

Haalbaarheid hoge golfsteilheid in golfgoten

Verslag analyses en inzichten 2024

paraf



Haalbaarheid hoge golfsteilheid in golfgoten

Verslag analyses en inzichten 2024

Auteur(s)

Hans de Waal

Haalbaarheid hoge golfsteilheid in golfgoten

Verslag analyses en inzichten 2024

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer M Bottema
Referenties	SITO-PS 2024 WWH02 - Versterking Onderzoek Waterveiligheid
Trefwoorden	Golfsteilheid, golfgoten, golffaciliteiten, golfopwekking

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	20-11-2024
Projectnummer	11210365-012
Document ID	11210365-012-ZWS-0001
Pagina's	40
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Hans de Waal	

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Hans de Waal	Jacco Groeneweg	Paul van Steeg

Samenvatting

In fysisch modelonderzoek in de Deltares golfgoten is de *gewenste* golfsteilheid dikwijls hoger dan de (schijnbaar) maximaal *haalbare* golfsteilheid. Dat is een probleem want als we de relevante condities niet voldoende kunnen nabootsen, dan is het moeilijk om uit het modelonderzoek bruikbare conclusies te trekken over die relevante condities.

In aanvulling op eerdere (deel-)studies zijn in 2024 enkele afzonderlijke deelstudies uitgevoerd om inzicht te krijgen in mogelijke oplossingsrichtingen voor dit probleem. Deze deelstudies zijn samen beschreven in dit rapport.

De deelstudies betreffen:

- Een analyse van de relevantie van hoge golfsteilheden in het toepassingskader van de veiligheid tegen overstroming in Nederland, aan de hand van rekenresultaten uit de Riskeer Testbank.
- Een analyse van de relatie tussen realiseerbare golfsteilheid en de afstand tot het golfschot, aan de hand van een korte meetcampagne in de Oosterscheldegoet.
- Een beschouwing van de rol van wind in de problematiek en formulering van eerste gedachten bij mogelijkheden voor het omgaan met deze rol.

Belangrijke bevindingen zijn:

- Hoge steilheden lijken inderdaad relevant, maar dit beeld wordt deels vertekend door de aanwezigheid van onrealistisch hoge berekende golfsteilheden.
- De in Riskeer te hoog berekende golfsteilheid lijkt al in (de SWAN resultaten in) de HB databases fysica te zitten. Deze bevinding ondersteunt het belang van verbetering van SWAN op het gebied van de (te hoog berekende) golfsteilheid.
- Bij het opwekken van golfcondities met hoge golfsteilheid nemen beide maten voor de golfsteilheid ($s_{0,p}$ en $s_{0,m}$) af met toenemende afstand tot het golfschot. Dit vormt een ondersteuning van de hypothese dat een hoge golfsteilheid wel opgewekt kan worden, maar niet in stand kan blijven met toenemende afstand tot het golfschot.
- Het is aannemelijk dat aanwezigheid van wind zorgt voor meer golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum en daardoor voor een grotere golfsteilheid dan in een situatie zonder wind.
- Het wordt aanbevolen expliciet aandacht te geven aan de rol van wind in de (in een fysisch model) te onderzoeken fenomenen en aan de invloed van de afwezigheid van wind op de interpretatie van het fysisch modelonderzoek.

Bij het plannen c.q. prioriteren van vervolgstappen in de aanpak van het probleem wordt overigens aanbevolen eerdere studies te blijven raadplegen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Nadere probleembeschrijving en focus in 2024	9
2.1	Inleiding	9
2.2	Definities	9
2.3	Gewenste, haalbare en realistische golfsteilheden	10
2.4	Diagnose; mogelijke oorzaken voor discrepantie	10
2.4.1	Mogelijke oorzaken voor (te) hoge gewenste golfsteilheid	10
2.4.2	Mogelijke oorzaken voor beperkte haalbare golfsteilheid	11
2.5	Aanpak sporen in 2024	11
3	Inventarisatie relevante waarden golfsteilheid	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Aanpak	12
3.3	Resultaten	13
3.4	Nadere analyse	14
3.5	Conclusies	17
4	Gemeten invloed van afstand tot golfschot	18
4.1	Inleiding	18
4.2	Beschrijving metingen	18
4.2.1	Modelopzet	18
4.2.2	Proevenprogramma	19
4.3	Analyse	20
4.3.1	Golfsteilheid	20
4.3.2	Golfhoogte en golfperiode	21
4.3.3	Spectrumvorm	25
4.4	Discussie	29
4.5	Conclusies	29
5	Nadere beschouwing rol wind	31
5.1	Inleiding	31
5.2	Rol wind in golfcondities	31
5.3	Hoe om te gaan met rol wind in fysisch modelonderzoek	32
6	Conclusies en aanbevelingen	34
	Referenties	36

A	Aanpak inventarisatie relevante waarden golfsteilheid in Riskeer testbankresultaten	37
A.1	Inleiding	37
A.2	Mappen en bestanden	37
A.3	De gezochte informatie halen uit een PO database	38

1 Inleiding

Probleem

In fysisch modelonderzoek in de Deltares golfgoten is de *gewenste* golfsteilheid dikwijls hoger dan de (schijnbaar) maximaal *haalbare* golfsteilheid. Dat is een probleem want als we de relevante condities niet voldoende kunnen nabootsen, dan is het moeilijk om uit het modelonderzoek bruikbare conclusies te trekken over die relevante condities.

Doel

Het doel van onderhavige analyses is het verkrijgen c.q. vergroten van inzicht in oorzaken voor het verschil tussen gewenste condities en haalbare condities in golfgoten wat betreft (hoge) golfsteilheid.

Dit inzicht vormt de basis voor het formuleren van eventuele investeringsbehoeften voor het verbeteren van de aansluiting tussen gewenste en haalbare condities. Het achterliggende doel is een goede aansluiting, ten behoeve van een optimaal kennis-rendement van onderzoek in golffaciliteiten.

Focus

Binnen de categorie 'golffaciliteiten' ligt de focus voornamelijk bij de *golfgoten* van *Deltares*, omdat dit de faciliteiten zijn die het vaakst worden ingezet ten behoeve van kennisontwikkeling rond de veiligheid tegen overstromen in Nederland.

Doelgroep

De doelgroep van dit document bestaat primair uit betrokkenen bij RWS en Deltares bij het benutten van de Deltares golfgoten voor kennisopbouw ten behoeve van de veiligheid tegen overstromen in Nederland. In bredere zin bestaat de doelgroep uit gebruikers van de Deltares golfgoten voor onderzoek ten behoeve van de moonshots.

Kader

Onderhavige analyses zijn uitgevoerd in het kader van
programma: SITO-PS 2024
thematafel: 'Waterveiligheid' (WVH)
project: 'Versterking Onderzoek Waterveiligheid' (VOW)
deelproject: 'Golfsteilheid golffaciliteiten Deltares'

Positionering

In diverse eerdere studies is reeds aandacht besteed aan dit probleem, zie met name (Groeneweg en Van Steeg, 2020), (Bottema, 2022) en (De Ridder et al., 2024). De analyses in onderhavig rapport bouwen voort op onderdelen uit deze eerdere studies. Onderhavig rapport vormt dan ook een *aanvulling* op deze eerdere studies; niet een update of vervanging ervan. De eerdere studies behouden hun waarde en het wordt dan ook aanbevolen deze studies te blijven raadplegen bij het maken van plannen voor vervolgstappen in de aanpak van het probleem.

Aanpak in 2024; Totstandkoming document

De studies in 2024 zijn grotendeels uitgevoerd door Hans de Waal, met hulp van Karolina Wojciechowska, Jacco Groeneweg en Menno de Ridder. De review is uitgevoerd door Jacco Groeneweg.

Opbouw document

Dit document is als volgt opgebouwd. Eerst wordt in hoofdstuk 2 de context van de in 2024 uitgevoerde studies nader beschreven. In hoofdstuk 3 en 4 volgt een verslag van twee afzonderlijke studies: in hoofdstuk 3 naar het voor de veiligheidsbeoordeling met BOI relevante bereik aan golfsteilheden en hoofdstuk 4 naar de invloed van de afstand tot het golfschot op de golfsteilheid in een golfgoot. Hoofdstuk 5 geeft een beschouwing van de rol van wind in de problematiek. Het document wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 6.

2 Nadere probleembeschrijving en focus in 2024

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een nadere beschrijving van het probleem en specificeert de focus van de studies in 2024. Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd. In paragraaf 2.2 worden de gehanteerde definities gegeven. Paragraaf 2.3 specificeert het probleem in termen van haalbare en gewenste golfsteilheden. Paragraaf 2.4 geeft een korte weergave van de diagnose: de mogelijke oorzaken van het probleem. In paragraaf 2.5 volgen de onderwerpen van de studies in 2024.

2.2 Definities

In deze rapportage kijken we naar twee parameters voor de golfsteilheid:

$$s_{0,p} = \frac{H_{m0}}{L_{0,p}} = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{H_{m0}}{(T_p)^2} \quad (2.1)$$

$$s_{0,m} = \frac{H_{m0}}{L_{0,m-1,0}} = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{H_{m0}}{(T_{m-1,0})^2} \quad (2.2)$$

Hierin is:

$s_{0,p}$	=	[diep-water] golfsteilheid op basis van de piekperiode (-)
$s_{0,m}$	=	[diep-water] golfsteilheid op basis van de spectrale golfperiode (-)
H_{m0}	=	significante golfhoogte (m)
$L_{0,p}$	=	[diep-water] golflengte op basis van de piekperiode (m)
$L_{0,m-1,0}$	=	[diep-water] golflengte op basis van de spectrale golfperiode (m)
g	=	versnelling ten gevolge van de zwaartekracht (m/s^2)
T_p	=	piekperiode, golfperiode horend bij de piek van het golfspectrum (-)
$T_{m-1,0}$	=	spectrale periode, spectraal gewogen gemiddelde periode (-)

Merk op dat we hier de verkorte notatie $s_{0,m}$ hanteren in plaats van de meer correcte maar omslachtiger notatie $s_{0,m-1,0}$.

In het veel voorkomende geval van een enkelvoudig, door wind opgewekt golfveld is doorgaans sprake van een golfspectrum met een JONSWAP vorm. Hierbij geldt voor de verhouding tussen de golfperiodematen globaal:

$$\frac{T_p}{T_{m-1,0}} \approx 1.1 \quad (2.3)$$

Voor de verhouding tussen de golfsteilheidmaten geldt dan:

$$\frac{s_{0,m}}{s_{0,p}} \approx 1.2 \quad (2.4)$$

2.3 Gewenste, haalbare en realistische golfsteilheden

In (Groeneweg en Van Steeg, 2020) en (De Ridder et al., 2024) is een inschatting gemaakt van welke hoge waarden voor de golfsteilheid nog realistisch zijn, c.q. daadwerkelijk in de natuur voorkomen. Daartoe is gekeken naar verzamelingen prototype-meetgegevens. Tabel 2-1 geeft een samenvatting van de hieruit afgeleide inschatting van de maximale golfsteilheid in prototype.

Omstandigheden	maximale golfsteilheid	
	$S_{0,p}$	$S_{0,m}$
Open, diep water, enkelvoudig JONSWAP spectrum	0.04	0.05
Strijklengte-beperkte situaties, jonge golven	0.06	0.07 à 0.08
Hellende bodem, een stelsel van geulen en platen of de aanwezigheid van stroming	(0.06)	(0.07 à 0.08)

Tabel 2-1. *Inschatting maximale golfsteilheid in prototype. Waarden tussen haakjes betreffen een vermoeden, met aanvullende analyse van beschikbare golfdata nader te verifiëren of aan te passen.*

De in een golf faciliteit gewenste, respectievelijk maximaal haalbare waarden voor de golfsteilheid zijn (nog) niet hard gekwantificeerd. Tabel 2-2 geeft een indicatie van deze waarden.

	maximale golfsteilheid	
	$S_{0,p}$	$S_{0,m}$
In golf faciliteit gewenste (hoge) golfsteilheid, vanuit rekenmodel	> 0.04	> 0.07
In golf faciliteit haalbare golfsteilheid	0.04	n.t.b.

