

Golfsteilheid in Deltares golffaciliteiten

Jaarrapport 2025



Golfsteilheid in Deltares golffaciliteiten

Jaarrapport 2025

Auteur(s)

mevrouw ir. V. Hengelmolen

de heer ir. J.P. de Waal

Golfsteilheid in Deltares golffaciliteiten

Jaarrapport 2025

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Marcel Bottema
Referenties	SITO-PS 2025 WVH02 - Versterking onderzoek waterveiligheid
Trefwoorden	Golfsteilheid, golfgoten, golffaciliteiten, golfopwekking

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	26-01-2026
Projectnummer	11211566-010
Document ID	11211566-010-ZWS-0001
Pagina's	29
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

	Vera Hengelmolen	
	Hans de Waal	

Samenvatting

In aanvulling op de eerdere studies naar golfsteilheid in de Deltares-golfgoten is in 2025 een literatuuronderzoek uitgevoerd naar gerealiseerde hoge golfsteilheden in golffaciliteiten elders in de wereld. Doel hiervan was om beter te begrijpen welke golfsteilheden in andere laboratoria haalbaar zijn, onder welke omstandigheden, en welke fysische processen daarbij bepalend zijn. Dit levert inzichten op voor het duiden van de beperkingen in de huidige Deltares-faciliteiten en voor het bepalen van mogelijke oplossingsrichtingen.

In de literatuurstudie is enerzijds gekeken naar de spectrale evolutie zonder wind, en anderzijds naar metingen in wind-golfgoten om de invloed van wind op de haalbare golfsteilheid te bepalen.

De volgende aanbevelingen zijn geformuleerd voor fysisch modelonderzoek:

- Beoordeel kritisch of de gevraagde golfsteilheid realistisch is.
- Een hoge gevraagde steilheid kan duiden op 'jonge golven' en daarmee op een belangrijke rol van wind; onderzoek daarom of een modelopzet zonder wind wel representatief is voor de te beschouwen fenomenen.
- Indien nodig en mogelijk: plaats de met golven te belasten constructie relatief dicht bij het golfschot.

Voor ontwikkeling van kennis en tools:

- Verbeter SWAN op het gebied van de (soms te hoog berekende) golfsteilheid.
- Verwerf 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.
- De huidige studie bevestigt vooral eerder opgedane inzichten; verdere ontwikkeling van kennis en tools past beter in andere SITO-projecten dan binnen het huidige VOW-kader.
- Bij verdere kennisontwikkeling en praktische vragen rond de haalbaarheid van hoge golfsteilheid in de Deltares faciliteiten wordt aanbevolen eerder uitgevoerde studies te blijven raadplegen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
2	Basisbegrippen	7
2.1	Golfsteilheid	7
2.2	Spectrale vormen	7
2.3	Effect van wind op golfspectra	8
3	Literatuurstudie golfsteilheid in (wind-) golf faciliteiten	9
3.1	Inleiding	9
3.2	Spectrale evolutie in golfgoten, met afstand tot het golfschot	9
3.2.1	Overzicht opgenomen literatuur	9
3.2.2	Voorgaand werk Deltares (2024a, 2024b)	10
3.2.3	Petrova et al. (2023)	11
3.2.4	Cao et al. (2023)	14
3.2.5	Petrova and Soares (2014)	15
3.2.6	Vergelijking tussen Petrova et al. (2023) en Deltares (2024b)	16
3.2.7	Synthese	19
3.3	Invloed van wind op het golfspectrum in een wind-golfgoot	20
3.3.1	Overzicht opgenomen literatuur	20
3.3.2	Zhang et al. (2024)	20
3.3.3	Lee and Monty (2019)	21
3.3.4	Vergelijking met JONSWAP (Hasselmann et al. 1973)	23
3.3.5	Synthese	24
3.4	Conclusie en praktische aanbevelingen	24
4	Terugblik en aanbevelingen	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Bevindingen	25
4.3	Aanbevelingen	26
	Referenties	28

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.

Aanpak

Diverse aspecten van het probleem zijn in voorgaande studies belicht, met name in (Deltares, 2020), (Rijkwaterstaat WVL, 2022), (Deltares, 2024a) en (Deltares, 2024b). Op hoofdlijnen is hierbij gekeken naar:

- Waarnemingen van hoge golfsteilheid in de natuur
- Het bereik en realiteitsgehalte van de gevraagde golfsteilheid in fysisch modelonderzoek
- De haalbare golfsteilheid in fysisch modelonderzoek bij Deltares

Onderhavige studie sluit hier op aan, door te kijken naar:

- Gerealiseerde hoge golfsteilheden in golffaciliteiten buiten Deltares, via literatuur.

Doel

Het doel van bovengenoemde analyses is het verkrijgen cq 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 de golffaciliteiten van Deltares.

Doelgroep

De doelgroep van dit document bestaat primair uit betrokkenen bij RWS en Deltares bij het benutten van de Deltares golffaciliteiten 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 2025
thematafel: 'Waterveiligheid' (WVH)
project: 'Versterking Onderzoek Waterveiligheid' (VOW),
deelproject: 'Golfsteilheid golffaciliteiten Deltares'

Totstandkoming document

De studie in 2025 is grotendeels uitgevoerd Vera Hengelmolen, met hulp van Hans de Waal. De review is uitgevoerd door Jacco Groeneweg.

Opbouw document

Dit document is als volgt opgebouwd. Eerst worden in Hoofdstuk 2 enkele basisbegrippen herhaald. In Hoofdstuk 3 volgt een verslag van een literatuurstudie en aanvullende analyses naar gerealiseerde hoge golfsteilheden in golffaciliteiten buiten Deltares. Hoofdstuk 4 geeft terugblik op de reeks uitgevoerde studies en bevat de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

2 Basisbegrippen

2.1 Golfsteilheid

Golfsteilheid wordt op verschillende manieren gedefinieerd. Voor een set onregelmatige golven wordt meestal de verhouding tussen de significante golfhoogte H_{m0} en een golflengte gebruikt. Wanneer de piekperiode wordt gebruikt om de golflengte L_p te bepalen, leidt dit tot de definitie van een golfsteilheid s_p . Als alternatief wordt de spectrale lengte $L_{m-1,0}$ gebruikt die gebaseerd is op de spectrale periode $T_{m-1,0}$, wat golfsteilheid s_m oplevert. De golfsteilheid s_p en s_m zijn als volgt gedefinieerd:

$$s_p = H_{m0}/L_p$$
$$s_m = H_{m0}/L_{m-1,0}$$

De golfsteilheid s_m is gevoeliger voor het frequentiebereik waarover het spectrum beschikbaar is. Vaak wordt gebruik gemaakt van de diep-water golflengte, wat resulteert in een golfsteilheid $s_{0,p}$ en $s_{0,m}$, met T_p en $T_{m-1,0}$ respectievelijk de piek- en spectrale periode, en g de zwaartekrachtversnelling.

$$s_{0,p} = \frac{H_{m0}}{L_{0,p}} = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{H_{m0}}{T_p^2}$$
$$s_{0,m} = \frac{H_{m0}}{L_{0,m-1,0}} = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{H_{m0}}{T_{m-1,0}^2}$$

Daar tegenover staat de individuele golfsteilheid s , die wordt berekend voor afzonderlijke golven aan de hand van de individuele hoogte H en de individuele golflengte λ . Deze maat is vooral relevant bij het analyseren van extreme golven. Individuele steilheden kunnen aanzienlijk hoger zijn dan gemiddelde spectrale steilheid. Het onderscheid tussen de twee benaderingen is belangrijk bij het interpreteren van experimentele resultaten. Spectrale steilheid geeft inzicht in algemene golfcondities, individuele steilheid geeft inzicht in lokale piekbelastingen en breking.

$$s = H/\lambda$$

Daarnaast hanteren vele studies een golfsteilheidsmaat van het type ka waarbij a een maat is voor de golfamplitude en k het golfgetal. De amplitude a kan op verschillende manieren worden gedefinieerd, bijvoorbeeld afgeleid van de significante golfhoogte of impliciet via spectrale grootheden. Deze spectrale definities zijn niet altijd eenduidig te herleiden tot afzonderlijke spectrale momenten, waardoor de onderlinge vergelijking van verschillende golfsteilheidsmaten soms complex is.

Dit rapport richt zich op de spectrale golfsteilheid $s_{0,p}$ en $s_{0,m}$.

2.2 Spectrale vormen

Het golfspectrum beschrijft hoe energie van een golfveld verdeeld is over frequenties. Vaak wordt gebruik gemaakt van gestandaardiseerde spectrale vormen zowel het Pierson-Moskowitz (PM) en het JONSWAP-spectrum.

Het PM-spectrum (Pierson & Moskowitz, 1964) is gebaseerd op metingen van volledig ontwikkelde zeeën onder constante windcondities. Het PM-spectrum wordt gekarakteriseerd door een smalle piek rond de piekfrequentie.

$$S_{PM}(f) = \frac{\alpha g^2}{16\pi^4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right)$$

Met α de schaalfactor en f_p de piekfrequentie.

Het JONSWAP-spectrum (Joint North Sea Wave Project, Hasselman et al., 1973) is een uitbreiding van het PM-spectrum en introduceert de versterkingsfactor γ die de piek van het spectrum verscherpt. Het JONSWAP-spectrum is typisch voor golfvelden die nog in ontwikkelingsfase zijn.

$$S_{JONSWAP}(f) = \frac{\alpha g^2}{16\pi^4} f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \gamma^b$$

Met α de schaalfactor en b en σ als volgt gedefinieerd:

$$b = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{f}{f_p} - 1\right)^2\right)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_1 = 0.07 & \text{voor } f \leq f_p \\ \sigma_2 = 0.09 & \text{voor } f > f_p \end{cases}$$

2.3 Effect van wind op golfspectra

Wind is de primaire kracht achter het ontstaan van golven. Door druk en wrijving op het wateroppervlak uit te oefenen, vormt wind energietoevoer aan de golven. Een aantal belangrijke factoren zijn de windsterkte, de duur van de wind en de fetch, oftewel de afstand waarover de wind ononderbroken over het water strijkt (strijklengte).

Het PM spectrum is empirisch afgeleid op basis van metingen van een volledig ontwikkelde zee, waarbij de golven in evenwicht zijn met de wind. Dit geldt dus voor situaties waarin de wind langdurig en constant is over een grote fetch. Het JONSWAP-spectrum houdt rekening met een beperkte fetch en geldt voor niet-volledige ontwikkelde zeeën.

