen te bepalen voor een aantal locaties. Doormiddel van Hydra-NL/RisKeer zou de impact inzichtelijk gemaakt kunnen worden voor een aantal locaties.
- Voor de huidige dataset is er geen relatie gevonden tussen de vorm van de volumeverdeling en het golfoverslagdebiet. Om het effect van de invloed van de waterdiepte beter te begrijpen kan worden overwogen om de volgende analyses uit te voeren.
 - Golfhoogteverdelingen vergelijken met bestaande verdelingen (Battjes-Janssen of Battjes-Groenendijk). Dit geeft inzicht in hoeverre bestaande verdelingen gebruikt kunnen worden voor het voorspellen van de volumeverdelingen.
 - De oploophoogteverdelingen voor verschillende waterdieptes vergelijken. Op basis van de numerieke sommen kunnen oploophoogtes bepaald worden, waarmee de processen op het talud verduidelijkt kunnen worden.
 - Het vergelijken van de individuele golfvolumes/oploophoogtes met de bijbehorende golfperiode en de golfhoogte.
- De huidige theorie is alleen gevalideerd voor langkammige-golven. Het is aannemelijk dat een vergelijkbare trend ook aanwezig is voor kortkammige-golven, maar dit kan niet worden geverifieerd in een 1D experiment. Om dit te onderzoeken zouden 3D testen uitgevoerd moeten worden. Echter, de aanname van langkammige-golven is een gebruikelijke aanname voor de experimenten die ten grondslag liggen aan de TAW (2002) formulering. Daarom is het advies om het effect van richtings spreiding op het golfoverslagdebiet niet binnen dit onderzoek uit te zoeken.

6.3 Vervolgstappen voor 2020

Op basis van de lijst met aanbevelingen worden de volgende vervolgstappen voor het jaar 2020 voorgesteld:

- Bereik van de invloedsfactor vergroten voor meer condities. Hierbij kan worden gedacht aan extreme waterdieptes (diep en ondiep) en variaties in voorlanden.
- De gevonden invloedsfactor projecteren op meer testen die vallen binnen het geldigheidsbereik van de TAW (2002) formulering.
- Het vergroten van het begrip van de golfoverslagfysica waardoor het makkelijker wordt om golfoverslag te modelleren en/of de huidige theorieën te verklaren. Hierbij kan worden gedacht aan het vergelijken van de golfhoogteverdelingen met oploopverdelingen en volumeverdelingen. Daarnaast kan een vergelijking van individuele golfeigenschappen met golfoverslagvolumes helpen om de golfoverslagfysica beter te begrijpen. Wellicht is het hierdoor ook mogelijk om de invloed van de waterdiepte in combinatie met andere processen (schuin invallende golven) te beargumenteren.
- De impact van de gevonden theorie bepalen aan de hand van benodigde kruinhoogte voor een aantal locaties in Nederland.

7 Referenties

Dingemans, M. W. (1997). "Water wave propagation over uneven bottoms". Nasa Sti/recon Technical Report N. Advanced Series on Ocean Engineering. **13**: 25769. [Bibcode:1985STIN...8525769K](#). [ISBN 978-981-02-0427-3](#) part 1 pp 182-184

Deltares, 2015, 'Influence of water depth at wave run-up and wave overtopping', Deltares concept rapport v1, 1220038-010-VEB-0005, oktober 2015

Deltares (2018). 'Invloed waterdiepte op golfoverslag: meetverslag golfoverslag proeven', Deltares final report V2.0, 11202189-012-ZWS-0001, December 2018

EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com

Herbers, T. H. C., Elgar, S., & Guza, R. T. (1995). Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12), 24863-24872.

Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., & Fredsøe, J. (2012). A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for numerical methods in fluids*, 70(9), 1073-1088.

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481-504.

Paulsen, B. T., Bredmose, H., & Bingham, H. B. (2014). An efficient domain decomposition strategy for wave loads on surface piercing circular cylinders. *Coastal Engineering*, 86, 57-76.

Szmytkiewicz, M., M., Zeidler, R.B., Pilarczyk, K.W., 1994. Irregular wave run-up on composite rough slopes, Proc. Coastal Dynamics 1994.

TAW (2002). Technische rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken. TR33

Van Steeg, P., Klein Breteler, M., & Provoost, Y. (2016). Large-scale physical model tests to determine influence factor of roughness for wave run-up of channel shaped block revetments. In Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab 2016), Ottawa.

Zelt, J. A., & Skjelbreia, J. E. (1993). Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. In *Coastal Engineering 1992* (pp. 777-789).

A Model set-up OceanWave3D

Het OceanWave3D domain is gediscretiseerd met 12 cellen in de verticaal. In de horizontaal is de discretisatie gebaseerd op basis van 12 cellen per golflengte gegeven een frequentie van 2 keer de piekfrequentie. Dit betekent dat vanuit de meeste golven binnen het spectrum goed gemodelleerd worden. Ter controle is ook een som met meer cellen in de verticaal en horizontaal uitgevoerd, maar dat gaf dezelfde resultaten qua golfhoogte en spectrale periode. Om reflectie aan het einde van het domein te voorkomen is een damping zone toegepast van 1 golflengte (gegeven de T_p).

Op de rand is het stuursignaal geforceerd dat ook in de fysieke experimenten is gebruikt. Tijdens de kalibratieproeven van de fysieke experimenten is een POT-meter stand (vermenigvuldiging factor voor de golfhoogte) gevarieerd om de juiste golfenergie bij de teen te verkrijgen. Aangezien de sturing in het numerieke model niet compleet hetzelfde, is ook tijdens de numerieke sommen de POT-meter stand gevarieerd totdat de golfhoogte overeen komt met de gemeten waarden bij de teen van de constructie. De golfhoogte (H_{m0}) en de spectrale periode ($T_{m-1,0}$) zijn hierbij nagenoeg gelijk gekregen aan de gemeten waarden (zie Tabel A.1). Merk op dat deze waarden niet altijd gelijk zijn aan de waarden die volgen uit de OpenFoam berekening, waar op dezelfde locaties waterstandsmeters aanwezig zijn (zie Tabel A.1). Het is dus van belang om de validatie uit te voeren op de OpenFoam resultaten. Tijdens de numerieke sommen worden de gemeten golfhoogtes uit de numerieke golfgoot gebruikt in de analyse. Dit betekent dat het ook niet erg is als er een afwijking is in de numerieke golfcondities ten opzichte van de fysieke experimenten.

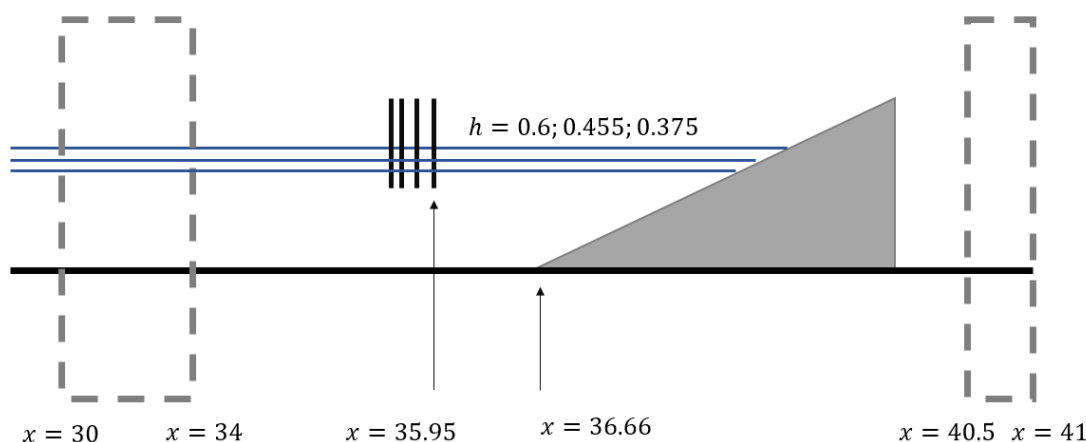
Tabel A.1 Resultaten van de OCW sommen bij de teen van de constructie. De resultaten van de fysiek model testen zijn verkregen bij de testen met de lage kruin. Onderstaande resultaten zijn gebaseerd op de inkomende signalen.

Test	OCW		Fysiek model test		Afwijking	
	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	H_{m0} [%]	$T_{m-1,0}$ [%]
T012 ($h = 0,375$)	0,140	1,57	0,138	1,445	1,45	8,65
T014 ($h = 0,6$)	0,138	1,50	0,139	1,459	-0,7	2,81
T016 ($h = 0,455$)	0,141	1,56	0,138	1,445	2,17	7,22
T001 ($h = 0,6$)	0,143	2,56	0,150	2,521	-4,67	1,55

B Model set-up OpenFoam

Het OpenFoam domein is gediscretiseerd op basis van de geforceerde condities (zie Figuur B.1 voor de model-setup). Om de gereflecteerde golven te absorberen en de OCW condities te forceren, is een sponslaag van ongeveer 1 golflengte nodig aan de zeezijde. Daarnaast heeft het de voorkeur om een afstand van minimaal een halve golflengte tussen de sponslaag en de teen van de constructie aan te houden. Om hieraan te voldoen is er voor gekozen om een 4 meter lange sponslaag te gebruiken ($x = 30$ tot $x = 34$ m). De teen van de constructie ligt op $x = 36,66$ m, dus dit betekent dat er een afstand van meer dan 2,5 m tussen de forcering en de teen van de constructie ligt. Aan de achterzijde is ook een sponslaag (0,5 m) toegepast om de golven te absorberen die door de overslag worden veroorzaakt. Deze sponslaag is alleen bedoeld om numerieke instabiliteit aan de achterzijde te voorkomen, maar heeft verder geen invloed op de resultaten.

