

Extreme golfsteilheden

literatuuronderzoek



Extreme golfsteilheden
literatuuronderzoek

Extreme golfsteilheden

literatuuronderzoek

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving (WVL)
Contactpersoon	Marcel Bottema
Referenties	Plan van Aanpak KPP 2020 project
Trefwoorden	Extreme golfsteilheid, breken van golven

Documentgegevens

Versie	1.5
Datum	31-3-2020
Projectnummer	11205235-010
Document ID	11205235-010-ZWS-0001
Pagina's	31
Status	definitief

Auteur(s)

J. Groeneweg P. van Steeg		

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	J. Groeneweg P. van Steeg	PM	PM	PM
1.3	J. Groeneweg P. van Steeg	J. van Nieuwkoop	M. van Gent	
1.5	J. Groeneweg P. van Steeg	J. van Nieuwkoop	M. van Gent	

Samenvatting

In diverse beoordelingstrajecten en ontwerpstudies van primaire keringen zijn hydraulische belastingen bepaald die hebben geleid tot vragen met betrekking tot grote golfsteilheden (groter dan 7% voor $s_{m-1,0}$, i.e. golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$, of 4% voor s_p , i.e. golfsteilheid op basis van T_p). Aan de hand van literatuuronderzoek hebben we antwoorden gezocht op deze vragen. De vragen zijn cursief gedrukt.

Wat is fysisch gezien een bovengrens voor de golfsteilheid, gegeven de lokale omstandigheden?

- Onder de aanname van een standaard JONSWAP spectrum geldt dat $s_{m-1,0}$ maximaal 5% en s_p maximaal 4% kan worden op open, veelal diep water. Voor strijklengte-beperkte situaties kan dit oplopen tot 7-8% resp. 6%.
- Een hellende bodem voor de kust, een stelsel van geulen en platen of de aanwezigheid van stroming maken dat de golfsteilheid mogelijk ook in de buurt van 7-8% resp. 6% uit kan komen. Met aanvullende analyse van beschikbare golfdata zou aangetoond kunnen worden of dit daadwerkelijk het geval is.

Wat maakt dat berekende golfsteilheden groot kunnen zijn?

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 modelonzekerheden;
- interpolatiefouten bij lage waterstanden als gevolg van een grove resolutie van basisstochastwaarden.

We bevelen aan deze omissies te verhelpen.

Zijn er qua golfsteilheid (en mogelijk andere parameters) belangrijke verschillen tussen in-situ-metingen en golfgootmetingen, waarmee rekening gehouden moet worden bij het duiden van die golfgootresultaten?

De voornaamste verschillen tussen metingen in een laboratoriumgoot en in-situ metingen komen voort uit het ontbreken van wind (uitgaande van het gotenarsenaal in Nederland) en richtingsverspreiding in de golfgoten. Uit de literatuur volgt dat:

- In de literatuur is weinig bekend over het effect van richtingsverspreiding op golfsteilheid. Sterker nog, de bevindingen in Prevosto (1998) dat langkammige golven tot hogere golfsteilheden kunnen leiden dan kortkammige lijken contra-intuïtief.
- Ondanks dat niet specifiek naar golfsteilheden is gekeken, lijken er (laboratorium)datasets te bestaan die het mogelijk maken meer duiding te geven aan het verschil in golfsteilheden in kort- en langkammige golfvelden.
- Daarnaast bevelen we aan de volgende kennisvraag te agenderen: 'Wat is de impact van de verschillen tussen in-situ en golfgoot golfeigenschappen (o.a. golfsteilheid en richtingsverspreiding) op de uitkomsten van proeven met golfgoten en oloop- en overslagsimulatoren, zoals wave setup, olooppniveau, overslagdebiet, golfklapbelasting, klei/gras/duinerosie?'. Binnen deze kennisvraag kan worden nagegaan wat de meest kansrijke opties zijn om met beperkingen t.a.v. onder andere golfsteilheid en gemis aan richtingsverspreiding om te gaan in het kader van erosieproeven op gras, klei en zand, en sterkteproeven van harde bekledingen.

De drie gestelde vragen zijn nog niet volledig beantwoord. Om deze reden adviseren we om beschikbare data specifiek op golfsteilheden te analyseren. Vervolgens wordt aanbevolen om de daaruit getrokken conclusies door te vertalen naar voor BOI relevante interne belastingen, zoals golfploop en golfoverslag en te vergelijken met conclusies uit indirect verkregen meetresultaten, zoals bijvoorbeeld door Wolters en Van Gent (2007), waar het effect van wind op golfoverslag artificieel is gemodelleerd.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
2	Definities en fenomenologische beschrijving	8
2.1	Definities van golfparameters	8
2.2	Definities van golfsteilheid	9
2.3	Beperking golfsteilheid: Breken van golven op diep water	10
2.4	Beperking golfsteilheid: breken van golven op ondiep water	11
3	Bovengrenzen golfsteilheid	13
3.1	Literatuur	13
3.2	Veldmetingen	14
3.2.1	Analyse van metingen op het IJsselmeer, Noordzee en Westerschelde	14
3.2.2	Metingen buiten Nederland	16
3.3	Vertaling naar voor Nederland relevante situaties	17
3.4	Conclusie	17
4	Berekenen van golfsteilheden	19
4.1	Grote berekende golfsteilheden	19
4.2	Ontbrekende fysica in SWAN	19
4.3	Probabilistische berekeningen	20
4.3.1	Onafhankelijk veronderstellen van modelonzekerheden	20
4.3.2	Grove discretisatie stochastwaarden	20
4.4	Empirische golfgroeikromme van Bretschneider	21
4.5	Conclusie	22
5	Effecten richtingsverspreiding op niet-lineaire aspecten	24
6	Conclusies en aanbevelingen	26
7	Referenties	28

1 Inleiding

Voor het beoordelen en ontwerpen van primaire keringen worden de belasting op de kering en de sterkte van de kering met elkaar vergeleken in een probabilistische of semi-probabilistische context. Als de kans op falen van een dijktraject groter is dan een vooraf vastgestelde norm, dan voldoet het dijktraject niet en zal een alternatief ontwerp gezocht moeten worden. Om een faalkans te bepalen kan gebruik worden gemaakt van het modelinstrumentarium Riskeer.

In diverse ontwerpprojecten, zoals de versterking van de Afsluitdijk en de Lauwersmeerdijk, zijn hydraulische belastingen bepaald ten behoeve van bekledingen op het buitentalud of de erosie van de kruin en het binnentalud, die enige twijfel hebben gezaaid in termen van grote golfsteilheden. De vraag daarbij is telkens of de berekende lokale golfsteilheid realistisch is. We kunnen deze vraag in twee subvragen splitsen:

1. Wat is fysisch gezien een bovengrens voor de golfsteilheid, gegeven de lokale omstandigheden?
2. Wat maakt dat berekende golfsteilheden groot kunnen zijn?

In het verlengde van bovenstaande twee vragen rijst een nieuwe vraag:

3. Zijn er qua golfsteilheid (en mogelijk andere parameters) belangrijke verschillen tussen insitu-metingen en golfgootmetingen, waarmee rekening gehouden moet worden bij het duiden van die golfgootresultaten?

De achtergrond van deze vraag zit in het feit dat veel oploop/overslagformules primair gekalibreerd zijn met golfmetingen in een golfgoot (zonder windforcering, langkammige golven) waarin het niet of nauwelijks lukt golfsteilheden s_p ¹ boven de 4-5% te krijgen. Golfoploop en daarmee het gemiddeld overslagdebiet hangt af van de breaker parameter gedefinieerd als $\tan(\alpha)/\sqrt{s_p}$, met α de talud helling. Een steilere golf resulteert dan dus in een lagere breker parameter. Een 20% overschatting van s_p geeft dus bijna 10% onderschatting van de breker parameter en dus 10% onderschatting van de golfoploop. Het gemiddeld overslagdebiet wordt dan dus ook onderschat.

Daar waar vanuit praktische ervaring een diepwater golfsteilheid¹ van 5% al als hoog wordt ervaren, kan dit na beantwoording van de eerste vraag wel eens een deel van de twijfels wegnemen. Het doel van het huidige onderzoek is om duiding te geven bij de grote modelgolfsteilheden, met name door inzicht te geven in wat voor golfsteilheden er in werkelijkheid in verschillende omstandigheden op kunnen treden.

Vanuit de literatuur is duidelijk geworden dat golfsteilheid niet eenduidig wordt gedefinieerd. Om deze reden behandelen we in Hoofdstuk 2 de definities die gehanteerd worden en geven we een fenomenologische beschrijving. In Hoofdstuk 3 presenteren we de uitkomsten van een beknopte literatuurstudie en noemen we in Hoofdstuk 4 een aantal redenen waarom berekende golfsteilheden groot kunnen zijn. In Hoofdstuk 4.5 gaan we nader in op het effect van kortkammigheid op golfsteilheid. In de discussie in Hoofdstuk 6 bespreken we deze bevindingen.

¹ definitie volgt in Paragraaf 2.2

2 Definities en fenomenologische beschrijving

Teneinde te voorkomen dat er misverstanden ontstaan in de interpretatie van conclusies in de literatuur, gaan we in dit hoofdstuk eerst in op de definitie van golfparameters en de verschillende manieren waarop golfsteilheden worden gedefinieerd. Omdat we geïnteresseerd zijn in de maximaal optredende golfsteilheden (in werkelijkheid en in numerieke modellen) gaan we vervolgens nog in op de fenomenologische beschrijving van het breken van golven.

2.1 Definities van golfparameters

De golfsteilheid s wordt gedefinieerd als de verhouding tussen golfhoogte en golflengte:

$$s = \frac{H}{L} \quad (2.1)$$

waarbij voor een enkele golf de golfhoogte H is gedefinieerd als het hoogteverschil tussen het hoogste en het laagste punt van het golfprofiel. De golflengte L is gedefinieerd als de horizontale afstand tussen twee opeenvolgende toppen (of dalen), welke volgens de lineaire golftheorie op de volgende wijze wordt berekend:

$$L = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right), \quad L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (2.2)$$

met g de zwaartekrachtsversnelling, T de golfperiode en L_0 de golflengte op diep water.