3 Literatuurstudie golfsteilheid in (wind-) golffaciliteiten

3.1 Inleiding

Vraagstelling

In eerdere studies zijn diverse aspecten van het probleem onderzocht. Deze onderzoeken richtten zich op de realiteitsgehalte van de gevraagde golfsteilheden en op de haalbare golfsteilheden in modelonderzoek bij Deltares. De huidige studie sluit hierop aan door te analyseren welke hoge golfsteilheden in andere golffaciliteiten buiten Deltares zijn gerealiseerd op basis van een literatuuronderzoek. Het literatuuronderzoek richtte zich aanvankelijk specifiek op metingen in wind-golfgoten en beoogde antwoord te geven op de volgende vragen:

- Welke golfsteilheden worden gemeten en welke omstandigheden horen bij welke (met name de hogere) golfsteilheden?
- Hoe ziet het golfspectrum er uit en hoe verhoudt dit zich tot de gemeten spectra in eerdere VOW-studies?
- Zijn er metingen beschikbaar voor condities waarbij de wind wegvalt?

Uitwerking

Tijdens het literatuuronderzoek bleek dat er slechts beperkt bruikbare gegevens beschikbaar zijn over combinaties van golven en wind. Ook zijn er geen metingen gevonden waarbij de wind wegvalt. Om toch een beter beeld te krijgen van relevante invloeden, is aanvullend gekeken naar de afstand tot het golfschot en hoe deze factor in eerdere studies wordt beschreven, ook in fysisch modelonderzoek zonder wind.

Het hoofdstuk is opgebouwd uit drie paragrafen. Paragraaf 3.2 bespreekt hoe het golfspectrum van opgewekte steile golven zich ontwikkelt naarmate de afstand tot het golfschot toeneemt. Paragraaf 3.3 analyseert beschikbare metingen in wind-golfgoten en beschrijft de invloed van wind op het golfspectrum. Paragraaf 3.4 vat de belangrijkste bevindingen samen en geeft richtlijnen voor toepassing in vervolgonderzoek en praktijk.

3.2 Spectrale evolutie in golfgoten, met afstand tot het golfschot

3.2.1 Overzicht opgenomen literatuur

Het literatuuronderzoek naar de spectrale evolutie van golven over de lengte van een golfgoot heeft geleid tot enkele relevante referenties. De zoektocht richtte zich primair op studies waarin zo steil mogelijke golfspectra zijn gerealiseerd (bij voorkeur in de orde grootte van de golfsteilheden die in Deltares (2023, 2024) zijn gemeten). Daarbij is specifiek gekeken naar metingen op verschillende posities in een golfgoot, om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van het spectrum. In deze paragraaf zijn, naast een samenvatting van eerder werk van Deltares, drie artikelen opgenomen:

1. **Petrova et al. (2023)**. *Non-Gaussian Statistics of Mechanically Generated Unidirectional Irregular Waves*. *Journal of Marine Science and Application* (2023) 22: 25-43
2. **Cao et al. (2023)**. *The influence of bandwidth on the energetics of intermediate to deep water laboratory breaking waves*. *J. Fluid Mech.* (2023), vol. 971, A11, doi:10.1017/jfm.2023.645
3. **Petrova and Soares (2014)**. *Distributions of nonlinear wave amplitudes and heights*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1207–1222, 2014.

Hoewel deze studies geen gezamenlijk onderzoeksdoel delen met de huidige analyse, zijn de gerapporteerde meetresultaten wél relevant binnen de context van deze literatuurstudie. De bevindingen uit deze publicaties vormen een belangrijke basis voor de analyses in de volgende secties.

3.2.2 Voorgaand werk Deltares (2024a, 2024b)

In Deltares (2024a) is onderzocht waarom hoge steilheden niet realiseerbaar zijn in de golffaciliteiten. Ten eerste is onderzocht wat een realistische golfsteilheid is volgens de literatuur. Op basis van 4 bronnen waarin veldmetingen gerapporteerd worden, ligt de maximale golfsteilheid $s_{0,m}$ tussen de 0,06 en 0,08. De extreme golfsteilheid van 0,08 komt alleen voor bij locaties met een korte strijklengte, terwijl op de Noordzee de maximale golfsteilheid ongeveer 0,06 is. De golfspectra gemeten op de Noordzee kwamen overeen met de JONSWAP vorm.

Hoewel korte strijklengtes niet representatief zijn voor de open kust, zijn dergelijke omstandigheden wel degelijk relevant in andere Nederlandse locaties, zoals dieper in estuaria, in randmeren en in brede riviertrajecten. Windgolven met relatief hoge steilheden zijn daarmee wel degelijk relevant voor de golfbelasting in het kader van waterveiligheid.

Ten tweede is in Deltares (2024a) gekeken naar wat de maximale golfsteilheid is in de faciliteiten, door fysieke model testen in diepwater condities uit te voeren in de Scheldegoot en het Deltabasin. In beide faciliteiten is een maximale golfsteilheid $s_{0,m}$ van 0,067 bereikt. Tabel 3-1 en Tabel 3-2 geven de golfcondities van het proevenprogramma en de gemeten golfsteilheid weer. Streven naar hogere steilheden levert niet het gewenste resultaat en leidt tot een verandering in het golfspectrum: in de staart van het spectrum blijft er relatief weinig energie over. Dit is al te merken bij de uitgevoerde testen, zie ter illustratie Figuur 3-1 en Figuur 3-2 waarin zowel het gemeten spectrum als het JONSWAP-spectrum volgens de doelwaardes van test *SL70901a* en *SL70902* wordt getoond. Merk daarnaast op dat de metingen op korte afstand van het golfschot hebben plaatsgevonden, namelijk op ongeveer 3 golflengtes afstand van de golfmaker. Mogelijk dissipeert de energie met afstand tot het golfschot en wordt de gemeten golfsteilheid verderop in de golfgoot niet bereikt.

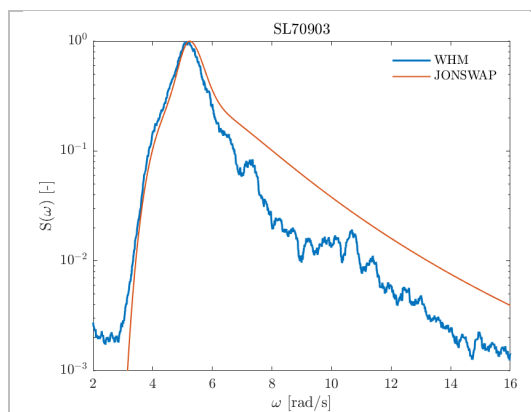
In een vervolgonderzoek (Deltares, 2024b) zijn vervolgens aanvullende analyses gedaan, om onder andere de invloed van de afstand tot het golfschot op de golfsteilheid in kaart te brengen. Hiervoor is een test uit het testprogramma van Deltares (2024a), namelijk test *SL70903* uit Tabel 3-1, opnieuw uitgevoerd in de Scheldegoot met verschillende potmeterstanden (waarmee de testen als het ware opgevoerd worden), terwijl dit keer op 10 locaties langs de gootlengte de oppervlakteuitwijking werd gemeten. Hieruit bleek dat de golfsteilheid inderdaad geleidelijk afneemt met toenemende afstand tot het golfschot, zoals in Figuur 3-3 te zien is.

Tabel 3-1 JONSWAP golfparameters van de testen uitgevoerd in de Scheldegoot in Deltares (2024a)

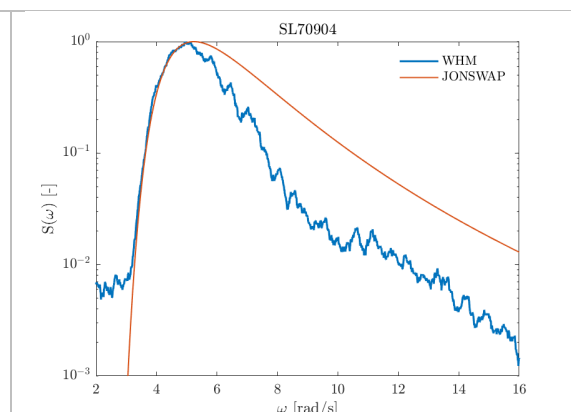
Test ID	H_s (doelwaarde) [m]	T_p (doelwaarde) [s]	γ (doelwaarde)	$s_{0,p}$ (gemeten)	$s_{0,m}$ (gemeten)
SL70901a	0,17	1,3	3,3	0,055	0,059
SL70902	0,17	1,3	1	0,056	0,056
SL70903	0,19	1,2	3,3	0,065	0,067
SL70904	0,19	1,2	1	0,051	0,061
SL70905	0,12	1,3	3,3	0,042	0,047
SL70906	0,05	1,3	3,3	0,018	0,022

Tabel 3-2 JONSWAP golfparameters van de testen uitgevoerd in het Deltabasin in Deltares (2024a)

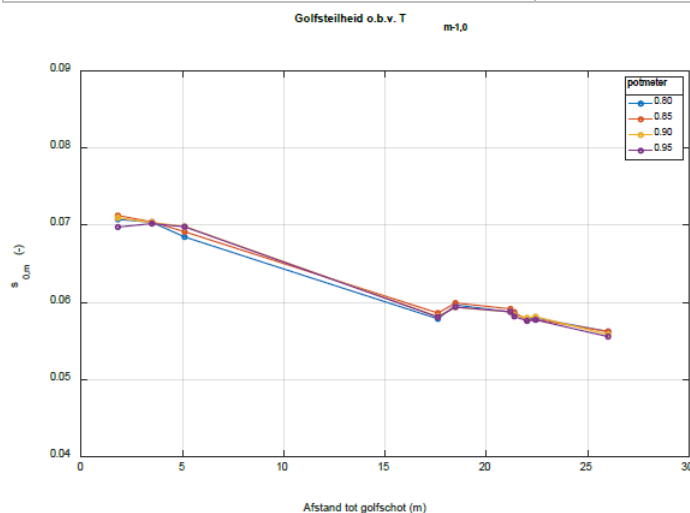
Test ID	Golfrichtings-spreiding [°]	H_s [m] (doelwaarde)	T_p [s] (doelwaarde)	γ (doelwaarde)	$s_{0,p}$ (gemeten)	$s_{0,m}$ (gemeten)
L80901c	0	0,17	1,4	3,3	0,063	0,064
L80902b	0	0,17	1,4	1	0,050	0,054
L80903	0	0,19	1,2	3,3	0,064	0,066
L80904	0	0,12	1,3	3,3	0,048	0,048
S80901b	70	0,17	1,4	3,3	0,060	0,065
S80902b	70	0,17	1,4	1	0,054	0,062
S80903	70	0,19	1,2	3,3	0,064	0,066
S80904b	70	0,12	1,3	3,3	0,040	0,046



Figuur 3-1 Golfspectrum zoals gemeten tijdens SL70903 (Deltares, 2024a) en het JONSWAP-spectrum op basis van de doelwaardes voor de golfparameters



Figuur 3-2 Golfspectrum zoals gemeten tijdens SL70904 (Deltares, 2024a) en het JONSWAP-spectrum op basis van de doelwaardes voor de golfparameters



Figuur 3-3 Golfsteilheid $s_{0,m}$ als functie van de afstand tot het golfschot voor SL70903 in Deltares (2024b)

3.2.3 Petrova et al. (2023)

Petrova et al. (2023) onderzoeken niet-Gaussische statistiek van unidirectionele golven opgewekt in een golffaciliteit zonder wind, en focust op de rol van initiële steilheid en spectrale

gepiektheid in het ontstaan van extreem hoge golven. Het artikel laat zien dat de spectra tijdens de voortplanting van de golven veranderen: ze verbreden, de piek verschuift naar lagere frequenties, en zowel de piekhoogte als het hoogfrequente deel nemen af. Daarnaast tonen Petrova et al. (2023) aan dat derde-orde niet-lineariteit toeneemt met afstand, wat kan leiden tot extreem hoge golven.

