



**Vlaanderen**  
is wetenschap



20\_025\_3  
WL rapporten

## Toetsing kunstwerken in kusthavens

Deelrapport 3  
Golfbelasting Mercatorsluis

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

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

# Toetsing kunstwerken in kusthavens

## Deelrapport 3 – Golfbelasting Mercatorsluis

Vanneste, D.; Nguyen, D.A.; De Roo, S.

## 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 2023  
D/2023/3241/188

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Vanneste, D.; Nguyen, D.A.; De Roo, S.** (2023). Toetsing kunstwerken in kusthavens: Deelrapport 3 – Golfbelasting Mercatorsluis. Versie 3.0. WL Rapporten, 20\_025\_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen



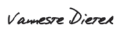

Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

## Documentidentificatie

Oprachtgever:	Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, Afdeling Kust	Ref.:	WL2023R20_025_3
Trefwoorden (3-5):	Haven Oostende, Mercatorsluis, golfbelasting, Mike21-BW, SWAN		
Kennisdomeinen:	kustbescherming > kustveiligheid bij extreme stormen > constructies in havens > numerieke modelleringen kustbescherming > kustveiligheid bij extreme stormen > hydrometeoklimaat extreme stormen > literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	47	Bijlagen (p.):	12
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteurs:	Vanneste, D.; Nguyen, D.A.
----------	----------------------------

## Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Roo, S.	Getekend door: Sieglien De Roo (Signatur) Getekend op: 2023-12-22 11:50:06 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Vanneste, D.	Getekend door: Dieter Vanneste (Signatur) Getekend op: 2023-12-22 09:15:08 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  

## Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2023-12-21 18:30:29 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	--

## Abstract

Voor de uitvoering van de probabilistische toets van de Mercatorsluis in de haven van Oostende zijn randvoorwaarden m.b.t. waterstanden en golfbelasting op het kunstwerk vereist. Dit rapport bevat de resultaten van de numerieke modellering (Mike21-BW, SWAN) van het golfklimaat voor een waaier aan combinaties van hoogwaterstanden, golfhoogtes en (aanlandige) windsnelheden. De lokale golfcondities werden vervolgens omgezet in golfkrachten en drukprofielen, als invoer voor het nazicht op constructiefalen van het kunstwerk.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren .....	VIII
1 Inleiding .....	1
2 Golfmodellering haven Oostende .....	2
2.1 Methodiek .....	2
2.1.1 Golfindringing: Mike21-BW .....	2
2.1.2 Lokale wind: SWAN.....	7
2.1.3 Resultierend golfspectrum ter hoogte van het kunstwerk .....	8
2.1.4 Resonantie in het Montgomerydok.....	9
2.2 Randvoorwaarden golfmodellen (aanlandige wind) .....	11
2.2.1 Referentiejaar 2020 .....	11
2.2.2 Referentiejaar 2050.....	12
2.3 Resultaten hoogwatersituatie (aanlandige wind) .....	13
2.3.1 Scenario 2020 .....	13
2.3.2 Scenario 2050 .....	19
2.4 Golftransformatie Mercatorsluis .....	22
2.4.1 Resonantie ( $f < 0.05$ Hz) .....	22
2.4.2 Golfindringing ( $f > 0.05$ Hz).....	23
2.4.3 Windgolven.....	27
3 Golfbelasting bij aanlandige wind .....	30
3.1 Methodiek .....	30
3.1.1 Invloed resonantie.....	30
3.1.2 Omzetting kortegolfspectrum in golfdrukprofiel en golfkracht .....	30
3.1.3 Kansverdeling golfkrachten en drukprofielen .....	31
3.1.4 Geometrische kenmerken Mercatorsluis .....	32
3.2 Vergelijking methodes .....	32
3.2.1 Algemeen.....	32
3.2.2 Correctie golfpiekperiode SWAN.....	32
3.2.3 Invloed golfreflectie.....	35
3.2.4 Conclusie.....	35

3.3	Resultaten hoogwatersituatie .....	36
3.3.1	Golfdrukprofielen onder golfkruin .....	36
3.3.2	Golfdrukprofielen onder golfdal.....	37
3.3.3	Golfkrachten .....	39
3.4	Evolutie golfbelasting tijdens stormperiode .....	41
3.4.1	Geval 1: combinatie hoge waterstand en maximale golfbelasting .....	41
3.4.2	Geval 2: combinatie laagwater en optredende golfbelasting tijdens stormopzet.....	43
4	Golfbelasting bij afluivende wind .....	44
5	Conclusies .....	45
	Referenties .....	46
Bijlage A	Simulatiematrix (aanlandige wind).....	B1
Bijlage B	Reflectiecoëfficiënten Mercatorsluis.....	B3
Bijlage C	Matrixplots invallende golfspectra t.p.v. Mercatorsluis .....	B4
Bijlage D	KD-krommen Mike21-BW.....	B10
Bijlage E	Significante drukprofielen .....	B12

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 – overzicht beschikbare Mike21-BW en SWAN simulaties.....	12
Tabel 2 – parameters totale langegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2020.....	13
Tabel 3 – parameters invallende kortegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2020.....	17
Tabel 4 – parameters totale langegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2050.....	19
Tabel 5 – parameters invallende kortegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2050.....	20
Tabel 6 – Regressiecoëfficiënten SWAN-gemodelleerde golfparameters tpv. Mercatorsluis.....	28
Tabel 7 – significante golfkrachten Mercatorsluis, scenario 2020.....	39
Tabel 8 – significante golfkrachten Mercatorsluis, scenario 2050.....	40
Tabel 9 – richtingsafhankelijke limietwaarden waterstand bij maximale KD-factor .....	41



