

**Invloed waterdiepte op
golfoverslag: meetverslag
golfoverslag proeven**

Titel

Invloed waterdiepte op golfoverslag: meetverslag golfoverslag proeven

| | | |
|----------------|-----------------------|-----------------|
| Project | Kenmerk | Pagina's |
| 11202189-012 | 11202189-012-ZWS-0001 | 23 |

Trefwoorden




Golfoverslag, invloed diepte, schaalmodelonderzoek, golfgoot

Samenvatting

Dit rapport beschrijft het modelonderzoek over de invloed van de waterdiepte op het golfoverslagdebiet. Om dit effect te onderzoeken zijn meerdere testen uitgevoerd in de Scheldegoot waarin het golfoverslagdebiet is gemeten voor een dijkprofiel met een glad 1:3 talud. De testen zijn uitgevoerd voor verschillende condities waarin de waterdiepte, golfsteilheid en kruinhoogte zijn gevarieerd. Voor elke combinatie van golfsteilheid en kruinhoogte is de waterdiepte gevarieerd voor drie verschillende waterdieptes.

Referenties

Plan van Aanpak KPP 2018 project, 2018 HV01 - Versterking Onderzoek Waterveiligheid

| Versie | Datum | Auteur | Paraaf | Review | Paraaf | Goedkeuring | Paraaf |
|--------|-----------|------------------------------|---|----------|---|-----------------|---|
| 1.0 | nov. 2018 | M. de Ridder P. van Steeg | | A. Capel | | M.R.A. van Gent | |
| 2.0 | dec. 2018 | M. de Ridder P. van Steeg |  | A. Capel |  | M.R.A. van Gent |  |

Status

definitief

Inhoud

| | |
|--|-----------|
| 1 Inleiding | 1 |
| 1.1 Achtergrond | 1 |
| 1.2 Technische achtergrond | 1 |
| 1.3 Theoretische achtergrond: invloed ondiepte op golven | 2 |
| 2 Modelopstelling en resultaten | 3 |
| 2.1 Faciliteit | 3 |
| 2.2 Model opzet | 3 |
| 2.3 Metingen | 4 |
| 2.4 Testprogramma | 5 |
| 2.5 Resultaten | 6 |
| 3 Analyse | 8 |
| 3.1 Invloed waterdiepte per test | 8 |
| 3.2 Vergelijking met TAW (2002) | 10 |
| 3.3 Invloedsfactor waterdiepte | 11 |
| 4 Rekenvoorbeeld | 15 |
| 5 Conclusie | 16 |
| 6 Referenties | 17 |

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Rijkswaterstaat wil met het KPP project 'Versterking Onderzoek Waterveiligheid', via versterking van het onderzoek naar waterveiligheid, bijdragen aan verbeteringen in het primaire proces rondom waterveiligheid. Dit kan worden bereikt door kostenbesparingen bij aanleg, beheer en onderhoud, door betere risicobeheersing en door versterking van het imago van Rijkswaterstaat (bron: Plan van Aanpak Versterking Onderzoek Waterveiligheid).

Het doel van het deelproject 'Invloed waterdiepte op golfoverslag' is om aan de hierboven genoemde doelstelling invulling te geven door te onderbouwen dat een beperkte waterdiepte tot gereduceerde hydraulische belastingen kan leiden. Hierdoor wordt een basis gelegd voor een aanpak waarbij rekenkundig de belastingen kunnen worden verlaagd wat leidt tot een efficiënter ontwerp (kostenbesparing bij aanleg) en scherpere beoordeling (kostenbesparing bij beheer en onderhoud). Hiermee wordt bijgedragen aan het primaire proces rondom waterveiligheid: het identificeren van mogelijke kostenbesparingen bij aanleg, beheer en onderhoud.

In Deltares (2015) is een verkennende bureaustudie uitgevoerd. Hierin werd, op theoretische basis en op basis van een literatuurstudie aannemelijk gemaakt dat de waterdiepte invloed heeft op de hoeveelheid golfoverslagdebiet. Er werd in dat rapport geconcludeerd dat er niet afdoende benchmarkdata beschikbaar was om deze stelling goed te onderbouwen. Om die reden werd aanbevolen om oriënterende kleinschalige experimenten uit te voeren in een kleinschalige golfgoet.

In 2018 zijn, op basis van de bovengenoemde aanbeveling, experimenten uitgevoerd in een golfgoet. Het voorliggende rapport is hiervan het meetverslag. De theoretische achtergronden en opzet van de proeven zijn weergegeven in Deltares (2015) en het projectplan (Deltares, 2018).

1.2 Technische achtergrond

Een uitgebreide theoretische achtergrond is gegeven in Deltares (2015, 2018). Een beknopte theoretische achtergrond is hieronder weergegeven.

Voor het bepalen van het golfoverslagdebiet kan gebruikt worden gemaakt van empirische formules (bijvoorbeeld de TAW). Echter, door de veelvoud aan processen die een rol spelen bij golfoverslag is de onzekerheid van deze formules vrij groot. De hypothese was dat een deel van de onzekerheid kan worden gereduceerd door de invloed van de waterdiepte in de formulering mee te nemen. In de huidige formuleringen is het golfoverslagdebiet niet afhankelijk van de waterdiepte. Echter, de hypothese is dat deze afhankelijkheid er wel is.

Als de spreiding van de huidige formuleringen verminderd kan worden, leidt dit tot een nauwkeurigere voorspelling van het golfoverslagdebiet en daarmee tot een efficiënter ontwerp en een scherpere toets. Ten tweede zal ook een formulering zonder invloed van de waterdiepte, het golfoverslagdebiet overschatten voor profielen met een ondiepte.

Om meer inzicht te krijgen in de invloed van de waterdiepte op het golfoverslagdebiet zijn meerdere testen uitgevoerd in de Scheldegoot van Deltares. Op basis van deze resultaten kan worden aangetoond of er een invloed van de waterdiepte bestaat en daarnaast hoe groot die invloed is.

1.3 Theoretische achtergrond: invloed ondiepte op golven

De waterdiepte beïnvloedt de golfcondities op vier manieren:

- 1 Invloed op de golfvorm
- 2 Invloed op de verdelingen van golfhoogte in een golfveld
- 3 Invloed op het golfspectrum
- 4 Wave setup

Invloed op de golfvorm

In ondiep water beweegt de top van de golf sneller dan het dal, zoals met lineaire golf theorie kan worden bepaald. Dit betekent dat de golf asymmetrisch wordt in ondiep water. Voor een asymmetrische golf geldt dat de periode waarin het water niveau daalt korter is dan periode waarin het water niveau stijgt. Dit kan ook een effect op de overslag hebben, aangezien dit leidt tot verschillende brekingmechanismen op het talud. Door deze verschillende brekingmechanismen is de oploop van de golven verschillend. In Deltares (2015) is op basis van een theoretische beschouwing aannemelijk gemaakt dat de oploophoogte lager is voor golven met een hogere steilheid. Dit zou betekenen dat een ondiepte, gerelateerd aan de golf vorm, resulteert in een lager golfoverslagdebiet.