In het experiment van Petrova et al. (2023) zijn zes JONSWAP-spectra gegenereerd met een piekperiode van $T_p = 1,0$ s en een piekversterkingsfactor γ van 3 en 6. Tabel 3-3 toont de doelwaardes van het testprogramma. De significante golfhoogte varieert tussen 0,035 m en 0,090 m, wat overeenkomt met een initiële spectrale golfsteilheid $s_{0,p}$ tussen de 0,022 en 0,057 in drie stappen. De steilste condities komen dus in de buurt van de testen in die Deltares (2023, 2024) zijn gerapporteerd.

Tabel 3-3 JONSWAP doelwaardes van de testen gerapporteerd in Petrova et al. (2023)

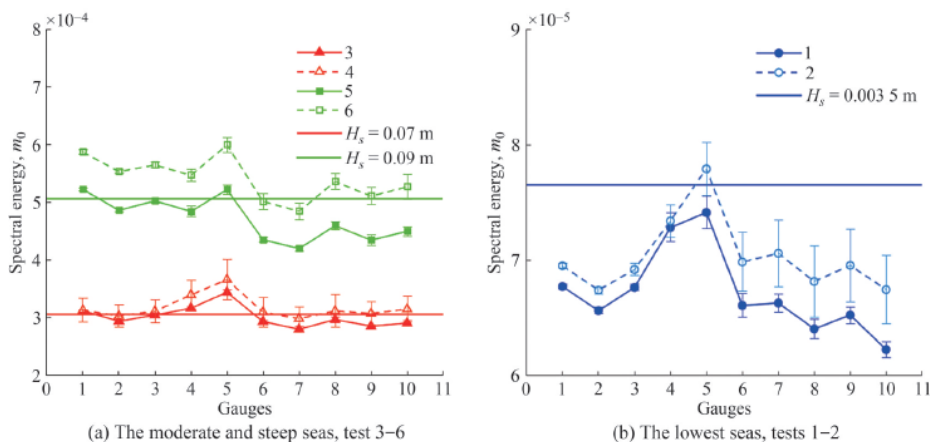
Test ID	H_s	T_p	γ	$s_{0,p}$
1	0,035	1,0	3	0,022
2	0,035	1,0	6	0,022
3	0,070	1,0	3	0,045
4	0,070	1,0	6	0,045
5	0,090	1,0	3	0,057
6	0,090	1,0	6	0,057

Figuur 3-4 is overgenomen uit Petrova et al. (2023) en toont de spectrale energie als functie van het golfhoogtemeternummer (dat oploopt met de afstand tot het golfschot). Uit dit figuur blijkt dat de totale golfenergie in de eerste helft van de golfgoot nog toeneemt. Dit laat zien dat het golfveld zich nog aan het ontwikkelen is. Pas vanaf golfhoogtemeter 5 begint dissipatie een rol te spelen en neemt de totale golfenergie af. Mogelijk begint golfbreking pas voor te komen na golfhoogtemeter 5. Petrova et al. verklaren dat dit effect minder zichtbaar is bij de hogere zeegangen (tests 5 en 6, zie Tabel 3-3 voor een overzicht van de bijbehorende condities), omdat de grotere energie-invoer van de golfmaker ervoor zorgt dat de golven eerder al ontwikkeld zijn. Merk op dat de ruimtelijke verdeling van de golfhoogtemeters niet uniform is over de lengte van de goot. Tot en met golfhoogtemeter 3 is de afstand telkens 2,5 m, terwijl tussen golfhoogtemeter 3 en 4 een aanzienlijk grotere afstand van ongeveer 15 m aanwezig is. Vervolgens is de afstand tussen golfhoogtemeter 4 en 10 weer 2,5 m.

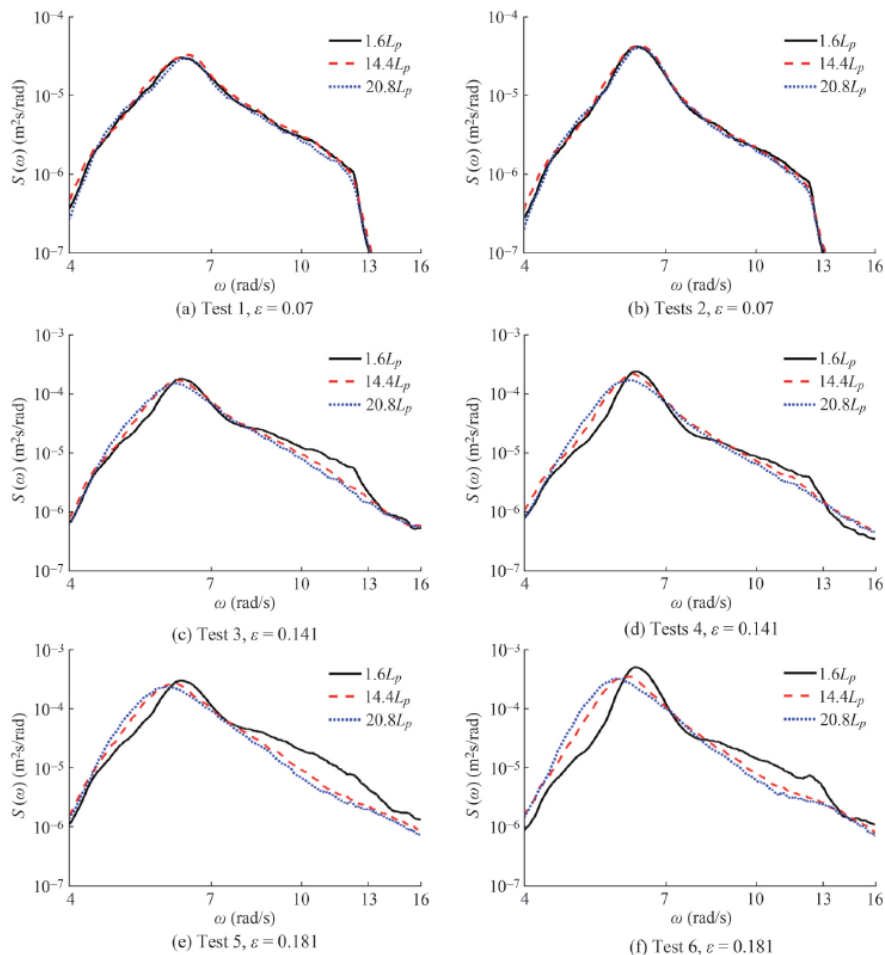
In Figuur 3-5, ook overgenomen uit het oorspronkelijk artikel, wordt het golfspectrum vergeleken op drie locaties, namelijk op 1,6, 14,4 en 20,8 golflengtes van het golfschot. Bij de laagste steilheid blijft het spectrum vrijwel onveranderd met de afstand. Bij hogere steilheden verandert het spectrum en is er een duidelijke afname van energie in de hoogfrequente flank te zien, naast een toename van energie in de lagere frequenties ($f < f_p$). Dit duidt volgens de auteurs op 'modulatie-instabiliteit' (Benjamin-Feir-instabiliteit), een niet-lineair mechanisme waarbij een kleine verstoring groeit door interacties tussen de golven, en daarmee kan leiden tot het ontstaan van extreem hoge golven (waar Petrova et al. onderzoek naar doet). Hierdoor verschuift energie binnen het spectrum, wat leidt tot een downshift van de piekfrequentie en een bredere spectrale verdeling. De gevoeligheid van een golfveld voor modulatie-instabiliteit wordt aangegeven door de Benjamin-Feir Index (BFI), gelijk aan de ratio tussen de steilheid en de spectrale breedte van het spectrum (omgekeerd evenredig met γ). Bij $BFI > 1$ (dus hoge steilheid, hoge γ), is het golfveld gevoeliger voor modulatie-instabiliteit, wat zich vertaalt in een grotere niet-lineariteit en verhoogde kans op extreme golven. Modulatie-instabiliteit zelf verlaagt de golfsteilheid niet, maar kan via versterkte golfconcentratie breking bevorderen, waardoor energie verloren gaat en de uiteindelijke steilheid in de praktijk lager uitvalt dan

beoogd. Dit verklaart mede waarom in golf faciliteiten de gewenste hoge steilheden binnen JONSWAP-spectra niet altijd worden bereikt.

Figuur 3-5 laat zien dat de spectrale breedte met name toeneemt over afstand bij hogere initiële steilheden en γ -waarden. Ook de piekfrequentie verschuiving is het grootst bij de steilste golven, waar de piekfrequentie van 6.28 rad/s naar 6.01 rad/s daalt binnen 14.4 golf lengtes.



Figuur 3-4 Ontwikkeling van de spectrale energie m_0 met afstand tot het golf schot. Overgenomen uit Petrova et al. (2024). De legenda komt overeen met de test ID's uit Tabel 3-3.



Figuur 3-5 Ontwikkeling van de golfspectra, op drie afstanden van het golf schot (in veelvouden van de golf lengte L_p , overgenomen uit Petrova et al. (2024). Van boven naar beneden neemt de opgewekte golfsteilheid toe, en van links naar rechts neemt de opgewekte spectrale gepiektheid toe, zie ook Tabel 3-3.