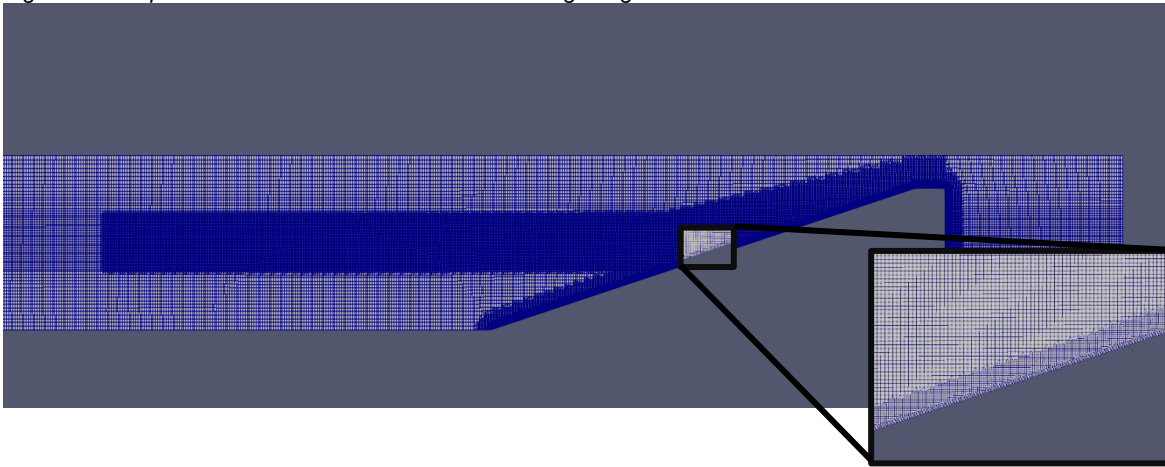
Figuur B.1 OpenFoam domein. De sponslagen zijn weergegeven met de gestippelde grijze boxen en de waterstandmeters met verticale zwarte lijnen. De drie waterstanden zijn geïllustreerd met de blauwe lijnen. Het figuur is ter illustratie en niet op schaal.



Om de rekentijd te reduceren is een ruimtelijk variërend rekenrooster gebruikt. Ten eerste is er een variatie in de verticale resolutie. In de regio rond de waterlijn ($wl \pm 0,2m$) is de resolutie het fijnst en constant. Vanaf deze regio rond de waterlijn, neemt de resolutie geleidelijk af richting de bodem en de bovenrand. Daarnaast is er een verfijning van een factor 2 rond de waterlijn en de constructie (met uitzondering van de sponslaag). Om relatief kleine ophoop tongen goed te kunnen modelleren is er verfijning van een factor 3 toegepast rond de constructie. Dit betekent dat er rond de waterlijn een resolutie is van ongeveer 1 cm terwijl het rekenrooster rond de constructie een resolutie heeft van ongeveer 3mm. Daarnaast is er een laag van parallelcellen rond de constructie toegepast (zie Figuur B.2).

Op dezelfde locatie als in de fysische experimenten zijn uitvoerpunten voor de waterstand gedefinieerd. Daarnaast zijn er ook 150 waterstandsmeters in het gehele domein geplaatst om velduitvoer te verkrijgen. Het golfoverslagdebiet wordt bepaald aan de hand van de horizontale flux van het water door een doorsnede op de kruin.

Figuur B.2 Impressie van het rekenrooster met een vergroting van de cellen rond het talud.



C Kalibratie Openfoam

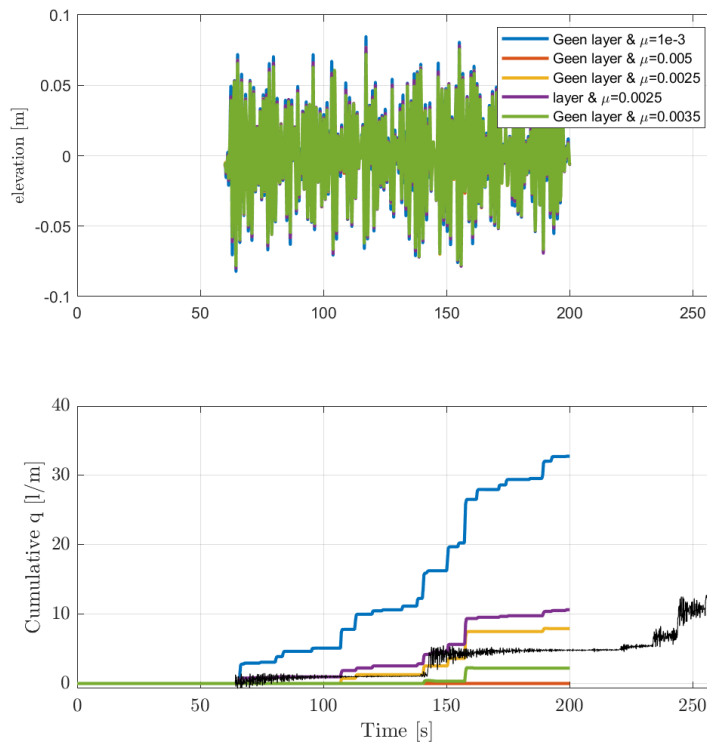
OpenFoam lost in principe de complete waterbeweging op. Echter, de turbulente stroming wordt beperkt door de grootte van het rekenrooster. Het is niet mogelijk om het rekenrooster zodanig te verfijnen dat de complete turbulente beweging correct gemodelleerd wordt, aangezien dat te veel rekentijd kost. Om hiervoor te corrigeren is de viscositeit, μ , verhoogd. Dit is in feite een constant turbulentie model met een turbulentie eddy viscositeit. Aangezien niet-brekende golven vrijwel rotatie vrij zijn heeft de viscositeit weinig invloed op de golf voortplanting, maar als de golven gaan breken is turbulentie wel erg belangrijk. Zonder aangepaste viscositeit wordt de golfoverslag erg overschat. Doordat de viscositeit is gerelateerd aan het rekenrooster, is er een optimale viscositeit per resolutie. Tijdens de kalibratie zijn daarom sommen met een aantal resoluties en viscositeit vergeleken.

Om de optimale rekeninstellingen te vinden zijn verschillende sommen uitgevoerd. Ten eerste zijn er een aantal instellingen gebruikt om Test T216 te modelleren, waarbij de resolutie van het rekenrooster en de viscositeit is aangepast. Om de doorlooptijd te beperken is dit gedaan voor een tijdsduur van 200 seconden. De volgende instellingen zijn gebruikt voor deze analyse:

1. Geen layer en $\mu=1^{-3}$
2. Geen layer en $\mu=0,005$
3. Geen layer en $\mu=0,0025$
4. Layer en $\mu=0,0025$
5. Geen layer en $\mu=0,0035$

waarbij μ de viscositeit is en layer een laag van enkele parallelle cellen rond de constructie voorstelt (zie bijvoorbeeld Figuur B.2). Deze parallelle cellen is gewenst om dunne oplooptongen te modelleren. Uit de resultaten blijkt dat qua golftransformatie de invloed van de viscositeit erg klein is (zie bovenste paneel Figuur C.1). Daarnaast is de invloed van de viscositeit op het golfoverslagdebiet wel erg groot (zie onderste paneel Figuur C.1). Een viscositeit van $0,0025 \text{ m}^2/\text{s}$ is gekozen als optimale waarden. Bij deze waarde treedt er relatief weinig golfdemping op en komt het golfoverslagdebiet redelijk goed overeen met de meting. Daarnaast heeft het ook de voorkeur om een layer toe te voegen, aangezien dit van belang kan zijn voor dunne oplooptongen.

Figuur C.1 Gevoeligheidsanalyse van het rekenrooster. In het bovenste paneel is de tijdreeks van de oppervlakte uitwijking getoond. Het onderste paneel laat het cumulatieve overslag debiet zien in de tijd. In zwart is het resultaat van de metingen weergegeven.



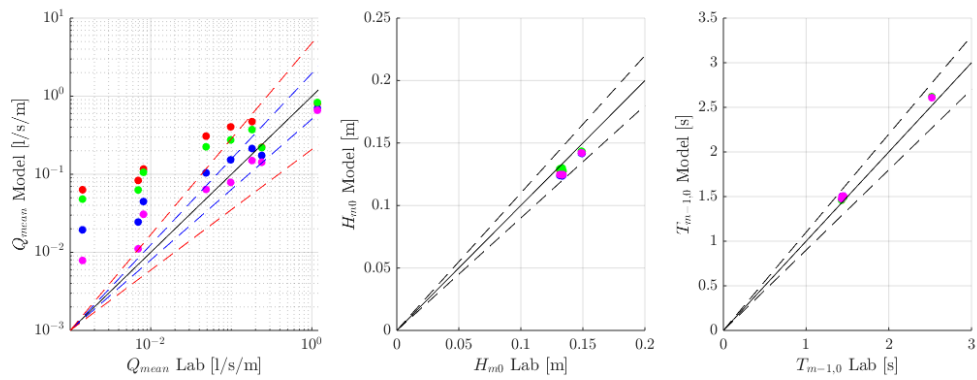
Naast de kalibratie van Test T216, zijn er ook viertal instelling gebruikt om alle testen te modelleren. Dit is gedaan om te voorkomen dat de instellingen alleen gelden voor Test T216. Een verfijning van factor 1 en 2 is toegepast rond de constructie voor twee verschillende viscositeiten. Dus, de volgende instellingen zijn gebruikt voor de kalibratie van alle testen:

- 1 Verfijning van 1 en $\mu=1e-3$ (rood)
- 2 Verfijning van 1 en $\mu=0,0025$ (blauw)
- 3 Verfijning van 2 en $\mu=1e-3$ (groen)
- 4 Verfijning van 2 en $\mu=0,0025$ (magenta)

De resultaten van deze sommen laten zien dat de instellingen die gevonden zijn voor Test T216 ook goede resultaten geven voor de overige testen (Figuur C.2). Daarnaast is duidelijk zichtbaar dat de rekeninstellingen minder invloed hebben voor de sommen met relatief veel golfoverslagdebiet. De sommen met de lange golven (testen met de meeste golfoverslag) hebben vrijwel geen afhankelijkheid van de rekeninstellingen.