Tabel 2-2. *Indicatie gewenste c.q. haalbare hoge golfsteilheid.*

De in een golf faciliteit gewenste golfcondities hebben veelal betrekking op relatief zeldzame, extreme omstandigheden. Het gaat daarbij primair om extreme waarden voor zowel de golfhoogte als de golfperiode; de golfsteilheid hoeft niet extreem te zijn. Die gewenste condities zijn niet rechtstreeks gebaseerd op waarnemingen, maar op statistische extrapolatie met behulp van rekenmodellen zoals het BOI¹.

In (Bottema, 2022) wordt gewezen op een schijnbaar verschil in haalbare golfsteilheid tussen de Deltagoot en de Scheldegoot. Daarop wordt in de studies van 2024 niet nader ingegaan.

2.4 Diagnose; mogelijke oorzaken voor discrepantie

2.4.1 Mogelijke oorzaken voor (te) hoge gewenste golfsteilheid

In (Groeneweg en Van Steeg, 2020) is het volgende gesteld: De met het BOI berekende steilheden kunnen groot zijn als gevolg van een combinatie van factoren; de mate waarin is locatie- en faalmechanisme-afhankelijk:

- Het geheel of gedeeltelijk ontbreken van essentiële fysica in de modellering met SWAN;
- Het onafhankelijk veronderstellen van modelonzekerheden².
- Interpolatiefouten bij lage waterstanden als gevolg van een grove resolutie van basisstochastwaarden.

¹ 'BOI' staat voor 'Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium' en is ontwikkeld voor de primaire waterkeringen in Nederland.

² In de nieuwe versie van het BOI wordt, indien aanwezig, de correlatie tussen modelonzekerheden golfhoogte en golfperiode wel meegenomen. Dit zorgt voor langere golfperiodes en daarmee lagere steilheden.

2.4.2 Mogelijke oorzaken voor beperkte haalbare golfsteilheid

De voornaamste verschillen tussen metingen in een golfgoot (uitgaande van het de Deltares golfgoten) en in-situ metingen komen voort uit:

- het ontbreken van wind en;
- het ontbreken van richtingspreiding (kortkammigheid).

In (De Ridder et al., 2024) wordt uit een vergelijking tussen metingen met en zonder richtingspreiding geconcludeerd dat richtingspreiding geen significante invloed heeft op de haalbare golfsteilheid. Daarom ligt de focus vooralsnog verder alleen op (het ontbreken van) wind.

Uit vergelijking van Tabel 2-2 met Tabel 2-1 lijkt te volgen dat de in golfgoten maximaal haalbare golfsteilheid voldoende aansluit bij de veel voorkomende situatie in prototype van open, diep water en een enkelvoudig JONSWAP spectrum. Een probleem doet zich wel voor bij meer specifieke prototype omstandigheden zoals een korte strijklengte en jonge golven. Deze 'meer specifieke omstandigheden' komen in de context van beoordelen en ontwerpen in Nederland nog relatief veel voor: korte strijklengte en (zeer) jonge golven spelen eigenlijk op alle smalle wateren zoals randmeren en voormalige zeearmen. En in geval van rivieren zijn deze omstandigheden weliswaar waarschijnlijk minder belangrijk voor golfoverslag³ (c.q. de benodigde kruinhoogte), maar waarschijnlijk wel belangrijk voor de golfbelasting op de bekledingen.

2.5 Aanpak sporen in 2024

Onderhavige studie sluit aan op eerdere studies naar gewenste en haalbare golfsteilheid. Specifiek wordt aangesloten bij de bevindingen en aanbevelingen uit de meest recente studie (De Ridder et al., 2024) en gedachtewisselingen tussen betrokkenen bij Deltares en RWS-WVL (via mail, memo's en mondeling) naar aanleiding daarvan.

De 'gewenste' golfsteilheden worden nu nader gespecificeerd als de golfsteilheden die relevant zijn voor de veiligheidsbeoordeling met BOI. Anders geformuleerd: relevant bij het bepalen van de overstromingskans van primaire waterkeringen in Nederland. Hieruit volgt de eerste activiteit in 2024:

- 1 Breng het voor de veiligheidsbeoordeling met BOI relevante bereik aan golfsteilheden in beeld.

Een belangrijke hypothese in (De Ridder et al., 2024) is dat een hoge golfsteilheid misschien wel op te wekken is, maar (bij afwezigheid van wind) in de golffaciliteit niet in stand kan blijven bij toenemende afstand tot het golfschot. De beste manier om inzicht te krijgen in de invloed van de afstand tot het golfschot op de golfsteilheid, is via het uitvoeren van hierop gerichte metingen in een goot. Dit levert de tweede activiteit in 2024:

- 2 Bepaal de invloed van de afstand tot het golfschot op de golfsteilheid.

Het ontbreken van wind in de Deltares golffaciliteiten zou een rol kunnen spelen bij beperkingen in de mogelijkheden om de voor BOI relevante golfcondities te kunnen reproduceren. Daarom is de derde activiteit in 2024:

- 3 Formuleer eerste gedachten bij de overweging om wind in de golffaciliteiten te faciliteren.

³ Op rivieren weegt bij overslag de trage stochast afvoer relatief zwaar mee in het illustratiepunt; in het illustratiepunt zal de windsnelheid minder extreem zijn en daarmee zijn de golven minder jong.

3 Inventarisatie relevante waarden golfsteilheid

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft een deelstudie, uitgevoerd in 2024, gericht op de vraag:

Hoe relevant zijn hoge golfsteilheden in het toepassingskader van de veiligheid tegen overstroming in Nederland?

Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd. In paragraaf 3.2 wordt eerst de aanpak beschreven. Vervolgens geeft paragraaf 3.3 de resultaten. Deze resultaten zijn aanleiding voor een aanvullende, nadere analyse, die wordt gegeven in paragraaf 3.4. Paragraaf 3.5, ten slotte, geeft de conclusies uit deze deelstudie.

3.2 Aanpak

In deze studie is gekozen voor de volgende aanpak van de vraag uit paragraaf 3.1:

Bezie de golfsteilheid in de illustratiepunten bij relevante terugkeertijd voor golfoverslag voor de testcases in de Riskeer testbank.

Voordelen van deze aanpak zijn:

- Er wordt gebruik gemaakt van rekenmethoden en data die op veel punten representatief zijn voor het toepassingskader van de veiligheid tegen overstroming in Nederland, verspreid over alle primaire waterkeringen en dus ook alle watersystemen.
- De aanpak kost relatief weinig inspanning, want er hoeven geen invoergegevens te worden gekozen en geen probabilistische berekeningen te worden uitgevoerd: de rekenresultaten zijn al beschikbaar vanuit de testprocedure bij Riskeer.

Er is wel een kanttekening bij deze aanpak:

- In de Riskeer testbank zitten geen voorlanden⁴, terwijl daar in de praktijk op veel locaties wel sprake van zou kunnen zijn. Voorlanden zorgen veelal voor afname van de golfhoogte bij gelijkblijvende golfperiode⁵, dus voor afname van de golfsteilheid. De gevonden waarden voor de golfsteilheid zullen daarom in veel gevallen hoger zijn dan in de praktijk van toepassing van Riskeer voor de Nederlandse waterkeringen.

Uitwerking

De Riskeer testbank bevat 228 locaties. De in deze studie geanalyseerde Riskeer testbankresultaten betreffen berekeningen van de golfoverslag. De doelwaarde van de terugkeertijd in de berekening hoort bij de signaleringswaarde voor het dijktraject waar de betreffende locatie aan gekoppeld is.

De geanalyseerde data bestaan uit de map met Riskeer testbankresultaten, met de naam: "Output_5_hlcd_gras_golfoploop_none_mu2017_bin_24_1_1_3fc_time_1_calc_1"

De beschikbare data zijn niet de allernieuwste data, maar de verwachting is dat dit voor de conclusies van onderhavige analyse niet zal uitmaken. Bovendien is de aanpak

⁴ Hier wordt bedoeld op eventuele voorlanden die liggen tussen de locaties in de database fysica voor Riskeer en de teen van de waterkering.

⁵ De 'constante golfperiode' is een benadering die in de huidige voorlandmodellering wordt gehanteerd. In werkelijkheid kan op een voorland wel sprake zijn van enige verandering in de golfperiode.

geautomatiseerd, dus eenvoudig opnieuw toe te passen op een eventueel gewenste update van de data in de testbank.

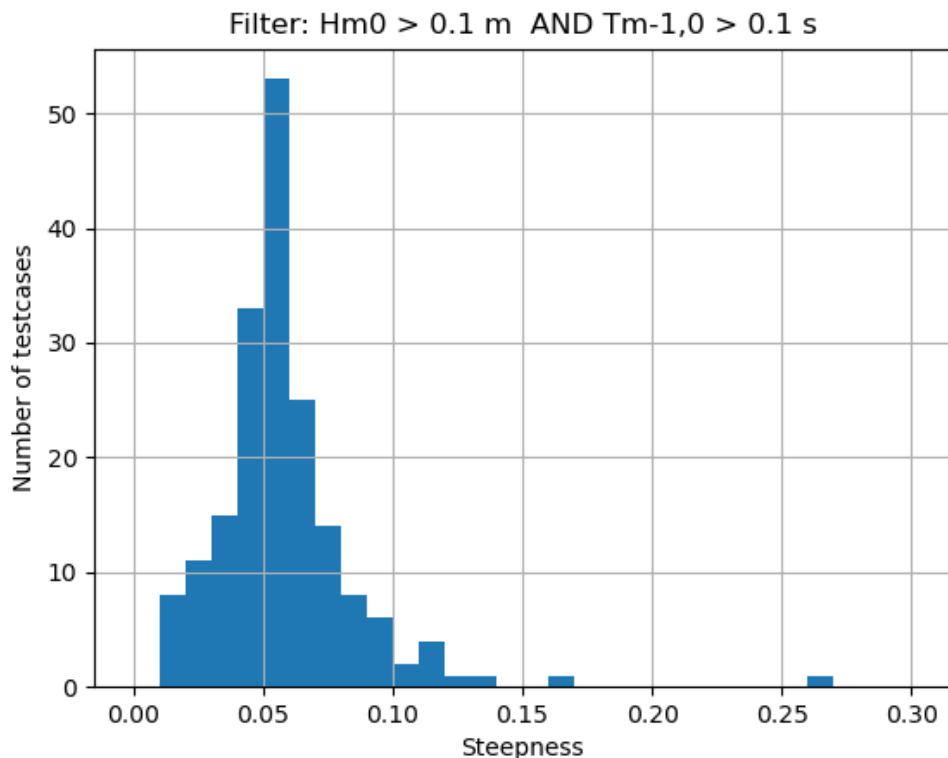
In de hier gehanteerde analyse geldt:

- We bekijken alleen de golfsteilheid gebaseerd op $T_{m-1,0}$.
- We nemen alleen de testcases mee waarbij de golfsteilheid is gebaseerd op een golfhoogte H_{m0} groter dan 0.1 m én een golfperiode $T_{m-1,0}$ groter dan 0.1 s.
- Een aantal testcases wordt buiten beschouwing gelaten omdat in het illustratiepunt geen combinatie van golfhoogte en golfperiode wordt gevonden. Vermoedelijk is overloop voor deze locaties maatgevend.

Voor nadere informatie over de analyse van de data wordt verwezen naar Bijlage A.

3.3 Resultaten

Figuur 3-1 toont een histogram van gevonden waarden van de golfsteilheid in de Riskeer testbankresultaten.



Figuur 3-1. Histogram van gevonden waarden van de golfsteilheid in de Riskeer testbankresultaten.

Observaties

- In veel gevallen ligt de golfsteilheid boven de 0.05; ook het golfsteilheidsinterval met de meeste testcases (namelijk: 0.05-0.06) ligt hierboven.
- Ook golfsteilheden groter dan 0.08 zijn geen zeldzaamheid, en zelfs waarden groter dan 0.10 zijn gevonden.

Interpretatie

In de rekenresultaten van de Riskeer-testbank komen NL-breed veel grote golfsteilheden voor. Dit vormt een bevestiging van de relevantie van het kunnen nabootsen van grote golfsteilheden in laboratoriumonderzoek naar de (benodigde) sterkte van waterkeringen.

Belangrijke kanttekening hierbij is wel dat de hier gevonden grote golfsteilheden een gevoel van ongemak geven, omdat zij enigszins doorgeschoten lijken te zijn: relatief veel waarden van de golfsteilheid lijken fysisch onrealistisch hoog. Hier wordt in de volgende paragraaf nader op ingegaan.