3.2.4 Cao et al. (2023)

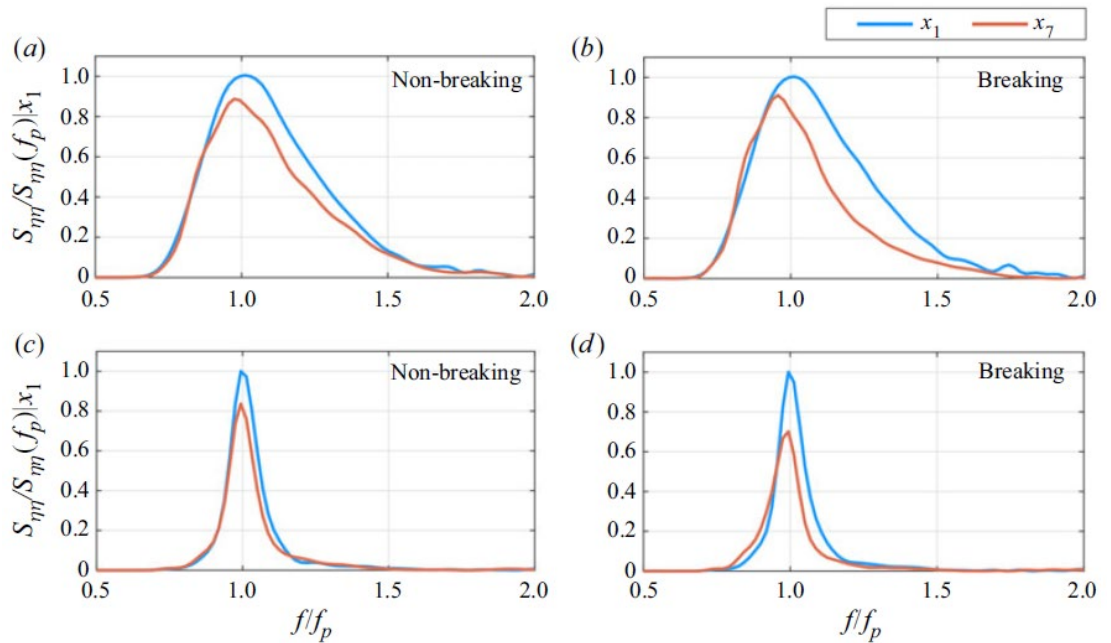
Cao et al. (2023) onderzochten de invloed van de bandbreedte van het golfspectrum op golfbreking, inclusief spectrale energie-evolutie, groepssnelheid en energieverlies. De relevantie voor deze literatuurstudie ligt in de gepresenteerde metingen van golfspectra op verschillende afstanden van het golfschot, die inzicht geven in de ontwikkeling van het spectrum langs de goot.

Het proevenprogramma van Cao et al. varieert de spectrale bandbreedte door verschillende γ -waarden (van 1 tot en met 4) toe te passen op JONSWAP-spectra met een piekperiode van $T_p = 1,2$ s. Een lagere γ -waarde resulteert in een bredere spectrale verdeling. De spectrale metingen vonden plaats op locaties tussen 2 tot 12 golflengtes afstand van het golfschot.

Cao et al. laten zien dat bredere spectra leiden tot golfbreking bij lagere steilheden. Daarnaast wordt vastgesteld dat het energieverlies door breking niet uniform over het spectrum plaatsvindt. Energieverlies treedt op bij frequenties boven $0,95f_p$, terwijl juist energie wordt toegevoegd bij de lagere frequenties. Dit is te zien in Figuur 3-6, waar de golfspectra zoals op twee locaties gemeten zijn geplot, in het blauw op 1,1 keer de golflengte afstand van het golfschot en in het rood op 6,4 golflengtes afstand van het golfschot. De verandering in het golfspectrum wijst op een niet-lineaire energieoverdracht van hoge naar lage frequenties. Ook vindt er een verschuiving van de piekfrequentie plaats naar een lagere waarde.

In tegenstelling tot Petrova et al. (2023) en Deltares (2024b) waar JONSWAP-spectra worden gegenereerd, gebruiken Cao et al. dispersieve focussing om individuele brekende golven te produceren. Sinusvormige componenten met verschillende fases en frequenties worden zo gecombineerd om op een bepaald punt samen te komen. Daarmee gebruikt Cao et al. ook een andere definitie voor de golfsteilheid, namelijk de groepssteilheid in plaats van de spectrale golfsteilheid. Ze hanteren drie verschillende definities, namelijk $S_n = \sum a_i k_i$, $S_s = k_s \sum a_i$ en $S_p = k_p \sum a_i$. Dit wijkt af van Petrova et al. (2023) en Deltares (2024b), daarom is het lastig om de steilheden met elkaar te vergelijken. Desondanks kan geconcludeerd worden dat de observaties van Cao et al. over de ontwikkeling van de golfspectra over de afstand van de goot overeenkomen met die van Petrova et al. (2024), met een verschuiving van de piekfrequentie naar lagere waarden en een herverdeling van energie van hoogfrequente naar laagfrequente componenten.

Het werk van Cao et al. richt zich op de vergelijking tussen smal- en breedbandige spectra en de implicaties hiervan op de golfkarakteristieken. In het IJsselmeer zijn bij jonge golven (strijk lengtes kleiner dan 2 km in combinatie met windsnelheden hoger dan 20 m/s) relatief hoge steilheden waargenomen. Het is goed mogelijk dat onder die omstandigheden ook de spectra vaak relatief smal zijn, in lijn met de bevinding van Cao et al.. Een vergelijking van metingen op het IJsselmeer met de resultaten van Cao et al. zou waardevolle inzichten kunnen opleveren.



Figuur 3-6 Genormaliseerde golfspectra overgenomen uit Cao et al. (2024). (a) $\gamma = 1, A = 0,069m$, niet brekend; (b) $\gamma = 1, A = 0,088m$, brekend; (c) $\gamma = 4, A = 0,082m$, niet brekend; (d) $\gamma = 4, A = 0,115m$, brekend.

3.2.5 Petrova and Soares (2014)

Petrova & Soares (2014) analyseren niet-lineaire golfkarakteristieken (toppen, dalen en hoogten) in diep-water golven voor dubbeltoppige golfspectra. De resultaten tonen een bandbreedte-afhankelijke evolutie van het spectrum met piekafname, downshift en afname van de hoogfrequente flank, en toenemende derde-orde niet-lineariteit met afstand tot het golfschot.

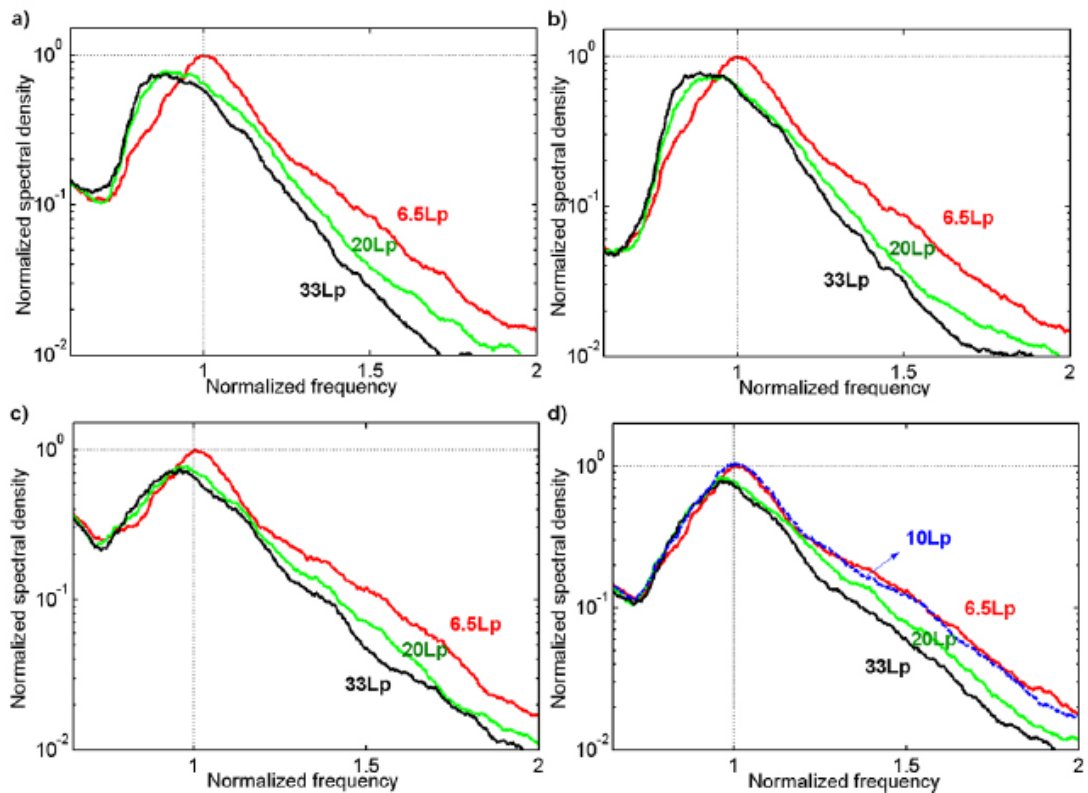
De golfspectra die door Petrova & Soares zijn getest bestaan uit de superpositie van twee enkeltoppige JONSWAP-spectra, mechanisch opgewekt in een golfbassin. Hiermee representeren de dubbeltoppige spectra een combinatie van zeegang en deining, waarbij de bijbehorende golfparameters zijn verschaald naar modelschaal. Twee verschillende situaties zijn getest, één waarbij beide enkeltoppige spectra zich in dezelfde richting voortplanten, de ander waarbij ze zich onder een hoek ten opzichte van elkaar voortplanten. Tabel 3-4 toont de doelwaardes van de vier gerapporteerde testen. De golfsteilheden van de hoogfrequente component uit Petrova & Soares (2014) zijn vergelijkbaar met de golfsteilheden van Deltares (2024b) en Petrova et al. (2023).

Tabel 3-4 JONSWAP doelwaardes van de testen gerapporteerd in Petrova & Soares. (2014)

Test ID	$H_{s,1}$	$T_{p,1}$	$H_{s,2}$	$T_{p,2}$	$s_{0,p1}$	$s_{0,p2}$
8228	4,6	7	2,3	14	0,06	0,008
8229	4,6	7	2,3	20	0,06	0,004
8230	3,6	7	3,6	14	0,047	0,011
8231	3,6	7	3,6	20	0,047	0,006

Petrova & Soares meten de golfspectra op verschillende afstanden van het golfschot, namelijk op 6,5, 20 en 33 golflengtes. Net zoals in Petrova et al. (2023) wordt modulatie-instabiliteit geobserveerd, met de bijbehorende veranderingen in het spectrum, namelijk: een verbreding van het spectrum met een verschuiving van de piekfrequentie naar lagere waarden en energieverlies in het hoogfrequente flank. Deze veranderingen nemen toe met afstand van het

golfschot, zoals te zien in Figuur 3-7. Dit figuur toont de resultaten van Petrova & Soares (2014), voor dubbeltoppige spectra waarvan beide JONSWAP-componenten zich in dezelfde richting voortplanten. Het figuur toont alleen de hoogfrequente component. De steilere condities 8228 en 8229 (panel a en b) zorgen voor een sterkere verandering ten opzichte van de minder steile condities (panel c en d). Bij kruisende zeeën zijn de spectrale veranderingen sterker.