Op basis van de analyse is ervoor gekozen om een verfijning van een factor 2 toe te passen rond de constructie met een viscositeit van $0,0025 \text{ m}^2/\text{s}$. Daarnaast is er ook een laag van parallelle (layer) cellen rond de constructie toegepast.

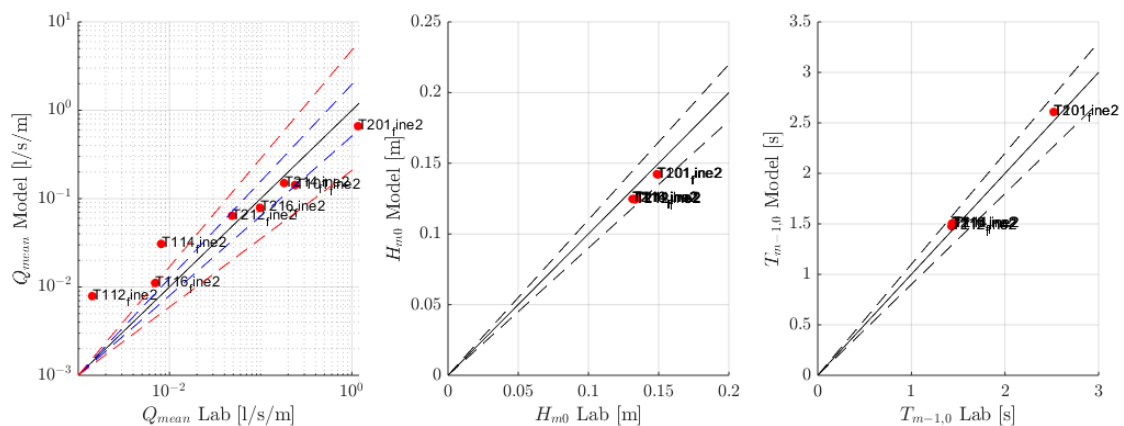
Figuur C.2 Resultaten van de kalibratie voor de vier verschillende instellingen (weergegeven in kleuren). In het rechterpaneel is het golfoverslagdebiet weergegeven met de 50% (blauwe stippellijn) en 500% (rode stippellijn). In het middelste paneel is de spectrale golfhoogte weergegeven met de 10% afwijking. In het rechter paneel is de spectrale periode weergegeven met de 10% afwijking.



D Validatie OpenFoam

Als validatie is het gemiddelde overslagdebiet, de spectrale golfhoogte en de spectrale periode vergeleken met de metingen. Dit is gedaan voor de 8 testen (Tabel A.1) en een tijdsduur van 700 seconden. Voor de metingen en de numerieke resultaten zijn dan ook alleen de eerste 700 seconden gebruikt voor de analyse. Dit is niet lang genoeg om het overslagdebiet nauwkeurig te bepalen, maar omdat de golf-trein hetzelfde is in OpenFoam en de fysische experimenten maakt de tijdsduur niet uit voor de validatie.

Figuur D.1 Scatter plots van de OpenFoam resultaten. In het linker paneel is de gemiddelde overslag getoond. Het tweede paneel laat de spectrale golfhoogte zien en de spectrale periode is getoond in het derde paneel. De grijze gestippelde lijn is de 10% lijn. De blauwe lijn is een factor 2 en de rode lijn een factor 5.



De golfparameters zijn goed gemodelleerd met OpenFoam (zie Figuur D.1). De spreiding in het golfoverslag debiet is groter, maar de meeste punten liggen binnen een factor 2. Op zich is een fout in het golfoverslagdebiet niet erg voor de productie sommen. Als de fout voor de verschillende waterdieptes gelijk is kan nog steeds de invloed worden bepaald. Echter, een te grote fout is ook niet gewenst om dat dat betekent dat er wellicht fysische processen verkeerd zijn gemodelleerd. Om toch gebruik te maken van de numerieke sommen is een toepasbaarheidsbereik vastgesteld voor de berekening van het golfoverslagdebiet.

Toepasbaarheidsbereik

De testen waar de fout het grootst is zijn de testen met de hoge kruin en dus een relatief laag overslagdebiet. Voor deze testen is de oplooptong ook erg klein. Om zo'n kleine oplooptong goed te kunnen modelleren is wellicht een fijner rekenrooster nodig. Om deze hypothese te checken is voor elke test de theoretische oplooptong berekend en vergeleken met de fout in het golfoverslagdebiet. Dit is gedaan voor twee verschillende resoluties in het rekenrooster. Het huidige rekenrooster en een grover rekenrooster. Op deze manier is het mogelijk om de toepasbaarheid te beschrijven met de dimensieloze laagdikte ($h_{2\%}/dx$). De theoretische laagdikte is berekend met de 2% overschrijdingswaarden van de laagdikte volgens:

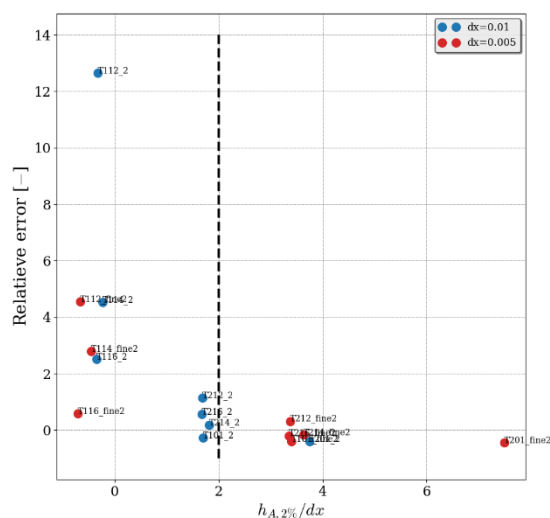
$$h_{2\%} = c_{h2\%}(R_{u2\%} - Z_A)$$

waarbij hier voor $c_{h2\%}$ een waarde van 0,2 is gebruikt (bij een helling van 1:3), $R_{u2\%}$ de 2% oploophoogte berekend volgens de TAW (2002) formulering en Z_A de hoogte op de helling. Om

de laagdikte op de kruin te beschouwen is de Z_A gelijk gezet aan de kruinhoogte. De resolutie van het rekenrooster, dx , is bepaald aan de hand van de resolutie op het talud.

Er blijkt een duidelijk trend zichtbaar wanneer de relatieve laagdikte wordt uitgezet tegen over de relatieve error in het golfoverslagdebiet (zie Figuur D.2). Merk op dat de theoretische laagdikte negatief wordt voor een aantal testen. Er is theoretisch gezien dus geen 2% overschrijdingswaarden voor de laagdikte. Voor het bepalen van de toepasbaarheid zijn deze waarden toch in het figuur weergegeven. Voor de productie sommen is een relatieve laagdikte van $\frac{h_{2\%}}{dx} = 2$ aangenomen als minimum voor de toepasbaarheid. De fout is dan kleiner dan een factor 2 (relatieve error van 1). Merk op dat de resultaten met een dx van 0,01 berekend zijn met de dezelfde viscositeit als met een dx van 0,005. Het zou kunnen dat de resultaten met een dx van 0,01m een beter resultaat geven voor een andere viscositeit. Echter, tijdens de kalibratie was aangetoond dat een groter viscositeit, welke nodig zou zijn om goede resultaten voor een grover rooster te geven, de golfvoortplanting te veel beïnvloed.

Figuur D.2 Relatieve error in het golfoverslag debiet uitgezet tegen over de relatieve laagdikte. De kleuren van de bolletjes geven de twee verschillende rekenrooster weer. De gestippelde lijn geeft de toepasbaarheidsgrens aan.



Nauwkeurigheid OpenFoam

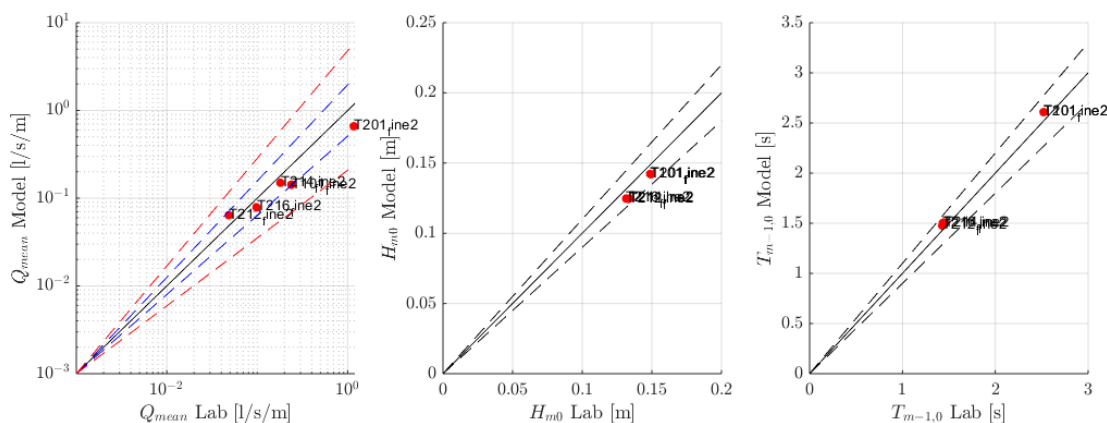
Op basis van de resultaten binnen het toepasbaarheidsbereik kan ook de nauwkeurigheid van het model worden bepaald. De resultaten zijn nauwkeurig gesimuleerd voor de golfparameters H_{m0} en $T_{m-1,0}$ en het gemiddelde golfoverslagdebiet (Tabel D.1). De relatieve afwijking is kleiner dan 7% voor de golfhoogte en kleiner dan 5% voor de spectrale golfperiode. De relatieve afwijking in overslagdebiet is groter met een maximum van 43% (zie ook Figuur D.3). Tussen de sommen met verschillende waterdieptes (T201, T212, T216) is een afwijking van ongeveer 50% gevonden. Niet alleen de golfhoogte, golfperiode en het gemiddelde golfoverslagdebiet zijn vergeleken, ook de spectrale vorm en het cumulatieve golfoverslagdebiet zijn vergeleken met de metingen (zie Appendix E). Uit deze vergelijking volgt dat de spectrale vorm vrijwel identiek is aan de metingen. Dus de variatie in het golfoverslagdebiet kan niet worden veroorzaakt door een afwijking in de spectrale vorm van de golven bij de teen van de dijk. In de tijdreeksen van de cumulatieve golfoverslagdebieten zijn

wel grote verschillen zichtbaar met de metingen. In het algemeen zijn de individuele overslag events redelijk goed voorspeld, maar de magnitude van de events niet altijd gelijk aan de meting.