3.4 Nadere analyse

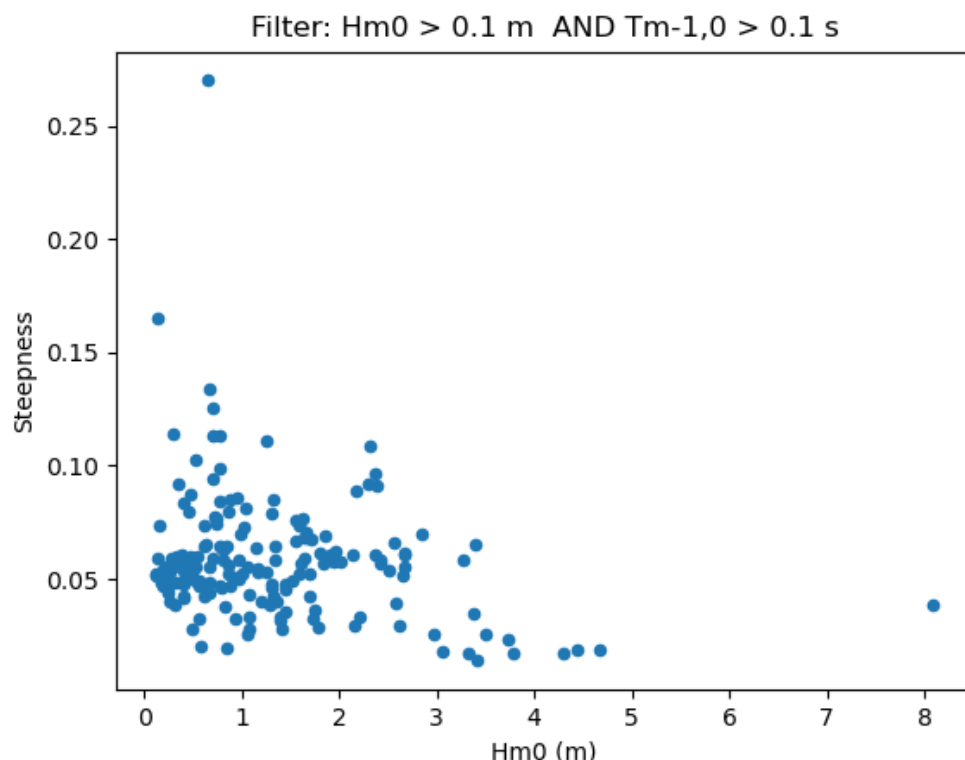
In paragraaf 3.3 is geconstateerd dat relatief veel gevonden waarden van de golfsteilheid in de Riskeer testbankresultaten fysisch onrealistisch hoog lijken. Als verklaring hiervoor kunnen de volgende hypothesen geformuleerd worden:

- A. De hoge golfsteilheden worden alleen gevonden bij heel kleine golven (en deze gevallen zijn waarschijnlijk niet echt relevant).
- B. De hoge golfsteilheden zitten al in de database fysica.
- C. In de database fysica zijn de golfsteilheden realistisch, maar bij de verwerking in Hydra-Ring gaat iets mis:
 - a. bij de interpolatie in de stochastenruimte gaat iets mis
 - b. bij het omgaan met modelonzekerheden in golfhoogte en golfperiode gaat iets mis

In het vervolg van deze paragraaf wordt nader gekeken naar hypothesen A en B. Het toetsen van hypothese C vergt meer inspanning en wordt daarom nu buiten de scope van deze deelstudie gehouden.

Toetsing hypothese A: 'De hoge golfsteilheden worden alleen gevonden bij heel kleine golven'

Voor het toetsen van hypothese A toont Figuur 3-2 een scatterplot van golfhoogte en golfsteilheid.



Figuur 3-2. Scatterplot van golfhoogte en golfsteilheid in de Riskeer testbankresultaten.

Observaties:

- De hoogste golfsteilheden zijn gevonden bij relatief kleine golfhoogte ($H_{m0} < 1$ m) en bij de hoogste golven is sprake van een gangbare tot lage golfsteilheid ($s_{0,m} < 0.05$).
- Hoge waarden voor de golfsteilheid worden niet alléén voor kleine waarden van de golfhoogte gevonden, maar ook voor bijvoorbeeld golfhoogtes groter dan 2 m.

Conclusie:

Hypothese A vormt geen algemene verklaring, kan hooguit voor enkele afzonderlijke gevallen een rol spelen.

Toetsing hypothese B: 'De hoge golfsteilheden zitten al in de database fysica'

Voor de toetsing van hypothese B wordt gekeken naar de test met LocId=1500387. Hierbij is het volgende illustratiepunt gevonden:

$$H_{m0} = 0.67 \text{ m}$$

$$T_{m-1,0} = 1.79 \text{ s}$$

$$s_{0,m} = 0.134$$

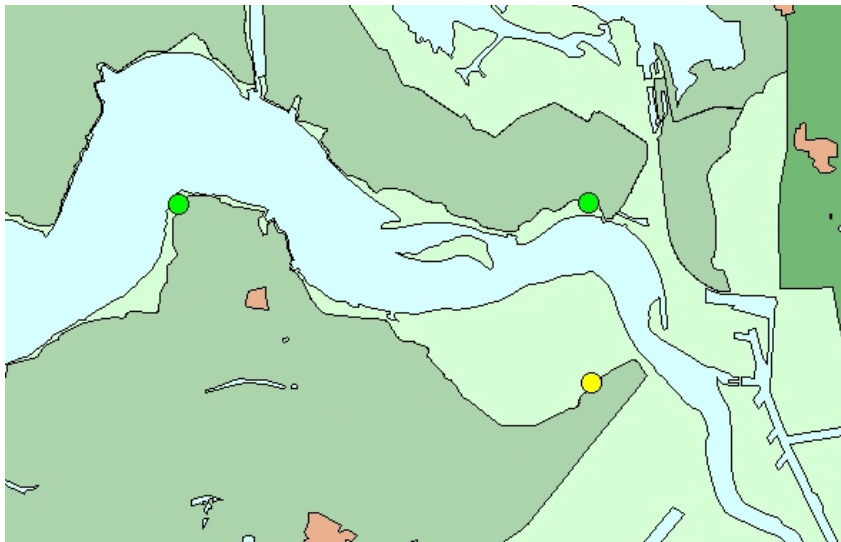
In het bestand 'Testlocaties.xlsx' blijkt dat deze LocId hoort bij:

database fysica: WBI2017_Westerschelde_32-4_v03.sqlite

locatie: 'WS_1_32-4_dk_00160'

HRDLocationId: 387

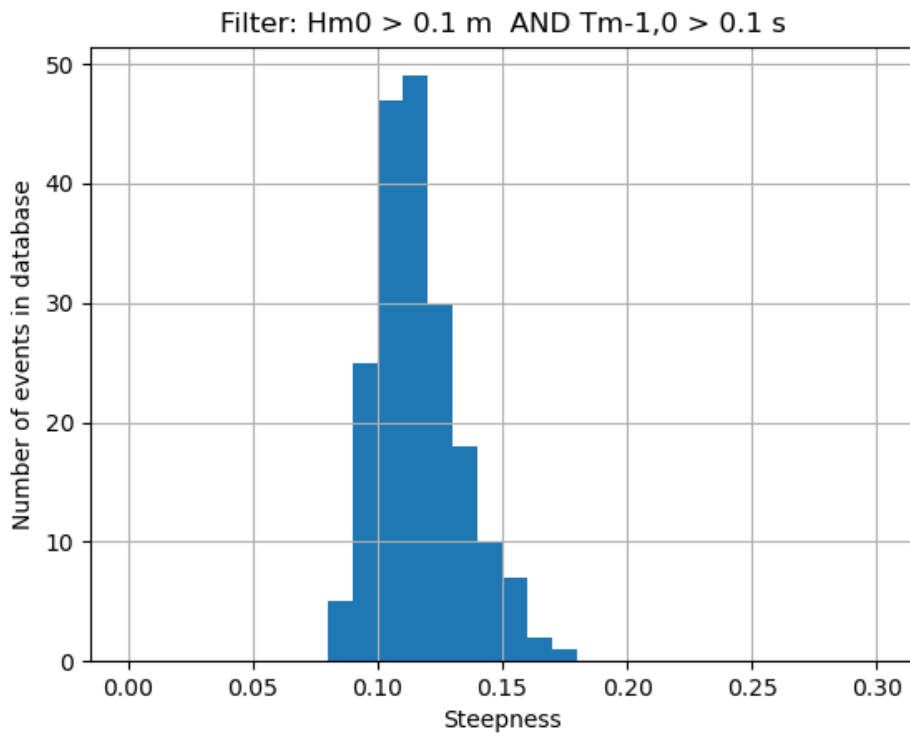
Deze locatie blijkt op het Verdrunken land van Saeftinge te liggen, bij de Hedwigepolder, zie Figuur 3-3.



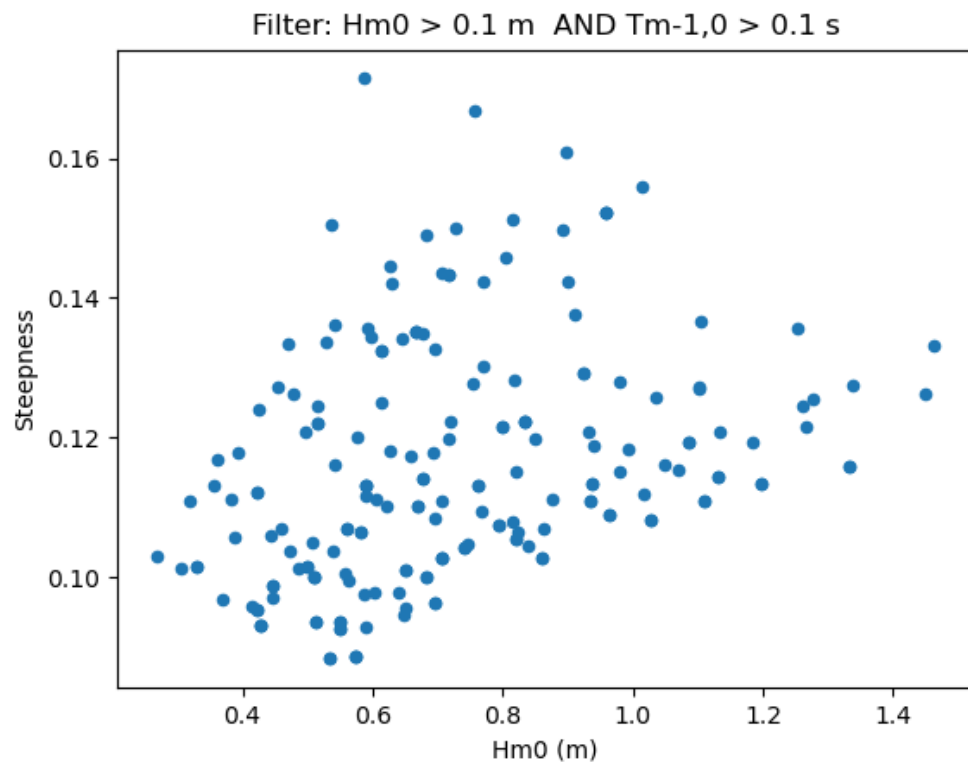
Figuur 3-3. Ligging van de beschouwde locatie (gele stip) in de Westerschelde.

Voor de analyse van de golfinformatie in deze database fysica is gebruik gemaakt van een ad hoc Python script. In deze analyse wordt alleen gekeken naar de events waarbij de golfhoogte H_{m0} groter is dan 0.1 m en de golfperiode $T_{m-1,0}$ groter is dan 0.1 s.

Figuur 3-4 toont het histogram van gevonden waarden van de golfsteilheid voor deze locatie in deze database fysica. Figuur 3-5 toont vervolgens de scatterplot van golfhoogte en golfsteilheid.



Figuur 3-4. Histogram van gevonden waarden van de golfsteilheid voor locatie WS_1_32-4_dk_00160 in de database fysica.



Figuur 3-5. Scatterplot van golfhoogte en golfsteilheid voor locatie WS_1_32-4_dk_00160 in de database fysica.