In een in werkelijkheid optredend onregelmatig golfveld worden de golfparameters via een stochastische beschrijving bepaald. De spectrale significante golfhoogte H_{m0} is gedefinieerd als de standaard afwijking van de oppervlakte-uitwijking η

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.3)$$

met het n -de moment: $m_n = \int_0^\infty f^n E(f) df$ voor $n = \dots, -3, -2, 0, 1, 2, 3, \dots$

en voor $n = 0$: $m_0 = \overline{(\eta^2)} = \int_0^\infty E(f) df$.

Met de significante golfhoogte H_s wordt doorgaans de spectrale significante golfhoogte H_{m0} of de gemiddelde golfhoogte van de hoogste 1/3 golven ($H_{1/3}$) bedoeld. In de praktijk is $H_{1/3}$ circa 5% kleiner dan H_{m0} .

Voor de golfperiode van een golfveld zijn er diverse maten. De piekperiode T_p is gedefinieerd als de periode (inverse van de frequentie) waarvoor het energiespectrum zijn maximum aanneemt. De gemiddelde periode T_z wordt vaak in nautische toepassingen gebruikt en wordt gedefinieerd als het gemiddelde van de periode tussen twee nuldoorgangen:

$$T_z = T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.4)$$

Een andere dikwijls gebruikte periodemaat is de spectrale periode $T_{m-1.0}$, waarbij er meer gewicht wordt toegekend aan de langere perioden in een golfspectrum. Dit is voor de Nederlandse ontwerp en beoordelingspraktijk de meest gangbare parameter om de golfperiode te karakteriseren (Van Gent, 2001):

$$T_{m-1.0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2.5)$$

2.2 Definities van golfsteilheid

De golfsteilheid ($s = H/L$) van een golfveld kan op verschillende manieren worden gedefinieerd. Hierbij kan onder andere onderscheid worden gemaakt naar:

- de golflengte op basis van onder andere de piekperiode T_p , de gemiddelde periode T_z (nuldoorgangperiode uit het tijdsdomein, welke ongeveer gelijk is aan T_{m02}) of de spectrale golfperiode $T_{m-1.0}$;
- De daadwerkelijke golflengte (in ondiep water) of een denkbeeldige diepwatergolflengte. Voor diep water is er uiteraard geen onderscheid.

Bij de bepaling van golfoverslag wordt in de Nederlandse situatie veelal (zoals in PC-Overslag en Risker) gerekend met de golfsteilheid op basis van de (fictieve) diepwater golflengte, gedefinieerd in termen van de lokale spectrale periodemaat $T_{m-1.0}$ en de lokale spectrale significante golfhoogte H_{m0} :

$$s_{m-1.0} = \frac{H_{m0}}{L_{m-1.0}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot H_{m0}}{g \cdot T_{m-1.0}^2} \quad (2.6)$$

Er worden voorsnog drie verschillende golfsteilheden onderscheiden. Deze zijn alle gebaseerd op de diep water golflengte zoals hierboven beschreven en de periodes T_p , T_z en $T_{m-1.0}$ en worden hier genoemd s_p , s_z en $s_{m-1.0}$ respectievelijk.

De verhouding tussen deze drie verschillende golfsteilheden is afhankelijk van het type golfspectrum. In de Rock Manual (CETMEF et al., 2007, page 367) is dit op basis van Goda (1988, 2000), samengevat voor een Pierson-Moskowitz (PM) spectrum en een JONSWAP spectrum. Dit is weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Verhouding tussen T_z en T_p zoals weergegeven in de Rock Manual (CETMEF et al., 2007) op basis van Goda (1988, 2000).

	PM	JONSWAP
$(T_z/T_p)_{\min}$	0.71	0.79
$(T_z/T_p)_{\max}$	0.82	0.87
$(T_z/T_p)_{\text{mean}}$	0.77	0.83
$(T_p/T_z)_{\text{mean}}$	1.31	1.20

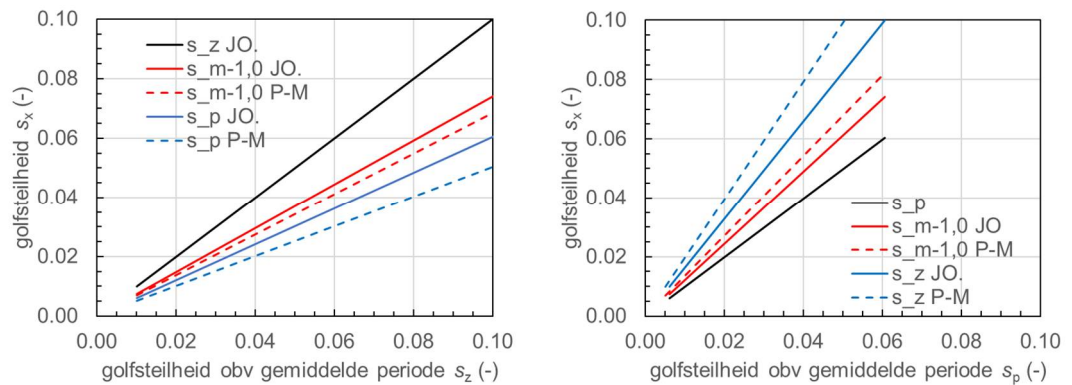
In Dingemans (1987, tabel G.3) zijn de verhoudingen analytisch bepaald. Die waarden zijn weergegeven in Tabel 2. Merk op dat wanneer de spectrale staart is afgekapt, zoals voor gemeten of met een model berekende spectra het geval is, de verhoudingen afwijkend kunnen zijn van die in Tabel 2.

Tabel 2: Verhouding tussen T_p en $T_{m-1.0}$ enerzijds en T_p en T_z anderzijds, zoals weergegeven in Dingemans (1987). Tussen haakjes de verhouding tussen de steilheden gebaseerd op deze periodematen.

	PM $\gamma = 1$	JONSWAP $\gamma = 3.3$	JONSWAP $\gamma = 6$	JONSWAP $\gamma = 20$
$T_p / T_{m-1.0}$ ($s_{m-1.0} / s_p$)	1.166 (1.36)	1.107 (1.23)	1.080 (1.17)	1.040 (1.08)
T_p / T_z (s_z / s_p)	1.408 (1.98)	1.286 (1.65)	1.222 (1.49)	1.116 (1.25)

In het vervolg van dit rapport worden de verhoudingen welke door Dingemans (1987) zijn gegeven aangehouden. Dit aangezien er in Dingemans (1987) een analytische afleiding is toegepast en de analyse van Goda is uitgevoerd op basis van data-analyse en numerieke simulatie.

Nu is het mogelijk om de verhouding tussen de verschillende golfsteilheden (s_p , $s_{m-1,0}$ en s_z) te bepalen. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Verhouding tussen s_p , $s_{m-1,0}$ en s_z bij een JONSWAP ("JO.") spectrum met $\gamma = 3.3$ en Pierson-Moskowitz ("P-M") spectrum). Op de x-as staat de golfsteilheid s_z (links) en s_p (rechts) op basis van een JONSWAP spectrum.

Zoals in Figuur 1 valt te zien, is er een aanzienlijk verschil tussen de waarden van de verschillende definities van de golfsteilheden. Zo is bijvoorbeeld "een 10% golfsteilheid" o.b.v. s_z bij een Pierson-Moskowitz spectrum "een 5% golfsteilheid" o.b.v. s_p (linkerplot van Figuur 1, onderbroken blauwe lijn).

2.3 Beperking golfsteilheid: Breken van golven op diep water

De maximale golfsteilheid en maximale golfhoogte zijn sterk verweven. De golfhoogte wordt beperkt wanneer de golf te steil wordt en gaat breken. In voorliggende paragraaf wordt het breken van golven op diep water beschreven. In de volgende paragraaf wordt het breken van golven in ondiep water beschreven.

Onderstaande drie alinea's bevatten een samenvatting welke is gebaseerd op Holthuijsen (2007, Section 6.4.5):

Breken van golven op diep water ('whitecapping') is een relatief slecht begrepen mechanisme, is niet goed gedefinieerd en het meten van het proces is lastig. Miche (1944) heeft theoretisch aangetoond dat de maximale golfhoogte H_{max} voor een golf is gelimiteerd doordat de deeltjes-snelheid in de top van de golf niet groter kan zijn dan de voortplantingssnelheid van de golf. Wanneer dit verder wordt uitgewerkt, wordt de volgende formule verkregen:

$$H_{max} \approx 0.14L \left(\tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \right) \quad (2.7)$$

Dit staat ook wel bekend als het Miche-criterium voor individuele golven. Voor diep water resulteert dit in een maximum golfsteilheid van een individuele golf van $s_{max} = H_{max}/L \approx 0.14$.

Op basis van observaties op zee (diep water) blijkt het breken van een individuele golf vrijwel onafhankelijk te zijn van de golfsteilheid maar lijkt H/L wel een maximum te hebben. Tevens lijkt de variatie van energie over de frequenties en de kortkammigheid ten minste zo belangrijk te zijn als de golfsteilheid. Het percentage brekende golven op diep water lijkt, op basis van metingen, sterk afhankelijk te zijn van de windsnelheid. Het dissipatieve effect van whitecapping op golven is lokaal zeer niet-lineair maar gemiddeld is deze invloed beperkt. In golfmodellen is whitecapping daarom weergegeven als een bron in de energiebalans van de golven.

2.4 Beperking golfsteilheid: breken van golven op ondiep water

De golfhoogte op ondiep water is afhankelijk van verschillende aspecten waaronder:

- de waterdiepte d
- de golfsteilheid s
- de taludhelling van het voorland ($\cot\alpha$).