## Lijst van de figuren

Figuur 1 – Noordzeeaquarium in Montgomerydok: uitstekend kaaivlak op palen.....	3
Figuur 2 – Mike21-BW bathymetrie (peilen in m TAW), illustratie richting NNW en T=1 jaar .....	4
Figuur 3 – modelbathymetrie richting W (illustratie voor T=1000 jaar) incl. onderwaterberm op de ‘knik’ van de W-dam. ....	4
Figuur 4 – Havengeul Oostende (a) vóór verbreding (beeld 13-3-2014) en (b) na verbreding (beeld 31-7-2020) .....	5
Figuur 5 – indeling typeklassen voor definitie absorptiecoëfficiënten langs binnenhaven Oostende .....	6
Figuur 6 – SWAN bathymetrie haven Oostende, (y-as = NNW) .....	7
Figuur 7 – illustratie golfveld gemodelleerd met M21BW (links) en SWAN (rechts) in de omgeving Mercatorsluis.....	9
Figuur 8 – gemeten golfspectrum aan locatie Vistrap, Montgomerydok tijdens de storm van 13 januari 2017 .....	10
Figuur 9 – vergelijking gemeten en M21-BW gemodelleerd golfspectrum t.p.v. het kaaiplateau Vistrap (De Roo <i>et al.</i> , 2020).....	10
Figuur 10 – totale golfspectra M21-BW t.p.v. Mercatorsluis (blauw gearceerd: verwachte frequentieband resonantie) .....	14
Figuur 11 – totale golfspectra SWAN t.p.v. Mercatorsluis .....	15
Figuur 12 – vergelijking gemeten (januaristorm 2017) versus SWAN golfspectrum (windrichting NW, waterpeil +5.65 m TAW).....	16
Figuur 13 – Gecombineerd spectrum Mike21-BW en SWAN, richting N T4 (SWP +6.96 mTAW) en T5 (SWP +7.5 mTAW).....	16
Figuur 14 – verhouding laagfrequente vs. hoogfrequente $H_{m0}$ t.p.v. Mercatorsluis.....	22
Figuur 15 – KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis, golfrichting NW, NNW en $-37^\circ$ N .....	23
Figuur 16 – KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis, golfrichting N en NNO .....	24
Figuur 17 – KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis, golfrichting W en WNW.....	24
Figuur 18 – golfperiode $T_p$ (boven) en $T_{m-1,0}$ (onder) ifv. $T_p$ buitengaats, t.p.v. Mercatorsluis.....	25
Figuur 19 – Fit $T_{m-1,0}/T_p$ ,bound t.p.v. Mercatorsluis in functie van waterstand (excl. richtingen NNO en W) .....	26
Figuur 20 – Fit M21-BW gemodelleerde $T_p$ waarden ifv. $T_{m-1,0}$ t.p.v. Mercatorsluis (excl. richtingen NNO en W) .....	26
Figuur 21 – SWAN gemodelleerde $H_{m0}$ (a), $T_{m-1,0}$ (b) en $T_p$ (c) tpv. sluisdeur Mercatorsluis in functie van lokale windsnelheid.....	27
Figuur 22 – Fit SWAN gemodelleerde $T_p$ waarden ifv. $T_{m-1,0}$ t.p.v. Mercatorsluis (excl. richtingen WZW en ZW) .....	29
Figuur 23 – Vergelijking methodes bepaling golfbelasting onder golfkruin (boven: volledig bereik $k_p h$ , onder: ingezoomd $k_p h < 1.5$ ).....	33

Figuur 24 – invloed wijziging $T_{p,SWAN} + 2.5$ s op berekende golfkrachten $F^*$ .....	33
Figuur 25 – golfdrukprofielen T5 simulaties N en WNW (links: originele $T_{p,SWAN}$ , rechts: $T_{p,SWAN}$ verhoogd met 2.5 s) .....	34
Figuur 26 – Invloed CR op berekende $F^*$ waarden.....	35
Figuur 27 – Significante golfdrukprofielen onder golfkruin, Mercatorsluis, scenario 2020.....	36
Figuur 28 – Significante golfdrukprofielen onder golfkruin, Mercatorsluis, scenario 2050.....	37
Figuur 29 – Significante golfdrukprofielen onder golfdal, Mercatorsluis, scenario 2020 .....	38
Figuur 30 – Significante golfdrukprofielen onder golfdal, Mercatorsluis, scenario 2050 .....	38
Figuur 31 – Getijslag i.f.v. waargenomen hoogwaterstanden (1925-2019) voor verschillende drempelwaarden van stormopzet.....	42

# 1 Inleiding

Onderhavig rapport kadert in de probabilistische studie naar het constructief faalgedrag van de sluisen en uitwateringsconstructies in de haven van Oostende door HKV en Deltares. Het rapport geeft een overzicht van de lokale golfspectra en -belastingen ter plaatse van de Mercatorsluis. Er wordt tevens ingegaan op de methodiek en enkele aspecten daarvan die verband houden met de te volgen aanpak in de probabilistische studie.

De hydraulische belasting op het kunstwerk wordt veroorzaakt door een combinatie van waterstand en lokale golven. Beiden zijn afhankelijk van de windrichting. Het lokale golfspectrum bestaat enerzijds uit een laagfrequente component geassocieerd met golven die de haven binnendringen vanuit zee doorheen de havenmond, diffracteren op de koppen van de havendammen en verder in de haven reflecteren op kaaimuren of taluds; en anderzijds een hoogfrequente component ten gevolge van lokaal opgewekte windgolven. De hoeveelheid golfenergie geassocieerd met beide componenten is afhankelijk van de locatie van het kunstwerk in de haven en eventuele afscherming van constructies in de haven, de windrichting en de richting van de golven buitengaats.