Observaties:

- Alle gevonden waarden voor de golfsteilheid zijn groter dan 0.08 en daarmee zeer hoog tot en met fysisch onrealistisch hoog.
- De spreiding in de waarden vertoont geen (schijn van) incidentele artefacten; de waarden tonen het structurele gedrag van het golfmodel (i.c. SWAN) voor deze locatie.

Bovenstaande beschouwing bevestigt het beeld dat in SWAN-resultaten sprake kan zijn van onrealistisch grote golfsteilheid⁶. Overigens is deze bevinding ook specifiek voor de Westerschelde niet nieuw: Eerder is in (Caires, 2012) al geconstateerd dat in de Westerschelde de SWAN golfsteilheid groter is dan de gemeten golfsteilheid, vooral voor de golfsteilheid gebaseerd op $T_{m-1,0}$. Deze bevinding is ook in (Groeneweg en Van Steeg, 2020) al uitgelicht.

Terzijde: Overigens zijn ook gevallen bekend waarbij in SWAN-resultaten sprake is van een onderschatting van de golfsteilheid. Daarom zou meer in het algemeen validatie van SWAN niet alleen op de afzonderlijke parameters voor golfhoogte (H_{m0}) en golfperiode (T_p ; $T_{m-1,0}$) moeten plaatsvinden, maar ook op de combinatie van deze twee in de vorm van de golfsteilheid (s_{op} ; s_{om}).

Conclusie:

Bovenbeschreven toets van hypothese B ondersteunt het belang van verbetering van SWAN op het gebied van de (te hoog berekende) golfsteilheid.

3.5 Conclusies

In de illustratiepunten van de rekenresultaten in de Riskeer-testbank komen NL-breed veel grote golfsteilheden voor. Dit vormt een bevestiging van de relevantie van het kunnen nabootsen van grote hoge golfsteilheden in laboratoriumonderzoek naar de (benodigde) sterkte van waterkeringen.

Kanttekeningen bij deze analyse en conclusie zijn echter wel:

- Veel berekende golfsteilheden zijn groter dan wat fysisch realistisch wordt geacht. Dit lijkt al in (de SWAN resultaten in) de HB databases fysica te zitten. Deze bevinding ondersteunt het belang van verbetering van SWAN op het gebied van de (te hoog berekende) golfsteilheid.
- In de testbank zitten geen voorlanden: de condities bij de locaties in de database fysica worden verondersteld aanwezig te zijn bij de teen van de waterkering. Voorlanden zorgen in de praktijk veelal voor afname van de golfhoogte bij gelijkblijvende (of enigszins toenemende) golfperiode, dus voor afname van de golfsteilheid. De in de testbank gevonden waarden voor de golfsteilheid zijn daarom in veel gevallen groter dan in de praktijk van toepassing van Riskeer voor de Nederlandse waterkeringen.

⁶ De golfcondities in de database zijn het resultaat van een interpolatie van SWAN resultaten bij verschillende waterstanden. In theorie kan de hoge steilheid in de database daarom ook veroorzaakt zijn door een fout bij de interpolatie. Dat wordt echter onwaarschijnlijk geacht.

4 Gemeten invloed van afstand tot golfschot

4.1 Inleiding

Een van de aanbevelingen uit (De Ridder et al, 2024) was om door middel van golfgootproeven inzicht te krijgen in de vraag in hoeverre de realiseerbare golfsteilheid afhangt van de afstand tot het golfschot. Deze aanbeveling kreeg de hoogste prioriteit op basis van verwachte toegevoegde waarde. Voor een specifiek op deze vraag gericht degelijk onderzoek was het in 2024 beschikbare budget echter niet toereikend.

Op een gegeven moment deed zich echter de gelegenheid voor om binnen een kort tijdvenster mee te liften met de meetopstelling ten behoeve van een ander onderzoek. Van deze gelegenheid is gebruik gemaakt, door met een zeer beperkte inspanning een zeer beperkt aantal proeven uit te voeren, in de hoop hiermee al enkele waardevolle inzichten te krijgen. De betreffende proeven zijn uitgevoerd op vrijdag 2 augustus 2024.

Dit hoofdstuk doet verslag van dit onderzoek en de analyse van de resultaten. Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd. In paragraaf 4.2 worden eerst de metingen (modelopstelling en proevenprogramma) beschreven. Vervolgens geeft paragraaf 4.3 de analyse van de meetresultaten. Paragraaf 4.4 bevat een korte discussie, waarna in paragraaf 4.5 het hoofdstuk wordt afgesloten met de conclusies van de deelstudie.

4.2 Beschrijving metingen

4.2.1 Modelopzet

De goot

De proeven zijn uitgevoerd in de Oosterscheldegoot. De goot was 'leeg': er was sprake van een horizontale bodem. Aan het einde van de goot was sprake van passieve golfdemping in de vorm van een stalen, gebogen ribbelplaat.

Locatie golfhoogtemeters

In totaal is gebruik gemaakt van 10 golfhoogtemeters:

- 8 golfhoogtemeters op posities vanuit lopend onderzoek: WHM01 t/m WHM08
- 2 extra golfhoogtemeters, voor onderhavige studie toegevoegd tussen het golfschot en eerste golfhoogtemeter: WHM09 en WHM10

Tabel 4-1 geeft een overzicht van naam, volgnummer en afstand van het golfschot tot de golfhoogtemeters.

Naam	i_X	X
		m
WHM09	1	1,81
WHM10	2	3,49
WHM01	3	5,10
WHM02	4	17,60
WHM03	5	18,47
WHM04	6	21,18
WHM05	7	21,37
WHM06	8	22,00
WHM07	9	22,42
WHM08	10	26,00

Tabel 4-1. Naam, volgnummer en afstand tot het golfschot van de golfhoogtemeters

Verwaarlozing reflectie

De golfhoogtemeters zijn niet ideaal opgesteld voor het scheiden van inkomende en gereflecteerde golven voor de condities die voor deze studie beoogd zijn. In deze studie is daarom alleen gekeken naar de totale golfhoogte; er is niet getracht de inkomende en gereflecteerde golven te scheiden. De verwachting is dat dit acceptabel is omdat de reflectie tegen de passieve demping aan het eind van de goot klein is.

4.2.2 Proevenprogramma

Als basis voor het proevenprogramma is uitgegaan van een test uit het onderzoek van (De Ridder et al, 2024), waarbij relatief hoge golfsteilheid was gerealiseerd, waarvoor overigens wel een aanzienlijk verhoogde potmeterstand nodig was. Dit betreft de condities van proef SL70903 zoals beschreven in (De Ridder et al, 2024).

Er is sprake van één waterstand en één stuursignaal (tijdreeks voor de golfschotpositie) op basis van eerste orde sturing. Dit stuursignaal is gedraaid bij 4 waarden voor de stand van de potmeter.

De potmeter is een knop waarmee het schotpositie-stuursignaal kan worden versterkt of verzwakt, zie (De Ridder et al., 2024) voor uitgebreidere informatie over de rol van de potmeter. De ervaring heeft uitgewezen dat een onbekende (vaak forse) verhoging van de potmeterstand ten opzichte van de standaardwaarde van 0.80 nodig is wanneer een hoge golfsteilheid wordt beoogd.

Tabel 4-2 geeft het overzicht van testnaam, doelcondities en potmeterstand in de proevenserie. In alle gevallen is een JONSWAP spectrum ingestuurd.

Testnaam	Testdoelcondities				potmeter
	h	Hm0	Tp	Tm-1,0	
	m	m	s	s	-
SL70903ESp8a	0,70	0,19	1,20	1,09	0,80
SL70903ESp85a	0,70	0,19	1,20	1,09	0,85
SL70903ESp9a	0,70	0,19	1,20	1,09	0,90
SL70903ESp95a	0,70	0,19	1,20	1,09	0,95

Tabel 4-2. Testnaam, doelcondities en potmeterstand in de proevenserie (h staat voor waterstand).

De testnaam is vooral van belang in de opslag van de bestanden en de analyse-scripts. In de analyse in onderhavige studie wordt de potmeterstand als onderscheidend kenmerk gebruikt.

4.3 Analyse

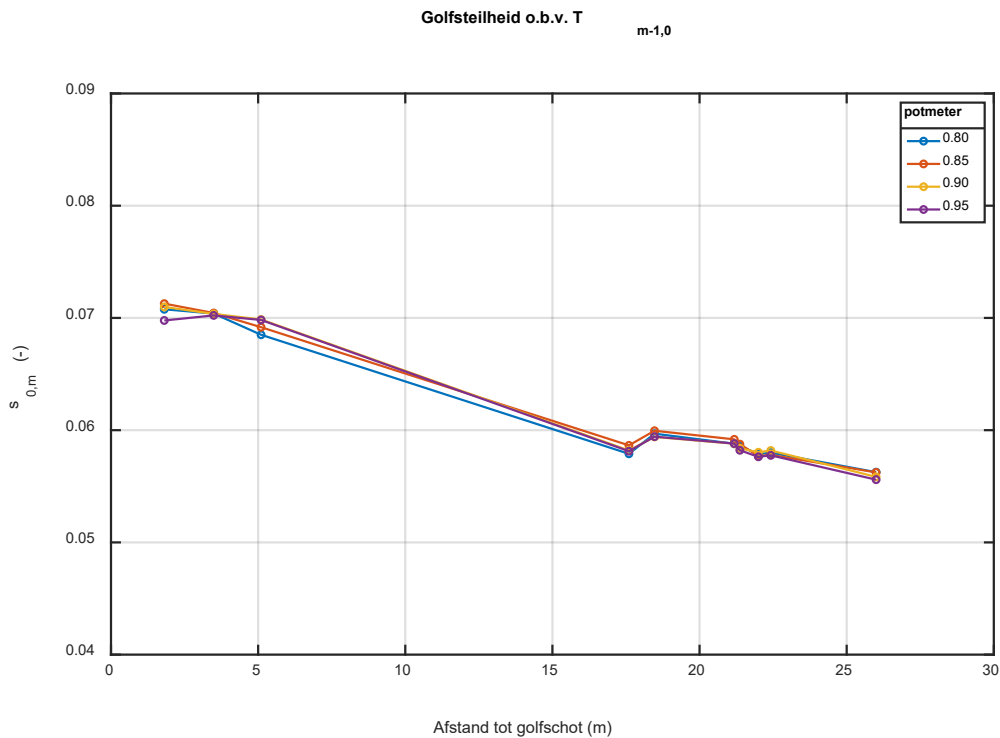
4.3.1 Golfsteilheid

Figuur 4-1 toont de golfsteilheid $s_{0,m}$ (op basis van $T_{m-1,0}$) in relatie tot de afstand tot het golfschot.

Observaties

- De golfsteilheid $s_{0,m}$ neemt geleidelijk af met toenemende afstand tot het golfschot.
- Er is nauwelijks verschil tussen de proeven, d.w.z. de potmeterstand heeft nauwelijks invloed op deze resultaten. Voor alle proeven geldt dat de golfsteilheid $s_{0,m}$ afneemt van ca 0.071 nabij het schot tot ca 0.056 op ca 26 meter van het golfschot.