Invloed op de verdelingen van golfhoogte in een golfveld

Het breken van golven zal een invloed hebben op de overschrijdings kromme. Voor diep water condities, waar de Rayleigh verdeling toepasbaar is, is er geen maximum golf gegeven. Er is theoretisch altijd een hogere golf te vinden voor een kleinere overschrijdingskans. Voor diep water is dit een goede benadering. Echter, in ondiep water is de maximale golf hoogte gerelateerd aan de waterdiepte. Dit is bijvoorbeeld beschreven in Battjes (2000), waarin een maximum aan de overschrijdings krommen is toegevoegd op basis van de waterdiepte. Als de golfhoogteverdeling veranderd zal dit ook een effect hebben op het golfoverslagdebiet, aangezien vooral de hoge golven tot overslag leiden. Daarom is de hypothese dat er een verband tussen de waterdiepte en het golfoverslagdebiet bestaat.

Invloed op het golfspectrum

Door de interacties tussen individuele golven in ondiep water, zal ook het golfspectrum veranderen in ondiep water. Deze interacties kunnen resulteren in meer energie bij de relatief lange golven en de relatief korte golven. Het is bijvoorbeeld mogelijk dat er een twee piek in het spectrum ontstaat bij 2 keer de piek periode in ondiep water.

Wave setup

Ten slotte kan een voorland ook leiden tot een wave setup en daarmee tot een verhoogd golfoverslagdebiet debiet. Dit is vooral van belang wanneer de golven al breken boven het voorland. In het voorliggend onderzoek zijn condities onderzocht waar nog geen significante breking optreedt op het voorland en hierdoor zal het effect van de setup minder groot zijn.

2 Modelopstelling en resultaten

2.1 Faciliteit

Het onderzoek is uitgevoerd in de Oosterscheldegoot van Deltares. Deze goot heeft een lengte van 55 m met een breedte van 1 m. De hoogte van de goot is 1,2 m. De golven worden gegenereerd door een golfschot met actieve reflectie compensatie. Dit betekent dat de golven die bij de constructie reflecteren worden geabsorbeerd bij het golfschot. Dit voorkomt dat er staande golven ontstaan in de golfgoot, wat tot een onrealistisch golfveld leidt. Bij alle testen is tweede orde sturing gebruikt voor het genereren van de golven bij het golfschot.

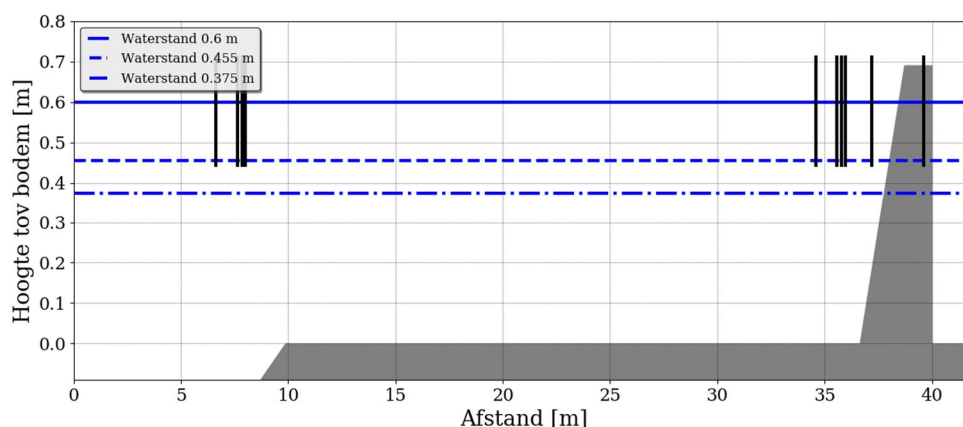
2.2 Model opzet

Om het golfoverslagdebiet te meten is een schaalmodel van een geschematiseerde dijk in de goot gebouwd. Het model bestaat uit een houten constructie met een 1:3 profiel zonder berm, teenconstructie, ruwheid of kruiementen. Er is gekozen voor een houten constructie zodat de kruinhoogte eenvoudig kan worden aangepast. Dit is nodig aangezien de kruinhoogte constant moet blijven voor verschillende waterdieptes. Dus voor elke waterdiepte is de absolute kruinhoogte aangepast, zodat de relatieve kruinhoogte (ten opzichte van de stilwaterlijn) gelijk blijft.

De bodem van de goot is met behulp van een betonnen vloer met 9 cm verhoogd. Een uitzondering hierop is de bodem vlak voor het golfschot, zodat de golven beter worden uitgestuurd. Daartussen zit een 1:10 overgangstalud. In Tabel A.7.1 worden de locaties van het voorland en de geschematiseerde dijk getoond. Alleen de teen van het talud is weergegeven, aangezien de kruinhoogte variabel is voor de verschillende testen.

In Figuur 2.1 is de model opstelling weergegeven. Doordat het illustratieve proeven zijn, is er geen schaal gegeven bij het model. Echter, om een beter beeld van de resultaten te krijgen, kan in een gedachtenmodel een geometrische schaal van 1:10 gebruikt worden.

Figuur 2.1 Overzicht van de modelopstelling. De golfhoogtemeters zijn aangegeven met de verticale zwarte lijnen. De verschillende waterstanden zijn met de blauwe lijnen weergegeven.



Tabel 2.1 Locatie van de instrumenten, het voorland en het dijkprofiel. De positie van de golfhoogte meters in de overslagbak zijn niet weergegeven (WHM91 en WHM92).

| Instrument | positie vanaf golfschot [m] | Duiding |
|--------------------|-----------------------------|--|
| Golfschot | 0,00 | - |
| WHM01 | 6,63 | Nabij golfschot |
| WHM02 | 7,63 | Nabij golfschot |
| WHM03 | 7,85 | Nabij golfschot |
| WHM04 | 8,00 | Nabij golfschot |
| WHM05 | 34,58 | Vlak voor de dijk |
| WHM06 | 35,58 | Vlak voor de dijk |
| WHM07 | 35,8 | Vlak voor de dijk |
| WHM08 | 35,95 | Vlak voor de dijk |
| WHM09 | 37,2 | Boven het 1:3 talud |
| WHM10 | Variërend | Op de kruin |
| WHM91 | - | In overslagbak |
| WHM92 | - | In overslagbak |
| Model geometrie | positie vanaf golfschot [m] | Hoogte gemeten vanaf de goot bodem [m] |
| Begin Voorland | 8,70 | 0,00 |
| Einde voorland | 9,87 | 0,09 |
| Teen van het talud | 36,66 | 0,09 |

2.3 Metingen

De volgende metingen zijn verricht:

- Inkomende en gereflecteerde golven: door middel van vier golfhoogtemeters. Dit is zowel gemeten bij de teen van de constructie (WHM05 tot en met WHM08) als op een afstand van ongeveer 8 m uit het golfschot (WHM01 tot en met WHM04). De methode van Zelt en Skjelbreia (1993) is gebruikt om het signaal te scheiden naar een inkomend en gereflecteerd signaal. Deze methode kan voor N aantal golfhoogtemeters het signaal scheiden, waarbij het inkomende en gereflecteerde signaal wordt berekend voor de laatste golfhoogtemeter (gezien vanaf het golfschot).
- Wave set-up: Een golfhoogtemeter (WHM09) in de onderste zone van het onderwatertalud. De resultaten van de setup meter zijn wel opgeslagen, maar nog niet gebruikt in het huidige rapport. In toekomstige analyses zou dit ook beschouwd kunnen worden.
- Een golfhoogte meter op de kruin (WHM10) van de constructie zodat het moment van overslag en eventueel de watertong op de kruin bepaald kan worden. Deze data is niet gebruikt voor de huidige analyse, maar zou voor toekomstig onderzoek gebruikt kunnen worden. De locatie van deze meter is dus afhankelijk van de gebruikte kruinhoogte.
- Golfoverslagdebiet: Door middel van een overslag bak met twee waterstandsmeters (WHM91 en WHM92) is de waterstand in de golfoverslagbak gemeten. Aan de hand van de waterstand in de overslagbak is de hoeveelheid golfoverslagdebiet bepaald. Er wordt hierbij opgemerkt dat de waterstand in de goot zou kunnen veranderen wanneer er veel overslag plaats vindt. Om dit te voorkomen is het water uit de overslagbak gepompt wanneer de bak bijna vol was. Dit water is teruggepompt naar de voorkant van de goot. Direct achter de kruinlijn is een geleidingstrede geplaatst welke het water in de

golfoverslagbak geleid. Deze trede heeft een breedte welke per test varieert. De breedtes varieerden tussen 30cm, 50cm en 80cm. De keuze voor een trede was gebaseerd op maximaal 1x pompen gedurende een test. Het volume in de overslag bak staat gelijk aan enkele millimeters water in de golfgoot, dus op deze manier is er geen significante bijdrage op de waterstand in de golfgoot. Zie Tabel 2.2 voor de breedte van de geleidingstree per test. De metingen tijdens het pompen zijn uit het meetsignaal gefilterd, zodat dit geen invloed heeft op de golfoverslagdebiet. In Figuur 2.2 is het talud met de geleidingstrede weergegeven.

Figuur 2.2 Geleidingstrede en overslag bak.



2.4 Testprogramma

Het testprogramma is zodanig opgezet dat de volgende variaties zijn toegepast:

- twee variërende relatieve kruinhoogtes;
- vier variërende golfsteilheden;
- drie variërende relatieve waterdieptes.

De bovengenoemde variaties worden hieronder verder uitgewerkt.

Variërende relatieve kruinhoogte

De proeven zijn uitgevoerd voor twee verschillende relatieve kruinhoogtes (R_c). Dit betekent dat voor elke conditie een test met relatief veel en weinig overslag is uitgevoerd. Bij de testen met een kleine relatieve kruinhoogte ($R_c = 0,274m$) zorgen plusminus 10 tot 19% van de inkomende golven voor golfoverslag volgens een berekening met PC-Overslag. Voor de testen met een grote relatieve kruinhoogte ($R_c = 0,375m$) zijn het plusminus 3 tot 8% van de inkomende golven die voor overslag zorgen. Deze relatieve kruinhoogtes leveren theoretisch (volgens TAW formules) een gemiddeld overslagdebiet op van 10 l/s/m en 1 l/s/m wanneer een geometrische schaal van 1:10 wordt gehanteerd.

Variërende golfsteilheid

De golfsteilheid is gevarieerd met vier verschillende waarden (1,5%, 2,5%, 3,5%, 4,5%). Hierbij is uitgegaan van de fictieve golfsteilheid gegeven door:

$$s_0 = 2\pi H_{m0} / (gT_{m-1,0}^2) \quad (1.1)$$

Met H_{m0} als de spectrale significante golfhoogte aan de teen van de dijk (m), $T_{m-1,0}$ de spectrale periode bij de teen van de dijk (s) en g de versnelling van de zwaartekracht (m/s^2).

De fictieve golfsteilheid is gevarieerd door alleen de spectrale periode ($T_{m-1,0}$) te veranderen en de golfhoogte (H_{m0}) aan de teen van de dijk zo constant mogelijk te houden. Op deze manier is voor elke test met dezelfde waterdiepte de ratio golfhoogte over waterdiepte (H_{m0}/d) gelijk. Echter, de testen met een hoge steilheid in ondiep water bleken niet gerealiseerd te kunnen worden. Daarvoor is er voor deze testen een afwijkende golfhoogte en daarmee ook afwijkende steilheid. Voor de compleetheit zijn deze testen ook gedaan voor alle andere waterdieptes.

Variërende waterdiepte

De invloed van de waterdiepte is onderzocht door elke conditie voor drie verschillende waterdieptes te herhalen. De waterdiepte is gevarieerd met een diepte van 0,60 m, 0,455 m en 0,375 m. Dit is de waterdiepte bij de teen van het talud. In het vervolg van het rapport wordt deze definitie van de waterdiepte gebruikt.

Door het combineren van de hierboven gegeven variaties zijn er in totaal $2 \times 4 \times 3 = 24$ condities (2 x kruinhoogte, 4 x golfsteilheid en 3 x waterstand). Voor elke conditie was het doel om de significante golfhoogte constant te houden op $H_{m0} = 0,15$ m.

Het bleek echter dat een aantal condities niet gerealiseerd kon worden doordat deze condities te extreem waren om met het golfschot te kunnen worden gerealiseerd. De testen met de twee relatieve steile golfcondities in combinatie met ondiep water ($h=0,3$ m) bleken niet mogelijk te zijn. Voor deze twee condities was het niet mogelijk om een H_{m0} van 0,15 m met een golfsteilheid van 3,5% en 4,5% bij de teen van de constructie te realiseren. Deze testen zijn daarom uitgevoerd met een H_{m0} van respectievelijk 0,142 m en 0,138 m en een golfsteilheid van 3,31% en 4,14% (test T211 en T212). Ten einde vergelijkbare testen te hebben, zijn deze testen ook uitgevoerd voor de andere twee waterdieptes en voor beide relatieve kruinhoogtes, zodat de invloed van de waterdiepte eenvoudiger bepaald kan worden. Dit zijn de testen T113, T114, T213, T214, T115, T116, T215 en T216.

Voor alle testen was een JONSWAP spectrum bij het golfschot beoogd. Door de invloed van de ondiepte is het inkomende spectrum bij de teen van het talud niet altijd meer gelijk aan een JONSWAP spectrum. Tijdens de kalibratie is, indien nodig, de golfhoogte zodanig aangepast dat de significante golfhoogte H_{m0} en spectrale periode $T_{m-1,0}$ bij de teen overheen komen met de beoogde waarden. De analyse is uitgevoerd met de waarden gemeten bij de teen van de dijk. Om een goede vergelijking te maken tussen de golfoverslag bij verschillende waterdieptes was het dus belangrijk dat de inkomende golfhoogte H_{m0} en spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ bij de teen van de dijk overheen kwamen met de doelwaarden van het testprogramma. Het test programma is uitgevoerd met circa 1000 golven per test.

2.5 Resultaten

De resultaten van de 32 proeven zijn weergegeven in Tabel 2.2 voor het inkomende signaal bij het talud. De resultaten voor de inkomende golven op een locatie van $x=8,0$ m zijn weergegeven in bijlage A. Voor de analyse zijn alleen de resultaten van de golfhoogtemeters bij de teen van de dijk gebruikt, omdat deze representatief zijn voor de bestaande formuleringen van golfoverslag. De overige metingen (setup meter en meter op de kruin) zijn niet uitgewerkt en opgeslagen voor eventueel toekomstige analyses. Daarnaast is het gemiddelde golfoverslagdebiet per strekkende meter bepaald voor elke test. Voor elke test is dit gebaseerd op een periode van circa 1000 golven.