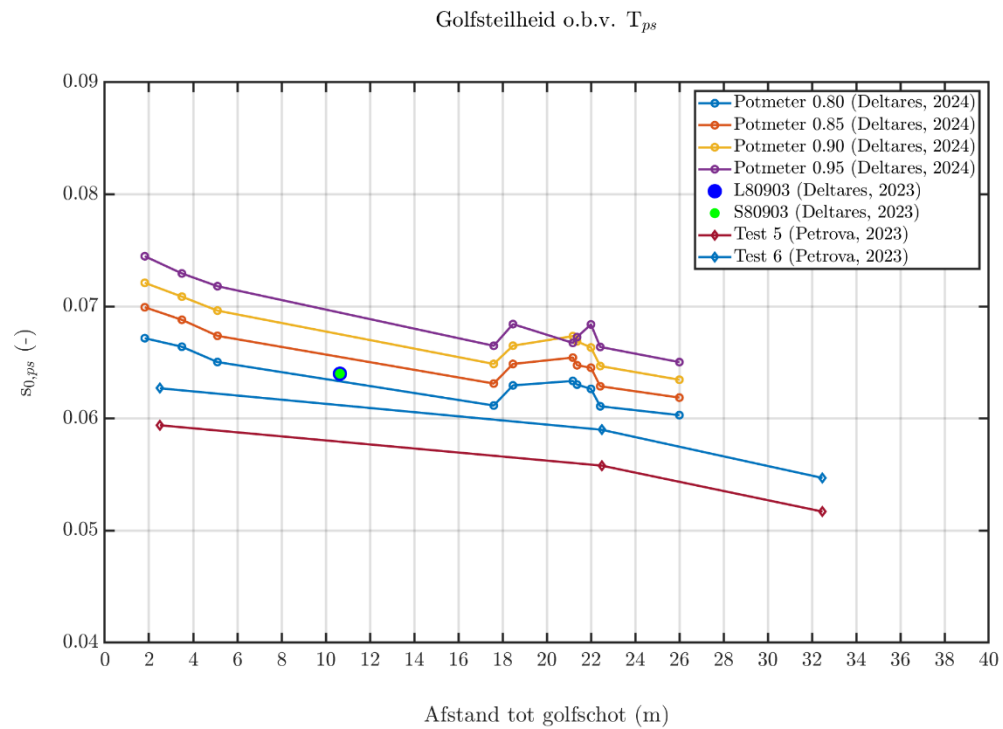
Figuur 3-7 Ontwikkeling van de hoogfrequente componenten van dubbeltoppige spectra, gemeten op verschillende afstanden van het golfschot (als functie van de golflengte geassocieerd met de piekfrequentie). Overgenomen uit Petrova & Soares (2014). (a) test 8228, (b) test 8229, (c) test 8230 (d) 8231.

3.2.6

Vergelijking tussen Petrova et al. (2023) en Deltares (2024b)

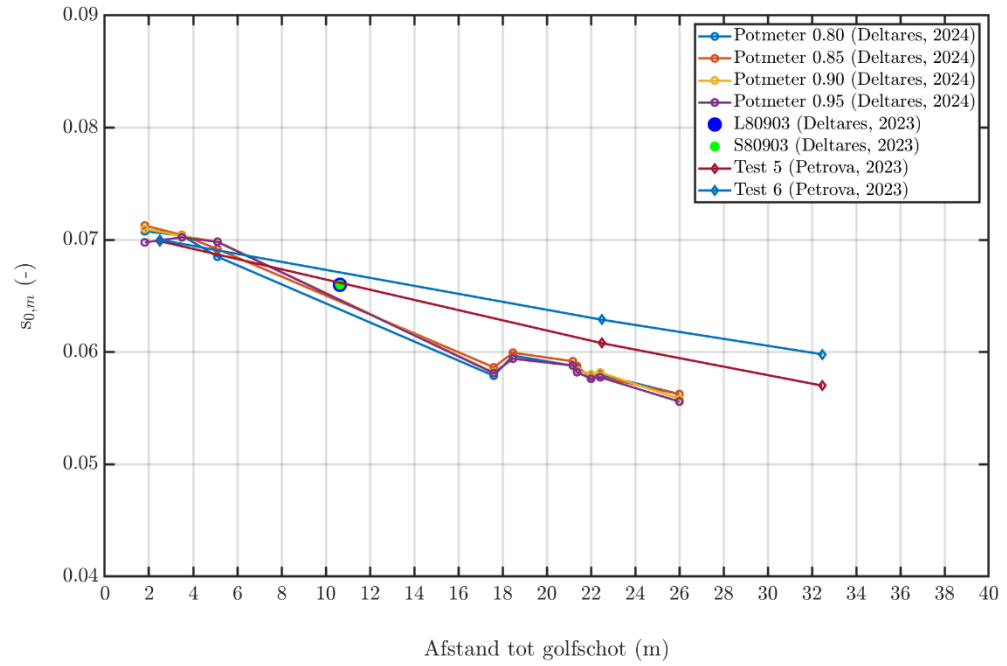
Omdat de golfsteilheid gemeten door Petrova et al. (2023) in de buurt ligt van de gemeten golfsteilheden van Deltares (2023, 2024), worden beide datasets met elkaar vergeleken. Figuur 3-8 toont de golfsteilheid op basis van T_p als functie van de afstand tot het golfschot, voor zowel de vier testen die in Deltares (2024b) zijn uitgevoerd en de twee steilste condities die in Petrova et al. (2023) zijn uitgevoerd, namelijk test 5 en test 6. Hoewel test 5 en test 6 een lagere golfsteilheid hebben, is een vergelijkbare trend zichtbaar: de golfsteilheid neemt af naarmate de afstand tot het golfschot groter wordt. In Figuur 3-8 zijn ook de steilste condities geplott, die voor het proevenprogramma in Deltares (2024b) in het Delta Basin zijn uitgevoerd. Het gaat om test L80903 en S80903. Deze punten vallen in dezelfde range van golfsteilheden als gemeten tijdens het proevenprogramma uit Deltares (2024b). In Figuur 3-9 wordt de golfsteilheid $s_{0,m}$ geplott, op basis van $T_{m-1.0}$. Ook deze golfsteilheid neemt voor alle testen af met afstand tot het golfschot. Hier valt echter op dat de testen van Deltares (2024b) sneller afnemen ten opzichte van de testen van Petrova et al. (2023). Dit duidt erop dat $T_{m-1.0}$ sneller verandert dan T_p in de testen van Deltares, en sneller dan de $T_{m-1.0}$ in de testen van Petrova et al. De periode $T_{m-1.0}$ is afhankelijk van het volledige spectrum, terwijl de piekperiode T_p wordt bepaald door het maximum van het spectrum.

Figuur 3-10 en Figuur 3-11 tonen de golfspectra van test 5 en test 6 uit Petrova et al. (2023), Figuur 3-12 en Figuur 3-13 tonen de golfspectra uit Deltares (2024b), met respectievelijk potmeter 0,8 en 0,95. In deze figuren wordt ook de JONSWAP-spectra in het groen geplot, op basis van de inkomende golfhoogte, golfperiode en gepiektheidsfactor. De vier figuren laten zien dat de energie in het hoogfrequente deel van het spectrum, naarmate de afstand tot het golfschot toeneemt, geleidelijk verschuift naar lagere frequenties. Daarnaast blijkt dat een steilere initiële golfsteilheid al vanaf 1,6 golflengte van het golfschot samenhangt met een relatief lagere hoeveelheid energie in de hoogfrequente flank van het spectrum, vergeleken met het beoogde JONSWAP-spectrum. Het verschil tussen het beoogde JONSWAP-spectrum is namelijk het grootst voor Figuur 3-13, waar de hoogste initiële steilheid is gemeten.

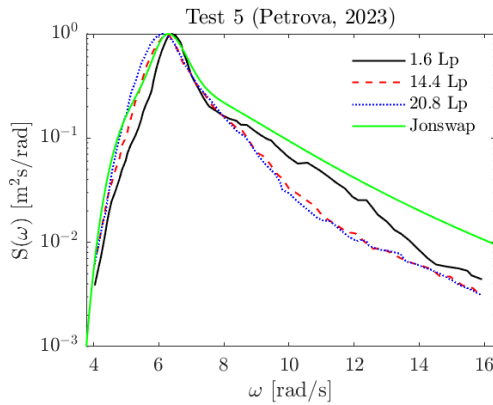


Figuur 3-8. Golfsteilheid $s_{0,p}$ als functie van de afstand tot het golfschot voor SL70903 in Deltares (2024b) en test 5 en 6 uit Petrova et al. (2023)

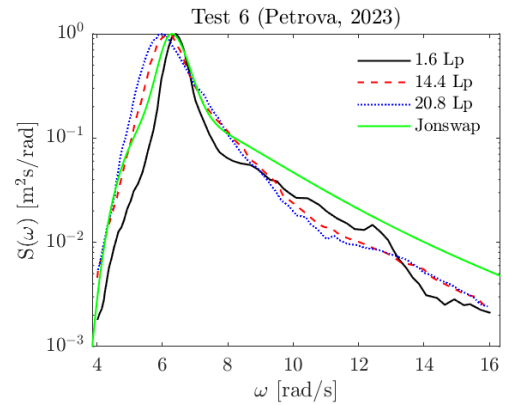
Golfsteilheid o.b.v. $T_{m-1,0}$



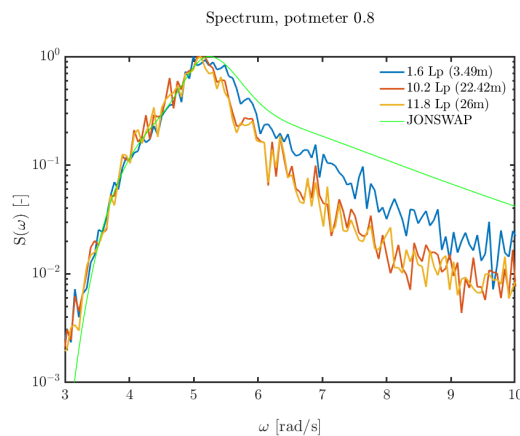
Figuur 3-9 Golfsteilheid $s_{0,m}$ als functie van de afstand tot het golfschot voor SL70903 in Deltares (2024b) en test 5 en 6 uit Petrova et al. (2023)



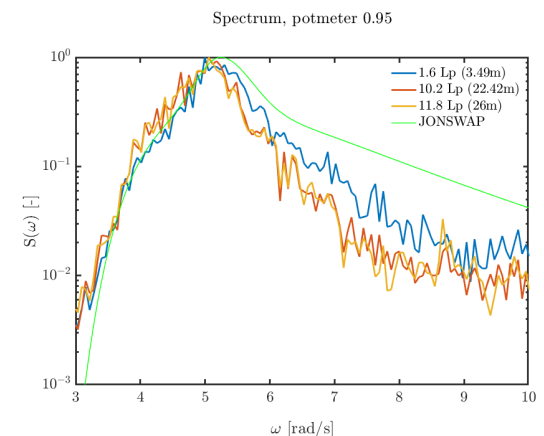
Figuur 3-10 Golfspectrum zoals gemeten tijdens Test 5 uit Petrova (2023) en het JONSWAP-spectrum op basis van de doelwaardes voor de golfparameters



Figuur 3-11 Golfspectrum zoals gemeten tijdens Test 6 uit Petrova (2023) en het JONSWAP-spectrum op basis van de doelwaardes voor de golfparameters



Figuur 3-12 Golfspectrum zoals gemeten tijdens Deltares (2024b), potmeterstand 0,8, en het JONSWAP-spectrum op basis van de doelwaardes voor de golfparameters



Figuur 3-13 Golfspectrum zoals gemeten tijdens Deltares (2024b), potmeterstand 0,95, en het JONSWAP-spectrum op basis van de doelwaardes voor de golfparameters

3.2.7 Synthese

Gezamenlijk tonen Deltares (2023, 2024), Petrova et al. (2023), Cao et al. (2023) en Petrova & Soares (2014) aan dat steile golfvelden, mechanisch opgewekt in een golfgoot zonder wind, veranderen met afstand tot het golfschot. Met afstand tot het golfschot verschuift de spectrale piek naar lagere frequentie, neemt de piek af en treedt energieverlies op in hoogfrequente componenten, terwijl de energie toeneemt bij laagfrequente componenten. De veranderingen zijn het sterkst bij hoge initiële steilheden en smalbandige (hoge γ) spectra.