Tabel D.1 Resultaten van de OpenFoam resultaten binnen het toepasbaarheidsbereik.

Test	OpenFoam			Fysiek model test			Afwijking		
	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	Q_{mean} [l/s/m]	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	Q_{mean} [l/s/m]	H_{m0} [%]	$T_{m-1,0}$ [%]	Q_{mean} [%]
T101	0,142	2,609	0,142	0,149	2,520	0,238	-4,70	3,53	-40,34
T201	0,142	2,608	0,660	0,149	2,520	1,169	-4,70	3,49	-43,54
T212	0,125	1,477	0,064	0,133	1,428	0,049	-6,02	3,43	30,61
T214	0,125	1,505	0,150	0,134	1,450	0,181	-6,72	3,79	-17,13
T216	0,125	1,503	0,079	0,132	1,435	0,098	-5,30	4,74	-19,39

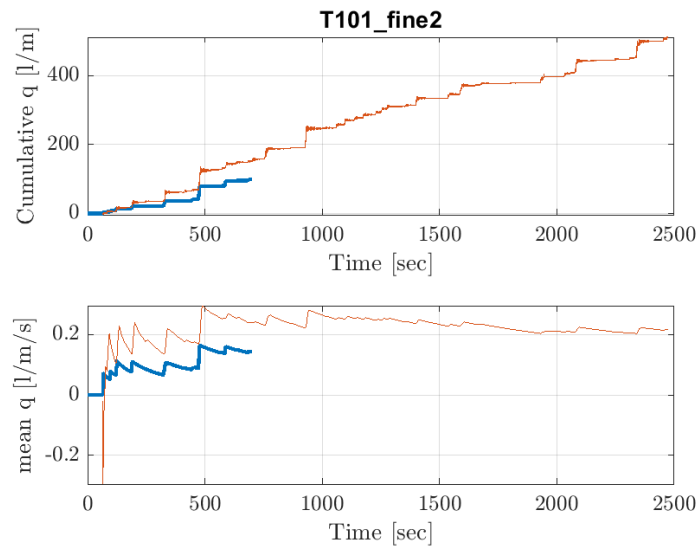
Figuur D.3 Resultaten van de OpenFoam validatie binnen het toepasbaarheidsbereik. In het linker paneel is de gemiddelde overslag getoond. Het tweede paneel laat de spectrale golfhoogte zien en de spectrale periode is getoond in het derde paneel. De grijze gestippelde lijn is de 10% lijn. De blauwe lijn is een factor 2 en de rode lijn een factor 5.



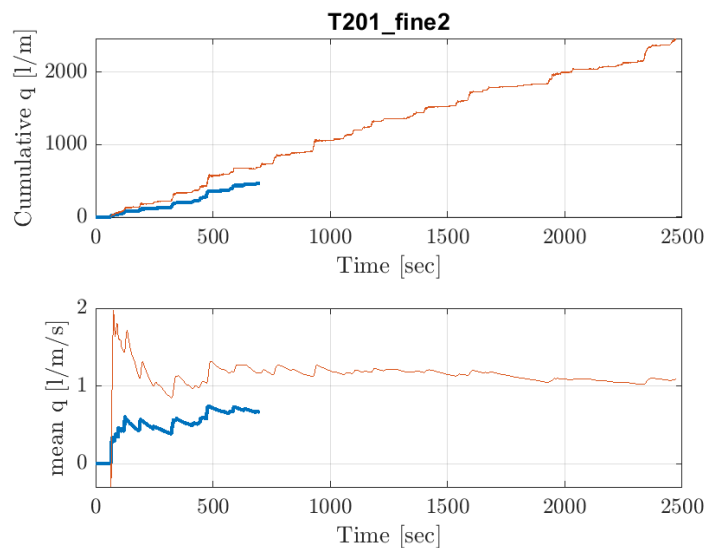
E Resultaten Validatie OpenFoam

Voor de testen uit de validatie zijn de tijdreeksen van de simulatieve en gemiddelde golfoverslag debieten vergeleken met de metingen. De oranje lijnen zijn de metingen en de blauwe lijnen de resultaten van OpenFoam.

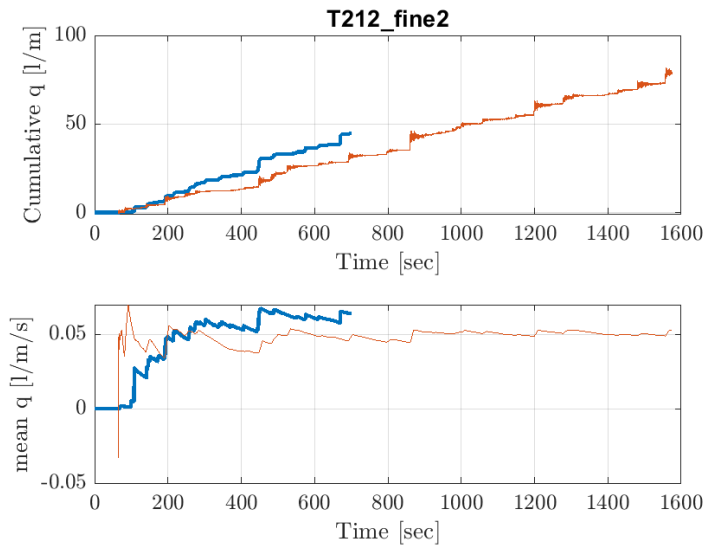
Figuur E.1 Cumulatief en gemiddelde golfoverslagdebiet voor Test T01



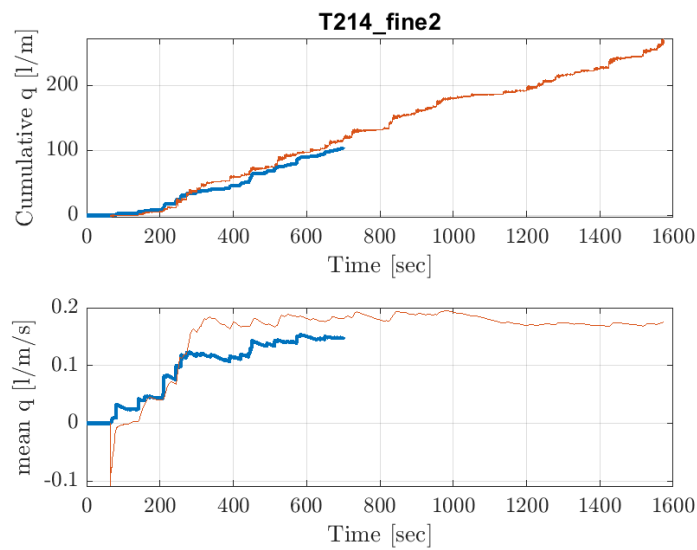
Figuur E.2 Cumulatief en gemiddelde golfoverslagdebiet voor Test T201



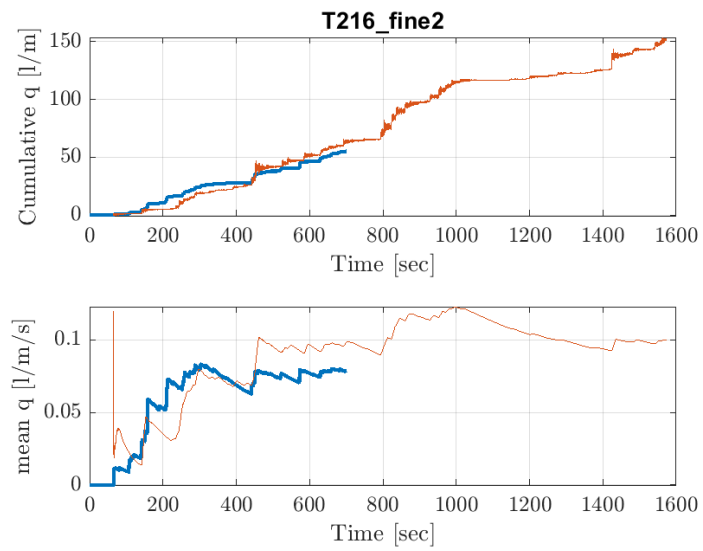
Figuur E.3 Cumulatief en gemiddelde golfoverslagdebiet voor Test 212



Figuur E.4 Cumulatief en gemiddelde golfoverslagdebiet voor Test T214



Figuur E.5 Cumulatief en gemiddelde golfverslagdebiet voor Test T216



F Resultaten numerieke en fysieke experimenten

De resultaten van de numerieke sommen zijn weergegeven in Tabel F.1. De waarden voor de inkomende golfhoogte en spectrale periode zijn bepaald aan de hand van de sommen zonder constructie. De waarden uit de fysieke testen zijn weergegeven in Tabel F.2. Alleen voor de brekende golven ($s_{m-1,0} > 0,0277$) is de invloedsfactor getoond.

Tabel F.1 Resultaten van de numerieke sommen. De spectrale periode en spectrale golfhoogte zijn gemeten met de sommen zonder constructie.

