



**Vlaanderen**  
is wetenschap



20\_025\_1  
WL rapporten

## Probabilistische faalgedraganalyse kunstwerken kusthavens

Deelrapport 1  
Uitbreiding directionele hydraulische randvoorwaarden kust

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Probabilistische faalgedraganalyse kunstwerken kusthavens

## Deelrapport 1 – Uitbreiding directionele hydraulische randvoorwaarden kust

De Roo, S.; Vanneste, D.; Mostaert, F.

### Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.  
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.  
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

### Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2021  
D/2021/3241/027

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**De Roo, S.; Vanneste, D.; Mostaert, F.** (2021). Probabilistische faalgedraganalyse kunstwerken kusthavens: Deelrapport 1 – Uitbreiding directionele hydraulische randvoorwaarden kust. Versie 2.0. WL Rapporten, 20\_025\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.


Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

### Documentidentificatie

Oprachtgever:	Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust, afdeling Kust	Ref.:	WL2021R20_025_1
Keywords (3-5):	hydraulische randvoorwaarden, extremewaardeanalyse, golftransformatie		
Kennisdomeinen:	Kustbescherming > kustveiligheid bij extreme stormen > hydrometeoklimaat extreme stormen > literatuur- en desktoponderzoek Kustbescherming > kustveiligheid bij extreme stormen > hydrometeoklimaat extreme stormen > in-situ metingen Kustbescherming > kustveiligheid bij extreme stormen > hydrometeoklimaat extreme stormen > numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	22	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	De Roo, S.
------------	------------

### Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanneste, D.	Getekend door:Dieter Vanneste (Signatur Getekend op:2021-02-26 09:01:21 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed 
Projectleider:	Vanneste, D.	Getekend door:Dieter Vanneste (Signatur Getekend op:2021-02-26 09:01:39 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed 

### Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door:Frank Mostaert (Signature Getekend op:2021-02-26 13:48:01 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed 
-----------------	--------------	--



## Abstract

Voor een probabilistische analyse van het constructief faalgedrag van verschillende kunstwerken in de havens van Oostende en Zeebrugge zijn richtingsafhankelijke hydraulische randvoorwaarden nodig.

Bij opmaak van het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2014 werden deze randvoorwaarden opgemaakt, maar niet voor het volledige vereiste bereik aan windsectoren. Daarom wordt in de eerste deelopdracht van WL studie 20\_025 de studie van de richtingsafhankelijke hydraulische randvoorwaarden uitgebreid voor de aanlandige windsectoren van ZW tot NO voor waterstand en significante golfhoogte, en over het volledige windsectorbereik voor windsnelheden.

Onderhavig rapport bevat de resultaten van de statistische analyse van de richtingsafhankelijke waterstand, windsnelheid en significante golfhoogte op diep water. Vervolgens werden deze getransformeerd volgens de methodiek beschreven in De Roo *et al.*, 2016a om tot locatiespecifieke golftrandvoorwaarden te komen ter hoogte van de havenmond van Oostende en Zeebrugge.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren .....	VII
1 Inleiding .....	1
2 Waterstand.....	3
2.1 Stormopzet $O$ .....	3
2.2 Waterstand $h$ .....	5
3 Wind .....	7
4 Golven.....	9
4.1 Diep water .....	9
4.2 Transformatie naar ondiep water met SWAN.....	11
4.2.1 Transformatie voor windsectoren NO tot W.....	13
4.2.2 Transformatie voor de windsectoren W tot Z.....	14
4.3 Ondiep water – ter hoogte van de havens .....	15
5 Besluit .....	21
6 Referenties .....	22

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Gebruikte data van Meetnet Vlaamse Banken .....	1
Tabel 2 – Stormopzet $O$ .....	4
Tabel 3 – Waterstand $h$ .....	5
Tabel 4 – Windsnelheid $u_w$ ( $dt=2u$ ).....	8
Tabel 5 – Significante golfhoogte $H_{m0}$ ( $dt=2u$ ).....	10
Tabel 6 – Info uitvoerpunten havens van Oostende en Zeebrugge .....	11
Tabel 7 – Locatiespecifieke hoekverdraaiing golfrichting tussen diep en ondiep water .....	14
Tabel 8 – Locatiespecifieke hoekverdraaiing golfrichting tussen diep en ondiep water .....	15
Tabel 9 – Significante golfhoogte $H_{m0}$ : parameters directionele Weibullverdeling (ontwerpduur $dt=2u$ ) (indien 2 waarden: NO tot W / W tot Z).....	17
Tabel 10 – Golfpiekperiode $T_p$ : parameters directionele machtsfunctie (indien 2 waarden: NO tot W / W tot Z) .....	20

## Lijst van de figuren

Figuur 1 – Directionele extremewaardeverdelingen van de waterstand $h$ [m TAW] .....	6
Figuur 2 – SWAN bathymetrisch rooster van het Belgisch Continentaal Plat (2015) met uitvoerpunten ter hoogte van havens Oostende en Zeebrugge – resolutie 250x250m.....	12
Figuur 3 – SWAN bathymetrisch rooster van het Belgisch Continentaal Plat (2020) – resolutie 50x50m .....	12
Figuur 4 – Uitvoerpunten ter hoogte van de haven van Oostende .....	13
Figuur 5 – Voorbeeld dubbeltoppig spectrum: uitvoerpunt ZBG2 – richting NNO.....	16
Figuur 6 – Significante golfhoogte $H_{m0}$ : terugkeerperiode $T$ op de verschillende uitvoerpunten (ontwerpduur $dt=2u$ ) .....	19





# 1 Inleiding

In het kader van de probabilistische analyse naar het constructief faalgedrag van verschillende kunstwerken in de havens van Oostende en Zeebrugge, zijn bijkomende (directionele) hydraulische randvoorwaarden nodig ter hoogte van de havenmond van Oostende en Zeebrugge.

Ter bepaling van deze randvoorwaarden is dezelfde dataset gebruikt als deze in De Roo *et al.*, 2016a (HR2014). In Hoofdstuk 2 van De Roo *et al.*, 2016b staat uitgebreid gedocumenteerd welke meetlocaties, -instrumentatie en -periodes gebruikt zijn om extreme waterstanden, golfhoogtes en windsnelheden te bepalen. Tabel 1 geeft een beknopt overzicht van deze data.

Tabel 1 – Gebruikte data van Meetnet Vlaamse Banken: Meetlocaties en -periode

	Meetlocatie(s)	Lengte tijdreeks
Waterstand	Oostende maregraaf	89 jaar (1925-2014)
Windsnelheid	Meetpaal (MP) 0, MP7 en Meteopark Zeebrugge	30 jaar (1984-2014)
Significante golfhoogte	Westhinder, ZW-Akkaert	30 jaar (1984-2014)

De hydraulische randvoorwaarden voor een maatgevende stormvloed met een hogere terugkeerperiode  $T$  kunnen niet rechtstreeks vertaald worden uit meetgegevens maar dienen berekend te worden door extrapolatie van deze meetgegevens.

Aangezien er langere tijdreeksen van golf- en windmeetdata bestaan voor meetlocaties op dieper water ('offshore') wordt een extremewaardeanalyse uitgevoerd voor de grootheden op diep water.

Deze meetlocaties geven tevens betrouwbaardere meetwaarden aangezien bijv. een zandbank (in ondieper water) de gemeten golfhoogtes  $H_{m0}$  kan verminderen bij een relatief lage waterstand  $h$ , en deze reductie groter is dan het geval zou zijn bij bijv. een 1000-jarige waterstand. Voor waterstanden  $h$  heeft de getijmeter in Oostende de langste meetreeks; voor deze grootheid wordt verondersteld dat de waterstanden  $h$  op diep water gelijk zijn.

De bepaalde extreme waarden worden nadien vertaald van diep naar ondiep water gebruik makende van het numeriek spectraal golfmodel SWAN (Simulating WAVes Nearshore, ontwikkeld door TUDelft). De hydraulische randvoorwaarden op ondiep water worden bekomen voor de betreffende kustsecties na een statistische analyse op de getransformeerde grootheden. Dit leidt tot locatiespecifieke waarden voor de maatgevende stormvloed.

De hydraulische randvoorwaarden worden opgesteld voor elke windsector tussen Z en NO (wijzerzin): i.e. Z, ZZW, ZW, WZW, W, WNW, NW, NNW, N, NNO en NO (sectorbreedte: 22.5°) voor de grootheden waterstand en significante golfhoogte. Voor de windsnelheid worden deze opgesteld voor alle windsectoren, dus bijkomend ook voor windsectoren ONO, O, OZO, ZO en ZZO.

Hierbij wordt verondersteld dat de golfrichting en de windrichting in diep water gelijk zijn. Voor elke grootheid wordt dus een directionele waarde voor de extreme overschrijdingskans bepaald.

Teneinde het schadeverloop van structuren (vb. zeedijk, havendam, kaaimuur) ten gevolge van de maatgevende stormvloed te voorspellen, zijn de hydraulische randvoorwaarden opgesteld voor een belastingsduur van  $dt=2u$ , de kenmerkende ontwerpduur voor golfoverslag. Deze laatste ontwerpduur wordt berekend door een gecentreerd gemiddelde uit te voeren op de originele meetreeksen van golven en wind, waarbij de waarde op tijdstip  $t$  resulteert uit het gemiddelde van de grootte over het tijdsinterval  $t-1h$  en  $t+1h$ .

## 2 Waterstand

De totale waterstand  $h$  wordt bepaald door een astronomische tij-component  $h_{AT}$  en een stormopzet-component  $O$ . Beide componenten zijn onafhankelijk van elkaar. Het astronomisch getij  $h_{AT}$  is deterministisch, en wordt bepaald door de stand van de hemellichamen. De stormopzet  $O$  is stochastisch, en wordt veroorzaakt door de wind. Enkel op de stormopzet  $O$  is een extremewaardeanalyse uitgevoerd.

### 2.1 Stormopzet $O$

Hiervoor is de scheve stormopzet  $O$  bepaald:

$$O = h_{max} - h_{AT,max}$$

De maxima van de voorspelde en opgetreden waterstand komen dus niet noodzakelijk op hetzelfde tijdstip voor.

Op deze reeks van scheve stormopzetten  $O$  is een selectie uitgevoerd om tot onafhankelijke *Peak-over-Threshold* (POT) waarden te komen, waarop vervolgens een extremewaardeverdeling wordt gefit.

De toegepaste onafhankelijkscriteria zijn:

- Tussen 2 extremen dient een tijdsduur  $\geq 36u$  te zijn.
- De drempelwaarde voor stormopzet  $O$ :  $x_{t,minO} = 0.4m$
- 2 stormvloeden zijn slechts onafhankelijk van elkaar indien de stormopzet  $O$  tussen beiden gedaald is tot  $x_{t,minO}$

Richtingsafhankelijkheid wordt bekomen door indeling van elke geselecteerde POT-stormopzet  $O$  volgens de windsector die op dit tijdstip voorkwam. Echter, de opbouw van een stormvloed op de Noordzee, en dus de maximale stormopzet  $O$ , is een proces dat enkele dagen kan duren (Technum *et al.*, 2002). De windsector die voorkomt op het tijdstip van de POT-stormopzet  $O$  is dus erg variabel. Daarom worden ook de POT-stormopzetten  $O$  horende bij naburige windsectoren meegenomen ter bepaling van de extremewaardeverdeling voor de stormopzet  $O$  van de desbetreffende windsector.

Tabel 2 geeft een overzicht van de hydraulische en statistische resultaten voor de stormopzet  $O$  per windsector. Bemerkt dat, aangezien de extremewaardeanalyse uitgevoerd is op elke windsector en diens naburige sectoren (= sectorbreedte:  $67.5^\circ$ ), de hydraulische resultaten voor de gekalibreerde verdelingen van deze directionele stormopzet  $O$  dienen herleid te worden naar de oorspronkelijke  $22.5^\circ$  brede sector<sup>1</sup>. Het zijn deze resultaten voor de oorspronkelijke sectorbreedte die getabelleerd zijn.

Lineair asymptotisch staartgedrag wordt voor alle windsectoren bekomen in de exponentiële kwantielplot. Bijgevolg worden de parameters van de extremewaardeverdeling gekalibreerd in deze kwantielplot. De drempelwaarde  $x_{t,o}$  is de geoptimaliseerde drempelwaarde voor elke windsector; de kolom #POT >  $x_{t,o}$  geeft het aantal POT-waarden boven de drempel  $x_{t,o}$  voor de uitgebreide windsector weer.

Aan de hand van deze gekalibreerde parameters, en het type verdeling, wordt het verband tussen de gewenste terugkeerperiode  $T$  en de stormopzet  $O$  berekend als:

---

<sup>1</sup> De representatieve kans voor een sectorbreedte  $22.5^\circ$  wordt bekomen door de kans van de gebeurtenis binnen de beschouwde sector van  $67.5^\circ$  te delen door 3.

$$P(O > o | o > o_0) = \frac{1}{T} \cdot \frac{m}{\#POT > x_{t,O}} = \exp\left(-\left(\frac{o - x_{t,O}}{\beta}\right)^k\right)$$

$$O(T) = \beta \cdot \left(-\ln\left(\frac{1}{\lambda \cdot T}\right)\right)^{1/k} + x_{t,O}$$

Waarin:  $\lambda = \frac{\#POT > x_{t,O}}{m}$ , en  $m$ : de tijdsduur van de meetreeks is (hier:  $m=89$  jaar).

Tabel 2 – Stormopzet  $O$ :  
 gefitte parameters extremewaardeverdeling volgens de *Least Squares* methode en resultaat voor  $T = 1000$  jaar

Hydraulische resultaten		Statistische resultaten				POT > $x_{t,O}$
Windsector	$O$ [cm]	Verdeling	Drempel $x_{t,O}$ [cm]	k [-]	$\beta$ [cm]	
NO	108.38	Exponentieel	42.20	1	16.4193	15
NNO	157.21	Exponentieel	43.20	1	22.6393	41
N	184.51	Exponentieel	58.00	1	23.4272	59
NNW	205.18	Exponentieel	66.00	1	23.3251	104
NW	191.30	Exponentieel	73.00	1	18.8077	144
WNW	190.48	Exponentieel	68.00	1	18.4046	207
W	182.83	Exponentieel	64.76	1	17.5924	219
WZW	164.08	Exponentieel	49.90	1	16.4030	281
ZW	136.78	Exponentieel	41.00	1	13.7604	281
ZZW	116.01	Exponentieel	43.88	1	11.8715	116
Z	96.80	Exponentieel	42.00	1	11.0476	38

## 2.2 Waterstand $h$

De totale waterstand  $h$  wordt bepaald door het toepassen van convolutie op de stormopzetten  $O$  en de astronomische hoogwaters  $h_{AT}$ , en dit voor elke beschouwde windsector. Hierbij is een zeespiegelstijging niet in rekening gebracht.

De overschrijdingsfrequentie van een bepaalde (directionele) waterstand  $h$  is berekend als:

$$P(h > h_1) = \sum_{i=1}^N f(O > (h_1 - h_{AT,i})) / N$$

Waarin:  $h_1$ : de beschouwde waterstand is;  $f(O)$ : de kans dat een stormopzet hoger is dan  $O$ ;  $h_{AT,i}$ : het  $i$ -de astronomische hoogwater  $h_{AT}$ ;  $N$ : het aantal hoogwaters in een Saros periode (=18.6jr).

De kans  $f(O)$  wordt berekend gebruik makende van de gekalibreerde extremewaardeverdeling voor de stormopzet  $O$  (cf. Tabel 2) Aangezien in de statistische analyse ook de naburige windsectoren in rekening gebracht werden, wordt hier evenwel de overschrijdingskans gedeeld door 3.

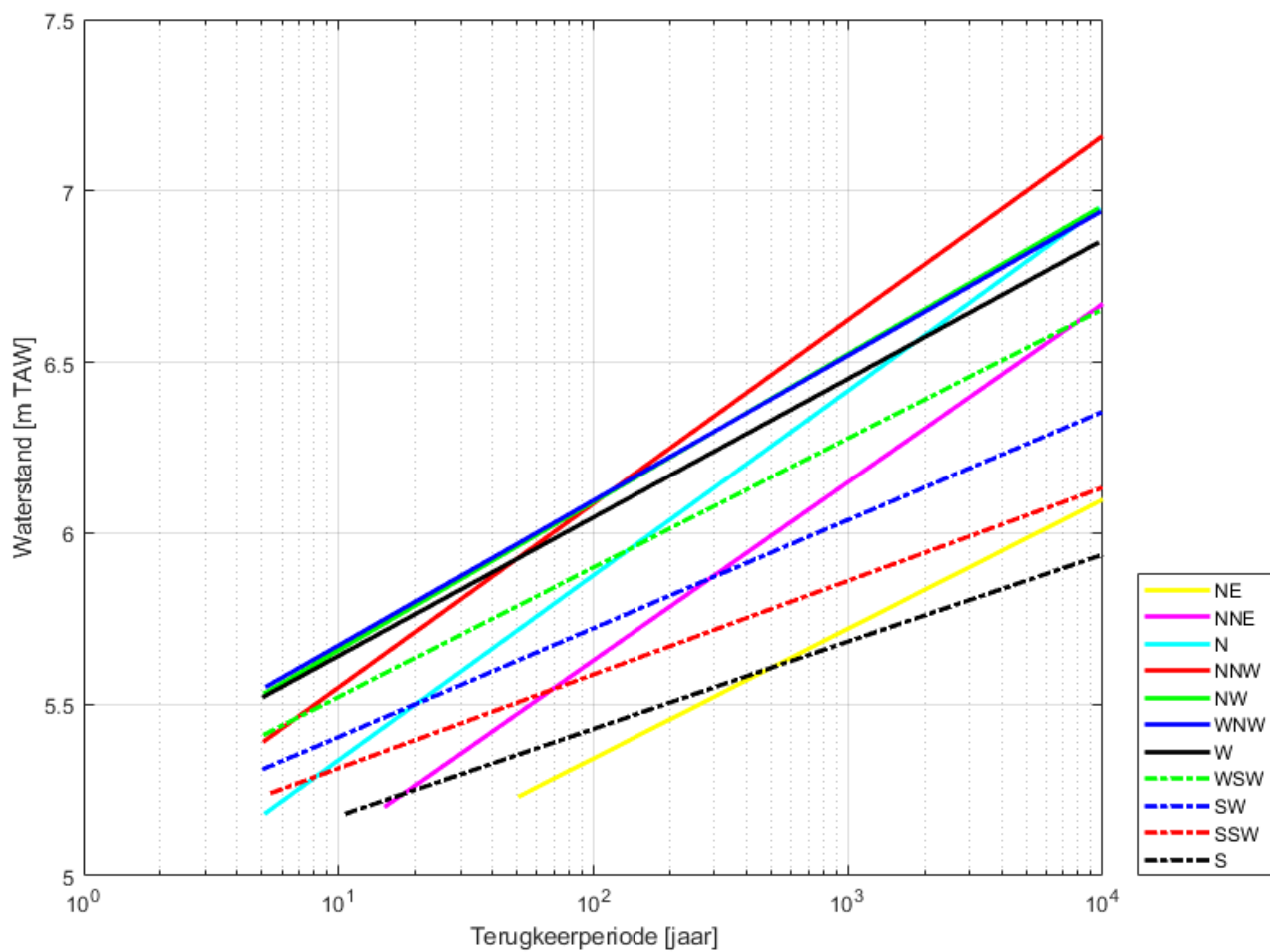
De waterstand  $h$  voor een terugkeerperiode  $T$  wordt dan berekend als:

$$h(T) = \beta \cdot \left(-\log\left(\frac{1}{T}\right)\right)^{1/k} + x_{t,h}$$

Tabel 3 geeft de resultaten die gelden voor de haven van Oostende, voor Zeebrugge dient het verschil in astronomisch springtij, i.e. 0.12 m, hiervan afgetrokken te worden .

Tabel 3 – Waterstand  $h$ :  
parameters extremewaardeverdeling en resultaat voor  $T = 1000$  jaar

Hydraulische resultaten		Statistische resultaten			
Windsector	$h$ [m TAW]	Verdeling	Drempel $x_{t,h}$ [m TAW]	$k$ [-]	$\beta$ [m TAW]
NO	5.720	Exponentieel	4.586	1	0.164
NNO	6.149	Exponentieel	4.585	1	0.226
N	6.416	Exponentieel	4.798	1	0.234
NNW	6.623	Exponentieel	5.012	1	0.233
NW	6.524	Exponentieel	5.225	1	0.188
WNW	6.519	Exponentieel	5.248	1	0.184
W	6.451	Exponentieel	5.236	1	0.176
WZW	6.277	Exponentieel	5.144	1	0.164
ZW	6.038	Exponentieel	5.088	1	0.138
ZZW	5.860	Exponentieel	5.040	1	0.119
Z	5.682	Exponentieel	4.919	1	0.110



Figuur 1 – Directionele extremewaardeverdelingen van de waterstand  $h$  [m TAW]  
(o.b.v. data: maregraaf Oostende)

## 3 Wind

De wind is een belangrijke actor voor stormopzet en windgolven. Daarbij zijn zowel de gemiddelde windsnelheid  $u_w$  (hier: de potentiële windsnelheid op een referentiehoogte van 10m boven het ogenblikkelijke zeeniveau (te Oostende)) als de windrichting  $dir_w$  van belang.

De windsnelheid  $u_w$  wordt bepaald door extremewaardeanalyse. De onafhankelijkheidscriteria ter selectie van de POT-waarden voor de windsnelheid  $u_w$ :

- De drempelwaarde voor windsnelheid  $u_w$ :  $x_{t,min,uw} = 10\text{m/s}$
- Een storm met extreme windsnelheden wordt gedefinieerd in het tijdsvenster waarbinnen de windsnelheden boven deze drempelwaarde  $x_{t,min,uw}$  liggen. Binnen dit tijdvenster wordt voor elke optredende windsector de maximale windsnelheid  $u_w$  geselecteerd als POT-waarde.
- 2 extremen uit een bepaalde windsector zijn slechts onafhankelijk van elkaar indien tussen deze 2 extremen een tijdsduur  $\geq 36\text{h}$  is.

Richtingsafhankelijkheid wordt bekomen door indeling van de windrichtingen  $dir_w$  per windsector in elk stormevent. Nadien wordt voor de optredende windsectoren binnen dit stormevent een POT-windsnelheid  $u_w$  geselecteerd.

De windrichting  $dir_w$  wordt gediscrètiseerd tot 16 windsectoren van elk  $22.5^\circ$  breed. De richtingsafhankelijkheid van de andere grootheden, die statistisch onderzocht worden per windsector, wordt bepaald door het voorkomen van de POT-waarde in een windsector.

Tabel 4 geeft een overzicht van de hydraulische en statistische resultaten voor de gemiddelde windsnelheid  $u_w$  per windsector, en dit voor een ontwerpduur  $dt=2u$ .

Lineair asymptotisch startgedrag wordt, afhankelijk van de windsector, bekomen in de exponentiële of de Weibull kwantielplot. Bijgevolg worden de parameters van de Weibull, respectievelijk exponentiële, extremewaardeverdeling gekalibreerd in deze desbetreffende kwantielplots. De drempelwaarde  $x_{t,uw}$  is de geoptimaliseerde drempelwaarde voor elke windsector.

Aan de hand van deze gekalibreerde parameters, en het type verdeling, wordt het verband tussen de gewenste terugkeerperiode  $T$  en de gemiddelde windsnelheid  $u_w$  berekend als:

$$P(W > w | w > w_0) = \frac{1}{T} \cdot \frac{m}{\#\text{POT} > x_{t,uw}} = \exp\left(-\left(\frac{u_w - x_{t,uw}}{\beta}\right)^k\right)$$
$$u_w(T) = \beta \cdot \left(-\ln\left(\frac{1}{\lambda \cdot T}\right)\right)^{1/k} + x_{t,uw}$$

Waarin:  $\lambda = \frac{\#\text{POT} > x_{t,uw}}{m}$ , en  $m$ : de tijdsduur van de meetreeks is (hier:  $m=29.83$  jaar).



Tabel 4 – Windsnelheid  $u_w$  ( $dt=2u$ ):  
 gefitte parameters extremewaardeverdeling volgens de *Least Squares* methode en resultaat voor  $T = 1000$  jaar

Hydraulische resultaten		Statistische resultaten					POT > $x_{t,uw}$
Windsector	$u_w$ [m/s]	Verdeling	Drempel $x_{t,uw}$ [m/s]	Locatiepar.	k [-]	$\beta$ [m/s]	
NO	27.248	Exponentieel	13.910	13.910	1	1.669	88
NNO	29.020	Exponentieel	12.803	12.800	1	1.973	111
N	26.740	Weibull	12.120	12.120	1.01	1.872	91
NNW	26.820	Weibull	13.190	13.100	1.25	2.520	118
NW	25.590	Weibull	15.051	15.000	1.34	2.216	100
WNW	32.112	Weibull	13.914	13.900	1.15	2.788	175
W	36.729	Exponentieel	13.766	13.766	1	2.573	224
WZW	32.288	Weibull	15.700	15.700	1.24	2.913	174
ZW	34.152	Weibull	16.130	16.100	1.14	2.675	196
ZZW	29.684	Weibull	15.540	15.500	1.20	2.363	154
Z	27.503	Weibull	14.520	14.500	1.05	1.704	140
ZZO	24.877	Exponentieel	14.202	14.200	1	1.365	74
ZO	24.119	Exponentieel	12.313	12.310	1	1.474	90
OZO	25.644	Exponentieel	11.269	11.260	1	1.741	115
O	26.835	Exponentieel	12.158	12.150	1	1.774	117
ONO	28.155	Exponentieel	12.970	12.970	1	1.845	112

## 4 Golven

### 4.1 Diep water

Het kortkruinig golfklimaat wordt gekarakteriseerd door de significante golfhoogte  $H_{m0}$ , de –piekperiode  $T_p$ , de -richting (hier: gelijk genomen aan de heersende windsector) en de directionele spreiding  $\sigma$ .

De significante golfhoogte  $H_{m0}$ , berekend als  $1.06 \cdot H_{1/3}$ , wordt bepaald door extremewaardeanalyse. De onafhankelijkheidscriteria ter selectie van de POT-waarden voor de significante golfhoogte  $H_{m0}$ :

- Tussen 2 extremen dient een tijdsduur  $\geq 36$ h te zijn.
- De drempelwaarde voor significante golfhoogte  $H_{m0}$ :  $X_{t,min,Hm0} = 2.5$ m
- 2 stormen zijn slechts onafhankelijk van elkaar indien de significante golfhoogte  $H_{m0}$  tussen beiden gedaald is tot een minimum golfhoogte  $\leq 66\%$  van de laagste van deze 2 opeenvolgende golfhoogtes.
- Richtingsafhankelijkheid wordt bekomen door indeling van elke geselecteerde POT-golfhoogte volgens de windsector die op dit tijdstip voorkwam.

De golfpiekperiode  $T_p$  wordt bepaald uit diens relatie tot de significante golfhoogte  $H_{m0}$ . Gebruik makend van (gelijktijdige) golfperiode data van 2 boeien op Westhinder (Wavec: 1998-2011 en Directionele Waverider: 2006-nu) is een relatie opgesteld tot de POT-golfhoogtes  $H_{m0}$ . Voor een ontwerpduur van  $dt=2u$  geldt:

$$T_p = 4.71 \cdot H_{m0}^{0.429}$$

De (eenzijdige) directionele spreiding  $\sigma$  [°] is empirisch berekend, gebruik makende van de spreidingsparameter  $s_{max}$  (Goda, 2000):

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{2}{s_{max}+1}\right)} \cdot \frac{180}{\pi}$$

Waarin:  $s_{max}$  bepaald is uit de relatie tussen de relatieve waterdiepte  $h/L_0$  en de spreidingsparameter  $s_{max,0}$  op diep water (zie Figuur 3-2 in De Roo *et al.*, 2016b), en de spreidingsparameter  $s$  voorstelt voor de piekfrequentie  $f_p$  (waar de directionele spreiding het kleinst is). Eenzelfde directionele spreiding wordt toegepast voor alle windsectoren.

Bemerk dat de meetlocatie WHI vaak als diep water gedefinieerd wordt, maar uiteraard, rekening houdend met de definitie van diep water ( $h \geq L_0/2$ ), eerder in het overgangsgebied naar ondiep water ligt. Daarom is de spreidingsparameter  $s_{max,0} = 10$  gesteld (uit Goda, 2000). De spreidingsparameter  $s_{max}$  op ondiep water, i.e. op de waterdiepte t.h.v. WHI, resulteerde dan uit Figuur 3-2 (met een loodrechte invalshoek als hoofdgolfrichting voor de diepwater golven:  $(\alpha_p)_0 = 0^\circ$ ). Voor WHI bedroeg deze gemiddeld  $s_{max} = 12$ . Een (eenzijdige) directionele spreiding  $\sigma = 22.5^\circ$  wordt zo bekomen voor de diep water condities in het Belgisch Continentaal Plat.

Tabel 5 geeft een overzicht van de hydraulische en statistische resultaten voor de significante golfhoogte  $H_{m0}$  per windsector, en dit voor een ontwerpduur  $dt=2u$ . Bemerk dat, voor windsector Z, de extremewaardeverdeling gebaseerd is op slechts 8 POT-waarden.

Lineair asymptotisch staartgedrag wordt, afhankelijk van de windsector, bekomen in de exponentiële of de Weibull kwantielplot. Bijgevolg worden de parameters van de Weibull, respectievelijk exponentiële, extremewaardeverdeling gekalibreerd in de desbetreffende kwantielplots. De drempelwaarde  $X_{t,Hm0}$  is de geoptimaliseerde drempelwaarde voor elke windsector.

Aan de hand van deze gekalibreerde parameters, en het type verdeling, wordt het verband tussen de gewenste terugkeerperiode  $T$  en de significante golfhoogte  $H_{m0}$  berekend als:

$$P(H_{m0} > h_s | h_s > h_{s,0}) = \frac{1}{T} \cdot \frac{m}{\#POT > x_{t,Hm0}} = \exp\left(-\left(\frac{H_{m0} - x_{t,Hm0}}{\beta}\right)^k\right)$$

$$H_{m0}(T) = \beta \cdot \left(-\log\left(\frac{1}{\lambda \cdot T}\right)\right)^{1/k} + x_{t,Hm0}$$

Waarin:  $\lambda = \frac{\#POT > x_{t,Hm0}}{m}$ , en  $m$ : de tijdsduur van de meetreeks is (hier:  $m=29.83$  jaar).

Tabel 5 – Significante golfhoogte  $H_{m0}$  ( $dt=2u$ ):  
gefitted parameters extremewaardeverdeling volgens de *Least Squares* methode en resultaat voor  $T = 1000$  jaar

Hydraulische resultaten		Statistische resultaten					POT > $x_{t,Hm0}$
Windsector	$H_{m0}$ [m]	Verdeling	Drempel $x_{t,Hm0}$ [m]	Locatiepar.	k [-]	$\beta$ [m]	
NO	4.923	Weibull	2.784	2.78	1.21	0.454	21
NNO	6.141	Weibull	2.742	2.74	1.26	0.753	23
N	6.140	Weibull	3.164	3.16	1.12	0.543	26
NNW	5.693	Weibull	3.424	3.42	1.26	0.495	27
NW	5.666	Weibull	2.906	2.90	1.49	0.738	40
WNW	7.074	Exponentieel	3.238	3.23	1	0.555	30
W	7.056	Weibull	2.930	2.93	1.11	0.743	25
WZW	7.803	Exponentieel	2.507	2.50	1	0.684	69
ZW	6.767	Exponentieel	3.182	3.18	1	0.467	64
ZZW	6.218	Exponentieel	2.895	2.89	1	0.455	44
Z	4.949	Exponentieel	2.512	2.51	1	0.436	8

## 4.2 Transformatie naar ondiep water met SWAN

De transformatie van de hydraulische randvoorwaarden van diep naar ondiep water, en de aanpassing van het golfveld aan deze bathymetrie, gebeurt met het numeriek model SWAN (Simulating WAVes Nearshore, v41.01 (februari 2015)), ontwikkeld door TUDelft.

Een matrix van hydraulische randvoorwaarden op diep water wordt doorgerekend voor elke windsector tussen NO en Z (tegenwijzerzin). Deze matrix is opgesteld aan de hand van de overschrijdingskansen van verschillende klassen van significante golfhoogtes  $H_{m0}$ . Voor deze kansen worden steeds de bijhorende waterstand  $h$  en windsnelheid  $u_w$  bepaald. Er wordt dus verondersteld dat, indien een 1000-jarige significante golfhoogte  $H_{m0}$  voorkomt, de waterstand  $h$  en windsnelheid  $u_w$  ook een 1000-jarige terugkeerperiode  $T$  hebben (voor dezelfde windsector). Elke simulatie heeft aldus een bepaalde kans van voorkomen. Voor de vorm van het golfspectrum voor deze stormevents wordt een JONSWAP spectrum met  $\gamma=3.3$  aangenomen. De golfpiekperiode  $T_p$  resulteert uit diens opgestelde verband tot de significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor elke ontwerpduur; de (eenzijdige) directionele spreiding  $\sigma = 22.5^\circ$  van de golven resulteert in een  $MS = 5$  als input voor SWAN (cf. tabel A.1 van TUDelft (2015)).

Een dieptemodel voor het Belgisch Continentaal Plat is met een resolutie van 20x20m beschikbaar (Vlaamse Hydrografie, 2015b). Voor het bathymetrisch gedeelte voor de Franse en Nederlandse kust zijn respectievelijk zeekaarten en data van Rijkswaterstaat gebruikt (Defevere et al., 2000, zie ook KUL & WL, 2004 §4.2.3.2.). Het geheel wordt als bathymetrie in SWAN aangemaakt op een roosterresolutie van 250x250m (rekenrooster idem). Lente 2020 werd een nieuw bathymetrisch rooster opgemaakt met een fijnere resolutie van 50x50m op basis van de meest recente peilingen van het Belgisch Continentaal Plat en het Nederlandse gedeelte van de Noordzee tot aan de Westerscheldemonding (50% > 2015) (Figuur 3).

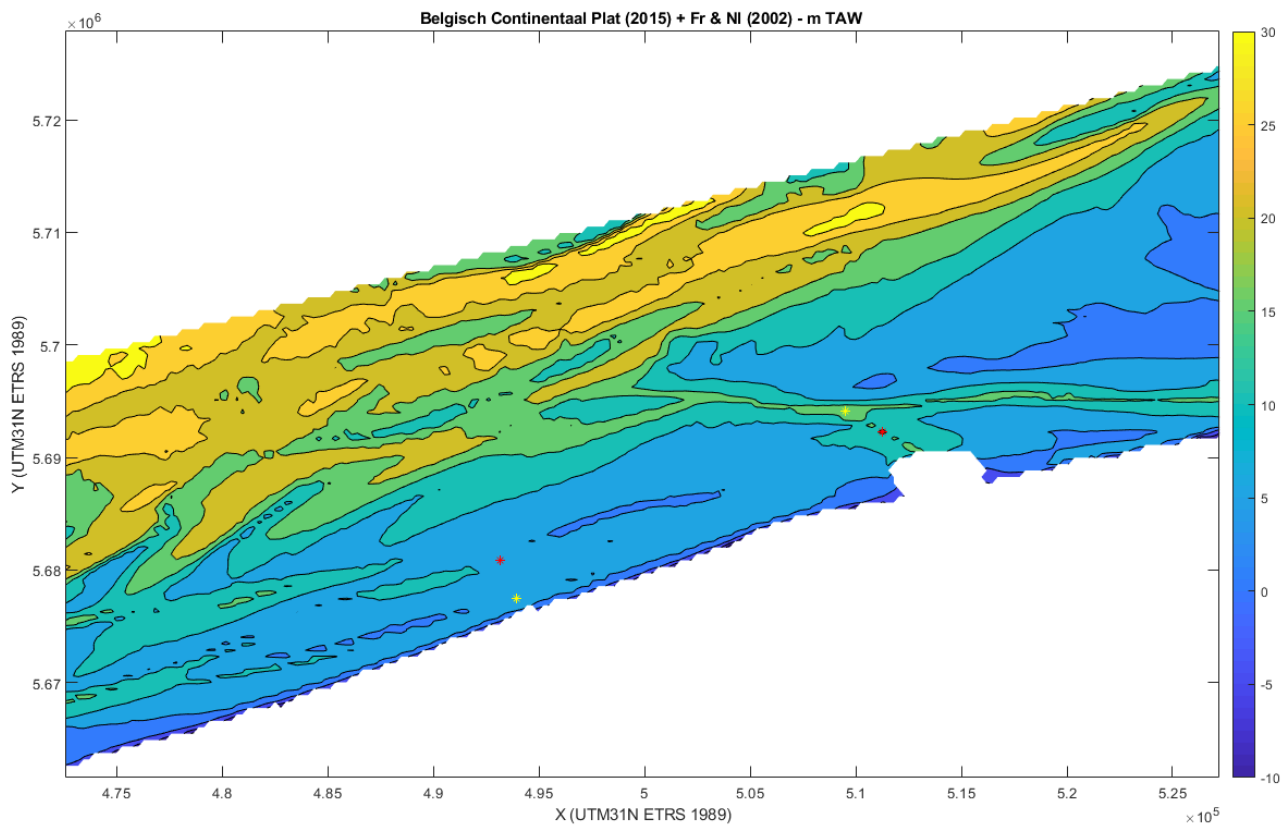
Ter hoogte van de haven van Oostende (kustsectie 117) wordt het uitvoerpunt van de Toetsing 2015 gebruikt ('OST1'). Gebruik makende van het nieuwe SWAN bathymetrisch rooster zijn bijkomend 2 uitvoerpunten gedefinieerd die zich wat ten Westen van OST1 situeren, 'OST2' en 'OST3' resp. (Figuur 4). Bemerkt dat het SWAN rekenrooster van dit bathymetrisch rooster verschilt; het heeft een resolutie van 125x250m.

Ter hoogte van de haven van Zeebrugge (geen gedefinieerd kustsectienummer) wordt het uitvoerpunt van het project overstromingsrisico gebruikt (Nguyen & Vanneste, 2019) ('ZBG1'), en bijkomend een uitvoerpunt dat ook in de vaargeul maar dichterbij de haven gelegen is ('ZBG2'), op 5 loodrechte roostercellen van de zuidelijke roosterrand.

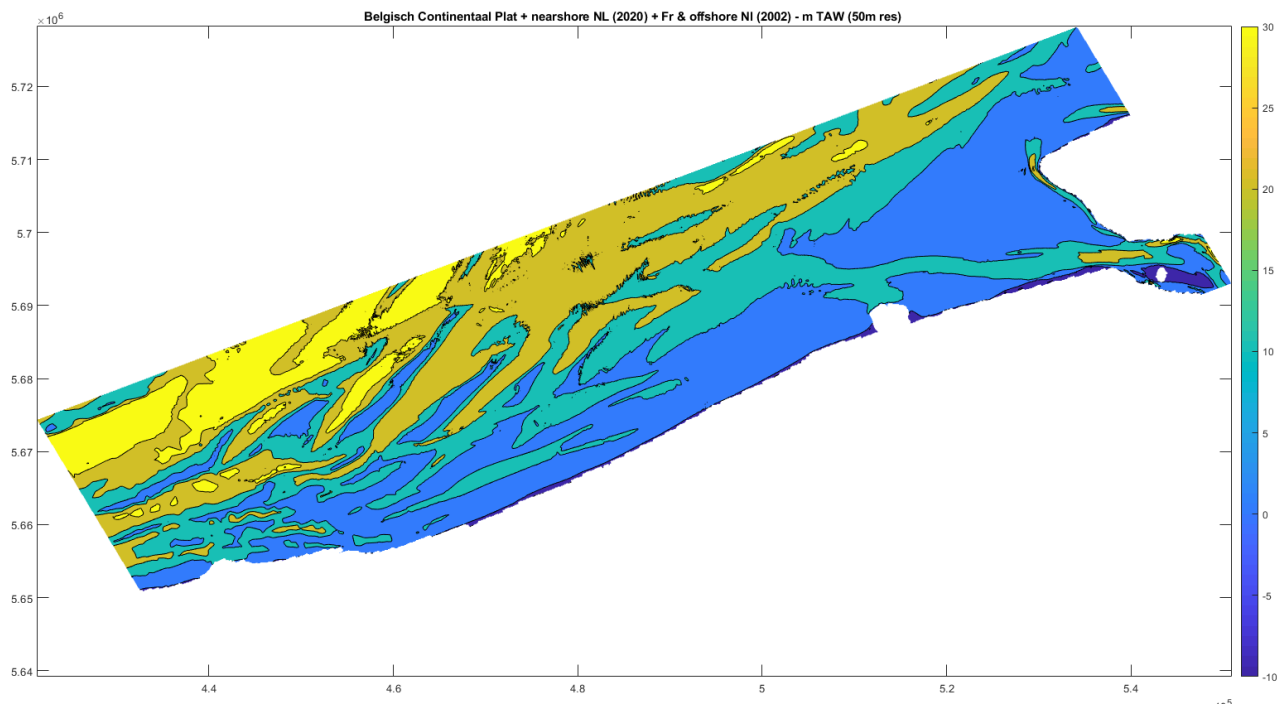
Tabel 6 vat de informatie van deze uitvoerpunten samen, tevens geïllustreerd in Figuur 2 en Figuur 4.

Tabel 6 – Info uitvoerpunten havens van Oostende en Zeebrugge (z op BCP 2020)

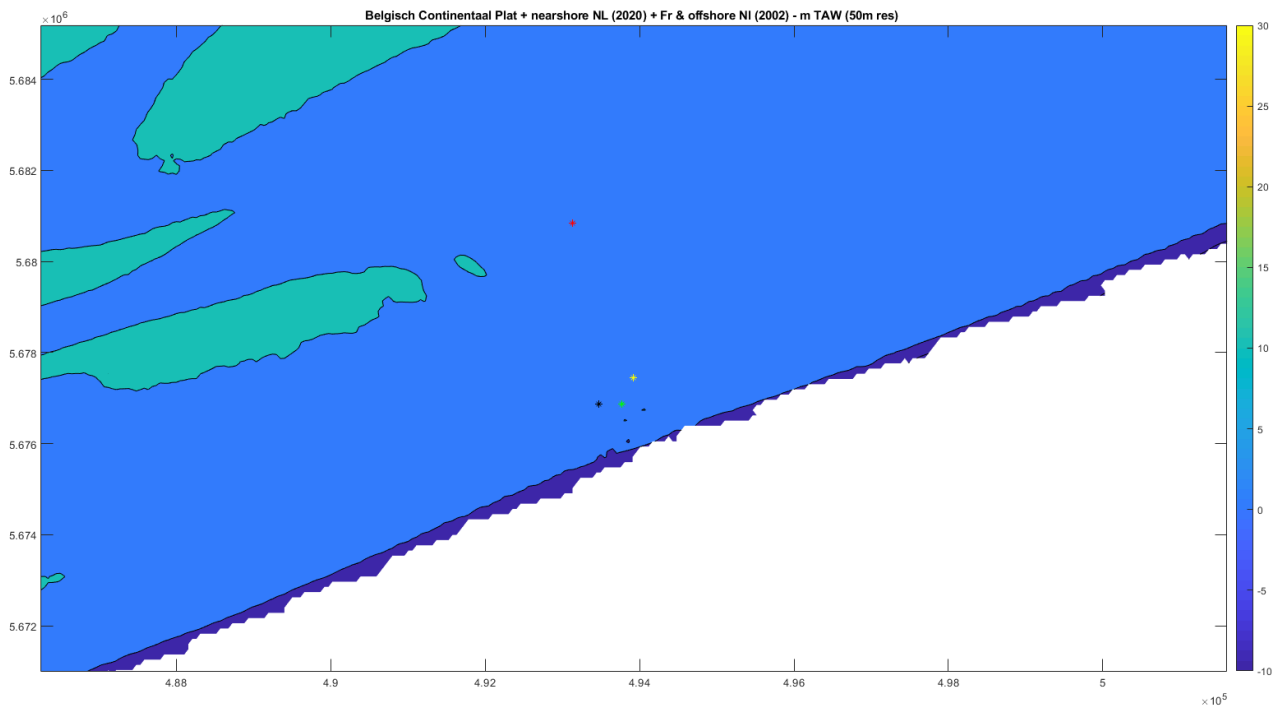
	X [UTM31 WGS84]	Y [UTM31 WGS84]	z [m TAW]
OST1 (16_014)	493920.54	5677439.60	-8.34 (-7.78)
ZBG1 (16_122)	509519.00	5694115.00	-16.84
ZBG2	511277.55	5692256.46	-16.60
OST2	493475.95	5676862.67	(-8.17)
OST3	493773.60	5676875.90	(-8.57)



Figuur 2 – SWAN bathymetrisch rooster van het Belgisch Continentaal Plat (2015) met uitvoerpunten ter hoogte van havens Oostende en Zeebrugge – resolutie 250x250m



Figuur 3 – SWAN bathymetrisch rooster van het Belgisch Continentaal Plat (2020) – resolutie 50x50m



Figuur 4 – Uitvoerpunten ter hoogte van de haven van Oostende (OST1: geel, OST2: zwart, OST3: groen)

#### 4.2.1 Transformatie voor windsectoren NO tot W

De matrix van door te rekenen hydraulische randvoorwaarden is opgesteld aan de hand van de overschrijdingskansen van verschillende klassen van significante golfhoogtes  $H_{m0}$  tussen 4.6 en 7.6m (breedte klasse: 0.2m, aantal klassen: 16). Dit vertaalt zich naar significante golfhoogtes  $H_{m0}$  tussen 3.89 en 6.44 m ter hoogte van de uitvoerpunten (algemeen).

Afhankelijk van de golf- en windrichting die opgelegd worden op diep water, treedt tijdens de transformatie een mate van refractie en shoaling op, wat resulteert in een locatiespecifieke hoekverdraaiing voor de golven op ondiep water. Deze hoekverdraaiing is ook afhankelijk van de opgelegde golfhoogte en windsnelheid. Hogere golven en windsnelheden resulteren in een kleinere hoekverdraaiing dan lagere waarden.

Soms overschrijdt deze hoekverdraaiing nipt de sectorgrens voor enkele waarden (van de 16 runs/windsector). Daarom zijn deze grenzen gerelaxeerd voor N (start 0.75° lager dan theoretisch: vanaf 348° ipv 348.75°) en WNW (start 2° lager: vanaf 279.2° ipv 281.25°). Zodoende kunnen deze waarden, en hun probabiteit, meegenomen worden in de overheersende sector. Tabel 7 geeft een overzicht van de hoekverdraaiingen, en duidt aan waar de kleine aanpassingen van de sectorgrens invloed hebben.

Tabel 7 – Locatiespecifieke hoekverdraaiing golfrichting tussen diep en ondiep water

Wind- en golfrichting op diep water	OST 1	ZBG 1	ZBG 2
NO (45°)	<b>NNO</b>	<b>NNO</b>	<b>NNO</b>
NNO (22.5°)	<b>N</b>	<b>N</b>	<b>N</b>
N (0°)	<b>NNW</b>	<b>NNW</b>	$H_{m0,off} \leq 5.8\text{m}$ : 348-348.7°, $H_{m0,off} \geq 6.0\text{m}$ : 348.9-350.6°) -> <b>N</b>
NNW (337.5°)	<b>NNW</b>	<b>NW</b>	<b>NNW</b>
NW (315°)	<b>NW</b>	<b>NW</b>	<b>NW</b>
WNW (292.5°)	<b>WNW</b>	<b>WNW</b>	<b>WNW</b>
W (270°)	<b>WNW</b>	<b>W</b>	WNW ( $H_{m0,off} \leq 6.4\text{m}$ ) - W ( $H_{m0,off} \geq 6.6\text{m}$ : 279°) -> <b>WNW</b>

#### 4.2.2 Transformatie voor de windsectoren W tot Z

De matrix van door te rekenen hydraulische randvoorwaarden is opgesteld aan de hand van de overschrijdingskansen van verschillende klassen van significante golfhoogtes  $H_{m0}$  tussen 4.0 en 7.6m (breedte klasse: 0.2m, aantal klassen: 19). Dit vertaalt zich naar significante golfhoogtes  $H_{m0}$  tussen 1.68 en 5.31 m ter hoogte van de uitvoerpunten (algemeen).

Afhankelijk van de golf- en windrichting die opgelegd worden op diep water, treedt tijdens de transformatie een mate van refractie en shoaling op, wat resulteert in een locatiespecifieke hoekverdraaiing voor de golven op ondiep water. Deze hoekverdraaiing is ook afhankelijk van de opgelegde golfhoogte en windsnelheid. Hogere golven en windsnelheden resulteren in een kleinere hoekverdraaiing dan lagere waarden.

Soms overschrijdt deze hoekverdraaiing nipt de sectorgrens voor enkele waarden (van de 16 runs/windsector). Daarom zijn deze grenzen gerelaxeerd voor WNW (start 0.5° lager dan theoretisch: vanaf 280.75° i.p.v. 281.25°), W (start 1° lager: vanaf 257.7° i.p.v. 258.75°) en WZW (start 0.05° hoger: vanaf 236.3° i.p.v. 236.25°). Zodoende kunnen deze waarden, en hun kansen, meegenomen worden in de overheersende sector. Tabel 8 geeft een overzicht van de hoekverdraaiingen, en duidt aan waar de kleine aanpassingen van de sectorgrens invloed hebben. Bemerkt dat, hoewel OST2 en OST3 nabij elkaar gelegen zijn, de hoekverdraaiing ter hoogte van beide uitvoerpunten toch ietwat verschilt. Golven komende uit Zuid bijvoorbeeld, resulteren ter hoogte van OST2 in golven uit 235-236°, i.e. windsector ZW; terwijl deze ter hoogte van OST3 resulteren in golven uit 237-238.5°, i.e. windsector WZW.

Bemerkt bijkomend dat OST 1 slechts 2 loodrechte roosterzellen van de zuidelijke rand van het rekenrooster gelegen is in het bathymetrisch rooster van 2015 en de bathymetrie snel ondieper wordt (waardoor veel refractie optreedt); dat geeft waarschijnlijk implicaties naar nauwkeurigheid wat betreft golftransformatie

uit de zuidelijke richtingen. Dit euvel is opgelost gebruik makende van het bathymetrisch rooster van 2020 en fijnere rekenrooster. Uitgezonderd de resultaten voor ZBG 1' zijn dan ook alle hieronder gerapporteerde resultaten bekomen gebruik makende van dit recentere rooster.

Tabel 8 – Locatiespecifieke hoekverdraaiing golfrichting tussen diep en ondiep water

Wind- en golfrichting op diep water	OST1	ZBG1	OST2	OST3
W (270°)	<b>WNW</b>	<b>W</b>	<b>WNW</b>	<b>WNW</b>
WZW (247.5°)	<b>W</b>	WZW ( $H_{m0,off} \leq 5.4\text{m}$ : 257.7° - 258.6°) - W ( $H_{m0,off} \geq 5.6\text{m}$ ) -> <b>W</b>	<b>W</b>	W ( $H_{m0,off} \leq 4.8$ : 279.8° - 281°) - WNW ( $H_{m0,off} \geq 5\text{m}$ ) -> <b>WNW</b>
ZW (225°)	<b>W</b>	<b>WZW</b>	<b>W</b>	<b>W</b>
ZZW (202.5°)	<b>WZW</b>	<b>ZW</b>	<b>WZW</b>	<b>WZW</b>
Z (180°)	<b>ZW</b>	(ZZW:2) <sup>2</sup> / <b>ZW</b>	<b>ZW</b>	<b>WZW</b>

### 4.3 Ondiep water – ter hoogte van de havens

De directionele kans van voorkomen van een bepaalde significante golfhoogte  $H_{m0}$  wordt berekend uit de (som der) kans(en) van de significante golfhoogte(s)  $H_{m0}$  die resulte(e)r(t)(en) naar deze nearshore windsector. Voor elk uitvoerpunt wordt een Weibull extremewaardeverdeling gefit gebruik makende van deze discrete punten. Deze fit resulteert in de locatiespecifieke verdeling van de significante golfhoogte  $H_{m0}$

$$H_{m0}(T) = \beta \cdot \left( -\log\left(\frac{1}{T}\right) \right)^{1/k}$$

De parameters van de gefitte Weibull verdeling zijn opgelijst in Tabel 9. Bijkomend is de drempelwaarde  $x_{t,H_{m0}}$  getabelleerd, die geldt als benedengrens voor gebruik van deze verdeling. Bemerkt dat voor windsectoren WNW en W er 2 parametersets gegeven zijn, dewelke gelden voor de desbetreffende gesimuleerde randvoorwaardenmatrix. Echter, beide fits lijken gelijkaardig maar bestaan wat betreft transformatie voor windsectoren W tot Z uit meer discrete waarden waardoor voor deze (ietwat robuustere) parametersets geopteerd kan worden. Figuur 4 illustreert voor de verschillende uitvoerpunten en verschillende golftransformaties de resulterende terugkeerperiode  $T$  voor verschillende significante golfhoogtes  $H_{m0}$  gegeven de gefitte Weibull extremewaardeverdelingen.

De locatiespecifieke relatie tussen de significante golfhoogtes  $H_{m0}$  en –piekperiodes  $T_p$  is van de vorm  $T_p = A \cdot H_{m0}^B$ . Gegeven de berekende significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor de maatgevende stormvloed, resulteert uit deze relatie de bijhorende golfpiekperiode  $T_p$ . De golfpiekperiode  $T_p$  die bij een significante golfhoogte  $H_{m0}$  hoort, is deze met de maximale probabilliteit (geldend voor deze  $H_{m0}$ - condities). In sommige nearshore

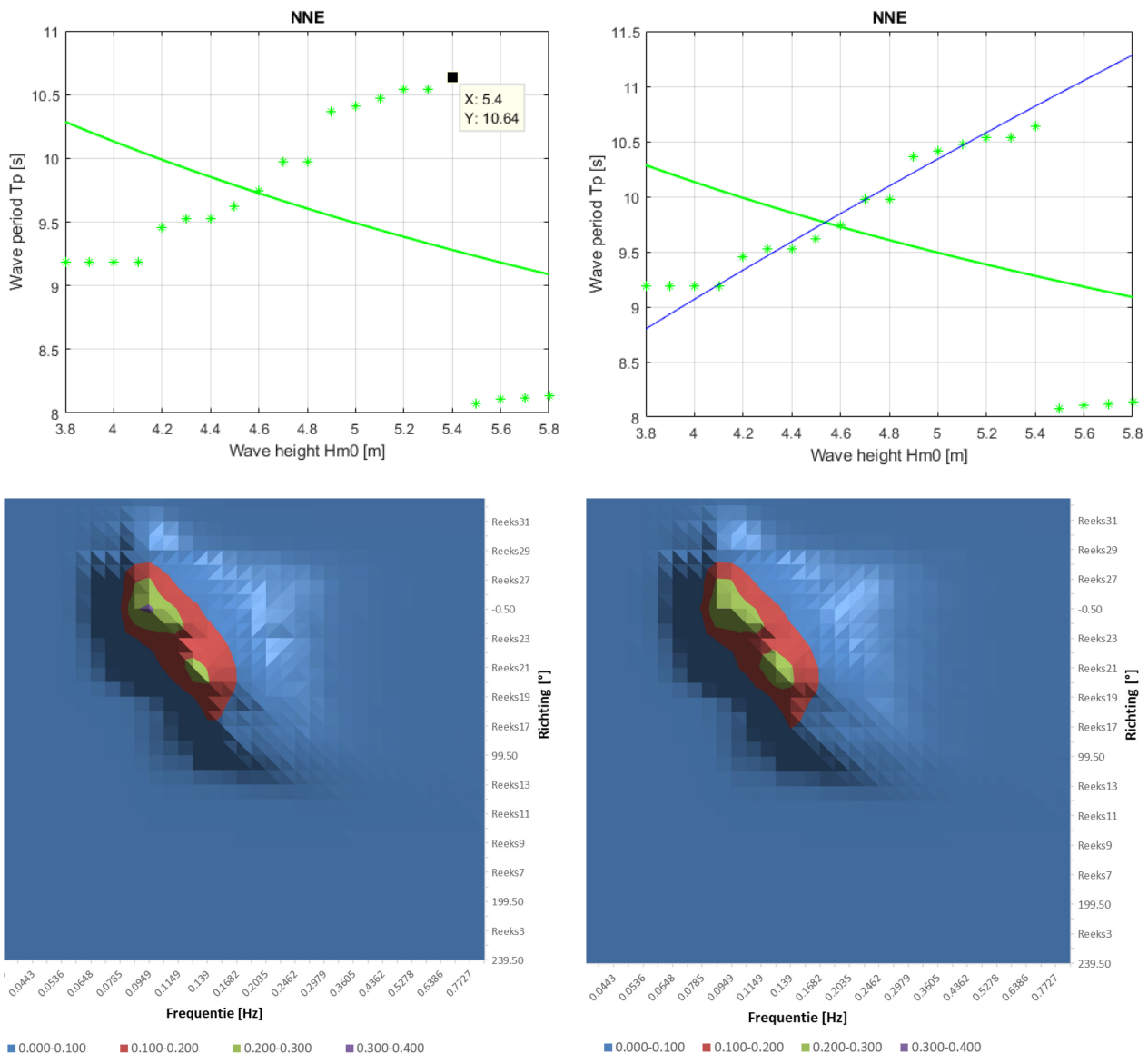


sectoren is het opstellen van een machtsfunctie niet zo eenduidig; bijvoorbeeld in deze met waarden resulterend uit verschillende offshore windsectoren.

In laatstgenoemd voorbeeld is geopteerd om de machtsfunctie te bepalen gebruik makende van de hoogste golfpiekperiodes. Hierdoor is dit niet steeds de golfpiekperiode met maximale probabiteit (wel zo veel mogelijk). Bovenstaande is toegepast voor uitvoerpunt ZBG 2 en nearshore windsector WNW.

Figuur 3 illustreert nog een ander voorbeeld; i.e. wat er gebeurt bij een golftransformatie uit offshore NO-richting. Ten gevolge van refractie treedt een hoekverdraaiing op, resulterend in een nearshore NNO-richting. Uit het opgelegde JONSWAP enkeltoppig spectrum resulteert een dubbeltoppig spectrum, waarbij de golfpiekperiode  $T_p$  naar de lagere top 'springt' vanaf een  $H_{m0} = 5.5\text{m}$ . In zo'n situatie is er geopteerd om de machtsfunctie tussen  $H_{m0}$  en  $T_p$  te bepalen zonder deze lagere  $T_p$ -waarden. Dit is ook toegepast voor uitvoerpunt ZBG 1 en nearshore windsector W.

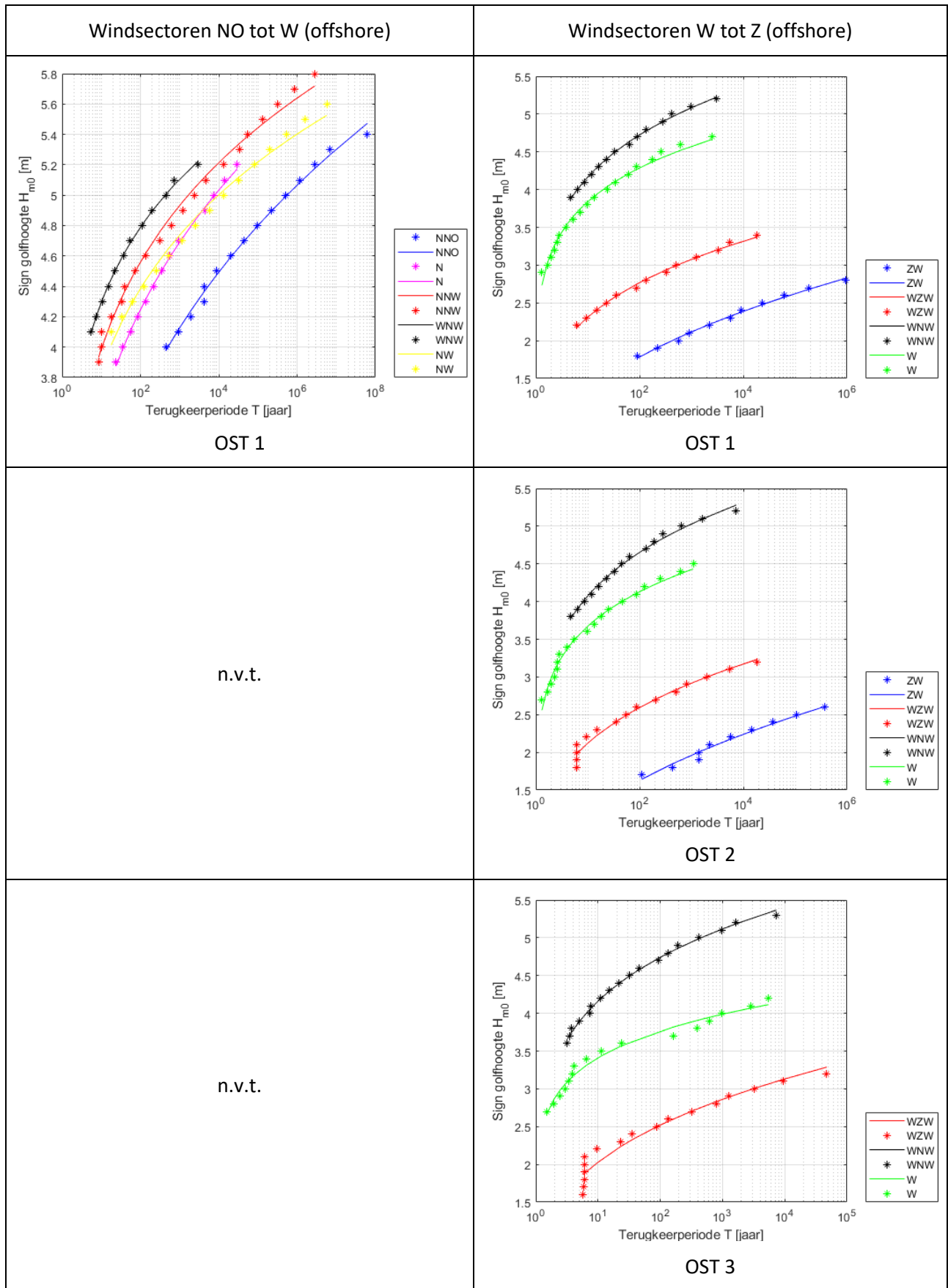
De parameters van de machtsfunctie tussen de significante golfhoogte  $H_{m0}$  en golfpiekperiode  $T_p$  zijn opgelijst in Tabel 10, alsook de drempelwaarde  $x_{t,Hm0}$  die geldt als benedengrens voor gebruik van deze functie.

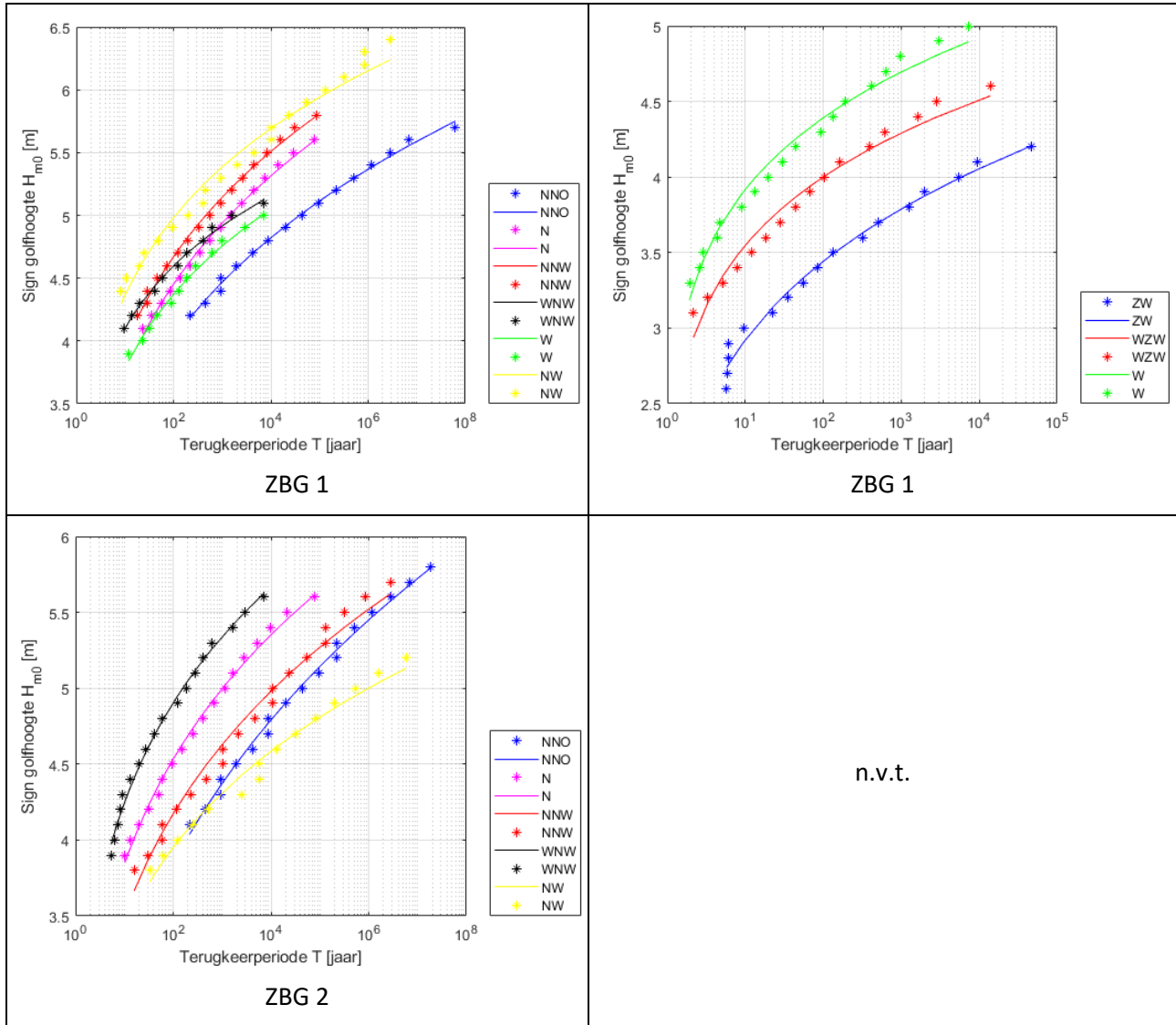


Figuur 5 – Voorbeeld dubbeltoppig spectrum: uitvoerpunt ZBG2 – richting NNO

Tabel 9 – Significante golfhoogte  $H_{m0}$ :  
parameters directionele Weibullverdeling (ontwerpduur  $dt=2u$ ) (indien 2 waarden: NO tot W / W tot Z)

Windsector op ondiep water	Locatie	Statistische resultaten			
		Verdeling	Drempel $x_{t,H_{m0}}$ [m]	k	$\beta$
NNO	OST1	Weibull	3.976	3.382	2.330
	ZBG1	Weibull	4.182	3.783	2.681
	ZBG2	Weibull	4.038	3.148	2.366
N	OST1	Weibull	3.874	4.079	2.921
	ZBG1	Weibull	4.100	3.918	3.016
	ZBG2	Weibull	3.850	4.176	3.145
NNW	OST1	Weibull	3.900	5.172	3.394
	ZBG1	Weibull	4.200	4.206	3.249
	ZBG2	Weibull	3.800	3.927	2.829
NW	OST1	Weibull	4.100	5.272	3.283
	ZBG1	Weibull	4.350	5.213	3.717
	ZBG2	Weibull	3.800	4.668	2.849
WNW	OST1	Weibull	4.100/3.900	6.352/5.015	3.766/3.581
	ZBG1	Weibull	4.100	6.046/-	3.572/-
	ZBG2	Weibull	3.900	4.787	3.565
	OST2	Weibull	3.800	5.213	3.472
	OST3	Weibull	3.600	5.315	3.557
	OST1	Weibull	2.900	6.281	3.362
W	ZBG1	Weibull	3.900/3.300	4.797/6.072	3.179/3.416
	OST2	Weibull	2.700	5.902	3.189
	OST3	Weibull	2.700	7.021	3.028
	OST1	Weibull	2.200	3.834	1.858
WZW	ZBG1	Weibull	3.000	5.780	3.071
	OST2	Weibull	2.000	3.442	1.664
	OST3	Weibull	2.000	3.196	1.563
	OST1	Weibull	1.767	2.379	0.939
ZW	ZBG1	Weibull	2.760	4.229	2.399
	OST2	Weibull	1.644	2.172	0.806
	OST3	-			





Figuur 6 – Significante golfhoogte  $H_{m0}$ : terugkeerperiode  $T$  op de verschillende uitvoerpunten (ontwerpduur  $dt=2u$ )

Tabel 10 – Golfpiekperiode  $T_p$ : parameters directionele machtsfunctie (indien 2 waarden: NO tot W / W tot Z)

	OST1			ZBG1			ZBG2			OST2			OST3		
	$X_{t,Hm0}$ [m]	A	B	$X_{t,Hm0}$ [m]	A	B	$X_{t,Hm0}$ [m]	A	B	$X_{t,Hm0}$ [m]	A	B	$X_{t,Hm0}$ [m]	A	B
NNO	4.0	3.94	0.63	4.3	3.42	0.69	4.1	4.01	0.59	n.v.t.			n.v.t.		
N	4.0	3.14	0.81	4.2	3.27	0.75	4.0	3.57	0.69	n.v.t.			n.v.t.		
NNW	4.2	3.57	0.71	4.3	3.09	0.77	3.8	5.16	0.46	n.v.t.			n.v.t.		
NW	4.2	3.41	0.74	4.5	3.63	0.64	3.8	4.39	0.59	n.v.t.			n.v.t.		
WNW	4.2/ 3.9	3.72/ 3.06	0.68/	4.2	2.33	0.99	4.3	2.21	0.98	3.8	3.26	0.77	3.8	3.31	0.76
W	-/ 2.9	-/3.6	-/ 0.73	3.9/ 3.6	2.36/ 3.39	1.02/ 0.74	-/ n.v.t.			2.7	3.91	0.69	2.7	5.28	0.42
WZW	2.2	4.90	0.39	3.0	5.45	0.24	n.v.t.			2.1	5.20	0.35	2.1	5.18	0.37
ZW	1.8	4.63	0.38	2.3	4.50	0.40	n.v.t.			1.7	5.02	0.30	-	-	-
ZZW	-	-	-	2.6			n.v.t.			-	-	-	-	-	-

## 5 Besluit

Voor de probabilistische analyse van het constructief faalgedrag van verschillende kunstwerken in de havens van Oostende en Zeebrugge zijn richtingsafhankelijke hydraulische randvoorwaarden nodig.

In kader van het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2014 werden deze randvoorwaarden opgemaakt, maar niet voor het volledige vereiste bereik. Daarom wordt in de eerste deelopdracht van WL studie 20\_025 de studie van de richtingsafhankelijke hydraulische randvoorwaarden op ondiep water uitgebreid, gebruik makende van dezelfde dataset, voor de aanlandige windsectoren van ZW tot NO voor waterstand en significante golfhoogte, en over het volledige windsectorbereik voor windsnelheden.

Dit rapport bevat de resultaten van deze statistische analyse van de richtingsafhankelijke waterstand, windsnelheid en significante golfhoogte op diep water. Vervolgens werd deze matrix getransformeerd volgens de methodiek beschreven in De Roo *et al.*, 2016a om tot locatiespecifieke golftrandvoorwaarden te komen ter hoogte van de havenmond van Oostende en Zeebrugge

## 6 Referenties

**De Roo, S.; Trouw, K.; Ruiz Parrado, I.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016a). Het Hydraulisch randvoorwaardenboek (2014). *WL Rapporten*, 14\_014. Waterbouwkundig Laboratorium/Fides Engineering: Antwerpen

**De Roo, S.; Trouw, K.; Ruiz Parrado, I.; Willems, P.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016b). Het hydraulisch randvoorwaardenboek 2014: achtergrondrapport. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14\_014\_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XXIII, 104 + 96 p. appendices pp.

**Nguyen, D.; Vanneste, D.** (2019). Numerical modeling of the extreme wave climate in the port of Zeebrugge. *WL Memo's*, 16\_122\_10. Flanders Hydraulics: Antwerp

**Technum; IMDC; Alkyon.** (2002). Structureel herstel van de kustverdediging te Oostende en verbetering van de haventoeegang naar de haven van Oostende: Hydrodynamische randvoorwaarden voor het ontwerp. Waterstanden en golfklimaat. Technum: Oostende. 264 pp.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**  
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

[waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)