Een overzicht van verschillende formuleringen van de maximale optredende golfhoogte is weergegeven in Holthuijsen (2007). Veelal wordt dit geformuleerd als een ratio tussen de maximale golfhoogte H_{\max} (maximum over individuele golven) en de waterdiepte d : $\gamma = H_{\max}/d$. Battjes en Stive (1985) geven bijvoorbeeld een formule waarbij de waarde van deze ratio afhankelijk is van de golfsteilheid:

$$\gamma = \frac{H_{\max}}{d} = 0.5 + 0.4 \cdot \tanh(33 \cdot s_0) \quad (2.8)$$

waarbij

$$s_0 = \frac{H_{RMS, \text{diepwater}}}{L_{\text{piek, diepwater}}} \quad (2.9)$$

de diep-water steilheid op basis van de piekperiode betreft, uitgedrukt in termen van de RMS golfhoogte, m.a.w. $H_{RMS} = H_{m0}/\sqrt{2}$ en dus $s_0 = s_p/\sqrt{2}$ of $s_0 = 0.575 \cdot s_{m-1.0}$ (voor een JONSWAP spectrum met $\gamma=3.3$), ofwel

$$\gamma = \frac{H_{\max}}{d} = 0.5 + 0.4 \cdot \tanh(19 \cdot s_{m-1.0}) \quad (2.10)$$

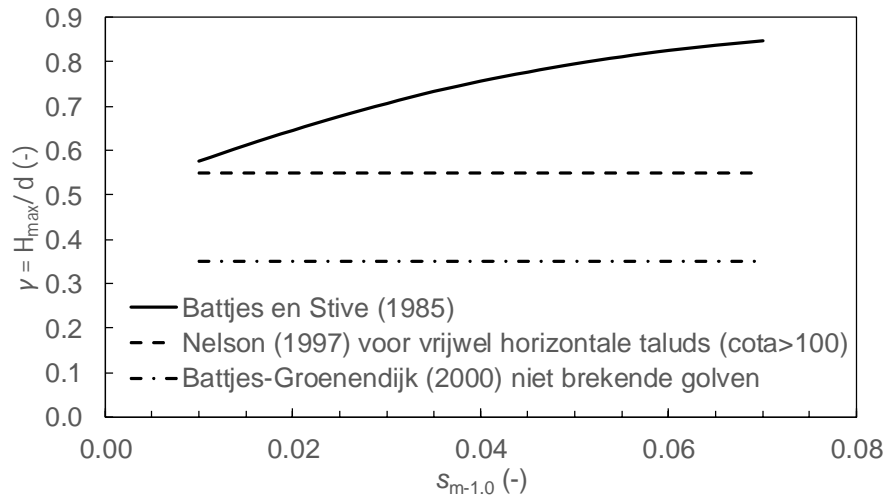
Volgens Nelson (1997) is bij een vrijwel horizontale bodem ($\cot\alpha > 100$) de verhouding H_{\max}/d niet hoger dan 0.55.

Er zijn diverse formuleringen die de kans op het overschrijden van een golfhoogte in ondiep water berekenen. De formulering van Battjes en Groenendijk (2000) is daar een voorbeeld van. Deze aanpak maakt gebruik van twee vergelijkingen: een vergelijking voor gebroken golven en een vergelijking voor golven welke niet zijn gebroken. De overgang van deze vergelijking ligt bij de golfhoogte (van individuele golf) waarbij breken optreedt, genoemd H_{tr} . H_{tr} is volgens die methode afhankelijk van de helling van het voorland en de diepte, maar niet van de golfsteilheid, en wordt als volgt bepaald:

$$\frac{H_{tr}}{d} = 5.8 \tan \alpha + 0.35 \quad (2.11)$$

Bij een horizontaal talud kan er volgens deze aanpak dus een maximale waarde van $H/d = 0.35$ optreden zonder dat er breken plaatsvindt. Bij een oplopende bodem kan deze waarde hoger zijn.

Het verschil tussen de twee hierboven beschreven methoden (enerzijds Battjes-Stive en Nelson en anderzijds Battjes-Groenendijk) is de definitie van de maximum golfhoogte. Bij de eerste aanpak worden alle individuele golven (brekende en niet brekende golven) beschouwd, bij de tweede aanpak worden alleen de niet-brekende golven beschouwd.



Figuur 2: Methode van Battjes en Stive welke is omschreven als functie van $s_{m-1.0}$ en H_{m0} (ipv s_p en H_{RMS})

Bovenstaande scheiding tussen de maximum optredende golf bij alle golven (brekende en niet-brekende golven) en de maximum optredende golfhoogte bij niet brekende golven is van belang voor een fenomenologisch begrip van de maximum optredende golfsteilheid. In het eerste geval is er wellicht sprake van een hogere golfsteilheid op een bepaalde locatie maar is het aannemelijk te veronderstellen dat deze golf enige afstand verder (orde 0.5 tot 1 golflengte) gebroken is en de golfhoogte, en daarmee de golfsteilheid, is afgenomen.

3 Bovengrenzen golfsteilheid

In dit hoofdstuk gaan we kort in op enkele publicaties over de maximale golfsteilheid. Vervolgens benoemen we enkele analyses van meetresultaten en gaan na in hoeverre de gevonden resultaten relevant zijn voor Nederlandse situaties, in het bijzonder voor een waterkering.

3.1 Literatuur

Voor een individuele golf kan de golfsteilheid worden uitgedrukt in H/L of in ka , met a de golfamplitude en k het golfgetal. In de literatuur zie je beschouwingen van beide terugkomen. Wanneer we definiëren $a = H/2$ en $k = 2\pi/L$, dan geldt $ka = \pi H/L$. De maximale golfsteilheid voor individuele golven is eind 19^e eeuw al analytisch afgeleid (Stokes, 1880; Michell, 1893),

$$ka \sim 0.44 \quad (3.1)$$

met andere woorden $H/L \sim 0.14$. Deze factor herkennen we ook in het Miche criterium (Miche, 1944). Velen geloven echter niet dat een dergelijke steilheid van 0.14 realistisch is op diep water. Slechts in uitzonderlijke gevallen, bij focussing van golven of bij het optreden van modulaire instabiliteiten is een dergelijke bovengrens haalbaar, zie bijvoorbeeld Babanin et al. (2007).

We zijn echter niet zozeer geïnteresseerd in de golfsteilheid van een enkele golf, maar in de gemiddelde golfsteilheid. Deze hebben we in Hoofdstuk 2 gedefinieerd als het quotiënt van de significante golfhoogte en de golf lengte geassocieerd met of de gemiddelde periode T_z of $T_{m-1,0}$ of de piekperiode T_p , hier weergegeven als s_z , $s_{m-1,0}$ resp. s_p .

Arena et al. (2010) geeft een kort overzicht van studies naar maximale gemiddelde steilheden op diep water. Battjes (1972) en Draper (1976) stelden een bovengrens van gemiddelde golfsteilheid op basis van T_z voor van 0.04 – 0.05. Bjerke et al. (1990) en Bitner Gregersen et al. (1998) kwamen tot waarden voor s_z van 0.06 – 0.07 op het continentale plat van Noorwegen (de lange deininggolven voelen hier de bodem). Carter et al. (1986) beschouwde H_s en T_z van de JONSWAP metingen om gemiddelde steilheden als functie van windsnelheid en strijklengte af te leiden. Voor volledig ontwikkelde zeegang vonden zij een maximale steilheid van 0.05. Voor groeiende (jongere) golven vonden zij over het algemeen grotere steilheden tot 0.06. Voor strijklengte beperkte golven bleek de maximale golfsteilheid fors groter, namelijk 0.09. Met andere woorden, op diep water zijn de gemiddelde steilheden gelimiteerd tot 0.06, op het continentale plat tot 0.07, en voor strijklengte-gelimiteerde golven zelfs tot 0.09.

Onder de aanname van een JONSWAP spectrum heeft Arena et al. (2010) theoretische waarden afgeleid voor de gemiddelde steilheid, zowel op basis van T_p als op basis van T_z , in termen van de JONSWAP parameters α en γ . De bovengrens voor s_p wordt verkregen voor $\alpha = 0.022$ en $\gamma = 6$ (sterk gepiekt spectrum) en bedraagt 0.06. Bij een verhouding van $s_z/s_p = 1.49$ conform Tabel 2 is dit omgerekend in $s_z = 0.089$. De sterk gepiekte spectra zijn karakteristiek voor jonge golven, veelal voorkomend in strijklengte beperkte situaties. In die zin strookt dat met de bevindingen van Carter et al. (1986), zoals boven genoemd.

Bovenstaande is samengevat in Tabel 3.

Tabel 3: Overzicht maximum golfsteilheid

Bron	s_z	s_p	toelichting
Battjes (1972) en Draper (1976)	0.04-0.05		
Bjerke et al. (1990)	0.06-0.07		Continentaal plat, Noorwegen
Carter et al. (1986)			
Volledig ontwikkelde zeegang	0.05		JONSWAP metingen
Jonge zeegang	0.06		JONSWAP metingen
Strijklengte beperkte golven	0.09		JONSWAP metingen
Arena et al. (2010)	0.089*	0.06	JONSWAP theoretisch ($\alpha = 0.022$, $\gamma = 6$)

* s_z is omgerekend conform de s_p/s_z verhouding, zoals weergegeven in Tabel 2

3.2 Veldmetingen

In onderstaande paragrafen bespreken we een aantal meetresultaten waarbij de golfsteilheid geanalyseerd is. Uiteraard is het zo dat je met meetfouten te maken hebt. Deze hebben weer een effect op de golfsteilheid. Bij stappenbaak/capstaafmetingen leidt het opkloppen van het water tot te hoge H_{m0} en golfsteilheid. Dit speelt met name bij meetpalen zonder uithouders, die in getijwateren zijn geplaatst (in Nederland bijvoorbeeld bij Petten, Waddenzee en Westerschelde).