Tabel 2.2 Testprogramma en bijbehorende resultaten. De inkomende golfhoogte en golfperiode zijn gemeten aan de teen van de constructie.

| Test | d[m] | Geleidingstrede [m] | R _c [m] | Gemeten waarden | | |
|------|-------|---------------------|--------------------|---------------------|------------------------|----------|
| | | | | H _{m0} [m] | T _{m-1,0} [s] | q[l/s/m] |
| T101 | 0,600 | 0,50 | 0,375 | 0,150 | 2.521 | 0,21601 |
| T102 | 0,600 | 0,50 | 0,375 | 0,151 | 2.000 | 0,14860 |
| T103 | 0,600 | 0,80 | 0,375 | 0,150 | 1.655 | 0,04798 |
| T104 | 0,600 | 0,80 | 0,375 | 0,149 | 1.475 | 0,03229 |
| T113 | 0,600 | 0,80 | 0,375 | 0,143 | 1.647 | 0,03829 |
| T114 | 0,600 | 0,80 | 0,375 | 0,139 | 1.459 | 0,00737 |
| T201 | 0,600 | 0,30 | 0,274 | 0,151 | 2.521 | 1,08636 |
| T202 | 0,600 | 0,30 | 0,274 | 0,150 | 2.000 | 0,84592 |
| T203 | 0,600 | 0,30 | 0,274 | 0,151 | 1.651 | 0,41234 |
| T204 | 0,600 | 0,30 | 0,274 | 0,151 | 1.471 | 0,28717 |
| T213 | 0,600 | 0,30 | 0,274 | 0,144 | 1.643 | 0,33466 |
| T214 | 0,600 | 0,50 | 0,274 | 0,141 | 1.455 | 0,17362 |
| T105 | 0,455 | 0,50 | 0,375 | 0,151 | 2.526 | 0,21623 |
| T106 | 0,455 | 0,50 | 0,375 | 0,149 | 1.958 | 0,04867 |
| T107 | 0,455 | 0,80 | 0,375 | 0,149 | 1.662 | 0,01948 |
| T108 | 0,455 | 0,80 | 0,375 | 0,150 | 1.470 | 0,01042 |
| T115 | 0,455 | 0,80 | 0,375 | 0,142 | 1.648 | 0,01544 |
| T116 | 0,455 | 0,80 | 0,375 | 0,138 | 1.445 | 0,00723 |
| T205 | 0,455 | 0,30 | 0,274 | 0,150 | 2.529 | 1,02915 |
| T206 | 0,455 | 0,30 | 0,274 | 0,149 | 1.959 | 0,62490 |
| T207 | 0,455 | 0,30 | 0,274 | 0,149 | 1.663 | 0,27716 |
| T208 | 0,455 | 0,30 | 0,274 | 0,150 | 1.469 | 0,13057 |
| T215 | 0,455 | 0,30 | 0,274 | 0,142 | 1.647 | 0,22257 |
| T216 | 0,455 | 0,50 | 0,274 | 0,138 | 1.445 | 0,10024 |
| T109 | 0,375 | 0,50 | 0,375 | 0,150 | 2.569 | 0,18205 |
| T110 | 0,375 | 0,50 | 0,375 | 0,150 | 1.990 | 0,02045 |
| T111 | 0,375 | 0,80 | 0,375 | 0,142 | 1.660 | 0,00823 |
| T112 | 0,375 | 0,80 | 0,375 | 0,138 | 1.445 | 0,00219 |
| T209 | 0,375 | 0,30 | 0,274 | 0,150 | 2.575 | 0,94867 |
| T210 | 0,375 | 0,30 | 0,274 | 0,149 | 1.992 | 0,34941 |
| T211 | 0,375 | 0,30 | 0,274 | 0,142 | 1.633 | 0,12758 |
| T212 | 0,375 | 0,50 | 0,274 | 0,138 | 1.444 | 0,05207 |

De definitie van de spectrale golfperiode is gegeven door,

$$T_{m-1,0} = \frac{\int f^{-1} S df}{\int S df} \quad (1.2)$$

Waar S de energie dichtheid (m²/Hz) is en f de frequentie (Hz). De golfhoogte is berekend met,

$$H_{m0} = 4 \sqrt{\int S df} \quad (1.3)$$

h is de waterdiepte bij de teen van de dijk ten opzichte van de bodem (m) en R_c is de verticale afstand tussen de kruin en de stil waterlijn (m).

3 Analyse

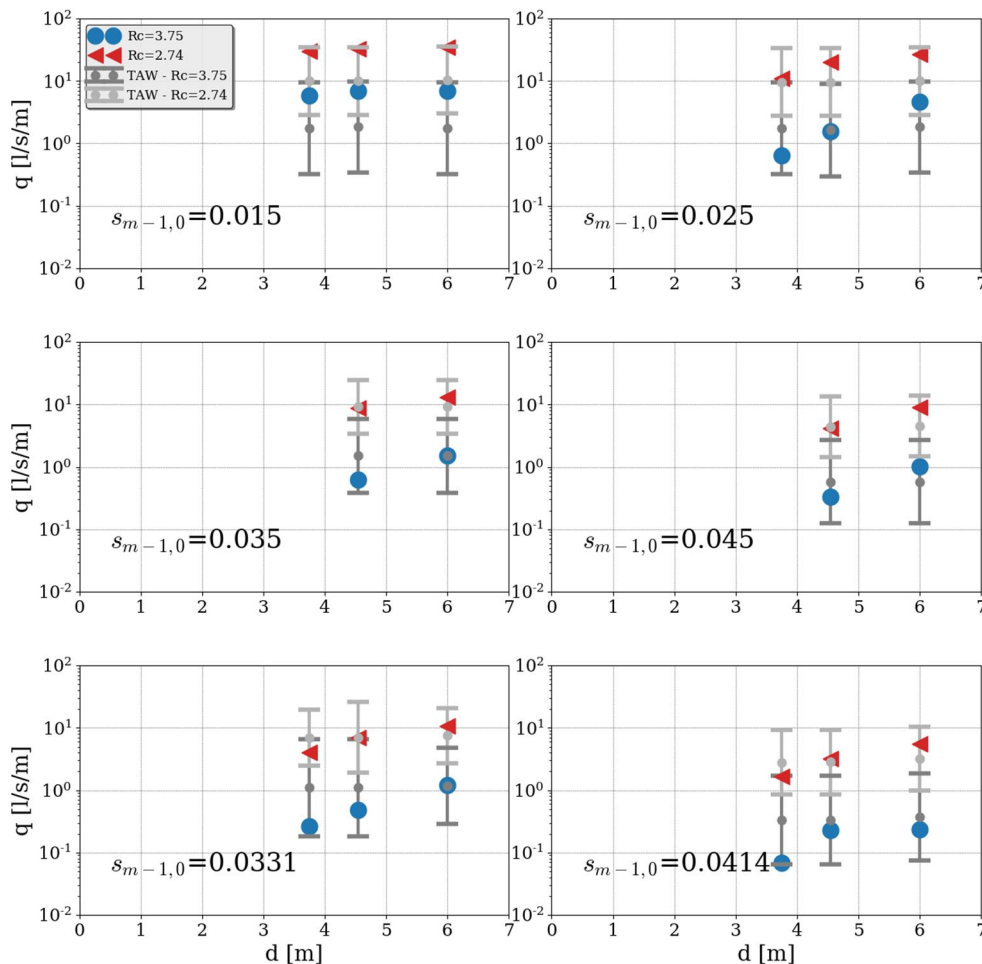
In voorliggend hoofdstuk wordt de invloed van de waterdiepte op het golfoverslagdebiet inzichtelijk gemaakt. De aanpak is opgedeeld in drie stappen. Eerst worden de datapunten getoond, waarmee het verband van de waterdiepte ten opzichte van het golfoverslagdebiet duidelijk wordt. Vervolgens worden de datapunten vergeleken met de TAW formulering. Ten slotte wordt er een invloedsfactor toegevoegd om de invloed van de waterdiepte in de TAW formulering te beschrijven. De analyse is uitgevoerd voor waarden die zijn omgerekend naar de werkelijke schaal. Een geometrische schaal van 1 op 10 is gebruikt voor de omrekening. De verschaling heeft geen invloed op de invloedsfactor voor waterdiepte.