De probabilistische toets op constructief falen vereist de kennis van (een combinatie van) de richtingsafhankelijke waterstand en lokaal golfspectrum (en afgeleide belasting) over hun volledige kansbereik, zowel voor de hoog- als de laagwatersituatie. Indien dit gecombineerd wordt met de aard van de windrichting (aanlandig of aflandig<sup>1</sup>) kunnen 4 gevallen onderscheiden worden:

1. **Hoogwater bij aanlandige wind:** in deze situatie treedt een verhoging van het astronomisch hoogwater op (stormopzet) in combinatie met zowel golfindringing als lokaal opgewekte windgolven in de haven.
2. **Laagwater bij aanlandige wind:** binnen dezelfde stormgebeurtenis als in situatie 1 wordt het astronomisch laagwater verhoogd door het stormopzet (indien de duurtijd van de stormpiek voldoende groot is). De windgolfbelasting is identiek als in situatie 1 maar door de lagere waterstand kunnen bepaalde fysische processen (breking, diffractie, reflectie) de mate van golfindringing wijzigen t.o.v. de hoogwatersituatie.
3. **Laagwater bij aflandige wind:** in deze situatie treedt een afwaaiing van de waterstand op (een verlaging van het astronomische laagwater), eventueel in combinatie met lokaal opgewekte windgolven uit aflandige sectoren<sup>2</sup>. Of er effectief een golfbelasting op het kunstwerk optreedt hangt af van de oriëntatie, locatie en eventuele afscherming binnen de haven;
4. **Hoogwater bij aflandige wind:** deze situatie wordt gekenmerkt door een afwaaiing van het astronomisch hoogwater in combinatie met lokale windgolven. De golfbelasting is opnieuw afhankelijk van de oriëntatie en locatie van het kunstwerk in de haven, maar zal altijd beperkter zijn dan in situatie 1.

De golfbelasting in geval 1 - de hoogwatersituatie onder stormopzet (aanlandige wind) - werd gemodelleerd met DHI Mike21-BW en SWAN voor resp. de golfindringing en lokale windgolven. Dit wordt in sectie 2 van dit rapport verder toegelicht. In sectie 3 van dit rapport worden de methodiek en resultaten van de berekening van golfdrukprofielen en golfkrachten voor dit geval uitgewerkt.

Een variatie van de waterstand tijdens de storm met aanlandige wind (geval 2) werd niet gemodelleerd. Er wordt verder in dit rapport (3.4) beschreven hoe hier mee om te gaan in de studie.

<sup>1</sup> Vereenvoudigend kan het begrip *aanlandige* wind voor de Belgische kust gelijkgesteld worden met een bereik aan windsectoren van ZW t.e.m. NO (in wijzerzin doorlopen). Het begrip *aflandige* wind kan gezien worden als het complement ervan, t.t.z. de sectoren tussen ZW en NO in tegenwijzerzin doorlopen. De windrichting wordt hier behandeld als een discrete stochast. In het HR2014 en HR2020 wordt uitgegaan van 16 windsectoren van elk 22,5 graden.

<sup>2</sup> De astronomische laagwaterstand (bij springtij) kan verlaagd worden door: (i) een hoge luchtdruk of (ii) door afwaaiing bij aflandige wind. In beide gevallen is het fysisch niet realistisch dat een langdurige periode van aanlandige wind aan het optredend (extreem) laagwater vooraf zou gaan (vermits anders een significante verhoging van de waterstand door stormopzet zou optreden). De combinatie van een aanlandige wind met een extreem laagtij wordt daarom niet beschouwd.

## 2 Golfmodellering haven Oostende

### 2.1 Methodiek

#### 2.1.1 Golfindringing: Mike21-BW

##### Model

Een Mike21-BW golfmodel voor golfindringing in de haven van Oostende werd gecreëerd door Gruwez *et al.* (2011). Een nieuw model werd opgebouwd voor de definitieve configuratie van de heraan te leggen zone Halve Maan en bijkomend gevalideerd in De Roo *et al.* (2020).

Hieronder wordt een beknopte samenvatting van de modeleigenschappen weergegeven, voor details wordt verwezen naar hoger vermelde referenties:

- 2DH Boussinesq vergelijkingen, faseoplossend
- fysische processen:
  - ✓ diffractie : treedt op aan havenmond, maar ook op enkele punten in binnenhaven (bv. Visserijsluis)
  - ✓ refractie en shoaling : basisproces bij propagerende golven in ondiep water
  - ✓ (partiële) golfreflectie : kademuren en taluds in haven, incl. staande golven (zie verder)
  - ✓ golfbreking : voorhaven (onderwaterbermen staketsel, dijktaud Halve Maan, ...)
  - ✗ golfploop : niet beschouwd op havendammen en glooiingen<sup>3</sup>
  - ✗ golftransmissie : niet beschouwd over havendammen (kunstmatig verhoogd kruinpeil<sup>4</sup>)
- rekenrooster 1x1 m, uniforme rekentijdsstap : 0.05 s
- golfgeneratie op basis van Jonswap spectrum (gamma=3.3) met directionele spreiding

##### Modelbathymetrie

Figuur 2 toont de modelbathymetrie van de haven na verbreding van de havengeul en heraanleg van de Halve Maandijk (plannen okt 2017). De resolutie bedraagt 1x1 m (zie sectie 3.1.2 in De Roo *et al.* (2020)).

Omdat voor richting W de onderwaterberm ter hoogte van de 'knik' in de westelijke havendam mogelijk een invloed heeft op de golfindringing door de havenmond, werd deze onderwaterberm opgenomen in de aangepaste modelbathymetrie (Figuur 3).