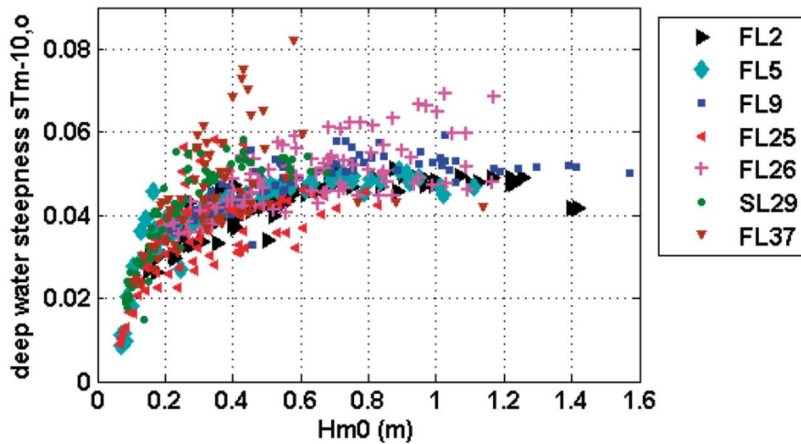
Bij boeimetingen is, gezien de vaak lage skewness van het meetsignaal, juist sprake van een potentiële onderschatting van H_{m0} (en mogelijk de steilheid), omdat een boei de neiging heeft om kortkammige golf toppen heen te lopen, in plaats van er overheen.

Daarnaast zijn de golfsteilheid en ook sommige golfperiodematen sterk afhankelijk zijn van het gebruikte spectrale integratiebereik en eventueel een aanname van de spectrale staart. Een te kort integratiebereik, waar je bij korte golven bij korte strijklengtes in de zoete wateren al snel mee te maken hebt, leidt tot iets te lage H_{m0} , en afhankelijk van de golfperiodemaat tot iets, en in het geval van T_{m02} (en dus T_z) veel, te hoge golfperiodes. Dit leidt tot te lage golfsteilheden.

Dergelijke fouten worden verder niet in onderstaande beschouwing meegenomen.

3.2.1 Analyse van metingen op het IJsselmeer, Noordzee en Westerschelde

In Bottema (2007) zijn golfhoogtemetingen op het IJsselmeer beschreven. Ook zijn van deze metingen de golfsteilheden uitgewerkt. Hierbij heeft Bottema twee definities gehanteerd. Een diepwatergolfsteilheid op basis van H_{m0} en $T_{m-1.0}$ en een 'werkelijke' golfsteilheid waarbij de lokale golflengte wordt gehanteerd. In het voorliggende rapport wordt de eerste definitie verder beschouwd, in lijn met de definities in Hoofdstuk 2. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.



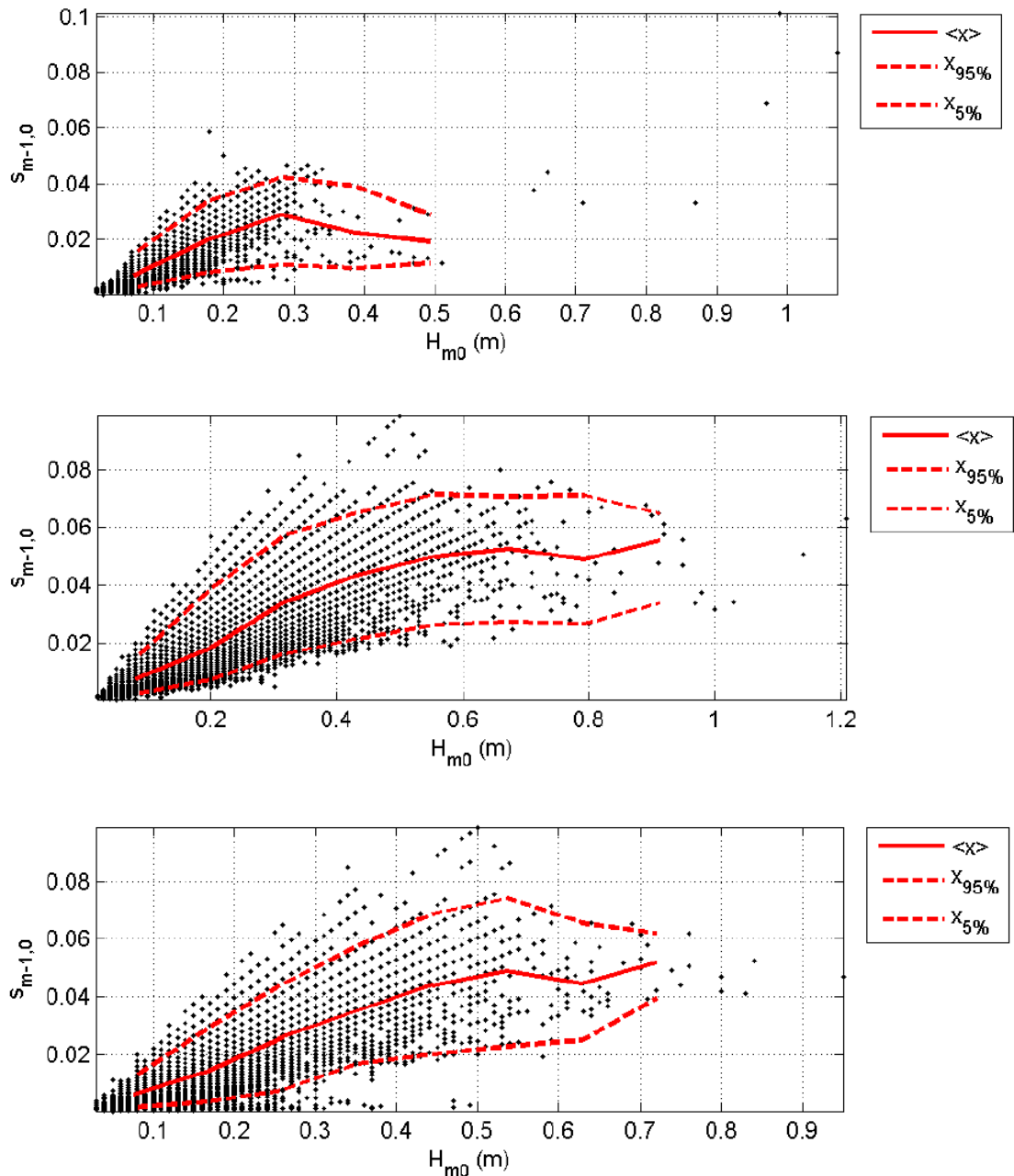
Figuur 3: Diep water golfsteilheid als functie van de golfhoogte, uit metingen op het IJsselmeer (bron: Bottema, 2007)

De lage golfsteilheden bij lage golfhoogtes zijn volgens Bottema (2007) een artefact als gevolg van het eindige spectrale integratiebereik waarmee de golfparameters bepaald zijn (samenhangend met de samplefrequentie die veelal niet meer dan 4 Hz was). De daadwerkelijke golfsteilheid voor lagere waarden van H_{m0} zou hoger moeten zijn, wat ruwweg resulteert in gemeten golfsteilheden van 0.04 tot 0.06. Bij twee locaties lijkt de golfsteilheid echter hoger te zijn dan 0.06 (i.e. FL26 en FL37). Beide locaties liggen dichtbij de Houtribdijk. Bij de veelvoorkomende zuid tot westen winden zijn de strijklengtes kort en de golven jong. Dit maakt dat de golven over het algemeen steiler worden dan op de andere locaties.

Ook Bottema en Van Vledder (2009, Figuur 9) en Bottema en Van Vledder (2008, Figuur 4) melden golfsteilheden s_p (bij korte strijklengte) van boven de 7%. In het laatste geval betreft het metingen bij Rotterdamse Hoek (FL2) en treden de grote steilheden op bij oostelijke winden, en dus korte strijklengtes. Nadien zijn ook bij de Wieringermeerdijk nieuwe metingen uitgevoerd. De palen FL49 en FL48 staan op respectievelijk 800 en 1500 m van de dijk. Over de korte strijklengtes in noordoostelijke richting zijn golfsteilheden gevonden (gedefinieerd als H_{m0}/L_p met L_p de golfengte behorend bij de piekperiode) tot ruim 8% (zie Deltares, 2015).

Caires (2012) heeft metingen op de Noordzee, Westerschelde en Oosterschelde geanalyseerd. Op de Noordzee zijn twee boeien beschouwd, Schouwenbank (SWB) en Scheur-West (SCW). De golfsteilheid s_p bij SWB is voor de meeste gevallen lager dan 0.05. De 95% percentiel van de data is 0.04. De golfsteilheid $s_{m-1,0}$ is in de meeste gevallen lager dan 0.06. Voor SCW vallen de maximale golfsteilheden iets lager uit. Deze bevindingen zijn in lijn met de bovengrens die Carter et al. (1986) aangeven voor volgroeide zeegang.

In de Westerschelde zijn metingen tussen 1999 en 2010 beschouwd op drie meetlocaties; Hoofdplaat (HFP1), Pas van Terneuzen (PVT1) en Bath (BAT1). Als voorbeeld is in onderstaande figuur de golfsteilheid $s_{m-1,0}$ als functie van H_{m0} weergegeven voor alle locaties. Waar de golfsteilheden halverwege de Westerschelde bij HFP1 nog beperkt van grootte zijn, nemen de 95% percentielen verder in de Westerschelde (PVT1 en BAT1) toe tot 0.07. Incidentele waarnemingen laten waarden zien tot ruim 0.09. De maxima worden verkregen voor de relatief jonge golven met een beperkte strijklengte. Ook dit komt overeen met de bevindingen in Carter et al. (1986). De metingen bij KEET in de Oosterschelde laten een vergelijkbaar beeld zien.



Figuur 4: Overzicht van gemeten H_{m0} vs. $s_{m-1,0}$ bij HFT1 (boven), PVT1 (midden), BAT1 (onder), in de Westerschelde. Data van 1999-2010 (bron: Caires, 2012).

3.2.2 Metingen buiten Nederland

Ten behoeve van de modellering van golfbreken op steilheid heeft Toffoli et al. (2009) een statistische analyse van een grote hoeveelheid individuele golven uit diverse datasets uitgevoerd. Hij heeft data van metingen van oppervlakte uitwijkingen in laboratoria en het veld zijn verzameld. Daarbij is een brede variatie van golfcondities beschouwd. Ondanks de grote variatie werden consistente resultaten verkregen. In termen van steilheid van de voorkant van een golf werd een maximale waarde voor ka van 0.55 gevonden, hetgeen meer is dan de Stokes limiet van 0.44 voor stationaire golven. Steilheid van de voorkant van een golf is een van de definities, naast steilheid 'crest-front' en 'crest-back'. In deze studie richten we ons op de totale golfsteilheid, welke op diverse manieren uitgedrukt kan worden, zie voorgaande paragrafen. De vele referenties in Toffoli et al. (2009) richten zich op individuele golven. Dit heeft dus hier niet onze interesse.