Testnaam	R_c [m]	d [m]	q [l/s/m]	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	γ_d [-]
T212_1	0,217	0,375	0,237	0,130	1,582	0,893
T212_2	0,158	0,375	0,251	0,130	1,582	0,902
T212_3	0,100	0,375	0,258	0,130	1,582	0,906
T216_1	0,217	0,455	0,361	0,131	1,624	0,940
T216_2	0,158	0,455	0,421	0,131	1,624	0,975
T216_3	0,100	0,455	0,411	0,131	1,624	0,972
T214_1	0,217	0,6	0,454	0,127	1,574	1,053
T214_2	0,158	0,6	0,488	0,127	1,574	1,074
T214_3	0,100	0,6	0,439	0,127	1,574	1,051
T112_1	0,294	0,375	0,041	0,130	1,582	0,887
T112_2	0,215	0,375	0,044	0,130	1,582	0,898
T112_3	0,139	0,375	0,049	0,130	1,582	0,912
T116_1	0,294	0,455	0,065	0,131	1,624	0,920
T116_2	0,215	0,455	0,094	0,131	1,624	0,979
T116_3	0,139	0,455	0,108	0,131	1,624	1,007
T114_1	0,294	0,6	0,102	0,127	1,574	1,050
T114_2	0,215	0,6	0,107	0,127	1,574	1,061
T114_3	0,139	0,6	0,113	0,127	1,574	1,077

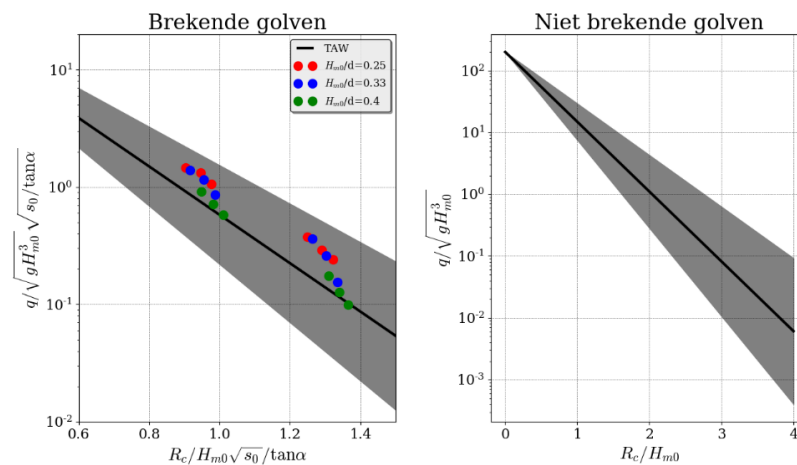
Tabel F.2 Resultaten van de fysieke experimenten.

Testnaam	R_c [m]	d [m]	q [l/s/m]	H_{m0} [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	γ_d [-]
T101	0,375	0,600	0,216	0,15	2,521	-
T102	0,375	0,600	0,149	0,151	2,000	-
T103	0,375	0,600	0,048	0,15	1,655	1,002
T104	0,375	0,600	0,032	0,149	1,475	1,083
T113	0,375	0,600	0,038	0,143	1,647	1,005
T114	0,375	0,600	0,007	0,139	1,459	0,943
T201	0,274	0,600	1,087	0,151	2,521	-
T202	0,274	0,600	0,847	0,15	2,000	-
T203	0,274	0,600	0,413	0,151	1,651	1,079
T204	0,274	0,600	0,287	0,151	1,471	1,148
T213	0,274	0,600	0,335	0,144	1,643	1,073
T214	0,274	0,600	0,174	0,141	1,455	1,103
T105	0,375	0,455	0,216	0,151	2,526	-
T106	0,375	0,455	0,049	0,149	1,958	-
T107	0,375	0,455	0,019	0,149	1,662	0,882
T108	0,375	0,455	0,010	0,15	1,470	0,931
T115	0,375	0,455	0,015	0,142	1,648	0,890
T116	0,375	0,455	0,007	0,138	1,445	0,955
T205	0,274	0,455	1,030	0,15	2,529	-
T206	0,274	0,455	0,625	0,149	1,959	-
T207	0,274	0,455	0,277	0,149	1,663	0,992
T208	0,274	0,455	0,131	0,15	1,469	0,991
T215	0,274	0,455	0,223	0,142	1,647	0,993
T216	0,274	0,455	0,100	0,138	1,445	1,019
T109	0,375	0,375	0,182	0,15	2,569	-
T110	0,375	0,375	0,020	0,15	1,990	-
T111	0,375	0,375	0,008	0,142	1,660	0,816
T112	0,375	0,375	0,002	0,138	1,445	0,835
T209	0,274	0,375	0,949	0,15	2,575	-
T210	0,274	0,375	0,350	0,149	1,992	-
T211	0,274	0,375	0,128	0,142	1,633	0,904
T212	0,274	0,375	0,052	0,138	1,444	0,916

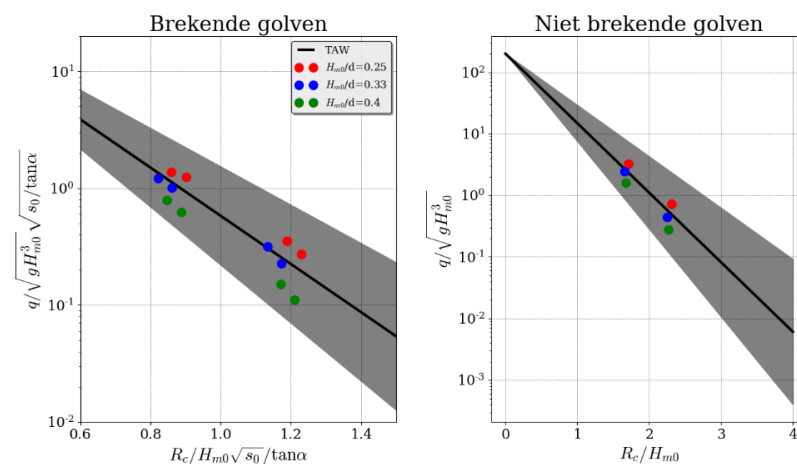
G Discussie: invloed inkomende spectrale periode $T_{m-1,0}$

In Paragraaf 2.5 zijn twee methodes beschreven voor het bepalen van de inkomende golfcondities (H_{m0} en $T_{m-1,0}$). Voor de beide methoden is het dimensieloze golfoverslagdebiet en de dimensieloze kruinhoogte bepaald. De resultaten op basis van de extra sommen zonder constructie (methode 2) geven een veel beter beeld van de invloed van de waterdiepte (zie Figuur G.1), terwijl de methode op basis van lineaire golf theorie een minder goede relatie laat zien (Figuur G.2). Vooral de punten bij een lage waterdiepte verschuiven naar beneden. Deze verandering (vooral in $T_{m-1,0}$) komt vooral doordat in ondiep water meer energie naar de lange golven verplaatst en het niet mogelijk is om voor deze lange golven de splitsing toe te passen. Naast dat de datapunten verschuiven, vallen nu ook alle datapunten in de categorie brekende golven. Wel is ook op basis van methode 1 een invloed van de waterdiepte zichtbaar.

Figuur G.1 Dimensieloze resultaten van de numerieke sommen weergegeven met de TAW (2002) formulering. Deze resultaten zijn op basis van een inkomende signaal bepaald met lineair golf theorie per test.



Figuur G.2 Dimensieloze resultaten van de numerieke sommen weergegeven met de TAW (2002) formulering. Deze resultaten zijn op basis van een totaal signaal in een numerieke goot zonder constructie.



H Invloed waterdiepte op golfoverslagvolumeverdeling

Het effect van de waterdiepte op het golfoverslagdebiet is beschreven in een aparte memo welke voor de volledigheid is toegevoegd als bijlage.



Memo

Datum 24 juni 2019	Aantal pagina's 9	
Contactpersoon Paul van Steeg	Doorkiesnummer +31(0)88 335 8376	E-mail Paul.vanSteeg@deltares.nl

Onderwerp
Invloed waterdiepte op vorm parameter b in golfoverslagmodellering

Inleiding

Binnen het KPP-VOW project, deelproject 'invloed waterdiepte op golfoverslag' (Deltares, 2019a) wordt onderzoek uitgevoerd naar de invloed van de waterdiepte op het golfoverslag-debiet. Eén van de hypothesen is dat een ondiepte aan de teen van de dijk leidt tot een andere golfhoogteoverschrijdingskromme wat weer leidt tot een andere volumeverdeling van de overslaande golven; hierbij neemt de significante golfhoogte H_{m0} nauwelijks af maar de grotere golven kunnen significant afnemen. Aangezien de grotere golven naar verwachting de meeste golfoverslag veroorzaken kan dit een verschil geven in het golfoverslagdebiet. In deze memo wordt deze hypothese getoetst door de volumeverdeling te kwantificeren (zogenoemde b waarden) voor een aantal testen met verschillende waterdieptes en de waarden van deze testen met elkaar te vergelijken.

In een numerieke simulatie met behulp van OpenFOAM (Deltares, 2019b) zijn meerdere casussen doorgerekend. Bij deze casussen is het mogelijk om de individuele overslaande volumes te bepalen. Het doel van deze memo is om de volumeverdeling van een viertal proeven (een diepwater en een ondiep water situatie, beiden voor een situatie met een relatief laag golfoverslagdebiet en met een relatief hoog golfoverslagdebiet) met elkaar te vergelijken en een inschatting te maken in hoeverre dit van invloed is op het golfoverslagdebiet.