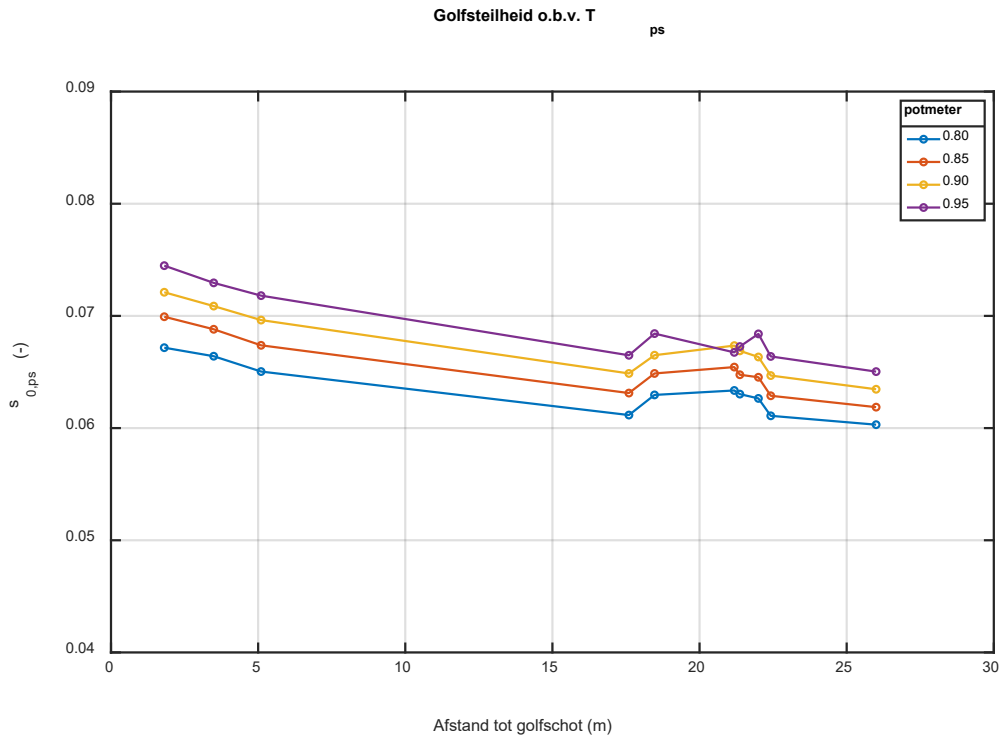
Merk op dat in de referentieproef SL70903 in (De Ridder et al, 2024) sprake is van een golfsteilheid $s_{0,m} = 0.067$ op een afstand van ca 11 m van het golfschot. Deze waarneming is weliswaar niet opgenomen in Figuur 4-1, maar lijkt vrij goed bij de trend in deze figuur te passen.



Figuur 4-1. Golfsteilheid $s_{0,m}$ (op basis van $T_{m-1,0}$) in relatie tot de afstand tot het golfschot

Figuur 4-2 toont de golfsteilheid $s_{0,ps}$ (op basis van T_{ps} ⁷) in relatie tot de afstand tot het golfschot.

⁷ In de analyse van het golfspectrum is in onderhavige studie voor de piekperiode steeds gebruik gemaakt van de 'smoothed peak period' T_{ps} .



Figuur 4-2. Golfsteilheid op basis van T_{ps} in relatie tot de afstand tot het golfschot

Observaties

- De golfsteilheid op basis van T_{ps} neemt geleidelijk af met toenemende afstand tot het golfschot.
- Er is duidelijk verschil tussen de proeven: bij hogere potmeterstand is de golfsteilheid op basis van T_{ps} hoger. De verschillen zijn opmerkelijk gelijkmatig; alleen de resultaten bij locatie 6 en 7 bij potmeterstand 0.95 wijken enigszins af.

Interpretatie

De waarneming dat beide maten voor de golfsteilheid afnemen met de afstand tot het golfschot vormt een ondersteuning van de hypothese dat een hoge golfsteilheid wel opgewekt kan worden, maar niet kan blijven bestaan in de goot.

De waarneming dat de golfsteilheid op basis van T_{ps} toeneemt bij hogere potmeterstand sluit aan bij de verwachting: een hogere potmeterstand vergroot immers de golfhoogte bij gelijkblijvende piekperiode. In de volgende paragraaf wordt nader ingegaan op deze parameters.

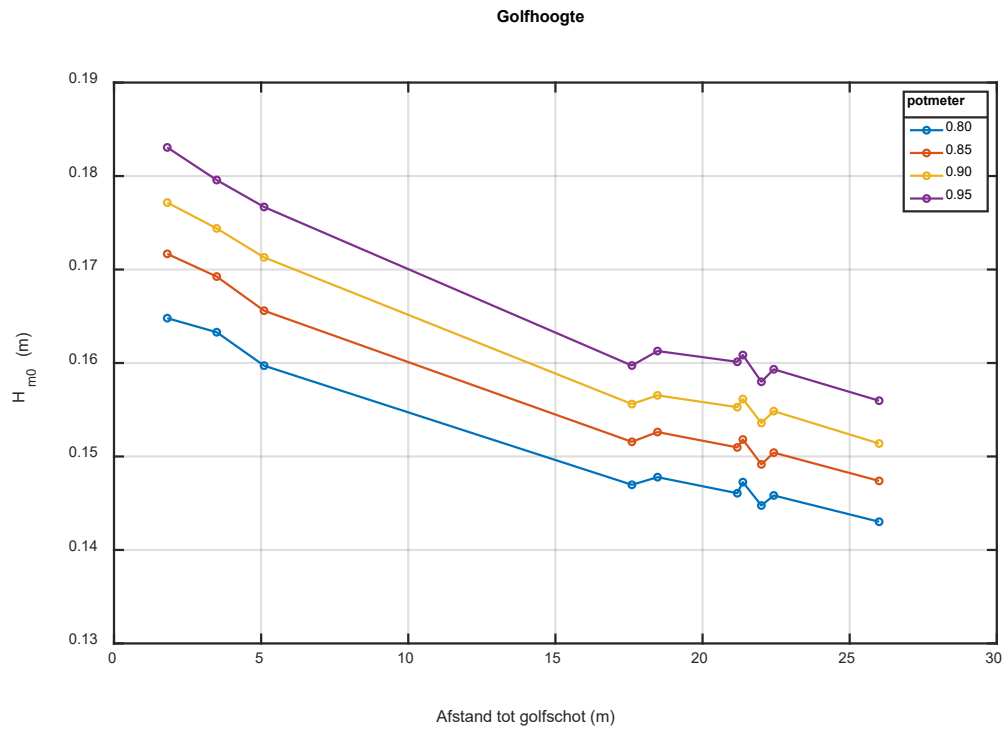
4.3.2 Golfhoogte en golfperiode

In deze paragraaf kijken we nader naar de golfparameters die deel uitmaken van de twee maten voor de golfsteilheid:

- de golfhoogte H_{m0}
- de smoothed piekperiode T_{ps}
- de spectrale (gemiddelde) golfperiode $T_{m-1,0}$

We bekijken hoe deze parameters veranderen met de afstand tot het golfschot.

Figuur 4-3 toont de golfhoogte H_{m0} in relatie tot de afstand tot het golfschot.

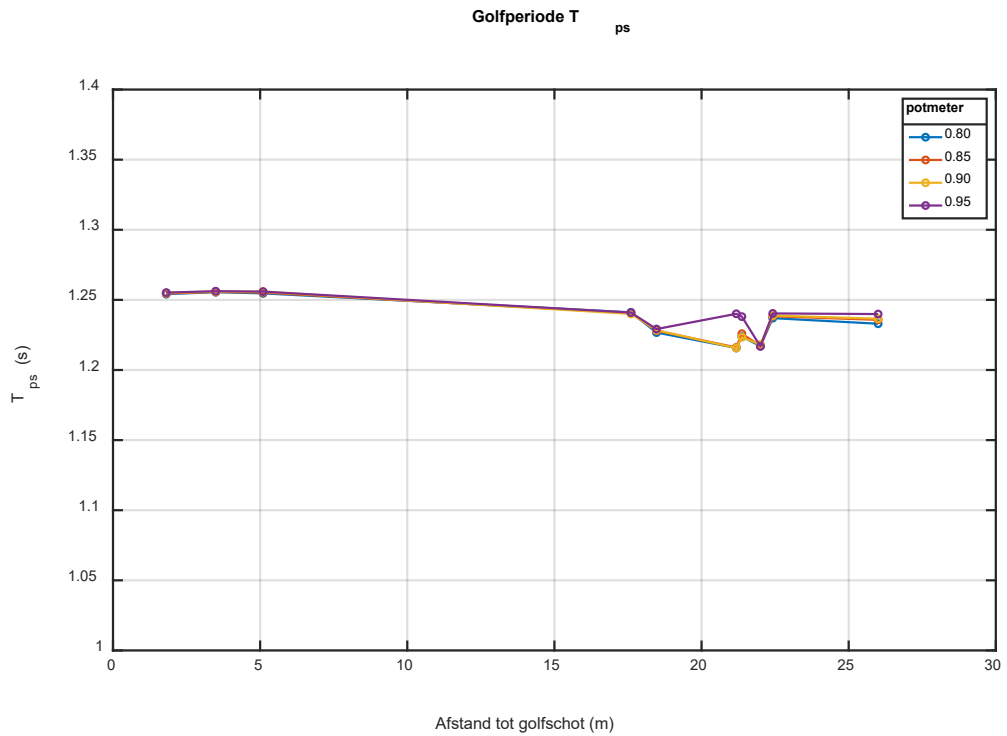


Figuur 4-3. Golfhoogte H_{m0} in relatie tot de afstand tot het golfschot

Observaties

- De golfhoogte neemt geleidelijk af met toenemende afstand tot het golfschot.
- Er is duidelijk verschil tussen de proeven: bij hogere potmeterstand is de golfhoogte groter. Dit is conform verwachting. De verschillen zijn opmerkelijk gelijkmatig.
- Het dichtst bij het golfschot en bij de hoogste potmeterstand is de hoogste golfhoogte gerealiseerd. Maar zelfs hier is de gestuurde golfhoogte van 0.19 m niet gehaald.

Figuur 4-4 toont de golfperiode T_{ps} in relatie tot de afstand tot het golfschot.

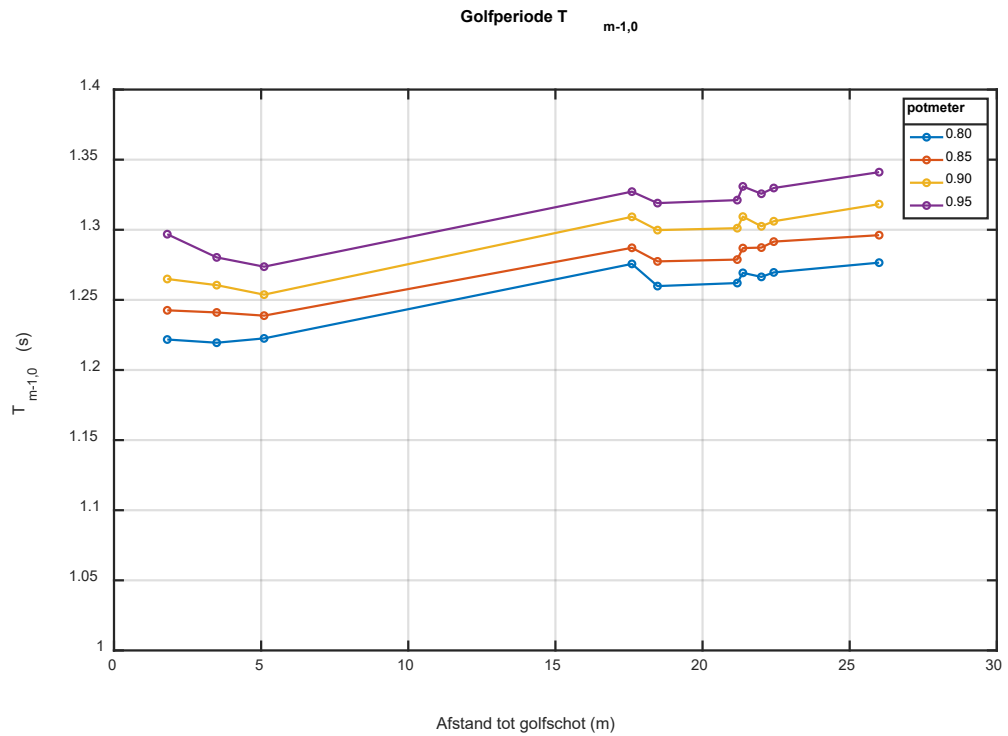


Figuur 4-4. Golfperiode T_{ps} in relatie tot de afstand tot het golfschot

Observaties

- Over het geheel beschouwd neemt de golfperiode T_{ps} heel licht af met toenemende afstand tot het golfschot.
- Er is vrijwel geen verschil tussen de proeven. Alleen de resultaten bij locatie 6 en 7 bij potmeterstand 0.95 wijken enigszins af.
- De gemeten waarden voor T_{ps} liggen globaal tussen ca 1.22 en ca 1.26 s en zijn daarmee iets groter dan de gestuurde waarde van de piekperiode T_{ps} van 1.20 s.

Figuur 4-5 toont de golfperiode $T_{m-1,0}$ in relatie tot de afstand tot het golfschot.