Het energieverlies in de hoogfrequente flank zorgt voor een afname aan korte golfcomponenten, wat resulteert in een lagere golfsteilheid $s_{0,m}$. Tegelijkertijd vindt er een niet-lineaire energie-overdracht plaats van hoge naar lagere frequenties. Dit is zichtbaar als een downshift van de spectrale piek. Hiermee neemt de piekperiode toe, worden de dominante golven langer en daalt de golfsteilheid $s_{0,p}$.

Bij hoge initiële steilheid treedt modulatie-instabiliteit (Benjamin–Feir-instabiliteit) op: een niet-lineair mechanisme waarbij kleine verstoringen groeien door onderlinge golfinteracties en kunnen leiden tot de vorming van extreem hoge golven. Deze instabiliteit veroorzaakt een herverdeling van energie over het spectrum, wat zich uit in een verbreding en een versterkte

lokale energieconcentratie. Wanneer de steilheid vervolgens een kritische waarde overschrijdt, kan golfbreking optreden. Dit gaat gepaard met energiedissipatie en een afname van de golfhoogte, waardoor de effectieve steilheid verder afneemt naarmate de afstand tot het golfschot groter wordt.

De combinatie van spectrale evolutie, energieverlies en breking zorgt ervoor dat een mechanisch opgewekt spectrum met hoge initiële steilheid zich ontwikkelt tot een breder spectrum met een lagere steilheid.

3.3 Invloed van wind op het golfspectrum in een wind-golfgoot

3.3.1 Overzicht opgenomen literatuur

In dit deel van de literatuuronderzoek is gezocht naar metingen waarbij de wind volledig wegvalt. Hiervoor zijn geen directe referenties gevonden. Wel leverde deze zoektocht twee relevante artikelen op waarin het effect van wind op mechanisch opgewekte golven experimenteel is onderzocht, namelijk:

- **Zhang et al. (2024).** *Laboratory study of wind impact on steep unidirectional waves in a long tank.* Physical Review Fluids, 9(10), Article 104801.
- **Lee & Monty (2019)** *On the interaction between wind stress and waves: wave growth and statistical properties of large waves.*

Deze studies combineren mechanisch opgewekte golven met wind en sluiten, in lijn met het Paragraaf 3.2, vooral aan doordat zij de spectrale evolutie met afstand tot het golfschot onderzoeken.

3.3.2 Zhang et al. (2024)

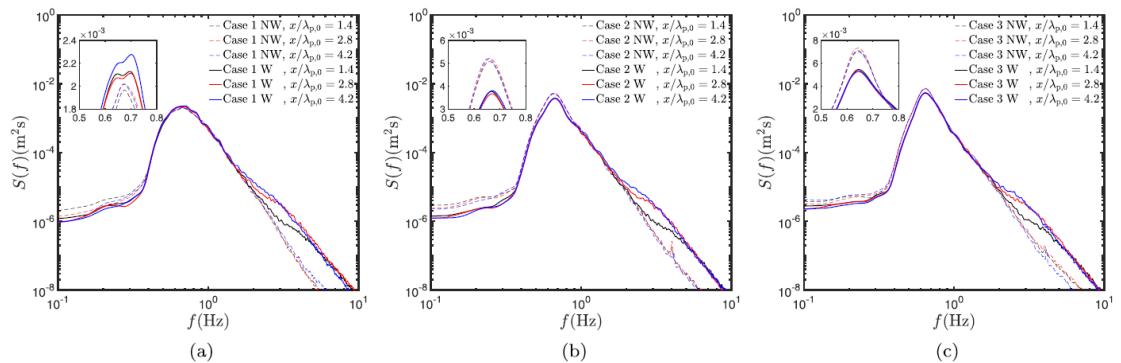
Het doel van Zhang et al. (2024) is om experimenteel te onderzoeken hoe wind de evolutie, statistiek en extremen van steile, unidirectionele willekeurige golven beïnvloedt in een zeer grote golfgoot. Voor deze studie zijn experimenten uitgevoerd in een wind-golfgoot, waarin drie verschillende golfspectra worden opgewekt met en zonder wind. Tabel 3-5 geeft de golfcondities per test case weer. De golfsteilheden zijn lager dan de steilheden besproken in Paragraaf 3.2.

Tabel 3-5 Golfcondities uit Zhang et al. (2023)

Test ID	H_s	L_p	γ	s_{0p}
Case 1	0,11	3,53	1	0,031
Case 2	0,14	3,52	3,3	0,040
Case 3	0,16	4,05	6	0,039

De oppervlakte uitwijking wordt op drie locaties ten opzichte van het golfschot gemeten, namelijk na 1,4, 2,8 en 4,2 golflengtes vanaf het golfschot. Figuur 3-14 laat de gemeten golfspectra zien voor de drie testcases, met en zonder wind. Het laat zien dat de metingen zonder wind redelijk stabiel blijven over de lengte van de goot, terwijl de metingen met wind veranderen. Uit dit figuur blijkt dat de aanwezigheid van wind voor energietoevoer in het hoogfrequente flank van het spectrum zorgt. Tegelijkertijd valt de laagfrequente flank lager uit dan de metingen zonder wind. De cases met de hoogste initiële steilheid (Case 2 en 3), zorgt wind voor een daling van de spectrale piek. Zhang et al. schrijven dit deels toe aan golfbreking, deels aan de opgewekte windrichting, die mogelijk niet volledig horizontaal was en daarom de golven verzwakt. Bij de lagere steilheid (Case 1), blijft de hoogte van de spectrale piek hetzelfde met en zonder wind.

In het artikel laten Zhang et al. (2024) zien dat de significante golfhoogte groeit met wind bij initieel lage golfsteilheden. Het effect is omgekeerd bij initiële hoge snelheden, ook al wordt dat deels toegeschreven aan de experimentele setup. Golfsteilheid groeit dan ook bij Case 1 door de aanwezigheid van wind, het omgekeerde vind plaats bij Case 2 en 3.



Figuur 3-14 Ontwikkeling van het golfspectrum met (W) en zonder (NW) wind. (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3.

3.3.3 Lee and Monty (2019)

Het doel van Lee & Monty (2019) is om experimenteel te onderzoeken hoe windstress de groei, statistiek en extreme waarden van golfparameters beïnvloedt, door mechanisch opgewekte golfvelden te genereren in combinatie met verschillende windsnelheden. De basis conditie is een JONSWAP spectrum met $T_p = 1$ s, $H_s = 0,57$ m (zonder wind) en de versterkingsfactor $\gamma = 3,3$. Dit spectrum wordt voor 9 verschillende windsnelheden gegenereerd, met windsnelheden tussen de 0 m/s en 13,6 m/s. De oppervlakte uitwijking wordt op verschillende plekken gemeten, namelijk na 0,65, 7,1 en 13,5 golflengtes afstand van het golfschot. Tabel 3-6 geeft de test condities weer. Hieruit blijkt dat met toevoer van wind, hogere golfsteilheden bereikt zijn dan gemeten in Deltares (2024b).

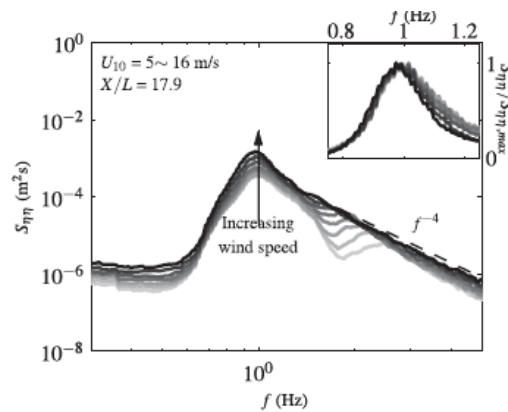
Tabel 3-6 Significante golfhoogte, windsnelheid en golfsteilheid op 13,5 golflengte afstand van het golfschot.

Test ID	H_s [m]	U [m/s]	s_{0p}
Case 1	0,057	0,0	0,036
Case 2	0,060	4,8	0,038
Case 3	0,062	6,0	0,039
Case 4	0,066	7,3	0,042
Case 5	0,073	8,6	0,047
Case 6	0,080	9,8	0,051
Case 7	0,090	11,1	0,057
Case 8	0,102	12,3	0,065
Case 9	0,117	13,6	0,075