3.1 Invloed waterdiepte per test

De waterdiepte is gevarieerd voor elke combinatie van kruinhoogte en golfsteilheid. Dit betekent dat voor elk van deze condities drie verschillende golfoverslagdebieten zijn gemeten, waarbij alleen de waterdiepte varieert. Volgens de overslagformules in de TAW (2002) waarin de waterdiepte geen rol speelt, zouden deze geteste combinaties hetzelfde golfoverslagdebiet moeten opleveren.

In Figuur 3.1 is voor elke test het golfoverslagdebiet uitgezet als functie van de waterdiepte. De figuren zijn geclusterd voor de verschillende golfsteilheden ($s_{m-1,0}$). De verschillende kleuren geven de verschillende relatieve kruinhoogtes weer. De rode markers zijn de datapunten met een relatief kleine kruinhoogte en een groot golfoverslagdebiet. In deze testen leiden zo'n 10 tot 19 % van de golven tot golfoverslag (volgens PC overslag). De blauwe markers zijn de datapunten met een relatief grote kruinhoogte en een relatief klein golfoverslagdebiet. In grijs is de TAW formulering met de 5% over- en onderschrijdingskans weergegeven. Er wordt opgemerkt dat de y-as logaritmisch is weergegeven.

Figuur 3.1 Golfverslagdebiet q per waterdiepte h uitgesplitst voor verschillende golfsteilheden ($s_{m-1,0}$). De waarden zijn omgerekend naar de werkelijke schaal (1:10).



Figuur 3.1 laat zien dat de grootte van het golfverslagdebiet afhangt van de waterdiepte. Dit geldt met name voor de grotere golfsteilheden. Alleen voor ‘surging’ golven met een golfsteilheid van 1,5% lijkt de afhankelijkheid van de waterdiepte gering, maar in het algemeen geldt dat een ondiepte bij de teen van het talud tot minder golfverslagdebiet leidt in vergelijking tot dezelfde test met een grotere waterdiepte. Alle uitkomsten vallen ook binnen de onzekerheidsband van de TAW formules. Dit betekent indirect dat een deel van de spreiding in de TAW grafieken afkomstig is van het verschil in waterdiepte.

Zoals hierboven is aangegeven is de conditie met een lage golfsteilheid voor de uitgevoerde proeven nauwelijks afhankelijk van de waterdiepte. Een verklaring zou kunnen zijn dat het type breking voor deze golven anders is dan de overige testen. Golven met een lage golfsteilheid zullen meer het talud oplopen (surging waves) en golven met een hoge golfsteilheid zullen eerder op het talud omslaan (plunging and spilling waves).

Naast de variatie in de golfsteilheid, lijkt ook de kruinhoogte een effect te hebben op de invloed van de waterdiepte. Bij de testen met een grote relatieve kruinhoogte (laag golfverslagdebiet) is de invloed relatief hoger dan bij de testen met een lagere relatieve kruinhoogte. Een verklaring hiervoor is dat het golfverslagdebiet voor deze condities

voornamelijk wordt bepaald door de hoogste golven. Doordat deze hogere golven eerder breken door een ondiepte, heeft de waterdiepte relatief veel invloed op deze golven en daarmee op het resulterende golfoverslagdebiet voor de testen met een grote relatieve kruinhoogte.

3.2 Vergelijking met TAW (2002)

In de vorige paragraaf is aangetoond dat er een invloed van de waterdiepte is op het golfoverslagdebiet. Om nu alle datapunten met elkaar te kunnen vergelijken is het golfoverslagdebiet en de kruinhoogte dimensieloos gemaakt, zodat de verschillende testresultaten met de TAW (2002) vergeleken kunnen worden.

In Figuur 3.2 is de complete dataset geplot volgens de formuleringen van de TAW met 5% over- en onderschrijdingskans. Het linker paneel is gebaseerd op de formulering voor brekende golven en het rechter paneel is gebaseerd volgens de formulering voor niet-brekende golven (conform TAW, 2002). Deze formuleringen zijn gegeven door (zonder invloedsfactoren en voor het gemiddelde van de waarnemingen):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \xi_0 \exp\left(-4.75 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0}\right) \quad (1.4)$$

Met als maximum,

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \quad (1.5)$$

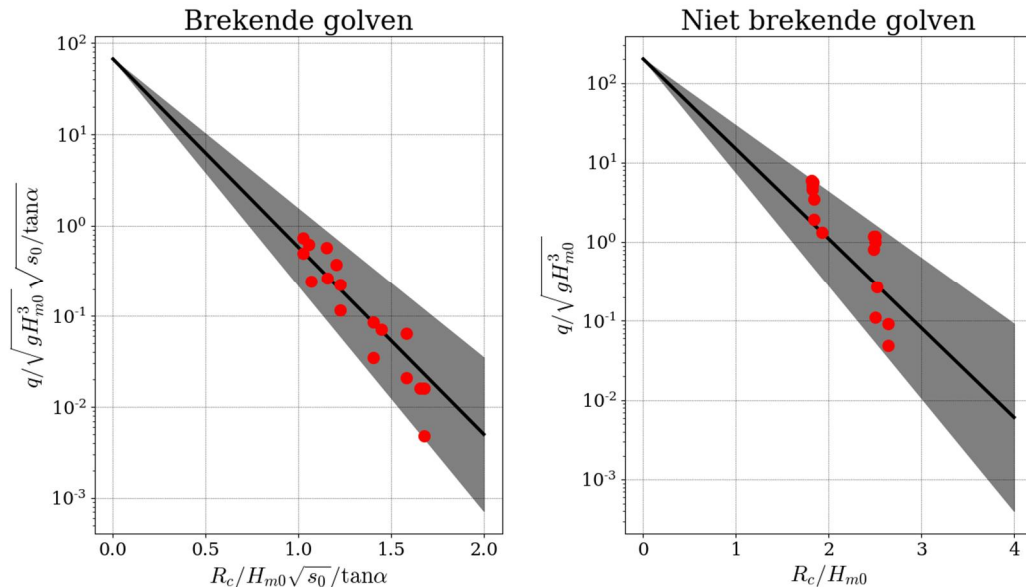
Waarin:

| | | |
|---------------|--|---------------------------|
| q | = gemiddelde golfoverslag debiet | [m ³ /m per s] |
| g | = versnelling van de zwaartekracht | [m/s ²] |
| H_{m0} | = Significante golfhoogte | [m] |
| ξ_0 | = de brekerparameters = $\tan \alpha / \sqrt{s_0}$ | [-] |
| s_0 | = golfsteilheid = $2 \pi H_{m0} / (g T_{m0}^2)$ | [-] |
| $T_{m-1,0}$ | = spectrale golfperiode | [-] |
| $\tan \alpha$ | = taludhelling | [m] |
| R_c | = kruinhoogte t.o.v stilwaterlijn | [m] |