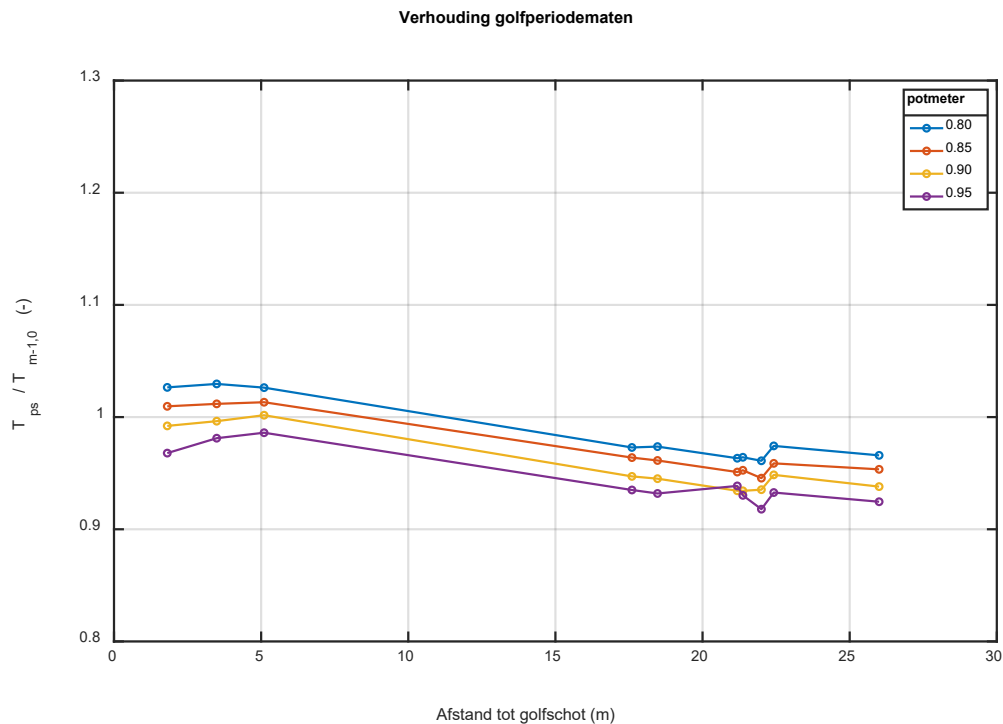


Figuur 4-5. Golfperiode $T_{m-1,0}$ in relatie tot de afstand tot het golfschot

Observaties

- Over het geheel beschouwd neemt de golfperiode $T_{m-1,0}$ licht toe met toenemende afstand tot het golfschot. Maar bijvoorbeeld in het sub-bereik van de eerste drie golfhoogtemeters is deze toename niet aanwezig.
- Er is duidelijk verschil tussen de proeven: bij hogere potmeterstand is de golfperiode $T_{m-1,0}$ groter. De verschillen zijn opmerkelijk gelijkmatig.
- De gemeten waarden voor $T_{m-1,0}$ zijn opmerkelijk hoog: groter dan de gestuurde waarde van de piekperiode T_{ps} van 1.20 s.

Figuur 4-6 toont de verhouding $T_{ps}/T_{m-1,0}$ in relatie tot de afstand tot het golfschot.



Figuur 4-6. Verhouding $T_{ps}/T_{m-1,0}$ in relatie tot de afstand tot het golfschot

Observaties

- Over het geheel beschouwd neemt de verhouding licht af met toenemende afstand tot het golfschot.
- Er is duidelijk verschil tussen de proeven: bij hogere potmeterstand is de verhouding kleiner. De verschillen zijn opmerkelijk gelijkmatig. Alleen de resultaten bij locatie 6 en 7 bij potmeterstand 0.95 wijken enigszins af.
- De gemeten waarden voor de verhouding liggen globaal tussen ca 0.92 en ca 1.04 s en zijn daarmee duidelijk lager dan de voor een JONSWAP spectrum verwachte waarde van ca 1.1.

Interpretatie

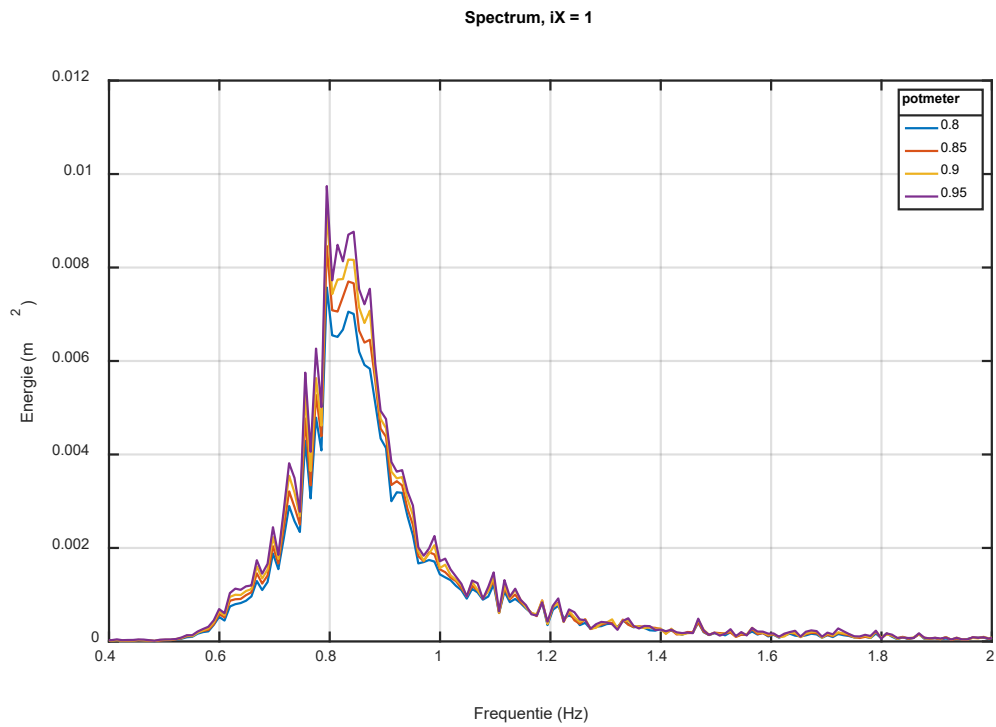
Als getracht wordt condities op te wekken met zeer hoge steilheid, dan:

- veranderen de golfparameters met de afstand tot het golfschot. Dit geldt vooral duidelijk voor de golfhoogte H_{m0} en de golfperiode $T_{m-1,0}$;
- worden de beoogde condities niet gerealiseerd, zelfs niet dicht bij het golfschot;
- worden opmerkelijk kleine waarden gevonden voor de verhouding $T_{ps}/T_{m-1,0}$, hetgeen duidt op een spectrale vorm die duidelijk afwijkt van de beoogde JONSWAP vorm. Hierop wordt in de volgende paragraaf nader ingegaan.

4.3.3 Spectrumvorm

In deze paragraaf kijken we nader naar de spectrumvorm.

Figuur 4-7 toont de spectrumvorm voor locatie 1 (WHM09) bij verschillende potmeterstanden.

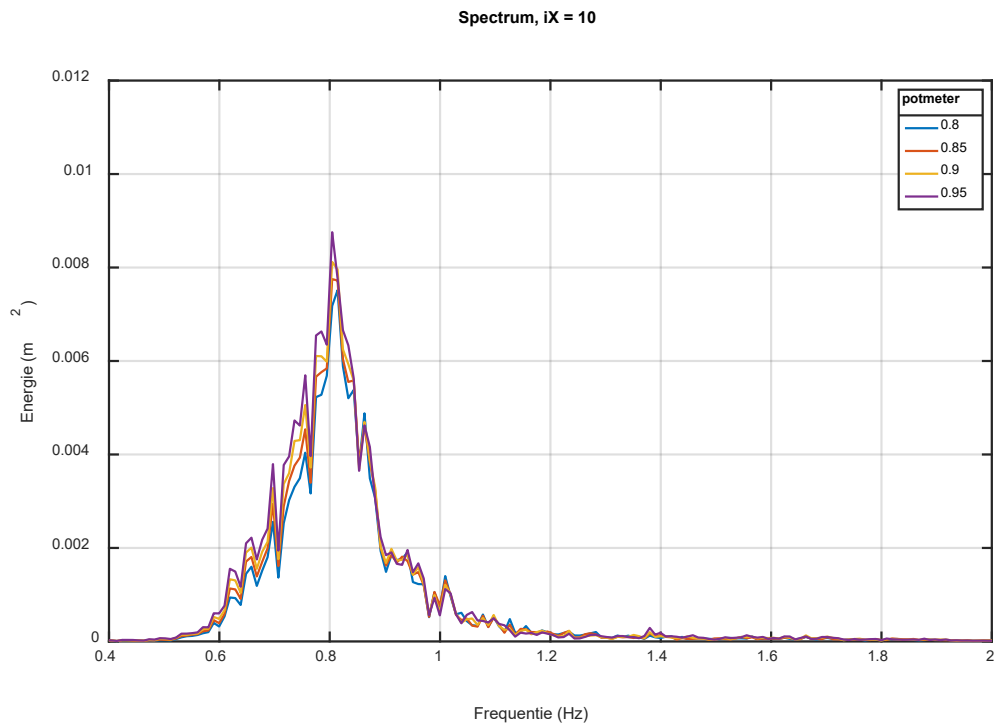


Figuur 4-7 Spectrumvorm voor locatie 1 (WHM09) bij verschillende potmeterstanden

Observaties

- Er is sprake van een relatief brede piek en de vorm is minder asymmetrisch dan een JONSWAP spectrum.
- De invloed van de potmeterstand is duidelijk zichtbaar: een hogere potmeterstand geeft hogere energieniveaus. Dit geldt globaal proportioneel, voor alle frequenties, dus zowel in de top als links en rechts van de top.

Figuur 4-8 toont de spectrumvorm voor locatie 10 (WHM08) bij verschillende potmeterstanden.



Figuur 4-8. Spectrumvorm voor locatie 10 (WHM08) bij verschillende potmeterstanden

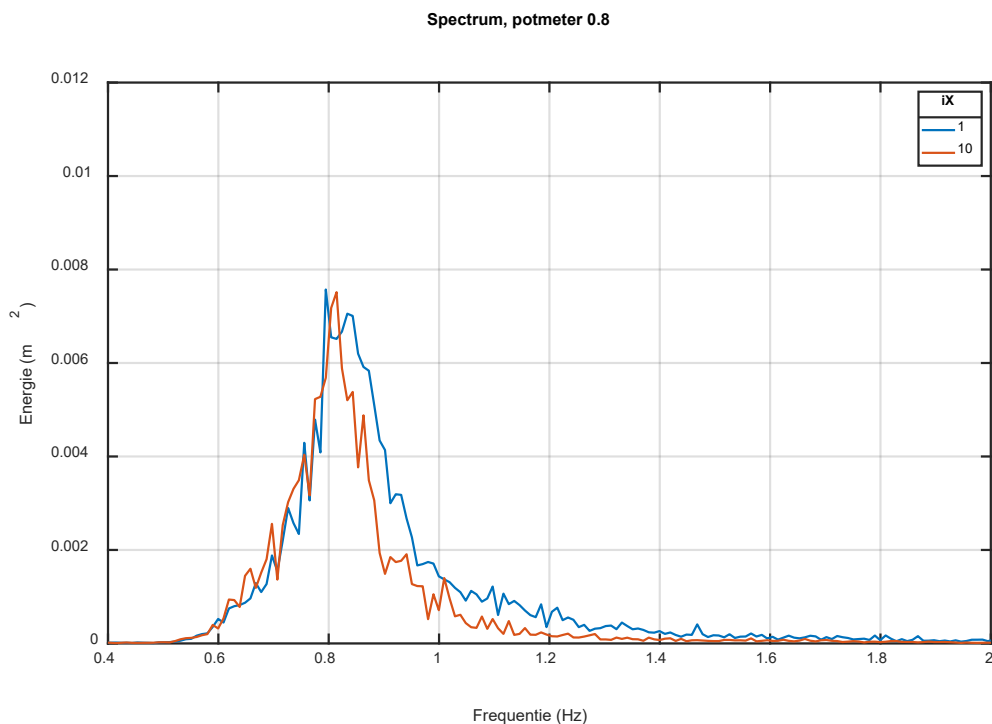
Observaties

- De invloed van de potmeterstand is slechts gedeeltelijk zichtbaar: een hogere potmeterstand geeft hogere energieniveaus bij de piekfrequentie en frequenties lager dan de piekfrequentie. Maar voor frequenties hoger dan de piekfrequentie is bij deze locatie de invloed van de potmeterstand verdwenen.
- De vorm is bijna symmetrisch en dus veel minder asymmetrisch dan het beoogde JONSWAP spectrum. Bij toenemende potmeterstand neemt de energie in het frequentiebereik beneden de piekfrequentie toe en het totaal daarvan lijkt van dezelfde orde als (of zelfs groter dan) de energie in het frequentiebereik boven de piekfrequentie te zijn.