Literatuuronderzoek

De verdeling van golfvolumes is in het Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag (TAW, 2002) als volgt gegeven:

$$P_v = 1 - e^{-\left(\frac{V}{a}\right)^b} \quad (1)$$

Met

$$a = 0.84 T_m \frac{q}{P_{ov}} \quad (2)$$

$$b = 0.75 \quad (3)$$

Waarbij

P_v	=	de kans dat de realisatie van het overslagvolume per golf V groter dan of gelijk aan V is [-]
V	=	overslagvolume per golf [m^3 / m]
T_m	=	de gemiddelde golfperiode ($N \cdot T_m$ is de stormduur of beschouwd tijdsinterval) [s]

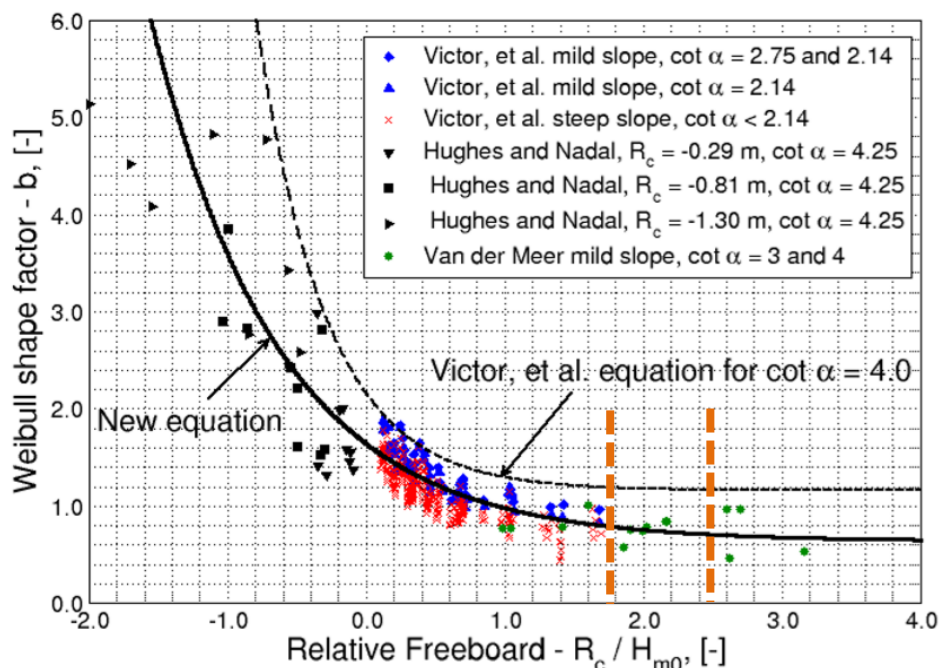
Datum
24 juni 2019

Pagina
2 van 9

q = gemiddeld golfoverslagdebiet [m^3/s per m]
 P_{ov} = N_{ov}/N = de kans op overslag per golf [-]
 N_{ov} = het aantal overslaande golven [-]
 N = het aantal inkomende golven tijdens de stormduur [-]
 b = vormfactor met een waarde van 0,75.

Vergelijking (1) is een zogenoemde twee-parameter Weibull verdeling met een vormfactor b (welke de extreme staart van de volumeverdeling beschrijft en een schaalfactor a (welke de vergelijking normaliseert). In deze studie ligt de interesse dus op de vormfactor b aangezien de hypothese is dat deze extreme staart van het volume wordt beïnvloed door de diepte. Om deze reden wordt in het hiernavolgende de waarde van b bepaald voor een aantal testen met diep en ondiep water. Aangezien de schaalparameter a geen invloed heeft op de verdeling van de volumes en alleen de magnitude van de volumes beschrijft, wordt deze niet nader beschouwd.

In Hughes et al (2012) is deze formule aangepast. Daarbij is b geen vaste waarde meer maar is het een functie van de relatieve kruinhoogte zoals weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Weibull vorm factor b voor gladde taluds als functie van de relatieve kruinhoogte (overgenomen uit Hughes (2012)). De dimensieloze kruinhoogtes (2.5 en 1.8) van de fysische experimenten zijn weergegeven met een oranje stippellijn.

Hierbij zijn de vormfactor b en de schaalfactor a beschreven door:

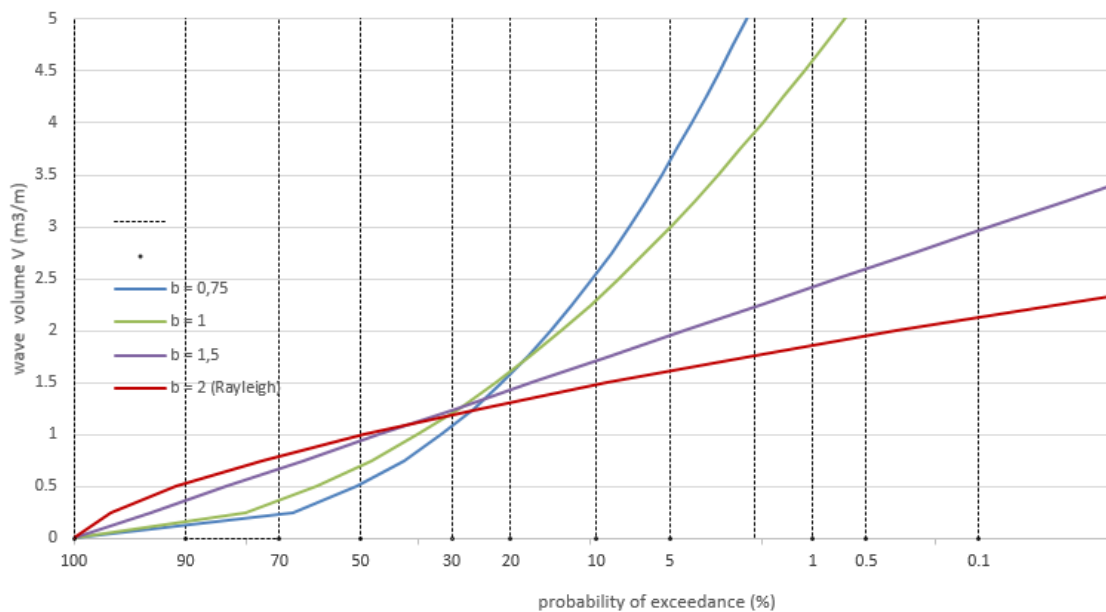
$$b = e^{\left(-0.6 \frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{1.8}} + 0.64 \quad (4)$$

$$a = \left(\frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)} \right) \left(\frac{qT_m}{P_{ov}} \right) \quad (5)$$

waarbij Γ de mathematische gamma functie is.

Door Zannutigh et al (2013) is de vormfactor b als functie van het dimensieloze golfoverslagdebiet ($q/(g \cdot H_{m0} \cdot T_{m-1,0})$ beschreven) waardoor de testresultaten met ruwheidselementen beter in dit model pasten.

Er is een sterke relatie tussen de waarde van de vormparameter b en de volume verdeling van de overslaande golven. Dit is voor enkele waarden van de vormparameter b weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Invloed van vormfactor b op de volumeverdeling weergegeven op een Rayleigh schaal

Overzicht beschouwde testresultaten

Ten behoeve van de analyse worden vier numerieke testresultaten beschouwd. Hierbij is gebruik gemaakt van twee testen met relatief veel diepte en twee testen welke relatief ondiep zijn (in verhouding tot de gebruikte golfhoogte). Tevens is er onderscheid gemaakt tussen testen met relatief veel golfoverslagdebiet en weinig golfoverslagdebiet. De beschouwde testen zijn weergegeven in Tabel 1.

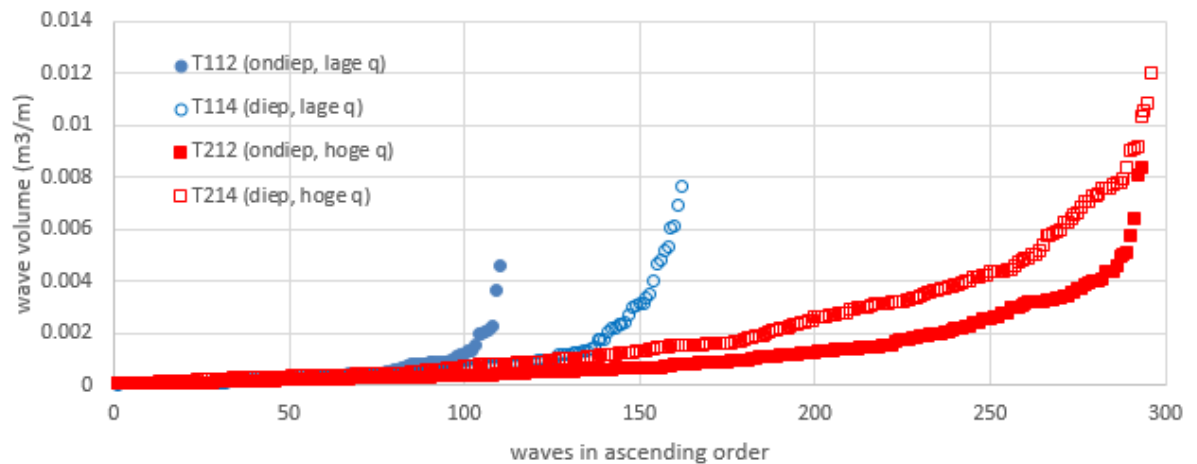
Tabel 1: Beschouwde numerieke testen

Test	duiding	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	d (m)	$s_{m-1,0}$ (-)	H/d (-)	R_c (m)	q_{meting} (l/s/m)	$q_{meting_prot}^*$ (l/s/m)
T112_1	lage q, ondiep	0.130	1.582	0.375	0.033	0.35	0.294	0.041	1.3
T114_1	lage q, diep	0.127	1.574	0.600	0.033	0.21	0.294	0.102	3.2
T212_1	hoge q, ondiep	0.130	1.582	0.375	0.033	0.35	0.217	0.237	7.5
T214_1	hoge q, diep	0.127	1.574	0.600	0.033	0.21	0.217	0.454	14.4

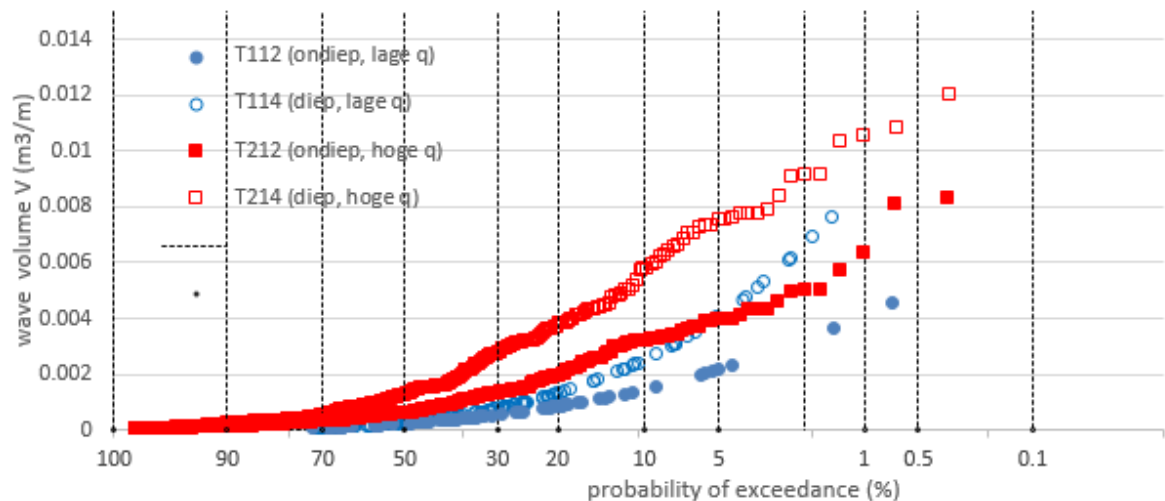
Hierbij zijn de H_{m0} en $T_{m-1,0}$ bepaald ter plaatse van de teen conform beschreven in Deltares (2019b).