De eerste formule geldt voor brekende golven en de tweede formule voor niet-brekende golven. De TAW formule is gebruikt om de gemeten datapunten te verdelen over de panelen. Dus de formule die maatgevend is volgens de TAW, geeft aan of het datapunt bij de brekende of niet-brekende categorie hoort. Dit komt er op neer dat de golven met een lage golfsteilheid in de categorie van niet-brekende golven vallen en de golven met een hoge golfsteilheid in de categorie van de brekende golven vallen.

De figuur laat zien dat de gemeten waarden binnen de onzekerheid van de TAW formulering vallen. Voor beide formules liggen de datapunten binnen de onzekerheidsband. Daarnaast liggen de punten om het gemiddelde heen. Er is geen totale over- of onderschatting van het gemiddelde van de TAW. De resultaten met de kleinste waterdiepte laten wel vaker een onderschrijding zijn terwijl de resultaten met de grootste waterdiepte vaker een overschrijding laten zien.

Figuur 3.2 Dimensieloze kruinhoogte uitgezet tegen de dimensieloze golfoverslagdebiet.



3.3 Invloedsfactor waterdiepte

Om de invloed van de waterdiepte inzichtelijk te maken is een invloedsfactor voor de waterdiepte toegevoegd aan de TAW formulering. De TAW formule kan worden herschreven in de volgende vorm,

$$q = ae^{-bx} \quad (1.6)$$

Er is vooralsnog voor gekozen om de invloedsfactor alleen in de b parameter toe te voegen. Het is ook mogelijk dat er een invloed van de waterdiepte in de a parameter is. Echter, voor het inzichtelijk maken van de invloed is eerst alleen de b parameter beschouwd. Voor de a -parameter zouden eigenlijk ook testen met een kleine R_c/H_{m0} verhouding uitgevoerd moeten worden.

Voor elke test is een γ_d bepaald zodanig dat het golfoverslagdebiet gelijk is aan de verwachtingswaarden van de TAW formule. Dus de invloedsfactor is niet bepaald met een fit door de datapunten, maar door de invloedsfactor uit te rekenen die zorgt voor een afwijking van 0 met de TAW formulering. Hiervoor is eerst de TAW formulering gebruikt om te bepalen of de test in categorie brekende of niet brekende golven past. Daarna is een invloeds factor toegevoegd, zodat de volgende formules worden verkregen:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \xi_0 \exp\left(-4.75 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\xi_0 \gamma_d}\right) \quad (1.7)$$

Met als maximum,

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0}} \frac{1}{\gamma_d}\right) \quad (1.8)$$

De invloedsfactor voor de waterdiepte is op eenzelfde manier verdisconteerd als de ruweheids en golfval invloedsfactor. Het is echter ook mogelijk dat de invloedsfactor op een vergelijkbare manier als de berm-invloedsfactor moet worden beschouwd en in de a en b van vergelijking 1.6 toegevoegd moet worden.

Deze invloedsfactoren zijn uitgezet tegen de dimensieloze golfhoogte (H_{m0}/d), het Ursell getal, de golfsteilheid en de relatieve waterdiepte (kd). Hierbij is het Ursell getal gegeven door:

$$U_r = \frac{H_{m0}L^2}{d^3} \quad (1.9)$$

Waarbij L de golflengte is die berekend is op basis van de dispersierelatie met daarin de spectrale golfperiode (Dingemans, 1997). De relatieve waterdiepte is het product van het golfgetal, gegeven door de dispersie relatie, en de waterdiepte.

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). 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. Dus het Ursell getal is ook een goede maat voor de ondiepte.

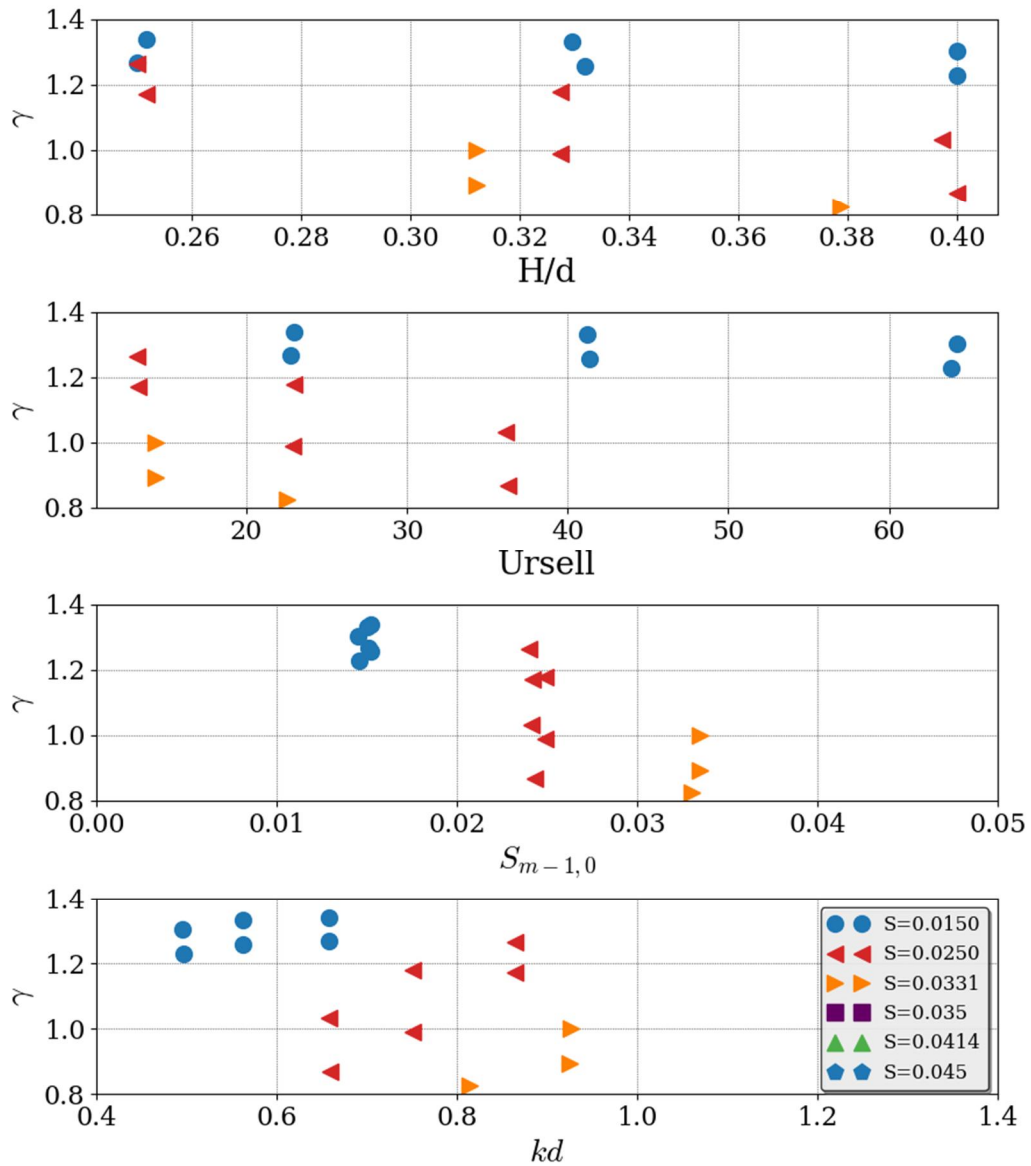
De golfsteilheid is ook uitgezet om te verifiëren of er ook een verband voor de golfsteilheid bestaat in de testen. De relatieve waterdiepte is een veel gebruikte parameter om te bepalen welke regime van lineaire golf theorie gebruikt kan worden voor het beschrijven van de golven. Voor een $kd \ll 1$ gelden bijvoorbeeld de ondiepwater condities van lineaire golf theorie. De non-lineariteit en het breken van golven kan echter niet worden gekarakteriseerd met de relatieve waterdiepte.