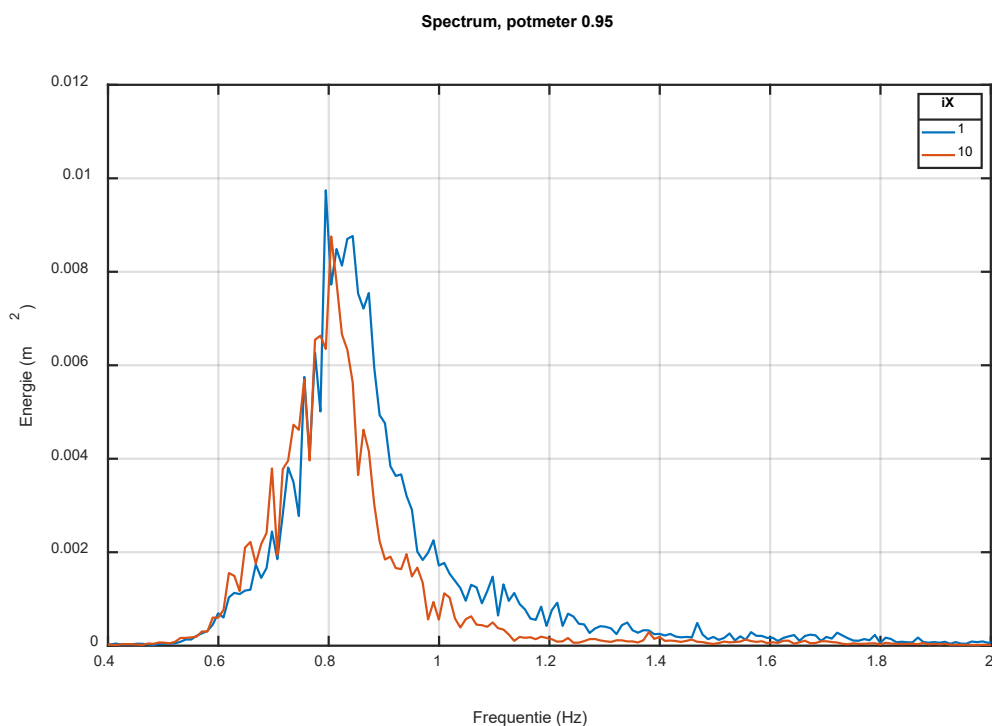
Figuur 4-9 toont de spectrumvorm voor de proef met potmeterstand 0.8 voor locaties 1 en 10.

Observaties

- De invloed van de locatie (afstand tot het golfschot) is als volgt zichtbaar. Met grotere afstand:
 - wordt de spectrumpiek smaller;
 - zakt de energie in het frequentiebereik boven de piekfrequentie in;
 - blijft de energie in het frequentiebereik onder de piekfrequentie gelijk (of neemt heel licht toe).



Figuur 4-9. Spectrumvorm bij potmeterstand 0.8 voor locatie 1 en 10



Figuur 4-10. Spectrumvorm bij potmeterstand 0.95 voor locaties 1 en 10

Figuur 4-10 toont de spectrumvorm voor de proef met potmeterstand 0.95 voor locaties 1 en 10. Hierbij blijkt sprake van dezelfde observaties als bij potmeterstand 0.8, in Figuur 4-9.

Interpretatie

De waarneming dat de energie in het frequentiebereik boven de piekfrequentie inzakkt tot een 'vast' niveau (d.w.z. onafhankelijk van de potmeterstand) vormt een ondersteuning van de hypothese dat in dit gebied sprake is van een 'verzadigingsniveau', zie ook paragraaf 5.2.

4.4 Discussie

De beperkte omvang van het meetprogramma noopt tot terughoudendheid bij het trekken van generieke conclusies.

Hoewel de omvang van het onderzoek zeer beperkt is, zien de resultaten er interessant en waardevol uit:

- De waargenomen trends zijn vrij duidelijk (vertonen weinig ruis) en sluiten in veel opzichten aan bij de verwachtingen (c.q. hypothesen).
- De resultaten uit eerder onderzoek lijken goed in de hier waargenomen trends te passen.

De resultaten leveren wel nadrukkelijk enkele aandachtspunten bij het opwekken van steile golven:

- Het is moeilijk om de beoogde golfhoogte te realiseren, zelfs met sterk verhoogde potmeterstand.
- De spectrale vorm, en met name de verhouding $T_p/T_{m-1,0}$ als indicator, wordt opvallend afwijkend van die van een JONSWAP spectrum.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van golfhoogtemeters die ongebruikelijk dicht bij het golfschot zijn geplaatst. Het verdient aanbeveling na te gaan in hoeverre het meetsignaal bij deze locaties kan zijn beïnvloed door evanescent modes⁸. De verwachting is dat die invloed verwaarloosbaar is.

In deze studie is niet getracht de inkomende en gereflecteerde golven te scheiden (zie paragraaf 4.2.1). Hoewel de reflectie zeer klein is, valt niet uit te sluiten dat reflectie toch een rol speelt in de meetresultaten, bijvoorbeeld in de kleine 'dip' in de golfperiode in Figuur 4-4.

Bij de doelwaarde van de golfhoogte (0.19 m) is sprake van een golfhoogte-waterdiepte verhouding van 0.27 en bij de maximaal waargenomen golfhoogte (0.183 m) van 0.26. Het is niet uitgesloten dat een deel van de waargenomen uitdemping van de golfhoogte met toenemende afstand tot het golfschot wordt veroorzaakt door ondiepwaterdissipatie (een deel van de golven voelt de bodem).

4.5 Conclusies

Het korte onderzoek in de Oosterscheldegoot heeft de volgende conclusies opgeleverd:

- Bij het opwekken van golfcondities met hoge golfsteilheid nemen beide maten voor de golfsteilheid ($s_{0,ps}$ en $s_{0,m}$) af met toenemende afstand tot het golfschot. Dit vormt een ondersteuning van de hypothese dat een hoge golfsteilheid wel opgewekt kan worden, maar niet in stand kan blijven met toenemende afstand tot het golfschot.
- De golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum zakt met toenemende afstand van het golfschot in tot een 'vast' niveau (d.w.z. onafhankelijk van de potmeterstand).
- Bij het opwekken van steile golven wordt de spectrale vorm met toenemende afstand tot het golfschot opvallend afwijkend van die van een JONSWAP spectrum:

⁸ Evanescent modes zijn verstoringen in de oppervlakteuitwijking die snel uitdempen met afstand tot het golfschot. Ze worden ook wel stoorgolven genoemd. De verstoringen hangen samen met het feit dat de waterbeweging ter plaatse van het schot (piston type; uniform over de verticaal) niet overeenkomt met de natuurlijke waterbeweging in de opgewekte golf (typische cosh-vorm over de verticaal). De uitdemping hangt samen met de (snelle) natuurlijke overgang van geforceerde waterbeweging naar natuurlijke waterbeweging.

- De hoogfrequente flank zakt in en de energie in de laagfrequente flank blijft gelijk of neemt zelfs licht toe.
- De gemeten waarden voor de verhouding $T_{ps}/T_{m-1,0}$ liggen globaal tussen ca 0.92 en ca 1.04 s en zijn daarmee duidelijk lager dan de voor een JONSWAP spectrum verwachte waarde van ca 1.1.

5 Nadere beschouwing rol wind

5.1 Inleiding

Aansluitend op de conclusies uit hoofdstuk 4 wordt in dit hoofdstuk de rol van wind in de problematiek nader beschouwd en worden enkele eerste gedachten geformuleerd bij mogelijkheden voor het omgaan met deze rol.

5.2 Rol wind in golfcondities

In paragraaf 4.3.3 is geconstateerd dat de golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum met toenemende afstand van het golfschot inzakt. Dit hangt zeer waarschijnlijk samen met het ontbreken van wind: de omzetting van windinput naar golfenergie vindt immers plaats via de hoogfrequente flank van het spectrum.

De golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum ligt in een situatie met wind hoger dan in een situatie zonder wind. Men zou kunnen zeggen dat bij aanwezigheid van wind de golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum is 'oververzadigd'. Bij oververzadiging is sprake van energieverlies door breking op steilheid (whitecapping) en overdracht van golfenergie naar lagere frequenties. Bij afwezigheid van wind zakt de golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum terug naar een 'verzadigingsniveau'; het 'vaste' niveau zoals gevonden in paragraaf 4.3.3.

In een situatie met korte strijklengte c.q. jonge golven is sprake van een sterke onbalans. De 'drang' om energie op te nemen en door te geven van de hogere frequenties naar de lagere frequenties hangt samen met de situatie dat te veel energie zich bij te hoge frequenties bevindt. Dit laatste sluit aan op de opvallend hoge golfsteilheid bij situaties met korte strijklengte c.q. jonge golven.

Bovenstaand beeld van de rol van wind in de golfenergie bij de relatief hoge frequenties wordt ook ondersteund door visuele waarnemingen. Figuur 5-1 toont het wateroppervlak in een golfgoot met wind. Er is sprake van veel relatief kleine, korte golven. Dit wateroppervlak is hiermee aanzienlijk grilliger / onrustiger dan het wateroppervlak in een goot zonder wind.



Figuur 5-1. Wateroppervlak in golfgoot met wind van Armfield.

Bron: <https://armfield.co.uk/product/s60-s80-s100-standard-teaching-and-research-flumes/>

5.3 Hoe om te gaan met rol wind in fysisch modelonderzoek

In paragraaf 5.2 is geconstateerd dat het ontbreken van wind zeer waarschijnlijk een rol speelt bij het feit dat de in de golfgoot haalbare golfsteilheid niet zo hoog is als soms gewenst. Hieronder wordt kort ingegaan op verschillende manieren om hiermee om te gaan:

- Wind faciliteren;
- Work-around: een provisorisch alternatief voor 'wind faciliteren' om een hoge steilheid te realiseren;
- Rol van wind relativeren.

Wind faciliteren?

Een voor de hand liggende aanpak lijkt het (alsnog) faciliteren van wind. Dit kan door een bestaande goot aan te passen (met een overkapping, retourkanaal en ventilatoren) of een afzonderlijke wind-golfgoot aan te schaffen. Toch is deze aanpak minder eenvoudig en aantrekkelijk dan op het eerste gezicht lijkt. Hieronder volgen enige kanttekeningen, zie ook (Bottema, 2022):

- Modeeffecten zijn moeilijk te vermijden, denk aan een realistisch windsnelheidsprofiel.
- Schaafeffecten zijn moeilijk te vermijden, denk aan capillaire golven en spray.
- De gootruimte wordt moeilijk(er) toegankelijk; het plaatsen van voorlanden, onderzoeksobjecten en meetinstrumenten wordt lastiger.
- Er is een inspeellengte nodig om de windinvloed te laten doorwerken in het gehele hoogfrequente deel van het mechanisch opgewekte spectrum.

Voorafgaand aan eventuele investeringen langs deze aanpak is het raadzaam om ook na te gaan waarom de windgoot van WL | Delft destijds buiten gebruik is gesteld; voorzigt deze faciliteit niet voldoende in een onderzoeksbehoefte?

Work-around?

In sommige gevallen is een work-around mogelijk, namelijk door het onderzoeksobject dichtbij het golfschot te plaatsen. Dit kan echter alleen bij een 'kort' onderzoeksobject op 'diep water'; een voorland mag geen rol spelen. Een dergelijke work-around is dus lang niet in alle gevallen een bruikbare aanpak.