##### Golfreflectie en -absorptie

Bij de opmaak van de Mike21-BW modelbestanden werd bijzondere aandacht besteed aan de absorptiecoëfficiënten gedefinieerd in de zg. *sponge layer* bestanden. Conform de aanpak in Gruwez *et al.* (2011) werden de kademuren, taluds, ... langsheen het havenbekken ingedeeld in 7 typeklassen naargelang de geometrie (kruinpeil, rechte muur of talud, palenfundering, aanwezigheid stormmuur):

<sup>3</sup> Omwille van numerieke stabiliteit (zie het oorspronkelijk modelopzet §3.1.5 in Gruwez *et al.* (2011)).

<sup>4</sup> De numerieke implementatie met porositeitslagen bleek geen optie omdat op die manier de geometrie niet accuraat ingebouwd kan worden en er bovendien stabiliteitsproblemen mee gepaard gaan (zie het oorspronkelijk modelopzet §3.1.5 in Gruwez *et al.* (2011)).

1. Onovertopbare kaaimuur (kaaimuur met onovertopbare stormmuur net aan de rand van de kaaimuur of dus bermbreedte = 0m);
2. Kaaimuur op peil ~6.90mTAW en met stormmuur op korte afstand van de rand (<15m);
3. Kaaimuur op peil ~6.90mTAW en met stormmuur op enige afstand van de rand (~15m);
4. Kaaimuur op peil ~6.90mTAW en zonder stormmuur;
5. Glooiing met helling ~1/2 op peil ~6.90mTAW en zonder stormmuur;
6. Kaaimuur met open palenrij op peil ~6.90mTAW en met stormmuur op enige afstand van de rand (~15m);
7. Stortsteen golfbreker met helling ~1/1.5.

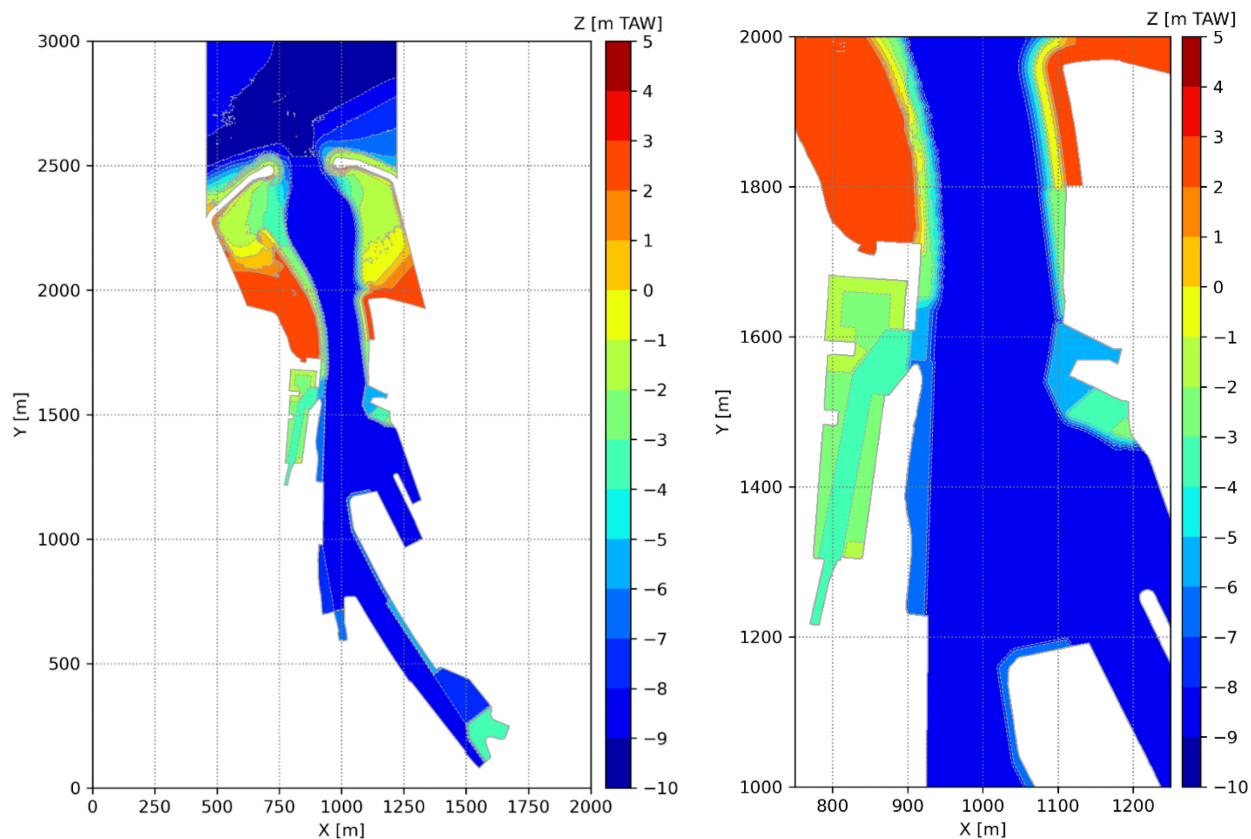
2 extra klassen voor het Klein Strand en de (nieuw aangelegde) Halve Maandijk werden gedefinieerd. De locatie van de types wordt weergegeven in Figuur 5. De waarde van de reflectie/absorptiecoëfficiënt is niet enkel afhankelijk van het type constructie maar ook van de waterstand. De relatie tussen de absorptiecoëfficiënten en de reflectiecoëfficiënt werd voor verschillende waterstanden onderzocht in Gruwez *et al.* (2012). Hierbij werd steeds loodrechte golfval verondersteld. Bijlage B bevat de toegepaste reflectiecoëfficiënten op de modelrand t.p.v. de zeewaartse sluisdeuren van de Mercatorsluis.

Merk op dat in de bepaling van de reflectiecoëfficiënten werd uitgegaan van de eigenschappen (type wand, kruinpeil) van de bestaande kadeconstructies in de haven. Voor de golfrandvoorwaarden t.p.v. de Mercatorsluis zijn i.h.b. de eigenschappen van de kademuren in het Montgomerydok van belang (Figuur 1) :

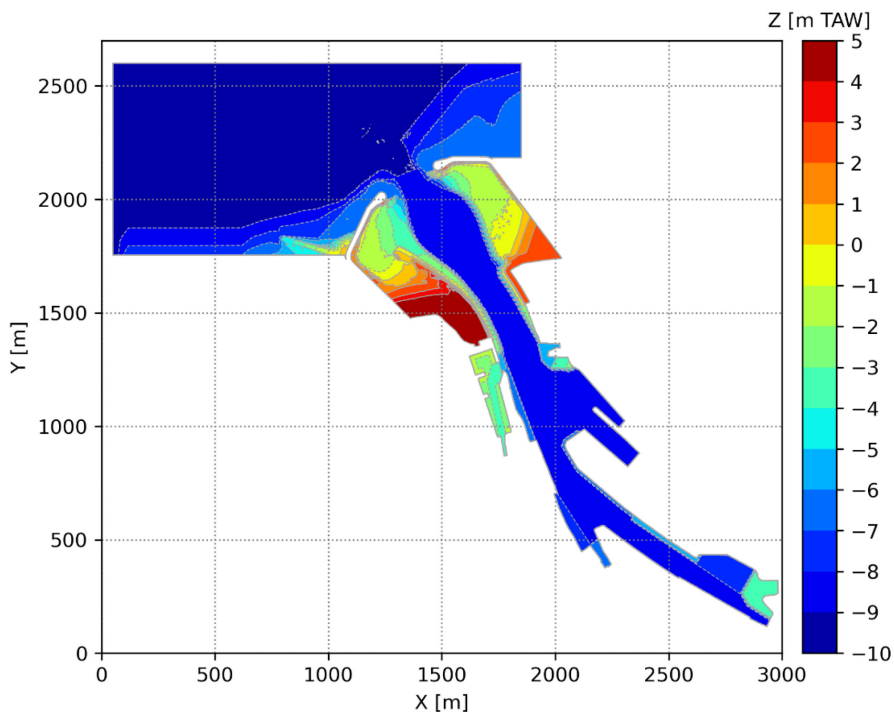
- kademuur type 2 aan westelijke zijde (met uitzondering van het Noordzeeaquarium);
- kademuur type 6 t.p.v. het Noordzeeaquarium : kademuur op palenrij (Figuur 1);
- kademuur type 4 aan oostelijke zijde.



Figuur 1 – Noordzeeaquarium in Montgomerydok: uitstekend kaavlak op palen.



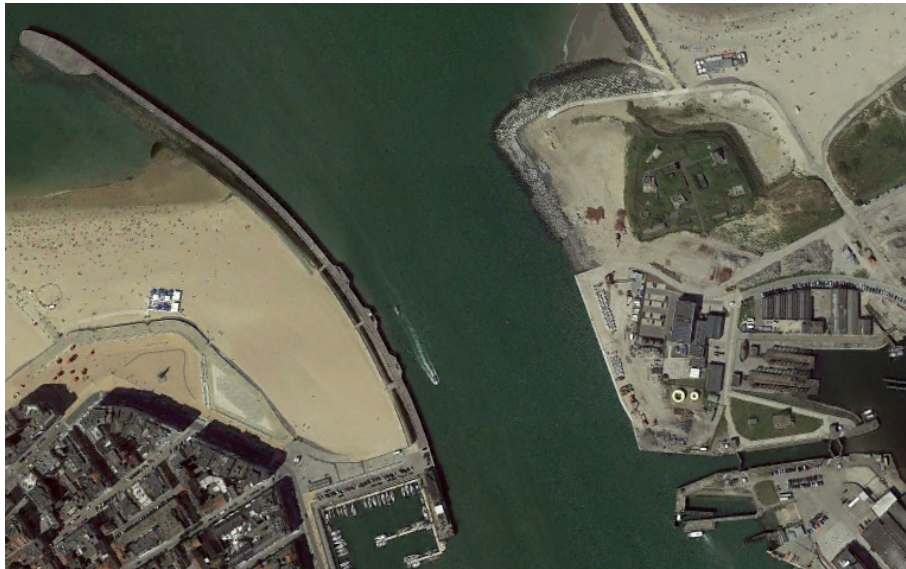
Figuur 2 – Mike21-BW bathymetrie (peilen in m TAW), illustratie richting NNW en T=1 jaar



Figuur 3 – modelbathymetrie richting W (illustratie voor T=1000 jaar) incl. onderwaterberm op de 'knik' van de W-dam.

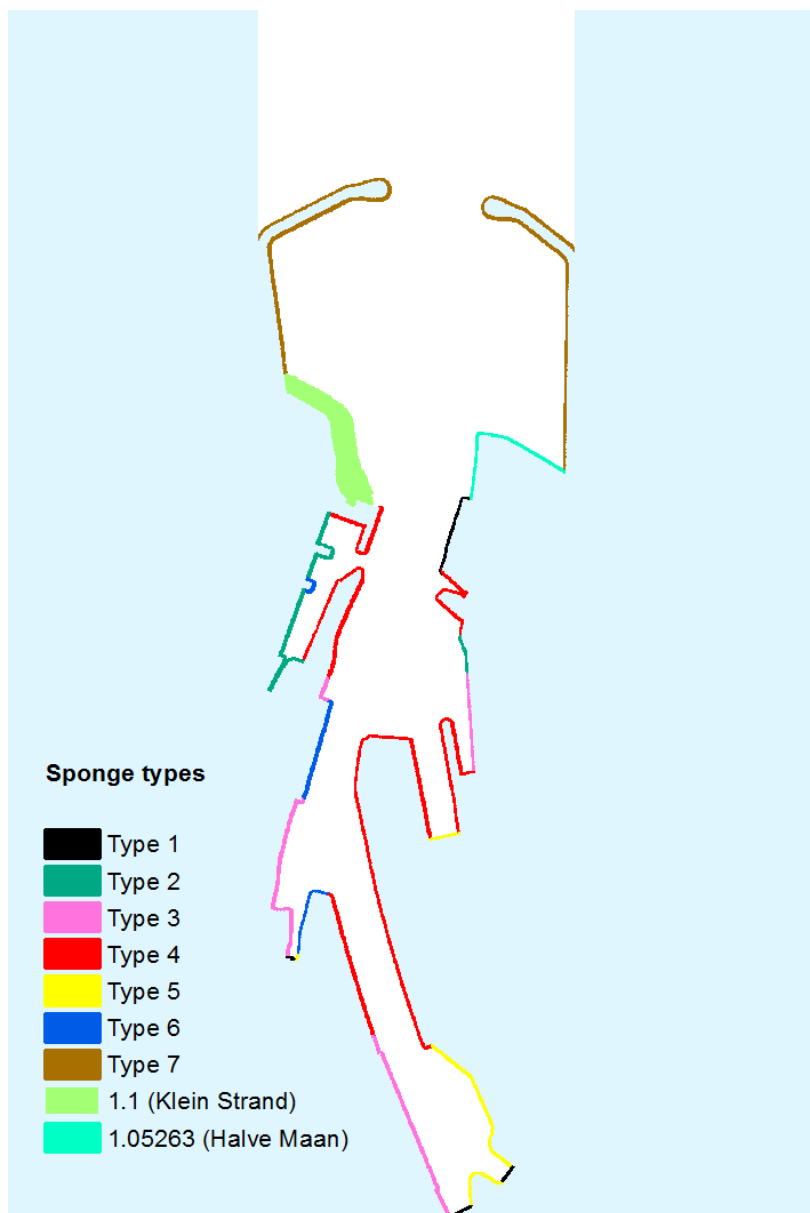


(a)



(b)

Figuur 4 – Havengeul Oostende (a) vóór verbreding (beeld 13-3-2014) en (b) na verbreding (beeld 31-7-2020)



Figuur 5 – indeling typeklassen voor definitie absorptiecoëfficiënten langs binnenhaven Oostende



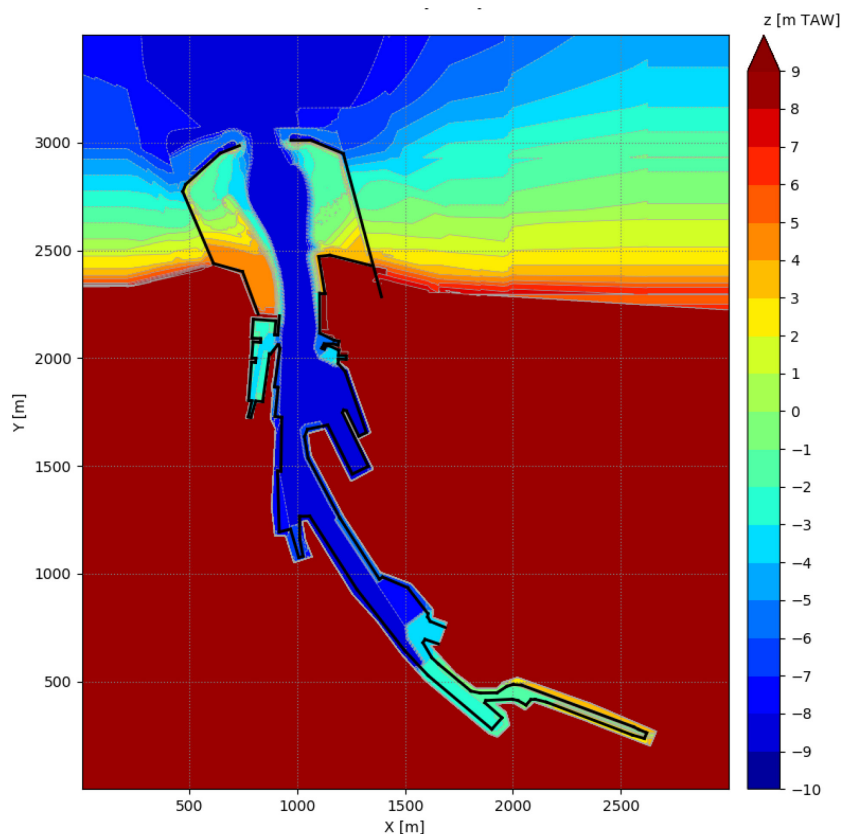
## 2.1.2 Lokale wind: SWAN

### Model

- Action-balance vergelijkingen, fasegemiddeld (spectraaldomein)
- fysische processen:
  - ✓ kortkruinige golfgeneratie door wind op basis van beschikbare strijklengte
  - ✓ golfdiffractie : wordt in principe gemodelleerd (zij het minder nauwkeurig dan in Mike21-BW), ook niet samen met reflectie
  - ✓ (partiële) golfreflectie : kademuuren en taluds in haven, geen staande golven.
  - ✓ Golfbreking
- Rekenrooster: 2 x 2 m

### Bathymetrie

De bathymetrie (resolutie 2 x 2 m) en havengeometrie beschrijven de haven Oostende na heraanleg van de Halve Maan (plannen oktober 2017). Het modeldomein bevat een uitbreiding in zuidelijke richting in vgl. met het Mike21-BW model. Figuur 6 toont de bathymetrie met aanduiding van de obstakels<sup>5</sup>. Zie Bijlage B voor toegepaste reflectiecoëfficiënten ter plaatse van de Mercatorsluis.



Figuur 6 – SWAN bathymetrie haven Oostende, (y-as = NNW)

<sup>5</sup> De numerieke implementatie van een (partieel) reflecterende rand in het modeldomein in SWAN vereist de definitie van een zg. *obstacle line* die langs beide zijden omgeven moet zijn door een natte gridcel. Dit heeft als gevolg dat de geografische locatie van de reflecterende wanden in Mike21-BW en SWAN niet exact dezelfde is. In de definitie van de uitvoerpunten (Gx) in de nabijheid van de sluisdeuren is hiermee rekening gehouden door eenzelfde *relatieve* afstand t.o.v. het gemodelleerde obstakel te beschouwen.

### 2.1.3 Resultierend golfspectrum ter hoogte van het kunstwerk

De berekening van de golfbelasting op de afwaartse vloeddeuren van de Mercatorsluis vereist de kennis van de golfparameters (golfhoogte, golfperiode) van het golfveld ter plaatse van het kunstwerk. Het totale golfveld wordt gekenmerkt door het gecombineerde golfspectrum dat de bijdrage van zowel de golfindringing als de windgolven bevat en samengesteld (gesuperponeerd) wordt op basis van de golfspectra uit beide golfmodellen. Dit is een benadering van de werkelijkheid in die zin dat de interactie tussen de langere indringingsgolven met de lokale wind niet gecapteerd wordt. Tot op heden is er echter geen (algemeen bruikbaar) faseoplossend golfvoortplantingsmodel beschikbaar dat alle hoger vermelde golftransformatieprocessen én windgroei combineert.

Het golfveld in de nabijheid van een reflecterende structuur vertoont echter een wezenlijk verschil in Mike en SWAN. In Mike21-BW wordt het (partieel) staande golfveld opgelost, zoals ook geïllustreerd in de linker panelen in Figuur 7. Theoretisch geldt dat ter plaatse van de reflecterende wand de *totale* golfhoogte gelijk is aan de *invallende* golfhoogte vermenigvuldigd met een factor  $(1+C_R)$ , met  $C_R$  de (frequentiegemiddelde) reflectiecoëfficiënt<sup>6</sup> die gedefinieerd wordt als de verhouding van de gereflecteerde t.o.v. invallende (significante) golfhoogte.

In SWAN echter bevat de oplossing weliswaar de invloed van de reflectie (toename golfenergie), maar vermits de fase niet opgelost wordt bevat het golfveld geen ruimtelijke variatie (zie Figuur 7 rechts). Theoretisch geldt dat de totale golfhoogte in SWAN ter plaatse van de reflecterende wand gelijk is aan de *invallende* golfhoogte vermenigvuldigd met een factor  $\sqrt{1 + C_R^2}$ .

Omwille van dit verschil dienen beide gemodelleerde golfspectra omgezet te worden in een *gelijkaardig* (invallend of totaal) golfspectrum ter plaatse van het kunstwerk (locatie G1 in Figuur 7), om vervolgens gesuperponeerd te worden.

- Het *invallend* M21-BW golfspectrum wordt bekomen door vermenigvuldiging van het gemodelleerde (totale) golfspectrum  $S_{f,M}$  met een factor  $1/(1 + C_{R,M})^2$ ;
- Het *invallend* SWAN golfspectrum wordt bekomen door vermenigvuldiging van het gemodelleerde golfspectrum  $S_{f,S}$  met een factor  $1/(1 + C_{R,S}^2)$ ;
- Het *totaal* SWAN golfspectrum wordt bekomen door vermenigvuldiging van het gemodelleerde golfspectrum  $S_{f,tot}$  met een factor  $1 + 2C_{R,S}/(1 + C_{R,S}^2)$ ;

waarbij  $C_{R,M}$  en  $C_{R,S}$  de (waterstandsafhankelijke) reflectiecoëfficiënten voorstellen die in resp. in Mike21-BW en SWAN toegepast werden t.h.v. de modelrand op de locatie van het beschouwde kunstwerk (sluisdeur of uitwateringsconstructie).