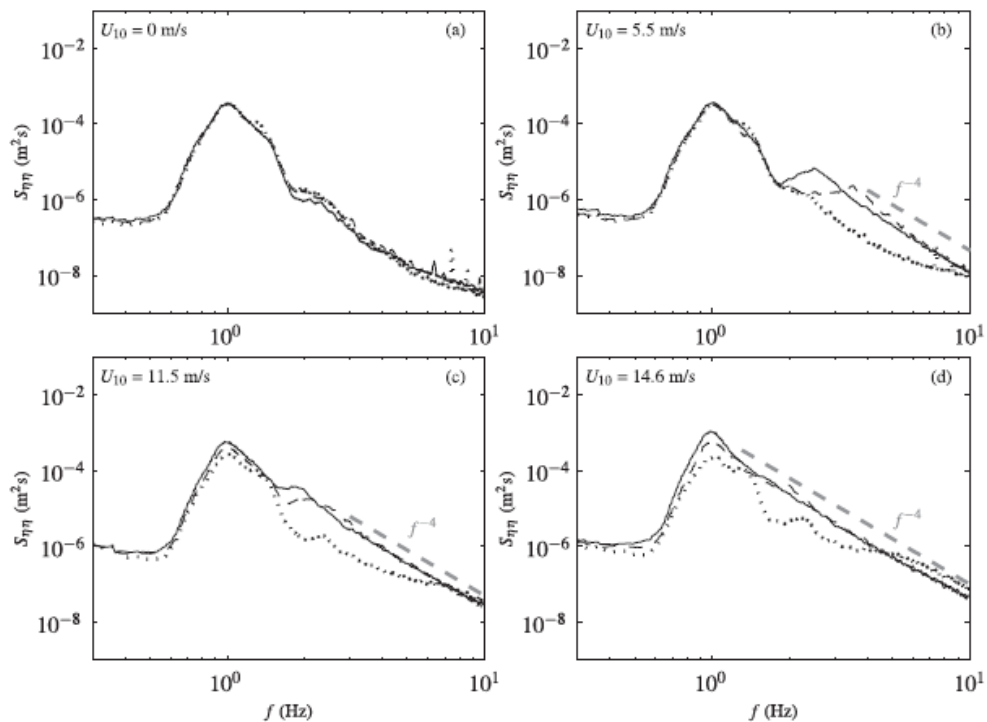
De analyse van de metingen toont aan dat de spectrale piekfrequentie nauwelijks verschuift met de toevoer van wind, zoals te zien in Figuur 3-15. Daarentegen heeft wind een versterkend effect op de hoogfrequente flank. Bij lage windsterkte ontstaat een tweede piek in het spectrum, die door korte wind-geïnduceerde golven veroorzaakt is, en die met toenemende fetch opschuift naar lagere frequenties. Bij hogere windsterktes en toenemende fetch volgt de hoogfrequente flank steeds meer de f^{-4} vervallijn, zoals voorspeld door de theorie van Phillips (1958). Dit wijst op een overgang naar een spectraal equilibrium, waar niet-lineaire interacties,

breking en energietoevoer door wind in balans zijn. Zonder wind kan een dergelijk evenwicht niet worden bereikt, en zal de vervallijn sneller zakken, zoals opgemerkt is in Paragraaf 3.2.

Daarnaast laten Lee & Monty (2019) ook zien dat de maximale individuele steilheid van golven wordt verhoogd door de aanwezigheid van wind. De steilheid overschrijdt de brekingsdrempel die bij afwezigheid van wind geldt. Deze drempel ligt bij $S_c = \pi a / \lambda_c > 0.4$, met a de golfkamamplitude en λ_c de golflengte tussen twee nuldoorgangen. In een golfgoot zonder wind overschrijden golven deze drempel zelden, omdat er geen aanvullende energietoevoer is. Lee & Monty (2019) laten zien dat de drempel wel regelmatig wordt overschreden met wind. Dit toont aan dat wind kan leiden tot hogere lokale steilheden dan in een golfgoot zonder wind, tot voorbij de brekingsdrempel. De toename in lokale steilheden is gerelateerd aan een energieverhuizing naar hogere frequenties. Wind speelt dus een kritische rol in het bereiken van extreme golfcondities, waaronder golfbreking en energieoverdracht naar hogere frequenties.



Figuur 3-15 Golfspectrum bij toenemende windsterkte. Overgenomen uit Lee & Monty (2019)



Figuur 3-16 Ontwikkeling van golfspectra bij verschillende windsnelheden, gemeten op verschillende afstanden; na 0,65 golflengtes (stippel lijn ...), na 7,1 golflengtes (onderbroken lijn - - -) en na 13,5 golflengtes (doorgetrokken lijn __). Overgenomen uit Lee & Monty (2019).

3.3.4 Vergelijking met JONSWAP (Hasselmann et al. 1973)

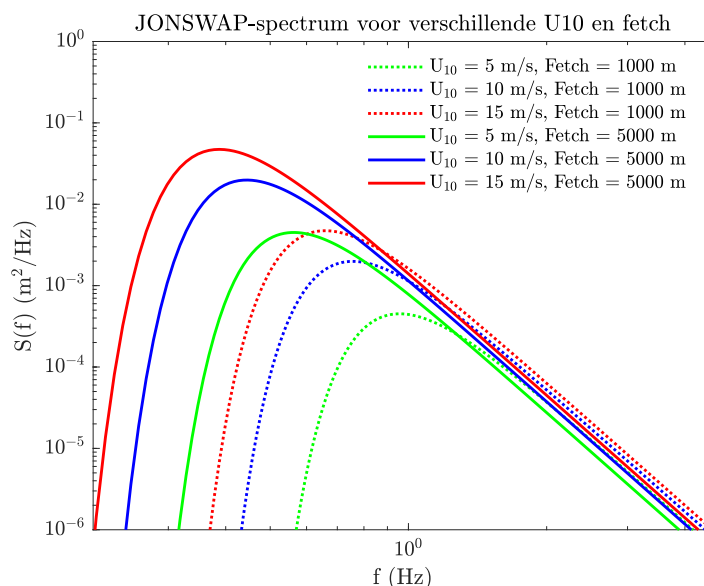
Het JONSWAP-spectrum (Joint North Sea Wave Project, Hasselmann et al., 1973) kan als volgt als functie van de strijklengte en windsnelheid worden uitgedrukt:

$$S_{JONSWAP}(f) = \frac{\alpha g^2}{16\pi^4} f^{-5} \exp\left(-\beta \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \gamma^b$$

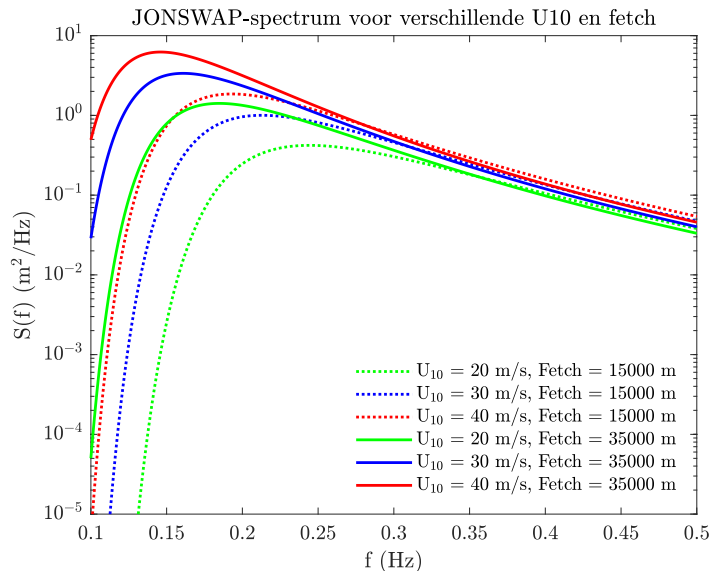
Met $\alpha = 0.076 (U_{10}^2/Fg)^{0.22}$ en $f_p = 3,5 \left(\frac{g^2}{u_{10}F}\right)^{1/3}$ waarbij F de strijklengte is en U_{10} de windsnelheid 10 m boven de stilwaterlijn.

Figuur 3-17 toont 6 JONSWAP-spectra met piekversterkingsfactor $\gamma = 1,0$, voor drie verschillende windsnelheden en twee strijklengtes. Figuur 3-17 laat zien dat zowel een toename van windsnelheid als fetch leidt tot hogere piekenergie en een piek op een lagere frequentie, wat overeenkomt met verder ontwikkelde (langere) golven. Bij toenemende windsnelheid neemt bovendien de energie op de hoog-frequente flank toe, doordat sterkere wind meer energie overdraagt naar kortere golven. Het effect van een toenemende strijklengte op de hoogfrequente flank is minder eenduidig en leidt niet tot een toename in energie bij de allerhoogste frequenties.

Figuur 3-17 sluit aan bij de resultaten van Zhang et al. (2024), die laten zien dat wind de hoogfrequente flank versterkt. Ook de bevindingen van Lee & Monty (2019) ondersteunen dit beeld: zij tonen dat sterkere wind de lokale golfsteilheid verhoogt, waardoor extra energie naar hoge frequenties gaat totdat breking verdere groei begrenst. Hierdoor ontstaat een evenwicht tussen windinvoer, niet-lineaire interacties en dissipatie. Het energieniveau van de hoogfrequente flank wordt daarbij primair bepaald door de windsnelheid en is slechts in beperkte mate afhankelijk van de strijklengte, voor zover de flank daadwerkelijk door de wind is gevuld. In Zhang et al. (2024) is de hoogfrequente flank bij de eerste golfhoogtemeter hoogstwaarschijnlijk nog niet door wind gevuld. De hoogfrequente flank groeit dus nog. Vanaf de eerste strijklengte waar de flank gevuld is door wind, blijft het hoogfrequente flank nagenoeg gelijk. Daarmee zijn de resultaten van Zhang et al. (2024) in lijn met de JONSWAP-beschrijving, in Figuur 3-17.



Figuur 3-17 JONSWAP-spectra bij toenemende strijklengte (fetch) en windsnelheid.



Figuur 3-18 JONSWAP-spectra bij toenemende strijklengte (fetch) en windsnelheid.

3.3.5 Synthese

Zhang et al. (2024) en Lee & Monty (2019) laten zien dat met toenemende windsterkte en fetch, het hoogfrequente flank zich ontwikkelt met afstand tot het golfschot. Energie wordt toegevoegd aan het hoogfrequente flank. Daarmee volgt de flank steeds meer de f^{-4} vervallijn, wat wijst op een overgang naar een spectraal equilibrium, waar niet-lineaire interacties, breking en energietoevoer door wind in balans zijn. Op lokaal niveau kan de golfsteilheid hogere waarden bereiken in aanwezigheid van wind, waarbij golfsteilheden boven de brekingsdrempel worden waargenomen. Dit zorgt voor meer energie in het hoogfrequente deel van het spectrum. Deze bevindingen zijn vergeleken met JONSWAP-spectra voor verschillende strijklengtes en windsnelheden, die voornamelijk laten zien dat windsnelheid de hoogfrequente flank verhoogt, terwijl bij langere strijklengtes de energie voornamelijk naar de piekfrequentie verschuift.

3.4 Conclusie en praktische aanbevelingen

Met name bij hoge golfsteilheden en smalbandige spectra ontwikkelt het golfspectrum zich het sterkst met afstand tot het golfschot. Bij afwezigheid van wind vindt er een herverdeling van de energie plaats. De energie in de hoogfrequente flank neemt af terwijl er energie wordt toegevoegd bij de lagere frequenties. Daarmee verschuift de spectrale piekperiode naar lagere waarden en daalt de spectrale golfsteilheid.

De aanwezigheid van wind speelt een belangrijke rol bij het behouden van energie bij de hogere frequenties. Wind voegt namelijk energie toe aan de hoogfrequente flank van het spectrum, wat het behoud van hogere golfsteilheden faciliteert. In de golffaciliteiten van Deltares is wind afwezig en kunnen golfsteilheden afnemen met afstand van het golfschot. Een manier om alsnog testen uit te voeren met hoge golfsteilheden is door het testmodel dicht bij het golfschot te plaatsen. Echter hebben golven een zekere afstand nodig om zich volledig te vormen. Het model moet daarom niet te dicht op het golfschot geplaatst worden.