Resultaten

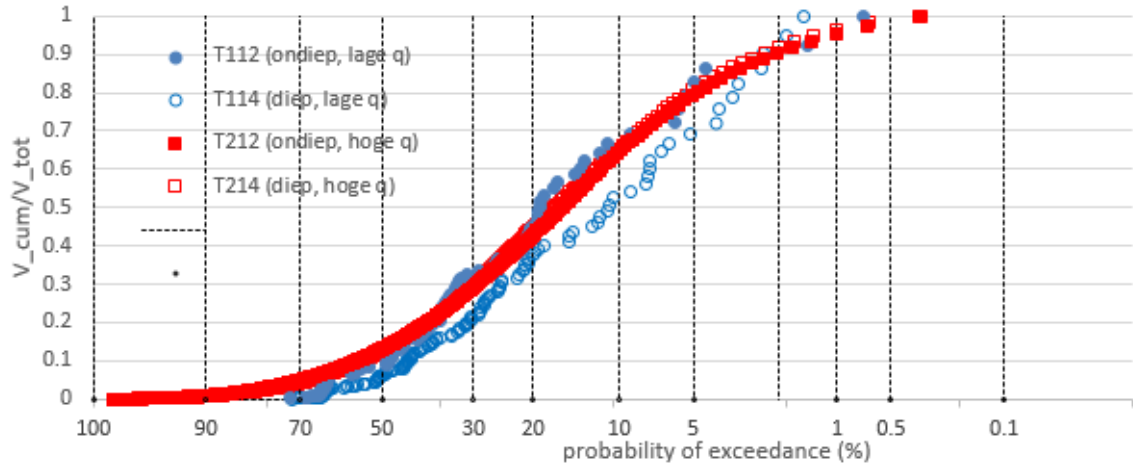
De resultaten zijn de volumes per golf. Deze zijn grafisch weergegeven in Figuur 3 en Figuur 4. De cumulatieve volumes V_{cum} (genormaliseerd met het totale volume V_{tot}) zijn weergegeven in Figuur 5.



Figuur 3 Volume per overslaande golf (gerangschikt van klein naar groot)



Figuur 4 Volume per overslaande golf (op Rayleigh schaal weergegeven)



Figuur 5 Cumulatieve volumes (genormaliseerd met het totale overslaande volume)

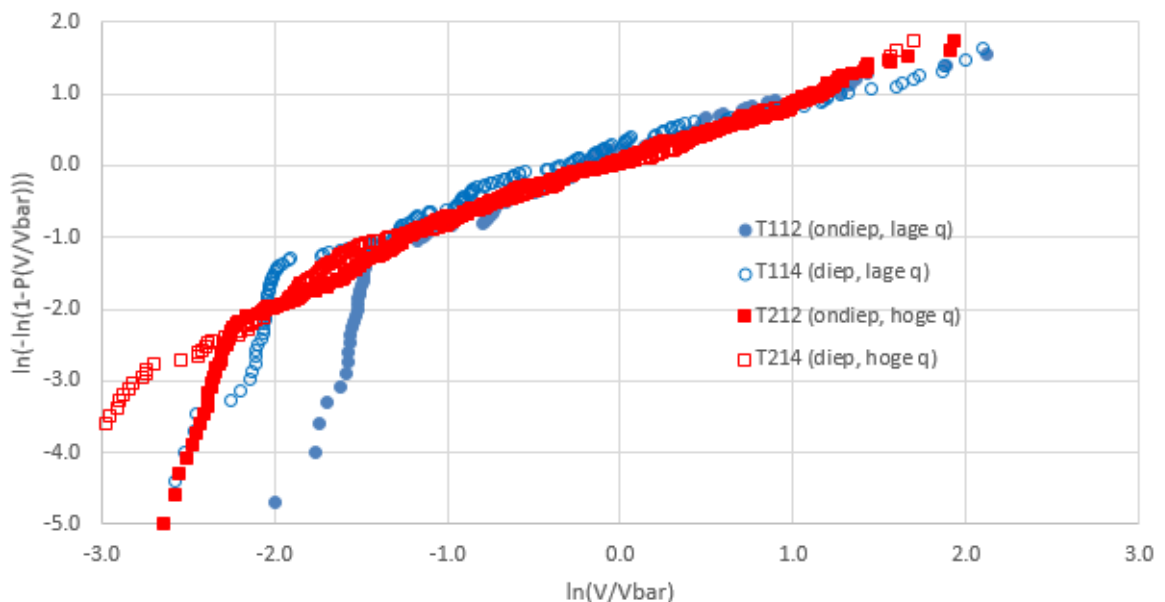
Bepaling van b-waarden

Bij de bepaling van de b-waarden is de procedure gevolgd welke tevens is beschreven in Zanuttigh et al (2013). Hierbij is de volgende procedure gehanteerd:

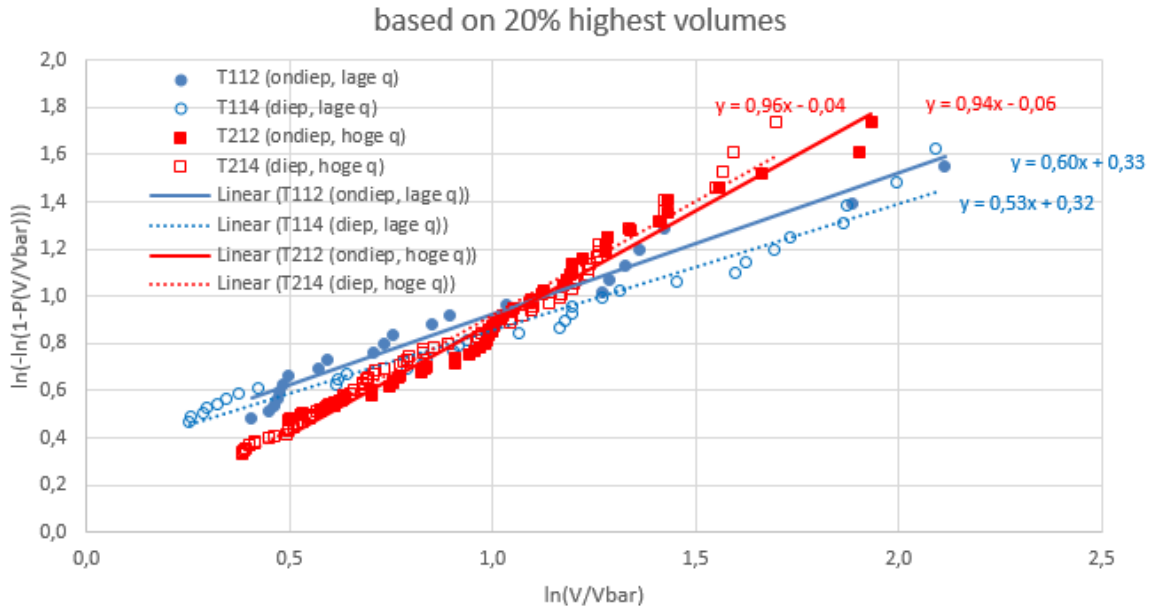
1. Plotten van de resultaten op een Weibull schaal (Figuur 6);
2. Fitten van de resultaten voor de hoogste 10%, 20% en 30% van de volumes. (Figuur 7 geeft de situatie waarbij "20%" is gekozen);
3. Bepalen b -waarde (gelijk aan de hoek van de Weibull fit) voor alle situaties (vier testen en drie percentages);
4. Bepalen b -waarde per proef op basis van het gemiddelde van de gekozen percentages (Figuur 8 en Tabel 2);
5. Visuele controle op keuze voor waarde van b (Figuur 9);
6. Vergelijken van afgeleide b -waarde met b -waarden in de literatuur (Figuur 10);

De bovenstaande stappen zijn hieronder verder toegelicht.

In Figuur 6 zijn de resultaten opnieuw weergegeven op een Weibull schaal. Hierbij is V_{bar} het gemiddelde golfoverslagvolume. Bij een rechte lijn is er sprake van een Weibull verdeling. Doorgaans is dit echter niet het geval en is alleen de staart Weibull verdeeld. Om die reden is de fit alleen toegepast op de hoogste volumes. De hoek van de lijn geeft de b -waarde. Dit is gedaan voor zowel de hoogste 10%, 20% en 30% van de golfvolumes (in Figuur 5 valt te zien dat deze golven voor circa 35%, 50% en 70% van het golfoverslagdebiet zorgen). De waarde van de schaalparameter a is bepaald met behulp van Vergelijking (5) waarbij voor q en P_{ov} de gemeten waarden zijn genomen. Voor T_m is een waarde van 1,34 s gehanteerd.

