



# WBI-beoordeling Oosterscheldekering

Modelonzekerheden golven

Opdrachtgever: Rijkswaterstaat





Opdrachtgever: Rijkswaterstaat



# WBI-beoordeling Oosterscheldekering

---



Modelonzekerheden golven

Definitief rapport

**Auteur**  
Vincent Vuik

PR4119.10  
april 2021







# Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Context	1
1.2	Aanleiding	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>Modelonzekerheden WBI</b>	<b>3</b>
2.1	Modelonzekerheden kust	3
2.2	Afleiding modelonzekerheden	3
2.3	Vergelijkbare studies	5
<b>3</b>	<b>Data en methoden</b>	<b>7</b>
3.1	Golvendatabase	7
3.2	Golfdata	8
3.3	Waterstandsdata	10
3.4	Winddata	10
3.5	Interpolatiemethode	11
3.6	Lineaire regressie	12
<b>4</b>	<b>Resultaten</b>	<b>13</b>
4.1	Significante golfhoogte $H_{m0}$	13
4.2	Golfspectra	20
4.3	Spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$	21
4.4	Piekperiode $T_p$	26
4.5	Maximale golfhoogte $H_{max}$	27
4.6	Golfperiode $T_{Hmax}$ bij maximale golfhoogte	29
4.7	Correlatie tussen modelonzekerheden	30
<b>5</b>	<b>Discussie en conclusies</b>	<b>35</b>
5.1	Geselecteerde golfdata	35
5.2	Beschrijving van de standaardafwijking	35
5.3	Samenvatting	39
5.4	Duiding van verschillen	39
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>41</b>
	<b>Bijlagen</b>	<b>43</b>
A	Stations op dieper water	1



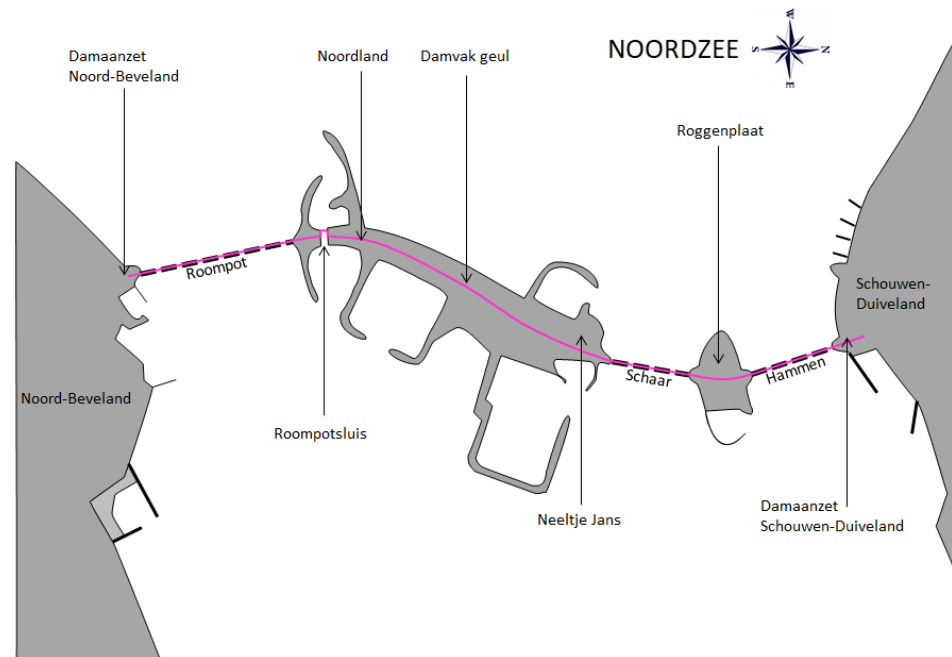


# 1 Inleiding

## 1.1 Context

Dit rapport is geschreven in de context van de WBI2017-beoordeling van de Oosterscheldekering. Binnen die beoordeling worden alle onderdelen van het normtraject 218 (Oosterscheldekering, zie Figuur 1) beoordeeld door een vergelijking tussen sterkte en hydraulische belastingen uit te voeren. Dit betreft zowel de stormvloedkering als de damaanzetten en waterkeringen op de eilanden Neeltje Jans en Roggenplaat. De kansverdelingen voor de sterkte en de belasting resulteren in een faalkans per faalmechanisme voor elke component. De belastingen bestaan uit waterstand, verval en golfkarakteristieken. Onderdeel van de filosofie van WBI2017 is dat ook modelonzekerheden in rekening moeten worden gebracht. Dit rapport heeft betrekking op de modelonzekerheden in de golfhoogte en golfperiode, gerelateerd aan de prestaties van het SWAN-model waarmee deze parameters zijn berekend.

*Figuur 1  
Normtraject 218,  
Oosterscheldekering  
(OSK), bestaand uit  
de stormvloedkering  
(SVKO) en de aansluitende delen van de kering.*



## 1.2 Aanleiding

Binnen WBI2017 zijn algemene getallen ontwikkeld voor het beschrijven van modelonzekerheden voor de golfhoogte en golfperiode. Deze gelden voor de watersystemen Kust (Noordzeekust, Westerschelde en Waddenzee) en het IJsselmeer. Deze algemene getallen leveren een grote onzekerheidsband op rondom de door SWAN berekende golfparameters.

De grote onzekerheidsbanden worden het best geïllustreerd door een concreet getallenvoorbeeld. Bij een terugkeertijd van 10000 jaar (gelijk aan de

normfrequentie van het traject), is de significante golfhoogte in het midden van de Roompot ca. 3.7 m en de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  ca. 6.7 s (Rijkswaterstaat Zee en Delta, 2017). De WBI2017 modelonzekerheden (Deltares, 2015a) leveren voor deze getallen een 95% betrouwbaarheidsinterval [ $\mu - 1.96\sigma$ ,  $\mu + 1.96\sigma$ ] op van [2.3, 5.1] m voor de golfhoogte ( $\sigma = 0.19 * H_{m0}$ ) en [5.3, 8.1] s voor de golfperiode ( $\sigma = 0.11 * T_{m-1,0}$ ), zie §2.1. Deze betrouwbaarheidsintervallen hebben grote invloed op de faalkansen van alle faalmechanismen waarin golven relevant zijn.

Een eerste vergelijking tussen modelresultaten en metingen nabij de OSK leidde tot vraagtekens bij de grootte van deze betrouwbaarheidsintervallen. Daarbij geldt dat een verfijnd SWAN-model is ontwikkeld (HKV, 2021), wat een hogere mate van nauwkeurigheid zou moeten hebben dan grovere modellen. Het verzoek van Rijkswaterstaat Zee en Delta aan HKV was dan ook om de modelonzekerheden nader te kwantificeren, specifiek voor het SWAN-model waarmee de golfbelastingen op de Oosterscheldekering zijn uitgerekend.

## 1.3 Doelstelling

Het doel van deze studie is meer inzicht verkrijgen in de prestaties van SWAN ter plaatse van de Oosterscheldekering, door het vergelijken van gemeten en gemodelleerde golfhoogtes en golfperiodes tijdens stormen op diverse locaties. Indien de resultaten daar aanleiding toe geven, volgt uit deze studie een nadere definitie van de modelonzekerheden voor de significante golfhoogte en spectrale golfperiode. Daarnaast geeft deze studie een advies over de golfperiode die gecombineerd moet worden met de maximale golfhoogte, gezamenlijk leidend tot de grootste individuele golfklap op de stormvloedkering tijdens een storm.

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een beknopt overzicht van de omgang met modelonzekerheden gerelateerd aan golfmodellering. Hoofdstuk 3 beschrijft de methode voor het afleiden van modelonzekerheden. Hoofdstuk 4 geeft de resultaten van de vergelijking tussen modelresultaten en metingen. Hoofdstuk 5 besluit het rapport met een advies over de toe te passen modelonzekerheden.

## 2 Modelonzekerheden WBI

### 2.1 Modelonzekerheden kust

In Deltares (2015a) zijn de modelonzekerheden uit Tabel 1 voorgeschreven voor de watersystemen Kust (Hollandse Kust, Waddenzee en Westerschelde) en het IJsselmeer. Deze modelonzekerheden hebben een multiplicatief karakter. Dit betekent dat er biascorrecties van +1% en +4% moeten worden toegepast op respectievelijk de door SWAN berekende golfhoogtes en golfperiodes. Ook dient er een standaardafwijking toegepast te worden rond de berekende golfparameters, eveneens met een multiplicatief karakter. De standaardafwijking bedraagt 19% voor de golfhoogte en 11% voor de golfperiode. Het multiplicatieve karakter houdt in dat de biascorrectie en standaardafwijking in absolute zin toenemen naarmate de golfhoogte en golfperiode groter worden. De standaardafwijking in een multiplicatief model is geen absolute, maar een relatieve standaardafwijking (in %).

*Tabel 1  
Toegepaste modelonzekerheden voor de regio Hollandse Kust*

$\mu H_{m0}$	$\sigma H_{m0}$	$\mu T_{m-1,0}$	$\sigma T_{m-1,0}$
1.01	0.19	1.04	0.11

In eerste instantie werden beide modelonzekerheden onafhankelijk van elkaar toegepast binnen het WBI. Dit kan echter leiden tot onrealistisch hoge golfsteilheden (zelfs in het illustratiepunt van Hydra-NL). Dit vanwege realisaties uit de kansverdelingen waarbij de golfhoogte wel 1 of 2 standaardafwijkingen boven het gemiddelde wordt gekozen, terwijl de golfperiode niet wordt verhoogd. In latere studies is daarom onderzocht in hoeverre afwijkingen in golfhoogte en golfperiode gecorreleerd zijn. Dit heeft geleid tot het advies om een correlatiecoëfficiënt van 0.37 toe te passen voor het watersysteem Kust (Deltares, 2018).

### 2.2 Afleiding modelonzekerheden

De getallen uit Tabel 1 zijn afgeleid in Deltares (2013). Door het analyseren van hindcasts (het met modellen narekenen van de golven tijdens werkelijk opgetreden stormen) is inzicht verkregen in de verschillen tussen gemeten en berekende golfparameters op meetlocaties. Het doel van Deltares (2013) was het bepalen van onzekerheden in golfparameters bij de dijkteen, gegeven een perfecte offshore forcering van het SWAN-model. De modelonzekerheden zouden dus betrekking moeten hebben op onnauwkeurige modelinvoer, ontbrekende fysica en/of onnauwkeurig gerepresenteerde fysica in SWAN.

De modelonzekerheden voor golven in het watersysteem Kust zijn gebaseerd op de volgende meetlocaties:

- Waddenzee:
  1. Amelander Zeegat: 4 locaties (AZB51, AZB61, AZB52 en AZB62), gelegen centraal in de Waddenzee tot op enige afstand van de dijken van Friesland;
  2. Westelijke Waddenzee: 5 locaties (BREEZDBTBI1, KORNWDZBTBI1 PANNGBI1, BREESBI1 en MALZBI1), gelegen centraal in de Waddenzee en bij de Afsluitdijk;
  3. Oostelijke Waddenzee: 3 locaties (Wierumerwad, Pieterburenwad en Uithuizerwad), gelegen aan de Waddenzeedijken van Friesland en Groningen.
- Westerschelde
  4. Zes Waverider golfboeien in de Westerschelde (WCT1, HFPL, PVT1, HAN1, BAT1 en BAT2), waarvan twee nabij de monding (Hoofdplaat en Westerschelde Containerterminal, nabij Borssele) en de overige locaties verder bovenstrooms.

Deze vier deelgebieden zijn samengevoegd in Deltares (2013) en een normale verdeling is gefit door de verschillen tussen de gemodelleerde golfhoogtes en golfperiodes ten opzichte van de metingen, resulterend in de getallen in Tabel 1. Al deze locaties betreffen locaties in een estuarium of in een zee-gat. Er zijn geen locaties meegenomen langs de open Noordzeekust. De onzekerheden hebben betrekking op SWAN 40.72ABCDE.

De modelonzekerheden voor de beschouwde locaties omvatten onder andere de volgende bronnen:

1. Ontbrekende fysische processen in SWAN zoals wave set-up, diffractie, reflecties, niet-lineaire golfprocessen, etc.;
2. Onnauwkeurig gemodelleerde fysische processen in SWAN die een rol spelen bij golfindringing, golfgroei en golfvoortplanting in estuaria en zee-gaten, zoals windgroei, propagatie, whitecapping, shoaling, refractie, golfbreking, niet-lineaire golf-golfinteractie (triads), wave set-up en golfstroominteractie;
3. Onnauwkeurige offshore randvoorwaarden (deze zijn niet nul zoals beoogd, zie o.a. Fig. 3.2 in Deltares, 2013);
4. Onnauwkeurige wind boven het watersysteem, onder andere door verschillen in oppervlakteruwheid tussen land en water door de aanwezigheid van de Waddeneilanden en de Zeeuwse eilanden.
  - Waddenzee: gemiddelde waarde van de gemeten wind bij Huibertgat, Texel Hors en Lauwersoog (Witteveen & Bos, 2008).
  - Westerschelde: gemiddelde waarde 4 meetlocaties (Witteveen & Bos, 2010).
5. Onnauwkeurige modellering van waterstands- en stromingsvelden in het geval van de Waddenzee met Delft3D, zie Royal Haskoning (2008);
6. Meetfouten bij de golfmeetboeien.

De modelonzekerheden dienen de onzekerheid in de volledige vertaling van basisstochasten (wind, waterstand) naar golven te representeren (Deltares,

2016). Voor een deel van bovenstaande oorzaken geldt dat ze niet relevant zijn voor deze vertaling. Voor een ander deel geldt dat er in Deltares (2013) andere wijzen van modellering zijn aangehouden dan in WBI. Een voorbeeld is dat de gebruikte winddata in de hindcasts verschillen van de wijze waarop in WBI productieberekeningen wind wordt opgelegd. Het toewijzen van de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten golven aan de verschillende onzekerheidsbronnen is niet zonder meer mogelijk. Daarom worden de verschillen in Deltares (2013) volledig in rekening gebracht als modelonzekerheden voor toepassing in WBI.

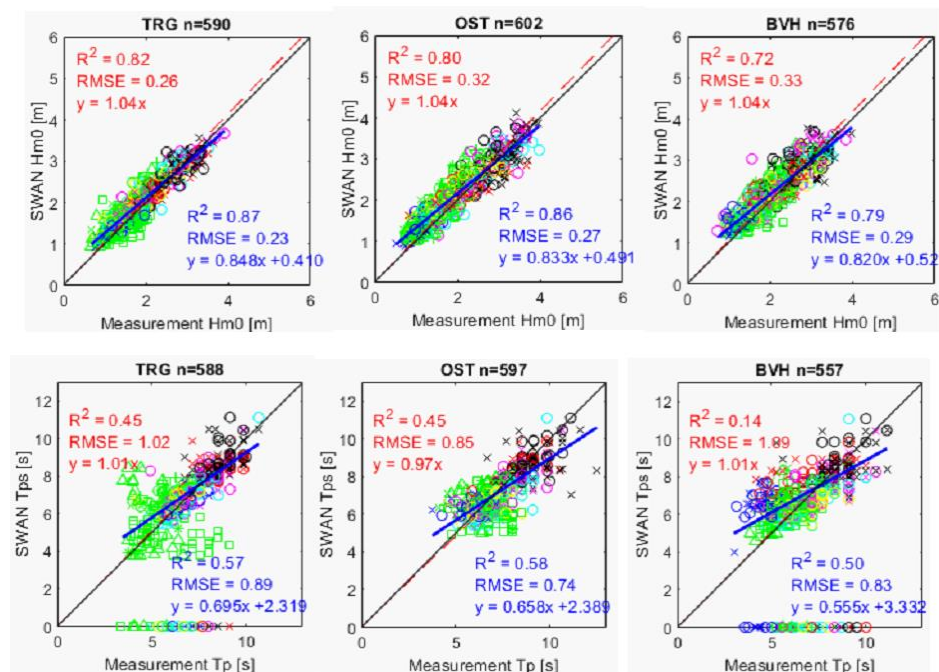
## 2.3 Vergelijkbare studies

Recent zijn door Suzuki et al. (2020) modelonzekerheden afgeleid voor de Vlaamse Kust. Voor drie locaties nabij de kust (Trapegeer, Oostende en Bol van Heist) vonden zij na kalibratie een biascorrectie van -4% en een standaardafwijking van 0.26 tot 0.33 m voor significante golfhoogtes  $H_{m0}$  in het bereik tot ongeveer 4 m, zie Figuur 2 (met de assen andersom ten opzichte van de huidige studie). Op het oog is geen toename van de standaardafwijking met de golfhoogte te zien in deze figuren, hoewel dit in Suzuki et al. (2020) niet specifiek is onderzocht.

Voor de piekperiode berekenden zij biascorrecties tussen -1% en +3% en een standaardafwijking variërend van 0.85 tot 1.09 s, zie Figuur 2. De piekperiode  $T_p$  is in gemeten golfspectra inherent minder stabiel dan de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$ .

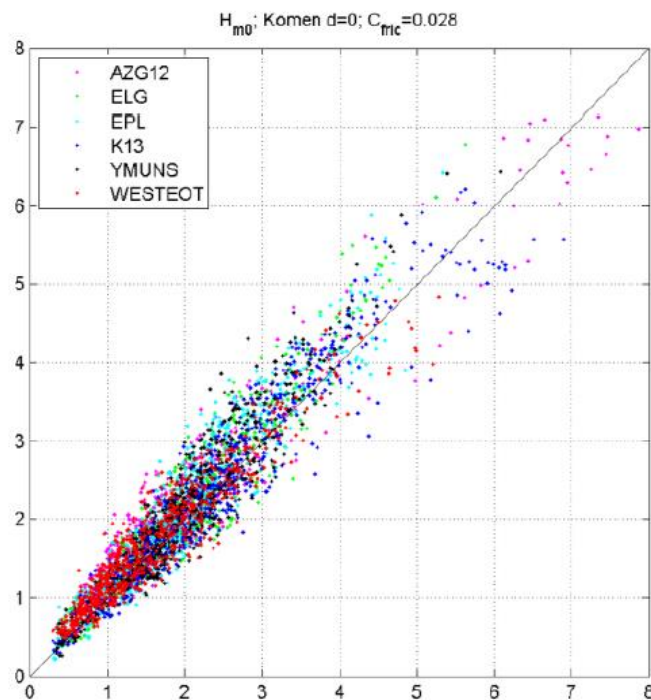
De standaardafwijkingen zijn als constante waarden toegepast voor de Hydraulische Randvoorwaarden voor de Vlaamse Kust (Vuik et al., 2020). De biascorrecties zijn genegeerd.

*Figuur 2  
Modelonzekerheden voor de Vlaamse Kust: significante golfhoogte (boven) en piekperiode (onder). Metingen staan hier horizontaal, modelresultaten verticaal (omgekeerd t.o.v. het voorliggende rapport).  
Bron: Suzuki et al. (2020).*



Een andere relevante studie is die voor het kalibreren en valideren van een operationeel SWAN-model voor de Noordzee: Deltares (2015b). Daaruit volgt voor SWAN-ZUNO een benodigde biascorrectie van -7% voor  $H_{m0}$  (SWAN overschat de golfhoogte) en +21% voor  $T_{m-1,0}$  (SWAN onderschat de golfperiode). Een relatieve standaardafwijking van respectievelijk 18 en 14% wordt aanbevolen. Dit betreft operationele SWAN-modellen met een groot modeldo-  
 main, een relatief grof rooster (in verband met rekestijden) in niet-statio-  
 naire modus. Daar waar windgroei, refractie en golfbreking dominant zijn  
 voor kustmodellen, zijn voor grootschalige modellen voor de gehele (zuide-  
 lijke) Noordzee windforcering, quadruplets, bodemwrijving en whitecapping  
 dominant. Een relatieve standaardafwijking (in %) is terecht toegepast om-  
 dat de absolute spreiding (in m) toeneemt met de golfhoogte, zie Figuur 3.

*Figuur 3  
 Scatterplot voor  $H_{m0}$   
 [m] voor SWAN-  
 ZUNO met aanbevo-  
 len instellingen; ob-  
 servaties op de X-  
 as, SWAN-resultaten  
 op de Y-as. Bron:  
 Deltares (2015b).*



## 3 Data en methoden

### 3.1 Golvendatabase

Voor de lopende WBI2017-beoordeling van de Oosterscheldekering wordt de golvendatabase OSK\_218\_v03.sqlite gebruikt. De totstandkoming van deze database is beschreven in HKV (2021). Het achterliggende SWAN-model is gebaseerd op Deltares (2017), waarbij het model in beide richtingen met een factor 2 is verfijnd. Daarnaast zijn ten opzichte van Deltares (2017) uitvoerlocaties toegevoegd langs de vaste delen van de OSK (zie Figuur 1).

In de sqlite-database zijn golfparameters beschikbaar voor de 62 sluitgaten, 37 punten langs de vaste delen van de OSK en de meetlocatie 'Oosterschelde 4' (OS4). Binnen de voorliggende studie is gebruik gemaakt van alle modeluitvoer die ten grondslag ligt aan deze database. Daarbij is ook modeluitvoer beschikbaar voor 12 andere meetlocaties binnen het modeldomein.

Golfparameters bij alle uitvoerlocaties zijn beschikbaar voor combinaties van de volgende waarden voor de basisstochasten:

- Windrichtingen:
  - Westelijke sector: 210, 240, 270, 300, 330, 360 graden t.o.v. N.
  - Oostelijke sector: 30, 60, 90, 120, 150, 180 graden t.o.v. N.
- Windsnelheden:
  - Westelijke sector: 10, 20, 24, 28, 30, 34, 38, 42, 46, 50 m/s
  - Oostelijke sector: 10, 20, 24, 28, 30, 34, 38 m/s
- Waterstanden:
  - -2.00 tot +3.00 m+NAP met stappen van 0.25 m
  - +3.00 tot +6.50 m+NAP met stappen van 0.50 m

Deze windsnelheden betreffen potentiële windsnelheden. Voor toepassing in SWAN zijn deze omgezet naar openwaterwindsnelheden via een conversietafel (De Waal, 2003). Deze ligt 11% hoger dan de potentiële windsnelheid bij 10 m/s en 2% hoger bij 50 m/s.

Op de rand op diep water zijn golfrandvoorwaarden opgelegd, afhankelijk van de windrichting en windsnelheid. Dit betreft statistiek voor locatie Schouwenbank, identiek aan de toegepaste randvoorwaarden in Deltares (2017). Tabel 2 toont een voorbeeld van de offshore golfrandvoorwaarden bij windrichting 330 graden. Om golfrandvoorwaarden bij de verschillende realisaties van de basisstochast windsnelheid (zie hierboven) te bepalen, is geïnterpoleerd tussen deze getallen.

Tabel 2  
Voorbeeld van de offshore golfbrandvoorwaarden bij windrichting 330 graden

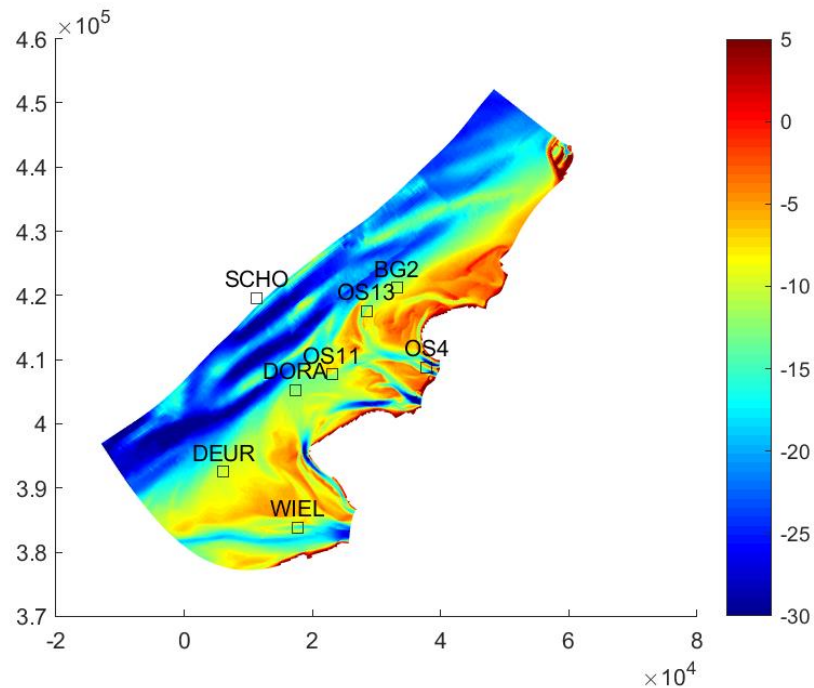
Windsnelheid (m/s)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>m-1,0</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)
12.3	2.8	6.7	7.5
16.7	3.9	7.9	8.9
21.2	5.5	9.1	10.3
25.8	6.7	10.2	11.6
30.4	7.7	11.1	12.9
35.1	8.6	12.0	14.1

## 3.2

## Golfdata

Golfmetingen zijn beschikbaar binnen het domein van het SWAN-model (Figuur 4) bij de locaties uit Tabel 3. Zie bijvoorbeeld Svasek (2006) voor meer informatie.

Figuur 4  
Locaties golfmetingen en ligging binnen het modeldomein. De bodemhoogte in het SWAN-model is weergegeven met de kleuren in de achtergrond. Bron: HKV (2021)



Tabel 3  
Locaties golfmetingen

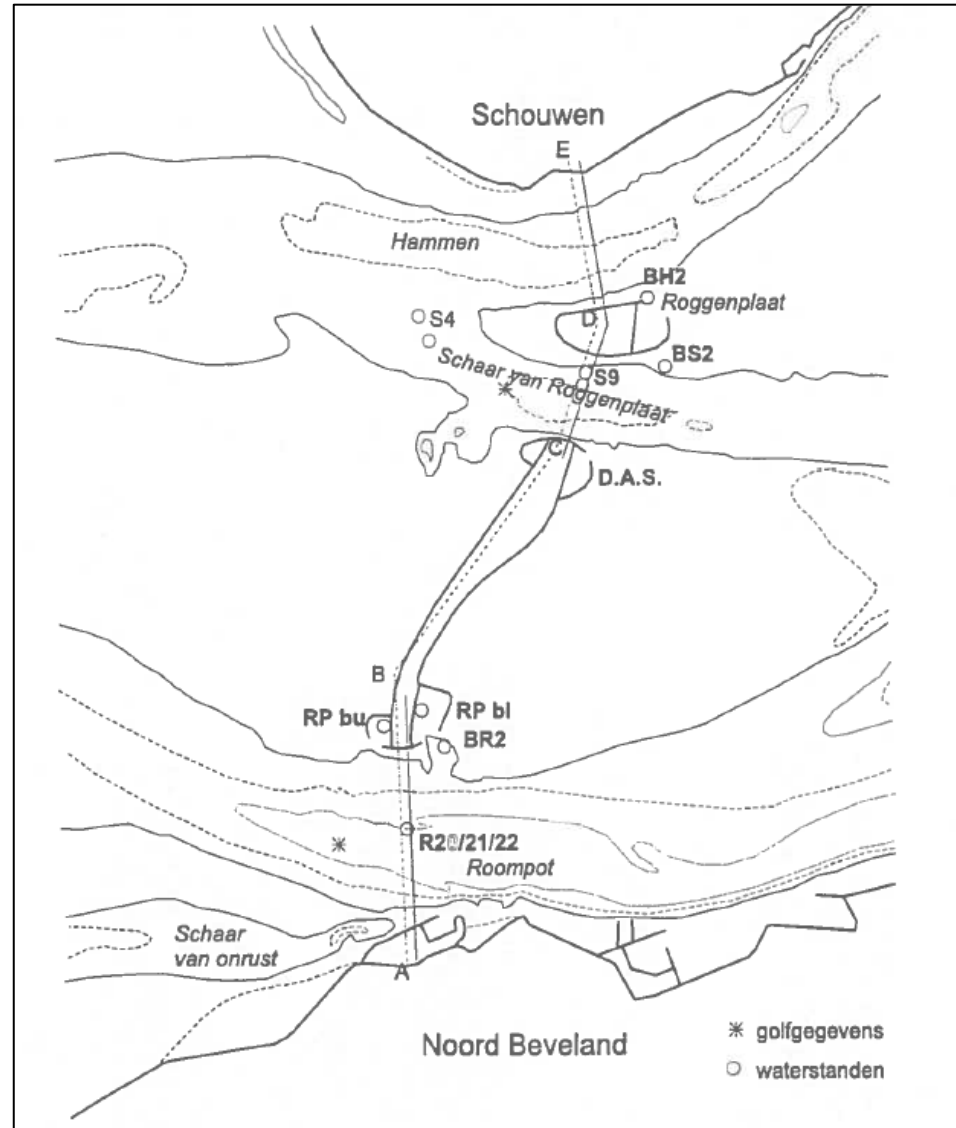
Locatie	Afkorting	RD-coördinaten	Periode
Oosterschelde 4	OS4	37837, 408813	1988-2019
Schouwenbank	SCHB	11332, 419605	1985-2019
Brouwershavense Gat 2	BG2	33140, 421239	1983-2019
Domburger Rassen	DORA	17325, 405275	1994-2019
Deurloo	DEUR	6071, 392601	2009-2019
Wielingen	WIEL	17641, 383875	1985-2019
Oosterschelde 11	OS11	23021, 407778	2008-2019
Roompot Midden	-	36877, 403513	1989-1995
Schaar Midden	-	39315, 407676	1989-1995

De coördinaten van Roompot Midden en Schaar midden zijn bij benadering, en betreffen de uitvoerlocatie uit het SWAN-model waar de metingen mee



zijn vergeleken. Beide WAVEC-boeien hebben op ongeveer 1 km afstand uit de kering gelegen, midden in de geulen Roompot en Schaar van Roggenplaat. De exacte posities zijn niet gedocumenteerd. De overige locaties zijn reguliere golfmeetboeien uit het Landelijke Meetnet Water.

*Figuur 5  
Locaties WAVEC-  
boeien, ter plaatse  
van de sterretjes in  
de Roompot en  
Schaar. Bron: Rijks-  
waterstaat Zeeland  
(1997).*



De volgende golfparameters zijn gebruikt voor deze studie:

1. Spectrale significante golfhoogte  $H_{m0}$  (m)
2. Spectrale gemiddelde golfperiode  $T_{m-1,0}$  (s)
3. Maximale golfhoogte  $H_{max}$  (m)
4. Golfperiode bij de maximale golfhoogte  $T_{Hmax}$  (s)

In de oudere data ontbrak de parameter  $T_{m-1,0}$ . Deze golfperiodemaat is pas in de laatste circa 20 jaar in zwang geraakt voor veiligheidsbeoordelingen. Voor de meetlocatie OS4 zijn daarom de waarden voor  $T_{m-1,0}$  afgeleid uit de oorspronkelijke golfspectra om de gaten te dichten.

### 3.3

## Waterstandsdata

In SWAN is gerekend met vlakke waterstanden (HKV, 2021). De waterstand bij Roompot Buiten is aangehouden als representatieve waterstand voor de gehele Oosterscheldekering.

Tabel 4  
Locatie waterstands-  
metingen

Locatie	Code	RD-coördinaten	Periode
Roompot Buiten	RPBU	36931, 404793	1988-2019

### 3.4

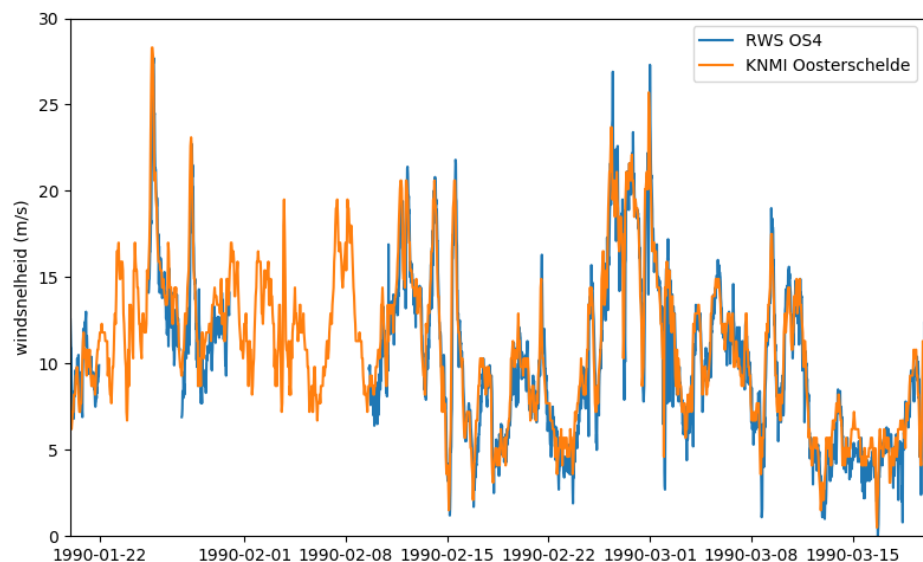
## Winddata

Voor de windsnelheid en windrichting is eveneens de Rijkswaterstaat meetlocatie Oosterschelde 4 gebruikt. Dit betreft metingen op ongeveer 10 m hoogte. Daarmee beschouwen we deze data als openwaterwindsnelheden. Gaten zijn gevuld met KNMI winddata van locatie Oosterschelde (312). Figuur 6 laat zien dat beide meetreeksen sterke overeenkomst vertonen (voorbeeld van een periode met stormen in 1990).

Tabel 5  
Locaties windmetin-  
gen

Locatie	Code	RD-coördinaten	Periode
Oosterschelde 4 (RWS)	OS4	37837, 408813	1988-2019
Oosterschelde (KNMI)	312	33161, 421402	1982-2019

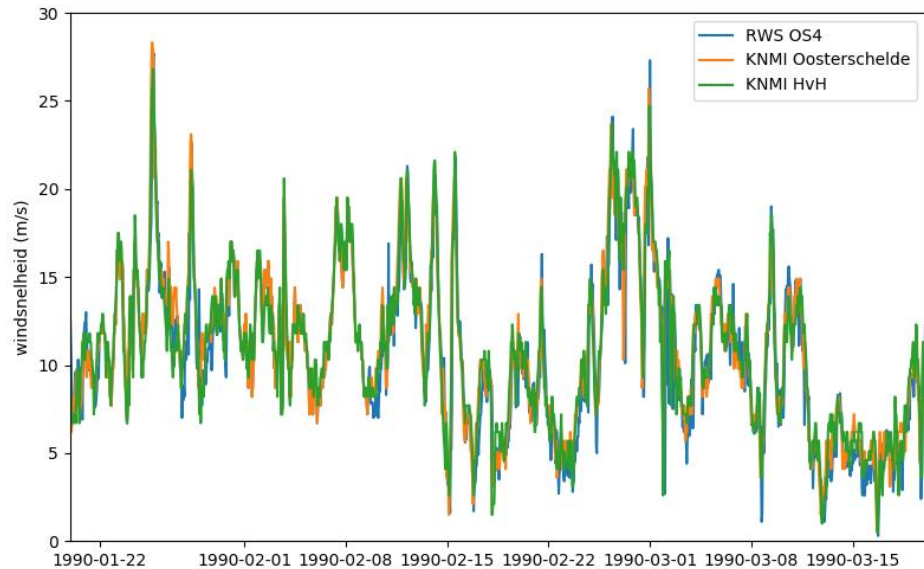
Figuur 6  
Voorbeeld van de  
overeenkomst tus-  
sen beide windsnel-  
heidsmetingen en  
het vullen van gaten  
in de tijdreeks van  
RWS



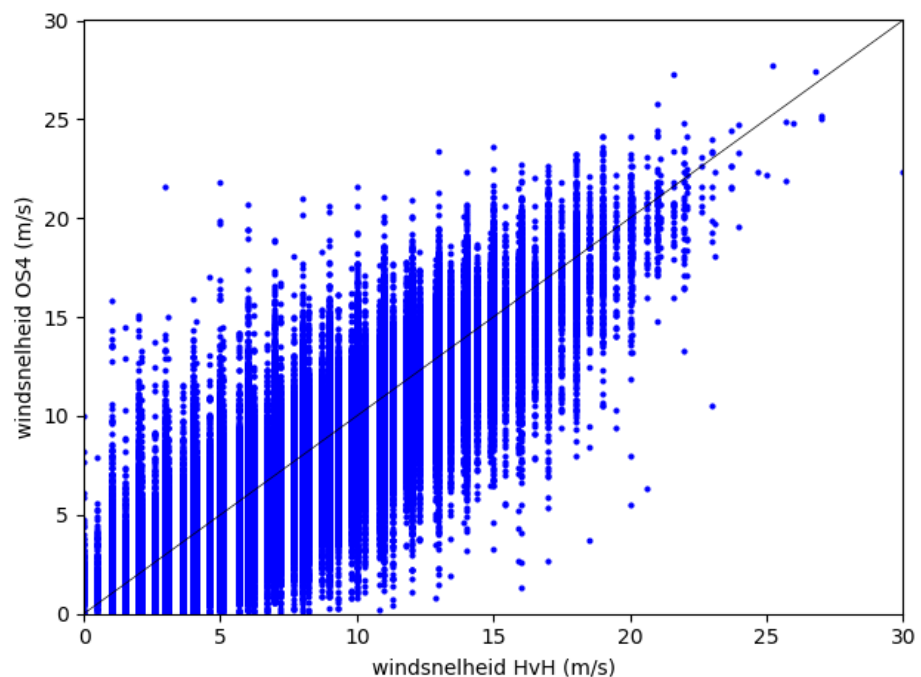
Ook is er een goede overeenkomst tussen de windsnelheid bij OS4 en de gemeten windsnelheid bij Hoek van Holland (KNMI locatie 330). De windmetingen bij Hoek van Holland vormen de basis voor de windstatistiek die gebruikt wordt voor de WBI-beoordeling van de Oosterscheldekering. De windsnelheid bij Hoek van Holland is nog gestandaardiseerd als potentiële windsnelheid en omgezet naar openwaterwindsnelheid voordat hij aan SWAN wordt opgelegd.

De gemeten windsnelheden uit Figuur 7 en Figuur 8 zijn dus niet exact representatief voor de windstatistiek bij Hoek van Holland (HvH), maar ze maken wel duidelijk dat er geen fundamenteel verschil bestaat tussen locatie Hoek van Holland en locatie OS4.

*Figuur 7  
Voorbeeld van de  
overeenkomst tus-  
sen de windsnel-  
heidsmetingen bij  
Oosterschelde 4 en  
Hoek van Holland*



*Figuur 8  
Windsnelheid OS4  
uitgezet tegen de  
windsnelheid bij  
Hoek van Holland*



### 3.5 Interpolatiemethode

Voor het reproduceren van de gemeten golven zijn geen nieuwe SWAN-berekeningen uitgevoerd. Er is gebruik gemaakt van interpolatie in de SWAN-database op basis van windrichting, openwaterwindsnelheid en waterstand. Interpolatie vindt alleen plaats binnen het bereik van de database, dus voor openwaterwindsnelheden van 10 m/s en hoger. De gemeten windrichtingen

zijn afgerond naar de dichtstbijzijnde waarde in de database. Gemeten golven bij een windrichting van 280 graden zijn dus vergeleken met de gemodelleerde golven bij 270 graden. Daarmee zijn de modelresultaten bij elke windrichting representatief verondersteld voor die windrichting  $\pm 15$  graden.

## 3.6 Lineaire regressie

Modelonzekerheden zijn afgeleid via lineaire regressie, waarbij de gemeten golfhoogtes een functie zijn van de gemodelleerde golfhoogtes. Daarbij worden regressielijnen van de vorm  $y=a*x$  gebruikt. Dit is conform het WBI (§2.1) en het levert robuustere resultaten op dan regressielijnen van de vorm  $y=a*x+b$ . De biascorrectie is gelijk aan  $a$ .

- Bij  $a>1$  geldt dat SWAN de metingen onderschat, waardoor getalswaarden uit de database verhoogd moeten worden voor toepassing bij beoordeling of ontwerp.
- Bij  $a<1$  geldt dat SWAN de metingen overschat, waardoor de getallen uit de database verlaagd moeten worden voordat ze worden toegepast bij een beoordeling of ontwerp.

De standaardafwijking volgt uit de wortel van het kwadratische verschil tussen observaties  $y$  en predicties  $y'=a*x$ :  $\sigma = \sqrt{\sum(y - a * x)^2 / N}$ .

De standaardafwijking is op deze manier van toepassing op de verschillen tussen metingen en model ná toepassing van de biascorrectie via  $y'=a*x$ .

Na het uitvoeren van de lineaire regressie is onderzocht hoe de standaardafwijking  $\sigma$  verloopt als functie van de parameter  $x$  (dat is: de golfhoogte of golfperiode zoals berekend door SWAN). Dit gebeurt door met een lopend venster over de data te schuiven. De procedure daarvoor is als volgt:

1. Kies een middelpunt  $\bar{x}$  van het venster, te beginnen bij 1.0 m voor de golfhoogte (voor OS4), oplopend tot 2.0 m (voor offshore locaties);
2. Selecteer alle waarden waarvoor de golfhoogte volgens SWAN zich minder dan 0.25 m van het middelpunt af bevindt [ $\bar{x} - 0.25 \text{ m}, \bar{x} + 0.25 \text{ m}$ ];
3. Bepaal de standaardafwijking voor alle punten binnen dit interval via bovenstaande formule;
4. Verhoog het middelpunt  $\bar{x}$  met 0.1 m, en bepaal de standaardafwijking voor het verschoven venster;
5. Herhaal deze procedure tot het maximum van  $H_{m0}=2.5 \text{ m}$  is bereikt (voor OS4), of  $H_{m0}=5.0 \text{ m}$  (voor offshore locaties).

Dezelfde procedure is gevolgd voor de golfperiode, met waarden tussen 3 en 6 s voor OS4 en tussen 5 en 8.5 s voor offshore locaties. Hier geldt het interval [ $\bar{x} - 0.25 \text{ s}, \bar{x} + 0.25 \text{ s}$ ] en een stapgrootte van 0.1 s. Het resultaat is een standaardafwijking als functie van het middelpunt van het venster:  $\sigma(\bar{x})$ , mits er minimaal 10 datapunten beschikbaar zijn om de standaardafwijking in het venster op te baseren. De curve stopt bij de grenzen van het bereik van de data, als het aantal datapunten binnen het venster kleiner dan 10 wordt.

## 4 Resultaten

### 4.1 Significante golfhoogte $H_{m0}$

Deze paragraaf bevat een vergelijking tussen modelresultaten en metingen, eerst voor locatie Oosterschelde 4 (OS4), dan voor de tijdelijke WAVEC-boeien in de Roompot en de Schaar van Roggenplaat, daarna voor overige locaties binnen het modeldomein van het SWAN-model.

#### 4.1.1 Locatie Oosterschelde 4

Allereerst ligt de focus op locatie Oosterschelde 4 (OS4), omdat dit de enige locatie is met een lange meetreeks dicht bij de OSK. De focus ligt op de windrichtingen waarbij significante golfhoogtes hoger dan 2.0 m aanwezig zijn in de gehele meetreeks: 240, 270, 300 en 330 graden. Voor andere windrichtingen zijn geen situaties met hoge golven aanwezig in de dataset bij OS4. Voor de analyse is eerst een deelselectie gemaakt van de data: golfhoogtes groter dan 1.0 m en windsnelheden boven respectievelijk 10, 15, 20 en 23 m/s. Figuur 9 tot en met Figuur 12 bevatten de vergelijking tussen de gemodelleerde (horizontale as) en gemeten golfhoogte (verticale as) voor de vier windsectoren.

Uit de figuren volgt het volgende:

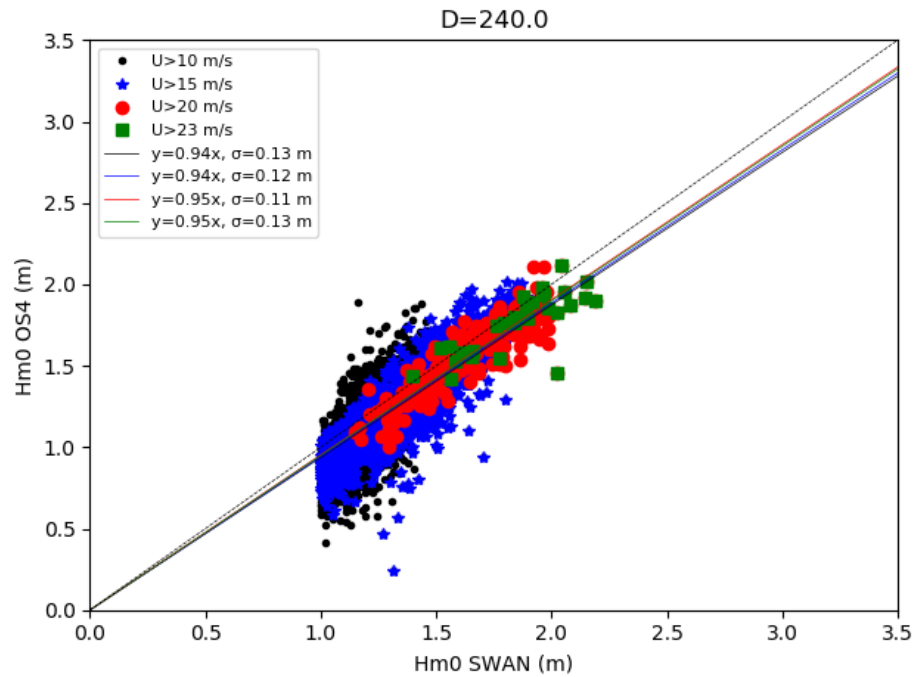
- Voor windrichting 240 graden overschat SWAN de metingen met 5-6% ( $a < 1$ ), afhankelijk van de ondergrens van de windsnelheid. Voor de andere windrichtingen is het verschil overwegend iets kleiner, maar de overschatting is structureel (alle  $a < 1$ ).
- Resultaten bij een windsnelheid boven 23 m/s zijn niet voor alle windrichtingen betrouwbaar vanwege een laag aantal datapunten.
- De standaardafwijking is aanzienlijk lager bij windrichting 240 graden ( $\sigma = 0.11$  m bij  $U > 20$  m/s) dan voor de andere windrichtingen ( $\sigma = 0.17$  m bij  $U > 20$  m/s).

Windrichting 240 vertoont dus ander gedrag dan 270-330 graden. De combinatie van stormvloed en hoge golven is vooral te verwachten bij noordwester storm. Daarom is het raadzaam om de beschrijving van modelonzekerheden alleen te baseren op de windrichtingen 270, 300 en 330 graden. Voor de meetdata betreft dit alle tijdstippen met een windrichting tussen 255 en 345 graden.

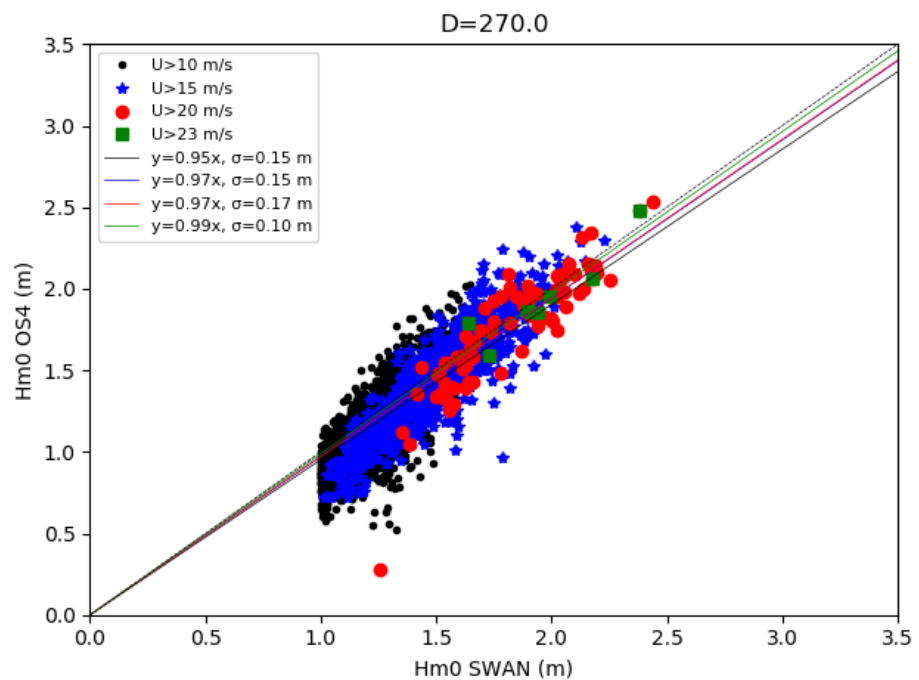
Deze drie windrichtingen zijn samengenomen in Figuur 13. Liefst baseren we de modelonzekerheden op zo hoog mogelijke windsnelheden, omdat deze condities het meest relevant zijn voor veiligheidsbeoordelingen. Voor de windsnelheid van 23 m/s zijn echter niet voor alle windrichtingen datapunten beschikbaar, waardoor de resultaten sterk gedomineerd zouden worden door westenwind. De keuze is daarom om alle modelonzekerheden te baseren op

de data bij windsnelheden hoger dan 20 m/s. Voor deze drie windrichtingen geldt gemiddeld dat er een biascorrectie van -5% nodig is ( $a=0.95$ , zie §3.6). De standaardafwijking is  $\sigma=0.17$  m. Deze getallen zijn nog iets kleiner dan gevonden door Suzuki et al. (2020) voor de Vlaamse kust, zie §2.3.

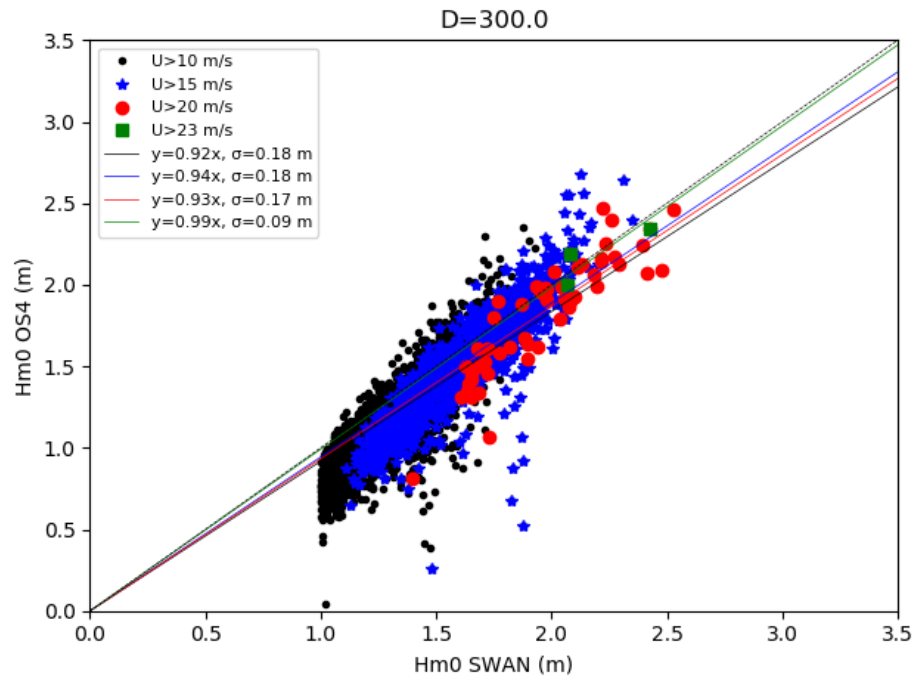
*Figuur 9  
De significante golf-  
hoogte volgens  
SWAN (horizontaal)  
ten opzichte van de  
metingen bij locatie  
Oosterschelde 4  
(verticaal) bij wind-  
richting 240 graden.*



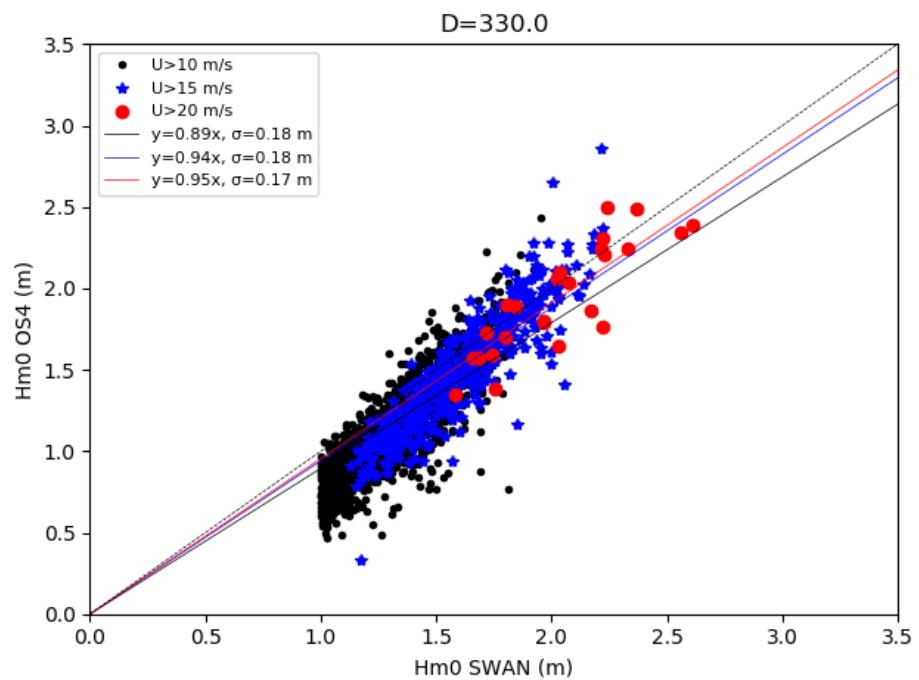
*Figuur 10  
De significante golf-  
hoogte volgens  
SWAN (horizontaal)  
ten opzichte van de  
metingen bij locatie  
Oosterschelde 4  
(verticaal) bij wind-  
richting 270 graden.*



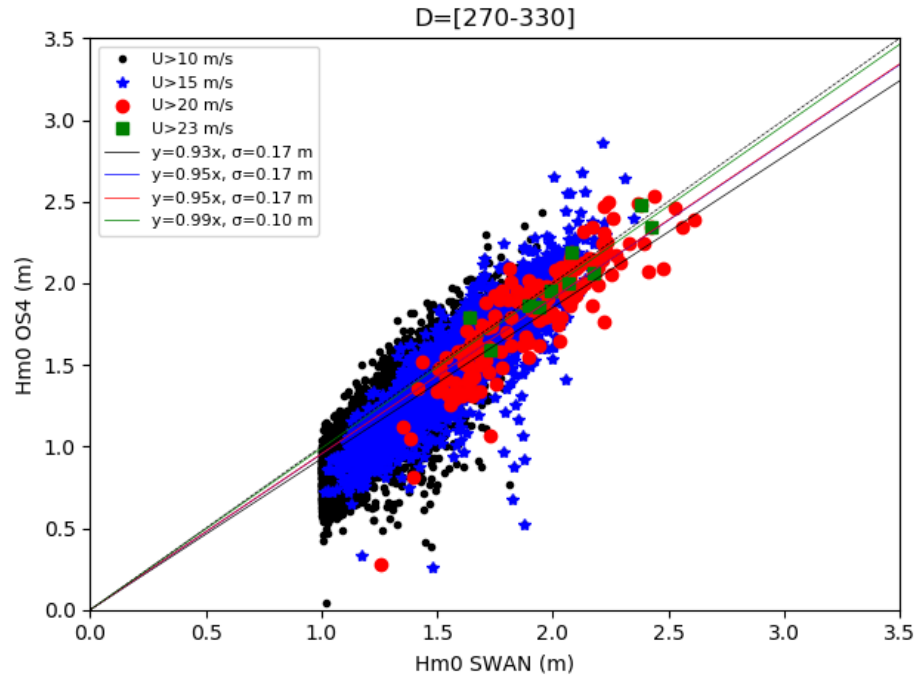
*Figuur 11  
De significante golf-  
hoogte volgens  
SWAN (horizontaal)  
ten opzichte van de  
metingen bij locatie  
Oosterschelde 4  
(verticaal) bij wind-  
richting 300 graden.*



*Figuur 12  
De significante golf-  
hoogte volgens  
SWAN (horizontaal)  
ten opzichte van de  
metingen bij locatie  
Oosterschelde 4  
(verticaal) bij wind-  
richting 330 graden.*

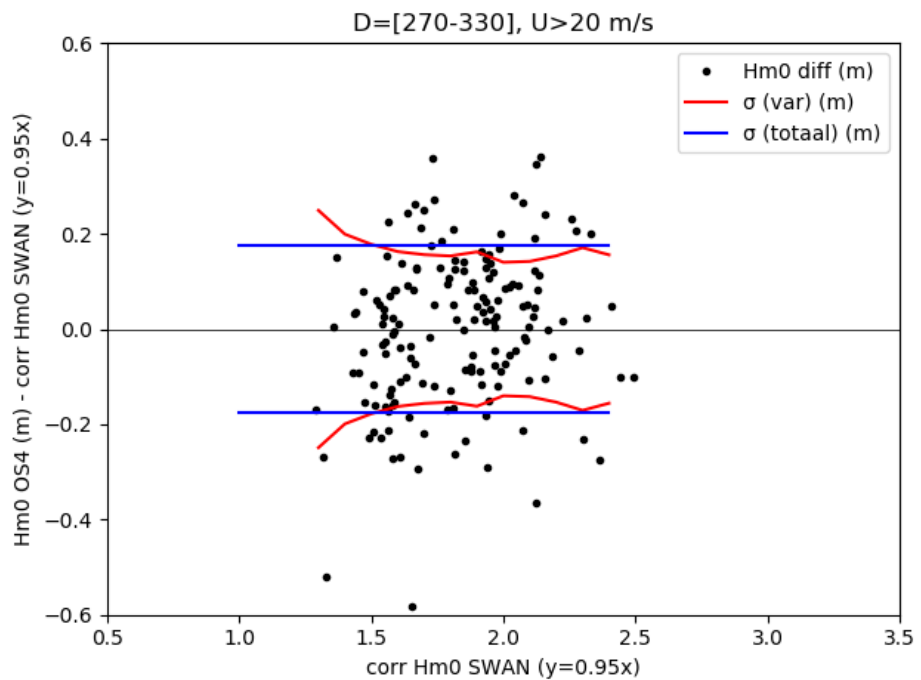


*Figuur 13  
De significante golf-  
hoogte volgens  
SWAN (horizontaal)  
ten opzichte van de  
metingen bij locatie  
Oosterschelde 4  
(verticaal) voor de  
windrichtingen 270  
tot en met 330 gra-  
den.*



Vervolgens is onderzocht hoe de standaardafwijking varieert met de grootte van de golfhoogte via de methode zoals beschreven in §3.6. Het resultaat is de rode lijn in Figuur 14 (windrichtingen 270-330, windsnelheid > 20 m/s). De afwijkingen tussen gemeten en gemodelleerde golven variëren sterker voor lage (1.0-1.5 m) dan voor hoge golfhoogtes (2.0-2.5 m). Binnen het bereik van de metingen is dus geen sprake van een multiplicatief karakter van de standaardafwijking ( $\sigma = a \cdot H_{m0}$ ), zoals standaard voor modelonzekerheden voor golven wordt voorgeschreven, zie §2.1. De standaardafwijking is vanaf ongeveer  $H_{m0} = 1.5$  m behoorlijk constant (van het karakter  $\sigma = a$ ).

*Figuur 14  
Verloop van de stan-  
daardafwijking als  
functie van de golf-  
hoogte bij locatie  
Oosterschelde 4  
voor windsnelheden  
groter dan 20 m/s  
en windrichtingen  
270-330 graden. De  
standaardafwijkin-  
gen zijn tweezijdig  
weergegeven.*





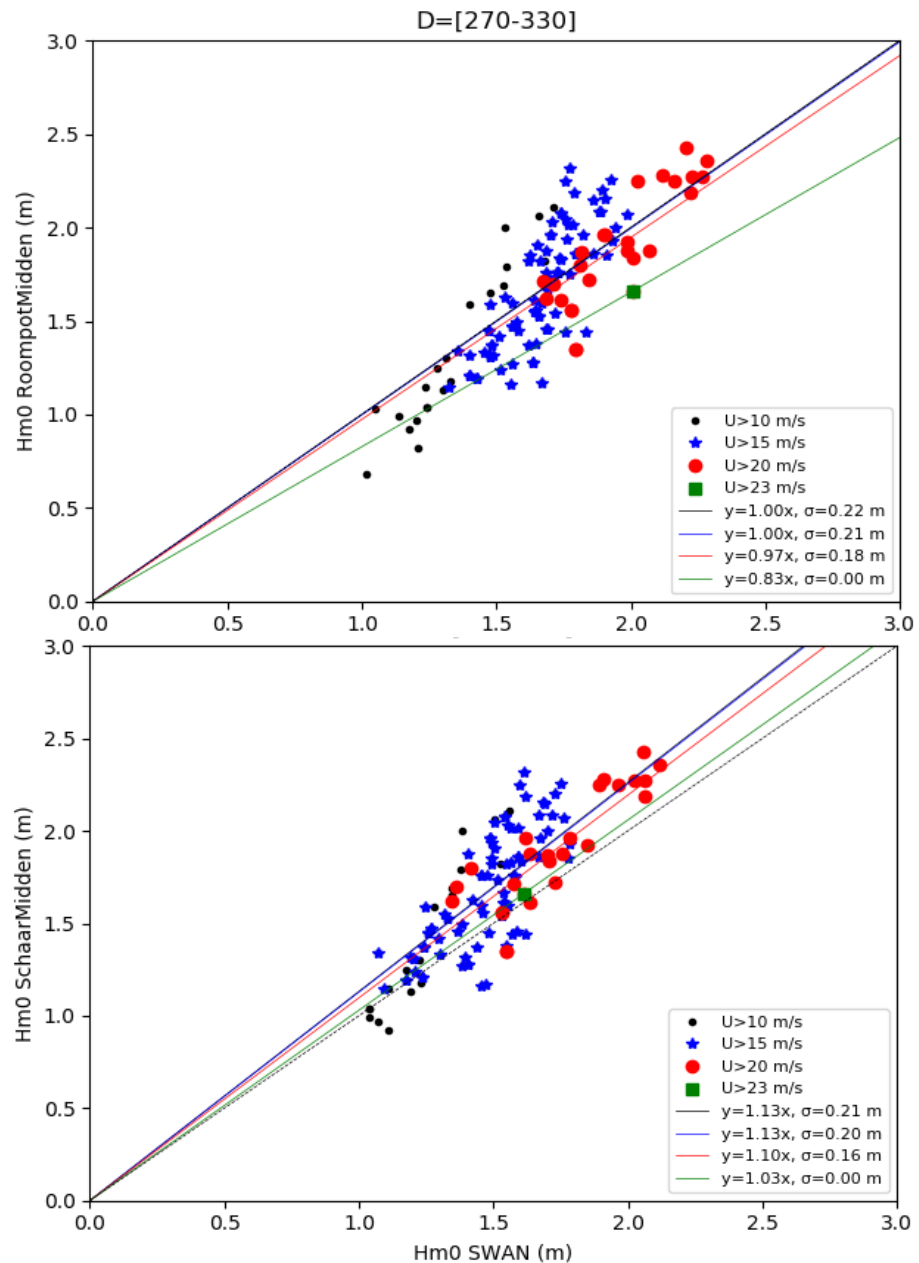
#### 4.1.2

#### Locaties Roompot-midden en Schaar-midden

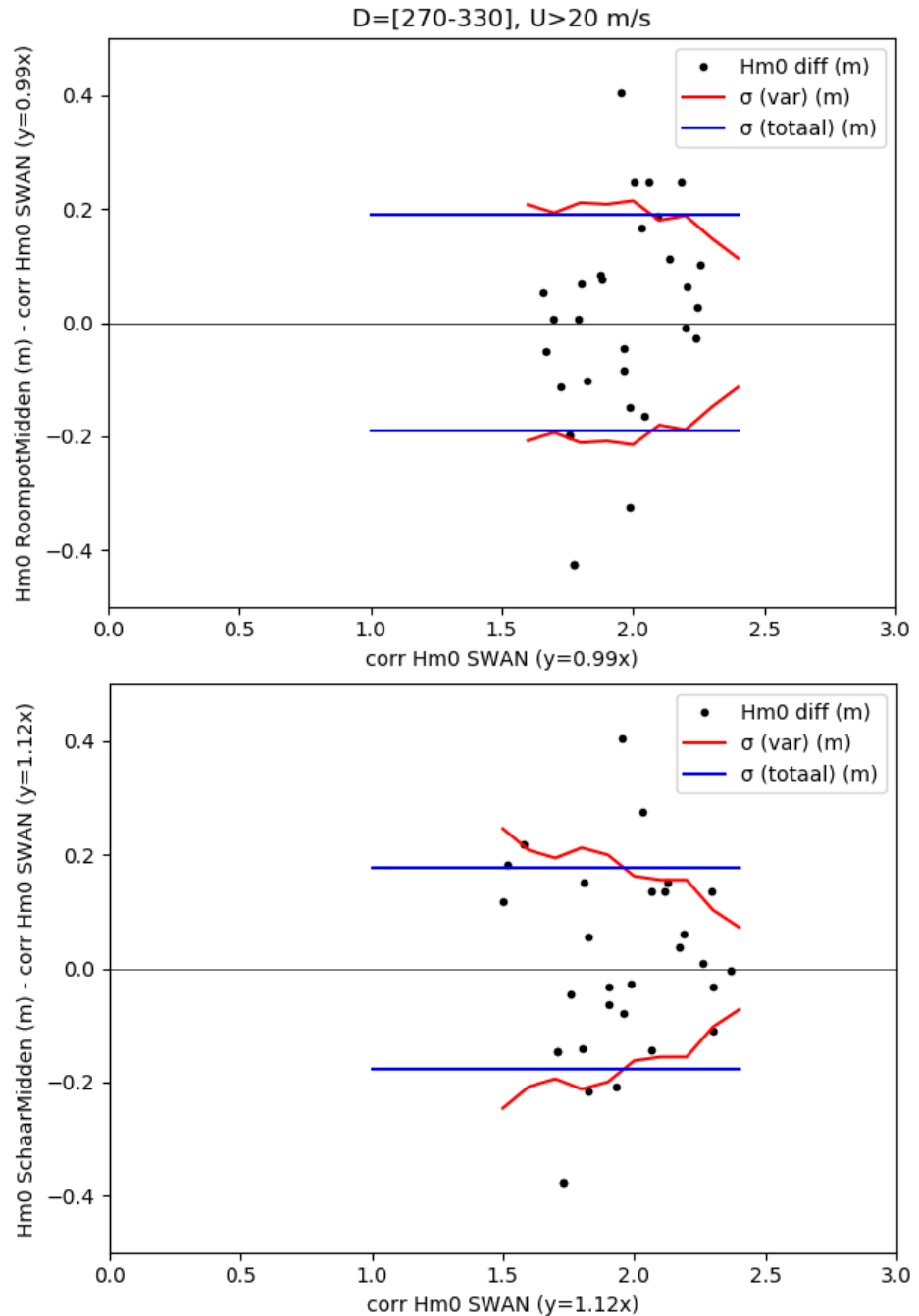
Voor de WAVEC-boeien in het midden van de geulen Roompot en Schaar van Roggenplaat is eenzelfde analyse uitgevoerd. Alle andere data (wind, waterstand, golvendatabase) is identiek. Voor het midden van de Roompot volgt een biascorrectie van 0.97 voor windsnelheden boven 20 m/s. Dit is in lijn met de waarde van 0.95, zoals gevonden voor locatie OS4. Voor het midden van de Schaar geldt een waarde van 1.10 voor windsnelheden boven 20 m/s.

De locaties OS4 en de WAVEC in de Schaar liggen vrij dicht bij elkaar, met dat verschil dat OS4 tegen de Roggenplaat aanligt, waar de WAVEC-boei in het midden van de Schaar was gepositioneerd. De standaardafwijking is voor beide boeien (0.18 en 0.16 m) vergelijkbaar met OS4 (0.17 m). Uit het verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte volgen geen andere conclusies dan voor locatie OS4. Het aantal metingen uit deze twee reeksen is ook relatief klein om daar solide conclusies uit te kunnen trekken.

*Figuur 15  
De significante golfhoogte volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen (verticaal) bij de WAVEC-boei in de Roompot (boven) en in de Schaar (onder) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.*



*Figuur 16  
Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte bij de WAVEC-boeien in de Roompot (boven) en Schaar (onder) voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.*



#### 4.1.3

#### Overige locaties binnen het modeldomein

Voor de overige meetlocaties binnen het modeldomein zijn figuren opgenomen in bijlage A.1.

Allereerst beschouwen we locatie Schouwenbank. Hier vergelijken we meetgegevens met de aan het model opgelegde randvoorwaarden (zie §3.1). De randvoorwaarden zijn namelijk gebaseerd op statistiek bij locatie Schouwenbank. Deze hebben dus niets van doen met de prestaties van SWAN, maar duiden aan hoe goed de randvoorwaarden passen bij de opgetreden golven tijdens werkelijke stormen. Uit Figuur A2 volgt een regressiecoëfficiënt van

0.87 bij locatie Schouwenbank. Dit houdt in dat de golfhoogte in de golfbrandvoorwaardenstatistiek binnen het meetbereik (10-25 m/s) gemiddeld ongeveer 13% hoger ligt dan in de metingen.

De bias en standaardafwijking voor alle meetlocaties in het modeldomein zijn samengevat in Tabel 6. Daaruit volgt dat SWAN hogere golven berekent dan gemeten op relatief diep water (Brouwershavense Gat, Domburger Rassen, Deurloo). Dit heeft een relatie met de relatief hoge golfbrandvoorwaarden die aan het model worden opgelegd. De locaties Oosterschelde 11 en Wielingen bevinden zich achter zandbanken. Bij Oosterschelde 11 ligt SWAN slechts 1% hoger dan de metingen, bij Wielingen is de overschatting door SWAN groter, namelijk 9%. Voor de locaties nabij de monding van de Westerschelde (Wielingen, Deurloo) geldt wel dat deze relatief dicht bij de modelrand liggen. Dit SWAN-model is eigenlijk niet bedoeld voor het berekenen van golven in dat gebied. Bij noordwestenwind is echter te verwachten dat schaduweffecten vanaf de randen een beperkte rol zullen spelen en de resultaten van SWAN ook in dit gebied van redelijke kwaliteit zullen zijn.

Evenals voor OS4 (Figuur 14) en beide WAVEC-boeien (Figuur 16) geldt ook voor de andere locaties binnen het modeldomein dat er binnen het bereik van de metingen geen toename zichtbaar is van de standaardafwijking naarmate de golfhoogte hoger wordt (Figuur A7 t/m Figuur A12). De standaardafwijking is wel groter op diep water dan op ondiep water (Wielingen, Oosterschelde 4, beide WAVEC-boeien). Op locaties waar de golven in absolute zin groter zijn, is ook de standaardafwijking groter.

*Tabel 6  
Bias en standaardafwijking voor de golfhoogte voor alle locaties in het modeldomein, voor windrichtingen 270-330 graden en windsnelheden boven 20 m/s.*

Locatie	$\mu H_{m0}$ (-)	$\sigma H_{m0}$ (m)
OS4 (§4.1.1)	0.95	0.17
RPT midden (§4.1.2)	0.97	0.18
SCH midden (§4.1.2)	1.10	0.16
BG2	0.93	0.61
OS11	0.99	0.52
DORA	0.86	0.53
DEUR	0.90	0.52
WIEL	0.91	0.35

## 4.2

## Golfspectra

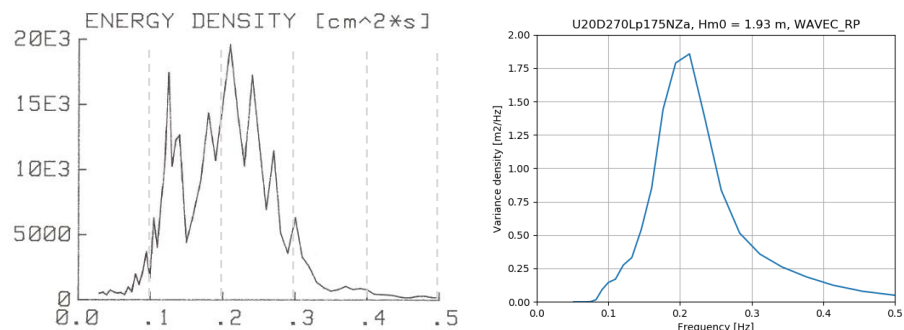
Deze paragraaf bevat enkele golfspectra uit de WAVEC-metingen uit Rijkswaterstaat Zeeland (1997) en legt daar golfspectra uit een vergelijkbare SWAN-berekening naast.

### 4.2.1

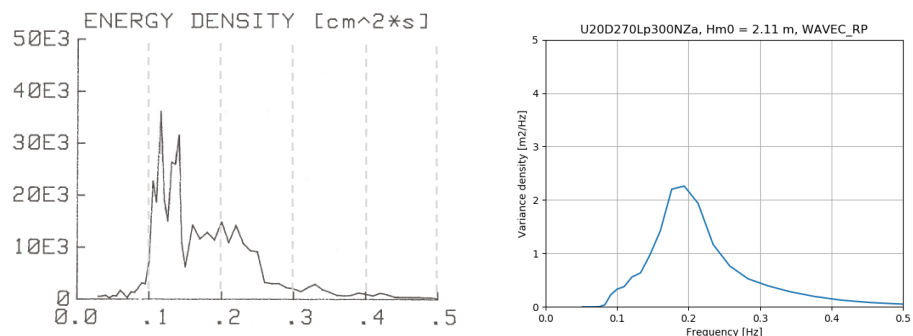
### Locatie Roompot-midden

Onderstaande golfspectra hebben betrekking op de storm van 28 februari 1990, 0.00-7.00 uur. De figuren links betreffen de WAVEC-metingen, de figuren rechts de SWAN-resultaten bij vergelijkbare condities.

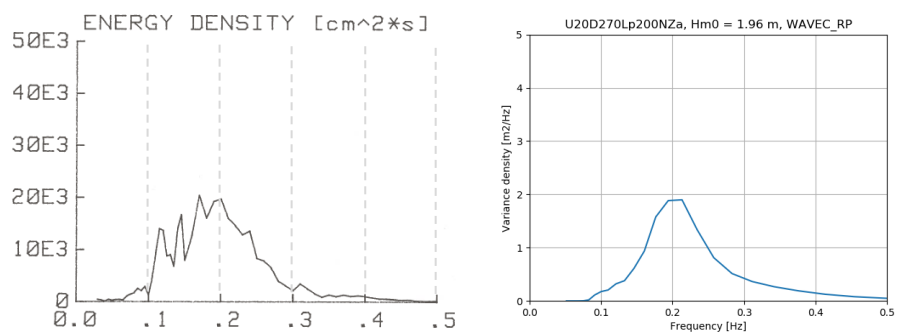
*Figuur 17*  
Gemeten golfspectrum (links) op 28 februari 1990 02:00,  $H_{m0}=1.94$  m,  $h=1.75$  m+NAP (SWAN: 1.75)



*Figuur 18*  
Gemeten golfspectrum (links) op 28 februari 1990 04:00,  $H_{m0}=2.09$  m,  $h=3.13$  m+NAP (SWAN: 3.00)



*Figuur 19*  
Gemeten golfspectrum (links) op 28 februari 1990 06:00,  $H_{m0}=2.05$  m,  $h=2.03$  m+NAP (SWAN: 2.00)



Tijdens de storm was de windrichting 272-280 graden en de windsnelheid 17.8-19.5 m/s (bij OS4). Ter vergelijking zijn de golfspectra uit de SWAN-berekeningen ernaast gezet bij een windrichting van 270 graden en een potentiële windsnelheid van 20 m/s. De totale golfhoogte komt goed overeen (verschil op deze 3 tijdstippen is -0.01, +0.02 en -0.09 m). In de metingen is echter sterkere deining aanwezig. Rond de piek van de waterstand (2.30-

5.30 uur) ligt de piekperiode zelfs bij de deining. In de SWAN-berekeningen is dit niet aan de orde. De deining is dan slechts zichtbaar als 'verdikking' van het windzeespectrum. De gemiddelde golfperiode neemt wel toe met de waterstand ( $T_{m-1,0}=4.35$  s bij 1.08 m+NAP en 4.91 s bij 3.13 m+NAP), maar het blijft een ééntoppig spectrum in de Roompot. Tweekoppige spectra zijn wel aanwezig in de SWAN-database, zie HKV (2021). Bij OS4 is sprake van tweekoppige spectra bij combinaties van noordwesten wind, lage windsnelheden en hoge waterstanden. Het lijkt er echter op dat deining in SWAN onvoldoende de kering bereikt en/of te sterk wordt gemengd met de windgolven door niet-lineaire golf-golfinteracties (triads en quadruplets), zie ook §4.4.

## 4.3 Spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$

Deze paragraaf bevat een vergelijking tussen de gemodelleerde en gemeten spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$ , eerst voor locatie OS4 en daarna voor overige locaties binnen het modeldomein. Voor de WAVEC-boeien is geen  $T_{m-1,0}$  aanwezig in de (papier) data.

### 4.3.1 Locatie Oosterschelde 4

Allereerst ligt opnieuw de focus op locatie Oosterschelde 4 (OS4), omdat dit de enige locatie is met een lange meetreeks dicht bij de OSK voor de windrichtingen 240, 270, 300 en 330 graden en tijdstippen met een golfhoogte groter dan 1.0 m en een windsnelheid boven respectievelijk 10, 15, 20 en 23 m/s. Figuur 20 tot en met Figuur 23 bevatten de vergelijking tussen de gemodelleerde (horizontale as) en gemeten spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$  (verticale as) voor de vier windsectoren.

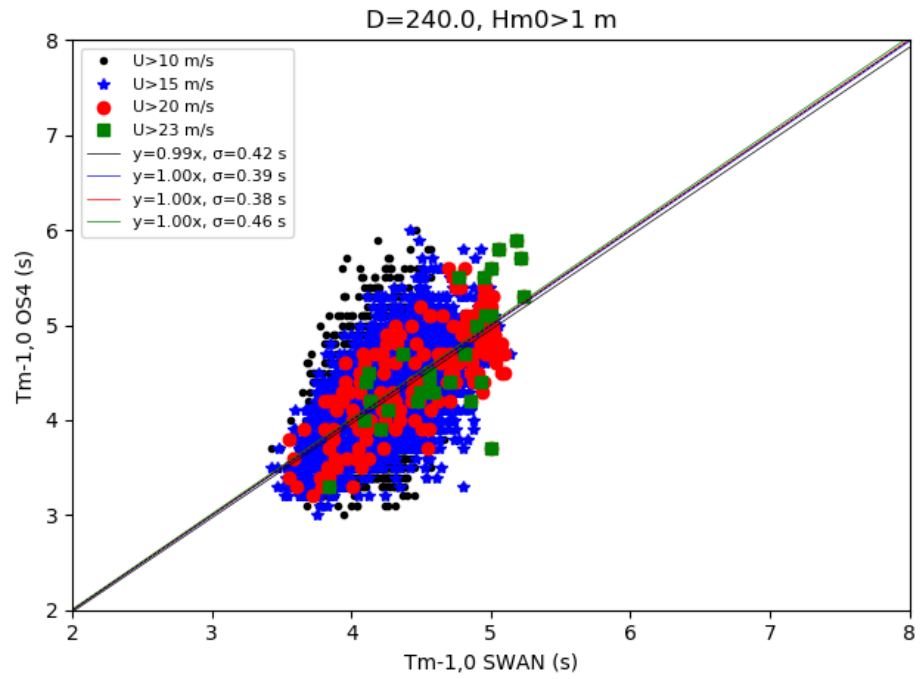
Uit de figuren volgt het volgende:

- Voor windrichting 240 graden is de golfperiode in SWAN gemiddeld genomen nagenoeg identiek aan de gemeten golfperiode ( $a \approx 1.0$ ). Voor de andere windrichtingen geldt dat de golfperiode gemiddeld met ongeveer 10% wordt onderschat door SWAN ( $a \approx 1.1$ ).
- Resultaten bij een windsnelheid boven 23 m/s zijn niet voor alle windrichtingen betrouwbaar vanwege een laag aantal datapunten.
- De standaardafwijking is het laagst bij 240 graden (0.38 s bij 20 m/s) en het grootst bij 300 en 330 graden (0.61-0.62 s bij 20 m/s). Hoe verder richting het noordwesten, hoe groter de standaardafwijking.

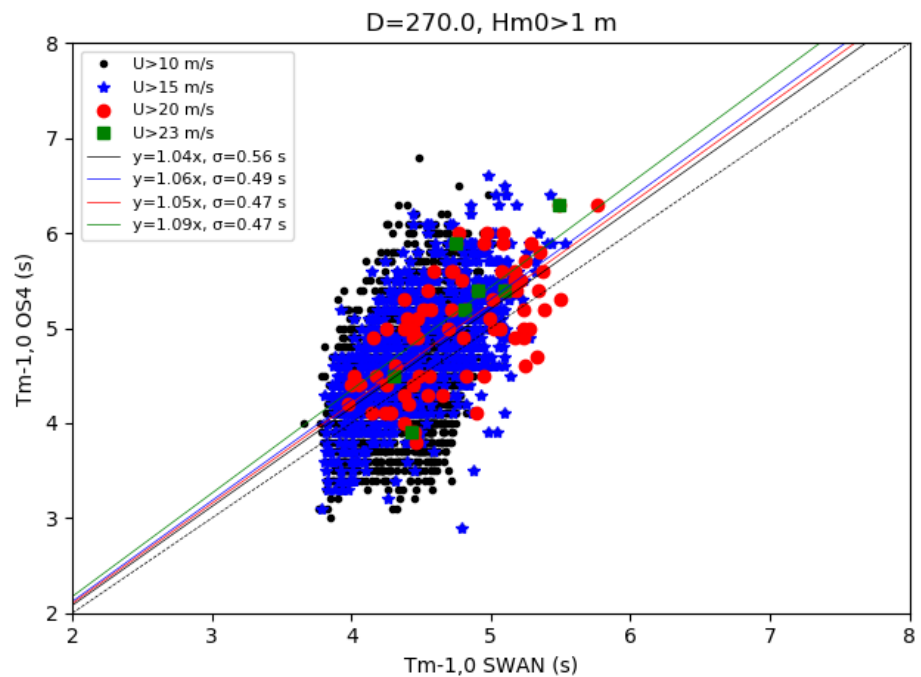
Windrichting 240 vertoont dus ander gedrag dan 300-330 graden, met 270 graden daar tussenin. De combinatie van stormvloed en hoge golven is vooral te verwachten bij noordwester storm. Daarom is het net als voor de golfhoogte (§4.1.1) raadzaam om de beschrijving van modelonzekerheden alleen te baseren op de windrichtingen 270, 300 en 330 graden. Voor de meetdata betreft dit alle tijdstippen met een windrichting tussen 255 en 345 graden.

Deze drie windrichtingen zijn samengenomen in Figuur 24. Zoals beargumentteerd in §4.1.1 baseren we de modelonzekerheden op de data voor een ondergrens van de windsnelheid van 20 m/s. Voor deze drie windrichtingen geldt gemiddeld dat er een biascorrectie van +7% nodig is ten opzichte van de golfperiode uit SWAN. De standaardafwijking is  $\sigma=0.55$  s.

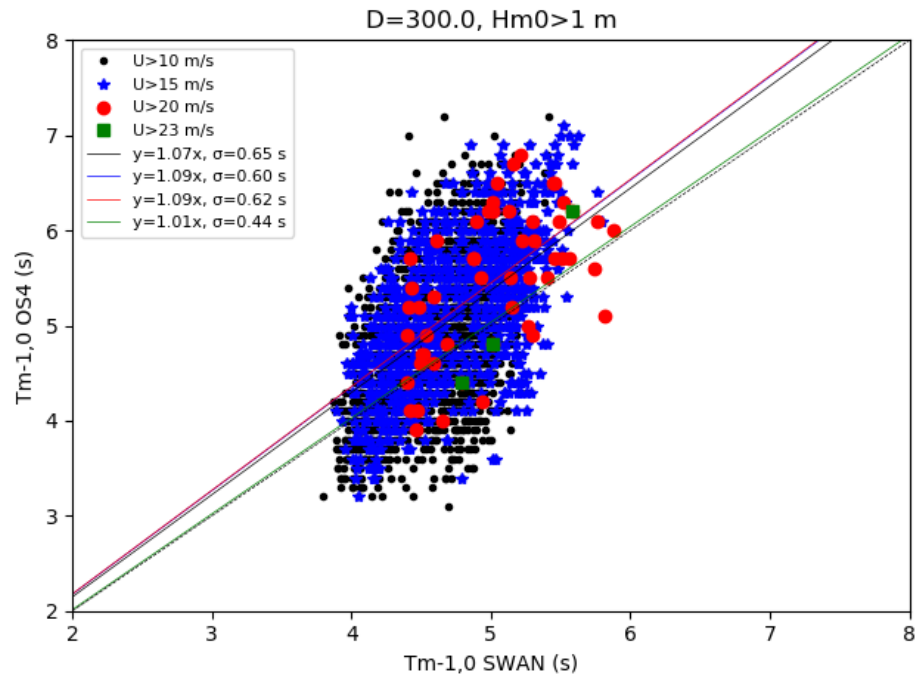
*Figuur 20  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie Oosterschelde 4 (verticaal) bij windrichting 240 graden*



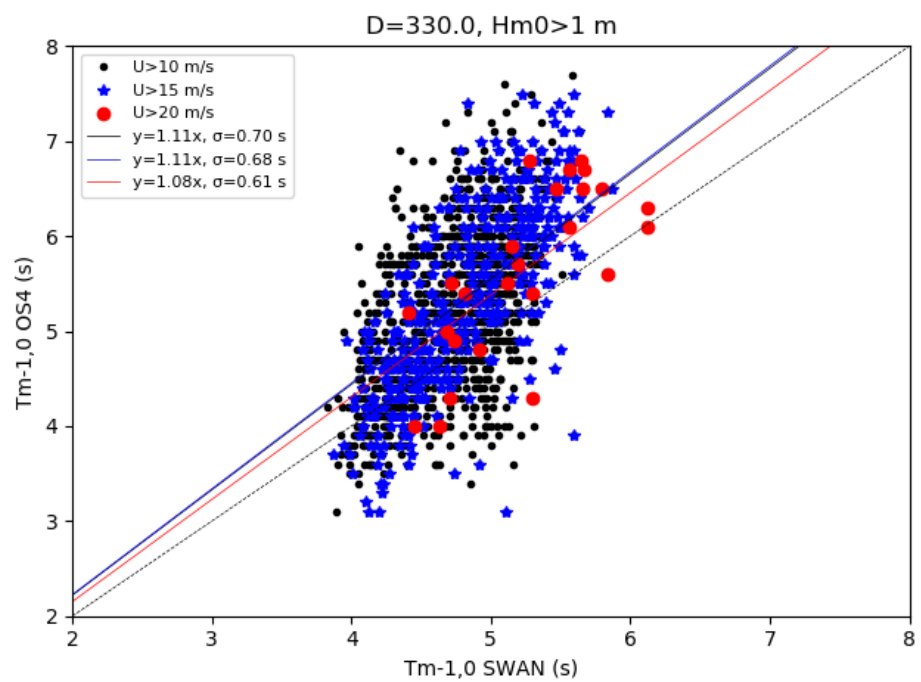
*Figuur 21  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie Oosterschelde 4 (verticaal) bij windrichting 270 graden*



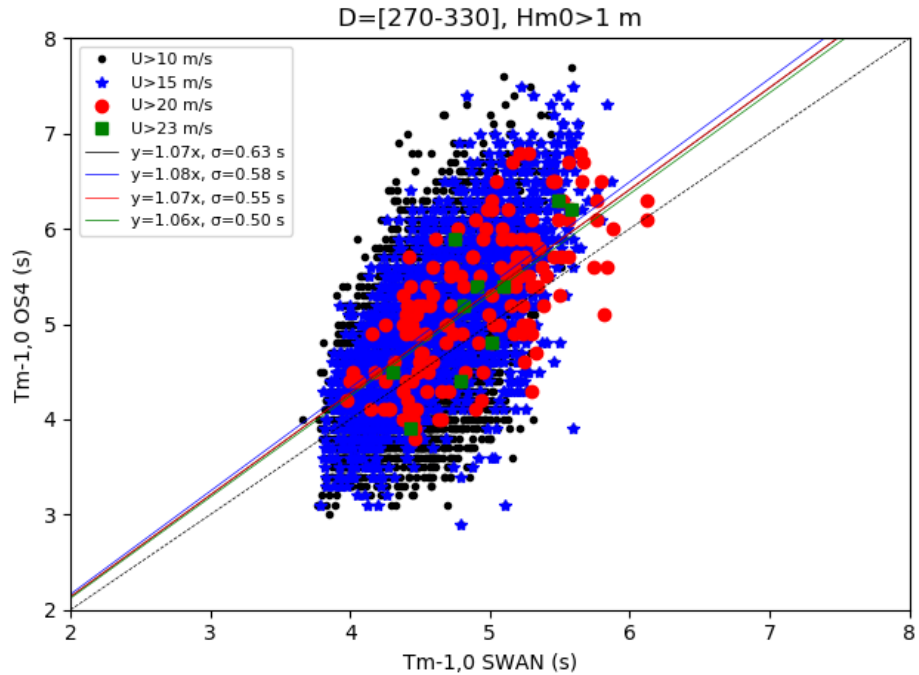
*Figuur 22*  
 De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie Oosterschelde 4 (verticaal) bij windrichting 300 graden



*Figuur 23*  
 De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie Oosterschelde 4 (verticaal) bij windrichting 330 graden

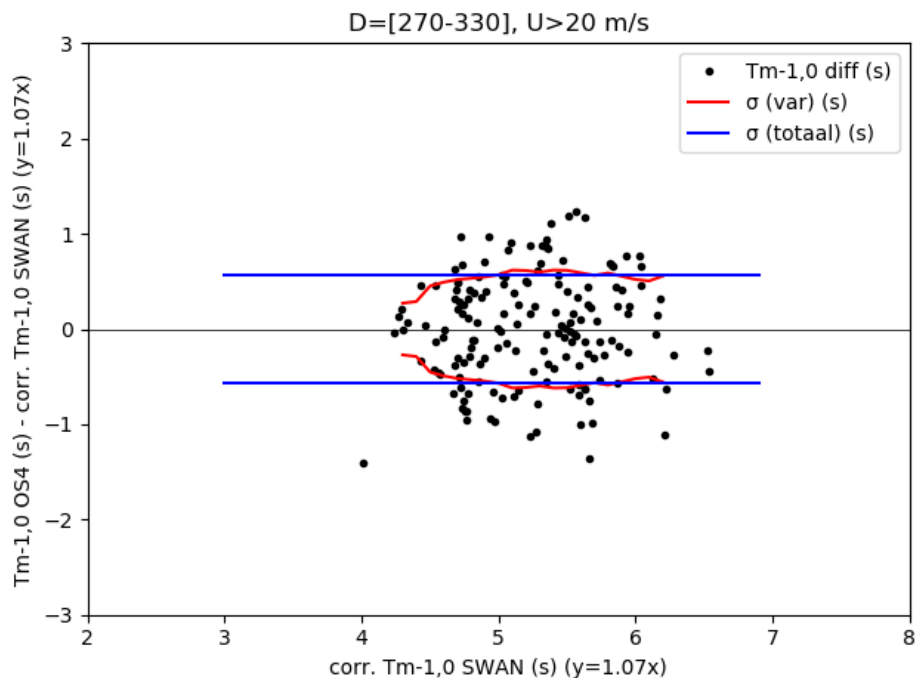


**Figuur 24**  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie Oosterschelde 4 (verticaal) voor windrichtingen 270-330 graden



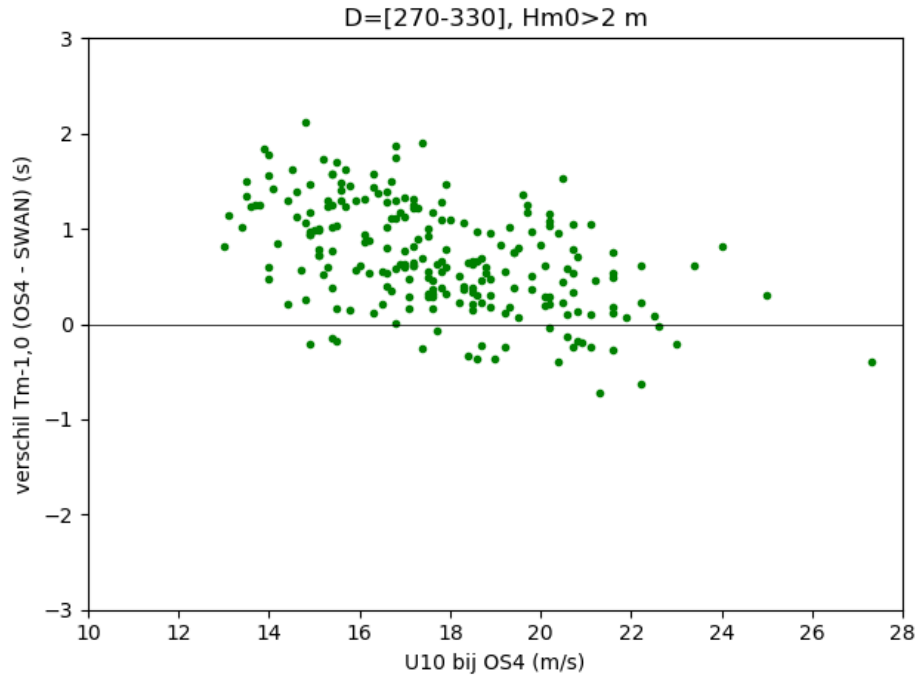
Evenals voor de golfhoogte is binnen het bereik van de metingen geen multiplicatief karakter zichtbaar voor de standaardafwijking als functie van de golfperiode (zie Figuur 25). De gemeten golfperiode wordt namelijk steeds beter gereproduceerd door SWAN naarmate de windsnelheid toeneemt (zie Figuur 26). SWAN is in algemene zin beter in staat om spectra te reproduceren die gedomineerd worden door lokale wind dan door deining. Het gedrag uit Figuur 26 bevestigt dit.

**Figuur 25**  
Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode bij locatie Oosterschelde 4 voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.





*Figuur 26  
Verschil tussen de  
gemodelleerde en  
gemeten golfperi-  
ode, uitgezet tegen  
de windsnelheid op  
dat moment*



#### 4.3.2

#### Overige locaties binnen het modeldomein

Voor de overige meetlocaties binnen het modeldomein zijn figuren opgenomen in bijlage A.1.

Allereerst beschouwen we locatie Schouwenbank. Hier vergelijken we meetgegevens met de aan het model opgelegde randvoorwaarden. De randvoorwaarden zijn namelijk gebaseerd op statistiek bij locatie Schouwenbank. Deze hebben dus niets van doen met de prestaties van SWAN, maar duiden aan hoe goed de golfrandvoorwaardenstatistiek past bij de opgetreden golven tijdens werkelijke stormen. Uit Figuur A14 volgt een regressiecoëfficiënt van ongeveer 0.92 bij locatie Schouwenbank. Dit houdt in dat de golfperiode in de randvoorwaarden ongeveer 8% hoger is dan gemeten.

De bias en standaardafwijking voor alle meetlocaties in het modeldomein zijn samengevat in Tabel 7. Daaruit volgt dat de overeenkomst in golfperiode tussen SWAN en metingen gemiddeld genomen zeer goed is op relatief diep water (Brouwershavense Gat, Domburger Rassen, Deurloo), met onderschattingen van 0 tot 1%. De overschatting van de golfperiode bij de randvoorwaarden (Schouwenbank) is bij deze drie locaties aan de buitenrand van de buitendelta dus al verdwenen. De locaties Oosterschelde 11 en Wielingen bevinden zich achter zandbanken. Bij Oosterschelde 11 is sprake van een lichte onderschatting door het model t.o.v. de metingen (4%), bij Wielingen is de onderschatting groter (11%).

Voor de standaardafwijking is te zien dat deze overal in het modeldomein ongeveer even groot is (0.55-0.68 s), ongeacht de waterdiepte. Evenals voor OS4 (Figuur 25) geldt ook voor de andere locaties binnen het modeldomein dat er binnen het bereik van de metingen geen toename zichtbaar is van de

standaardafwijking naarmate de golfperiode groter wordt (Figuur A19 t/m Figuur A24).

*Tabel 7  
Bias en standaardafwijking voor de golfhoogte voor alle locaties in het modeldomein, voor windrichtingen 270-330 graden en windsnelheden boven 20 m/s.*

Locatie	$\mu T_{m-1,0}$ (-)	$\sigma T_{m-1,0}$ (s)
OS4 (§4.3.1)	1.07	0.55
BG2	1.01	0.68
OS11	1.04	0.67
DORA	1.00	0.66
DEUR	1.00	0.64
WIEL	1.11	0.55

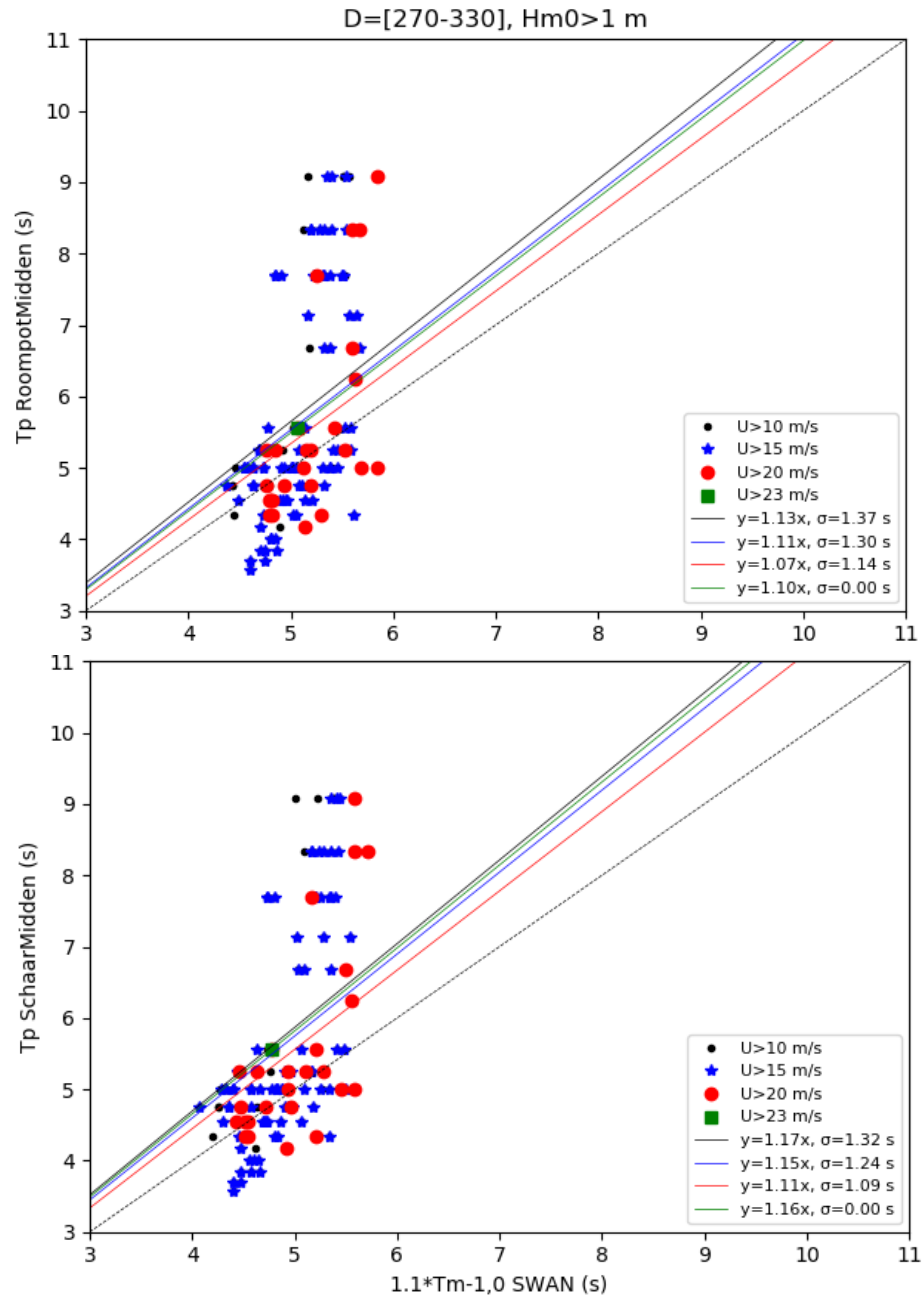
## 4.4

### Piekperiode $T_p$

Voor de WAVEC-boeien is  $T_{m-1,0}$  niet beschikbaar. Daarom geven we een vergelijking voor de piekperiode  $T_p$ . Het is niet het doel om een modelonzekerheid voor  $T_p$  af te leiden, maar een beschouwing van deze golfperiode in de WAVEC-data kan nuttige inzichten opleveren. De periodemaat  $T_p$  ontbreekt echter weer in de database (zie HKV (2021) voor de reden). Daarom schatten we voor SWAN de piekperiode uit  $T_{m-1,0}$  via  $T_p = 1.1 * T_{m-1,0}$ . Deze schatting voor de piekperiode vergelijken we met de gemeten piekperiode bij de WAVEC-boeien, zie Figuur 27 voor beide boeien.

In de figuren zijn twee clusters punten te zien: een cluster met een behoorlijk goede overeenkomst tussen model en metingen en een cluster waarbij de gemeten piekperiode veel groter is dan de waarde op basis van 1.1 keer de gemodelleerde  $T_{m-1,0}$ . Voor het eerste cluster geldt dat vooral in de Roompot sprake is van iets hogere waarden in SWAN dan in de metingen. In de Schaar liggen de punten rond de 1:1-lijn. Het tweede cluster betreft golfspectra waarbij de piekperiode in de metingen op de deiningspiek ligt, zoals in Figuur 18. In §4.2.1 is al de hypothese opgeworpen dat deining onvoldoende goed de kering kan bereiken in SWAN. Golf-gerelateerd bezwijken van de OSK zal in principe alleen optreden bij een extreem hoge lokale windsnelheid. Onder zulke omstandigheden is niet te verwachten dat de deiningspiek bepalend is voor de piekperiode.

**Figuur 27**  
 De piekperiode op basis van de spectrale golfperiode in SWAN (horizontaal) ten opzichte van de gemeten Piekperiode (verticaal) bij de **WAVEC-boeien in de Roompot** (boven) en de **Schaar** (onder) voor windrichtingen 270-330 graden



## 4.5

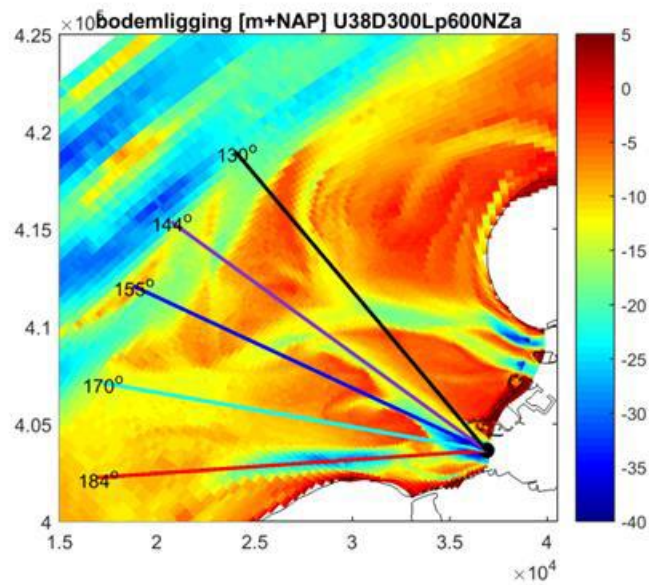
### Maximale golfhoogte $H_{max}$

Deltares (2018) heeft een studie uitgevoerd naar de maximale golfhoogte die op kan treden bij de Oosterscheldekering. Dit betreft de hoogte van de hoogste individuele golf in een tijdreeks, gegeven een bepaalde significante golfhoogte  $H_s$  (dat is: het gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van de golven, dus  $H_s = H_{1/3}$ ).

In Deltares (2018) is aanbevolen om een Rayleigh-verdeling aan te houden voor de golfhoogteverdeling. Dit resulteert, gegeven een aangenomen tijdsduur van de piek van de belastingen van 3 uur, in een maximale golfhoogte

$H_{\max}=1.94 \cdot H_s$ . Een Rayleigh-verdeling is van toepassing op golven op diep water, zonder het effect van breking van de hoogste individuele golven. Voor ondiep water zijn andere golfhoogteverdelingen ontwikkeld, zoals die van Battjes-Groenendijk of de WGP-verdeling. Met deze verdelingen is het mogelijk om in rekening te brengen dat golven breken op de ondiepe buitendelta, met zandbanken op NAP-5 m. Uit een Battjes-Groenendijk-verdeling volgt een verhouding van  $H_{\max}/H_s$  van 1.53-1.73. De redenering in Deltares (2018) is echter dat niet uit te sluiten valt dat golven via de geulen de Oosterschelde bereiken. Op basis van de lokale diepte in de Roompot is daarom toch geadviseerd om uit te gaan van een Rayleigh-verdeling.

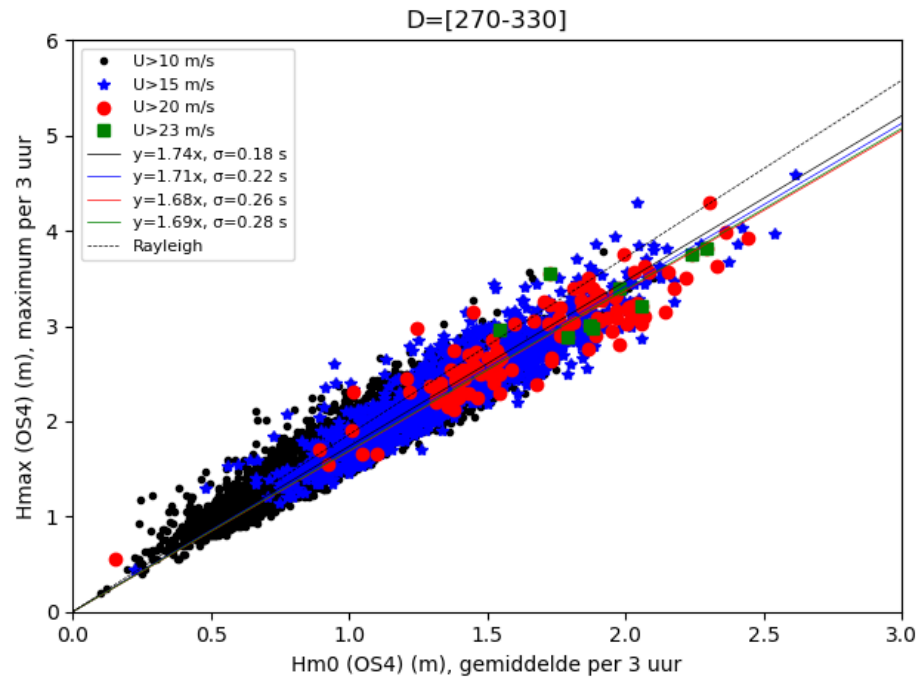
*Figuur 28  
Bodemligging in de  
buitendelta van de  
Oosterschelde. Bron:  
Deltares (2018).*



In theorie (eveneens voor diep water) geldt tussen de significante golfhoogte in het tijdsdomein  $H_s$  en de significante golfhoogte in het spectrale domein  $H_{m0}$  een verhouding van  $H_s/H_{m0}=3.85/4.00=0.96$  (Rijkswaterstaat Zee en Delta, 2017). Combinatie van 1.94 en 0.96 levert  $H_{\max}=1.86 \cdot H_{m0}$ .

Figuur 29 toont voor metingen bij locatie OS4 de verhouding tussen de maximale golfhoogte en significante golfhoogte, afhankelijk van de windsnelheid. Hier is de gemiddelde  $H_{m0}$  per periode van 3 uur uitgezet tegen de maximale  $H_{\max}$  over elke periode van 3 uur. De verhouding daalt naarmate de windsnelheid (en daarmee de golfhoogte) toeneemt. De bodem heeft meer invloed op hogere golven. Voor de data bij OS4 geldt gemiddeld voor de noordwestelijke windrichtingen en windsnelheden boven 20 m/s dat  $H_{\max}=1.68 \cdot H_{m0}$ . Deze verhouding ligt in het bereik van de verdeling van Battjes-Groenendijk (1.53-1.73). De Rayleigh-verdeling ligt ongeveer 11% hoger dan de gemiddelde verhouding in de data tijdens stormen (>20 m/s). De Rayleigh-verdeling is dus een conservatieve keuze. Daarmee wordt impliciet rekening gehouden met de spreiding die in de verhouding tussen  $H_{m0}$  en  $H_{\max}$  aanwezig is.

*Figuur 29  
Verhouding tussen de maximale golfhoogte  $H_{max}$  en spectrale significante golfhoogte  $H_{m0}$  bij locatie OS4 voor een tijdsduur van 3 uur, in vergelijking met een Rayleigh verdeling bij dezelfde tijdsduur (gestreepte lijn).*



## 4.6

### Golfperiode $T_{H_{max}}$ bij maximale golfhoogte

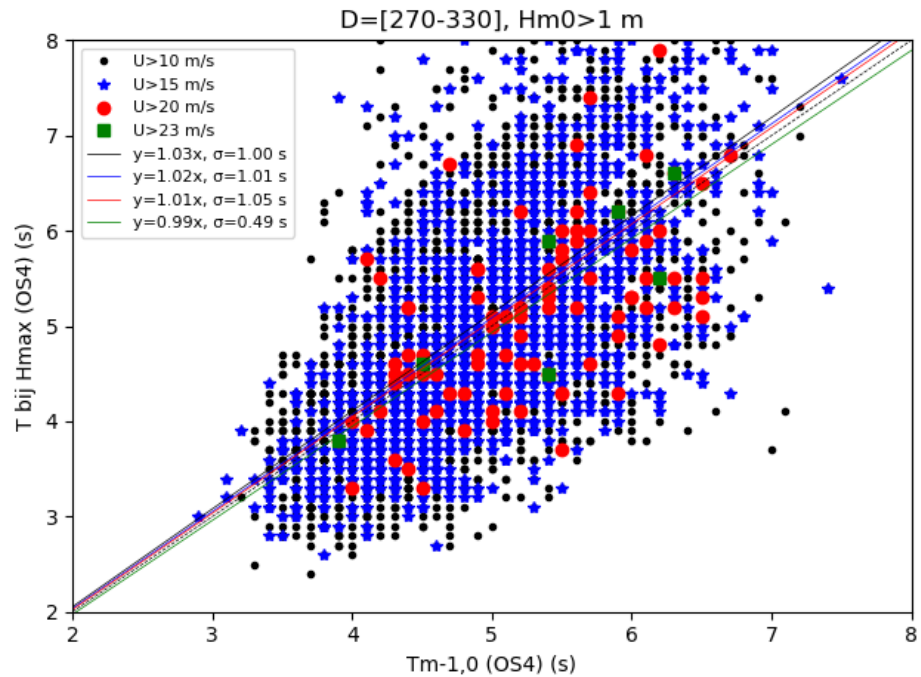
De maximale golfhoogte dient voor bepaalde faalmechanismen gecombineerd te worden met een bepaalde golfperiode, die we aanduiden als  $T_{H_{max}}$ . Deze golfperiode is inherent een sterk variabele parameter omdat het geen statistische maat is, maar één realisatie uit een stochastisch proces in het tijdsdomein.

Uit Figuur 30 volgt dat in de meetdata van Oosterschelde 4 de golfperiode  $T_{H_{max}}$  gemiddeld genomen sterke gelijkens vertoont met de spectrale golfperiode:  $T_{H_{max}} = 1.01 * T_{m-1,0}$ .

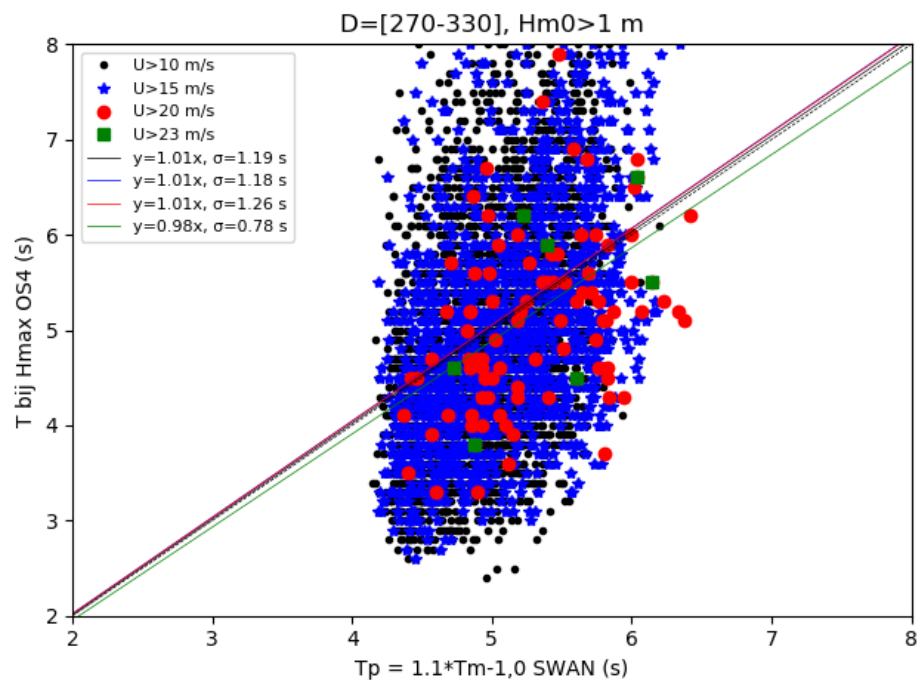
In Figuur 31 is (ten opzichte van Figuur 30) de golfperiode op de horizontale as vervangen door een inschatting van de piekperiode op basis van SWAN, waarbij  $T_p = 1.01 * T_{m-1,0}$  (onder de aanname van een JONSWAP-spectrum). Uit die figuur blijkt dat  $T_p$  gemiddeld genomen een goede benadering is voor  $T_{H_{max}}$ . In deze  $T_p$  is echter nog geen biascorrectie op  $T_{m-1,0}$  toegepast. Uit Figuur 24 volgt dat deze 1.07 is. De regressiecoëfficiënt tussen  $T_{H_{max}}$  en  $T_p$  verschuift daardoor ongeveer van 1.01 naar  $1.01/1.07 = 0.94$ .

De golfperiode  $T_{H_{max}}$  kan dus worden berekend als  $0.94 * T_p$ , ná verdisconten van de biascorrectie in  $T_{m-1,0}$ . Gelijkstellen van  $T_{H_{max}}$  aan  $T_p$  is dan een goede benadering. Fysisch genomen betekent dit dat het meest waarschijnlijke geval is dat de maximale golfhoogte optreedt in combinatie met de piekperiode. Geen verrassende conclusie, aangezien de meeste golfenergie aanwezig is rond de piekperiode. Het is dus (gemiddeld genomen) niet het geval dat de hoogste golf ook een relatief lange golf is. Het is vooral een golf met een grote steilheid.

*Figuur 30  
De golfperiode van de golf met de maximale golfhoogte (verticaal), uitgezet tegen de gemeten spectrale golfperiode (horizontaal) bij OS4 voor windrichtingen 270-330 graden.*



*Figuur 31  
De golfperiode van de golf met de maximale golfhoogte (verticaal), uitgezet tegen de piekperiode op basis van SWAN (horizontaal) bij OS4 voor windrichtingen 270-330 graden.*



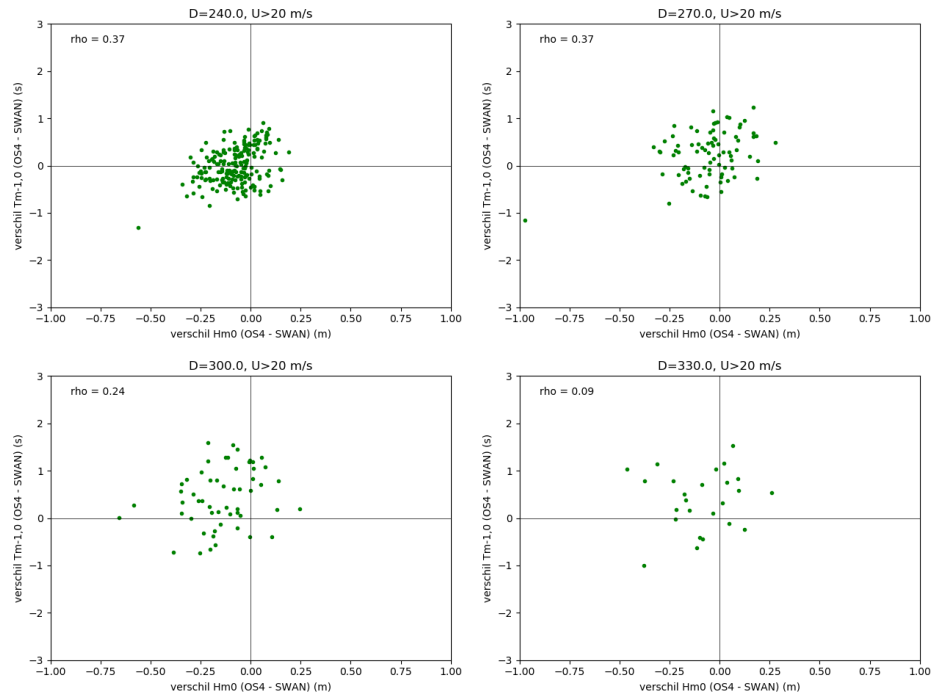
## 4.7

### Correlatie tussen modelonzekerheden

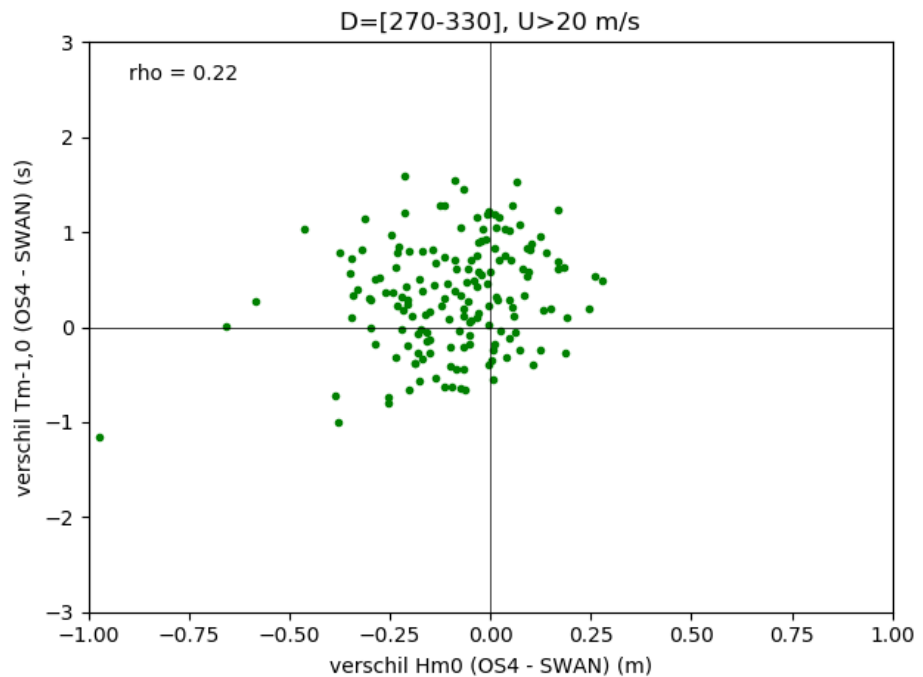
In deze paragraaf staat de correlatie tussen modelonzekerheden centraal. Dit is het verschil tussen observaties en predicties (zie §3.6) voor de golfhoogte ten opzichte van het verschil tussen observaties en predicties voor de golfperiode. Het gaat dus niet om de correlatie tussen de golfhoogte en de golfperiode (die is relatief sterk), maar om de correlatie tussen de afwijkingen (model ten opzichte van metingen).

In Figuur 32 zijn de verschillen tegen elkaar uitgezet voor de windrichtingen 240 tot en met 330 graden. De correlatiecoëfficiënt varieert van 0.09 tot 0.37. Vanwege consistentie focussen we opnieuw op de samengevoegde data voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden en windsnelheden boven 20 m/s. De bijbehorende correlatiecoëfficiënt is 0.22, zie Figuur 33. Dit is iets lager dan de in Deltares (2018) geadviseerde waarde van 0.37, zie §2.1.

*Figuur 32  
Correlatie tussen  
modelonzekerheden  
voor de golfhoogte  
(horizontaal) en  
golfperiode (verti-  
caal) voor diverse  
windrichtingen.*



*Figuur 33  
Correlatie tussen  
modelonzekerheden  
voor de golfhoogte  
(horizontaal) en  
golfperiode (verti-  
caal) voor de wind-  
richtingen 270-330  
graden.*

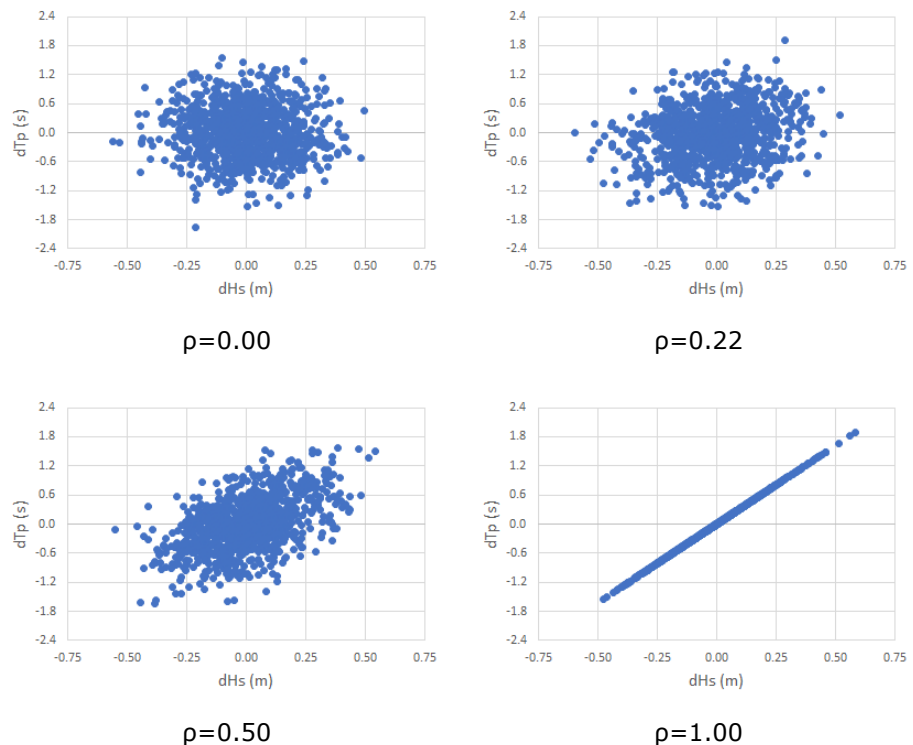


Om een beter beeld te krijgen van de invloed van de correlatiecoëfficiënt is een Monte Carlo simulatie uitgevoerd (10000 samples), waarmee gecorreleerde paren van afwijkingen in de golfhoogte en golfperiode zijn getrokken. Het resultaat is te vinden in Figuur 34 in algemene termen van twee gemiddelde waarden  $\mu$  en twee standaardafwijkingen  $\sigma$ . In Figuur 35 zijn deze getallen gecombineerd met de werkelijke standaardafwijkingen voor de golfhoogte ( $\sigma=0.17$  m) en golfperiode ( $\sigma=0.55$  s).

*Figuur 34  
Gezamenlijke kansdichtheid bij verschillende correlatiecoëfficiënten*

		waarde	$\mu-2\sigma$	$\mu-1\sigma$	$\mu$	$\mu+1\sigma$	$\mu+2\sigma$
		interval	$[-inf -1.5\sigma]$	$[-1.5\sigma -0.5\sigma]$	$[-0.5\sigma 0.5\sigma]$	$[0.5\sigma 1.5\sigma]$	$[1.5\sigma inf]$
<b><math>\rho = 0.00</math></b>	$\mu+2\sigma$	$[1.5\sigma inf]$	0.6%	1.4%	2.3%	1.7%	0.4%
	$\mu+1\sigma$	$[0.5\sigma 1.5\sigma]$	1.5%	5.6%	9.6%	6.4%	1.3%
	$\mu$	$[-0.5\sigma 0.5\sigma]$	2.7%	9.1%	14.8%	9.3%	2.6%
	$\mu-1\sigma$	$[-1.5\sigma -0.5\sigma]$	1.6%	5.8%	9.1%	5.8%	1.6%
	$\mu-2\sigma$	$[-inf -1.5\sigma]$	0.5%	1.7%	2.8%	1.5%	0.4%
<b><math>\rho = 0.22</math></b>	$\mu+2\sigma$	$[1.5\sigma inf]$	0.2%	0.9%	2.4%	2.5%	1.0%
	$\mu+1\sigma$	$[0.5\sigma 1.5\sigma]$	1.1%	4.4%	8.8%	6.9%	2.2%
	$\mu$	$[-0.5\sigma 0.5\sigma]$	2.7%	9.7%	14.2%	9.4%	2.3%
	$\mu-1\sigma$	$[-1.5\sigma -0.5\sigma]$	2.3%	6.9%	10.0%	4.7%	1.0%
	$\mu-2\sigma$	$[-inf -1.5\sigma]$	0.9%	1.9%	2.6%	1.0%	0.2%
<b><math>\rho = 0.50</math></b>	$\mu+2\sigma$	$[1.5\sigma inf]$	0.0%	0.3%	1.6%	2.8%	1.8%
	$\mu+1\sigma$	$[0.5\sigma 1.5\sigma]$	0.4%	2.8%	9.0%	8.8%	3.0%
	$\mu$	$[-0.5\sigma 0.5\sigma]$	1.6%	9.0%	16.8%	9.0%	2.0%
	$\mu-1\sigma$	$[-1.5\sigma -0.5\sigma]$	2.9%	9.5%	9.1%	2.9%	0.2%
	$\mu-2\sigma$	$[-inf -1.5\sigma]$	1.9%	2.7%	1.6%	0.3%	0.0%
<b><math>\rho = 1.00</math></b>	$\mu+2\sigma$	$[1.5\sigma inf]$	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.2%
	$\mu+1\sigma$	$[0.5\sigma 1.5\sigma]$	0.0%	0.0%	0.0%	24.5%	0.0%
	$\mu$	$[-0.5\sigma 0.5\sigma]$	0.0%	0.0%	37.9%	0.0%	0.0%
	$\mu-1\sigma$	$[-1.5\sigma -0.5\sigma]$	0.0%	24.7%	0.0%	0.0%	0.0%
	$\mu-2\sigma$	$[-inf -1.5\sigma]$	6.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

*Figuur 35  
Monte Carlo simulatie van paren van modelonzekerheden bij diverse correlatiecoëfficiënten*





Een waarde  $\rho=0.22$  duidt op een zwakke positieve correlatie. Er is een groot verschil tussen zwakke correlatie en volledige correlatie ( $\rho=1.00$ ). Anderzijds hebben extreme combinaties zoals  $[X_1 > \mu_1 + 1.5\sigma_1, X_2 > \mu_2 + 1.5\sigma_2]$  een kans van 1.0% met  $\rho=0.22$  en slechts 0.4% met  $\rho=0.00$ . In het ongecorrleerde geval is er daarnaast een kans op combinaties die tot onrealistische golfsteilheden kunnen leiden, waar deze kans met enige correlatie veel kleiner wordt. Daarom is het aan te raden om de partiële correlatie te verdisconteren, en de correlatiestructuur niet te vereenvoudigen tot volledige onafhankelijkheid of volledige afhankelijkheid.



## 5 Discussie en conclusies

### 5.1 Geselecteerde golfdata

De analyses in het voorgaande hoofdstuk laten zien dat meetlocatie Oosterschelde 4 (OS4) een representatief beeld geeft van de prestaties van SWAN nabij de OSK. De meetreeks bij die locatie is relatief lang en bevat daardoor stormen bij uiteenlopende waterstanden, windsnelheden en windrichtingen. De data voor andere meetlocaties nabij de kering, zoals de tijdelijk aanwezige WAVEC-boeien (§4.1.2), bevestigen dat OS4 qua biascorrectie en standaardafwijking een representatieve locatie is voor de gehele OSK.

Het advies is om de modelonzekerheden te baseren op de windrichtingen 270, 300 en 330 graden (255-345 graden in de data), aangezien deze windrichtingen leiden tot combinaties van hoge waterstanden en hoge golven bij de OSK. Daarbij wordt de analyse beperkt tot tijdstippen waarop de windsnelheid hoger is dan 20 m/s. Deze ondergrens geeft een juiste balans tussen enerzijds voldoende databeschikbaarheid en anderzijds voldoende focus op stormcondities.

### 5.2 Beschrijving van de standaardafwijking

Een specifiek punt van aandacht is het toepassen van een absolute standaardafwijking (in meters voor  $H_{m0}$  en in seconden voor  $T_{m-1,0}$ ) of een relatieve standaardafwijking (in %). Binnen WBI worden relatieve modelonzekerheden voorgeschreven, waarbij de spreiding toeneemt naarmate de golfhoogte of golfperiode toeneemt. Deze toenemende spreiding werd ook gevonden voor modellen voor de gehele Noordzee (zie bijvoorbeeld Deltares, 2015b, beschreven in §2.3).

Uit de voorliggende studie volgen echter geen aanwijzingen dat de standaardafwijkingen groter worden voor hogere of langere golven. Er is eerder sprake van afnemende afwijkingen naarmate de windsnelheid hoger wordt. Voor andere beschouwde meetlocaties in het modeldomein (OS11, Brouwershavense Gat 2, Schouwenbank, Domburger rassen, Deurloo en Wielingen) volgen dezelfde conclusies als voor OS4. Voor de Vlaamse kust, eveneens een dissipatie-gedomineerd systeem, werd ook een absolute en constante standaardafwijking gehanteerd voor golven tot ongeveer 4 m, zie §2.3.

Hogere en langere golven treden op bij hogere windsnelheden. Het systeem wordt bij hogere windsnelheden in toenemende mate gedomineerd door lokale windgroei en golfbreking. Bij lagere windsnelheden leidt deining tot relatief grote afwijkingen in met name de golfperiode. Ook relatieve waterdieptevariaties door zandbanken en geulen nemen af met een toenemende waterstand. Tot slot geldt dat bij de hoogste golven in veel gevallen sprake is van

een gesloten Oosterscheldekering, waardoor de stroming veel zwakker is dan bij een open kering. Dit zorgt voor een afname van de gecompliceerde golfstromingsinteractie, een proces wat in het SWAN-model (HKV, 2021) niet is opgenomen.

Onderstaande figuren tonen:

- De absolute standaardafwijking in de golfhoogte in Figuur 36;
- De relatieve standaardafwijking in de golfhoogte in Figuur 37;
- De absolute standaardafwijking in de golfperiode in Figuur 38;
- De relatieve standaardafwijking in de golfperiode in Figuur 39.

De dikke lijnen tonen drie typen standaardafwijkingen:

- Op basis van een verschuivend venster (variabele  $\sigma$ ) in rood (zie §3.6);
- Een vaste waarde in meters of seconden (absolute  $\sigma$ ) in blauw;
- Een vaste waarde in procenten (relatieve  $\sigma$ ) in groen;
- Standaard WBI-waarden (relatieve  $\sigma$ ) in zwart, waarbij voor de golfperiode geldt dat groen en zwart gelijk zijn aan elkaar.

De bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen  $[-1.96\sigma, 1.96\sigma]$  zijn weergegeven met stippellijnen.

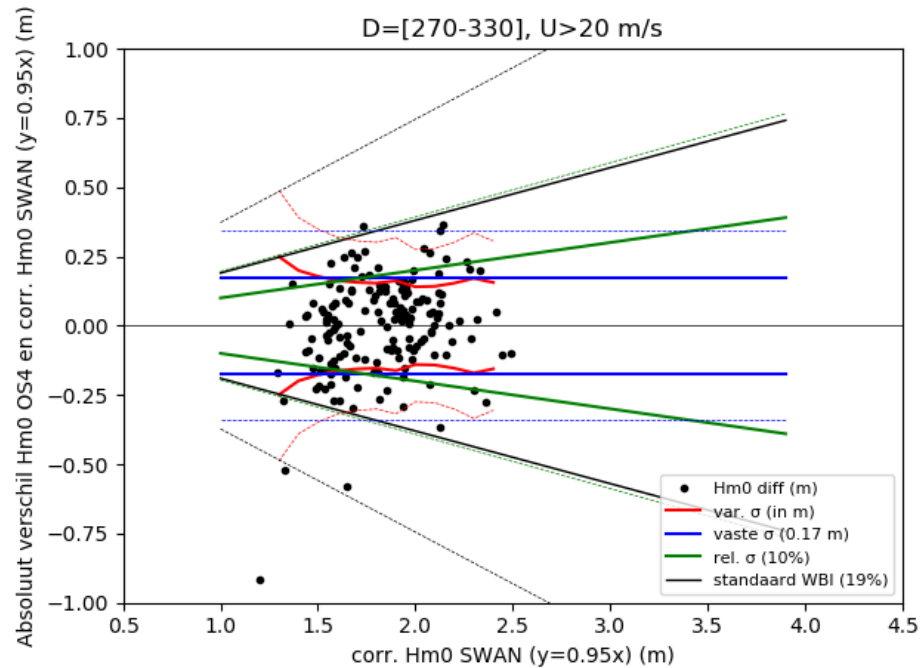
Voor de golfhoogte geldt dat de standaardwaarde vanuit het WBI voor het watersysteem kust ( $\sigma=0.19 \cdot H_{m0}$ , de zwarte lijn) de spreiding in de data duidelijk overschat. Het 95% betrouwbaarheidsinterval (de zwarte stippellijn) is veel breder dan de spreiding in de data. Het is daarom nodig om de standaardafwijking voor de golfhoogte bij de Oosterscheldekering te reduceren.

Zoals reeds in §4.1.1 benoemd, vertoont de standaardafwijking een afnemende trend binnen het meetbereik ( $H_{m0}$  tot 2.7 m). De significante golfhoogte in het midden van de Roompot is bij een terugkeertijd van 10.000 jaar ongeveer 3.7 m (Rijkswaterstaat Zee en Delta, 2017). De vraag is dus hoe de standaardafwijking moet verlopen in het bereik tussen ongeveer 2.7 en 4.0 m. Is het te rechtvaardigen om de vrij kleine standaardafwijking uit het gemeten bereik ( $\sigma=0.17$  m, de blauwe lijn) ook nog in extreme condities toe te passen? Zet de afname van de standaardafwijking met een toenemende golfhoogte (de rode lijn) zich door tot ver boven het bereik van de metingen, of gaat deze vanaf een bepaald omslagpunt toch weer toenemen? Een antwoord op deze vraag is niet voorhanden, dus enige voorzichtigheid is raadzaam. Daarom is in een overleg tussen RWS Zee en Delta, RWS WVL en HKV besloten om toch een relatieve standaardafwijking toe te passen.

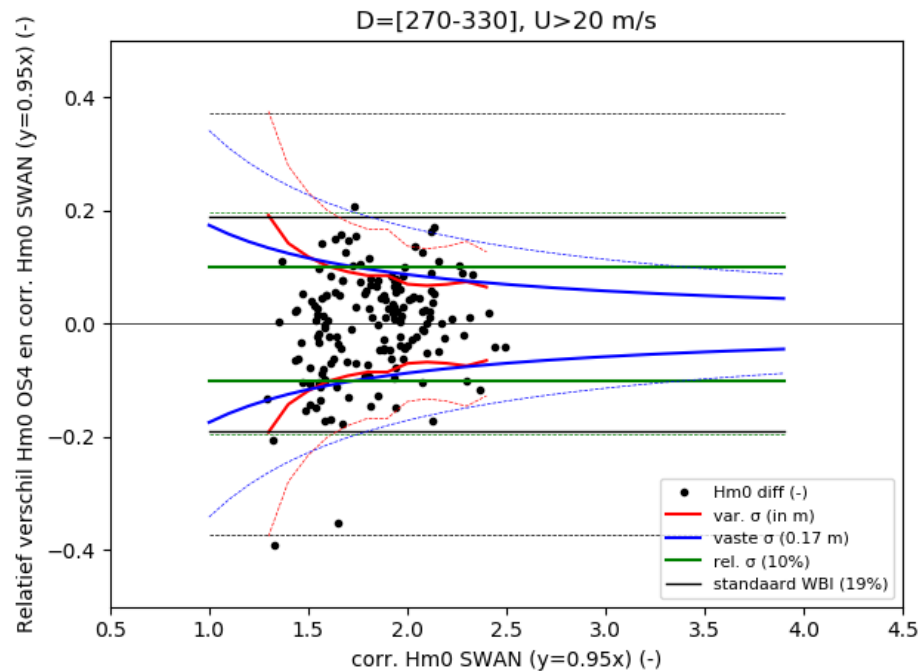
De OSK heeft al zeer vaak bewezen een significante golfhoogte van 2.0 m zonder enige schade te kunnen doorstaan. Daarom wordt het bereik tot 2.0 m door RWS Zee en Delta beschouwd als volstrekt irrelevant voor de veiligheid van de OSK. De relatieve standaardafwijking wordt daarom afgeregeld op de combinatie van  $\sigma=0.17$  m en  $H_{m0}=2.0$  m, wat een relatieve standaardafwijking van  $0.17/2.0=9\%$  oplevert. RWS Zee en Delta geeft op basis van deze getallen de voorkeur aan een afgeronde waarde van 10% (de groene lijn in Figuur 36 en Figuur 37), wat ongeveer neerkomt op een halvering ten

opzichte van de standaardwaarde uit het WBI voor de Kust (19%). Alle datapunten tot ongeveer  $H_{m0}=1.8$  m vallen binnen het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval, wat bevestigt dat 10% een robuuste keuze is.

*Figuur 36*  
Drie beschrijvingen van absolute verschillen tussen metingen en model voor de golfhoogte bij locatie Oosterschelde 4: een lopend gemiddelde (rood), een absolute standaardafwijking (in m) (blauw) en een relatieve standaardafwijking (in %) (groen). De gestippelde lijnen geven de bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen weer.



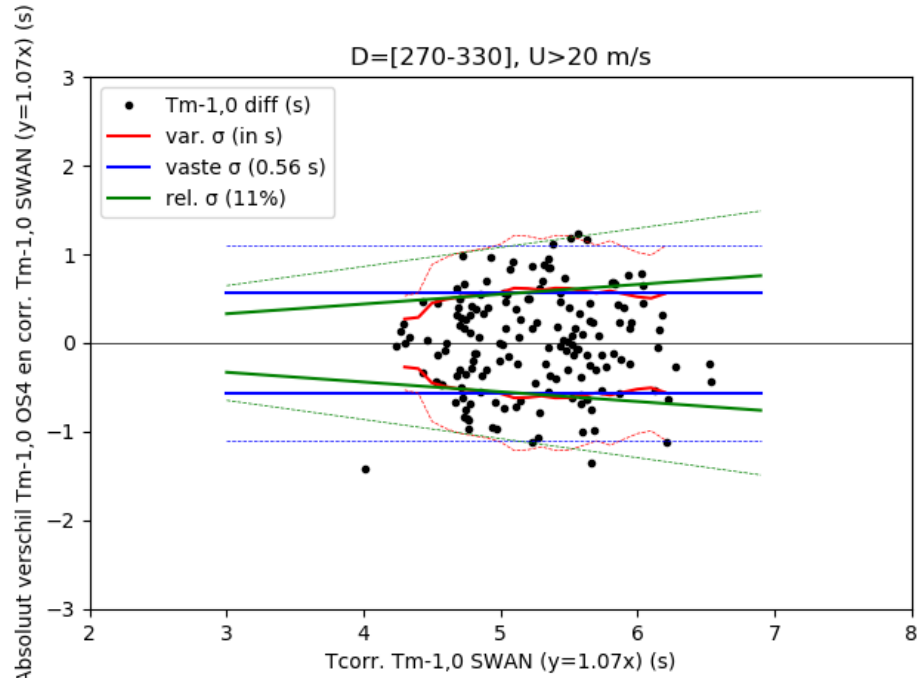
*Figuur 37*  
Drie beschrijvingen van relatieve verschillen tussen metingen en model voor de golfhoogte bij locatie Oosterschelde 4: een lopend gemiddelde (rood), een absolute standaardafwijking (in m) (blauw) en een relatieve standaardafwijking (in %) (groen). De gestippelde lijnen geven de bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen weer.



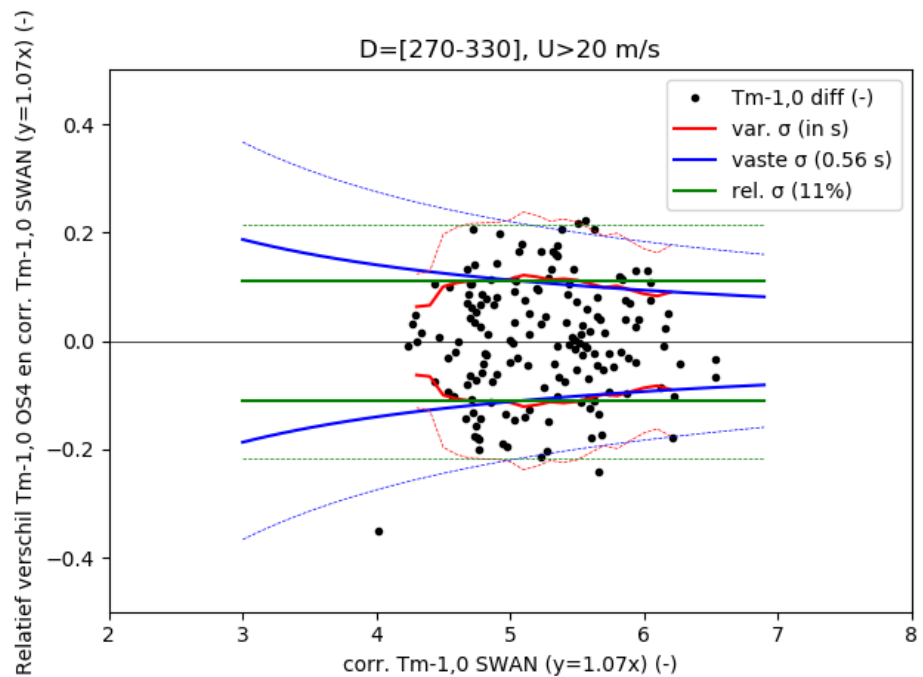
Voor de golfperiode  $T_{m-1,0}$  is de standaardafwijking vrij constant binnen het meetbereik (de rode lijn). Een vaste waarde komt uit op  $\sigma=0.55$  s. De golfperiode tijdens extreme condities is slechts beperkt hoger dan in het gemeten bereik: 6.7 s bij  $T=10.000$  jaar (Rijkswaterstaat Zee en Delta, 2017). Als we stellen dat de standaardafwijking van 0.55 s geldig moet zijn bij golfperiodes van 6.0 s en hoger, resulteert een relatieve standaardafwijking van

0.55/6.0=9%. Dit is redelijk vergelijkbaar met de reguliere standaardafwijking uit WBI voor het watersysteem kust van 11%. Daarom is het advies om de standaardafwijking voor de OSK gelijk te kiezen aan de reguliere waarde voor de Kust. De biascorrectie wordt overigens wel aangepast voor deze specifieke situatie.

**Figuur 38**  
Drie beschrijvingen van absolute verschillen tussen metingen en model voor de golfperiode bij locatie Oosterschelde 4: een lopend gemiddelde (rood), een absolute standaardafwijking (in s) (blauw) en een relatieve standaardafwijking (in %) (groen). De gestippelde lijnen geven de bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen weer.



**Figuur 39**  
Drie beschrijvingen van relatieve verschillen tussen metingen en model voor de golfperiode bij locatie Oosterschelde 4: een lopend gemiddelde (rood), een absolute standaardafwijking (in s) (blauw) en een relatieve standaardafwijking (in %) (groen). De gestippelde lijnen geven de bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen weer.



## 5.3

### Samenvatting

De gevonden modelonzekerheden wijken substantieel af van de standaard getallen uit Deltares (2015a) voor de watersystemen Kust en IJsselmeer. Het advies is daarom om de modelonzekerheden uit Tabel 8 te hanteren binnen de WBI-2017 beoordeling van de OSK. Eerst dienen biascorrecties te worden toegepast, vervolgens de standaardafwijkingen (relatief ten opzichte van de waarden ná biascorrectie).

Beide standaardafwijkingen en de Rayleigh-verdeling zijn voorzichtig gekozen op basis van de uitgangspunten uit deze studie. Als de beoordeling van de OSK erop uitkomt dat de kering niet aan de veiligheidseisen voldoet, is hier nog enige ruimte aanwezig voor verdere aanscherping.

*Tabel 8  
Geadviseerde modelonzekerheden voor de Oosterscheldekering*

Grootheid	Beschrijving	Bron
Biascorrectie $H_{m0}$	$H_{m0}=0.95*H_{m0,SWAN}$	Figuur 13
Standaardafwijking $H_{m0}$	$\sigma=0.10*H_{m0}$	Figuur 36
Biascorrectie $T_{m-1,0}$	$T_{m-1,0}=1.07*T_{m-1,0,SWAN}$	Figuur 24
Standaardafwijking $T_{m-1,0}$	$\sigma=0.11*T_{m-1,0}$	Figuur 38
Correlatie modelonzekerheden	$\rho=0.22$	Figuur 33
Maximale golfhoogte $H_{max}$	Rayleigh-verdeling	§4.5
Golfperiode bij $H_{max}$	$T_{Hmax}=T_p=1.1*T_{m-1,0}$	Figuur 31

## 5.4

### Duiding van verschillen

De standaardafwijking voor de golfhoogte komt dus uit op  $\sigma=0.10*H_{m0}$ . Dit is aanzienlijk lager dan de waarde van  $\sigma=0.19*H_{m0}$  uit Deltares (2013). Hiervoor zijn een aantal mogelijke oorzaken te benoemen:

1. De modelonzekerheden uit Deltares (2013) zijn gebaseerd op relatief complexe hindcasts met een keten van modellen, inclusief waterstands- en stromingsmodellering (Delft3D-FLOW). De voorliggende studie maakt gebruik van eenvoudigere SWAN-modellen met uniforme lokaal gemeten wind en vlakke waterstanden, zonder het effect van stroming.
2. Het bereik aan significante golfhoogtes in Deltares (2013) loopt tot ca. 1.5 m nabij de waterkering in zowel de Waddenzee als de Westerschelde. Het gemeten bereik aan golven bij OS4 loopt tot 2.9 m. Multiplicatieve onzekerheden vanuit de Waddenzee en Westerschelde zijn niet per definitie lineair opschaalbaar naar een ander watersysteem met hogere golven.
3. De fysica van golfindringing, golfgroei en golfvoortplanting in estuaria en zeegaten is aanzienlijk complexer dan voor een buitendelta langs de open Noordzeekust. Tabel 9 geeft een overzicht van de verschillen in dominante fysica tussen beide typen watersystemen.
4. De meetreeks bij OS4 bevat veel stormen bij uiteenlopende windrichtingen, windsnelheden en waterstanden, waardoor een robuuste beschrijving van modelonzekerheden mogelijk is, zeker na toevoegen van een vergelijking met andere meetlocaties. Deltares (2013) is gebaseerd op aanzienlijk minder stormen.

5. De SWAN-versie (40.72ABCDE versus 41.10.1) en dominante fysica (van de Westhuijsen versus Komen) verschillen tussen respectievelijk Deltares (2013) en de huidige studie.

De verschillen overziend, zijn er voldoende argumenten om de locatie- en modelspecifiek afgeleide modelonzekerheden uit de huidige studie (Tabel 8) toe te passen binnen de WBI-beoordeling van de Oosterscheldekering.

*Tabel 9  
Enkele verschillen  
tussen de afleiding  
van modelonzeker-  
heden voor de Wad-  
denzee en Wester-  
schelde (Deltares,  
2013) t.o.v. die voor  
de Oosterscheldeke-  
ring (deze studie)*

Aspect	Waddenzee en Westerschelde	Oosterscheldekering
Wind	Land-waterovergan- gen, middeling diverse stations	Openwaterwind o.b.v. wind bij OS4
Waterstand	Delft3D-modellering, gecorrigeerd voor me- tingen; grote gradiën- ten in estuaria en in ondiep water; wave set-up.	Vlakke waterstanden in SWAN o.b.v. water- stand bij Roompot Bui- ten
Stroming	Delft3D-modellering, sterke golf-stroomin- teractie	Van ondergeschikt be- lang bij een gesloten OSK
Golfbreking	Intergetijdegebied, for- mulering Van der Westhuijsen	Open kust, formulering Battjes-Janssen
Refractie	Refractie door buiten- delta, intergetijdege- bied en stroming. Re- fractielimitering toege- past.	Refractie richting kust en effect van diepteva- riaties buitendelta
SWAN-versie en fysica	40.72ABCDE WESTH	41.10.1 KOMEN
Golfdata	Westerschelde: 2 stor- men uit 2007; Wad- denzee: 3 stormen uit 2007, 1 storm uit 2009. Windsnelheden tot 24 m/s.	Alle stormen voor de periode 1988-2019. Windsnelheden tot 28 m/s.



## 6 Referenties

- Deltares (2013). Quantifying uncertainties of SWAN results; Investigation of SWIVT cases. Deltares report 1206011-002, A. Smale, feb. 2013.
- Deltares (2015a). Modelonzekerheid belastingen; Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI 2017. Deltares rapport 1209433-008, H. Chbab en J. Groeneweg, juli 2015.
- Deltares (2015b). SWAN North Sea 2014. Deltares report 1209448-004-IKS-0004, C. Gautier, March 2015.
- Deltares (2016). WBI – Onzekerheden; Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium. Deltares rapport 1220080-001-ZWS-0004, F. Diermanse, augustus 2016.
- Deltares (2017). Golfberekeningen Pilot Oosterschelde WBI2023. Deltares rapport 11200556-000, C. Gautier, 19 december 2017.
- Deltares (2018). Correlation between model uncertainties wave height and wave period. Deltares memo 11202225-003-GEO-0001, Alfons Smale, 20 november 2018.
- HKV (2021). Herziening WBI golvendatabase Oosterscheldekering. HKV memo pr4039.30, V. Vuik, 4 januari 2021.
- Rijkswaterstaat Zeeland (1997). Conditiebewaking Oosterscheldekering. Eindrapportage, CONDITS-R-96010, januari 1997.
- Rijkswaterstaat Zee en Delta (2017). Prestatiepeilenmodel Oosterscheldekering 2017. Versie 3.0, 1 oktober 2017, K. Saman.
- Royal Haskoning (2008). Hindcast tidal inlet of Ameland storms January and March 2007. Royal Haskoning Report 9T5842.A0, October 2008.
- Suzuki, T., Trouw, K., De Roo, S., & Mostaert, F. (2020). Methodology for Hydraulic Boundary Conditions and Safety Assessment 2021: SWAN v41.20 validation report for a higher wave climate. Version 1.0. FHR Reports, 18\_037\_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.
- Svasek Hydraulics (2006). Rapportage veldmetingen Westerschelde januari 2003 t/m mei 2006. Svasek rapport project 1407. 15 december 2006.
- Vuik, V., Kuijper, B., Geerse, C.P.M., Strijker, B., Gautier, C., Trouw, K., Van Neste, D., Suzuki, T., Nossent, J., Thoon, D., De Roo, S., Mostaert, F. (2020). Het Hydraulisch Randvoorwaardenboek (2020): Achtergrondrapport. Versie 2.0. WL Rapporten, 18\_037\_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.
- De Waal, J.P. (2003). Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven; Een analyse van de bouwstenen. RIZA-werkdocument 2003.118x. Lelystad, juli 2003.
- Witteveen & Bos (2008). Hindcast of the 8 and 9 November 2007 storm for the tidal inlet of Ameland. DT293-2/winb/011, November 2008.
- Witteveen & Bos (2010). Verification of SWAN in western Wadden Sea. Hindcast January and November 2007 storms.



# Bijlagen



# A Stations op dieper water

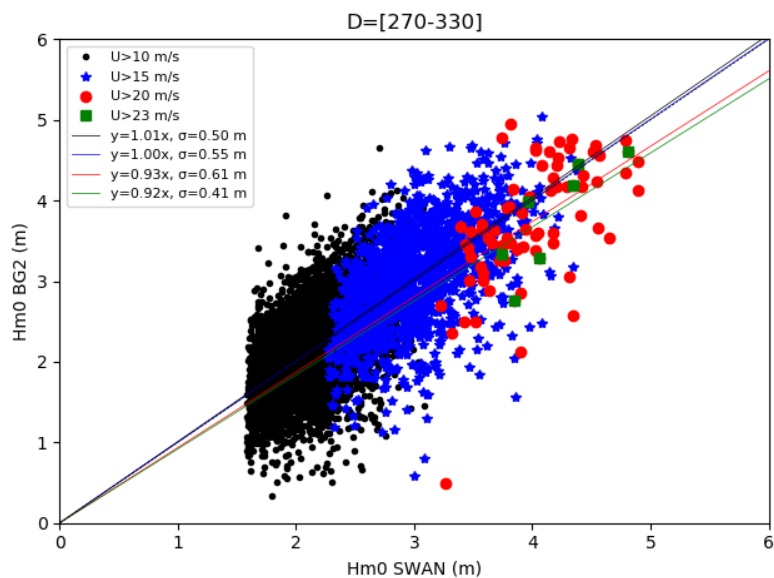
Deze bijlage bevat figuren voor de vergelijking tussen SWAN en metingen voor zes locaties. Voor de Schouwenbank is een vergelijking gemaakt tussen metingen en de aan het SWAN-model opgelegde randvoorwaarden. Voor alle andere locaties gaat het om een vergelijking tussen metingen en modelresultaten. Bij alle figuren betreft het de richtingssector [270, 330] graden.

Locatie	Afkorting	Coördinaten	Periode
Brouwershavense Gat 2	BG2	33140, 421239	1983-2019
Schouwenbank	SCHB	11332, 419605	1985-2019
Oosterschelde 11	OS11	23021, 407778	2008-2019
Domburger Rassen	DORA	17325, 405275	1994-2019
Deurloo	DEUR	6071, 392601	2009-2019
Wielingen	WIEL	17641, 383875	1985-2019

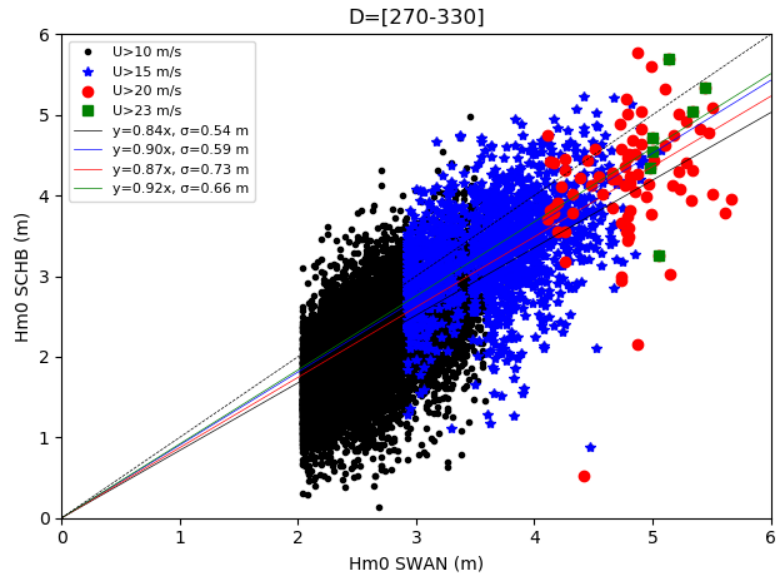
## A.1 Significante golfhoogte $H_{m0}$

Deze paragraaf bevat twee typen figuren: eerst de golfhoogte in SWAN (horizontaal) ten opzichte van de golfhoogte in de metingen (verticaal). Daarna het verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte voor windsnelheden boven 20 m/s.

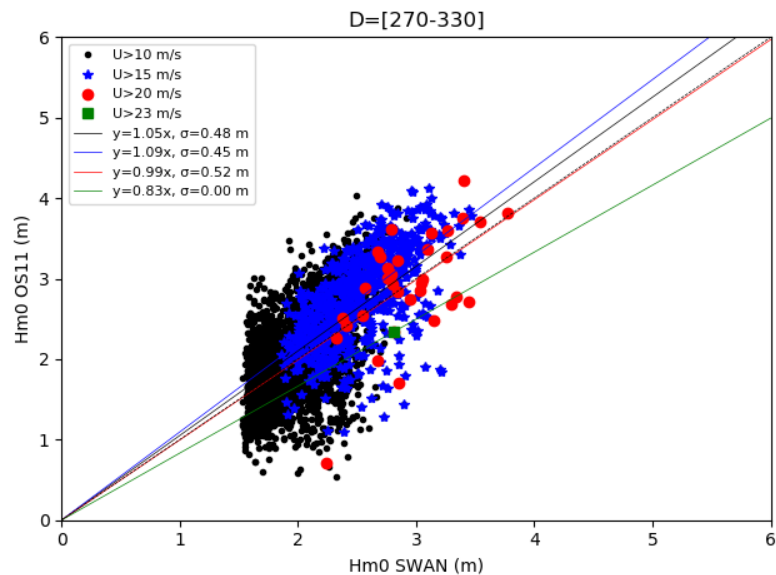
*Figuur A1  
De significante golfhoogte volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Brouwershavense Gat** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.*



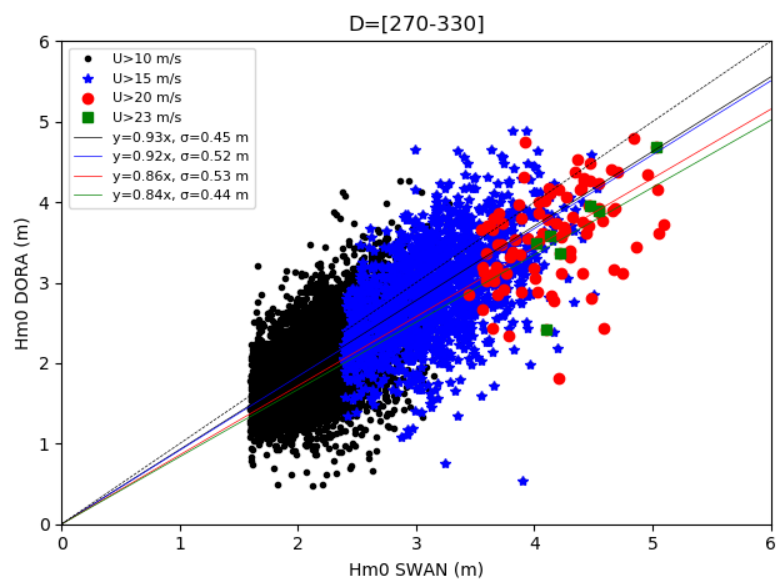
**Figuur A2**  
 Vergelijking gemeten golfhoogte bij **Schouwenbank** met de aan het SWAN model opgelegde randvoorwaarden uit HKV (2021)



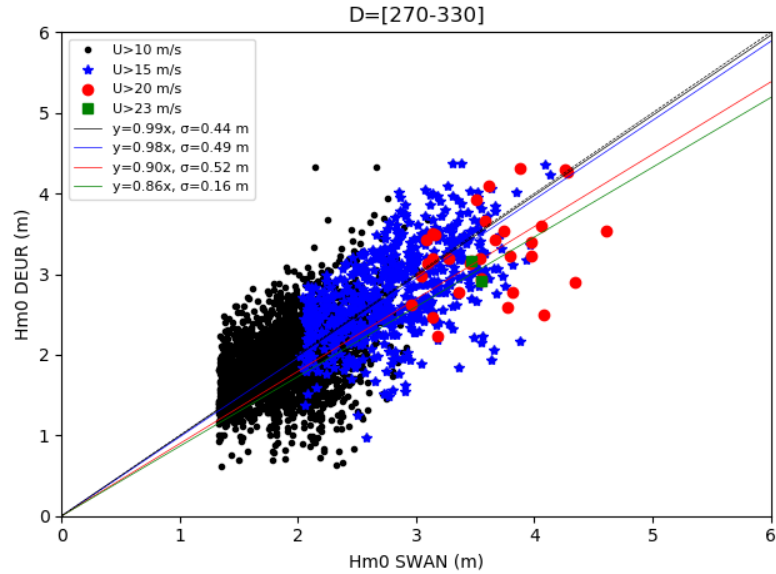
**Figuur A3**  
 De significante golfhoogte volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Oosterschelde 11** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.



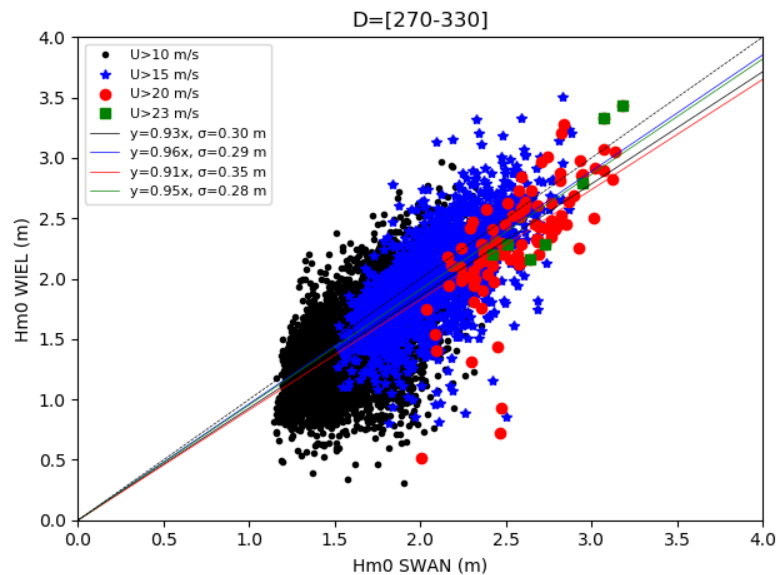
**Figuur A4**  
 De significante golfhoogte volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Domburger Rassen** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.



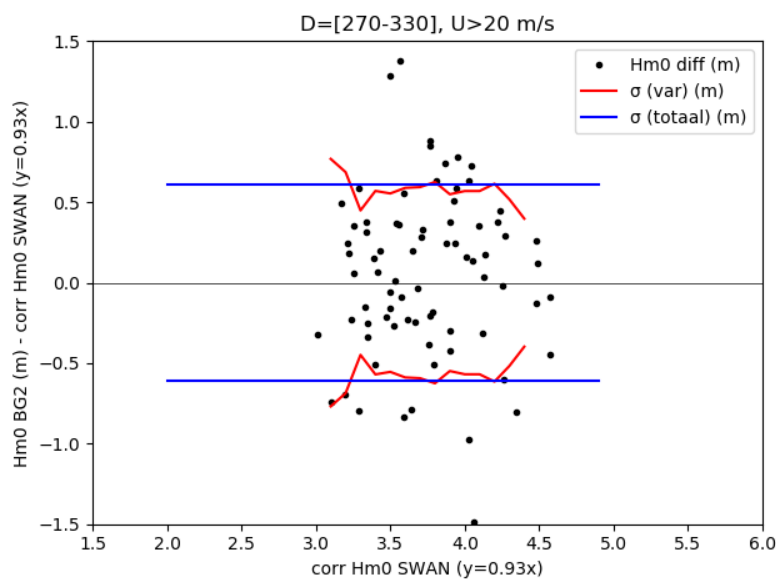
**Figuur A5**  
De significante golfhoogte volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Deurloo** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.



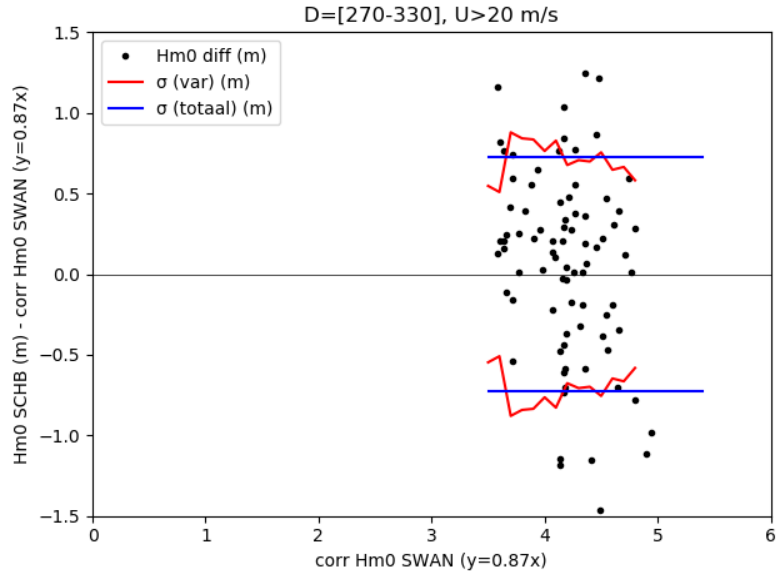
**Figuur A6**  
De significante golfhoogte volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Wielingen** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.



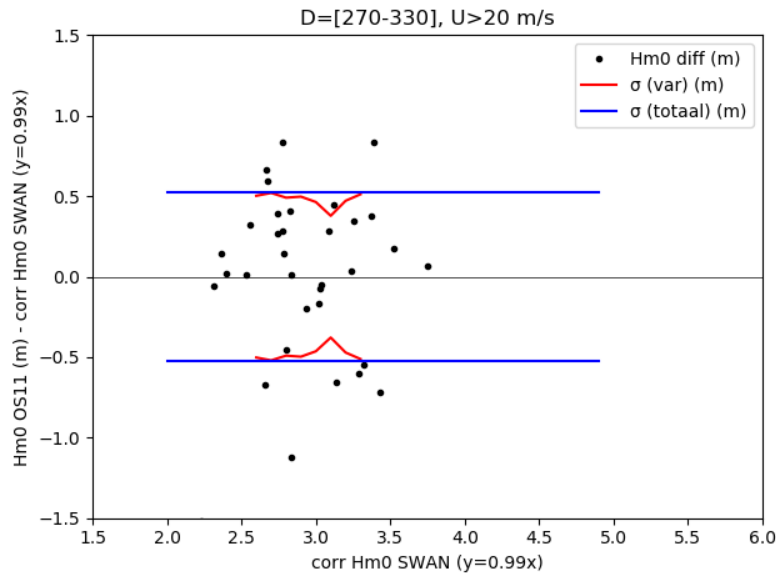
**Figuur A7**  
Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte bij locatie **Brouwershavense Gat** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



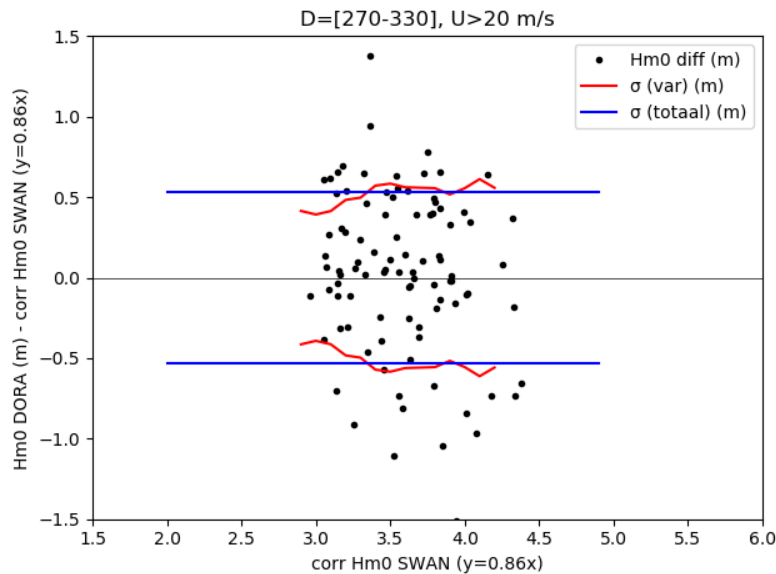
**Figuur A8**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte bij locatie **Schouwenbank** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



**Figuur A9**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte bij locatie **Oosterschelde 11** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.

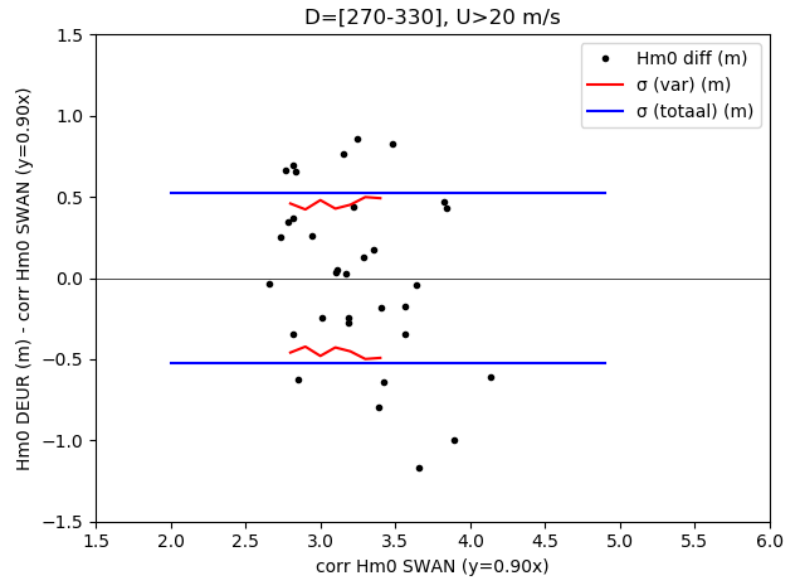


**Figuur A10**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte bij locatie **Domburger Rassen** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.

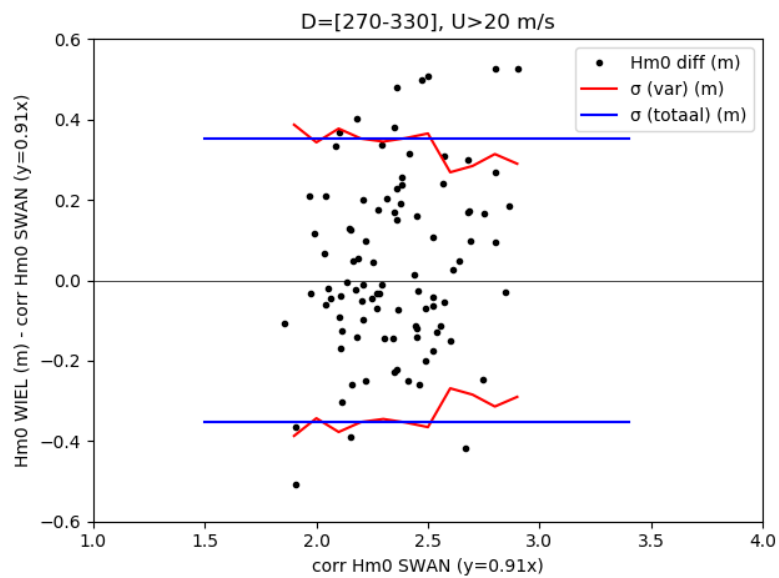




**Figuur A11**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte bij locatie **Deurloo** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



**Figuur A12**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfhoogte bij locatie **Wielingen** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.

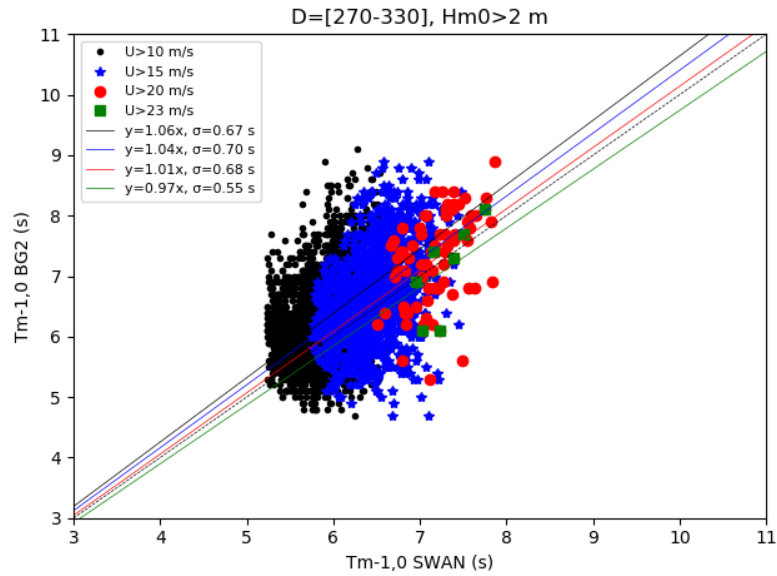


## A.2

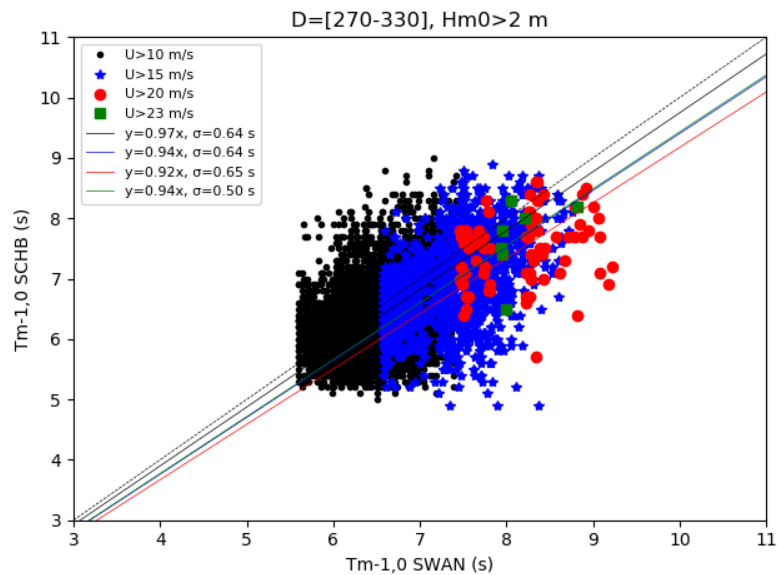
### Spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$

Deze paragraaf bevat twee typen figuren: eerst de golfperiode in SWAN (horizontaal) ten opzichte van de golfperiode in de metingen (verticaal). Daarna het verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode voor windsnelheden boven 20 m/s.

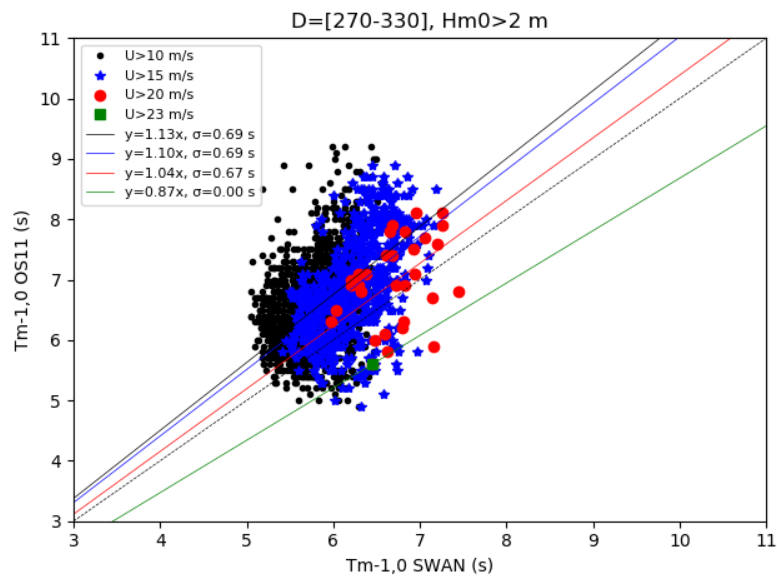
**Figuur A13**  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Brouwershavense Gat** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.



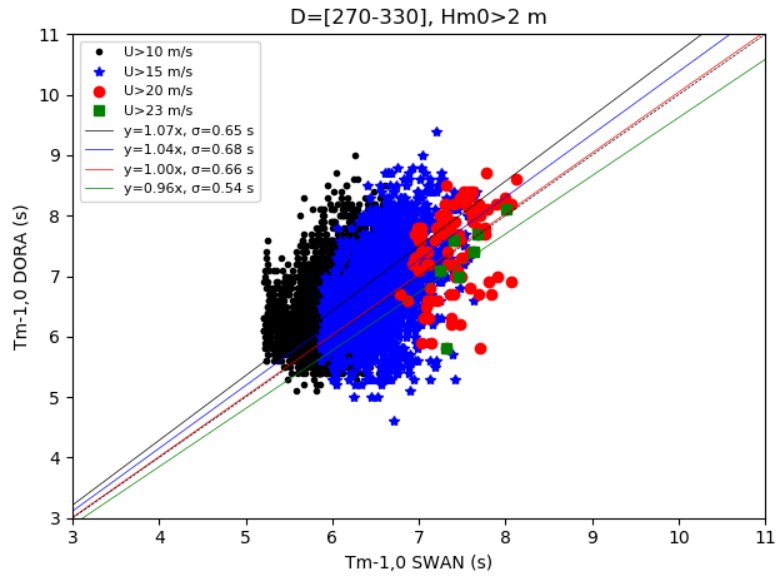
**Figuur A14**  
Vergelijking gemeten spectrale golfperiode bij **Schouwenbank** met de aan het SWAN-model opgelegde randvoorwaarden uit HKV (2021)



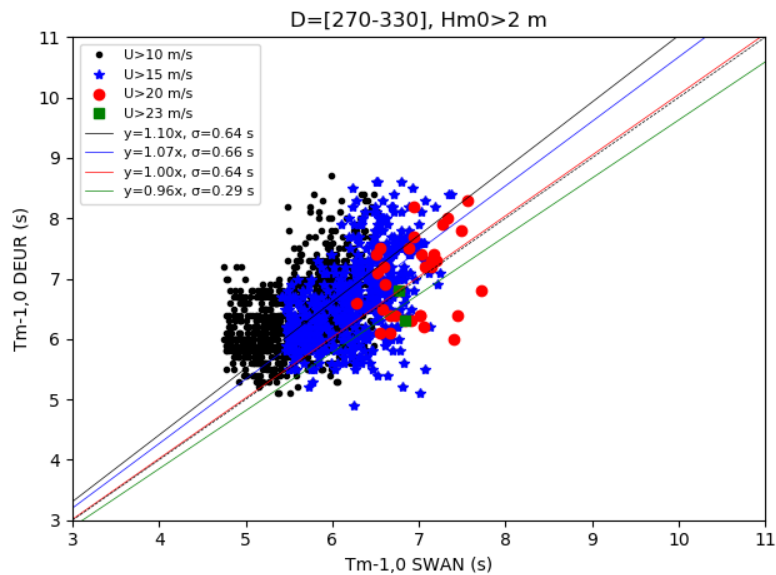
**Figuur A15**  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Oosterschelde 11** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden.



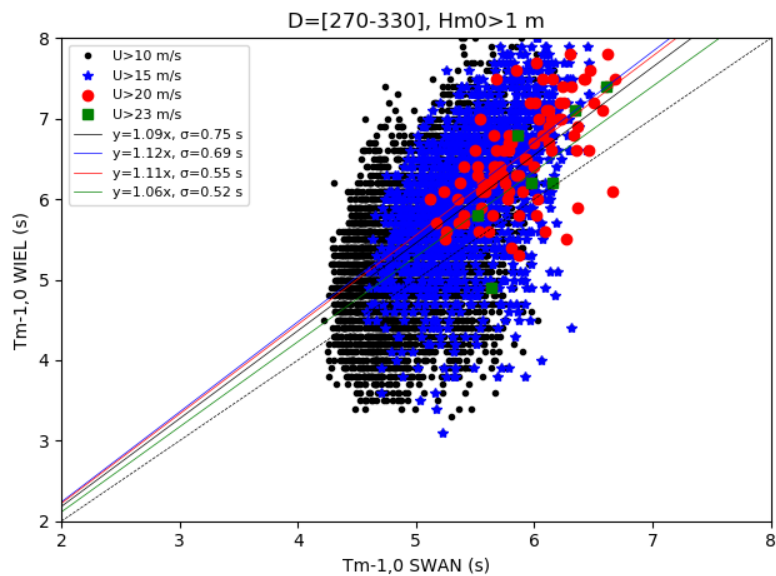
**Figuur A16**  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Dom-burger Rassen** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden



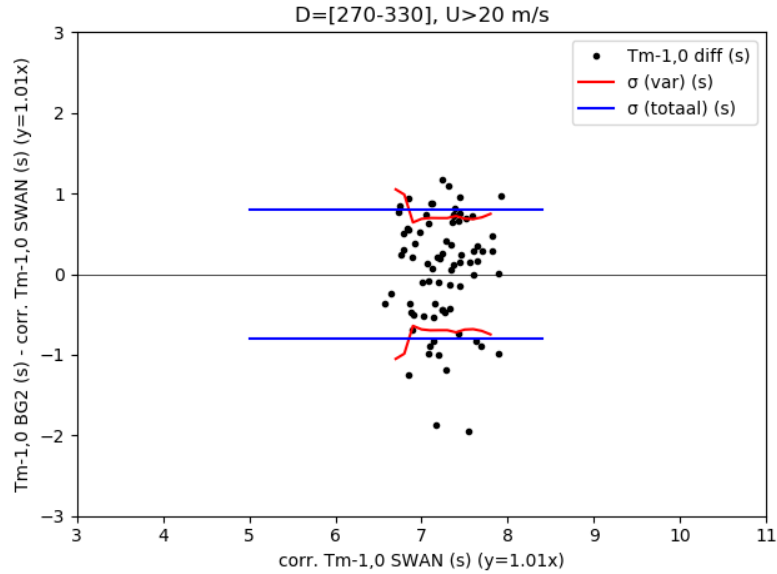
**Figuur A17**  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Deur-loo** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden



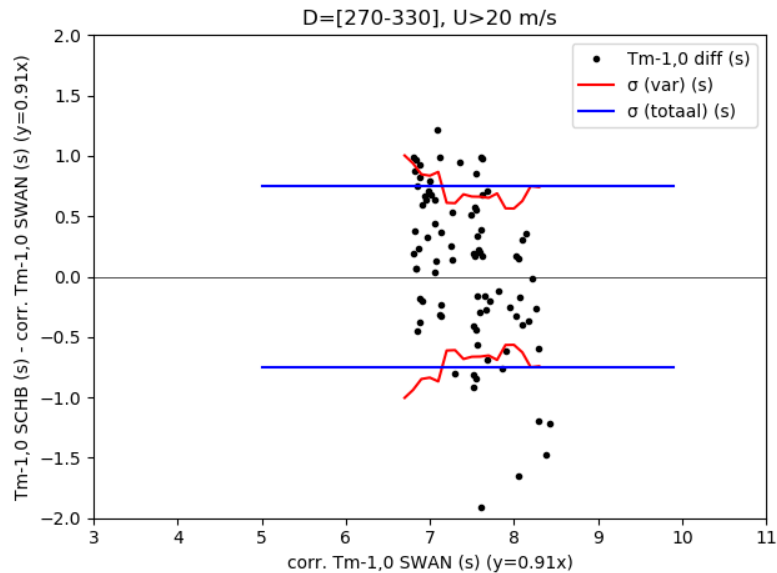
**Figuur A18**  
De spectrale golfperiode volgens SWAN (horizontaal) ten opzichte van de metingen bij locatie **Wie-lingen** (verticaal) voor de windrichtingen 270 tot en met 330 graden



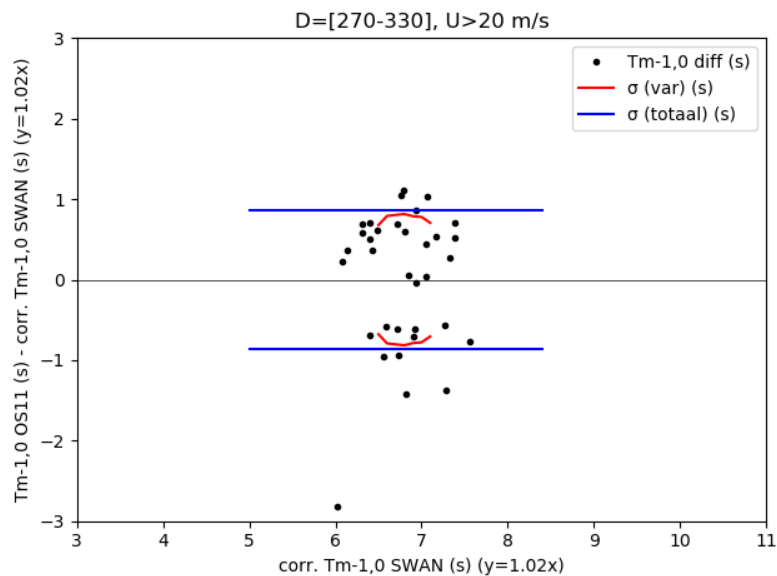
**Figuur A19**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode bij locatie **Brouwershavense Gat** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



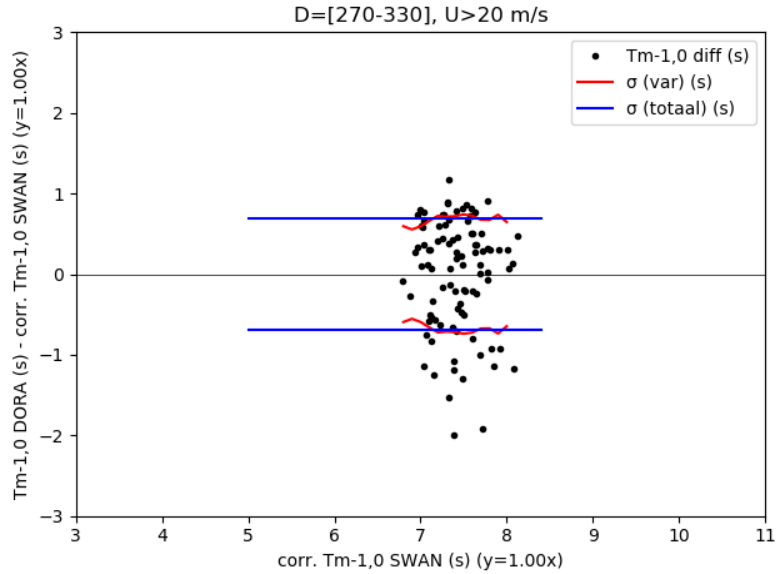
**Figuur A20**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode bij locatie **Schouwenbank** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



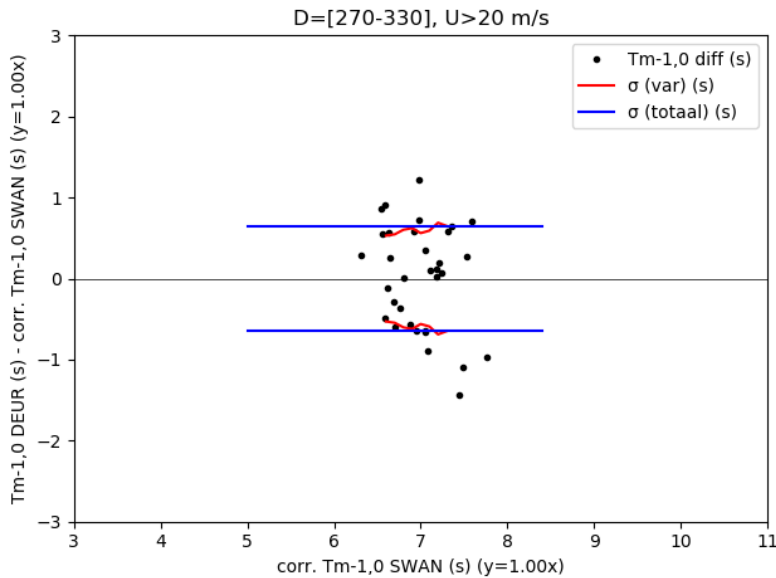
**Figuur A21**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode bij locatie **Oosterschelde 11** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



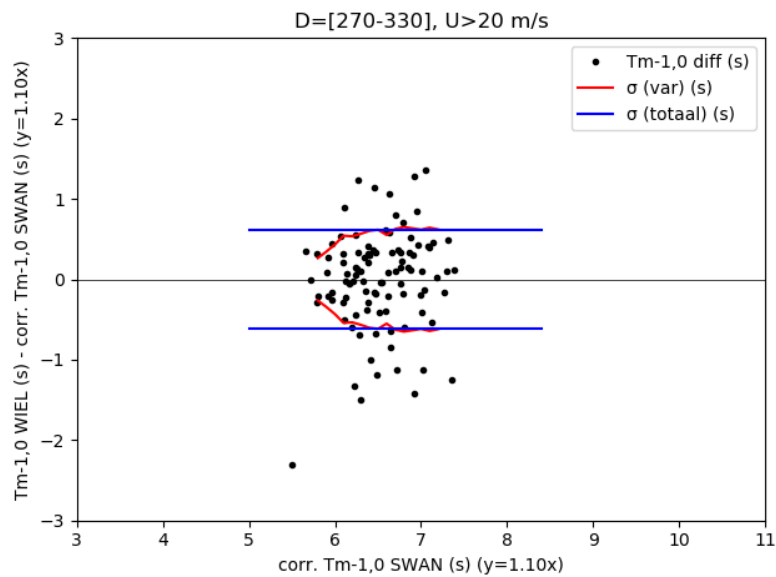
**Figuur A22**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode bij locatie **Domburger Rassen** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



**Figuur A23**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode bij locatie **Deurloo** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.



**Figuur A24**  
 Verloop van de standaardafwijking als functie van de golfperiode bij locatie **Wielingen** voor windsnelheden groter dan 20 m/s en windrichtingen 270-330 graden. De standaardafwijkingen zijn tweezijdig weergegeven.







Hoofdkantoor  
HKV lijn in water BV  
Botter 11-29  
8232 JN Lelystad

Nevenvestiging  
Informaticalaan 8  
2628 ZD Delft

0320 29 42 42  
info@hkv.nl  
www.hkv.nl