In Figuur 3.3 is de invloedsfactor voor niet-brekende golven geplot en Figuur 3.4 laat de invloedsfactor zien voor brekende golven. Een factor groter dan 1 betekent dat de TAW formules het golfoverslagdebiet onderschatten, terwijl een factor kleiner dan 1 juist een overschatting laten zien.

Uit de figuren blijkt dat er voor brekende golven een duidelijke afhankelijkheid is van zowel de parameters H_{m0}/d en de Ursell parameter. Dit is in mindere mate het geval bij niet-brekende golven. Bij niet brekende golven lijkt er ook een afhankelijkheid van de golfsteilheid en de relatieve diepte te zijn. In een toekomstige studie dient dit nader te worden bestudeerd ten einde de invloed te kunnen kwantificeren.

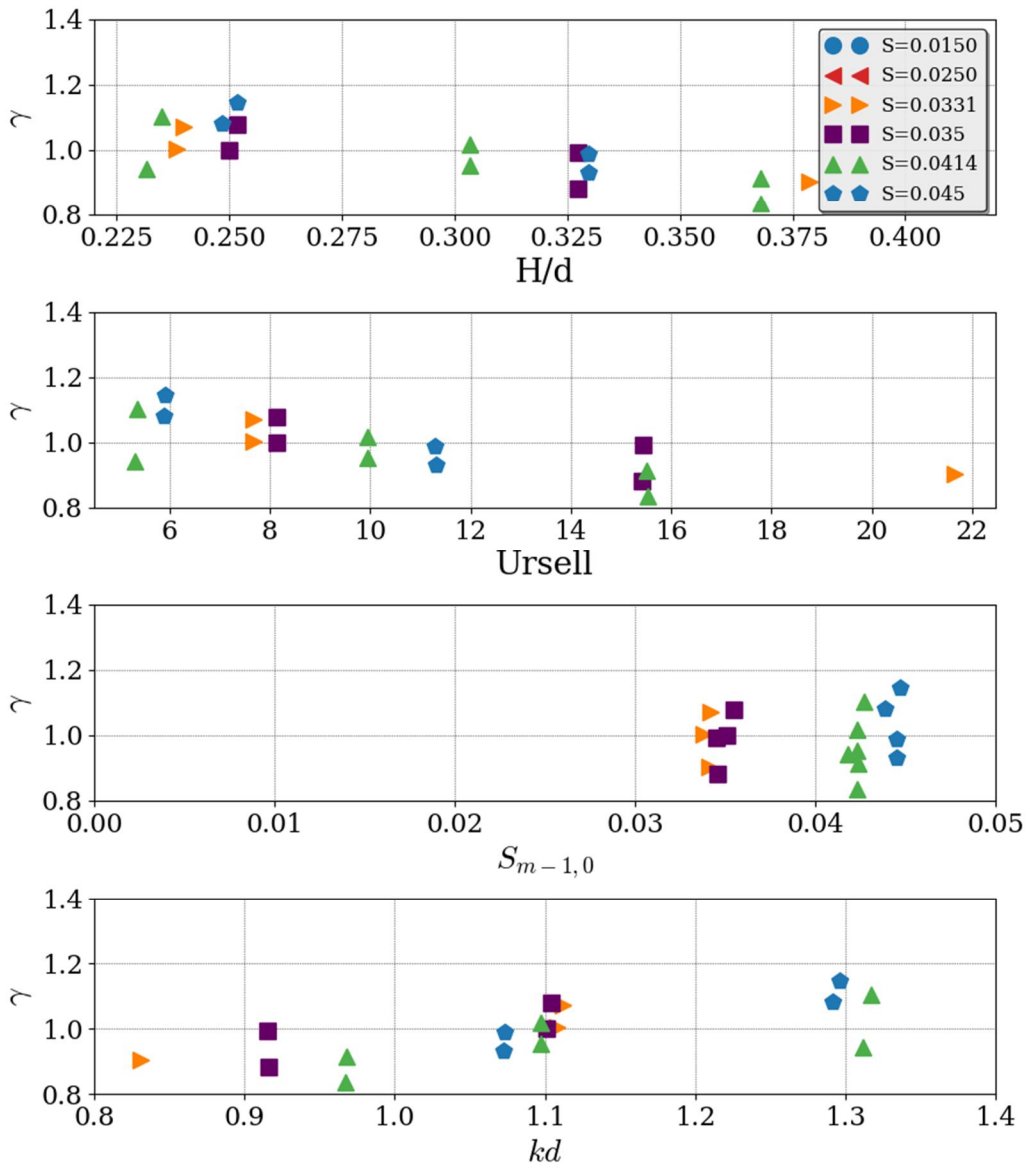
Figuur 3.3 Invloedsfactor voor niet-brekende golven uitgezet tegenover de dimensieloze golfhoogte, het Ursell getal en de golfsteilheid.

Niet brekende golven



Figuur 3.4 Invloedsfactor voor brekende golven uitgezet tegenover de dimensieloze golfhoogte, het Ursell getal en de golfsteilheid.

Brekende golven



4 Rekenvoorbeeld

Om het effect van de waterdiepte toe te lichten zijn twee voorbeelden gegeven, waarin het golfoverslagdebiet is bepaald met 2 verschillende invloedsfactoren voor de waterdiepte. Er is een rekenvoorbeeld voor een rivierdijk en een zeedijk, zodat de invloed voor verschillende type systemen duidelijk wordt.

Een significante golfhoogte van $H_{m0} = 1$ meter is gekozen voor de rivierdijk en een golfhoogte van $H_{m0} = 4$ meter bij de zeedijk. Voor beide voorbeelden is een golfsteilheid van $S_{m-1,0} = 4,5\%$ gebruikt in de berekening. Er is een 1:3 talud gehanteerd wat overeenkomt met de uitgevoerde testen. Er zijn geen bermen, kruinelementen, schuin invallende golven en ruwheidsfactoren toegepast. De benodigde kruinhoogte is berekend voor een debiet van 1 en 10 l/s/m. De gevonden invloedsfactoren zoals gegeven in paragraaf 3.4 zijn gebruikt voor de berekening om de invloed van de waterdiepte mee te nemen. Dus de invloedsfactor γ_d is gevarieerd tussen 0,9 en 1,1. Overigens zijn er nog grotere afwijkingen gevonden.

In Tabel 4.1 staan de twee golfcondities aangegeven met de bijbehorende kruinhoogtes. De invloed van de waterdiepte, afgeleid voor deze reeks testen, zorgt voor een significant verschil in benodigde kruinhoogte. Bij de rivierdijk varieert de benodigde kruinhoogte van 1,9 tot 2,3 m bij een debiet van 1 l/s/m. Voor de zeedijk varieert de kruinhoogte dan van 10 m tot 12,3 m. De lagere kruin behoort dan bij een situatie met γ_d van 0,9 en de hogere kruin bij een situatie met γ_d is 1,1. Voor een hoger golfoverslagdebiet is het verschil iets kleiner maar nog steeds significant.

Tabel 4.1 Resultaten voorbeeld berekening met invloed van de diepte.

| | Rivierdijk | Zeedijk |
|--|------------|---------|
| H_{m0} [m] | 1,0 | 4,0 |
| $s_{m-1,0}$ [-] | 4,5% | 4,5% |
| taludhelling | 1:3 | 1:3 |
| R_c [m] (bij $q = 1$ l/s/m) $\gamma_d=0,9$ | 1,9 | 10,0 |
| R_c [m] (bij $q = 1$ l/s/m) $\gamma_d=1,1$ | 2,3 | 12,3 |
| R_c [m] (bij $q = 10$ l/s/m) $\gamma_d=0,9$ | 1,2 | 7,3 |
| R_c [m] (bij $q = 10$ l/s/m) $\gamma_d=1,1$ | 1,5 | 8,9 |

5 Conclusie

Het golfoverslagdebiet is gemeten voor een geschematiseerd dijkprofiel met een 1:3 talud in de Oosterscheldegoot. De proeven zijn uitgevoerd voor verschillende kruinhoogtes, golfsteilheden en waterdieptes. Voor elke combinatie van kruinhoogte en golfsteilheid is de waterdiepte gevarieerd voor drie verschillende dieptes. Op deze manier is de invloed van de waterdiepte op het golfoverslagdebiet in kaart gebracht.

Er blijkt een significante invloed te zijn van de waterdiepte voor brekende golven. Het onderscheid is minder duidelijk voor de relatief lange golven (niet-brekende golven). Voor de brekende golven is duidelijk zichtbaar dat de testen met de laagste waterstand een lager debiet geven vergeleken met de resultaten op basis van de TAW formulering en dat de testen met de grootste waterdiepte een hoger golfoverslagdebiet geven dan de resultaten op basis van de TAW formulering. De huidige spreiding die in de TAW grafieken te zien is, kan dan ook deels worden verklaard door het missen van de waterdiepte in de formulering.

Om de invloed inzichtelijk te maken is een voorbeeld berekening gedaan voor een rivierdijk en een zeedijk. Hieruit blijkt dat het verschil in benodigde kruinhoogte significant is. Bij de grootste golfhoogte-waterdiepte-verhouding H_{m0}/d lijkt op basis van de huidige eerste resultaten en ten opzichte van de TAW-overslagformules enerzijds een potentiële reductie in vereiste kruinhoogte mogelijk van enkele decimeters voor rivierdijken tot orde 1 meter voor zeedijken. Anderzijds voor de kleinste golfhoogte-waterdiepte-verhouding H_{m0}/d geldt het tegenovergestelde.

Het voorliggende rapport is bedoeld om de uitgevoerde testen vast te leggen en om een eerste analyse uit te voeren. Om de invloed te kunnen kwantificeren wordt aanbevolen om een aanvullende analyse uit te voeren.

6 Referenties

Battjes, J. A., & Groenendijk, H. W. (2000). Wave height distributions on shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 40(3), 161-182.

Deltares, 2015, 'Influence of water depth at wave run-up and wave overtopping', Deltares final report V2.0, 1220039-010-VEB-0009, November 2015

Deltares, 2018, 'Plan van Aanpak invloed waterdiepte op golfoverslag', Deltares plan van aanpak V3, 11202189-000, Mei 2018

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

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

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 Resultaten

De gemeten golfcondities voor het golfschot bij $x=8\text{m}$ zijn weergegeven in Tabel A.1. In deze tabel zijn de golfperiode en golfhoogte van het inkomende signaal weergegeven.

Tabel A.7.1 De golfhoogte en periode direct na het golfschot.

| Test ID | $H_{m0}[m]$ | $T_{m-1,0}[s]$ | $d[m]$ |
|---------|-------------|----------------|--------|
| T101 | 0,155 | 2,472 | 0,690 |
| T102 | 0,157 | 1,960 | 0,690 |
| T103 | 0,158 | 1,626 | 0,690 |
| T104 | 0,160 | 1,440 | 0,690 |
| T113 | 0,150 | 1,621 | 0,690 |
| T114 | 0,148 | 1,428 | 0,690 |
| T201 | 0,155 | 2,471 | 0,690 |
| T202 | 0,157 | 1,959 | 0,690 |
| T203 | 0,158 | 1,626 | 0,690 |
| T204 | 0,160 | 1,440 | 0,690 |
| T213 | 0,150 | 1,621 | 0,690 |
| T214 | 0,148 | 1,428 | 0,690 |
| T105 | 0,156 | 2,433 | 0,545 |
| T106 | 0,158 | 1,881 | 0,545 |
| T107 | 0,162 | 1,587 | 0,545 |
| T108 | 0,165 | 1,416 | 0,545 |
| T115 | 0,154 | 1,578 | 0,545 |
| T116 | 0,151 | 1,393 | 0,545 |
| T205 | 0,156 | 2,432 | 0,545 |
| T206 | 0,158 | 1,881 | 0,545 |
| T207 | 0,162 | 1,587 | 0,545 |
| T208 | 0,165 | 1,415 | 0,545 |
| T215 | 0,154 | 1,577 | 0,545 |
| T216 | 0,152 | 1,393 | 0,465 |
| T109 | 0,163 | 2,362 | 0,465 |
| T110 | 0,169 | 1,814 | 0,465 |
| T111 | 0,160 | 1,534 | 0,465 |
| T112 | 0,159 | 1,363 | 0,465 |
| T209 | 0,163 | 2,359 | 0,465 |
| T210 | 0,168 | 1,812 | 0,465 |
| T211 | 0,160 | 1,533 | 0,465 |
| T212 | 0,158 | 1,363 | 0,465 |