Om de optimale positie van het testmodel te bepalen, wordt aanbevolen om voorafgaand aan een testprogramma kalibratie testen uit te voeren waarbij op meerdere locaties in de golfgoot de oppervlakte-uitwijking gemeten wordt. Op basis van deze metingen kan worden vastgesteld op welke locatie het gewenste golfspectrum het best gerealiseerd wordt.

4 Terugblik en aanbevelingen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden in het kort de belangrijkste bevindingen beschreven die volgen uit onderhavige studie en de hieraan voorafgaande studies (Deltares, 2020), (Rijkswaterstaat WV, 2022), (Deltares, 2024a) en (Deltares, 2024b).

4.2 Bevindingen

Definitie van golfsteilheid

In de literatuur worden voor het kenmerk 'golfsteilheid' veel verschillende definities gehanteerd. Veel verschillen zorgen ervoor dat de getalswaarde van de golfsteilheid volgens de ene definitie niet eenduidig is te vertalen naar de getalswaarde van de golfsteilheid volgens de andere definitie. Dit maakt de informatie over golfsteilheid in de literatuur gefragmenteerd: alleen in afzonderlijke specifieke contexten bruikbaar.

Onderhavige studie beschouwt de golfsteilheid die veel gebruikt wordt bij het opzetten van fysisch modelonderzoek. Deze golfsteilheid is afgeleid uit

- de spectrale golfhoogte H_{m0} en de spectrale piekperiode T_p en/of
- de spectrale golfhoogte H_{m0} en de spectraal gemiddelde periode $T_{m-1,0}$.

Dit levert respectievelijk $s_{0,p}$ en $s_{0,m}$. Bij de afleiding wordt de golfperiodemaat omgerekend naar een golfengte, volgens de formule voor diep water.

Hoge golfsteilheid in de natuur

De maximale golfsteilheid ($s_{0,m}$) gemeten in het veld ligt rond de 0,08, waarbij de meeste datasets een maximum laten zien rond de 0,06.

De hoogste waarden worden gevonden voor relatief jonge golven, dat wil zeggen voor situaties met relatief korte strijklengte en/of relatief harde wind (en bij afwezigheid van golfbreking door ondiepte).

Gevraagde golfsteilheid in modelonderzoek

De in modelonderzoek gevraagde golfsteilheid is doorgaans gebaseerd op berekeningen met een numeriek golfmodel, al of niet in combinatie met een probabilistisch model. Deze gevraagde golfsteilheid kan significant hoger uitpakken dan de hoogste waarden in de natuur. In de voor Nederland relevante praktijk is het volgende gebleken:

- Het numerieke golfmodel SWAN kan soms onrealistisch hoge golfsteilheid geven. De precieze oorzaak hiervan is niet duidelijk, dat wil zeggen: er is nog geen concrete oplossing bekend.
- Het probabilistisch model (Hydra-Ring binnen Riskeer, of Hydra-NL) kan onrealistisch hoge golfsteilheid opleveren, met name als de modelonzekerheid in de golfhoogte en de modelonzekerheid in de golfperiode onderling ongecorrleerd in rekening worden gebracht.

Haalbare golfsteilheid in fysisch modelonderzoek bij Deltares

- Er is geen invloed gevonden van richtingspreiding op de haalbare golfsteilheid.
- In de Scheldegoot van Deltares is een maximale golfsteilheid $s_{0,m}$ gerealiseerd van 0.071. Dit is iets lager dan de maximale waargenomen waarde in de natuur.
- Bij het opwekken van golfcondities met hoge golfsteilheid speelt de afstand tot het golfschot een belangrijke rol:

- Beide maten voor de golfsteilheid ($s_{0,p}$ en $s_{0,m}$) nemen af met toenemende afstand tot het golfschot. Een hoge golfsteilheid kan wel opgewekt worden, maar kan niet in stand blijven met toenemende afstand tot het golfschot.
- De golfenergie in de hoogfrequente flank van het spectrum zakt in met toenemende afstand tot het golfschot.
- De spectrale vorm met toenemende afstand tot het golfschot is opvallend afwijkend van die van een JONSWAP spectrum:
 - 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 $T_p/T_{m-1,0}$ 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.

Haalbare golfsteilheid in fysisch modelonderzoek elders (via literatuur)

Tijdens het literatuuronderzoek bleek dat er slechts beperkt bruikbare gegevens beschikbaar zijn over combinaties van golven en wind. Het literatuuronderzoek is daarom in twee delen gedaan. Eerst is gezocht naar de spectrale evolutie met afstand tot het golfschot volgens modelonderzoek elders. Vervolgens is gezocht naar beschikbare metingen in wind-golfgoten om de invloed van wind op het golfspectrum te onderzoeken. Dit heeft geleid tot de volgende bevindingen:

- Zonder wind neemt de haalbare golfsteilheid af met afstand tot het golfschot: de spectrale piek verschuift naar lagere frequenties, hoogfrequente energie verdwijnt en de totale steilheid daalt door dissipatie en niet-lineaire energieoverdracht.
- Deze afname is het sterkst bij hoge initiële steilheid en smalbandige (hoge γ) spectra; modulatie-instabiliteit en breking versnellen energie-verlies en spectrumverbreding
- Met toevoer van windenergie blijft hoogfrequente energie behouden: wind voegt energie toe aan de hoogfrequente staart, waardoor een hogere golfsteilheid haalbaar lijkt dan in golffaciliteiten zonder wind.
- Vergelijking met JONSWAP-spectra bevestigt dat windsnelheid vooral de hoogfrequente flank verhoogt, terwijl fetch de energie richting de piekfrequentie verschuift.
- Voor golfgoten zonder wind, zoals bij Deltares, betekent dit dat hoge steilheden alleen haalbaar blijven dicht bij het golfschot; daarom zijn kalibratiemetingen langs de goot noodzakelijk om de optimale positie voor realistische, hoge steilheden te bepalen.

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.

4.3 Aanbevelingen

Aansluitend bij de conclusies kunnen de aanbevelingen als volgt worden samengevat:

In communicatie:

- 1 Wees duidelijk in de communicatie over 'de golfsteilheid'; geef een expliciete definitie.

Voor fysisch modelonderzoek:

- 2 Kijk kritisch naar de bij modelonderzoek gevraagde golfsteilheid: mogelijk is deze onrealistisch hoog en moeten de gevraagde golfcondities (vooralsnog ad hoc) worden aangepast.
- 3 Een hoge gevraagde golfsteilheid kan horen bij 'jonge golven', hetgeen duidt op een belangrijke rol van wind in de te beschouwen condities. Dit vormt een (extra) aanleiding om (vooralsnog ad hoc) de rol van wind bij de in het model te beschouwen

fenomenen/parameters na te gaan c.q. te verifiëren of de modelopzet zonder wind voldoende representatief is.

- 4 Indien nodig en mogelijk: plaats de met golven te belasten constructie relatief dicht bij het golfschot.

Voor ontwikkeling van kennis c.q. tools:

- 5 (Ter generieke ondersteuning van punt 2): Verbeter SWAN op het gebied van de (te hoog berekende) golfsteilheid.
- 6 (Ter generieke ondersteuning van punt 3): Verwerf 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.
- 7 Onderhavige studie heeft relatief weinig nieuwe of aanvullende inzichten opgeleverd, wel enige mate van bevestiging van de eerder opgedane inzichten. De aard van de aanbevolen verdere ontwikkeling van kennis en tools (punt 5 en 6) past niet goed meer bij het karakter van het overkoepelende SITO-PS-WVH-VOW project. Daarom wordt aanbevolen dergelijke ontwikkelingen in andere (SITO) projecten in te bedden.
- 8 De in Paragraaf 4.1 genoemde voorgaande studies bevatten meer relevante informatie dan in bovenstaande samenvatting kan worden gepresenteerd. Bij verdere kennisontwikkeling en praktische vragen rond de haalbaarheid van hoge golfsteilheid in de Deltares faciliteiten wordt daarom aanbevolen deze eerder uitgevoerde studies te blijven raadplegen.

Referenties

- Cao R., Padilla, E.M. and Callaghan, A.H. (2023). The influence of bandwidth on the energetics of intermediate to deep water laboratory breaking waves. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 971, A11, DOI: 10.1017/jfm.2023.645.
- Deltares (2020). Extreme golfsteilheden. Literatuuronderzoek. Document ID: 11205235-010-ZWS-0001.
- Deltares (2024a). Golfsteilheid in golfgoten. Document ID: 11209204-012-GEO-0001.
- Deltares (2024b). Haalbaarheid hoge golfsteilheid in golfgoten. Verslag analyses en inzichten 2024. Document ID: 11210365-012-ZWS-0001.
- Lee & Monty (2019). On the interaction between wind stress and waves: wave growth and statistical properties of large waves. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 50, Issue 2, pp. 383-397. DOI: 10.1175/JPO-D-19-0112.1
- Liu, J., Liu, Z., Guo, A., Li, H., (2021). Experimental study on the evolution of mechanically generated waves mixed with space non-uniform wind-driven waves. *Ocean Engineering Volume 232*, 15 July 2021. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109129
- Kumar, K., Shemer, L., (2024). Laboratory study of the effect of mean water current on the evolution of young wind waves. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 996, A21. DOI: 10.1017/jfm.2024.768
- Kumar, K., Shemer, L., (2024). Spatial growth rates of young wind waves under steady wind forcing. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 984, A22. DOI: 10.1017/jfm.2024.228
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H. (1973). Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches Institut.
- Shemer, L., Singh, S.K., Chernyshova, A., (2020). Spatial evolution of young wind waves: numerical modelling verified by experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 901, A22.
- Petrova & Soares (2014). Distributions of nonlinear wave amplitudes and heights. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1207-1222, 2014. DOI: 10.5194/nhess-14-1207-2014.
- Petrova, P.G., Guedes Soares, C., Vileti, V., and Esperança, P. T. T., (2023). Non-Gaussian Statistics of Mechanically Generated Unidirectional Irregular Waves. *Journal of Marine Science and Application*, 22: 25-43. DOI: 10.1007/s11804-023-00324-y
- Pierson, W.J., Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research* (1896-1977) Volume 69, Issue 24 pp. 5181-5190. DOI: 10.1029/JZ069i024p05181
- Rijkswaterstaat WVL (2022). Relevantie van schuine golfval en kortkammigheid voor golfoverslag, en de representativiteit van golfgootproeven – een quick scan van de literatuur.
- Wu, R., Guo, A., Zhu, S., Liu, J., 2025. Growth of wind-driven waves under uniform currents. *Coastal Engineering*, Vol. 198, 15 May 2025. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2025.104704
- Zhang, Z., Tang, T., Zheng, X., Xu, W., Zhang, L., Lee, J. H., Adcock, T. A. A., Monty, J. P., Slunyaev, A., Van Den Bremer, T. S., & Li, Y. (2024). Laboratory study of wind impact on steep unidirectional waves in a long tank. *Physical Review Fluids*, 9(10), Article 104801. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.9.104801

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