Daarnaast zijn er diverse publicaties van statistische verdelingen van golfsteilheden, zoals Tayfun (2006) en Myrhaug en Rue (1993). Deze verdelingen zijn gebaseerd op metingen van individuele golven. De maximale gemiddelde steilheid wordt daarin helaas niet getoond.

We hebben in de beperkte beschikbare tijd geen papers gevonden waarin resultaten van gemiddelde golfsteilheden op basis van metingen worden getoond.

3.3 Vertaling naar voor Nederland relevante situaties

In paragrafen 3.1 en 3.2 hebben we een kort overzicht gegeven van wetenschappelijke bronnen omtrent theoretische en gemeten bovengrenzen voor de golfsteilheid. De grootste steilheden werden gevonden voor golven met korte strijklengtes.

Helaas zijn bovengenoemde beschouwingen beperkt relevant voor de Nederlandse wateren. Voor de kust hebben we een hellende bodem, in de estuaria platen en geulen en worden de golfcondities bepaald door de deze bodemgeometrie. Ook de meren zijn dermate ondiep dat ze eerder diepte-beperkend dan strijklengte-beperkend zijn. Uitzondering hierop vormen de rivieren en brede wateren van de delta's. Daarnaast steilen golven op in aanwezigheid van stroming, hetgeen uiterst relevant is voor kust en estuaria (getijde- en windgedreven stroming) en op rivieren, en in mindere mate voor de meren (windgedreven stroming). Over dergelijke situaties hebben we in de literatuur helaas niets gevonden. Dat wil echter niet zeggen dat deze informatie niet te verkrijgen is. In de afgelopen 15 jaar zijn er uitgebreide meetcampagnes geweest voor de kust van Petten, in de Waddenzee en Westerschelde en zijn zelfs aanvullend op de metingen in Bottema (2007), extra metingen gedaan in het IJsselmeer. Laatstgenoemde metingen, bij de Wieringermeerdijk, gaan met name in op het effect van korte strijklengtes op de golfgroei. De metingen op de Waddenzee kunnen ons inzicht geven in het effect van ondieptes en geulen, inclusief stroming, op de golfsteilheid. Een nadere analyse van de Petten metingen toont de opsteiling van de golven op een hellende (kust)bodem. Zoals Caires (2012) dat heeft gedaan voor de golfmetingen op de twee Noordzee boeien en vier boeien in Ooster- en Westerschelde, zo kan ook de golfsteilheid voor de bovengenoemde metingen worden uitgevoerd. Daarmee verkrijgen we een scherper beeld van de maximale steilheden voor de voor Nederland relevante situaties.

3.4 Conclusie

De vraag is of de steilheden $s_{m-1,0}$ van meer dan 7% voor de Afsluitdijk, volgend uit berekeningen voor bekledingen, en ruim 9% (zij het gebaseerd op lokale golflengte $L_{m-1,0}$) voor het traject Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat bij HBN berekeningen, in werkelijkheid voor zouden kunnen komen. In de literatuur zijn diverse referenties gevonden die aangeven dat de steilheden s_z niet veel groter worden dan 7% (Tabel 3). Onder de aanname van een JONSWAP spectrum met peak enhancement factor $\gamma = 3,3$ geldt dat $s_{m-1,0}$ dan maximaal 5% is en s_p maximaal 4% (volgens Tabel 2). Echter, deze conclusie is gebaseerd op analyses op open, veelal diep water. Wanneer golven strijklengte-beperkt zijn, is de maximale steilheid groter. De golfsteilheid s_p kan oplopen tot 6%. Afhankelijk van de spectrale vorm is de maximale $s_{m-1,0}$ dan in de orde 7-8 %, hetgeen in de buurt komt bij de grote strijklengtes verkregen bij bovengenoemde ontwerpprojecten. Echter, de golfcondities langs de Afsluitdijk en het traject Lauwersmeerdijk-Vierhuizergat zijn nauwelijks strijklengte-beperkt te noemen.

Naast beperking van golfgroei door strijklengtes heeft ook de bodemgeometrie een groot effect op de golfsteilheid. Een hellende bodem voor de kust, een stelsel van geulen en platen en de aanwezigheid van stroming maken dat de golfsteilheid $s_{m-1,0}$ hoger kan uitkomen dan de 5% op open, diep water. De maximale steilheid zal lokaal sterk kunnen verschillen. Helaas hebben we hierover geen informatie in de literatuur gevonden, maar de vele golfdata (Petten, Amelander Zeegat, Oostelijke Waddenzee) maken dat een analyse op golfsteilheid, aanvullend op Bottema

(2007) voor het IJsselmeer en Caires (2012) voor de Westerschelde en Oosterschelde ons het gewenste inzicht kan geven.

4 Berekenen van golfsteilheden

4.1 Grote berekende golfsteilheden

Hydraulische belastingen voor de beoordeling of ontwerp van primaire keringen worden op probabilistische wijze bepaald met Riskeer of Hydra-NL. De hydraulische belastingen zijn gegeven in termen van waterstanden en/of golfparameters golfhoogte, golfperiode en golfrichting. Voor zowel de Afsluitdijk (Deltares, 2017a) als de strekking Lauwersmeerdijk-Vierhuizen (Noorderzijlvest, 2020) zijn hydraulische belastingen bepaald, waarbij de golfsteilheden groot zijn. In de voorbereiding van fysische modelproeven voor bekledingen is gebleken dat de in Deltares (2017a) afgeleide hydraulische belastingen (afgeleid met Hydra-NL, incl. onzekerheden) leiden tot golfsteilheden die groter zijn dan 7% ($s_{m-1,0}$) of 4% (s_p). Voor Lauwersmeerdijk-Vierhuizen worden bij de berekening van het Hydraulische Belastingniveau (HBN) golfsteilheden ($H_{m0}/L_{m-1,0}$ met $L_{m-1,0}$ de golflengte gebaseerd op de lokale $T_{m-1,0}$) verkregen tot 9%.

De hoge golfsteilheden worden geweten aan een drietal aspecten:

1. Ontbreken van essentiële fysica in SWAN
2. Onafhankelijk veronderstellen van modelonzekerheden
3. Grote discretisatie stochastwaarden

Deze drie aspecten worden in onderstaande paragrafen behandeld. Tenslotte gaan we ook nog in op de golfsteilheden die worden bereikt met het gebruik van de golfgroeikromme van Brettschneider.

4.2 Ontbrekende fysica in SWAN

SWAN wordt gebruikt om de statistiek van wind en zeewaterstand te vertalen naar lokale golfstatistiek. Met name voor de Waddenzee zijn in de afgelopen 15 jaar significante verbeteringen aan SWAN doorgevoerd. Dat neemt niet weg dat niet alle fysica zondermeer correct in SWAN zit, sterker nog, enkele fysische aspecten ontbreken. We noemen de belangrijkste.

In het kader van SBW is aangetoond dat SWAN de doordringing van Noordzee golven in de Waddenzee onvoldoende voorspelt (Van der Westhuysen et al., 2012). Daar zijn meerdere redenen voor aangedragen. Groeneweg et al. (2015) toonden aan dat richtingsgespreide golven zorgen voor generatie van laag-frequente golven, met een andere voortplantingsrichting dan de hoofdcomponenten. Dit is niet gemodelleerd in SWAN. De onderschatting van laag-frequente golven kan leiden tot overschatting van de gemiddelde golfsteilheid.

Op een hellende bodem interacteren golven met elkaar en worden hoog-frequente en laag-frequente golfcomponenten gegenereerd. In dit zogenoemde triad-proces (driegolfwisselwerkingen) wordt de generatie van laag-frequente golven in SWAN niet meegenomen, hetgeen leidt tot een overschatting van de golfsteilheid. Dit is zeer relevant voor de kustgebieden langs de Noordzee.

Recentelijk heeft Smale (2018, niet gerapporteerd) laten zien dat de thans gehanteerde resolutie onvoldoende is om refractie van golven op bodemhellingen en stromingsgradiënten correct te modelleren. Omdat de Waddenzee, en in mindere mate de Westerschelde en Oosterschelde, een complexe bodemgeometrie hebben met geulen en platen, zal SWAN met name de laag-frequente golfenergie niet correct voorspellen. Veelal is sprake van een onderschatting van deze golfenergie, wat ook weer leidt tot een overschatting van de gemiddelde golfsteilheid.

Bovenstaande bevindingen hebben betrekking op zowel operationele als extreme omstandigheden. Caires (2012) heeft naast de metingen (zie Par 3.2.1) ook SWAN berekeningen nader

geanalyseerd. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen windsnelheden in de meetrange enerzijds, dus tot 25 m/s, en anderzijds alle in de SWAN berekeningen beschouwde windsnelheden, dus oplopend tot 40 m/s. In het laatste geval zijn de 95% percentiel waarden 20% hoger dan wanneer alleen de windsnelheden tot 25 m/s worden beschouwd. Echter, ook wanneer alleen de lagere windsnelheden worden beschouwd, ligt de 95% percentiel waarde van de golfsteilheid S_p of $S_{m-1,0}$ nog fors hoger (factor 1,5 - 2) dan voor de metingen.

4.3 Probabilistische berekeningen

4.3.1 Onafhankelijk veronderstellen van modelonzekerheden

In zowel Riskeer als Hydra-NL worden statistische en modelonzekerheden expliciet meegenomen. Modelonzekerheden zijn het gevolg van aannames in o.a. de modellen WAQUA, SWAN en Bretschneider. In de probabilistische modellering zijn aparte stochasten gedefinieerd voor de modelonzekerheid in waterstand, golfhoogte en golfperiode. In WBI2017 is verondersteld dat deze stochasten onafhankelijk zijn. Daarmee kan het voorkomen dat in een berekening een stochastische realisatie van de modelonzekerheid voor golfhoogte groot is, terwijl deze voor de golfperiode nihil is. Dat betekent dat de resulterende golfhoogte als het ware een forse toeslag krijgt en de golfperiode niet, met een grotere steilheid tot gevolg. In werkelijkheid zijn de modelonzekerheden wel gecorreleerd. Een hoge realisatie van de modelonzekerheid in golfhoogte gaat dan vaak gepaard met een hoge realisatie van de modelonzekerheid in golfperiode.

In Noorderzijlvest (2020) is aangetoond dat de aanname van onafhankelijkheid van genoemde stochasten heeft geleid tot grote steilheden. De aanname van een realistische correlatie van 0.37, zoals afgeleid in Deltares (2018), leidt ertoe dat steilheden ongeveer 1 procentpunt (bijvoorbeeld van 8% naar 7%) afnemen. Dat nog steeds hoge steilheden worden verkregen heeft o.a. te maken met de onvolkomenheden in o.a. SWAN (zie vorige paragraaf). Ook voor de Afsluitdijk droeg de aanname van onafhankelijkheid bij aan de grote steilheden (Deltares, 2017a). Echter, daar werden de SWAN resultaten wel voldoende betrouwbaar geacht. De bodemgeometrieën voor de Afsluitdijk en voor het traject Lauwersmeerdijk-Vierhuizen zijn dan ook sterk verschillend.

Het gebruik van de golfmodellen SWAN en Bretschneider maakt dat er een fysische relatie is tussen de berekende golfhoogte en golfperiode enerzijds, maar anderzijds ook tussen golfhoogte en waterdiepte. Omdat modelonzekerheden achteraf worden verdisconteerd zonder daarbij de correlatie tussen de modelonzekerheden in golfhoogte en waterstand (waterdiepte) in rekening te brengen, kan het dus ook voorkomen dat een golfhoogte verhoogd wordt, terwijl dat voor de waterstand en dus de resulterende waterdiepte, niet het geval is. Daarmee is fysisch gezien de golfhoogte te groot voor de bijbehorende waterdiepte, omdat in werkelijkheid breking opgetreden zou zijn.

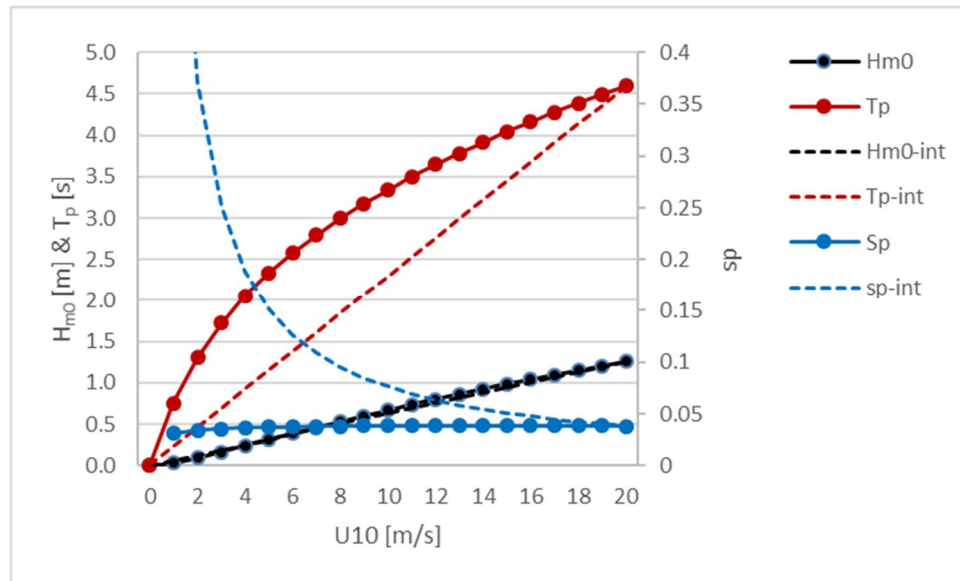
4.3.2 Grove discretisatie stochastwaarden

In de vertaling van statistiek van basisstochasten naar lokale belastingen wordt gebruik gemaakt van een vertalingsmatrix. Voor een matrix van stochastwaarden worden WAQUA, SWAN of Bretschneider berekeningen uitgevoerd. Zo worden voor bijvoorbeeld de Waddenzee en Westerschelde windsnelheden van 20, 25, 30, 35 en 40 m/s beschouwd. In de probabilistische berekeningen worden belastingen voor tussengelegen basisstochastwaarden verkregen op basis van interpolatie.

Op zich is een resolutie van de windsnelheid van 5 m/s voldoende voor het verkrijgen van nauwkeurige resultaten uit de probabilistische berekeningen. Echter, wanneer de maatgevende windsnelheid laag is, dat wil zeggen tussen 0 en 20 m/s, dan moet geïnterpoleerd worden tussen de golfcondities bij 0 en 20 m/s. En dat kan leiden tot forse onnauwkeurigheden. Lage maatgevende windsnelheden worden vooral verkregen voor berekeningen voor laag op het talud liggende bekladingen in windgedomineerde gebieden (met name kust, estuaria en delen van de meren). Ook

op Bovenrivieren en overige delen van de meren zijn de maatgevende windsnelheden voor golfoverslag laag, in verband met de dominantie van de rivierafvoer respectievelijk meerpeil. Merk op dat de laagst beschouwde windsnelheid bij rivierberekeningen 5 m/s is.

In Deltares (2017b) zijn resultaten van Hydra-NL voor de bekledingen van de Veerhaven van Perkpolder nader geanalyseerd. In Figuur 5 zijn de resultaten van Bretschneider berekeningen getoond voor een windsnelheid van 0 - 20 m/s, een strijklengte van 16 km en totale waterdiepte van 6,5 m. De steilheid s_p is 0.03 – 0.04. Tevens is de significante golfhoogte en piekperiode berekend door te interpoleren tussen de waarden verkregen bij windsnelheden van 0 en 20 m/s. Het verschil tussen de berekende piekperiode bij gegeven windsnelheid (doorgetrokken lijn met balletjes) en de geïnterpoleerde piekperiode (gestreepte rode lijn) is groot. De resulterende waarden voor s_p zijn ook geplot. Door de enorme interpolatiefout in de golfperiode neemt de golfsteilheid zeer irrealistische waarden aan.



Figuur 5: Resultaten Bretschneider met fijne en grove discretisatie van de basisstochast windsnelheid voor de Veerhaven van Perkpolder (bron: Deltares, 2017b).

Dit is dus alleen relevant in het bereik onder de laagst beschouwde waarde voor de windsnelheid. Voor de kustgebieden betreft dit 0 – 20 m/s. Wanneer maatgevende windsnelheden hoger zijn, dan is er geen probleem.

4.4 Empirische golfgroeikromme van Bretschneider

Voor de kustgebieden en de brede binnenwateren (meren en delen van het Benedenrivierengebied) wordt SWAN gebruikt. Voor de smalle wateren worden lokale golfcondities verkregen met behulp van de empirische golfgroeikromme van Bretschneider.

Onderstaande formules in dit rapport zijn afkomstig uit Holthuijsen (1980), waarbij de golfhoogte en periode zijn uitgedrukt als functie van dimensieloze waterdiepte en strijklengte.

$$\tilde{H}_s = 0.283v_1 \tanh \left[\frac{0.0125\tilde{F}^{0.42}}{v_1} \right], \quad v_1 = \tanh[0.53\tilde{d}^{0.75}]$$

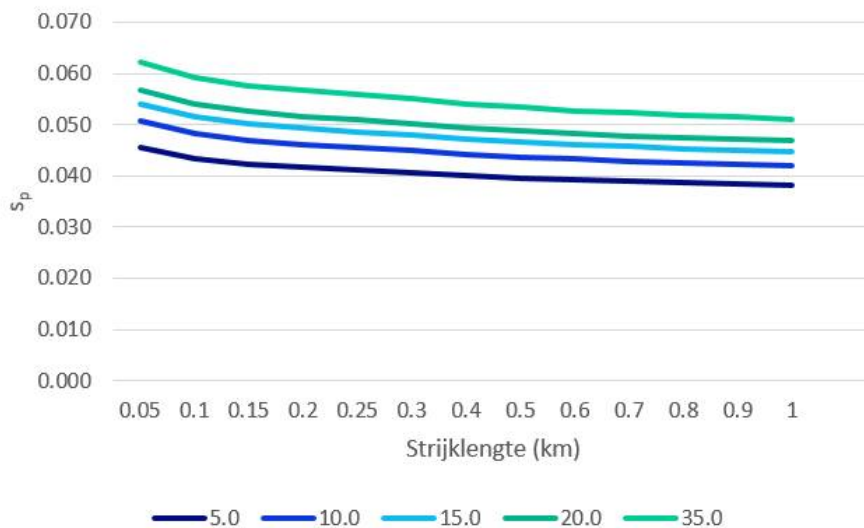
$$\tilde{T}_s = 2.4\pi v_2 \tanh \left[\frac{0.077\tilde{F}^{0.25}}{v_2} \right], \quad v_2 = \tanh[0.833\tilde{d}^{0.375}].$$

De dimensieloze parameters worden geschaald met de windsnelheid en de zwaartekrachtversnelling g :

$$\tilde{H}_s = \frac{gH_s}{U_{10}^2}, \quad \tilde{T}_s = \frac{gT_s}{U_{10}}, \quad \tilde{d} = \frac{gD}{U_{10}^2}, \quad \tilde{F} = \frac{gF_{eff}}{U_{10}^2}$$

waarin H_s de significante golfhoogte, T_s significante golfperiode, d waterdiepte, F_{eff} effectieve strijklengte (in m) en U_{10} windsnelheid. De piekperiode wordt berekend door de significante golfperiode met 1,08 te vermenigvuldigen.