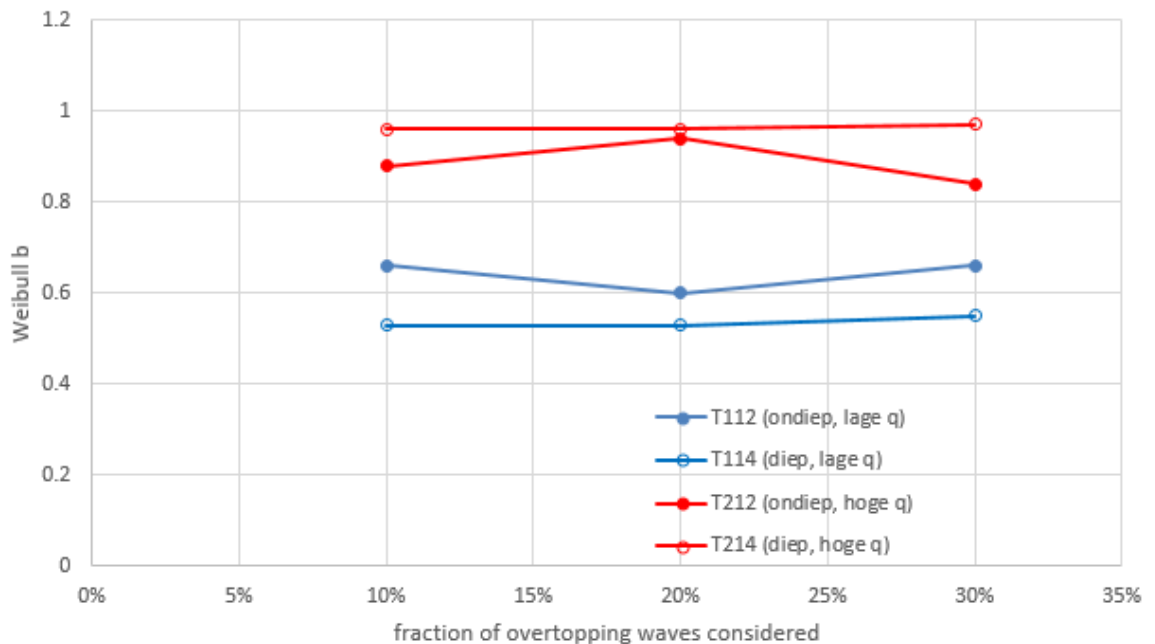


Figuur 6 Resultaten weergegeven in een Weibull plot



Figuur 7 Fitting op basis van de 20% grootste golfvolumes. De hoek van de lijn is gelijk aan de b -waarde. Eenzelfde plot is gemaakt voor de 10% en 30% grootste golfoverslagvolumes maar niet weergegeven.

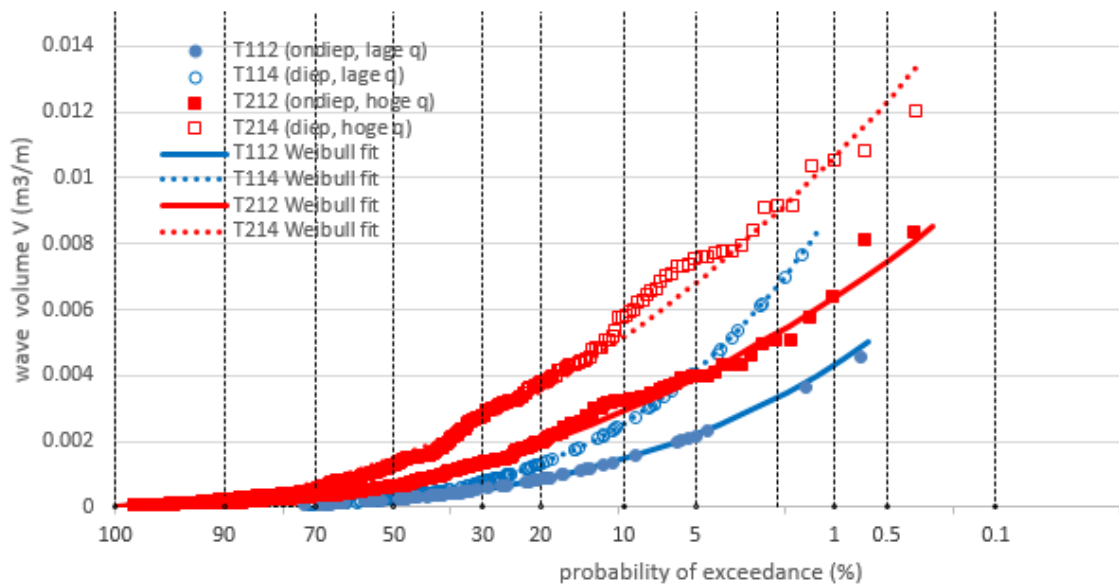
Het is lastig om te bepalen wat het juiste percentage zou zijn om de vormparameter b op te baseren. De b -waarden als functie van dit percentage zijn weergegeven in Figuur 8. Op basis daarvan wordt gekozen om het gemiddelde van die drie waarden te nemen.



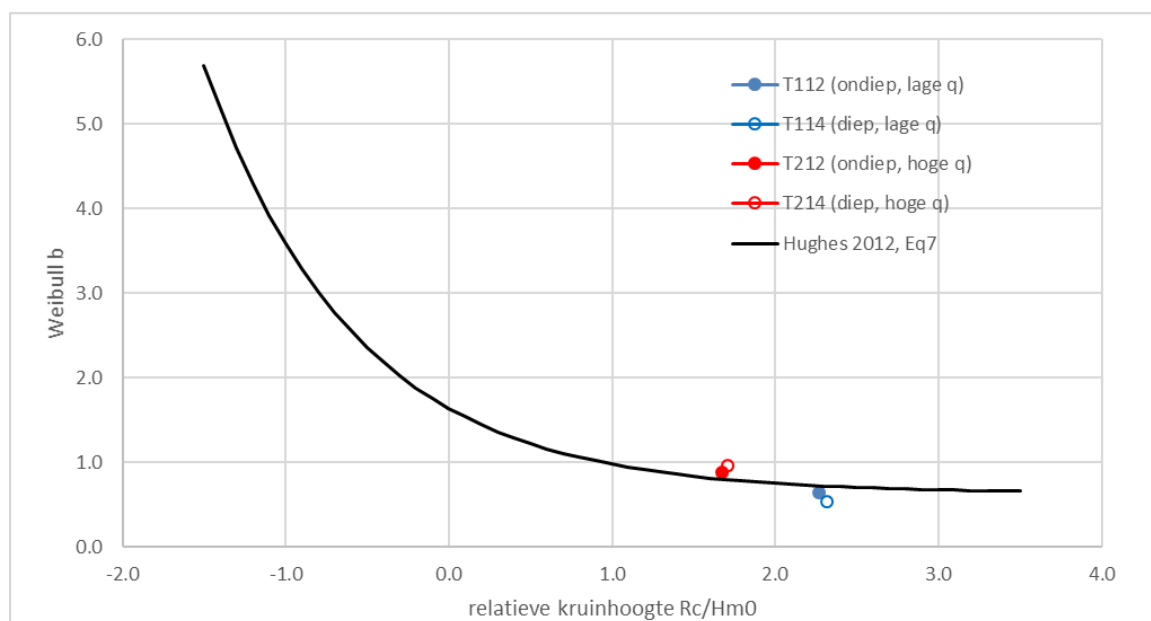
Figuur 8 Vormparameter b als functie van % beschouwde hoogste golfoverslagvolumes.

Tabel 2: Vormparameter b als voor verschillende % beschouwde hoogste overslagvolume

	10%	20%	30%	average
T112 (ondiep, lage q)	0,66	0,60	0,66	0,64
T114 (diep, lage q)	0,53	0,53	0,55	0,54
T212 (ondiep, hoge q)	0,88	0,94	0,84	0,89
T214 (diep, hoge q)	0,96	0,96	0,97	0,96



Figuur 9 Volumes en gefitte Weibull verdeling



Figuur 10 Afgeleide waarde van vormparameter b als functie van de relatieve kruinhoogte in vergelijking met de formule van Hughes (2012)

Conclusies

In voorliggend memo is de hypothese getoetst of de waterdiepte invloed heeft op de verdeling van de golfoverslagvolumes. Dit is gebaseerd op een viertal numerieke simulaties waarbij is gevarieerd in de relatieve waterdiepte en het golfoverslagdebiet.

De verdeling van de golfoverslagvolumes kan worden uitgedrukt in de vormparameter b welke wordt gehanteerd bij een Weibull verdeling. De vormparameter b is bepaald door een Weibullverdeling te fitten op de gemeten volumes van de vier beschouwde numerieke proeven.

De bepaalde waarden van de vormparameter b van de vier proeven sluiten goed aan op de waarden in de literatuur.

Bij de beschouwde proeven wordt de vormparameter b niet significant beïnvloed door de relatieve waterdiepte. Derhalve kan de hypothese dat de waterdiepte invloed heeft op de verdeling van golfoverslagvolumes niet worden bevestigd.

Referenties

Deltares, 2019a. Plan van Aanpak KPP2019 project HV02 2019 – Versterking Onderzoek Waterveiligheid, 9 januari 2019

Deltares 2019b. Invloed waterdiepte op golfoverslag, concept rapport met kenmerk 11203682-015-ZWS-0001, september 2019

EurOtop, 2018. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com

Hughes, S., C. Thornton, J.W. van der Meer and B. Scholl, 2012. Improvements in describing wave overtopping processes. ASCE, Proc. ICCE 2012, Santander, Spain.

Zanuttigh, B., Van der Meer, J.W., Bruce, T. and Hughes, S. 2013. Statistical characterisation of extreme overtopping wave volumes. *Proc. ICE, Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013, Edinburgh, UK.*