Rol van wind relativeren

Voor onderzoek naar de interactie tussen golven en vaste of drijvende objecten is de precieze realisatie van de golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum waarschijnlijk in slechts weinig gevallen van significant belang. In veel onderzoeken is vermoedelijk belangrijker om goed om te gaan met:

- de beperkte waterdiepte in de faciliteit;
- (het meemodelleren van) stroming;
- 3D aspecten zoals scheve golfaanval en richtingspreiding.

Maar de afwezigheid van wind verdient wel meer expliciete aandacht. Het wordt aanbevolen expliciet aandacht te geven aan de rol van wind in de te onderzoeken fenomenen en aan de invloed van de afwezigheid van wind op de interpretatie van fysisch modelonderzoek.

6 Conclusies en aanbevelingen

In 2024 zijn enkele deelstudies uitgevoerd naar het verschil tussen gewenste condities en haalbare condities in golfgoten wat betreft (hoge) golfsteilheid. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit deze deelstudies zijn als volgt.

In de illustratiepunten van de rekenresultaten in de Riskeer-testbank komen Nederland-breed veel grote golfsteilheden voor. Dit vormt een bevestiging van de relevantie van het kunnen nabootsen van grote hoge golfsteilheden in laboratoriumonderzoek naar de (benodigde) sterkte van waterkeringen.

Kanttekeningen bij deze analyse en conclusie zijn echter wel:

- Veel berekende golfsteilheden zijn groter dan wat fysisch realistisch wordt geacht.
- In de testbank zitten geen voorlanden. De in de testbank gevonden waarden voor de golfsteilheid zijn daarom in veel gevallen groter dan in de praktijk van toepassing van Riskeer voor de Nederlandse waterkeringen.

De met Riskeer te hoog berekende golfsteilheid lijkt al in (de SWAN resultaten in) de HB databases fysica te zitten. Deze bevinding ondersteunt het belang van verbetering van SWAN op het gebied van de (te hoog berekende) golfsteilheid.

Bij het opwekken van golfcondities met hoge golfsteilheid nemen beide maten voor de golfsteilheid ($s_{0,p}$ en $s_{0,m}$) af met toenemende afstand tot het golfschot. Dit vormt een ondersteuning van de hypothese dat een redelijk⁹ hoge golfsteilheid wel opgewekt kan worden, maar niet in stand kan blijven met toenemende afstand tot het golfschot.

Belangrijke kanttekening hierbij is:

- Bij het opwekken van steile golven wordt de spectrale vorm met toenemende afstand tot het golfschot opvallend afwijkend van de opgewekte vorm van een JONSWAP spectrum. De energie in de hoogfrequente flank zakt in en de energie in de laagfrequente flank neemt licht toe.

Het is aannemelijk dat de aanwezigheid van wind zorgt voor meer golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum en daardoor voor een grotere golfsteilheid dan in een situatie zonder wind. Vooral in situaties met jonge golven is de wind van dominant belang voor de golfkenmerken (energie in hoogfrequente flank, golfsteilheid) en zijn deze kenmerken moeilijk(er) na te bootsen in een golffaciliteit zonder wind.

Voor onderzoek naar de interactie tussen golven en vaste of drijvende objecten is de precieze realisatie van de golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum mogelijk in slechts weinig gevallen van significant belang. Maar de afwezigheid van wind verdient sowieso meer expliciete aandacht dan gangbaar in de huidige praktijk. Het wordt aanbevolen expliciet aandacht te geven aan de rol van wind in de te onderzoeken fenomenen en aan de invloed van de afwezigheid van wind op de interpretatie van fysisch modelonderzoek.

⁹ Nabij het golfschot is de realiseerbare golfsteilheid vrij groot, maar ook daar wel degelijk begrensd: niet elke gewenste steilheid is realiseerbaar.

Uit deze deelstudie komen de volgende onderwerpen naar voren als aanbevolen vervolgstudies:

- Verbetering van SWAN op het gebied van de (te hoog berekende) golfsteilheid.
- Inzicht in de rol van wind in te onderzoeken fenomenen en in de invloed van de afwezigheid van wind op de interpretatie van diverse types fysisch modelonderzoek. Idealiter leidt dit tot een afweeg- of handelingskader dat aangeeft in welke gevallen en op welke wijze je windinvloeden moet meewegen en/of meenemen bij gootproeven en onder welke omstandigheden je je studieobject dichter bij het golfschot moet plaatsen dan gebruikelijk.
- Naar aanleiding van de huidige resultaten de oorzaak van de te lage golfperiodes in de golfgoot nagaan: is sprake van te veel laagfrequente golfenergie, of juist te weinig hoogfrequente golfenergie.

Uit communicatie naar aanleiding van deze deelstudie komt verder nog het volgende onderwerp naar voren als aanbevolen vervolgstudie:

- Nader onderzoek naar de (verklaring van de) paradox dat bij het (ruimtelijk) wegvallen van de golfforcering in de golfgoot vooral de hoogfrequente spectrale flank lijkt in te zakken, terwijl bij het (tijdsafhankelijk) wegvallen van de golfforcering in de IJsselmeer/Slotermeermetingen juist de spectrale piek lijkt in te zakken.

Bij het plannen c.q. prioriteren van vervolgstappen in de aanpak van het probleem wordt aanbevolen eerder uitgevoerde studies te blijven raadplegen: (Groeneweg en Van Steeg, 2020), (Bottema, 2022) en (De Ridder et al., 2024).

Referenties

Bottema, M., 2022. Relevantie van schuine golfinval en kortkammigheid voor golfoverslag, en de representativiteit van golfgootproeven – een quick scan van de literatuur. RWS rapport, versie 3.2 (eindversie). 7 november 2022.

Caires, S., 2012. Maximale significante golfhoogte bij ondiep water en maximale golfsteilheid. Deltares rapport 1204727-004-HYE-0001, 13 april 2012.

De Ridder, M., De Waal, J.P., Groeneweg, J., 2024. Golfsteilheid in golfgoten. Deltares rapport 11209204-012-GEO-0001, 17 januari 2024.

Groeneweg, J., Van Steeg, P., 2020. Extreme golfsteilheden. Literatuuronderzoek. Deltares rapport 11205235-010-ZWS-0001, 24 juli 2020.

A Aanpak inventarisatie relevante waarden golfsteilheid in Riskeer testbankresultaten

A.1 Inleiding

De inventarisatie van de relevante waarden voor de golfsteilheid in de Riskeer resultaten is vastgelegd in het ad-hoc Python script “find_wave_steepness_in_riskeer_testbank_results.py”.

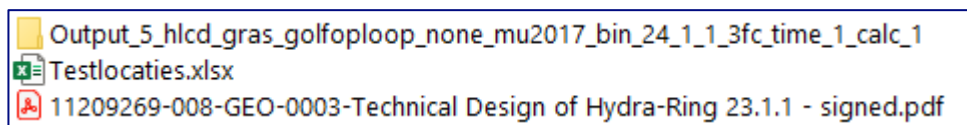
In hoofdlijnen voert dit script de volgende taken uit:

regel	taak
1	Doe voor alle Riskeer testcases van het beoogde berekeningstype:
2	Zoek de golfhoogte en golfperiode in het illustratiepunt
3	Bereken de golfsteilheid
4	Plot de resultaten

In het vervolg van deze bijlage worden regel 1 en 2 kort nader toegelicht. Als toelichting bij regel 1 geeft paragraaf A.2 een beschrijving van de mappen en bestanden waarin de testbankinformatie beschikbaar is. Als toelichting bij regel 2 beschrijft paragraaf A.3 hoe de gezochte informatie in het juiste uitvoerbestand wordt gevonden.

A.2 Mappen en bestanden

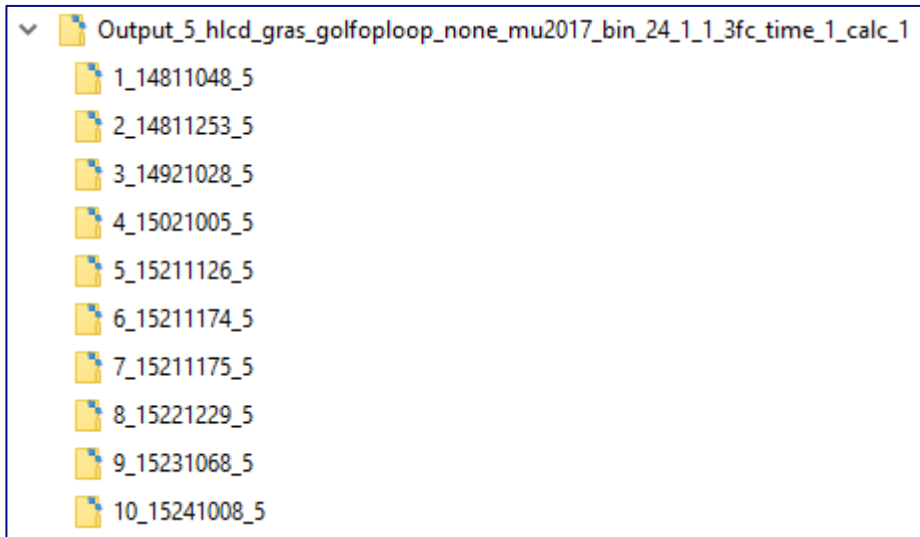
Onderstaande figuur toont de beschikbare map en bestanden op het hoogste niveau:



De data staan in een submap per locatie in de map

Output_5_hlcd_gras_golfoploop_none_mu2017_bin_24_1_1_3fc_time_1_calc_1\

Deze map bevat 228 submappen. Onderstaande figuur toont de bovenste 10 submappen.



De naam van elke submap is opgebouwd als:
<testcasenr>_<LocatieID>_5

Iedere map bevat meerdere bestanden met informatie over de berekening. De gezochte info staat in project output (PO) databases, met als generiek pad\bestandsnaam:

\\<testcasenr>_<LocatieID>_5\<LocatieID>-output.sqlite

De nummers zijn te herleiden tot een combinatie van {locatie, traject, HRD database, etc} in het bestand (op het hoogste niveau):

Testlocaties.xlsx

A.3 De gezochte informatie halen uit een PO database

De opbouw van de PO database staat (kort) beschreven in paragraaf 4.7 van het document (op het hoogste niveau)

\\11209269-008-GEO-0003-Technical Design of Hydra-Ring 23.1.1 - signed.pdf

De gezochte informatie staat in de PO database in de tabel

DesignPointResults,

specifiek in het veld

DesignPointResults.Value

Hieronder bepalen we de relevante records in deze tabel. Hiertoe moeten we de waarden specificeren van:

- OutputVariableId
- SubmechanismId
- OuterIterationId
- PeriodId
- ClosingSituationId
- WindDirectionId

Golfsteilheid, afgeleid uit golfhoogte en periode

We kijken naar golfsteilheid, te bepalen uit de combinatie van significante golfhoogte en spectrale golfperiode. De betreffende waarden van **OutputVariableId** kunnen we vinden in de tabel **OutputVariables**:

OutputVariableId = 3 voor de significante golfhoogte

OutputVariableId = 7 voor de spectrale golfperiode

Submechanisme overslag

We kijken naar submechanisme overslag. De betreffende waarde van **SubmechanismId** kunnen we vinden in de tabel **Submechanisms**:

SubmechanismId = 102

Eindresultaat van iteratieve berekening

We kijken naar de resultaten bij de laatste iteratiestap. De betreffende waarde van **OuterIterationId** kunnen we vinden als de grootste waarde van **OuterIterationId** in de tabel **IterateToGivenBetaConvergence**:

OuterIterationId = MAX{IterateToGivenBetaConvergence.OuterIterationId}

Verder kijken we naar de resultaten bij de kleinste waarde van **PeriodId**:

PeriodId = MIN{DesignPointResults.PeriodId}

Achtergrond: Vaak heeft **PeriodId** maar één waarde. Maar als in een berekening sprake is van meerdere waarden voor **PeriodId**, dan betreft de kleinste waarde een lamel in de top van de trapeziumvorm voor de trage stochast. Die lamel draagt waarschijnlijk het meest bij, dus is voor onze analyse het meest relevant.

Windrichting en keringtoestand

We bekijken alleen de meest bijdragende windrichting en de keringtoestand waarbij deze meest bijdragende windrichting is gevonden. De betreffende waarde van **WindDirectionId** respectievelijk **ClosingSituationId** kunnen we vinden in de tabel **GoverningWind**, bij de eerder bepaalde waarde van **OuterIterationId** en **PeriodId**.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl