

**Maximale significante  
golfhoogte bij ondiep water en  
maximale golfsteilheid**





**Maximale significante golfhoogte bij  
ondiep water en maximale  
golfsteilheid**

Sofia Caires

1204727-004



## Titel

Maximale significante golfhoogte bij ondiep water en maximale golfsteilheid

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1204727-004	1204727-004-HYE-0001	61

## Trefwoorden

Significante golfhoogte, golfsteilheid, ontwerpgrafieken, dieptegelimiteerde golven, Zeeuwse Getijdewateren.

## Samenvatting

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

Voor het ontwerpen van steenzettingen met Steentoets wordt door PBZ in Zeeland gebruik gemaakt van correcties op de uit 1997 stammende golfcondities, die destijds met SWAN zijn berekend (Alkyon, 2007). Het gebruik van de gecorrigeerde golfcondities heeft bij toepassing in Steentoets geleid tot veelvuldige waarschuwingen over de golfsteilheid en de golfhoogte op ondiep water. Omdat dit veelvuldig gebeurt, is een bureaustudie uitgevoerd om de juistheid van de criteria in Steentoets te controleren. De bureaustudie bevat de volgende elementen:

- Beschouwing van de verschillende brekercriteria uit de literatuur;
- Beschouwing van de maximale golfsteilheid aan de hand van gegevens uit de literatuur;
- Evaluatie van resultaten verkregen met een recente versie van het golfmodel SWAN, namelijk versie 40.72ABCDE, waarbij de nieuwste inzichten zoals deze volgen uit het SBW project zijn toegepast;
- Analyse van metingen.

De resultaten uit deze studie kunnen ook gebruikt worden om de kwaliteit van de ontwerpcondities te controleren. Op basis van de criteria kunnen verdachte golfcondities opgespoord worden.

De belangrijkste conclusies van deze studie zijn dat:

- *Maximale significante golfhoogte* - De in dit rapport gepresenteerde ontwerpgrafieken en vuistregel kunnen gebruikt worden in ééndimensionale situaties waar de bodemhelling bijna constant is. Voor complexe tweedimensionale situaties waar in de huidige praktijk de golfcondities op ondiep water bepaald zijn uit oude SWAN berekeningen (Alkyon, 1997) met diverse correcties van rekenresultaten, kunnen de in dit rapport geselecteerde en gepresenteerde SWAN resultaten volgens de laatste inzichten uit SBW voor de Westerschelde gebruikt worden *ter vergelijking*.
- *Maximale golfsteilheid* - De golfsteilheden in de beschouwde metingen zijn lager dan die voor de geselecteerde SWAN resultaten voor de Westerschelde. Deze verschillen in golfsteilheden worden veroorzaakt door (i) het feit dat veel SWAN uitvoerlocaties dicht langs de kering, langs of op een geulwand of afgeschermd ligt voor dominante windrichtingen, (ii) de complexe geometrie van de Westerschelde, (iii), de extreme windsnelheden die zijn beschouwd naast de stromwinden en (iv) het meenemen van triads in het SWAN model. Mede door het meenemen van triads, die alleen golfenergie naar hogere frequenties verschuiven, zijn de golfperiodes in de SWAN resultaten mogelijk overgeschat. Als er 1 seconde toegevoegd wordt aan de berekende golfperiodes, dan komen de berekende golfperiodes en daarmee ook de golfsteilheden dicht bij de gemeten waarden. Aanbevolen wordt om 0,08 als grens voor de steilheid aan te houden waarboven Steentoets een waarschuwing moet geven.







**Titel**  
Maximale significante golfhoogte bij ondiep water  
en maximale golfsteilheid

**Opdrachtgever** Rijkswaterstaat Waterdienst  
**Project** 1204727-004  
**Kenmerk** 1204727-004-HYE-0001  
**Pagina's** 61

Aanbevolen wordt de criteria voor de maximale golfhoogte op ondiep water en de golfsteilheid in het rekenmodel Steentoets aan te passen zoals genoemd in de conclusies van dit rapport.

**Referenties**

Klein Breteler, M., 2011: Offerte m.b.t. "advisering steenbekledingen 2011", kenmerk 1204727-000-HYE-0003.

<b>Versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteur</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Review</b>	<b>Paraaf</b>	<b>Goedkeuring</b>	<b>Paraaf</b>
1	nov. 2011	Sofia Caires		Jacco Groeneweg		Marcel van Gent	
2	feb. 2012	Sofia Caires		Jacco Groeneweg		Marcel van Gent	

**Status**  
definitief

## Inhoud

Lijst van Tabellen	iii
Lijst van Figuren	v
<b>1 Introductie</b>	<b>1</b>
1.1 Aanleiding en doel van voorliggende studie	1
1.2 Aanpak	2
<b>2 Data</b>	<b>5</b>
2.1 Golfparameters	5
2.2 Ééndimensionale SWAN simulaties	6
2.2.1 De fysica	6
2.2.2 Het model	7
2.2.3 De berekeningen	8
2.3 Nieuwe SWAN Westerschelde berekeningen	10
2.4 Metingen	11
2.4.1 Noordzee	11
2.4.2 Meetnet Zeeuwse Getijdewateren	12
2.4.3 Slotermeer	13
<b>3 Maximale significante golfhoogte in ondiep water</b>	<b>15</b>
3.1 Literatuur overzicht	15
3.1.1 Energieverlies t.g.v. dieptegeïnduceerde breken	15
3.1.2 Dieptegelimiteerde maximale significante golfhoogte	17
3.2 Data analyse	19
3.2.1 SWAN ééndimensionale resultaten	19
3.2.2 SWAN resultaten voor de Westerschelde	25
3.2.3 Slotermeer metingen	29
3.2.4 Conclusies en aanbevelingen	30
<b>4 Maximale golfsteilheid</b>	<b>31</b>
4.1 Literatuur overzicht	31
4.2 Data analyse	32
4.2.1 Introductie	32
4.2.2 SWAN eendimensionale resultaten	32
4.2.3 Noordzee metingen	33
4.2.4 Metingen van Meetnet Zeeuwse Getijdewateren	39
4.2.5 SWAN resultaten voor de Westerschelde	43
4.2.6 Vergelijkingen tussen de gemeten en SWAN golfsteilheden	53
4.3 Verhouding tussen de piek- en de gemiddelde periode	56
<b>5 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>59</b>
<b>Literatuur</b>	<b>61</b>





## Lijst van Tabellen

Tabel 4.1	$s_p$ gemiddelden, 5% en 95% percentielen uit de metingen op de Noordzee en in de Zeeuwse getijdewateren en uit SWAN resultaten voor de Westerschelde.	54
Tabel 4.2	$s_{m-1,0}$ gemiddelden, 5% en 95% percentielen uit de metingen op de Noordzee en in de Zeeuwse getijdewateren en uit SWAN resultaten.	55
Tabel 4.3	$T_p/T_{m-1,0}$ gemiddelde, 5% en 95% percentielen uit de Noordzee en Zeeuwse getijdewateren metingen en uit SWAN resultaten voor de Westerschelde.	58



## Lijst van Figuren

Figuur 2.1	Voorbeeld van golfgroei voor verschillende waarden van de strijktlengte (vergelijkbaar aan golfgroei in tijd). Bron: Grafiek uit Holthuijsen (2007, Figuur 6.4).	6
Figuur 2.2	Schematisatie van de golfspectrale vervorming door de diepwater golfenergie brontermen. Bron: Grafiek uit Holthuijsen (2007, Figuur 6.27).	7
Figuur 2.3	Voorbeeld van een SWAN berekening van de triads bronterm ( $S_{n13}$ ). Bron: Grafiek uit Holthuijsen (2007, Figuur 8.14).	8
Figuur 2.4	Opzet van de bodem in de SWAN simulaties. Van offshore naar de kust (van links naar rechts in het figuur) er is eerst over 200 m een horizontale bodem, daarna over een afstand van 3600 m een bodemhelling van 1:n, en de laatste 200 m van de bodem heeft een diepte gelijk aan 2m.	9
Figuur 2.5	Voorbeelden van met SWAN berekende spectra met en zonder triads (van linksboven naar rechtsonder neemt, voor verschillende bodemhellingen, de offshore golfsteilheid $s_o$ toe van 0.01 to 0.07).	10
Figuur 2.6	Bodemschematisatie en basis uitvoer locaties (+) van de SWAN Westerschelde berekeningen.	11
Figuur 2.7	Nummering van de basisuitvoerlocaties van de toegepaste SWAN Westerschelde berekeningen.	11
Figuur 2.8	Locatie van de negen offshore meetstations langs de Nederlandse kust.	12
Figuur 2.9	Meetlocaties (●) van Meetnet Zeeuwse Getijdewateren.	13
Figuur 2.10	Slotermeer meetlocatie (SL29). Figuren uit Bottema (2006).	14
Figuur 3.1	Ontwerpgrafieken uit Van der Meer (1990, figuren 1 t/m 3).	18
Figuur 3.2	Ontwerpgrafieken op basis van SWAN simulaties met $U_{10}=40$ m/s, waarin triads niet geactiveerd zijn.	20
Figuur 3.3	Ontwerpgrafieken op basis van SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid, met triads geactiveerd (met de SBW instellingen).	21
Figuur 3.4	$(H_{m0}/d)_{max}$ vs de bodemhelling. Figuur boven: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid, zonder triads. Figuur beneden: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid met triads (SBW instellingen). De kleuren van de lijnen identificeren de waarde van $s_{op}$ .	22
Figuur 3.5	$(H_{m0}/d)_{max}$ schattingen van de vuistregel op basis van $T_p$ vs de SWAN waarden. De vorm van de symbolen geeft de diep water golfsteilheid en de kleur de bodemhelling.	23
Figuur 3.6	$(H_{m0}/d)_{max}$ schattingen van de vuistregel op basis van $T_{m-1,0}$ vs de SWAN waarden. De vorm van de symbolen geeft de diep water golfsteilheid en de kleur de bodemhelling.	24
Figuur 3.7	$(H_{m0}/d)_{max}$ schattingen van Goda (2000) vs de SWAN waarden. De vorm van de symbolen geeft de diep water golfsteilheid en de kleur de bodemhelling.	25

Figuur 3.8	$H_{m0}$ vs $H_{m0}/d$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	26
Figuur 3.9	$H_{m0}/d$ vs $s_{m-1,0}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	28
Figuur 3.10	$(-\beta/\pi)^{2.5}$ vs $H_{m0}/d$ in SWAN resultaten voor de Westerschelde.	29
Figuur 3.11	$(-\beta/\pi)^{2.5}$ vs $H_{m0}/d$ . De blauwe punten representeren de Sloterveer metingen en de rode lijnen komen uit de bovenste figuur van Figuur 3.10.	30
Figuur 4.1	$(s_p)_{\max}$ vs de bodemhelling. De kleur van de lijnen geeft de waarde van $s_{op}$ op diep water. Figuur links: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en geen triads. Figuur rechts: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en triads conform de instellingen zoals voorbereid binnen SBW.	32
Figuur 4.2	$(s_{m-1,0})_{\max}$ vs de bodemhelling. De kleur van de lijnen geeft de waarde van $s_{op}$ op diep water. Figuur links: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en geen triads. Figuur rechts: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en triads conform de in SBW afgeleide instellingen.	33
Figuur 4.3	Gemeten spectra op ondiep voorland met helling van 1:100 (TAW 2002).	33
Figuur 4.4	Gemeten $T_p$ vs $H_{m0}$ bij SWB, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.	34
Figuur 4.5	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_p$ bij SWB, Noordzee.	35
Figuur 4.6	Gemeten $T_{m-1,0}$ vs $H_{m0}$ bij SWB, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.	36
Figuur 4.7	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_{m-1,0}$ bij SWB, Noordzee.	36
Figuur 4.8	Gemeten $T_p$ vs $H_{m0}$ bij SCW, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.	37
Figuur 4.9	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_p$ bij SCW.	37
Figuur 4.10	Gemeten $T_{m-1,0}$ vs $H_{m0}$ bij SCW, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.	38
Figuur 4.11	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_{m-1,0}$ bij SCW, Noordzee.	38
Figuur 4.12	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_p$ bij HFP1, Westerschelde. Data van 1999-2010.	39
Figuur 4.13	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_{m-1,0}$ bij HFP1, Westerschelde. Data van 1999-2010.	40
Figuur 4.14	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_p$ bij PVT1, Westerschelde. Data van 2001-2010.	40
Figuur 4.15	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_{m-1,0}$ bij PVT1, Westerschelde. Data van 2001-2010.	41
Figuur 4.16	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_p$ bij BAT1, Westerschelde. Data van 1999-2010.	41
Figuur 4.17	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_{m-1,0}$ bij BAT1, Westerschelde. Data van 1999-2010.	42
Figuur 4.18	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_p$ bij KEET, Oosterschelde. Data van 1999-2010.	42
Figuur 4.19	Gemeten $H_{m0}$ vs $s_{m-1,0}$ bij KEET, Oosterschelde. Data van 1999-2010.	43

Figuur 4.20	$T_p$ vs $H_{m0}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	44
Figuur 4.21	$H_{m0}$ vs $s_p$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	44
Figuur 4.22	$T_{m-1,0}$ vs $H_{m0}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	45
Figuur 4.23	$H_{m0}$ vs $s_{m-1,0}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	45
Figuur 4.24	$s_p$ vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde.	46
Figuur 4.25	$s_{m-1,0}$ vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde.	47
Figuur 4.26	$s_p$ vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde voor windsnelheden van 40 m/s en offshore waterstanden van 4 m+NAP (grafiek boven) en 0 m+NAP (grafiek beneden) .	48
Figuur 4.27	$s_{m-1,0}$ vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde voor windsnelheden van 40 m/s en offshore surge van 4 m (grafiek boven) en 0 m (grafiek beneden).	49
Figuur 4.28	$s_p$ vs $U_{10}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	50
Figuur 4.29	$s_{m-1,0}$ vs $U_{10}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde.	50
Figuur 4.30	$s_p$ vs $U_{10}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde voor offshore waterstanden van 4 m+NAP (grafiek boven) en 0 m+NAP (grafiek beneden).	51
Figuur 4.31	$s_{m-1,0}$ vs $U_{10}$ SWAN resultaten voor de Westerschelde voor offshore waterstanden van 4 m+NAP (grafiek boven) en 0 m+NAP (grafiek beneden).	52
Figuur 4.32	Voorbeeld van een SWAN spectrum voor de Westerschelde met een extreem hoge golfsteilheid, $s_{m-1,0} = 0.24$ . Dit spectrum is geassocieerd met een windsnelheid van 35 m/s en een richting van 300°N in de SWAN berekeningen en de locatie (274, zie Figuur 2.7) is dichtbij WAL5 in Figuur 2.9.	53
Figuur 4.33	Verhouding tussen $T_p$ en $T_{m-1,0}$ vs $H_{m0}$ voor metingen op SWB (links) en op SCW (rechts).	56
Figuur 4.34	Verhouding tussen $T_p$ en $T_{m-1,0}$ vs $H_{m0}$ voor metingen op HFP1 (boven links), op PVT1 (boven rechts), BAT1 (beneden links) end KEET (beneden rechts).	57
Figuur 4.35	Verhouding tussen $T_p$ en $T_{m-1,0}$ vs $H_{m0}$ voor de SWAN resultaten voor de Westerschelde (beneden links)	57



# 1 Introductie

## 1.1 Aanleiding en doel van voorliggende studie

Het onderhavige onderzoek is uitgevoerd in het kader van het meerjarige project 'Advisering steenbekledingen Zeeland' voor het Projectbureau Zeeweringen (PBZ). Dit projectbureau is opgericht ten behoeve van de renovatie van de steenzettingen in Zeeland en is een samenwerking van Rijkswaterstaat Zeeland en het Waterschap Scheldestromen. Contractueel is de Waterdienst van Rijkswaterstaat de opdrachtgever namens PBZ voor het onderhavige onderzoek. Het deel van het project dat gericht is op kennisontwikkeling sluit aan op het Onderzoeksprogramma Kennisleemtes Steenbekledingen dat uitgevoerd is in de periode van 2003-2009 in opdracht van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat namens PBZ.

In het kader van dit project worden hydraulische belastingen afgeleid ten behoeve van het ontwerp van steenbekledingen voor de primaire waterkeringen in Zeeland (Oosterschelde en Westerschelde). Voor deze ontwerpen vormen rekenresultaten verkregen met een versie van het spectrale golfmodel SWAN uit 1997 (Alkyon, 1997) de basis voor de toegepaste hydraulische belastingen. Op deze rekenresultaten zijn correcties toegepast (op parameterniveau) om deze met meetresultaten in overeenstemming te brengen. Bij de laatste correcties (Svasek, 2010) is echter gebleken dat veel frequenter dan voorheen de (gecorrigeerde) golven steiler blijken te zijn of hoger dan het criterium zoals gesteld in Steentoets. Het rekenmodel Steentoets geeft dan een waarschuwing. Dit is aanleiding om de golfsteilheid en de maximale golfhoogte nader te onderzoeken.

In de afgelopen jaren is in het kader van het project Sterkte en Belastingen Waterkering (SBW) het golfmodel SWAN verder verbeterd. Bij het beoordelen van de stabiliteit van steenzettingen wordt echter nog geen gebruik gemaakt van de rekenresultaten verkregen met de nieuwste versie van het rekenmodel. Voor het opstellen van de golfcondities voor ontwerp wordt er gebruik gemaakt van een breker criterium dat aangeeft hoe groot de maximale significante golfhoogte kan zijn op ondiep water. Als golven op relatief ondiep water komen, zal de hoogte ervan afnemen als gevolg van het breken van de hoogste golven. Naarmate de waterdiepte kleiner wordt, gaat een steeds groter deel van de golven breken en neemt de significante golfhoogte steeds verder af. Dit proces is verdisconteerd in SWAN. Sinds 1997 zijn vele verbeteringen aangebracht in SWAN. Veel van deze verbeteringen zijn tot stand gekomen in het SBW-project. De daaruit voortgekomen versie van SWAN is ingezet voor het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). Ten behoeve van het afleiden van de golfcondities voor het WTI zijn zeer vele berekeningen uitgevoerd met dit rekenmodel. De tussentijdse resultaten van die berekeningen zijn gebruikt in de huidige studie. De definitieve golfcondities voor het WTI zijn (nog) niet vastgesteld en konden in deze studie niet gebruikt worden. De in deze studie beschouwde rekenresultaten omvatten ook extreme situaties en sluiten daarom aan bij de ontwerpcondities.

Het doel van de hier gerapporteerde bureaustudie is het geven van een voorstel voor de toe te passen criteria ten aanzien van in Steentoets ingevoerde golfhoogte en golfsteilheid. Om tot deze criteria te komen wordt informatie verzameld aan de hand van literatuuronderzoek en analyse van metingen en rekenresultaten. In het huidige rapport worden deze twee aspecten apart behandeld in respectievelijk hoofdstuk 3 en 4 omdat ze in feite los van elkaar staan.

De golfsteilheid is de verhouding tussen de golfhoogte en de golflengte. Bij het begin van de storm, of als de strijklengte (afstand tot de bovenwindse oever) kort is, zijn de golven relatief 'jong' en is de golfsteilheid relatief groot. Als golven breken boven een zandbank, wordt de golfhoogte kleiner en dus de golfsteilheid ook. Na de zandbank kunnen de golven door de invloed van de wind weer toenemen en neemt ook de golfsteilheid weer toe.

Bij het bepalen van de maximale golfhoogte op ondiep water gaat het voornamelijk om de verhouding tussen de significante golfhoogte en de waterdiepte. Als deze verhouding te groot wordt, gaan de golven breken. Dat maakt dat bij ondiep water er een maximale significante golfhoogte is. Als de waterdiepte meer dan ongeveer driemaal de significante golfhoogte is, is er geen diepte geïnduceerd breken. Golven kunnen dan nog wel breken als de golfsteilheid te groot is geworden als gevolg van de invloed van de wind.

## 1.2 Aanpak

Om met deze problematiek in de Zeeuwse Getijdewateren goed om te gaan is er een korte bureaustudie uitgevoerd waarin:

- de verschillende brekercriteria uit de literatuur en uit de meest recent versie van SWAN;
  - de maximale golfsteilheid aan de hand van gegevens uit de literatuur en berekeningen met de meest recente versie van SWAN, en ook
  - enkele metingen
- geanalyseerd zijn.

Er is gekozen voor het rekenmodel SWAN voor deze studie omdat dit model ook gebruikt wordt voor het afleiden van de golfrandvoorwaarden voor de periodieke toetsing van de waterkeringen in het kader van de Waterwet. De golfrandvoorwaarden uit het vigerende HR2006 randvoorwaardenboek en de door PBZ toegepaste ontwerprandvoorwaarden vinden hun basis in dezelfde set van SWAN berekeningen uit 1997 (Alkyon, 1997). Het rekenmodel SWAN is hiernaast echter de afgelopen jaren flink verbeterd in het kader van het onderzoeksproject SBW, maar in deze bureaustudie is gebleken dat SWAN op onderdelen niet perfect is.

Opgemerkt wordt dat SWAN in deze studie met twee wezenlijk verschillende instellingen is gebruikt:

- SWAN versie 40.72ABCDE met instellingen zoals afgeleid binnen het SBW onderzoek (Van der Westhuysen et al., 2012).
- Dezelfde SWAN-versie, maar met triads uitgeschakeld.

Wat betreft de maximale golfhoogte op ondiep water, is er een literatuurstudie uitgevoerd (§3.1). Gemotiveerd door het literatuuroverzicht, zijn SWAN sommen voor ééndimensionale situaties uitgevoerd, waarbij de bodemhelling constant is. Met de resultaten van de ééndimensionale SWAN sommen zijn nieuwe ontwerpgrafieken (§3.2.1) gemaakt. Verder zijn de resultaten van de SWAN ééndimensionale sommen vergeleken met de in Steentoests geïmplementeerde vuistregel en de empirische formule van Goda (2000), zie §3.2.1.1. Dit leidt tot een criterium voor de maximale significante golfhoogte in geïdealiseerde ééndimensionale situaties waar de bodemhelling bijna constant is. Tevens is een vergelijking gemaakt met de (tussentijdse) SWAN resultaten voor de Westerschelde welke in het kader van WTI zijn verkregen (§3.2.2), om aan te geven wat de waarden zijn die in de Westerschelde gelden onder extreme omstandigheden volgens het SWAN model. De statistieken die uit deze nieuwe SWAN resultaten voor de Westerschelde komen, zijn



tenslotte vergeleken met sterk diepte-gelimiteerde golfhoogten, die zijn gemeten in het Slotermeer (§3.2.3).

Wat betreft de maximale golfsteilheid, is er vooral gekeken naar de resultaten van de SWAN berekeningen (de ééndimensionale sommen, §4.2.2, en de nieuwe SWAN resultaten voor de Westerschelde, §4.2.5) en naar metingen, zowel op relatief diep water (§4.2.3) als op relatief ondiep water (§4.2.4).

Met de resultaten uit de modellen en de metingen is een schatting gemaakt van de maximale golfhoogte op ondiep water en de maximale golfsteilheid. Hiermee is een voorstel gedaan voor de toe te passen criteria vanaf waar een waarschuwing gegeven moet worden in Steentoets ten aanzien van de golfhoogte op ondiep water en ten aanzien van de golfsteilheid.



## 2 Data

### 2.1 Golfparameters

In dit rapport worden golfparameters gebruikt die bepaald worden aan de hand van het (gemeten of berekende) golfspectrum: de verdeling van de golfenergiedichtheid als functie van de frequentie.

De significante golfhoogte ( $H_s$ ), hier voornamelijk aangeduid als  $H_{m_0}$  om aan te geven dat het bepaald wordt aan de hand van het golfspectrum, is als volgt gedefinieerd:

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0}, \quad (2.1)$$

waar  $m_0$  is de 0<sup>e</sup> orde momentum van het golfspectrum. In het algemeen

$$m_n = \int_0^\infty S(f) f^n df, \quad (2.2)$$

waar  $S$  is de golfenergiedichtheid en  $f$  de frequentie.

De golfperiode wordt meestal gekarakteriseerd door de piekperiode ( $T_p$ ): de periode die hoort bij de golven met de grootste energiedichtheid. Naast de piekperiode worden vaak de "gemiddelde" spectrale golfperiodes

$$T_{m_{0,1}} = m_0 / m_1 \quad (2.3)$$

en

$$T_{m_{-1,0}} = m_{-1} / m_0 \quad (2.4)$$

gebruikt.

Het gebruik van een gemiddelde spectrale golfperiode, in plaats van de piekperiode, is geadviseerd wanneer het golfspectrum meerdere pieken heeft (bijvoorbeeld in ondiepe gebieden waar de golven sterk niet-lineair zijn). De gemiddelde periode is dan robuuster dan de piekperiode. Voor golfloop en overslag is al in de negentiger jaren geadviseerd om altijd  $T_{m_{-1,0}}$  te gebruiken omdat deze processen relatief sterk afhankelijk zijn van de lagere frequenties in het spectrum en de  $T_{m_{-1,0}}$  juist daaraan een wat zwaarder gewicht toekent (Van Gent, 1999 en 2001). Vooralsnog gebruikt Steentoets alleen  $T_p$  als periodemaat. Er loopt echter een onderzoek naar het mogelijke gebruik van  $T_{m_{-1,0}}$  ter aanvulling van  $T_p$ .

De golflengte is afhankelijk van de golfperiode en de waterdiepte. Op diep water geldt:

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi}, \quad (2.5)$$

met:

$L_o$  = golflengte op diep water (m) (het subscript 'o' duidt op diep water of offshore);

$g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ) en

$T$  = golfperiode (s).

In de hier gerapporteerde berekeningen, ongeacht de waterdiepte, wordt de golflengte altijd met formule (2.5) berekend. In het bijzonder, ongeacht de waterdiepte, wordt de golfsteilheid ( $s$ ) als volgt gekarakteriseerd door de verhouding tussen de lokale significante golfhoogte en golfperiode:

$$s = \frac{2\pi H_{m0}}{gT^2}. \quad (2.6)$$

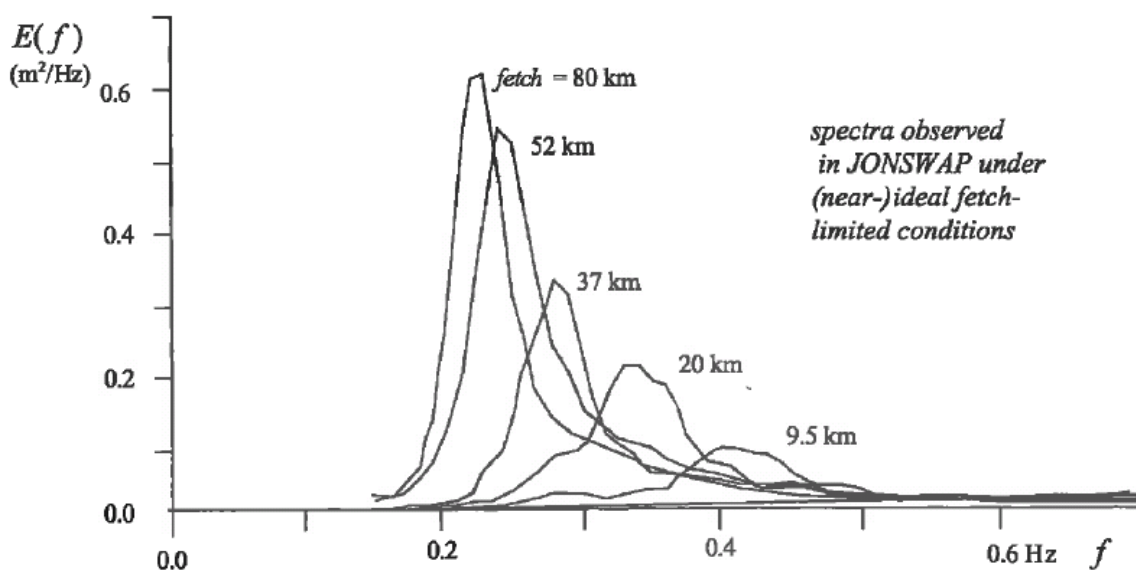
## 2.2 Ééndimensionale SWAN simulaties

### 2.2.1 De fysica

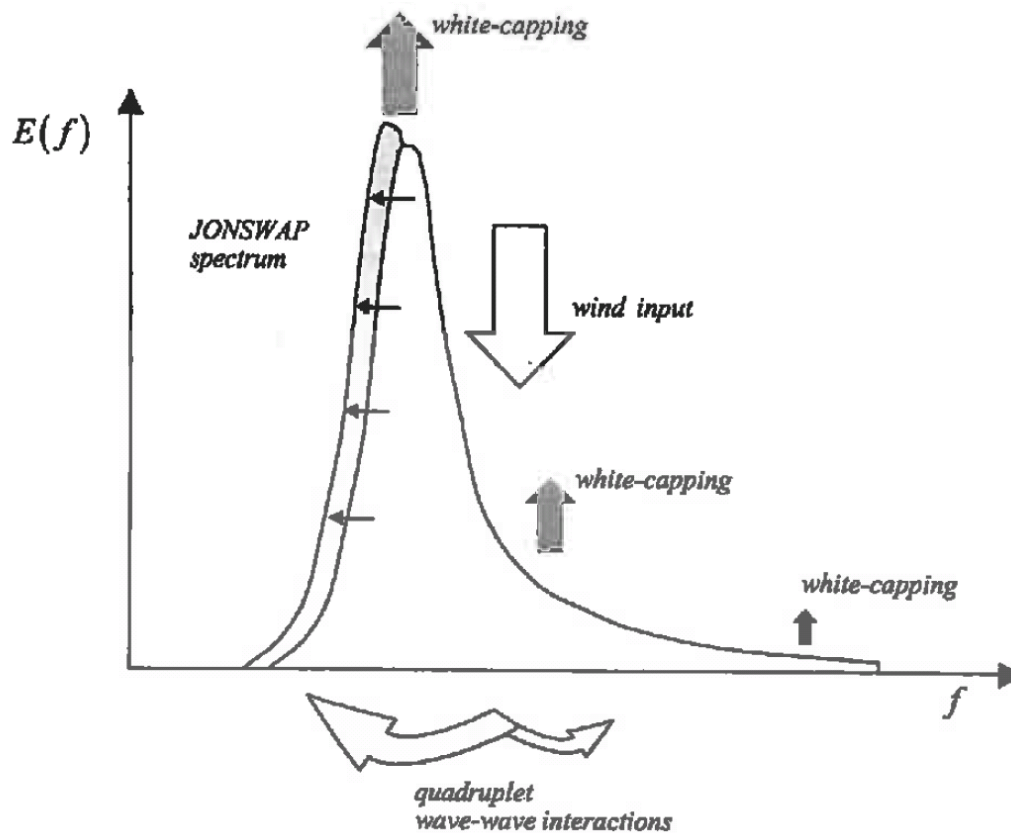
Golven ontstaan door wrijving van de wind op het wateroppervlak. Korte golven evolueren naar steeds langere golven als gevolg van niet-lineaire (vier-golf) wisselwerkingen. Doordat de wind energie blijft toevoeren, wordt de golfhoogte steeds groter. In Figuur 2.1 is dit te zien als het steeds verder groeien van het oppervlak onder het spectrum. Tegelijkertijd verschuift de piek naar links: de  $T_p$  wordt groter.

Golven die ontstaan ten gevolge van wind in een verder afgelegen gebied, maar die niet meer onderhevig zijn aan de plaatselijke wind, noemt men deining.

De golven op zee variëren in hoogte, periode, lengte en voortplantingsrichting. In dieper water zijn er slechts drie brontermen die belangrijk zijn, namelijk de windinvoer, de energiedissipatie door middel van turbulentie (te herkennen aan schuimkoppen, wanneer golven te steil worden; whitecapping) en de niet lineaire interacties tussen 4 golven (quadruplets), zie Figuur 2.2. Wanneer de golven zich van diep naar ondiep water bewegen, wordt de invloed van de bodem steeds belangrijker. Dit wordt veroorzaakt door tal van fenomenen zoals 'shoaling' (golven worden hoger en steiler door de afname van de voortplantingssnelheid), 'refractie' (schuin invallende golven op de kust komen steeds meer loodrecht op de kust te staan), 'golfdissipatie door bodemwrijving' (wrijvingsverliezen tussen waterbeweging en bodemoppervlak zorgen voor een golfhoogte-verlagend effect), 'golfdissipatie door breken' (golven worden steiler en korter; er ontstaat een instabiele situatie waarbij de golven breken) en 'niet-lineaire 3 golfinteracties' ofwel triads (transporteren van energie van de piek van het spectrum naar hogere en lagere frequenties).



Figuur 2.1 Voorbeeld van golfgroei voor verschillende waarden van de strijklengte (vergelijkbaar aan golfgroei in tijd). Bron: Grafiek uit Holthuijsen (2007, Figuur 6.4).



Figuur 2.2 Schematisatie van de golfspectrale vervorming door de diepwater golfenergie brontermen. Bron: Grafiek uit Holthuijsen (2007, Figuur 6.27).

### 2.2.2 Het model

Het SWAN ('Simulating WAVes Nearshore') model, ontwikkeld aan de TU Delft specifiek voor toepassingen in ondiepe kustgebieden<sup>1</sup>, meren en estuaria, berekent de golfspectra en daaruit afgeleide parameters, zoals significante golfhoogte, gemiddelde golfperiode en gemiddelde richting, op basis van wind-, stromings- en bodemgegevens.

Gedetailleerde informatie over de in SWAN geïmplementeerde fysica, numeriek schema's, etc. is te vinden in Booij et al. (1999) en op de website <http://swanmodel.sourceforge.net/>. Verder is Holthuijsen (2007) een goed toegankelijk boek over de fysica van windgolven en hoe die in SWAN geïmplementeerd zijn. Een aantal figuren in dit rapport zijn overgenomen uit dit boek.

Voor deze notitie is het van belang op te merken dat de triads-modellering van Elderberky (1996) is gebruikt in SWAN. In die formulering is de energiewisselwerking afhankelijk van de bifase ( $\beta$ ), geparameteriseerd als functie van het lokale spectrale Ursellgetal ( $Ur$ ):

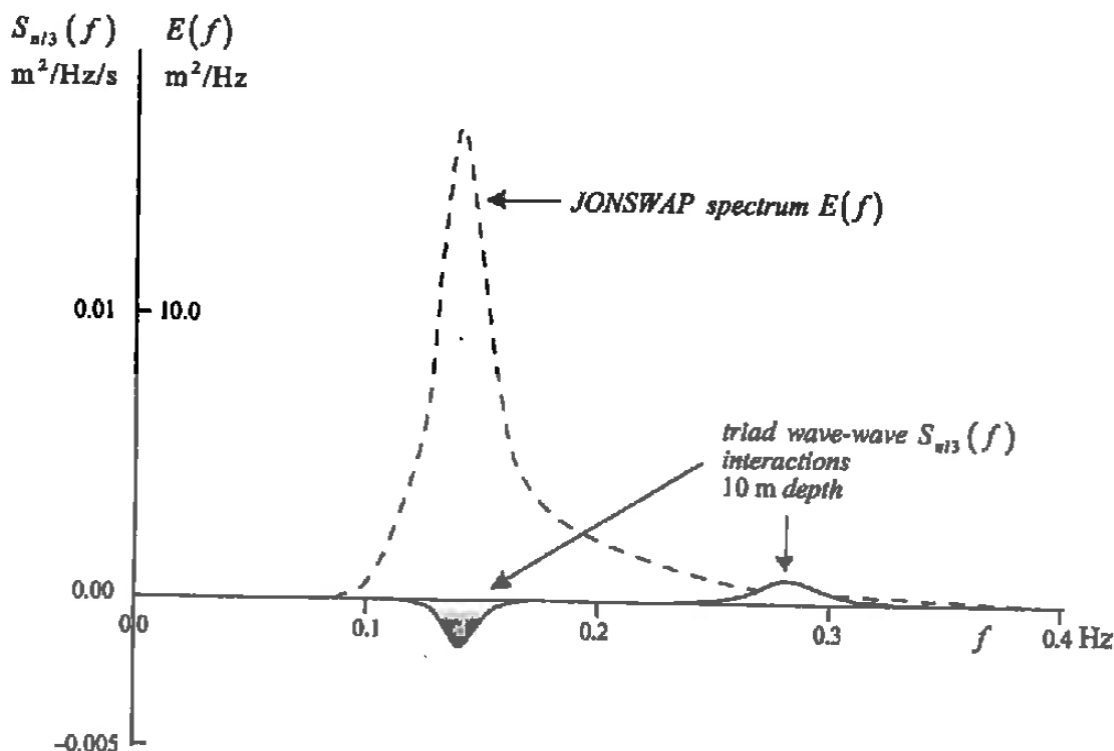
$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{Ur}\right), \quad (2.7)$$

1. Als vuistregel kan worden gehanteerd dat wanneer de waterdiepte kleiner is dan de helft van de golflengte, de golfvoortplanting beïnvloed wordt door de bodem, en dan wordt het gebied geclassificeerd als ondiep.

waar het spectrale Ursellgetal  $Ur$  (de verhouding tussen de mate van niet-lineariteit en dispersiviteit) berekend wordt als

$$Ur = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_{m0} T_{m0,1}^2}{d^2} \quad (2.8)$$

In deze formulering wordt alleen het transporteren van energie van de piek van het spectrum naar hogere frequenties beschouwd, zie Figuur 2.3. Echter, door het breken van golven in ondiep water is er in werkelijkheid ook een transport van energie naar lagere frequenties die van belang is voor de belastingen van de waterkeringen. Geen rekening houden met energie die getransporteerd wordt naar lagere frequenties kan leiden tot een onderschatting van de golfperiode. Zodra de waarde van  $Ur$  groter is dan ongeveer 0.1, kunnen triads in SWAN voor een drastische reductie van de gemiddelde golfperiode zorgen.



Figuur 2.3 Voorbeeld van een SWAN berekening van de triads bronterm ( $S_{n13}$ ). Bron: Grafiek uit Holthuijsen (2007, Figuur 8.14).

Er bestaat een SWAN testversie, waarbij door triads wisselwerking van energie naar lagere frequenties (SAM1D, Janssen, 2006) wordt getransporteerd. Echter, het is alleen voor ééndimensionale simulaties geïmplementeerd en (nog) niet operationeel (zie van der Westhuijsen, 2007).

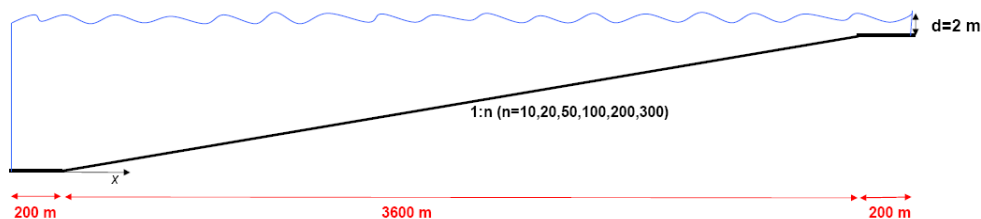
## 2.2.3 De berekeningen

Tijdens deze korte bureaustudie zijn een aantal SWAN sommen gedraaid met de huidige SWAN versie 40.72ABCDE. Het zijn allemaal ééndimensionale simulaties met

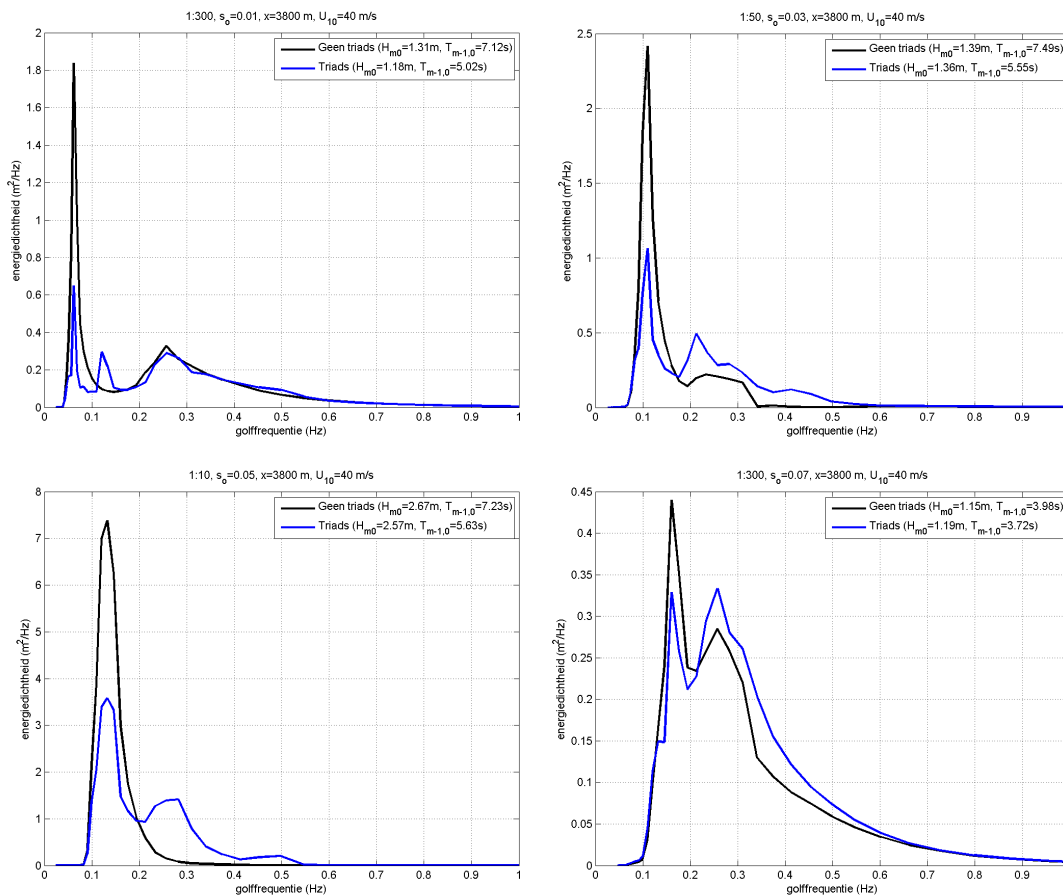
- een bodemschematisatie zoals aangegeven in Figuur 2.4, met hellingen 1:300, 1:200, 1:100, 1:50, 1:20 en 1:10,
- een offshore significante golfhoogte van 4 m met een geassocieerde golfsteilheid die is gevarieerd tussen 0.01 en 0.07 met stappen van 0.01, en
- een uniforme windsnelheid ( $U_{10}$ ) van 40 m/s.

Voor elke van deze 6 bodemhellingen en 7 golfsteilheden (42 combinaties) zijn SWAN sommen uitgevoerd met en zonder triads. Figuur 2.5 laat het effect zien van triads op de golven op een afstand van 3800 m van de offshore rand van het model (de locatie waar de bodem een constant diepte van 2 m krijgt) voor een viertal combinaties.

De resultaten van de berekeningen zijn gegeven in paragraaf 4.2.2. In deze ééndimensionale situaties is duidelijk te zien dat triads de energie bij de piek van het spectrum naar hogere frequenties (2x en 4x de piekfrequentie) transporteert. Dit maakt de gemiddelde periode  $T_{m-1,0}$  kleiner. De significante golfhoogte  $H_{m0}$  blijft onveranderd.



Figuur 2.4 Opzet van de bodem in de SWAN simulaties. Van offshore naar de kust (van links naar rechts in het figuur) er is eerst over 200 m een horizontale bodem, daarna over een afstand van 3600 m een bodemhelling van 1:n, en de laatste 200 m van de bodem heeft een diepte gelijk aan 2m.



Figuur 2.5 Voorbeelden van met SWAN berekende spectra met en zonder triads (van linksboven naar rechtsonder neemt, voor verschillende bodemhellingen, de offshore golfsteilheid  $s_o$  toe van 0.01 tot 0.07).

## 2.3 Nieuwe SWAN Westerschelde berekeningen

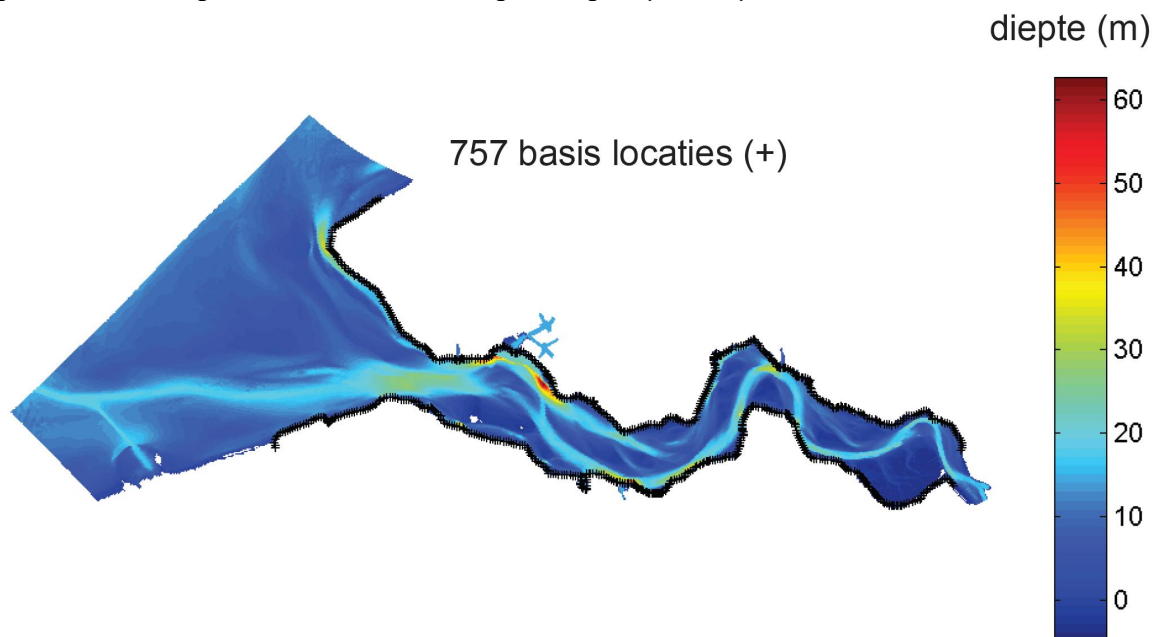
Het rekenmodel SWAN vormt de basis voor de hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van de primaire waterkeringen. Onlangs zijn er nieuwe SWAN berekeningen uitgevoerd met gebruikmaking van de nieuwe inzichten uit SBW (Van der Westhuysen et al., 2012) voor de primaire waterkeringen in de Westerschelde. Er waren in totale 1800 beschouwde combinaties:

- windsnelheid (vanuit 20 m/s t/m 40m/s in stappen van 5 m/s;  $U_{10} = 20, 25, 30, 35$  en 40 m/s),
- windrichting (90, 180, 210, 240, 270, 300, 330 en 360°N),
- offshore surge (0, 2 en 4 m),
- faseverschil getijpiek en stormpiek (0, 4 en 8 uur), en
- vijf tijdstippen (-2, -1, 0, 1 en 2 uur) rond piek van de storm.

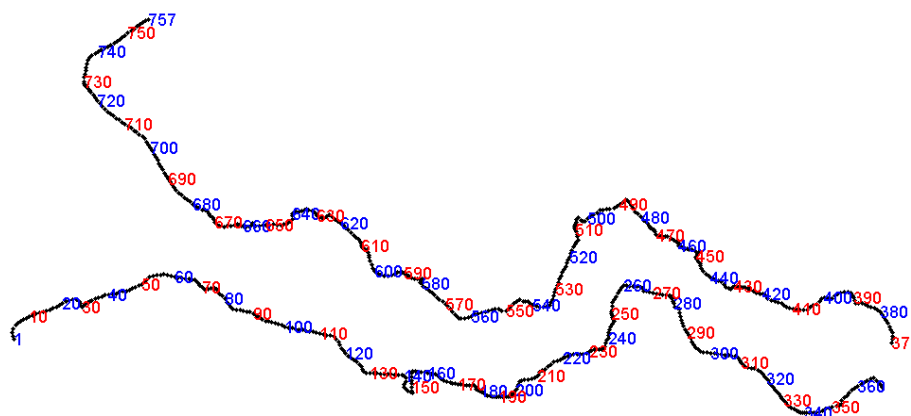
Figuur 2.5 laat de gebruikte bodemschematisatie (gelijk aan het modeldomein) en de basis uitvoerlocaties (+) van de SWAN berekeningen in de Westerschelde zien. De resultaten van deze sommen op de 757 basislocaties zijn hier geanalyseerd. De nummering van de locaties start in het zuidwesten en loopt eerst langs de zuidoever naar het oosten, en vervolgens via de noordoever weer naar het westen, zie Figuur 2.8. Steeds betreft het punten op circa 30 tot 80 m uit de teen van de dijk.



Merk op dat op een aantal van de locaties er geen resultaten zijn wanneer de waterstand te laag is en de locatie droogvalt. Verder is voor veel van de beschouwde situaties de verhouding tussen de lokale significante golfhoogte en diepte niet erg groot, waardoor dit geen informatie geeft over de maximale golfhoogte op ondiep water.



Figuur 2.6 Bodemschematisatie en basis uitvoer locaties (+) van de SWAN Westerschelde berekeningen.

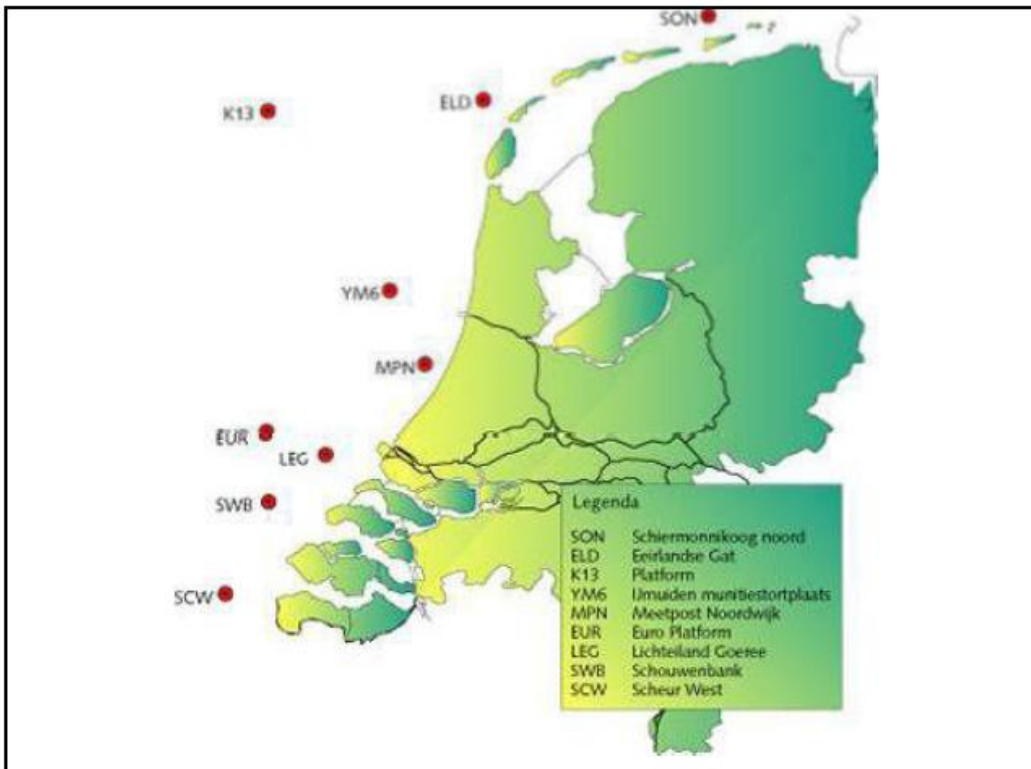


Figuur 2.7 Nummering van de basisuitvoerlocaties van de toegepaste SWAN Westerschelde berekeningen.

## 2.4 Metingen

### 2.4.1 Noordzee

Rijkswaterstaat voert golfmetingen uit op negen offshore meetstations langs de Nederlandse kust. De locatie van deze boeien is aangegeven in Figuur 2.8. De Schouwenbank (SWB) en Scheur West (SCW) boeien zijn gelokaliseerd offshore van de Zeeuwse Getijdewateren. De gemeten significante golfhoogte en golfperiode bij deze boeien worden hier geanalyseerd met het doel om de golfsteilheid offshore van de Zeeuwse Getijdewateren te karakteriseren. De data is gevalideerde en 3-uurlijks van 1979 voor SWB, resp. 1985 voor SCW tot 2008 beschikbaar.



Figuur 2.8 Locatie van de negen offshore meetstations langs de Nederlandse kust.

## 2.4.2 Meetnet Zeeuwse Getijdewateren

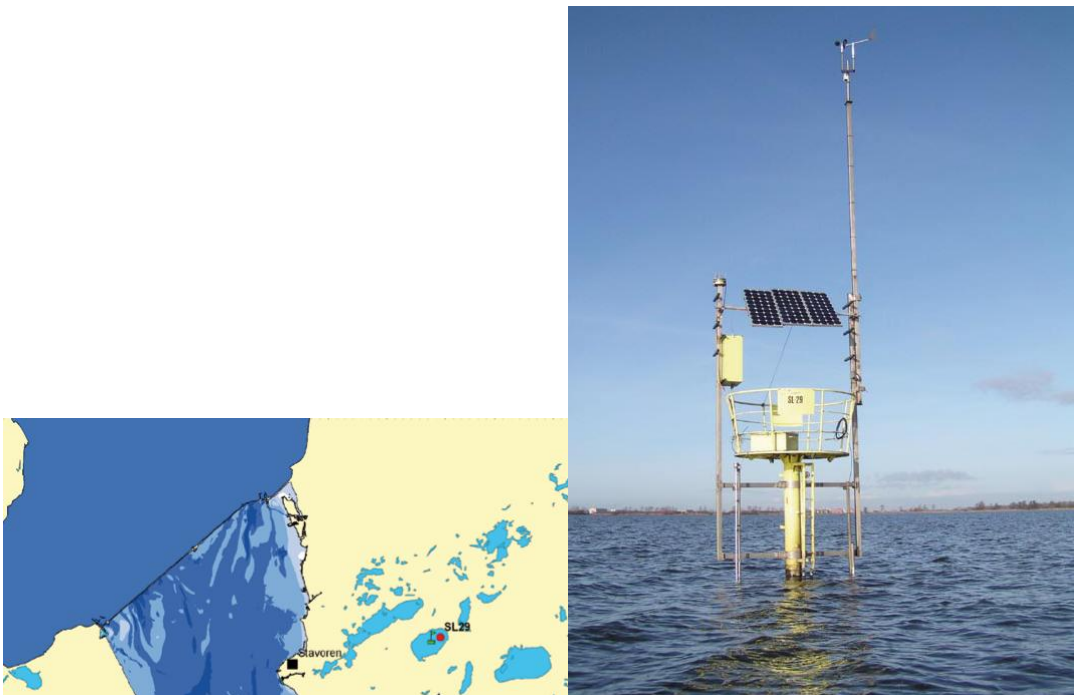
Figuur 2.9 laat de meetlocaties van Meetnet Zeeuwse Getijdewateren zien. Dit meetnet bevat een aantal golfmeetlocaties in de Wester- en Oosterschelde. De data van een aantal meetlocaties dichtbij de waterkeringen (Keet, HFP1, PVT1 en BAT1) worden hier geanalyseerd met het doel om de golfsteilheid in de Zeeuwse Getijdewateren te karakteriseren. De data is per 30 minuten beschikbaar tot 2010 (zie [www.HMCZ.nl](http://www.HMCZ.nl)) vanaf 1999 voor Keet, HFP1 en BAT1 en vanaf 2001 voor PVT1. Helaas zijn er verschillende perioden waarin er geen data beschikbaar is. Verder is de kwaliteit van de data helaas onbekend. Binnen de scope van het project was het niet mogelijk de data te valideren.



Figuur 2.9 Meetlocaties (●) van Meetnet Zeeuwse Getijdewateren.

### 2.4.3 Slotermeer

Omdat metingen in de Zeeuwse Getijdewateren geen hoge waarden van de verhouding tussen de significante golfhoogte en diepte bij de waterkeringen bevatten, worden de meetdata van het Slotermeer meetstation hier ook geanalyseerd, zie paragraaf 3.2.3. Door Bottema (2007) zijn reeds perioden met hoge waarden van de verhouding tussen de significante golfhoogte en diepte geïdentificeerd.



Figuur 2.10 Slotermeer meetlocatie (SL29). Figuren uit Bottema (2006).

### 3 Maximale significante golfhoogte in ondiep water

Golven kunnen op diep water zich over enorme afstanden voortplanten met een verwaarloosbaar energieverlies. Als ze echter in ondiep water komen, voelen de golven de bodem en zal de golfhoogte afnemen door bodemwrijving. Bij erg kleine waterdiepte kan daarbij ook diepte-geïnduceerd breken optreden. Dit laatste kan een aanzienlijke reductie van de golfhoogte geven, en beïnvloedt ook (in mindere mate) de golfperiode. Als golven boven een ondiepte aan het breken zijn, spreken we van brekende golven. Na de ondiepte kan de waterdiepte weer toenemen en spreken we van gebroken golven. Deze hebben doorgaans een vrij kleine golfsteilheid, die weer kan toenemen onder invloed van de wind. De mate van diepte-geïnduceerd breken is voornamelijk afhankelijk van de verhouding tussen de golfhoogte en de waterdiepte (van bodem tot vrij wateroppervlak). Het is verwaarloosbaar als de verhouding tussen de significante golfhoogte en de diepte  $H_{m0}/d < 0.3$ .

#### 3.1 Literatuur overzicht

##### 3.1.1 Energieverlies t.g.v. dieptegeïnduceerde breken

Battjes en Janssen (2008) geven een overzicht van de 30 jaar ontwikkeling van parametrische modellen voor de energiedissipatie door diepte-geïnduceerd golfbreking, sinds de eerst van deze modellen in 1978 (Battjes en Janssen, 1978). Deze modellen berekenen de energiedissipatie gebruikmakend van een analogie met energiedissipatie in een watersprong (in Engels: "bore") en de kans van breken op basis van een Rayleigh verdeling voor de individuele golfhoogten. In het model van Battjes en Janssen (1978) is de energiedissipatie afhankelijk van de brekingsgolfhoogte:

$$H_b = \gamma d, \quad (3.1)$$

waar  $\gamma$  de brekerindex en  $d$  de lokale waterdiepte weergeeft. De brekerindex is de enige calibratie parameter in het model van Battjes en Janssen (1978). In Battjes en Janssen (1978) is een constant waarde voor  $\gamma$  gelijk aan 0.8 voorgesteld.

Battjes and Stive (1985) hebben het model van Battjes en Janssen (1978) gekalibreerd, gebruikmakend van veld- en laboratoria-metingen, en vonden een sterke correlatie tussen  $\gamma$  en de diep water golfsteilheid ( $s_o$ ). Ze stelden voor om de volgende parameterisatie voor de brekerindex te gebruiken:

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh(33s_o), \quad (3.2)$$

waar  $s_o$  de diep water root-mean-square-golfhoogte ( $H_{rms}$ ) is gedeeld door de diepwater golflengte op basis van de piekperiode. Ruessink et al. (2003) hebben een andere parameterisatie voor de brekerindex afgeleid, als functie van de lokale dimensieloos diepte ( $k_p d$ ),

$$\gamma = 0.76k_p d + 0.29, \quad (3.3)$$

waar  $k_p$  het golfgetal horend bij piekfrequentie is.

Een andere model, dat ook in Battjes en Janssen (2008) beschreven wordt, is het model van Thornton en Guza (1983). Één van de verschillen met het Battjes-Janssen model is de gehanteerde verdeling van golfhoogtes. Door Battjes en Janssen (1978) wordt een afgekapte Rayleighverdeling gehanteerd, waarin verondersteld wordt dat de hoogste golven breken en na dit breken allemaal dezelfde golfhoogte hebben. In het model van Thornton en Guza wordt echter ook in de surfzone<sup>2</sup> een volledige Rayleigh verdeling aangehouden.

In het overzicht van Battjes en Janssen (2008) ontbreekt de referentie Van der Westhuysen (2010), omdat het later gepubliceerd was. Van der Westhuysen (2010) heeft onderzocht of de toen in SWAN geïmplementeerde benadering voor het energieverlies t.g.v. het dieptegeïnduceerde breken, namelijk het model van Battjes en Janssen (1978) met een constante brekerindex van  $0.73^3$ , verbeterd kon worden. De motivatie voor zijn studie was dat in dieptegelimiteerde windgroeisituaties met constante waterdiepte de resultaten van SWAN onderschattingen van de gemeten significante golfhoogtes en golfperiodes gaven, terwijl voor situaties met golven brekend op een hellende bodem de resultaten van SWAN goed waren. Uit gevoeligheidsanalyses bleek dat het model van Battjes en Janssen (1978) zorgt voor een limiet op de golfgroei. Een van de conclusies van Van der Westhuysen (2010) is dat de introductie van een parametrische brekerindex volgens de suggesties van Battjes en Stive (1985), met de diep water golfsteilheid vervangen door de lokale golfsteilheid, of toepassing van Ruessink et al. (2003) in het model van Battjes en Janssen (1978), tot verbeteringen van de resultaten kan leiden. Dit geldt voornamelijk voor een parameterisatie als functie van de lokale dimensieloze diepte (Ruessink et al., 2003), waardoor de verwachting is dat de modelresultaten in dieptegelimiteerde windgroeisituaties verbeterd kunnen worden en in golven brekend op een hellende bodem zijn kwaliteit houden. De brekerindex afhankelijkheid van de lokale golfsteilheid en dimensieloze waterdiepte brengt Van der Westhuysen (2010) tot de conclusie dat de brekerindex gemodelleerd moet worden als functie van de niet-lineariteit van de golf op ondiep-water. Daarom heeft hij een benadering voor het energieverlies t.g.v. diepte-geïnduceerd breken voorgesteld met een brekerindex als functie van de bifase (zie formule (2.7)). Voor  $\beta = 0$  geldt dat de golven sinusvormig zijn en niet breken als gevolg van de beperkte diepte (maar mogelijk wel door steilheid). Als  $\beta \rightarrow -\pi/2$ , krijgen de golven de vorm van een zaagtand en breken ze. Vanwege de veronderstelling dat de brekerindex afhankelijk is van de bifase, is er geen expliciete maximale golfhoogte op een bepaalde diepte. Daarom heeft hij zijn brekerindex formulering toegevoegd aan het model van Thornton en Guza (1983), in plaats van aan het model van Battjes en Janssen (1978). Van der Westhuysen (2010) laat zien dat zijn formulering met het energieverlies t.g.v. diepte-geïnduceerd breken ( $D$ , m<sup>2</sup>/s), gegeven als:

$$D = -\frac{3\sqrt{\pi}}{16} \frac{B^3}{T_{m0,1} d} \left( \frac{\beta}{\beta_{ref}} \right)^n H_{rms}^3, \quad (3.4)$$

met parameters gecalibreerd als  $\beta_{ref} = -\frac{4\pi}{9}$ ,  $B = 0.9$  en  $n = 2.5$ , tot betere resultaten leidt dan de al lang in SWAN geïmplementeerde formulering van Battjes en Janssen (1978). In een later uitgevoerde (maar eerder gepubliceerde) calibratiestudie, heeft Van der Westhuysen (2009) de parameter  $n$  in formule (3.4) afhankelijk gemaakt van de golfsteilheid (Van der Westhuysen, 2009, vgl. (7)).

- 
2. Waar diepte-geïnduceerd breken optreedt.
  3. Het gemiddelde van de (optimale) waarden, zoals berekend door Battjes en Stive (1985).

### 3.1.2 Dieptegelimiteerde maximale significante golfhoogte

Er zijn een aantal vuistregels voor de dieptegelimiteerde maximale  $H_{m0}$ . In het handboek voor dimensionering van gezette taludbekleding (Klein Breteler, 1992) is de volgende vuistregel voorgesteld:

$$(H_{m0})_{\max} = 0.5d_m, \quad (3.5)$$

waar  $d_m$  is de maatgevende waterdiepte, de diepte op een zeewaartse afstand ( $x_m$ ) van de locatie onder beschouwing. Deze afstand is gelijk aan:

$$x_m = \frac{1}{2}L_p, \quad (3.6)$$

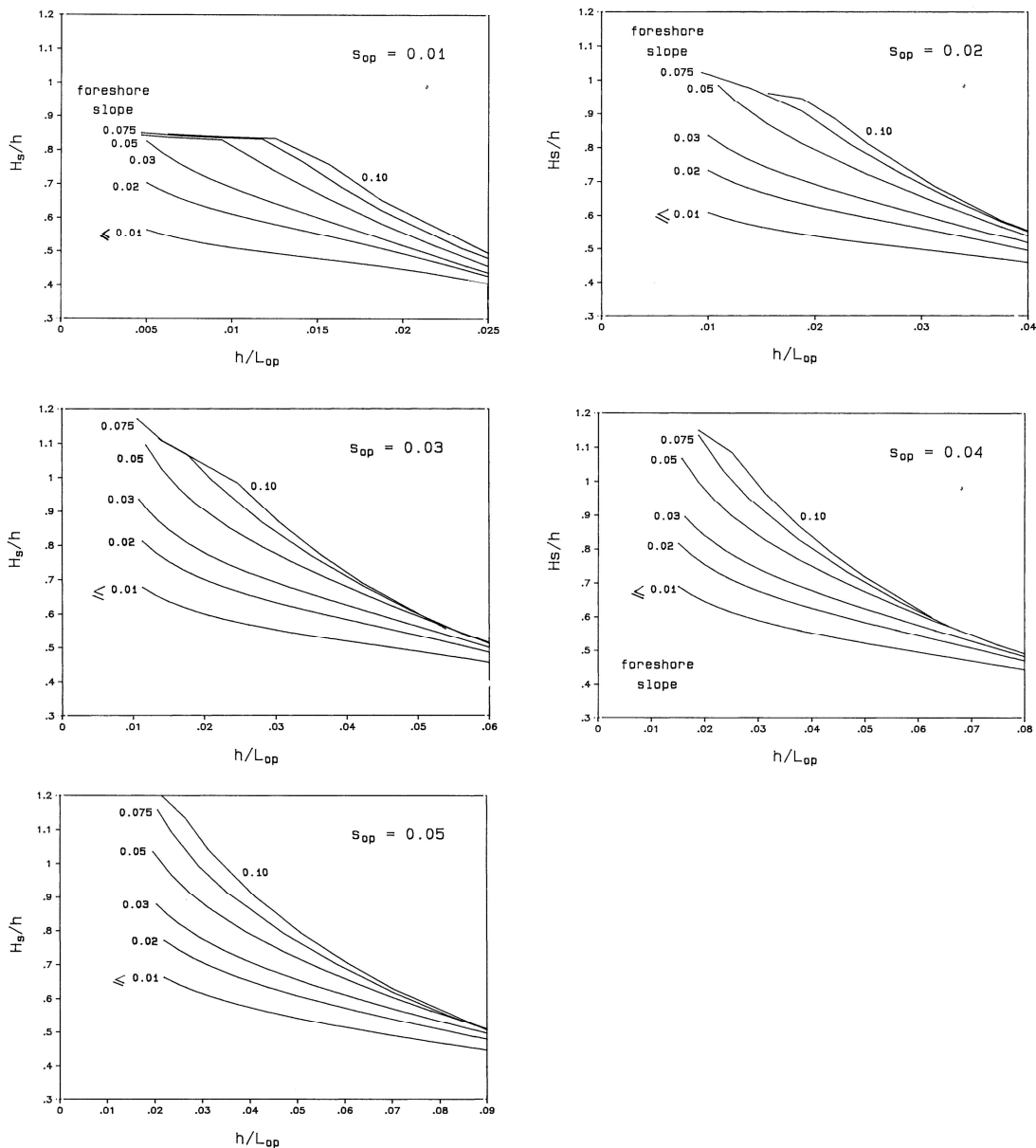
waar  $L_p$  de lokale (in de locatie onder beschouwing) diepwater golflengte op basis van de piekperiode is (zie formule (2.5)).

Deze vuistregel is tot stand gekomen op basis van de ontwerpgrafieken van Van der Meer (1990), en zijn geldigheid is volgens Klein Breteler (1992) beperkt tot situaties met:

- een verhouding tussen de lokale significante golfhoogte en de golflengte op diep water ( $H_{m0}/L_{op}$ ) tussen 0.01 en 0.05.
- een in de richting van de locatie onder beschouwing geleidelijk afnemende waterdiepte;
- een gemiddelde bodemhelling flauwer dan 1:30;
- een verwaarloosbare invloed van refractie en diffractie.

Merk op dat volgens deze vuistregel, in vergelijkbare situaties,  $d_m$  en daardoor  $(H_{m0})_{\max}$  hoger is bij een steilere bodemhelling of langere golflengte (kleinere golfsteilheid).

In plaats van de boven beschreven vuistregel te gebruiken, kunnen ook ontwerpgrafieken van gebruikt worden om een lokale  $(H_{m0})_{\max}$  te berekenen. Deze ontwerpgrafieken, weergegeven in Figuur 3.1, leggen het verband tussen de dimensieloze maximale significante golfhoogte en de golfsteilheid op diep water ( $s_{op} = H_{m0}/L_p$ ), de helling van het voorland en de relatieve lokale waterdiepte ( $d/L_{op}$ ).



Figuur 3.1 Ontwerpgrafieken uit Van der Meer (1990, figuren 1 t/m 3).

De ontwerpgrafieken in Figuur 3.1 waren opgesteld op basis van ENDEC-berekeningen. Het ENDEC golfmodel is een eenvoudig eendimensionaal model dat de formulering van energiebehoud van Battjes en Janssen (1978) gebruikt en rekening houdt met energiedissipatie door dieptegeïnduceerde golfbreking, bodemwrijving en energie-generatie door wind.

Het gebruik van deze ontwerpgrafieken of van de empirische formule van Goda (2000) is geadviseerd in The Rock Manual (CIRIA et al., 2006) voor het berekenen van  $(H_{m0})_{max}$  op voorlanden met geleidelijk afnemende waterdieptes. Zoals in de ontwerpgrafieken zijn de invoerparameters van de formule van Goda (2000) de golfsteilheid op diep water, de helling van het voorland en de relatieve lokale waterdiepte. Volgens Goda (2000) is de maximale significante golfhoogte in ondiep water gelijk aan:



$$(H_{m0})_{\max} = \begin{cases} K_s H' & \text{voor } d/L_{op} > 0.2 \\ \min\{K_s H', \beta_{\max} H', \beta_0 H' + \beta_1 d\} & \text{voor } d/L_{op} < 0.2 \end{cases} \quad (3.7)$$

met:

- $H'$  = diep water offshore significante golfhoogte waarbij verondersteld kan worden dat refractie en diffractie kunnen worden verwaarloosd;
- $K_s = \left[ \tanh(kd) \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \right]$ ;
- $\beta_0 = 0.028 (H'/L_{op})^{-0.38} \exp(20m^{1.5})$ ;
- $\beta_1 = 0.052 \exp(4.2m)$ ;
- $\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32 (H'/L_{op})^{-0.29} \exp(2.4m)\}$ ;
- $k = 2\pi/L_{op}$ ; en
- $m = \tan(\text{bodempelling})$ .

## 3.2 Data analyse

### 3.2.1 SWAN ééndimensionale resultaten

Als eerste zullen de resultaten van de SWAN ééndimensionale simulaties (zie §2.2.3) worden gepresenteerd. Die zijn uitgevoerd omdat de ontwerpgrafieken van Van der Meer en de vuistregel van Klein Breteler (1992) gebaseerd zijn op resultaten van het ééndimensionale ENDEC model. Dit model is minder nauwkeurig dan het SWAN model.

Verwacht wordt dat het effect van drie-golf wisselwerkingen (triads) significant is in de eendimensionale berekeningen. De huidige formulering in SWAN leidt tot een onderschatting van verschuiving van energie naar lage frequenties en een overschatting van de verschuiving naar hoge frequenties. Als gevolg hiervan wordt de gemiddelde periode mogelijk onderschat. Om deze redenen beschouwen we twee verzamelingen van resultaten:

- 1 die van de berekeningen zonder triads en
- 2 die van de berekeningen met triads met dezelfde triads instellingen als gebruikt in de berekeningen met de instellingen zoals voorbereid in SBW.<sup>4</sup>

Figuur 3.2 en Figuur 3.3 laten de ontwerpgrafieken op basis van SWAN simulaties met een windsnelheid van 40 m/s respectievelijk zonder en met triads zien. Er is een figuur per beschouwde diep water golfsteilheid  $s_o$  en in elke figuur een lijn per beschouwde bodempelling. Alleen de modelresultaten op een afstand tussen 200 en 2800 m van de offshore rand zijn in de figuren gepresenteerd (in termen van  $d/L_{op}$  op de horizontale as).

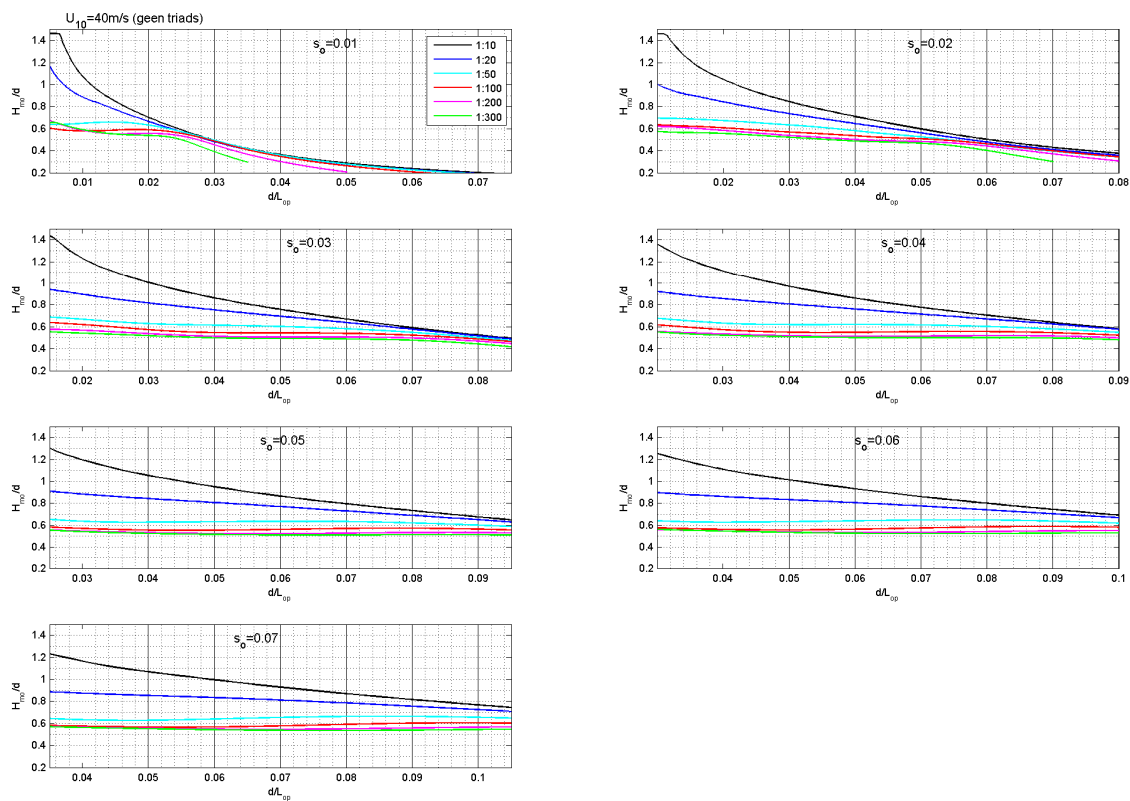
4. In de invoer bestanden van de ééndimensionale SWAN berekeningen zijn de volgende instellingen voor diepte-geïnduceerde golfbreking en triads gebruikt:

- BREA WESTH alpha=0.96 pown=2.5 bref=-1.39630 shfac=500.0
- TRIAD trfac=0.1 cutfr=2.5

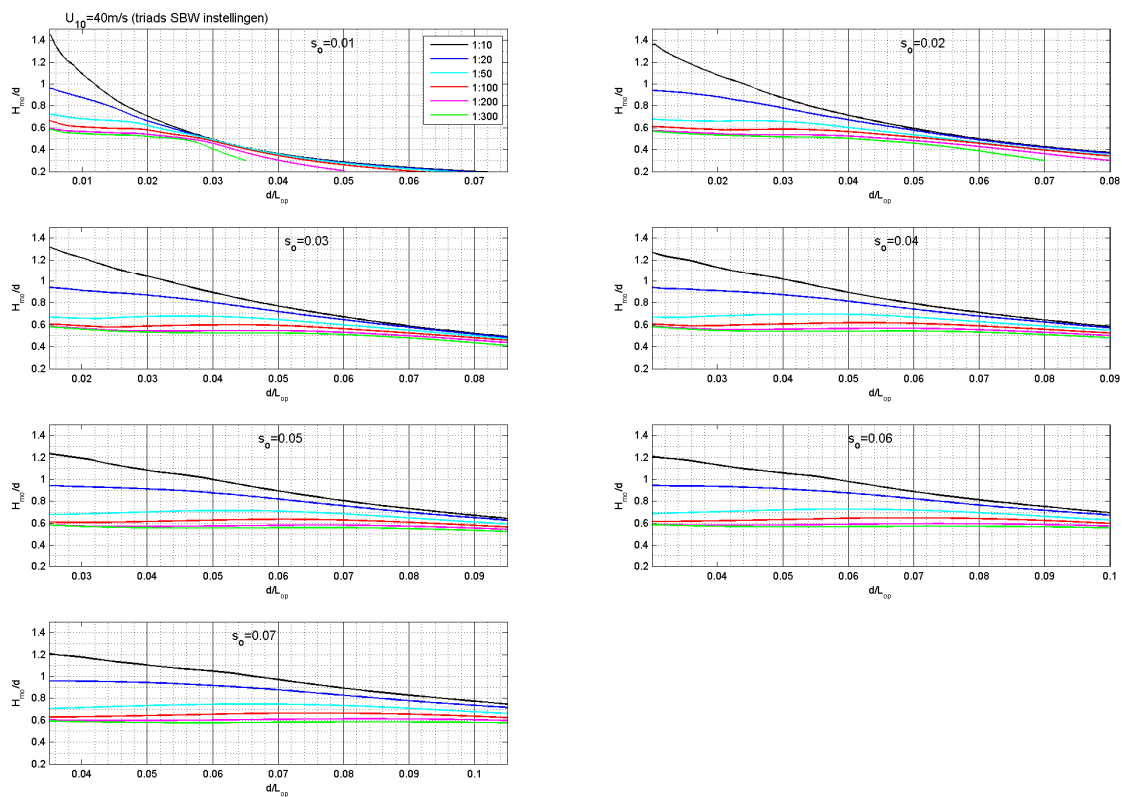
In de berekeningen waarin triads niet geactiveerd zijn is de TRIAD regel niet gegeven.

Zowel Figuur 3.1, Figuur 3.2 en Figuur 3.3 illustreren dat op steile bodems hoge  $H_{m0}/d$  waarden kunnen ontstaan en dat, in vergelijking met het effect van de bodemhelling, het effect van de diep water golfsteilheid op  $H_{m0}/d$  beperkt is. Dat het effect van de diep water golfsteilheid op  $H_{m0}/d$  beperkt is, is ook te zien in Figuur 3.4. De figuur laat de variatie zien van de maximale, met een SWAN eendimensionale simulatie berekende, waarde van  $H_{m0}/d$ , hier weergegeven als  $((H_{m0}/d)_{\max})$ , als functie van de bodemhelling.

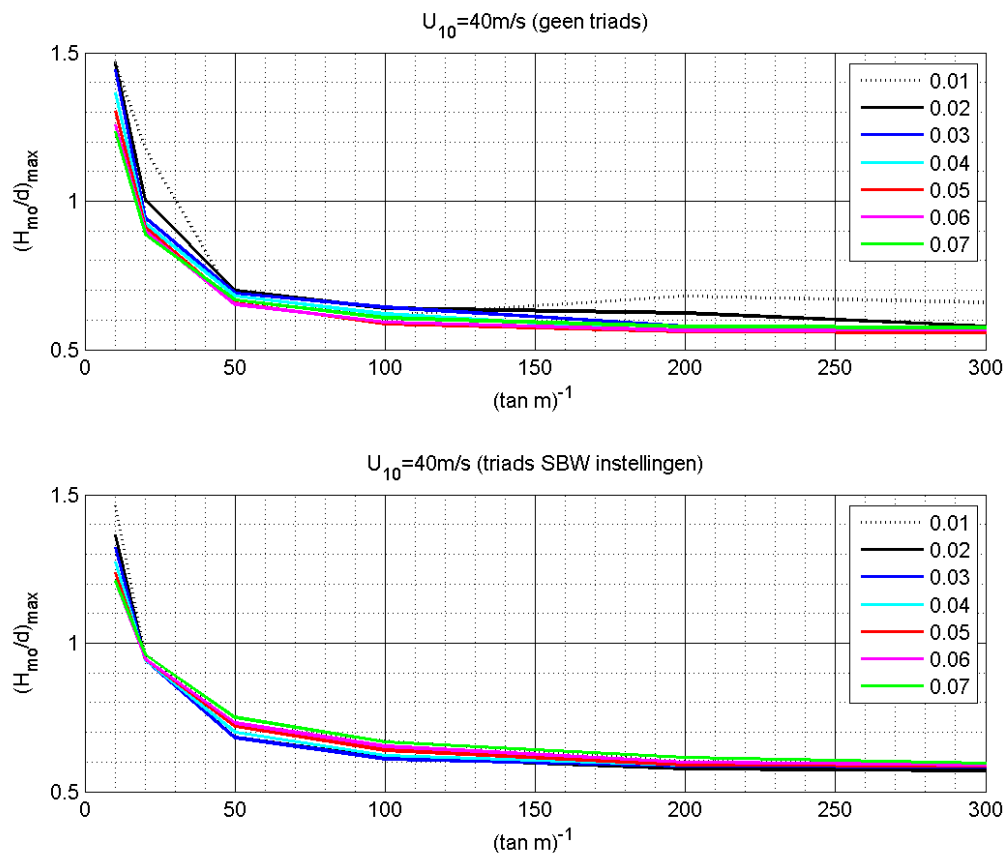
De vergelijking tussen Figuur 3.2 en Figuur 3.3 laat zien dat het effect van het meenemen van triads beperkt is op  $H_{m0}/d$ . Dat is zoals verwacht omdat de niet lineaire golfinteracties energie-behoudend zijn. Daarnaast blijft er toch het effect van de wind en van de veranderingen in golfsteilheid.



Figuur 3.2 Ontwerpgrafieken op basis van SWAN simulaties met  $U_{10} = 40$  m/s, waarin triads niet geactiveerd zijn.



Figuur 3.3 Ontwerpgrafieken op basis van SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid, met triads geactiveerd (met de SBW instellingen).



Figuur 3.4  $(H_{m0}/d)_{\max}$  vs de bodemhelling. Figuur boven: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid, zonder triads. Figuur beneden: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid met triads (SBW instellingen). De kleuren van de lijnen identificeren de waarde van  $s_{op}$ .

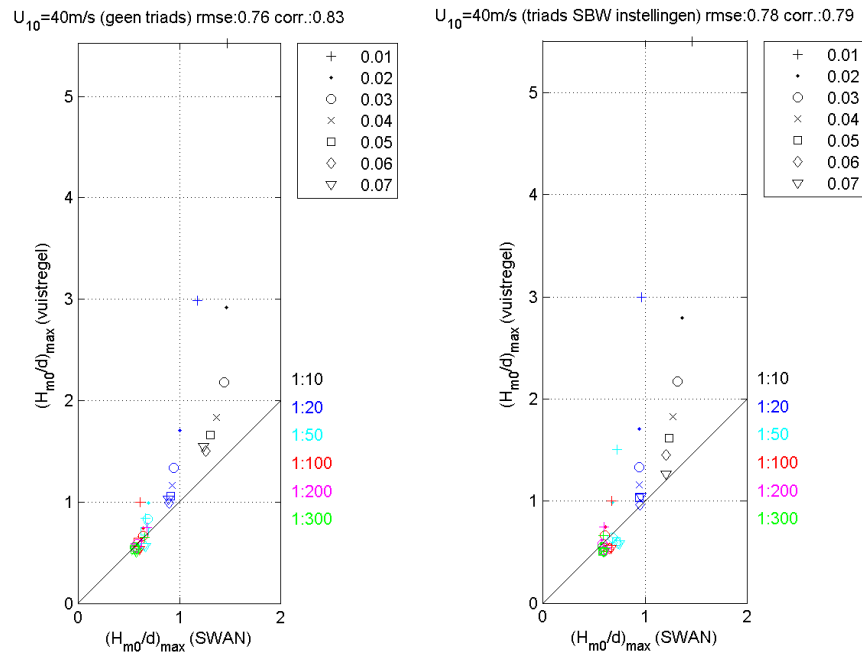
De vergelijking tussen de ontwerpgrafieken van Van der Meer (1990) (Figuur 3.1) en de SWAN ontwerpgrafieken (Figuur 3.2 en Figuur 3.3) laat zien dat de SWAN ontwerpgrafieken hogere  $H_{m0}/d$  waarden geven voor steile bodems. Omdat de ontwerpgrafieken in Figuur 3.2 of Figuur 3.3 berekend waren op basis van een beter golfmodel met de huidige inzichten wat betreft dieptegelimiteerde golfbreken, adviseren we data van deze grafieken te gebruiken in plaats van de grafieken van Van der Meer (1990).

### 3.2.1.1 Vergelijkingen met vuistregel en Goda (2000)

In deze paragraaf zijn de maximale  $H_{m0}/d$  schattingen van de vuistregel (zie formule (3.5)) van Klein Breteler (1992) en van de empirische formule van Goda (2000) vergeleken met de maximale  $H_{m0}/d$  waarden in de SWAN resultaten.

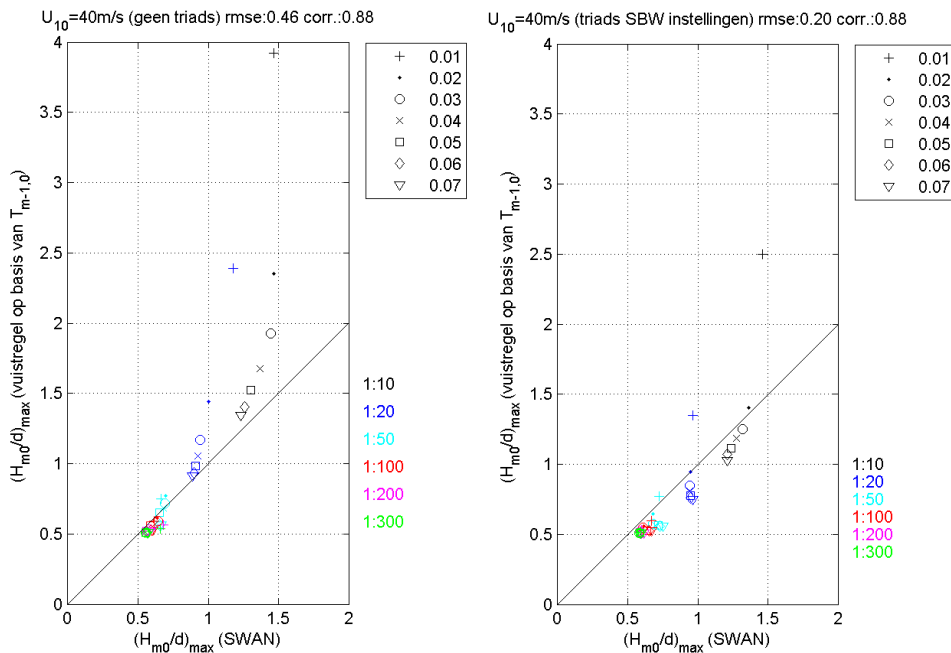
Figuur 3.5 geeft een vergelijking tussen de  $(H_{m0}/d)_{\max}$  waarden, met enerzijds de schattingen van de vuistregel op basis van  $T_p$  en anderzijds de SWAN resultaten met en zonder triads. De schattingen met de vuistregel waren berekend door gebruik te maken van de in SWAN berekende lokale golfhoogte op de locatie waar  $H_{m0}/d$  maximaal is in de SWAN resultaten. Zoals te zien is in Figuur 3.5, heeft de vuistregel een grote correlatie met de door SWAN berekende waarden. Verder, zijn de schattingen met de vuistregel meestal

conservatief. Omdat de vuistregel gebruik maakt van de lokale golfhoogte uit SWAN, zijn de schattingen voor de situatie met triads voor aantal gevallen lager dan die van de situatie zonder triads in de SWAN berekeningen.



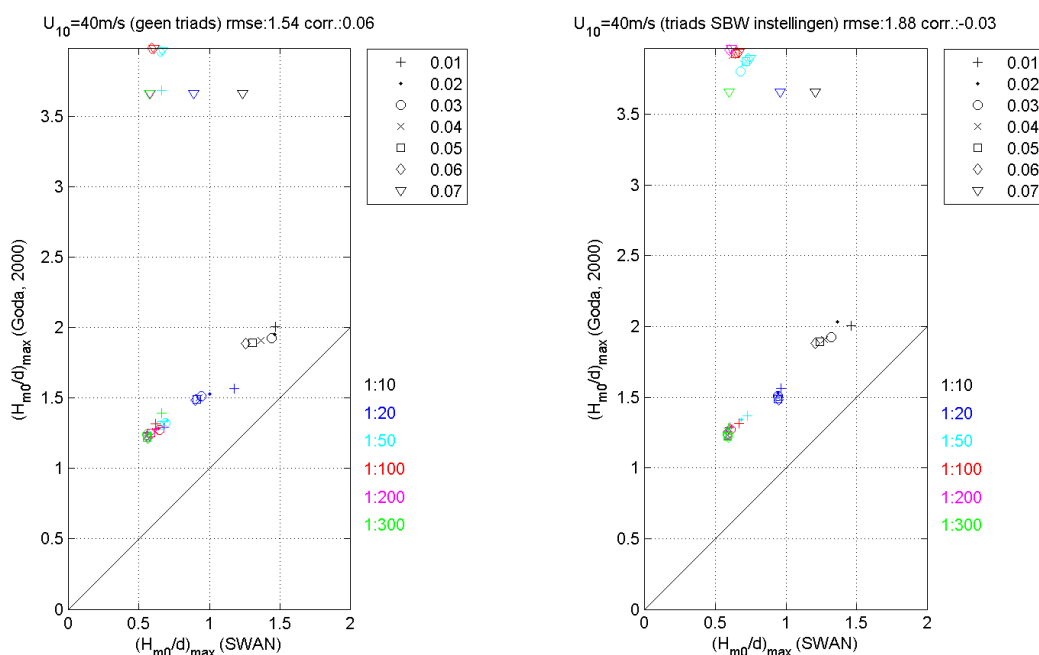
Figuur 3.5  $(H_{m0}/d)_{\max}$  schattingen van de vuistregel op basis van  $T_p$  vs de SWAN waarden. De vorm van de symbolen geeft de diep water golfsteilheid en de kleur de bodemhelling.

Figuur 3.6 laat dezelfde vergelijkingen zien als Figuur 3.5, maar hier zijn de resultaten van de vuistregel op basis van  $T_{m-1,0}$  gepresenteerd (d.w.z.  $x_m = 0.5L_{m-1,0}$  in formule (3.6)). Merk op dat in het huidige Steentoets-programma relaties als functie van  $T_{m-1,0}$  niet van belang zijn. Het huidige programma gebruikt alleen de golfperiodemaat  $T_p$ . Voor de volledigheid zijn in deze rapportage ook resultaten met  $T_{m-1,0}$  gepresenteerd. Zoals te zien is in de figuur, hebben de resultaten een nog grotere correlatie met de door SWAN berekende waarden (88%) dan die in Figuur 3.5. Doordat SWAN een wat te kleine golfperiode berekent (door triads), is ook de golfhoogte wat te klein. Dat heeft bij gebruik in de vuistregel als effect dat de maximale  $H_{m0}$  bij ondiep water ook wat aan de lage kant uitpakt. De resultaten voor de situatie met triads (grafiek rechts in Figuur 3.6) liggen daarom in het algemeen onder de lijn met een maximaal verschil van 0.21.



Figuur 3.6  $(H_{m0}/d)_{\max}$  schattingen van de vuistregel op basis van  $T_{m-1,0}$  vs de SWAN waarden. De vorm van de symbolen geeft de diep water golfsteilheid en de kleur de bodemhelling.

Figuur 3.7 geeft een vergelijking tussen de  $(H_{m0}/d)_{\max}$  geschat met de formule van Goda (2000), formule (3.7), en de  $(H_{m0}/d)_{\max}$  uit de SWAN resultaten met en zonder triads. Zoals te zien is in Figuur 3.7, overschatten ze in vele gevallen de SWAN data en hebben ze een geringe correlatie met de door SWAN berekende waarden. De hoge waarden van  $(H_{m0}/d)_{\max}$  volgens Goda's formule (waarden groter dan 3.5 in Figuur 3.7) voldoen aan het criterium  $d/L_{op} > 0.2$  (zie formule (3.7)). Voor de andere waarden geldt  $d/L_{op} < 0.2$ . Wat opvalt is dat voor de grotere golfsteilheden de Goda formule zich niet meer laat vergelijken met de SWAN uitkomsten. Kennelijk is het tweede deel van de formule van Goda nog vrij redelijk, maar het eerste deel laat grote verschillen zien met de SWAN resultaten.



Figuur 3.7  $(H_{m0}/d)_{\max}$  schattingen van Goda (2000) vs de SWAN waarden. De vorm van de symbolen geeft de diep water golfsteilheid en de kleur de bodemhelling.

De gepresenteerde figuren laten zien dat de vuistregel van Klein Breteler (1992), die al langere tijd gebruikt wordt voor steenzettingen (gebaseerd op ENDEC berekeningen), leidt tot waarden die een grote correlatie hebben met de resultaten van het SWAN model. Deze vuistregel kan dus in principe gebruikt worden als criterium voor maximale significante golfhoogte. De geconstateerde onderschatting van de vuistregel ten opzichte van SWAN zou veroorzaakt kunnen zijn doordat in SWAN de triads nog niet zo goed worden verdisconteerd.

Geadviseerd wordt om het waarschuwingscriterium niet gelijk te kiezen aan de vuistregel, omdat er dan soms ook gewaarschuwd wordt als er niets mis is met de golfcondities. Door het criterium wat hoger te kiezen wordt alleen gewaarschuwd als de kans groot is dat de golfcondities mogelijk niet kloppen. Daarom wordt geadviseerd het waarschuwingscriterium in Steentoets op  $(H_{m0})_{\max} = 0.6d_m$  te stellen. Met deze wijziging zal het aantal waarschuwingen beperkt blijven tot die gevallen waar mogelijk echt iets aan de hand is.

Goda's formule leidt tot conservatieve resultaten, wat in principe gewenst is, maar wijken te veel af van de SWAN resultaten. In geval van grote golfsteilheden is Goda duidelijk niet meer met SWAN vergelijkbaar, en daarom niet meer bruikbaar. Immers: de basis voor de ontwerprandvoorwaarden ligt in het SWAN model.

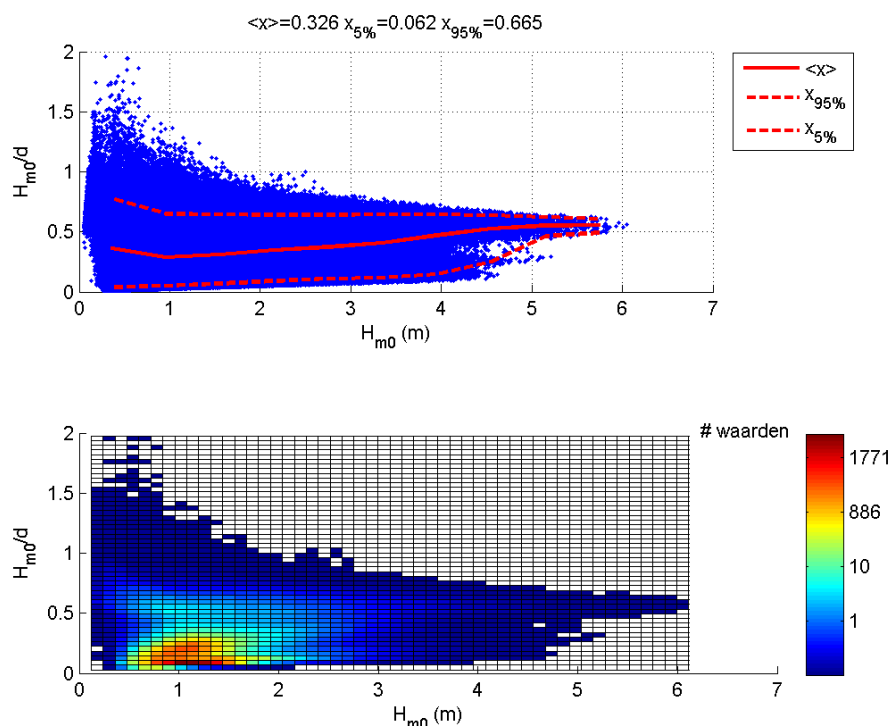
### 3.2.2 SWAN resultaten voor de Westerschelde

De voorgaande gepresenteerde ontwerpgrafieken, vuistregel en empirische formules zijn geldig voor geïdealiseerde ééndimensionale situaties waar de bodemhelling bijna constant is. Voor complexe tweedimensionale situaties wordt geadviseerd het SWAN model te gebruiken om de golfcondities op ondiep water te berekenen. De rekenresultaten die in Steentoets worden gebruikt hebben in de meeste gevallen betrekking op complexe tweedimensionale

situaties. Met recentelijk met SWAN afgeleide resultaten volgens de inzichten uit SBW voor de Westerschelde kunnen deze resultaten worden geëvalueerd.

Figuur 3.8 laat in twee grafieken de variatie zien van de lokale  $H_{m0}/d$  als functie van de lokale  $H_{m0}$  in de SWAN resultaten in de Westerschelde (1800 beschouwde situaties op 757 locaties, zie §2.3). De rode lijnen in het bovenste figuur geven het gemiddelde (ongebroken lijn) en 5 en 95% percentiel (gestippelde lijnen) van de data als functie van  $H_{m0}$ . De onderste figuur laat de dichtheid-scattergrafiek van de data zien.

De figuur laat zien dat in de SWAN resultaten de maximale waarde van  $H_{m0}/d$  ongeveer 2 is en dat  $H_{m0}/d$  waarden boven 1 zeldzaam zijn. We beschouwen de  $H_{m0}/d$  waarden boven 1.5 als uitschieters: die condities moeten nader beschouwen worden. Nader beschouwen van de SWAN Westerschelde resultaten valt echter buiten de scope van deze studie. Ook is in de figuur te zien dat voor hogere waarden van  $H_{m0}$  de maximale  $H_{m0}/d$  waarden lager zijn. Als  $H_{m0} > 4m$  geldt er in feite dat  $(H_{m0}/d) < 0.74$ . Er is echter veel spreiding in de figuur doordat er veel datapunten zijn waar de verhouding tussen de lokale significante golfhoogte en waterdiepte niet maximaal is. Dit maakt het figuur minder geschikt voor de evaluatie van de maximale  $H_{m0}$  op ondiep water. Daarom is  $H_{m0}/d$  als functie van andere variabelen gepresenteerd om te kijken of sterkere correlaties te vinden zijn. Dat is in Figuur 3.9 en Figuur 3.10 gedaan.



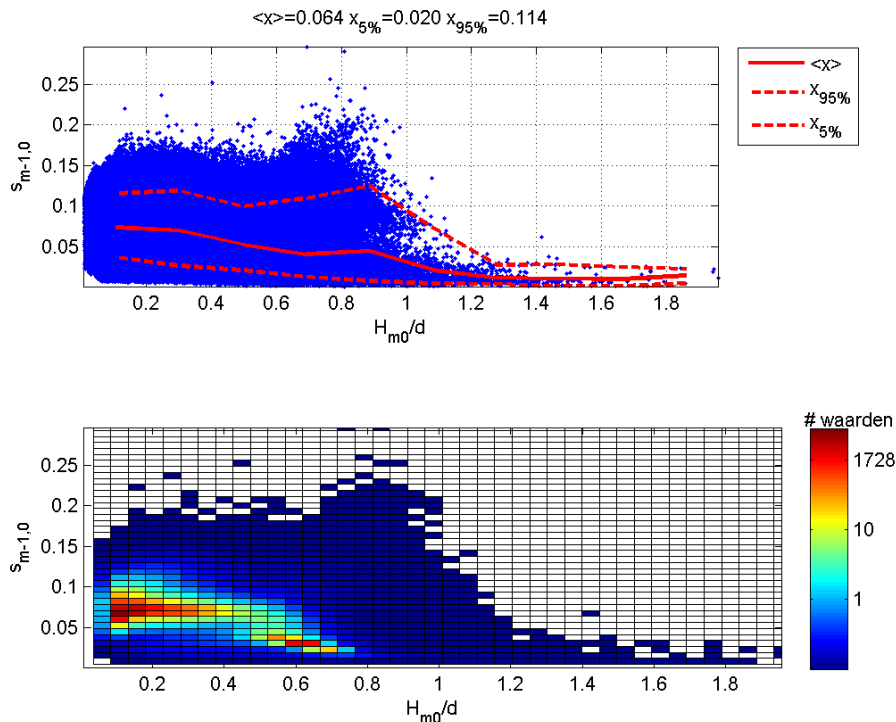
Figuur 3.8  $H_{m0}$  vs  $H_{m0}/d$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.

Figuur 3.9 laat in twee grafieken, met dezelfde formaat als Figuur 3.8, de variatie zien van de lokale  $s_{m-1,0}$  (de golfsteilheid op basis van  $T_{m-1,0}$ ) met de lokale  $H_{m0}/d$  in de SWAN resultaten in de Westerschelde. Terwijl een correlatie tussen  $s_{m-1,0}$  en  $H_{m0}/d$  te zien is in de onderste figuur als gelet wordt op de niet-blauwe hokjes, zoals het geval is voor Figuur 3.8, is



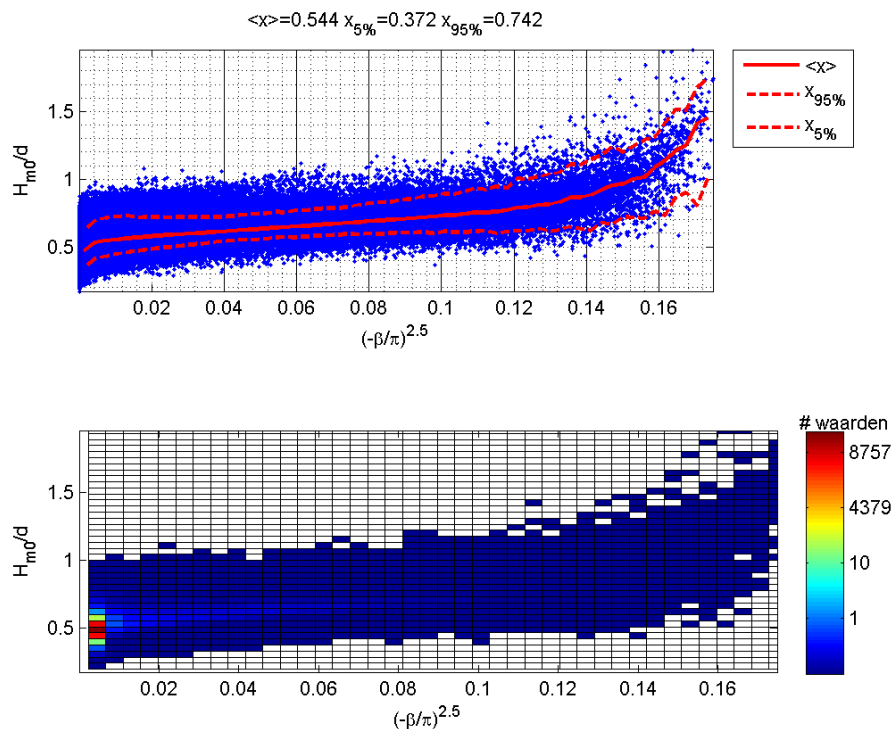
de spreiding van de data groter en er lijken veel datapunten te zijn waar de verhouding tussen het lokale significante golfhoogte en diepte niet maximaal is.

Uit Figuur 3.8 en Figuur 3.9 kunnen we toch tot de conclusie komen dat de hoge  $H_{m0}/d$  waarden in de SWAN resultaten geassocieerd zijn met lage waarden van  $H_{m0}$  en  $s_{m-1,0}$ .



Figuur 3.9  $H_{m0}/d$  vs  $s_{m-1,0}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.

Zoals aangegeven in formule (3.4), is in de SWAN- berekeningen het energieverlies t.g.v. dieptegeïnduceerde breken afhankelijk van  $(\beta/\beta_{ref})^n$ . Figuur 3.10 laat in twee grafieken de variatie zien van de lokale  $H_{m0}/d$  met de lokale  $(-\beta/\pi)^{2.5}$  ( $\beta_{ref} = -\pi$  en  $n = 2.5$ ) in de SWAN resultaten voor  $(-\beta/\pi) > 0.01$ . Voor  $(-\beta/\pi) < 0.01$  is het onwaarschijnlijk dat lokaal dieptegeïnduceerde breken voorkomt. Helaas kan in de resultaten van SWAN (1800 beschouwde situaties op 757 locaties) geen uitsplitsing gemaakt worden tussen situaties met diepte-geïnduceerd breken en situaties waarin dat niet optreedt. Met bovenstaand criterium worden echter wel een groot aantal van de situaties zonder diepte-geïnduceerd breken uit de data verwijderd.

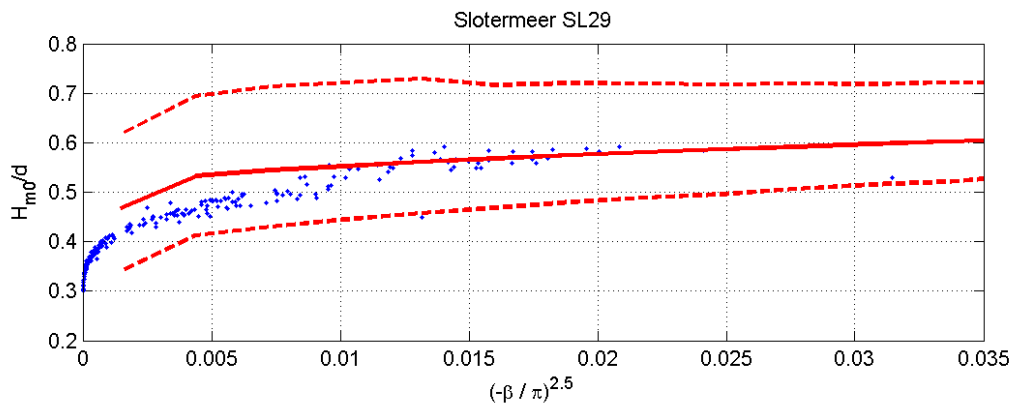


Figuur 3.10  $(-\beta/\pi)^{2.5}$  vs  $H_{m0}/d$  in SWAN resultaten voor de Westerschelde.

In Figuur 3.10 is een duidelijke variatie van de lokale  $H_{m0}/d$  met de lokale  $(-\beta/\pi)^{2.5}$  te zien, met een relatief (t.o.v. Figuur 3.8 en Figuur 3.9) lage spreiding. Merk op dat alle gevallen met niet brekende golven helemaal links in deze figuur zitten. Dat zijn veruit de meeste datapunten.

### 3.2.3 Slotermeer metingen

Omdat de beschikbare Westerschelde metingen geen hoge waarden van  $H_{m0}/d$  bevatten, analyseren we de meetdata van het Slotermeer meetstation ten aanzien van de maximale  $H_{m0}/d$ . Deze data was al door Bottema (2007) geanalyseerd en hij heeft de hoge waarden van de gemeten  $H_{m0}/d$  geïdentificeerd. Voor die perioden geeft Figuur 3.11 de gemeten variatie van de lokale  $H_{m0}/d$  met de lokale  $(-\beta/\pi)^{2.5}$ . Ook voor de Slotermeer metingen is het verband tussen  $H_{m0}/d$  en  $(-\beta/\pi)^{2.5}$  duidelijk. De rode lijnen uit de bovenste figuur van Figuur 3.10 zijn ook in Figuur 3.11 weergegeven. Alle gemeten data valt binnen de SWAN-berekening 90% 'betrouwbaarheid' banden.



Figuur 3.11  $(-\beta/\pi)^{2.5}$  vs  $H_{m0}/d$ . De blauwe punten representeren de Slotermeer metingen en de rode lijnen komen uit de bovenste figuur van Figuur 3.10.

### 3.2.4 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste conclusies en aanbevelingen uit dit hoofdstuk luiden als volgt:

- Er wordt geadviseerd om de ontwerpgrafieken in Figuur 3.2 en Figuur 3.3, die berekend zijn op basis van de huidige inzichten wat betreft dieptegelimiteerde golfbreken, te gebruiken in plaats van de grafieken van Van der Meer (1990).
- De aangepaste vuistregel van Klein Breteler (1992) met  $(H_{m0})_{\max} = 0.6d_m$  kan gebruikt worden als criterium voor maximale significante golfhoogte.

## 4 Maximale golfsteilheid

De golfsteilheid wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de golfhoogte ( $H_{m0}$ ) en de golflengte. Voor de golflengte wordt bij het toetsen en ontwerpen van dijken voor het gemak vaak de fictieve golflengte op diep water aangehouden, namelijk  $gT^2/(2\pi)$ . Voor de golfperiode  $T$  wordt in deze rapportage de piekperiode  $T_p$  of spectrale periode  $T_{m-1,0}$  genomen.

Aan het begin van een storm, of op locaties dicht bij de bovenwindse oever, zijn de golven relatief jong en is de golfsteilheid doorgaans relatief groot. Naarmate de storm langer duurt, de golven groeien en meer volwassen worden en wordt de golfsteilheid kleiner. Ook als golven breken op een ondiepte wordt de golfhoogte kleiner en daarmee ook de golfsteilheid. Als ze daarna weer op dieper water komen, kan de golfhoogte en golfsteilheid onder invloed van de wind weer toenemen.

Ook de waterdiepte heeft invloed op de golfsteilheid. Naarmate de golven in ondieper water komen, wordt de golfsteilheid groter. Dit gaat door totdat de steilheid te groot wordt, of de waterdiepte-golfhoogte verhouding te klein wordt. In het eerste geval breken de golven op steilheid, in het tweede betreft het diepte-geïnduceerd breken.

### 4.1 Literatuur overzicht

Regelmatige golven in diep water hebben een maximale steilheid gelijk aan 0.142 volgens de theorie van Miche (1944). Deze maximale golfsteilheid geldt voor individuele golven in een golfspectrum. In diep water voor onregelmatige golven wordt vaak aangenomen dat de maximale golfsteilheid 0.05 à 0.07 is, berekend met respectievelijk de piekperiode en  $T_{m0,1}$  (CIRIA et al., 2006). Op ondiep water zijn de spectra vaak meertoppig door alle niet-lineaire effecten en is er geen betrouwbare theorie die een bovengrens voor de golfsteilheid geeft.

Als voorbeeld voor een criterium voor de maximale golfsteilheid kan hier die van Klein Breteler (1992) vermeld worden:

$$\left(H_{m0}\right)_{\max} = 0.1L_{op} \sqrt{\tanh(2\pi d / L_{op})}. \quad (4.1)$$

Deze formule is identiek aan:

$$\left(H_{m0} / L_{gp}\right)_{\max} = 0.1 \quad (4.2)$$

waarin  $L_{gp}$  gelijk is aan de ondiep water golflengte. In de de buurt van dijken geldt doorgaans  $L_{gp}/L_{op} \approx 0,75 \pm 0,2$ , waardoor dit ongeveer overeenkomt met:

$$\left(H_{m0} / L_{op}\right)_{\max} = 0.075 \quad (4.3)$$

Klein Breteler (1992) geeft geen theoretische achtergrond, literatuurverwijzingen of experimentele verificatie van deze formule.

Door het ontbreken van een betrouwbare theorie voor de maximale golfsteilheid wordt in het vervolg van dit hoofdstuk vooral gekeken naar resultaten van SWAN berekeningen en naar metingen. De SWAN-berekeningen worden immers gebruikt voor de periodieke toetsing in het kader van de Waterwet en zijn derhalve zeer relevant.

Mede door de benaderingen die in SWAN gebruikt zijn (zie §2.2.2), zullen de golfsteilheden in de SWAN Westerschelde resultaten mogelijk overschattingen zijn. Dit is een gevolg van de onderschatting van de golfperiode. Op basis van gemeten golven op de Westerschelde is door Van der Westhuysen en Elias (2010) aangetoond dat SWAN een onderschatting geeft van 10 à 16%. In dit hoofdstuk wordt hiermee rekening gehouden bij het trekken van conclusies.

## 4.2 Data analyse

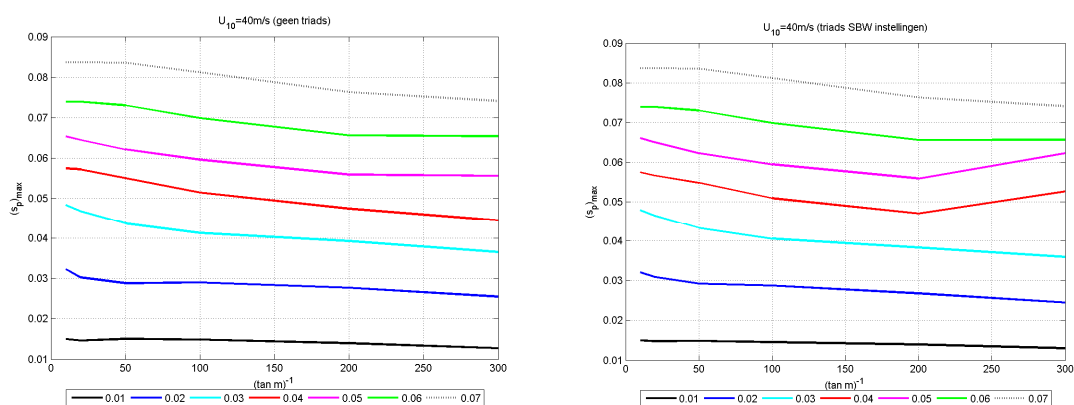
### 4.2.1 Introductie

Omdat er geen theoretisch richtlijnen te bepalen zijn voor de maximale  $s_p$  en  $s_{m-1,0}$  op ondiep water, zijn in de volgende hoofdstukken gemeten en met SWAN berekende waarden van  $s_p$  en  $s_{m-1,0}$  gepresenteerd om de mogelijke spreiding van de data te illustreren.

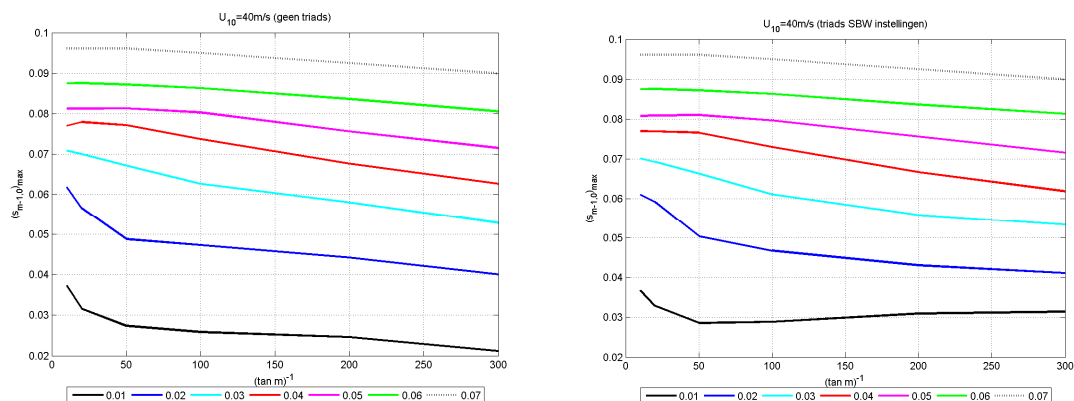
### 4.2.2 SWAN eendimensionale resultaten

Figuur 4.1 en Figuur 4.2 laten de variatie zien van de maximale met een eendimensionale SWAN simulatie berekende waarde van respectievelijk  $s_p$  en  $s_{m-1,0}$ , als functie van de bodemhelling. In deze berekeningen is er sprake van windgroei, shoaling en breking van golven. De maximale waarde treedt meestal in het middelste derde deel van het rekendomein op (op een afstand tussen 1300 m en 2600 m van de offshore rand). De nadere omschrijving van deze berekeningen is gegeven in paragraaf 2.2.3.

De berekende maximale golfsteilheid is in alle gevallen hoger dan de golfsteilheid van de offshore golven. Zoals verwacht is de berekende maximale golfsteilheid in het algemeen, en voornamelijk voor de golven met lage offshore golfsteilheid, groter als de triads aan staan.

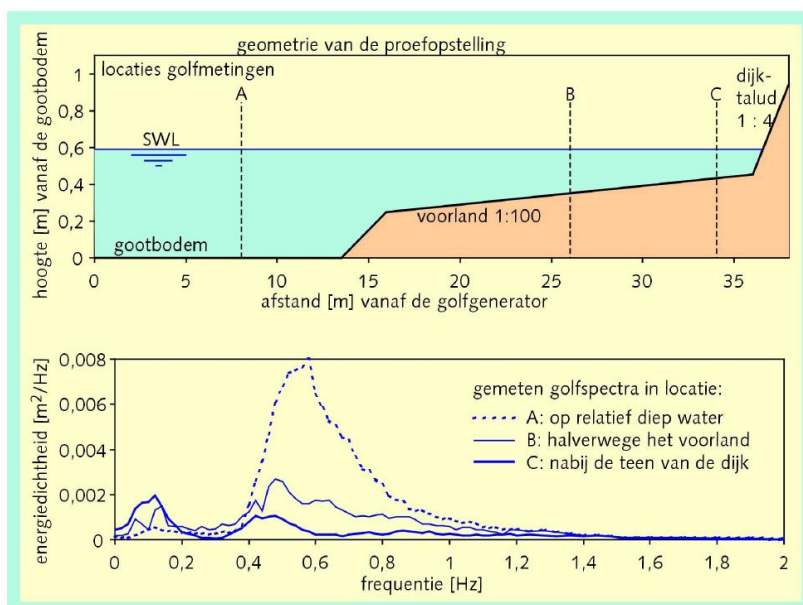


Figuur 4.1  $(s_p)_{\max}$  vs de bodemhelling. De kleur van de lijnen geeft de waarde van  $s_{ep}$  op diep water. Figuur links: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en geen triads. Figuur rechts: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en triads conform de instellingen zoals voorbereid binnen SBW.



Figuur 4.2  $(s_{m-1,0})_{\max}$  vs de bodemhelling. De kleur van de lijnen geeft de waarde van  $s_{op}$  op diep water. Figuur links: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en geen triads. Figuur rechts: SWAN simulaties met 40 m/s windsnelheid en triads conform de in SBW afgeleide instellingen.

In SWAN simulaties neemt in de meeste gevallen de golfsteilheid toe ten opzichte van de diep water golfsteilheid. Dit is in modelonderzoek niet geobserveerd omdat, zoals gerapporteerd in TAW (2002), doorgaans vastgesteld wordt dat de golfsteilheid afneemt als golven breken. Dit is bijvoorbeeld gedemonstreerd in Figuur 4.3 (de piek frequentie van het spectrum neemt af, waardoor er relatief meer energie zit in de lagere frequenties, waardoor  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$  toenemen). De belangrijkste oorzaak van dit verschil is de invloed van de wind (die in modelonderzoek ontbreekt). In de SWAN berekeningen wordt gerekend met een windsnelheid van 40 m/s, en die is in staat de golfsteilheid te laten groeien.

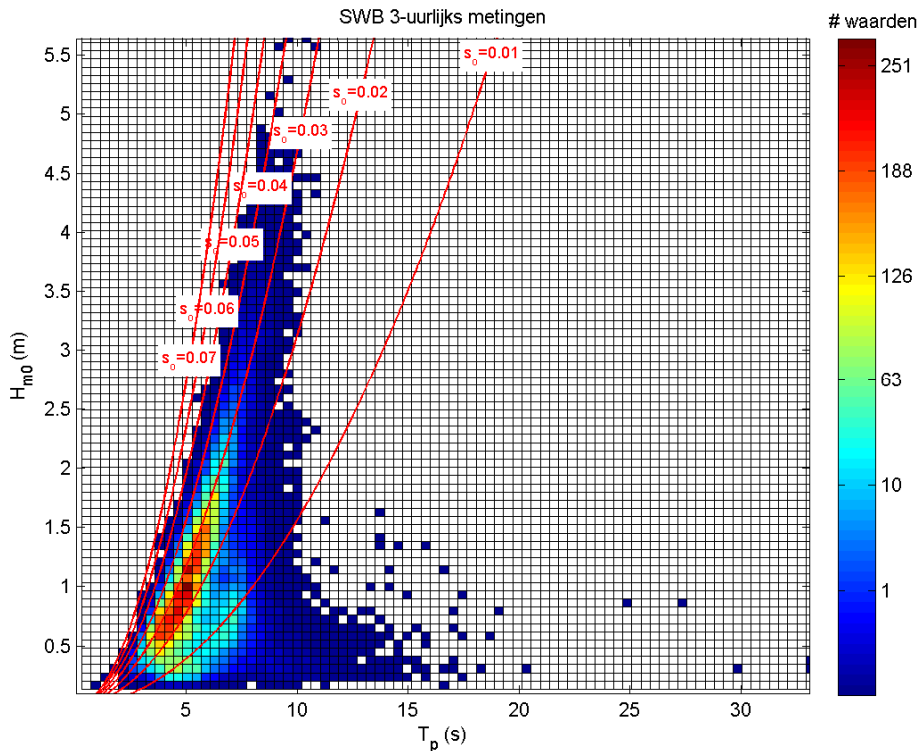


Figuur 4.3 Gemeten spectra op ondiep voorland met helling van 1:100 (TAW 2002).

### 4.2.3 Noordzee metingen

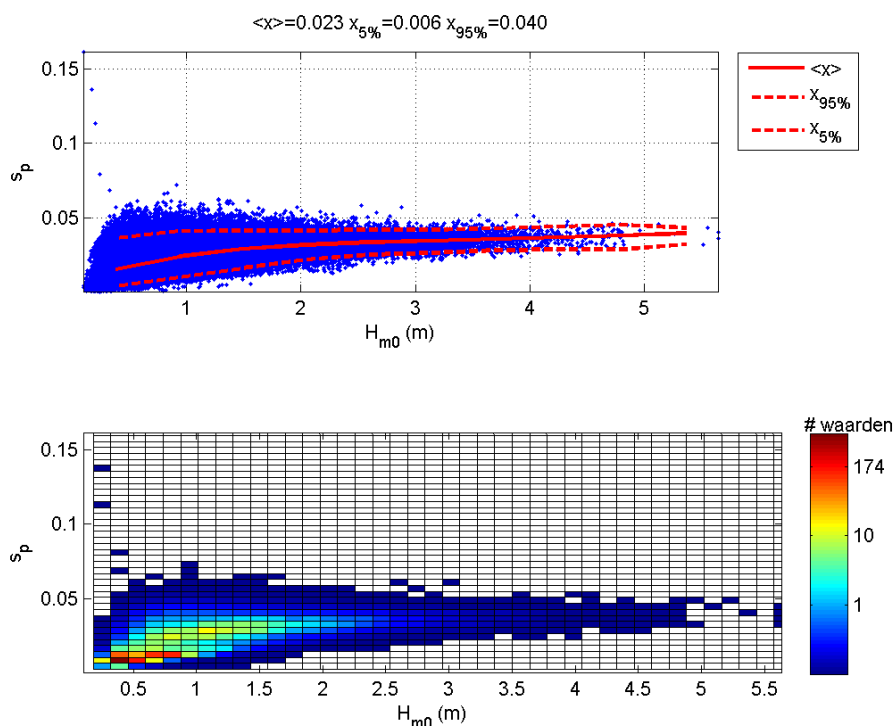
Figuur 4.4 toont de dichtheid-scattergrafiek van de gemeten  $T_p$  versus de gemeten  $H_{m0}$  op de Noordzee bij boei SWB (zie locatie in Figuur 2.8). De rode lijnen in Figuur 4.4 zijn lijnen van constant golfsteilheid (met waarden van 0.01 t/m 0.07 in stappen van 0.01). Figuur 4.5

laat in twee grafieken de variatie zien van de gemeten  $s_p$  als functie van de gemeten  $H_{m0}$  op SWB. De rode lijnen in de bovenste figuur geven het gemiddelde (ongebroken lijn) en 5 en 95% percentiel (gestippelde lijnen) van de data aan als functie van  $H_{m0}$ . De onderste figuur geeft de dichtheid-scattergrafiek van de data weer. Uit deze figuren is te concluderen dat de golfsteilheid op basis van  $T_p$  bij SWB voor de meest gevallen lager is dan 0.05. De 95% percentiel van de data is 0.04.



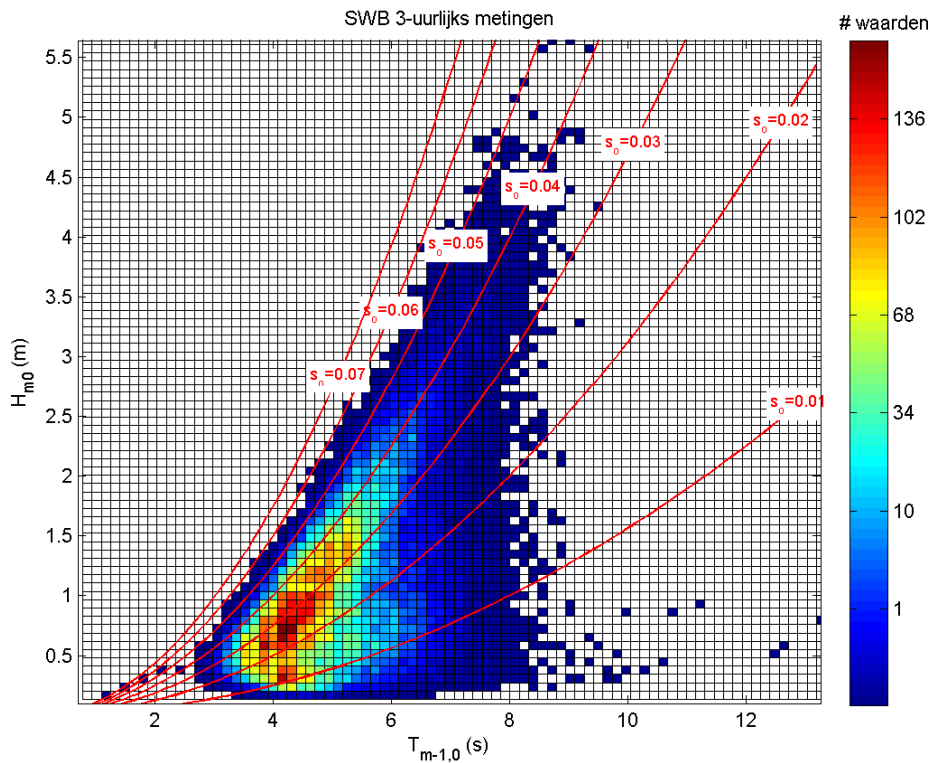
Figuur 4.4 Gemeten  $T_p$  vs  $H_{m0}$  bij SWB, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.



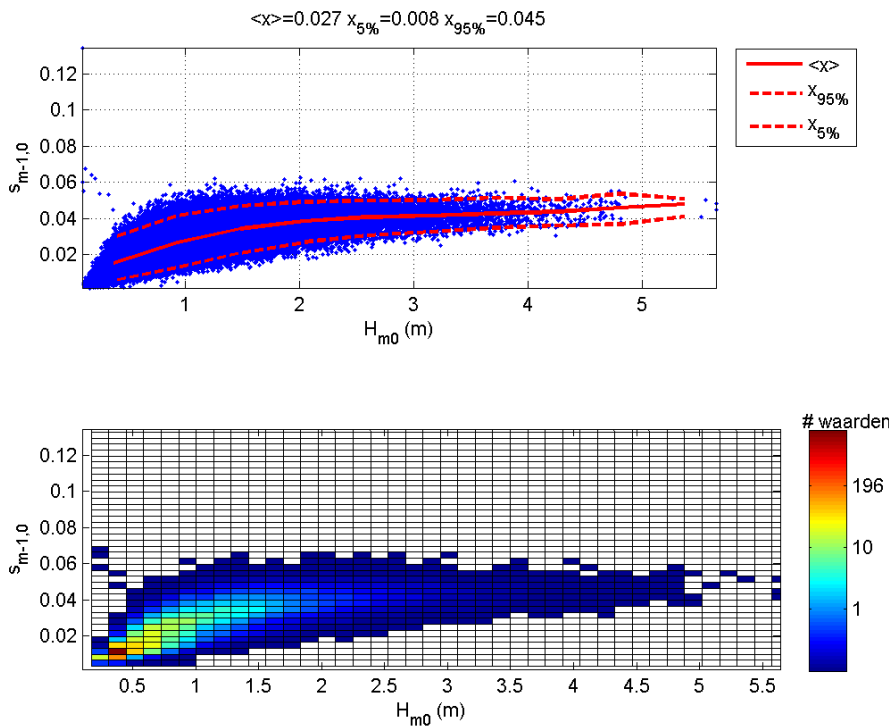


Figuur 4.5 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_p$  bij SWB, Noordzee.

Figuur 4.6 en Figuur 4.7 zijn analoog aan Figuur 4.4 en Figuur 4.5 maar tonen data van respectievelijk  $T_{m-1,0}$  en  $s_{m-1,0}$  in plaats van  $T_p$  en  $s_p$ . Uit deze figuren is te concluderen dat de golfsteilheid op basis van  $T_{m-1,0}$  bij SWB voor de meest gevallen lager is dan 0.06. De 95% percentiel van de data is 0.045.



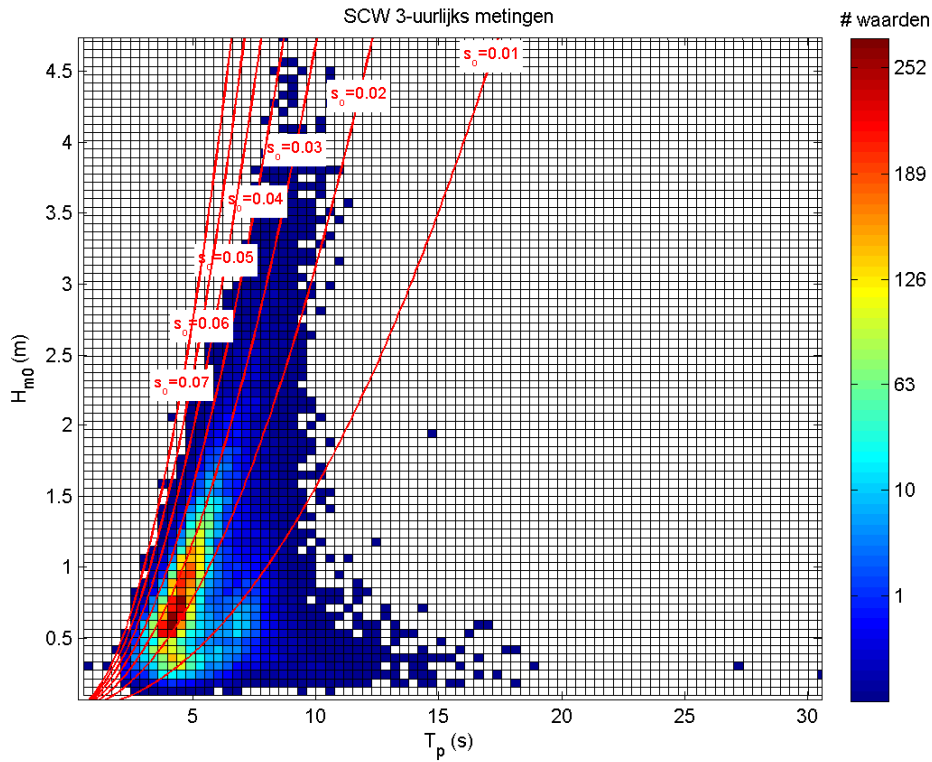
Figuur 4.6 Gemeten  $T_{m-1,0}$  vs  $H_{m0}$  bij SWB, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.



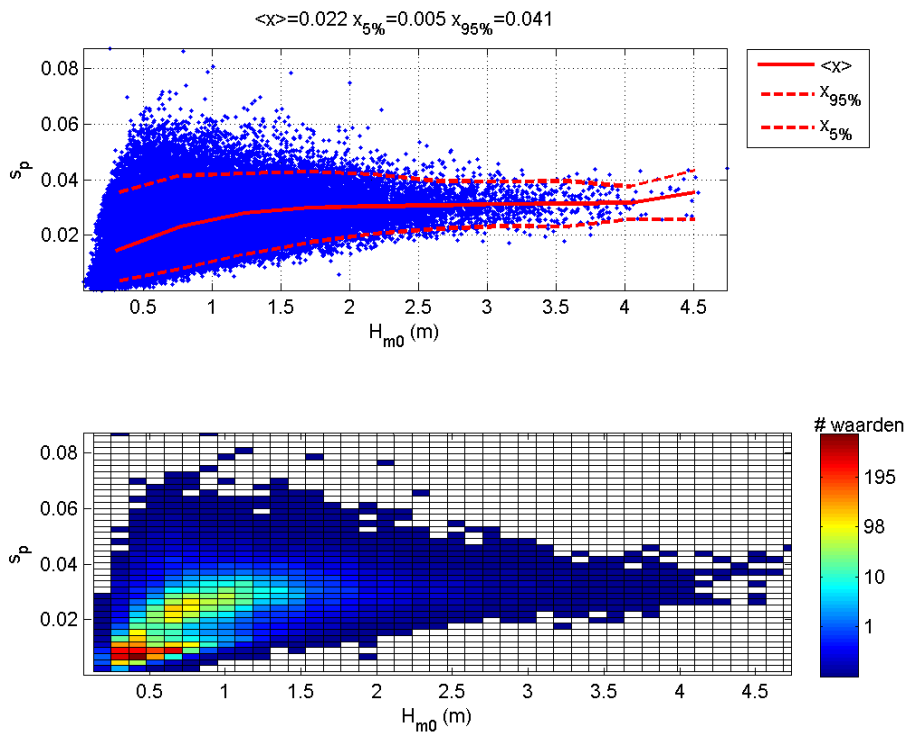
Figuur 4.7 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_{m-1,0}$  bij SWB, Noordzee.

Figuur 4.8 t/m Figuur 4.11 zijn analoog aan Figuur 4.4 t/m Figuur 4.7 maar tonen metingen op de Noordzee van boei SCW (zie locatie in Figuur 2.8). De golfsteilheid statistieken op deze

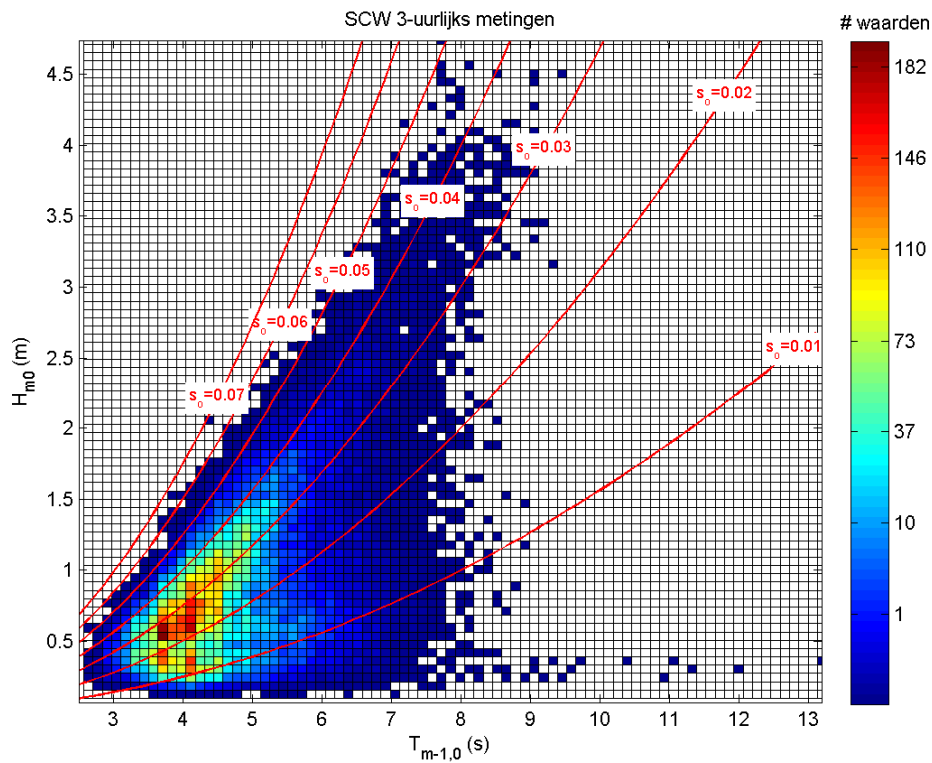
Noordzee-locaties zijn vergelijkbaar, waarbij de gemiddelde golfsteilheden op de SCW locatie iets lager zijn dan op de SWB locatie.



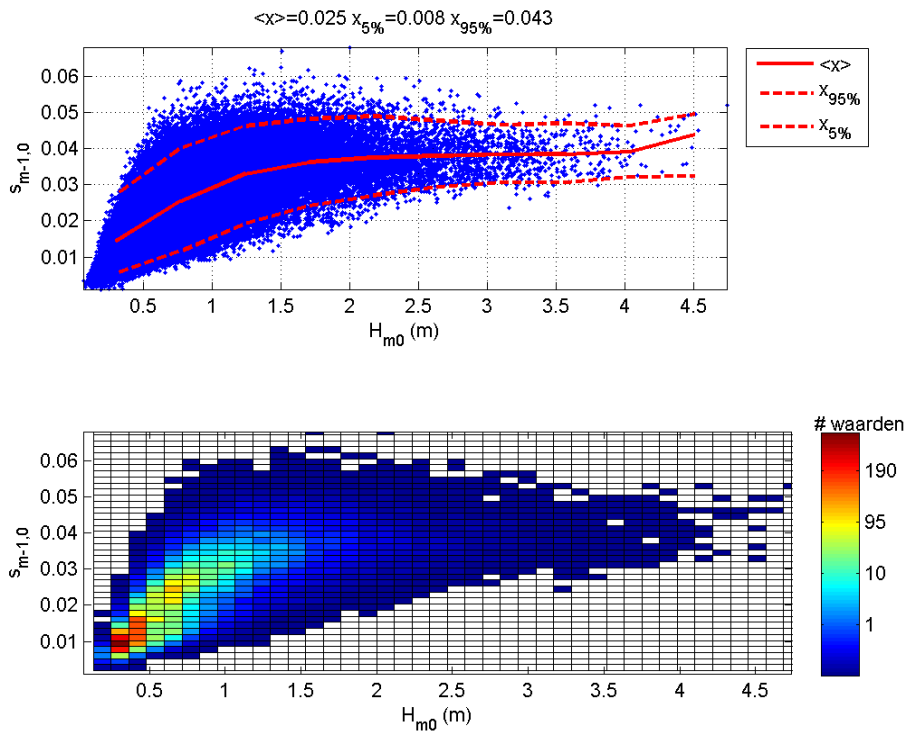
Figuur 4.8 Gemeten  $T_p$  vs  $H_{m0}$  bij SCW, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.



Figuur 4.9 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_p$  bij SCW.



Figuur 4.10 Gemeten  $T_{m-1,0}$  vs  $H_{m0}$  bij SCW, Noordzee. De rode lijnen zijn lijnen met constant golfsteilheid.

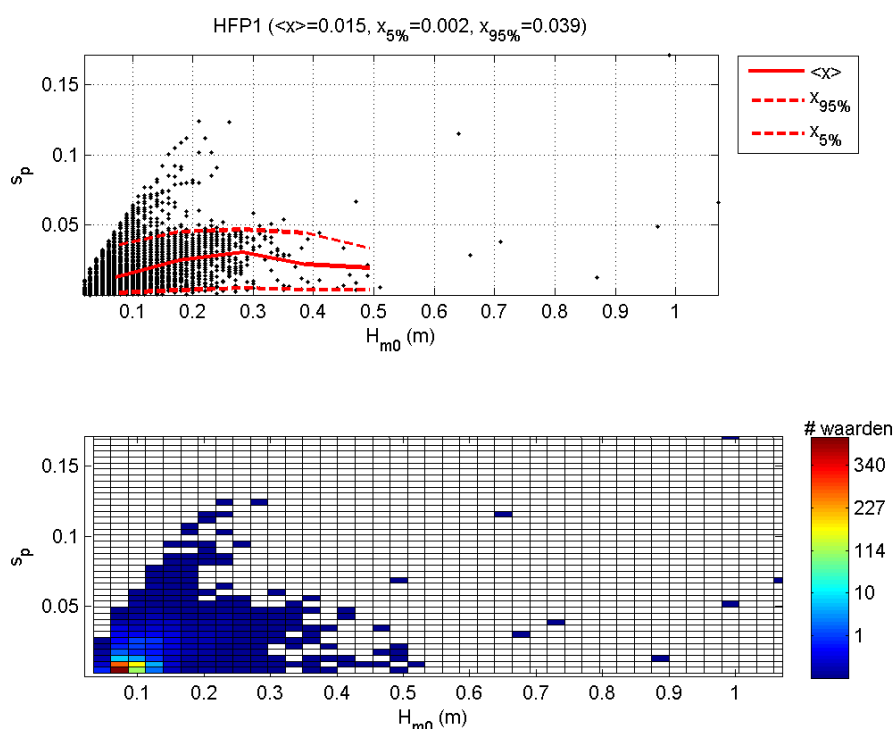


Figuur 4.11 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_{m-1,0}$  bij SCW, Noordzee.

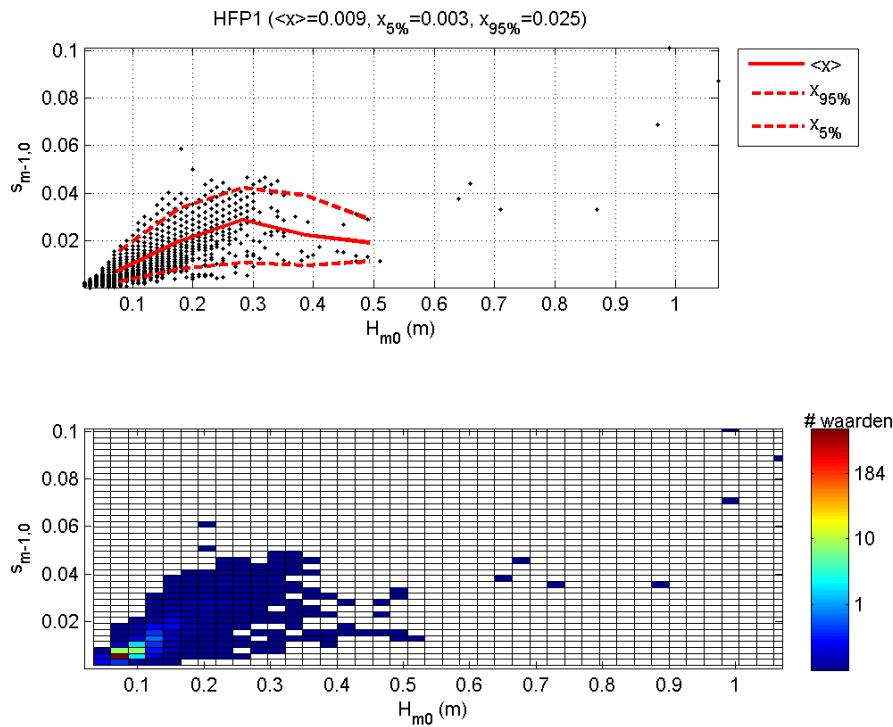
#### 4.2.4 Metingen van Meetnet Zeeuwse Getijdewateren

Figuur 4.12, Figuur 4.14, Figuur 4.16 en Figuur 4.18 geven in twee grafieken de variatie weer van de gemeten  $s_p$  als functie van de gemeten  $H_{m0}$  op HTP1, PVT1 en BAT1 in de Westerschelde en KEET in de Oosterschelde (zie Figuur 2.9 voor locaties). De rode lijnen in de bovenste figuur geven het gemiddelde (ongebroken lijn) en 5 en 95% percentiel (gestippelde lijnen) van de data als functie van  $H_{m0}$ . De onderste figuur geeft de dichtheidscattergrafiek weer van de data. Figuur 4.13, Figuur 4.15, Figuur 4.17 en Figuur 4.19 zijn analoog aan Figuur 4.12, Figuur 4.14 Figuur 4.16 en Figuur 4.18 maar tonen data van  $s_{m-1,0}$  in plaats van  $s_p$ .

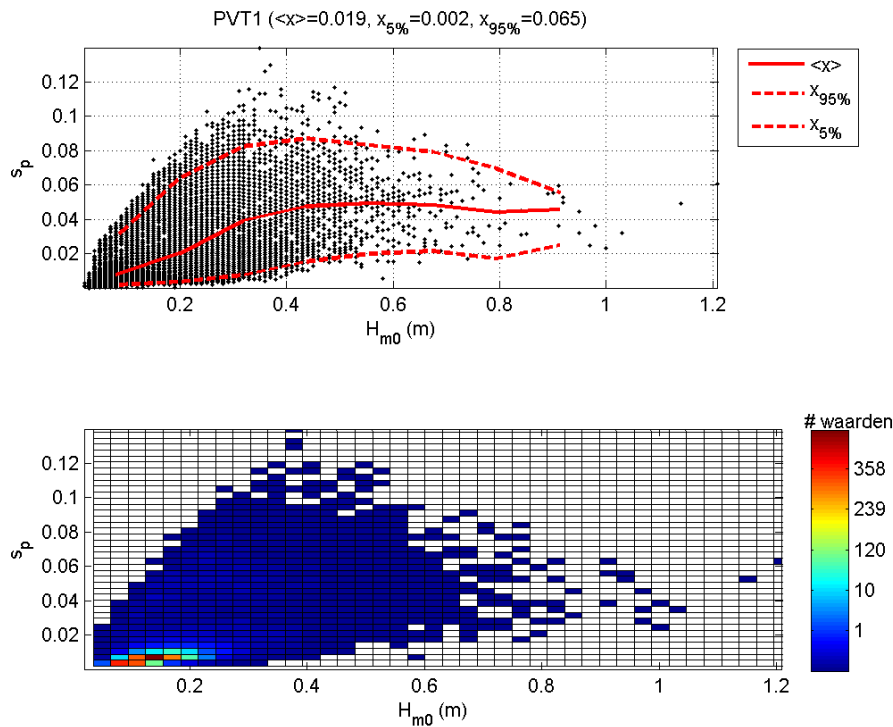
In vergelijken met de golfsteilheden op de offshore locaties ( $s_p$  gemiddelden tussen 0.022 en 0.023 en  $s_{m-1,0}$  gemiddelden tussen 0.025 en 0.027) zijn de gemiddelde golfsteilheden op de Wester- en Oosterschelde ( $s_p$  gemiddelden tussen 0.015 en 0.026 en  $s_{m-1,0}$  gemiddelden tussen 0.012 en 0.026) in het algemeen iets lager. Deze lagere gemiddelde golfsteilheden op Wester- en Oosterschelde metingen heeft hoogwaarschijnlijk te maken met het feit dat de geanalyseerde metingen voornamelijk zeer lage significante golfhoogtes ( $H_{m0} < 15\text{cm}$ ) bevatten. Merk op dat de gemiddelden lager zijn, maar de maximale waarden juist veel groter zijn. De maxima worden aangenomen voor de relatief jonge golven.



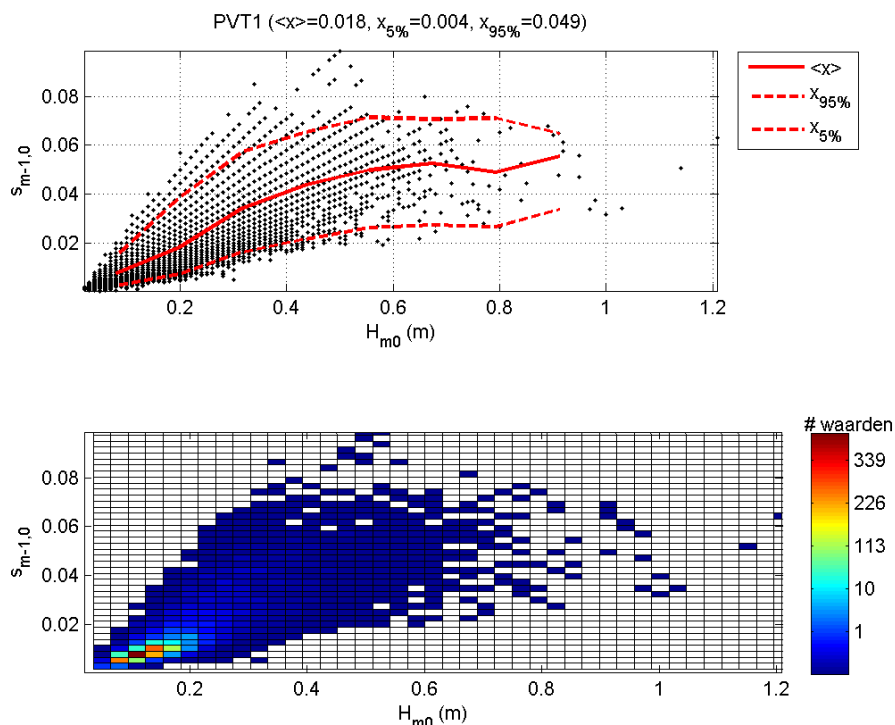
Figuur 4.12 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_p$  bij HFP1, Westerschelde. Data van 1999-2010.



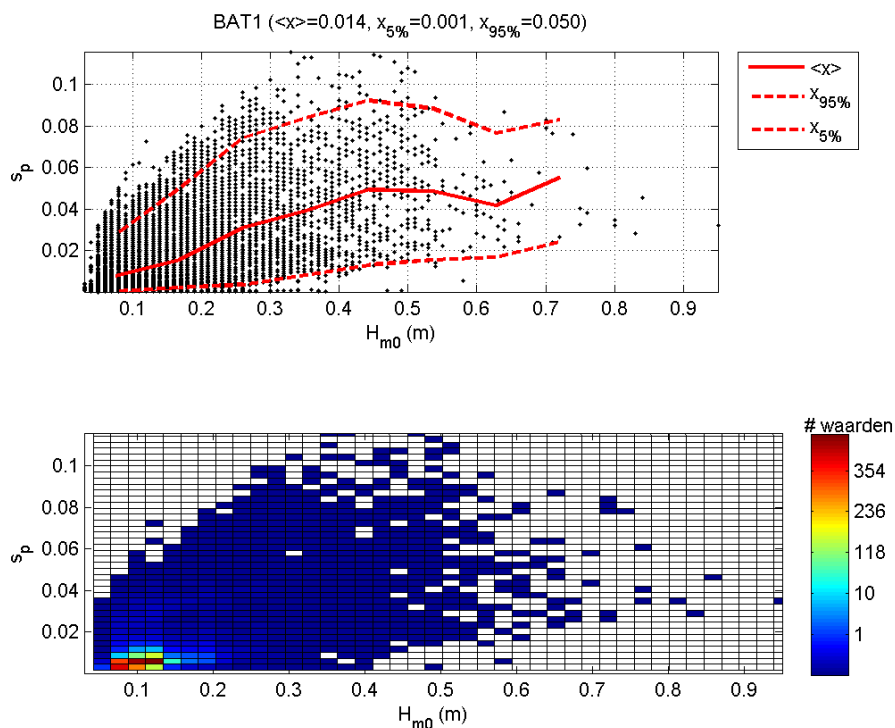
Figuur 4.13 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_{m-1,0}$  bij HFP1, Westerschelde. Data van 1999-2010.



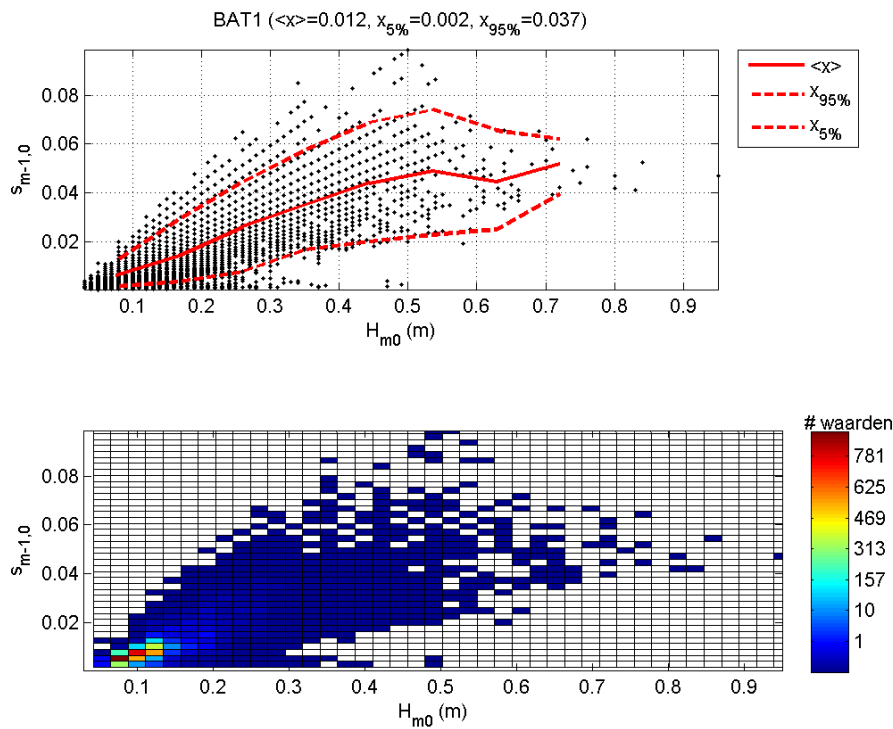
Figuur 4.14 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_p$  bij PVT1, Westerschelde. Data van 2001-2010.



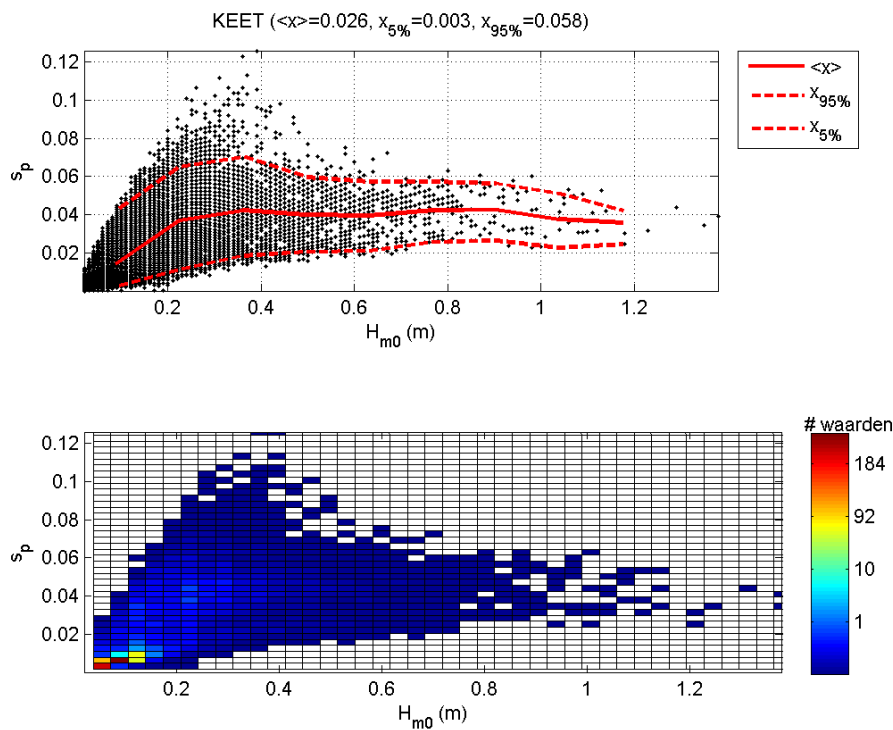
Figuur 4.15 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_{m-1,0}$  bij PVT1, Westerschelde. Data van 2001-2010.



Figuur 4.16 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_p$  bij BAT1, Westerschelde. Data van 1999-2010.

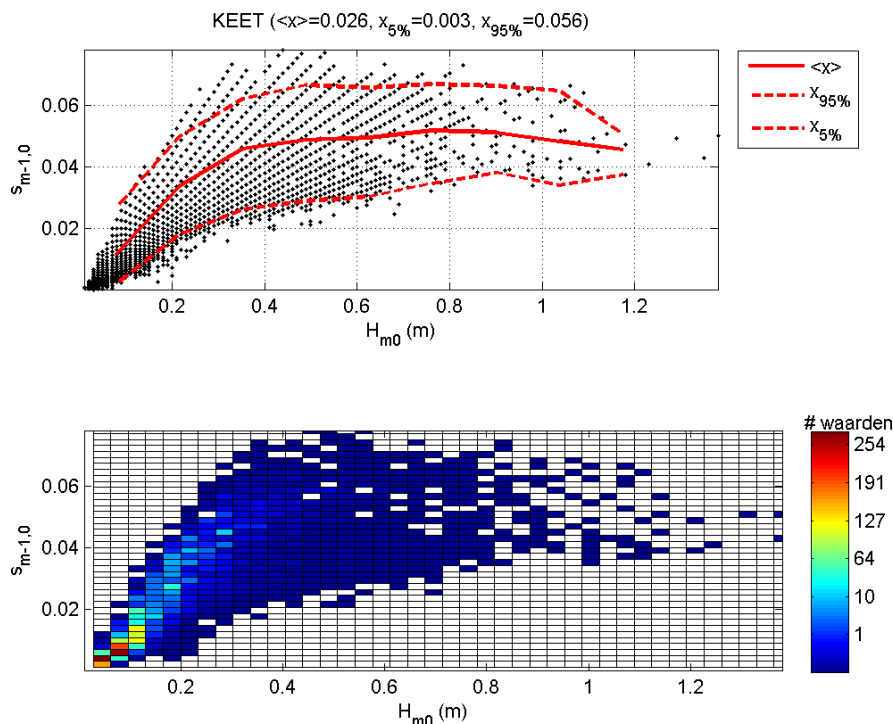


Figuur 4.17 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_{m-1,0}$  bij BAT1, Westerschelde. Data van 1999-2010.



Figuur 4.18 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_p$  bij KEET, Oosterschelde. Data van 1999-2010.



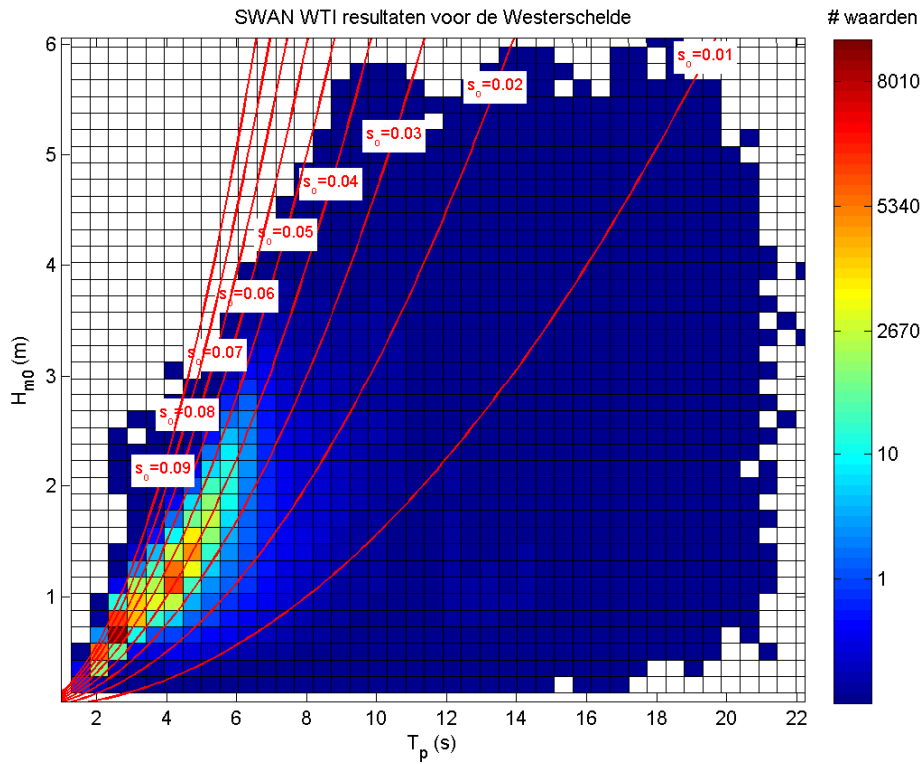


Figuur 4.19 Gemeten  $H_{m0}$  vs  $s_{m-1,0}$  bij KEET, Oosterschelde. Data van 1999-2010.

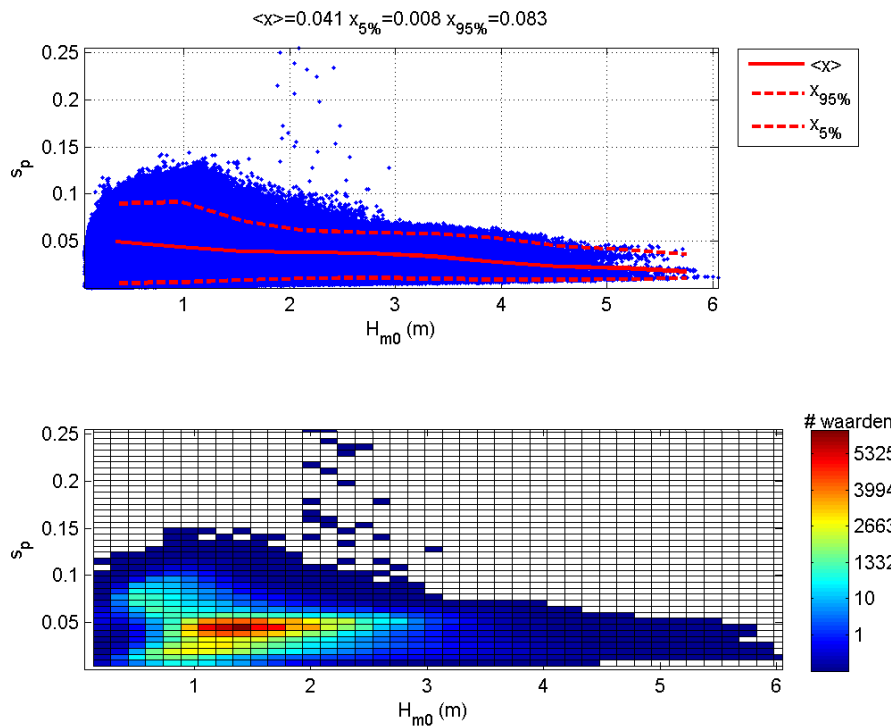
#### 4.2.5 SWAN resultaten voor de Westerschelde

Figuur 4.20 t/m Figuur 4.23 tonen SWAN-berekeningen voor de Westerschelde (1800 beschouwde situaties op 757 locaties). Het betreft de resultaten van berekeningen met de SWAN versie zoals die is voorbereid in SBW. Ze zijn analoog aan Figuur 4.4 t/m Figuur 4.7, behalve dat er twee extra lijnen zijn toegevoegd constante golfsteilheid, namelijk 0.08 en 0.09. In de figuur valt op dat, analoog aan de metingen, de golfsteilheid bij de hoge golven wat kleiner is dan bij de kleine golven. Dit is een gevolg van het feit dat de hoogste golven in de buurt van de monding van de Westerschelde zijn bepaald, waar de invloed van de lange golven van de Noordzee nog het grootste is. De kleinste golven hebben doorgaans betrekking op locaties met korte strijklengte. Deze golven zijn relatief jong en hebben een grote golfsteilheid.

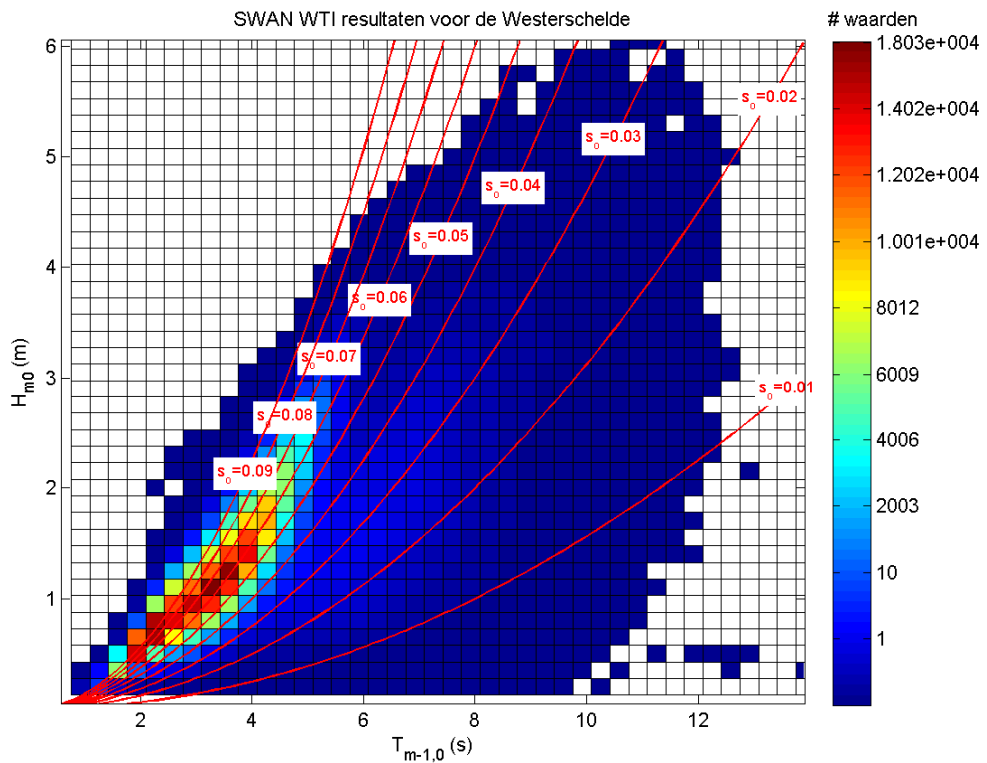
De golfsteilheid op deze locaties is in het algemeen hoger dan de golfsteilheid ter plaatse van de al geanalyseerde metingen. Terwijl de gemiddelde  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) varieert tussen 0.014 en 0.026 (0.009 en 0.027) op de meetlocaties locaties, is de gemiddelde  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) gelijk aan 0.041 (0.064) in de SWAN uitvoer. Redenen voor deze verschillen in steilheden betreffen de complexe geometrie van de Westerschelde, korte strijklengtes, de extreme omstandigheden beschouwd in de SWAN berekeningen en het meenemen van triads die alleen energie genereren naar de hogere (geen lagere) frequenties.



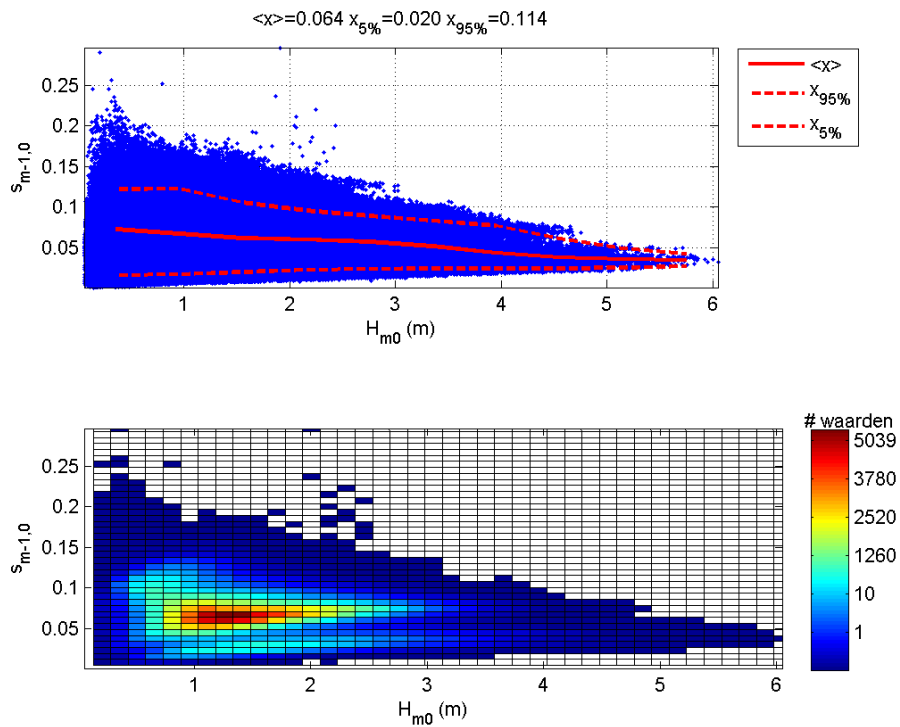
Figuur 4.20  $T_p$  vs  $H_{m0}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.



Figuur 4.21  $H_{m0}$  vs  $s_p$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.



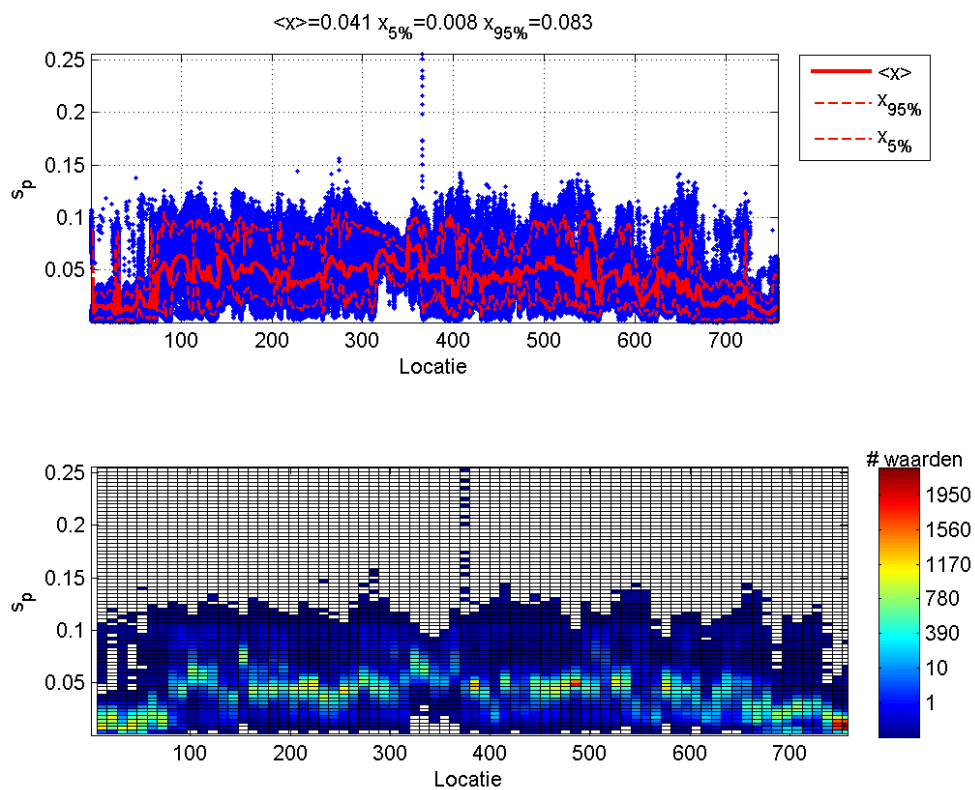
Figuur 4.22  $T_{m-1,0}$  vs  $H_{m0}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.



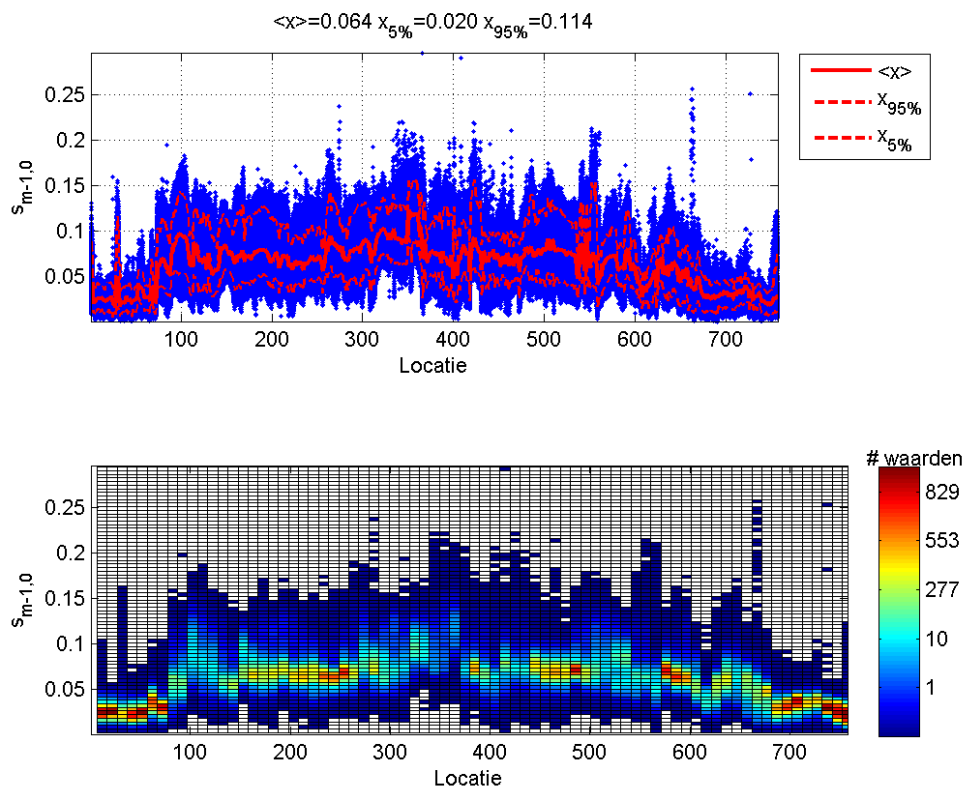
Figuur 4.23  $H_{m0}$  vs  $s_{m-1,0}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.

Om meer inzicht te geven in de variatie van de golfsteilheden bij de beschouwde situaties en locaties zijn onderstaand grafieken gegeven waarin de variatie van de golfsteilheden met locatie, waterstand en windsnelheden te zien zijn.

Om een beeld te krijgen van de variatie van de golfsteilheid met de locatie laat Figuur 4.24 (Figuur 4.25) in twee grafieken de variatie zien van  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) als functie van de locatie (zie Figuur 2.7). In de figuren valt de grote spreiding in de golfsteilheid op, zelfs op dicht bij elkaar gelegen locaties. Het vermoeden is dat dit een gevolg is van de complexe geometrie en het feit dat vele windrichtingen beschouwd zijn. Alleen achterin de Westerschelde aan de zuidoever (locaties met nummer 310-370) is de variatie kleiner. Daar is de strijklengte wat korter dan elders en dat leidt tot een wat hogere gemiddelde golfsteilheid.

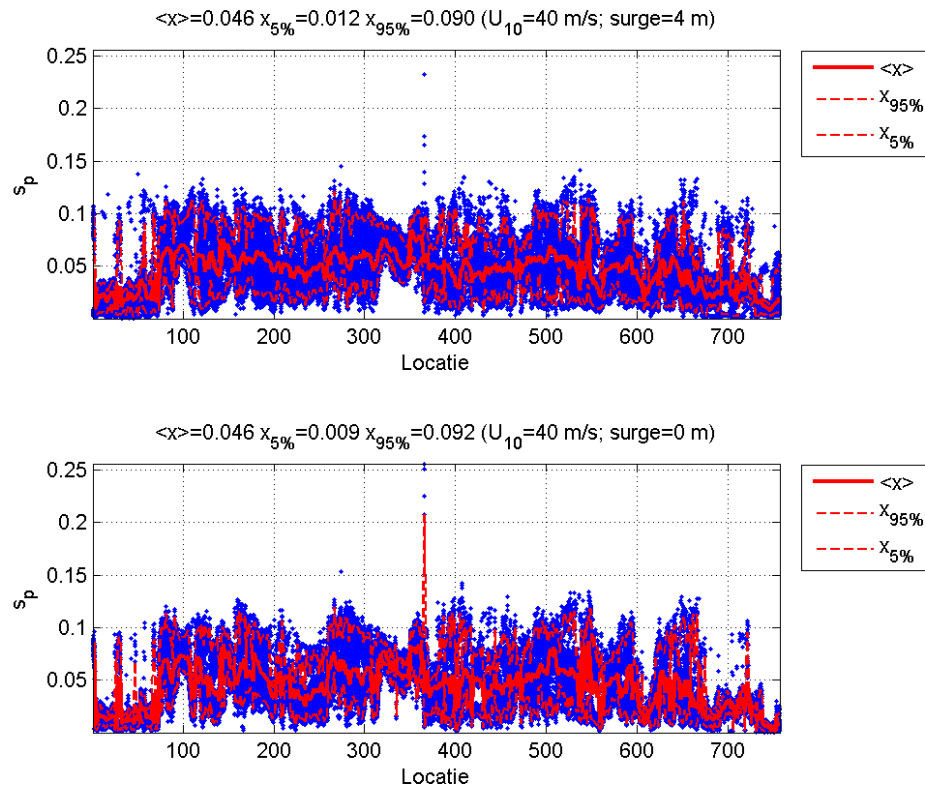


Figuur 4.24  $s_p$  vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde.

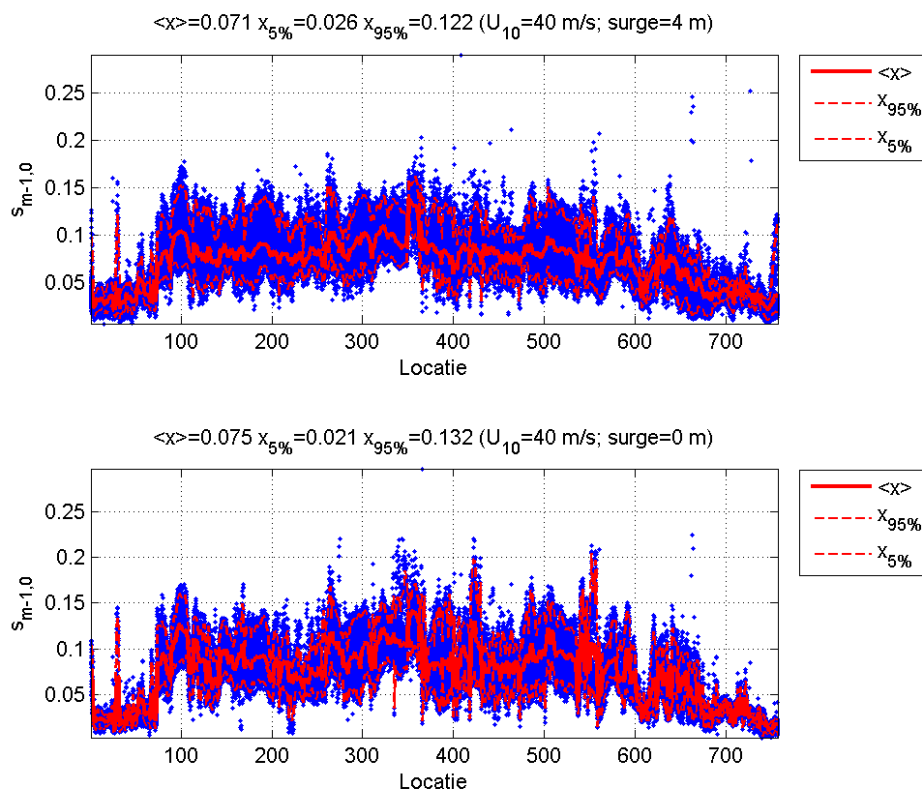


Figuur 4.25  $s_{m-1,0}$  vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde.

Om het effect van de extreme omstandigheden in de berekende golfsteilheden weer te geven, laat Figuur 4.26 (Figuur 4.27) de variatie zien van  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) als functie van de locatie voor de situaties met de maximale beschouwde windsnelheid ( $U_{10}=40$  m/s) en voor de laagste (0 m+NAP) en hoogst (4 m+NAP) beschouwde offshore waterstanden. Van Figuur 4.24 t/m Figuur 4.27 kan er geconcludeerd worden dat de golfsteilheden gemiddeld hoger zijn voor hogere windsnelheid en lagere waterstand.

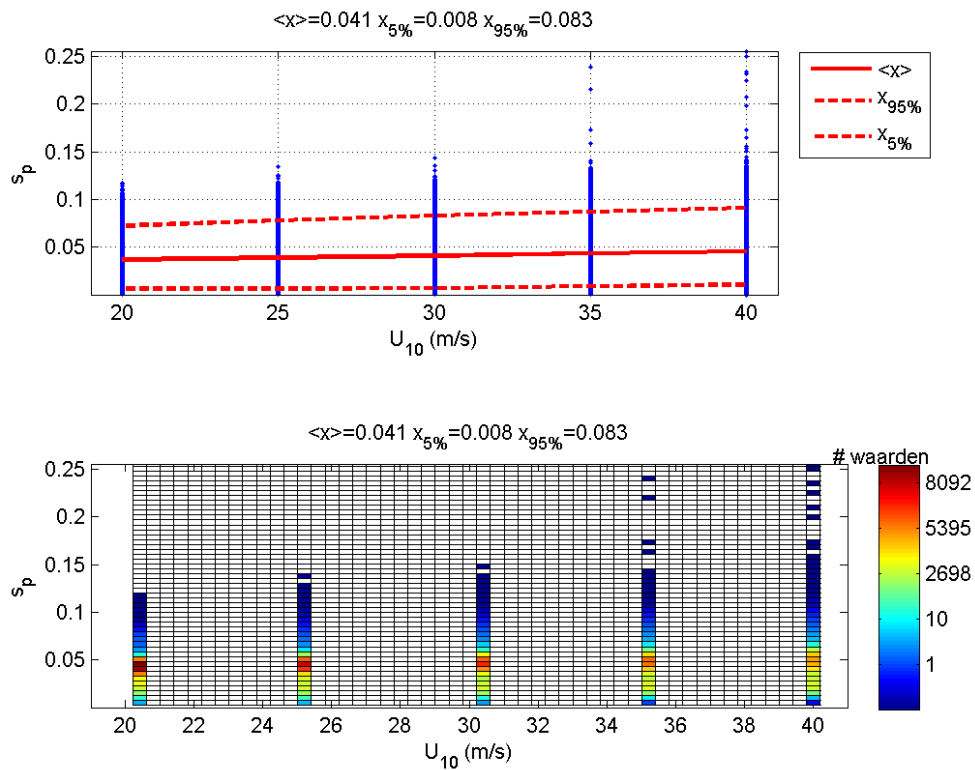


Figuur 4.26  $s_p$  vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde voor windsnelheden van 40 m/s en offshore waterstanden van 4 m+NAP (grafiek boven) en 0 m+NAP (grafiek beneden) .

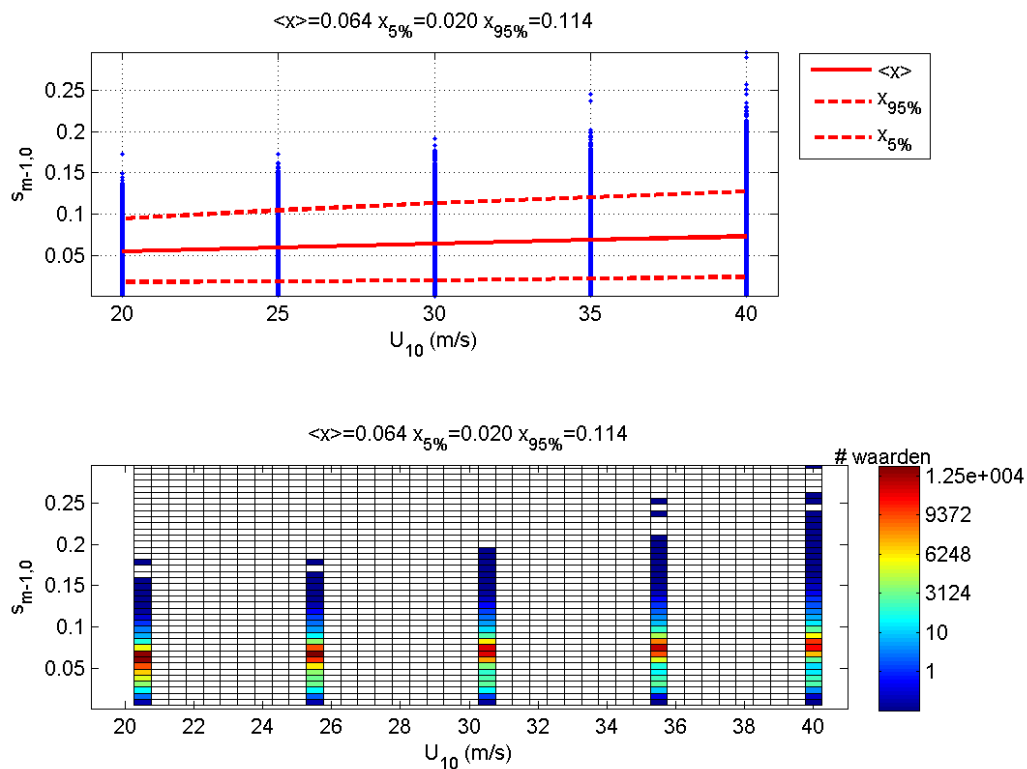


Figuur 4.27  $s_{m-1,0}$  vs locatie SWAN resultaten voor de Westerschelde voor windsnelheden van 40 m/s en offshore surge van 4 m (grafiek boven) en 0 m (grafiek beneden).

De invloed van de windsnelheid is te zien in Figuur 4.28 t/m Figuur 4.31. Zoals te zien is in de figuren, is er een lichte toename van de gemiddelde golfsteilheid met de windsnelheid. Verder komen er bij hogere windsnelheden meer uitschieters voor en nemen de maximale steilheden enorm toe. Van 20 tot 40 m/s neemt de golfsteilheid gemiddeld ongeveer 20% toe. Dit is een belangrijk gegeven, omdat hiermee de gemeten golfsteilheden beter kunnen worden geïnterpreteerd. De metingen zijn doorgaans uitgevoerd bij windsnelheden onder 25 m/s.



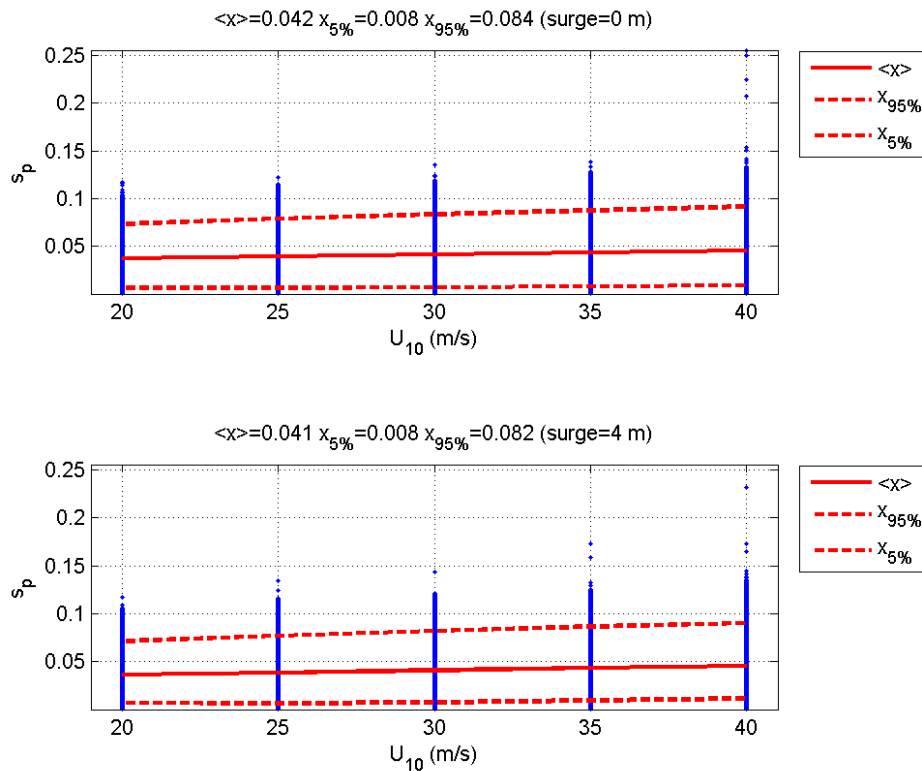
Figuur 4.28  $s_p$  vs  $U_{10}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.



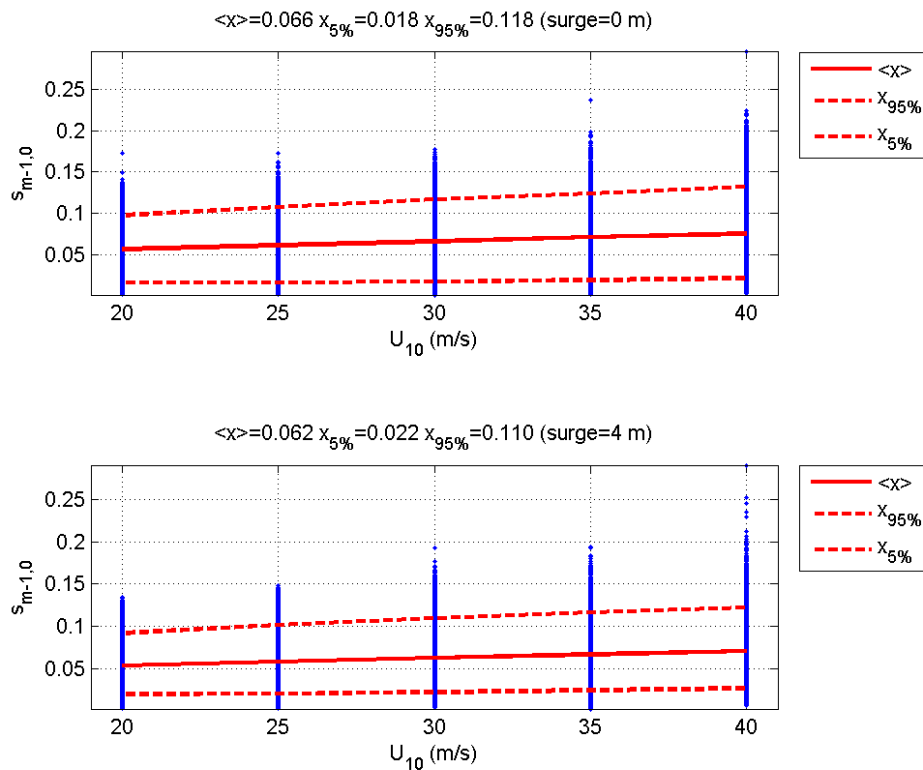
Figuur 4.29  $s_{m-1,0}$  vs  $U_{10}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde.



Ter aanvulling van de boven gepresenteerd variaties laat Figuur 4.30 (Figuur 4.31) de variatie zien van  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) als functie van de windsnelheid ( $U_{10}=40$  m/s) voor de laagste (0 m+NAP) en hoogst (4 m+NAP) beschouwde offshore waterstanden. De figuren geven opnieuw weer dat de golfsteilheden gemiddeld hoger zijn voor hogere windsnelheid en lagere waterstand.

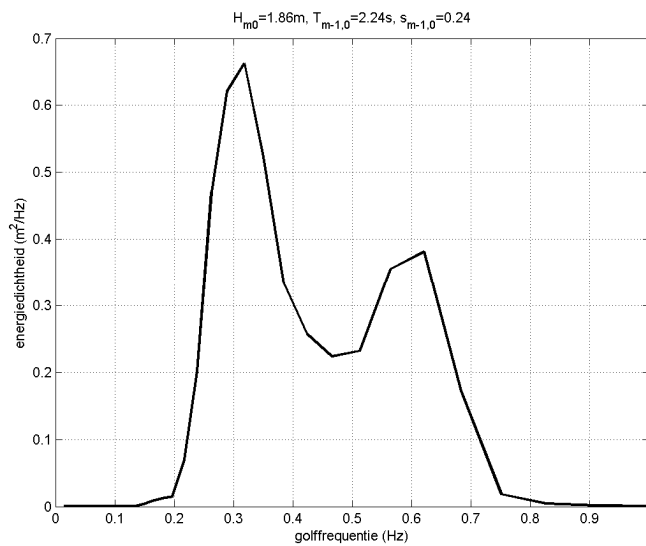


Figuur 4.30  $s_p$  vs  $U_{10}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde voor offshore waterstanden van 4 m+NAP (grafiek boven) en 0 m+NAP (grafiek beneden).



Figuur 4.31  $s_{m-1,0}$  vs  $U_{10}$  SWAN resultaten voor de Westerschelde voor offshore waterstanden van 4 m+NAP (grafiek boven) en 0 m+NAP (grafiek beneden).

In de boven gepresenteerde SWAN resultaten is te zien dat er een aantal uitschieters duidelijk te identificeren zijn. Figuur 4.32 toont, als voorbeeld, het spectrum van een van de datapunten met hoge golfsteilheid. Zoals te zien is in de figuur komt de hoge golfsteilheid door de zeer jonge zee (kleine piekperiode) en een tweede, hoogfrequente piek. Dit voorbeeld laat zien dat op ondiep water in complexe tweedimensionale situaties de golfsteilheid, die uit de SWAN berekeningen komt, extreem hoog kan worden. Dit is mede het gevolg van het feit dat er in de SWAN berekeningen geen triads zijn die energie naar lage frequenties verspreiden. Dergelijke hoge golfsteilheden roepen wel de vraag op of dit wel fysisch realistisch is. Vermoedelijk moet de golfperiode naar boven gecorrigeerd worden, bijvoorbeeld door er 1 s bij op te tellen. Een verantwoorde keuze ten aanzien van zo'n correctie vergt echter een uitgebreid onderzoek dat buiten het kader van de onderhavige bureaustudie valt.



*Figuur 4.32 Voorbeeld van een SWAN spectrum voor de Westerschelde met een extreem hoge golfsteilheid,  $s_{m-1,0} = 0.24$ . Dit spectrum is geassocieerd met een windsnelheid van 35 m/s en een richting van 300°N in de SWAN berekeningen en de locatie (274, zie Figuur 2.7) is dichtbij WAL5 in Figuur 2.9.*

#### 4.2.6 Vergelijkingen tussen de gemeten en SWAN golfsteilheden

In Tabel 4.1 en Tabel 4.2 zijn respectievelijk de statistieken van  $s_p$  en  $s_{m-1,0}$ , van zowel de geanalyseerde metingen als de SWAN resultaten, voor de Westerschelde gegeven. De waarden in de tabellen zijn ook gegeven in de gepresenteerde figuren (4.5, 4.7, 4.9, 4.11 t/m 4.19, 4.21 en 4.23) en tonen de verschillen tussen de modelresultaten en de metingen. De spreiding in de gemeten en berekende resultaten is groot omdat zowel tijdens de metingen als de berekeningen het bereik van windsnelheden en windrichtingen groot is geweest. De gemiddelde golfsteilheden van de SWAN data in de Westerschelde zijn hoger dan die van de meetdata. De verschillen in de  $s_{m-1,0}$  golfsteilheden zijn groter dan die in de  $s_p$  golfsteilheden. De  $s_{m-1,0}$  gemiddelde golfsteilheid van de SWAN data is hoger dan de 95 golfsteilheid percentielen van de meetdata.

	$s_p$		
	Gemiddelde	5% percentiel	95% percentiel
SWB (Noordzee)	0.023	0.006	0.040
SCW (Noordzee)	0.022	0.005	0.041
HFP1 (Westerschelde)	0.015	0.002	0.039
PVT1 (Westerschelde)	0.019	0.002	0.065
BAT1 (Westerschelde)	0.014	0.001	0.050
KEET (Oosterschelde)	0.026	0.003	0.058
SWAN resultaten (alle locaties en windsnelheden)	0.041	0.008	0.083
SWAN resultaten alleen voor windsnelheden tot 25m/s	0.038	0.007	0.075
SWAN resultaten met $T_p = T_p + 1s$	0.026	0.006	0.044

Tabel 4.1  $s_p$  gemiddelden, 5% en 95% percentielen uit de metingen op de Noordzee en in de Zeeuwse getijdewateren en uit SWAN resultaten voor de Westerschelde.

Het grote verschil tussen de metingen en de SWAN resultaten heeft verschillende oorzaken:

1. Vanwege de complexe geometrie van de Westerschelde zijn er een groot aantal locaties nabij de kering waar het golfspectrum wordt bepaald door meerdere golfsystemen met verschillende richtingen en piekperioden. Deze kunnen relatief laag zijn als gevolg van korte strijklengtes.
2. SWAN-berekeningen zijn uitgevoerd met veel hogere windsnelheid dan opgetreden in de metingen. De maximale gemeten wind die in de analyses is beschouwd is lager dan 25 m/s, terwijl in de SWAN berekeningen de maximale windsnelheid 40 m/s is. Op grond van Figuur 4.28 t/m Figuur 4.31 zou hierdoor een verschil van orde 20 % kunnen ontstaan.
3. SWAN berekeningen houden geen rekening met het effect van triads, die in werkelijkheid energie naar lage frequenties verspreiden. Mede daardoor worden de golfperiodes door SWAN onderschat en de golfsteilheden overschat.

Ten aanzien van punt 1 (een eenvoudige bodemgeometrie) geldt dat een steilere bodemhelling een grotere golfsteilheid geeft. Dit is met SWAN doorgerekend in paragraaf 4.2.2, resulterend in een  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) golfsteilheid van maximaal 0.085 (0.095) bij een steile bodem (1:10). Bij minder steile bodems is het maximum een stuk lager.

Wat betreft 2 (invloed van de windsnelheid) geldt dat een toename van 20 m/s naar 40 m/s een toename van 20 % in de golfsteilheid geeft volgens de SWAN berekeningen. De invloed van de windsnelheid is te zien in Figuur 4.28 t/m Figuur 4.31.

De invloed van aspect 3 (het effect van de triads in de SWAN berekeningen) is ook te zien in het verschil tussen de  $s_p$  en  $s_{m-1,0}$ , die in de rekenresultaten veel hoger is dan in de metingen. Om een idee te hebben van het effect van overschattingen van de golfperiode in

de SWAN resultaten zijn in Tabel 4.1 en Tabel 4.2 ook de resultaten gegeven met gecorrigeerde SWAN resultaten. Voorlopig is de periode verhoogd met 1 s zonder precies te weten of dit de juiste correctie is. Wat betreft  $s_p$  zijn de statistieken van de gecorrigeerde resultaten vergelijkbaar met de statistieken van de metingen. Wat betreft  $s_{m-1,0}$  komen de statistieken van de gecorrigeerde resultaten wel in de buurt van die van de metingen maar zijn het nog steeds een overschattingen ervan.

Ten opzichte van het criterium van Klein Breteler (1992) (formule (4.3)) zijn de gepresenteerde statistieken van de metingen doorgaans lager, net als de meeste SWAN resultaten. In sommige gevallen zijn echter de metingen hoger (tot 0.16) en de SWAN resultaten veel hoger (tot 0.25). Voorlopig wordt gesteld dat de SWAN resultaten nader beschouwd zouden moeten worden als de golfsteilheid groter is dan ca. 0.09, om te beoordelen of de waarde fysisch realistisch is.

	$s_{m-1,0}$		
	Gemiddelde	5% percentiel	95% percentiel
SWB (Noordzee)	0.027	0.008	0.045
SCW (Noordzee)	0.025	0.008	0.043
HFP1 (Westerschelde)	0.009	0.003	0.025
PVT1 (Westerschelde)	0.018	0.004	0.049
BAT1 (Westerschelde)	0.012	0.002	0.037
KEET (Oosterschelde)	0.026	0.003	0.056
SWAN resultaten (alle locaties en windsnelheden)	0.064	0.020	0.114
SWAN resultaten voor windsnelheden tot 25m/s	0.057	0.018	0.100
SWAN resultaten met $T_{m-1,0} = T_{m-1,0} + 1s$	0.037	0.015	0.058

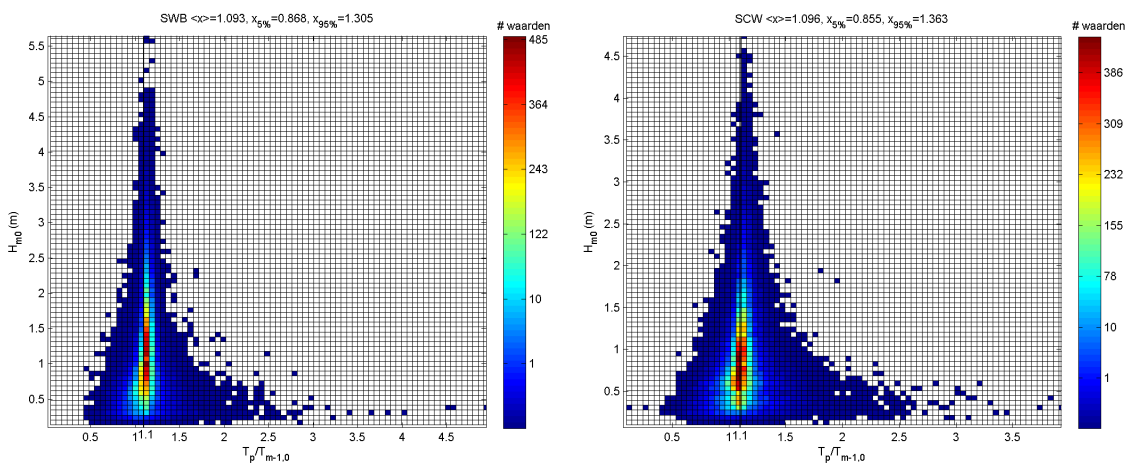
Tabel 4.2  $s_{m-1,0}$  gemiddelden, 5% en 95% percentielen uit de metingen op de Noordzee en in de Zeeuwse getijdewateren en uit SWAN resultaten.

Voor het bepalen van een geschikte grens voor het geven van een waarschuwing in Steentoets wordt eerst gekeken naar de metingen. De drie locaties met grootste 95 % percentiel van de  $s_p$  is 0.058. Bij een hogere windsnelheid is een 20 % hogere golfsteilheid te verwachten, dus 0.069. De lokale geometrie kan in bijzondere gevallen ook een verhoging van de golfsteilheid geven. Kijkend naar Figuur 4.1 wordt geconcludeerd dat een steilere bodemhelling bij grote waarde van  $s_p$  een verhoging van de golfsteilheid van orde 10 % kan betekenen. Daarmee komen we op 0.076. Op grond van deze overwegingen wordt geconcludeerd dat Steentoets een waarschuwing over de golfsteilheid moet geven als  $s_p > 0.08$ .

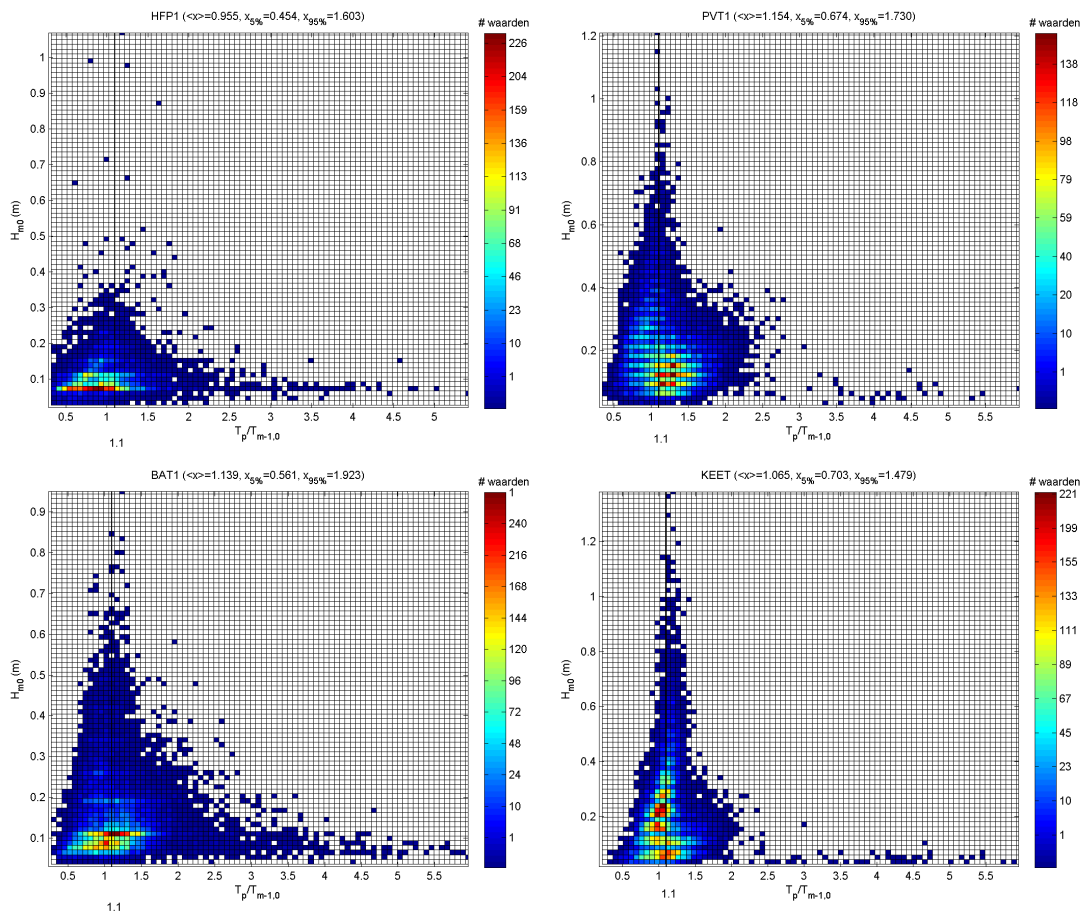
### 4.3 Verhouding tussen de piek- en de gemiddelde periode

Omdat de verschillen tussen  $s_p$  en  $s_{m-1,0}$  hoger zijn in de SWAN resultaten dan in de metingen, tonen we ook de verhoudingen tussen  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$ .

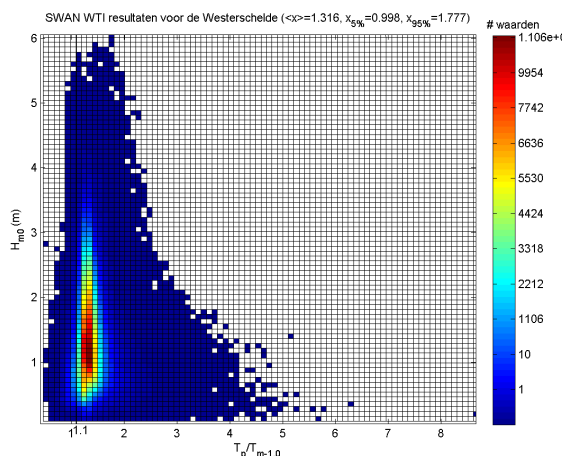
Figuur 4.33, Figuur 4.34 en Figuur 4.35 tonen de dichtheid-scattergrafiek van de  $T_p/T_{m-1,0}$  versus de  $H_{m0}$  data. De grote spreiding rondom de gemiddelde waarde van 1.1 in the Wester- en Oosterschelde meetdata is opmerkelijk (zie Figuur 4.34) en geeft een indicatie van de variatie in golfcondities die te vinden is in deze getijdewateren.



Figuur 4.33 Verhouding tussen  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$  vs  $H_{m0}$  voor metingen op SWB (links) en op SCW (rechts).



Figuur 4.34 Verhouding tussen  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$  vs  $H_{m0}$  voor metingen op HFP1 (boven links), op PVT1 (boven rechts), BAT1 (beneden links) end KEET (beneden rechts).



Figuur 4.35 Verhouding tussen  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$  vs  $H_{m0}$  voor de SWAN resultaten voor de Westerschelde (beneden links)

	$T_p / T_{m-1,0}$		
	Gemiddelde	5% percentiel	95% percentiel
SWB (Noordzee)	1.093	0.868	1.305
SCW (Noordzee)	1.096	0.855	1.363
HFP1 (Westerschelde)	0.955	0.454	1.603
PVT1 (Westerschelde)	1.154	0.674	1.730
BAT1 (Westerschelde)	1.139	0.561	1.923
KEET (Oosterschelde)	1.065	0.703	1.479
SWAN resultaten	1.316	0.998	1.777

Tabel 4.3  $T_p / T_{m-1,0}$  gemiddelde, 5% en 95% percentielen uit de Noordzee en Zeeuwse getijdewateren metingen en uit SWAN resultaten voor de Westerschelde.

Tabel 4.3 geeft van de verhouding  $T_p / T_{m-1,0}$  het gemiddelde, 5 en 95 percentielen weer. Terwijl voor de meetdata de gemiddeld  $T_p / T_{m-1,0}$  waarde 1 - 1.1 is, is voor de modeldata het orde 1.3. Dit is in lijn met de analyse in de vorige sectie van de verschillen tussen de modelresultaten en de meetdata. De onderschatting van  $T_{m-1,0}$  is groter dan die van de  $T_p$  uit de SWAN resultaten als gevolg van triads, en dat leidt tot een grotere overschattingen van  $s_{m-1,0}$  ten opzicht van  $s_p$  en tot hogere  $T_p / T_{m-1,0}$  waarden. Diepgaande analyse van de verschillen tussen metingen en berekeningen van deze verhoudingen valt buiten de scope van deze studie. Wel kan opgemerkt worden dat onder extreme situaties op relatief ondiep water de spectra zeer plat worden en niet meer de mooie enkeltoppige vorm aannemen, die op de Noordzee leidt tot een verhouding van de periodematen van 1.1.



## 5 Conclusies en aanbevelingen

Voor het ontwerpen van steenzettingen met Steentoets wordt door het Projectbureau Zeeweringen van RWS (PBZ) in Zeeland gebruik gemaakt van correcties op de uit 1997 stammende golfcondities, die destijds met SWAN zijn berekend. Het gebruik van deze gecorrigeerde golfcondities heeft bij toepassing in Steentoets geleid tot veelvuldige waarschuwingen over de golfsteilheid en de golfhoogte op ondiep water. Omdat dit veelvuldig gebeurt, is een bureaustudie uitgevoerd om de juistheid van de criteria in Steentoets te controleren. Hiertoe zijn

- de verschillende brekercriteria uit de literatuur en uit de recentste versie van SWAN;
  - de maximale golfsteilheid aan de hand van gegevens uit de literatuur en de recentste versie van SWAN, en ook
  - enkele metingen
- beschreven en geanalyseerd.

De belangrijkste conclusies van deze studie zijn als volgt.

### Maximale significante golfhoogte op ondiep water

De eenvoudigste manier om de maximale significante golfhoogte op ondiep water te bepalen is met de vuistregel van Klein Breteler (1992)

$$H_{s_{\max}} = 0.5d_m,$$

$d_m$  = diepte op  $1.56T_p^2/2$  afstand van de dijk (m).

Deze methode blijkt vrij goed overeen te komen met de SWAN ééndimensionale resultaten. Een andere methode, de methode van Goda (2000) blijkt daarentegen niet altijd de juiste waarden te geven. De ontwerpgrafieken in Figuur 3.2 en Figuur 3.3 (afgeleide op basis van nieuwe SWAN berekeningen) zouden nog iets nauwkeuriger kunnen zijn dan de vuistregel.

### Maximale golfsteilheid

De golfsteilheden in de SWAN berekeningen met de instellingen zoals voorbereid binnen SBW voor de Westerschelde zijn hoger dan de golfsteilheden voor alle geanalyseerde metingen. Terwijl de gemiddelde  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) varieert tussen 0.014 en 0.026 (0.009 en 0.027) voor de metingen, is de gemiddelde  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) gelijk aan 0.041 (0.064) in de SWAN resultaten in de Westerschelde. Deze verschillen in golfsteilheid worden primair veroorzaakt door de in de SWAN simulaties beschouwde extreme omstandigheden, het grote aantal condities/locaties met relatief korte strijklengtes (jong golven) en het meenemen van triads in de SWAN berekeningen. In tegenstelling tot de werkelijkheid wordt in het model alleen energie verschoven naar hogere (geen lagere) frequenties. Er wordt geen rekening gehouden met transport van energie van de piek van het spectrum naar lagere frequenties. Dit leidt tot een onderschatting van de golfperiode en daardoor tot een onderschatting van de golfsteilheid. Reeds in 2010 is door Van der Westhuysen en Elias (2010) aangegeven dat SWAN de golfperiodes met 10 tot 16% onderschat. Het bepalen van een goede correctiewaarde voor SWAN valt buiten het kader van dit onderzoek. Op basis van de huidige

analyse kan geen verbetering worden voorgesteld ten opzicht van de veelvuldig toegepaste verhoging van de golfperiode met 1 s.

Als de periode met 1 seconde wordt gecorrigeerd in de huidige SWAN resultaten, dan wordt de gemiddelde  $s_p$  ( $s_{m-1,0}$ ) gelijk aan 0.026 (0.037) en ligt daarmee veel dichterbij de gemeten waarden.

Uitgaande van de metingen, het effect van de veel grotere windsnelheid in toetscondities en een inschatting van de lokale complexe geometrie is een grens afgeleid voor de golfsteilheid, die gebruikt kan worden in Steentoets. Als  $s_p > 0.08$  moet Steentoets waarschuwen dat de golfcondities zeer bijzonder (mogelijk foutief) zijn.

Het is belangrijk dat de ontwikkeling van het numerieke model SWAN wordt voortgezet, zodat op termijn ook de golfperiode nauwkeurig kan worden voorspeld.

#### Criteria voor waarschuwing in Steentoets

Geadviseerd wordt om Steentoets een waarschuwing te laten geven als:

- de maximale significante golfhoogte op ondiep water  $H_s > 0.6d_m$  met  $d_m =$  diepte op  $1.56T_p^2/2$  afstand van de dijk. Dit sluit met een kleine marge aan op de vuistregel van Klein Breteler (1992) die al langere tijd gebruikt wordt voor steenzettingen. Door dit waarschuwingscriterium te hanteren, dat iets hoger ligt dan de vuistregel ( $H_s > 0.5d_m$ ), wordt alleen gewaarschuwd als er een gerede kans is dat de golfhoogte te hoog is ten opzichte van de waterdiepte.
- de maximale golfsteilheid:  $s_p > 0.08$ . Dit sluit aan op de metingen en inschatting van de overige invloeden die  $s_p$  beïnvloeden.

## Literatuur

- Alkyon, 1997: Golfberekeningen Westerschelde. Alkyon rapport A174R1r1.
- Battjes, J. A., en J. P. F. M. Janssen, 1978: Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering* 1978 (pp. 569–588), Am. Soc. of Civ. Eng., New York.
- Battjes, J.A. en T. T. Janssen, 2008: Random wave breaking models – History and discussion. *Coastal Engineering* 2008 (pp 25-37), Hamburg, September 2008.
- Battjes, J.A. en M.J.F. Stive, 1985: Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research*, 90, C5, 9159-9167.
- Booij, N., R.C. Ris en L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geoph.Research*, 104, C4, 7649-7666
- Bottema, M., 2007: *Measured wind-wave climatology Lake IJssel (NL). Main results for the period 1997-2006*. Report RWS RIZA 2007.020, July 2007 ([http://english.verkeerenwaterstaat.nl/kennisplein/3/5/359788/Measured\\_wind-wave\\_climatology\\_lake\\_IJssel\\_\(NL\)-main\\_results\\_for\\_the\\_period1.pdf](http://english.verkeerenwaterstaat.nl/kennisplein/3/5/359788/Measured_wind-wave_climatology_lake_IJssel_(NL)-main_results_for_the_period1.pdf)).
- CIRIA, CUR, CETMEF, 2006: *The rock manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2<sup>nd</sup> edition). C683, CIRIA, London.
- Eldeberky, Y., 1996: *Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology.
- Gent, M.R.A. van, 1999: *Wave run-up and wave overtopping for double peaked wave energy spectra*. Delft Hydraulics rapport H3351-Januari 1999, Delft, The Netherlands.
- Gent, M.R.A. van, 2001: Wave run-up on dikes with shallow foreshores. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 127 (5), pp. 254-262.
- Goda, Y., 2010: *Random seas and design of maritime structures* (3<sup>rd</sup> edition). Advanced Series on Ocean Engineering, New Jersey. ISBN 978-981-4282-39-0. xxiv, 708 pp.
- Holthuijsen, L.H., 2007: *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.
- Janssen, T. T., 2006: *Nonlinear surface waves over topography*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 223 pp.
- Klein Breteler, M., 1992: *Handboek voor dimensionering van gezette taludbekleding*. TAW, CT-Rapp CUR 155.
- Meer, J.W. van der, 1990: *Extreme shallow water wave conditions*. Delft Hydraulics, Report H 198, January 1990.
- Miche, R., 1944 : Mouvement ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. *Annales des Ponts et Chaussées*.
- Ruessink, B.G., D.J.R. Walstra en H.N. Southgate, 2003: Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches. *Coastal Engineering*, 48, 139-149.
- Svasek, 2010: Update correctiewaarden Zeeland: Vervangend rapport voor ' Advisering toepassing correctiewaarden Zeeland'. Svasek rapport 1585/U10250D/PvdR.
- TAW, 2002: Technisch Rapport golfploop en golfoverslag bij dijken
- Thornton, E.B. en R.T. Guza, 1983: Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, 88, 5925-5938.
- Westhuysen, A. J. van der, 2007: *Advances in the spectral modelling of wind waves in the nearshore*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 207 pp.
- Westhuysen, A. J. van der, 2009: Modelling of depth-induced wave breaking over sloping and horizontal beds. *Proc. 11th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting* ([http://www.waveworkshop.org/11thWaves/Papers/westhuysen\\_11thwavesworkshop.pdf](http://www.waveworkshop.org/11thWaves/Papers/westhuysen_11thwavesworkshop.pdf)).
- Westhuysen, A. J. van der, 2010: Modeling of depth-induced wave breaking under finite depth wave growth conditions. *J. Geophys. Res.*, 115, C01008, 2010.
- Westhuysen, A. J. van der en E. Elias, 2010: Validation of wave-current interaction modelling in the Western Scheldt and the Columbia River Mouth. Deltares Report 1202120-004-HYE-0003, June 2010.
- Westhuysen, A. J. van der, A.R. van Dongeren, J. Groeneweg, G.Ph. van Vledder, H. Peters, C. Gautier en J.C.C. van Nieuwkoop, 2012: Improvements in spectral wave modelling in tidal inlet seas. Submitted to *J. Geophys. Res.*