Als voorbeeld hebben we op basis van bovenstaande vergelijkingen in Figuur 5 de steilheid s_p als functie van de strijklengte geplot voor een vijftal windsnelheden bij een waterdiepte van 10 m. Andere waterdieptes leiden niet tot een wezenlijk andere beeld. De grootste steilheden worden bij de kortste strijklengtes gevonden, tot 0.06. Dit is opnieuw in overeenstemming met Carter et al. (1986). Deze bevinding is ook in lijn met Bottema en Van Vledder (2009, Figuur 9). Golfsteilheden s_p op basis van metingen in het IJsselmeer zijn vergeleken met golfsteilheden die berekend zijn met golfgroeikrommes van Bretschneider, Kahma en Calkoen (1992) en Young en Verhangen (1996). Op laatstgenoemde na worden golfsteilheden s_p bereikt van 0.07 voor de kortste dimensieloze strijklengtes. OP de smalle wateren in Nederland is de strijklengte over het algemeen kort. Dat betekent dat ook daar rekening gehouden moet worden met berekende golfsteilheden die aan de hoge kant zijn.



Figuur 6: Golfsteilheid s_p bij korte strijklengtes tot 1 km, een waterdiepte van 10 m en windsnelheden van 5 – 35 m/s.

4.5 Conclusie

Ondanks dat we nog geen fysische bovengrenzen voor de golfsteilheid voor bovengenoemde projecten hebben kunnen geven, hebben we wel drie belangrijke oorzaken genoemd voor de soms grote steilheden in de berekende ontwerprandvoorwaarden:

1. Het geheel of gedeeltelijk ontbreken van essentiële fysica in de modellering met SWAN;
2. het onafhankelijk veronderstellen van modelonzekerheden van golfhoogte en golfperiode;
3. de interpolatiefouten bij lage waterstanden als gevolg van een grove resolutie van basisstochastwaarden.

De mate waarin deze foutenbronnen bijdragen aan de grote steilheden is sterk afhankelijk van de locatie en welk faalmechanisme wordt doorgerekend. Voor elk ontwerp moeten daarom de drie mogelijke oorzaken in het achterhoofd worden gehouden.

Ook bij toepassing van de golfgroeiformule van Brettschneider moet men er op bedacht zijn dat steilheden s_p bereikt kunnen worden van 0.07 bij korte strijklengtes.

5 Effecten richtingsverspreiding op niet-lineaire aspecten

Steile golven zijn het gevolg van niet-lineaire wisselwerkingen tussen golven. In het vorige hoofdstuk zijn al een aantal aspecten genoemd die een effect hebben op de niet-lineariteit, zoals diepte en de aanwezigheid van stroming. Iets wat nog niet nader is belicht is het effect van richtingsverspreiding. Zoals in de inleiding is aangegeven, is dat een belangrijk aspect. Veel empirische formules, die wij in ons instrumentarium voor de waterveiligheid gebruiken, zijn gebaseerd op golfgootproeven. Daarin ontbreekt richtingsverspreiding. In werkelijkheid treedt dit wel op.

Helaas is hier in de literatuur weinig over bekend, getuige de uitspraak in Prevosto (1998): “At our knowledge, good literature does not exist about the effect of the directional spreading and spectral bandwidth on the nonlinear characteristics of waves, and particularly none can be found for shallow water.” In deze paper is de aanname van nauwbandigheid (dus bijna regelmatige golven) en langkammigheid (dus nauwelijks richtingsverspreiding), welke in veel modellen wordt gehanteerd, onderzocht. Met behulp van een tweede orde golfmodel zijn richtingsafhankelijke onregelmatige golven opgewekt. Aan de hand van een aantal extreme situaties van korte en lange fetch golfvelden is het effect van de spectrale breedte (verdeling van energie over de frequenties) en richtingsverspreiding op verschillende golfkarakteristieken gelinkt aan niet-lineariteit (skewness, verdelingen van golfhoogte en hoogte van de golfkam en golfsteilheid). Ten aanzien van de golfsteilheid is de volgende conclusie getrokken: De hypothese van langkammigheid is altijd conservatief, met andere woorden leidt tot hogere (in dit geval maximale voorflank) steilheden dan in sterk richtingsgespreide windzee. Dit is onafhankelijk van de waterdiepte. Forristall (2000) doet iets vergelijkbaars. Hij kijkt niet expliciet naar de golfsteilheid, maar naar de hoogte van de golfkam. Op basis van drie-dimensionale, tweede-orde berekeningen concludeert hij dat in diep water de golfkammen in een richtingsgespreid veld orde 2% lager zijn dan voor langkammige golven. Echter, individuele richtingsgespreide kammen kunnen hoger worden dan langkammige als gevolg van niet-lineariteiten. Zeer recent hebben Lee en Monty (2020) aan de hand van laboratoriumproeven in een windgoot aangetoond dat de verdeling van de hoogte van de golfkammen afhangt van de windsnelheid, met name voor de golven met de kleinste kans van voorkomen (hoogste golven dus). De groei van de meest extreme golven wordt beperkt door breken, waardoor de kans van voorkomen op hoge golfkammen door de verdeling van Forristall wordt overschat bij de hoogste windsnelheden. Met andere woorden, de aanwezigheid van forse wind maakt dat langkammige golven wel eens minder hoog en steil kunnen worden dan aanvankelijk door Forristall (2000) voorzien. Dat zou ook de conclusie naar aanleiding van de modelresultaten van Prevosto (1998) tegenspreken.

Daarnaast lijkt de conclusie van Prevosto (1998) contra-intuïtief, zoals blijkt uit een discussie met Luigi Cavaleri (pers. comm.). Langkammige golven zouden minder steil moeten zijn omdat het om typische deininggolven gaat. Natuurlijk kunnen steile deininggolven voorkomen, maar zelfs in sterk geforceerde grootschalige systemen geldt dat wanneer de wind stopt, golven in hoogte zullen afnemen en minder steil worden. Aan de andere kant, veronderstel dat twee golfsystemen die elkaar kruisen. Per definitie kan slechts een van de twee actieve windzee zijn, maar de vraag is of het kruisen van de golven tot steilheden leidt die gemiddeld gezien verschillen van die van een van de individuele golfsystemen. De inschatting is dat er inderdaad hele steile golven zijn, steiler dan in een apart golfsysteem, maar dat dat gemiddeld gezien niet bijdraagt. Dit is een analogon met freak waves. Ook al komen deze mogelijk in kruisende golfsystemen meer voor, de golfstatistiek zal er niet door veranderen. Er moet wel onderscheid gemaakt worden tussen equilibrium and transiënte condities. Als twee steile golven elkaar kruisen, zal er een grotere golf ontstaan, die echter moet breken, vanwege zijn te grote steilheid. Daarbij kom je weer op de oorspronkelijke golfstatistiek.

Echter in de transiënte fase naar breken toe kan de golf hoger zijn dan de theoretische equilibriumwaarde. De statistiek zal naar verwachting (maar niet onderbouwd) de gebruikelijke verdeling niet overstijgen, maar individuele golven kunnen dat wel. Dit effect is naar verwachting op enige afstand na het breken (inschatting: halve tot hele golflengte) weer verdwenen. Met andere woorden, op basis van beschikbare modelresultaten en logische redeneringen kunnen we niet zondermeer hard maken dat de gemiddelde golfsteilheid groter kan worden in een kortkammig of in een langkammig golfveld.

Beschikbare metingen kunnen mogelijk wel uitsluitsel bieden. Guimarães (2018) heeft stereo video data verkregen in de Zwarte Zee geanalyseerd, maar niet specifiek naar golfsteilheden gekeken. Guimarães (pers. comm.) geeft aan dat de vele bimodale golfcondities uit verschillende richtingen maken dat de analyse van golfsteilheden erg lastig wordt. Op de Noordzee hebben we niet met verschillende swell systemen naast elkaar te maken en is een dergelijke analyse wellicht wel mogelijk. We beschikken echter nog niet over stereo video data. Guimarães heeft ook aangegeven over laboratorium data (windfaciliteit) te beschikken. Hij heeft daarbij niet specifiek een analyse uitgevoerd op steilheden, maar dat lijkt alleszins mogelijk. Dit kan aangevuld worden met een analyse van stereo video data vanaf de meetoren nabij Venetië, door Benetazzo (pers. comm. Cavaleri). Hiermee kan ook het effect van richtings spreiding op golfsteilheid bepaald worden. Een dergelijke analyse zou niet alleen de contra-intuïtieve resultaten van Prevosto (1998) kunnen weerleggen, danwel bevestigen, maar het zou ook een meer kwantitatieve duiding van het effect van kortkammigheid op de golfsteilheid geven.

6 Conclusies en aanbevelingen

In diverse beoordelingstrajecten en ontwerpstudies van primaire keringen zijn hydraulische belastingen bepaald die hebben geleid tot vragen met betrekking tot grote golfsteilheden (groter dan 7% ($s_{m-1,0}$, i.e. golfsteilheid op basis van $T_{m-1,0}$) of 4% (s_p , i.e. golfsteilheid op basis van T_p). Aan de hand van literatuuronderzoek hebben we antwoorden gezocht op de hieronder cursief weergegeven vragen. De conclusies en verdere aanbevelingen zijn hieronder benoemd.

Wat is fysisch gezien een bovengrens voor de golfsteilheid, gegeven de lokale omstandigheden?

- Onder de aanname van een standaard JONSWAP spectrum met peak enhancement factor $\gamma = 3,3$ geldt dat $s_{m-1,0}$ maximaal 5% en s_p maximaal 4% kan worden op open, veelal diep water. Voor strijklengte-beperkte situaties kan dit oplopen tot 7-8% resp. 6%.
- Een hellende bodem voor de kust, een stelsel van geulen en platen en de aanwezigheid van stroming maken dat de golfsteilheid mogelijk ook in de buurt van 7-8% resp. 6% uit kan komen. Met aanvullende analyse van beschikbare golfdata zou aangetoond kunnen worden of dit daadwerkelijk het geval is.

Wat maakt dat berekende golfsteilheden groot kunnen zijn?

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 modelonzekerheden;
- interpolatiefouten bij lage waterstanden als gevolg van een grove resolutie van basisstochastwaarden.

We bevelen aan deze omissies te verhelpen.

Zijn er qua golfsteilheid (en mogelijk andere parameters) belangrijke verschillen tussen in-situ-metingen en golfgootmetingen, waarmee rekening gehouden moet worden bij het duiden van die golfgootresultaten?

De voornaamste verschillen tussen metingen in een laboratoriumgoot en in-situ metingen komen voort uit het ontbreken van wind (uitgaande van het gotenarsenaal in Nederland) en richtingsverspreiding in de golfgoten. Uit de literatuur volgt dat:

- In de literatuur is weinig bekend over het effect van richtingsverspreiding op golfsteilheid. Sterker nog, de bevindingen in Prevosto (1998), dat langkammige golven tot hogere golfsteilheden kunnen leiden dan kortkammige, lijken contra-intuïtief.
- Momenteel kunnen we nog niet de vraag beantwoorden of maximale golfsteilheden in golfgoten (langkammige golven) en in werkelijkheid (meestal kortkammige golven) verschillend zullen zijn. Ondanks dat niet specifiek naar deze vraag is gekeken, lijken er (laboratorium)datasets te bestaan die het mogelijk maken meer duiding te geven aan het verschil in golfsteilheden in kort- en langkammige golfvelden.

Omdat nog niet duidelijk is in hoeverre golfcondities in golfgoten op belangrijke punten als golfsteilheid en kort- en langkammigheid afwijken van in-situ-metingen, is ook niet aan te geven (kwalitatief noch kwantitatief) wat dat globaal betekent voor de uitkomsten van proeven met golfgoten en oploop- en overslagsimulatoren, zoals wave setup, oplooppniveau, overslagdebiet, golfklapbelasting, klei/gras/duinerosie. Daarom bevelen we aan de kennisvraag te agenderen wat de impact is van de verschillen tussen in-situ en golfgoot golfeigenschappen (o.a. golfsteilheid en richtingsverspreiding) op de hierboven genoemde uitkomsten.

Binnen deze kennisvraag kan worden nagegaan wat de meest kansrijke opties zijn om met bovenstaande beperkingen (o.a. golfsteilheid en gemis aan richtingsverspreiding) om te gaan in het kader van erosieproeven op gras, klei en zand, en sterkteproeven van harde bekledingen. Zijn dat empirische correcties, een combinatie van goot of simulatorproeven met numerieke belasting- en sterktemodellen, of het nastreven van combinaties tussen goot/simulatorproeven en veldmetingen?

Het moge duidelijk zijn dat de drie gestelde vragen nog niet volledig zijn beantwoord. Om deze reden adviseren we beschikbare data specifiek op golfsteilheden te analyseren. In het bijzonder betreft het dan:

- Analyse van beschikbare golfdata (Petten, Amelander Zeegat, Oostelijke Waddenzee, IJsselmeer en Westerschelde) teneinde een schatting van de lokale maximale golfsteilheden te verkrijgen. Naar verwachting zullen deze minimaal even groot zijn als de reeds in de literatuur genoemde steilheden voor korte strijklengtes en op het IJsselmeer (Bottema, 2007).
- Analyse van stereo video data van Guimarães (2018), zowel in het veld als in een wind faciliteit, aangevuld met stereo video data vanaf de meetoren nabij Venetië, door Benetazzo (pers. comm. Cavaleri). Hiermee kan het effect van richtingsverspreiding op golfsteilheid bepaald worden en kan duiding gegeven worden aan resultaten van golfgootproeven.
- Analyse van de data van Lee en Monty (2020), indien beschikbaar, om inzicht te krijgen in het effect van wind op de equilibrium waarde van de golfsteilheid.
- Doorvertalen van bovengenoemde effecten naar voor BOI relevante interne belastingen, zoals golfploop en golfoverslag en vergelijken met conclusies uit indirect verkregen meetresultaten, zoals bijvoorbeeld door Wolters en Van Gent (2007), waar het effect van wind op golfoverslag artificieel is gemodelleerd. Merk op dat dit slechts een van de factoren is die kunnen bijdragen aan de verschillen tussen in-situ en golfgoot of golfsimulator proeven.

7 Referenties

- Arena, F., Guedes Soares, C. and Petrova, P. (2010). Theoretical analysis of average wave steepness related to peak period or to mean period. Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2010, June 6-11, 2010, Shanghai, China.
- Babanin, A.V., D. Chalikov, I. Young, and I. Savelyev (2007): Predicting the breaking onset of surface water waves. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07605, doi:10.1029/2006GL029135.
- Battjes (1972). Set-up due to irregular waves. Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., Vancouver B.C., 1993-2004.
- Bjerke, P.L., Mathiesen, M., Torsethhaugen, K. (1990). Haltenbanken Metocean Study. Main Report. Appendix A. NHL Rapport no. STF60 A90055, Arkiv-nr. NH: R-048951.
- Bitner-Gregersen, E.M., Guedes Soares, C. and Silvestre A. (1998), On the Average Wave Steepness, Proceedings of the Conference Ocean Wave Kinematics, Dynamics and Loads on Structures, Houston, Texas, April 30-May 1, pp. 513-520.
- Bitner-Gregersen, E. M. and C. G. Soares, 2007. Uncertainty of average wave steepness prediction from global wave Databases, *Advancements in Marine Structures – Guedes Soares & Das (eds) © 2007 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-43725-7.*
- Bottema, M., 2007, Measured wind-wave climatology Lake IJssel (NL) Main results for the period 1997-2006 Report RWS RIZA 2007.020.
- Bottema, M. en G. Ph. Van Vledder (2008). Effective fetch and non-linear four-wave interactions during wave growth in slanting fetch conditions. *Coastal Engng.*, Vol. 55, 261-275.
- Bottema, M. en G. Ph. Van Vledder (2009). A ten-year data set for fetch- and depth-limited wave growth. *Coastal Engng.*, Vol. 56, 703-725.
- Carter, D.J.T. (1986). Estimating Wave Climate Parameters for Engineering Applications. Report OTH 86 228, Institute of Oceanographic Sciences (Great Britain).
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007), The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London.
- Dingemans, M. (1987). Verification of numerical wave propagation models with laboratory measurements, HISWA verification in the directional wave basin. Technical report H228, Part 1B, Appendices A-G. Delft Hydraulics, Delft.
- Draper (1976). Waves recorded at Dowsing Light Vessel, North Sea. Institute of Oceanographic Sciences Report, No 31, 20 pp.
- Deltares (2015). Wave Growth at Short Fetches. Deltares report 1209433-007-HYE-0010, February 2015 (C. Gautier and J. Morris).
- Deltares (2017a). Consequentieanalyse nieuwe normering Afsluitdijk. Deltares rapport 11200365 000-HYE-0003. Februari 2017 (J. van Nieuwkoop en B. Hoonhout).

- Deltares (2017b). Golfsteilheden Perkpolder. Memo Deltares, d.d. 20 december 2017 (C. Gautier).
- Deltares (2018). Correlation between model uncertainties wave height and wave period. Deltares memo 11202225-003-GEO-0001, d.d. 20 November 2018 (A. Smale).
- Forristall, G.Z. (2000). Wave Crest Distributions: Observations and Second-Order Theory. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 30, 1931-1943.
- Goda, Y. (1988). Statistical variability of sea-state parameters as a function of a wave spectrum. *Coastal Eng. in Japan*, vol 31, no 1, pp 39-52
- Goda, Y. (2000) Random seas and design of maritime structure. In: P L-F Liu (ed) *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol 15, World Scientific, Singapore, 444 pp.
- Groeneweg, J., van Gent, M., van Nieuwkoop, J., and Toledo, Y. (2015). Wave Propagation into Complex Coastal Systems and the Role of Nonlinear Interactions. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000300, 04015003.
- Guimarães, P. V. (2018). Sea Surface and Energy Dissipation. PhD thesis Ecole centrale de Nantes.
- Holthuysen, L.H. (2007) *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- Lee, J.H. and J.P. Monty (2020). On the interaction between wind stress and waves: Wave growth and statistical properties of large waves. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 50, 383-397.
- Miche (1944). Undulatory Motions of the Ocean at Constant or Decreasing Depth. *Ann. Ponts Chass*, Vol 2, No 1.
- Michell (1893). The highest waves in water. *Philos. Mag.* (5), Vol. 36, 430-437.
- Myrhaug, D., and Rue, H. _1993_. "Joint distribution of successive wave steepness parameters." *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, 115, 191–195.
- Noorderzijvest (2020). Aanscherping ontwerpogave Dijkversterking Lauwersmeerdijk – Vierhuizergat. Januari 2020 (B. de Wolff, S. Post, G. Pleijter, V. Vuik).
- Prevosto, M. (1998). Effect of Directional Spreading and Spectral Bandwidth on the Nonlinearity of the Irregular Waves. In the *Proceedings of The Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference*, 24-29 May 1998, Montreal, Canada.
- Stokes (1880). Supplement to a paper on the theory of oscillatory waves. *Math. Phys. Pap.*, Vol 1, 314-326. Cambridge University Press.
- Tayfun, M. A. (2006). Distributions of Wave Steepness and Surf Parameter. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 132, No. 1. DOI: 10.1061/_ASCE_0733-950X_2006_132:1_1
- Van der Westhuysen, A.J., A.R. van Dongeren, J. Groeneweg, G.Ph. van Vledder, H. Peters, C. Gautier and J.C.C. van Nieuwkoop (2012). Improvements in spectral wave modeling in tidal inlet seas. *J. of Geophys. Res.*, vol. 117, C00J28, doi:10.1029/2011JC007837.
- Van Gent, M.R.A. (2001), Wave run-up on dikes with shallow foreshores. *ASCE, Journal of 607 Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.*, Vol.127, No. 5.
- Toffoli, A., A. Babanin, M. Onorato, and T. Waseda, 2010. Maximum steepness of oceanic waves: Field and laboratory experiments, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L05603, doi 10.1029/2009GL041771.

Wolters, G. and M.R.A. van Gent (2007). Maximum wind effect on wave overtopping of sloped coastal structures with crest elements. Proc. Coastal Structures 2007, 1263–1274.

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