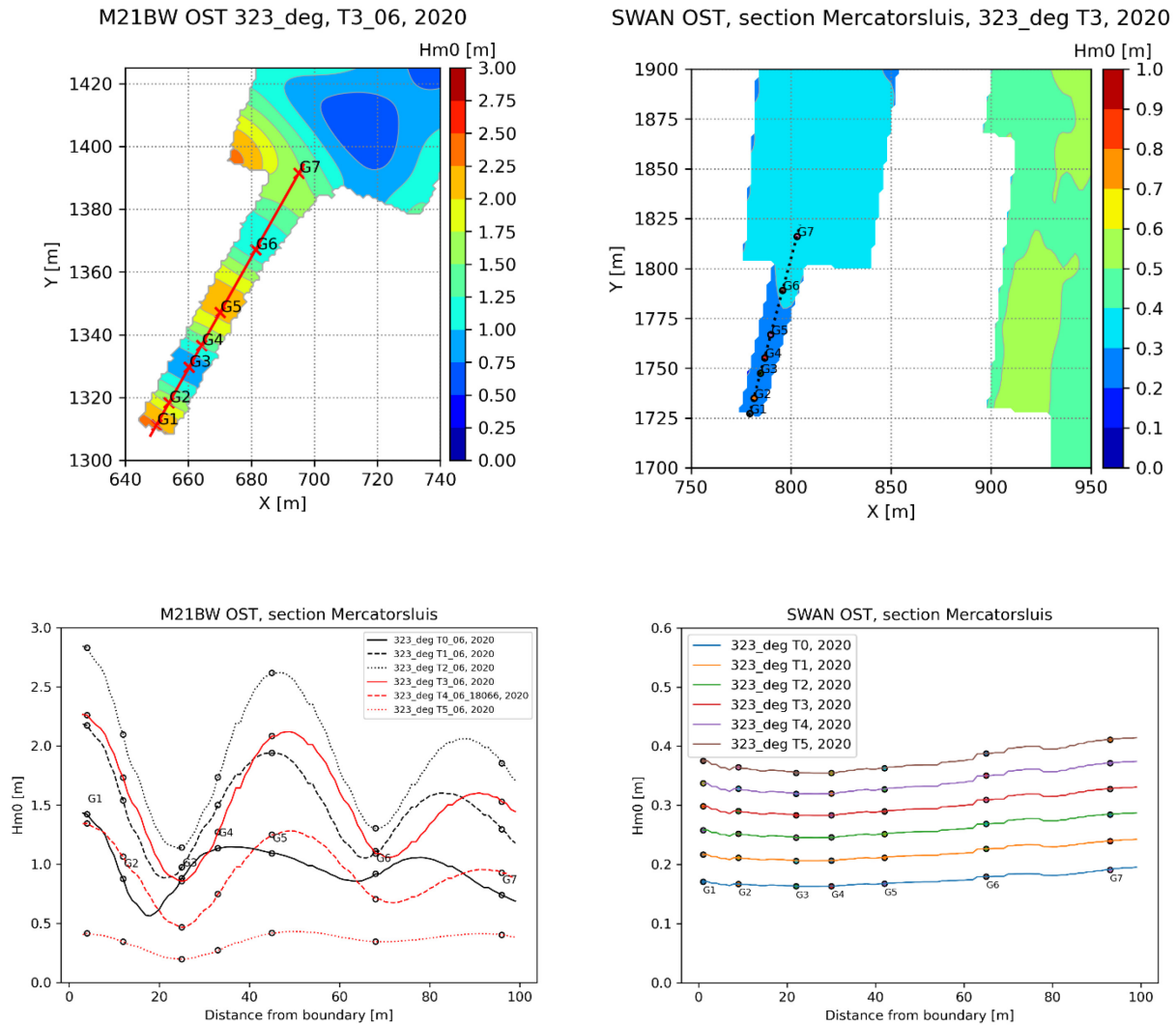
Het resulterend *invallend* golfspectrum ter plaatse van het kunstwerk wordt dan bekomen als:

$$S_{f,inc}(f) = \frac{S_{f,M}(f)}{(1 + C_{R,M})^2} + \frac{S_{f,S}(f)}{(1 + C_{R,S}^2)}$$

Het resulterend *totaal* golfspectrum ter plaatse van het kunstwerk wordt dan bekomen als:

$$S_{f,tot}(f) = S_{f,M}(f) + S_{f,S}(f) \left[ 1 + \frac{2C_{R,S}}{(1 + C_{R,S}^2)} \right]$$

<sup>6</sup> De reflectiecoëfficiënten zoals toegepast in Mike21-BW en SWAN (zie Bijlage B), waarbij loodrechte golfval verondersteld wordt.



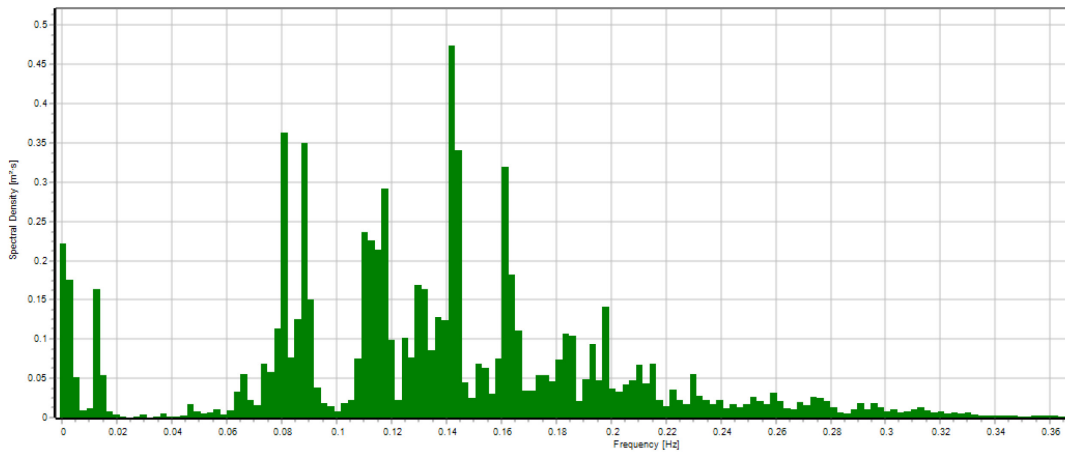
Figuur 7 – illustratie golfveld gemodelleerd met M21BW (links) en SWAN (rechts) in de omgeving Mercatorsluis.

#### 2.1.4 Resonantie in het Montgomerydok

Uit analyse van de golvenspectra blijken de indringingsgolven gepaard te gaan met resonantie in het Montgomerydok. Figuur 9 toont het gemeten golfspectrum ter plaatse van het kaaiplateau Vistrap in het Montgomerydok tijdens een storm op 13-14 januari 2017 (Vanneste *et al.*, 2017)<sup>7</sup>. De laagfrequente golfenergie (<0.05 Hz) is duidelijk waarneembaar en bedraagt ca. 7 % van de totale hoeveelheid golfenergie.

In De Roo *et al.* (2020) werd het M21-BW havenmodel gevalideerd op deze locatie op basis van deze storm. De laagfrequente energiecomponent (rond 0.01 Hz) werd toen waargenomen, maar de gemodelleerde hoeveelheid laagfrequente golfenergie bleek beduidend lager te zijn dan de gemeten waarde (Figuur 9).

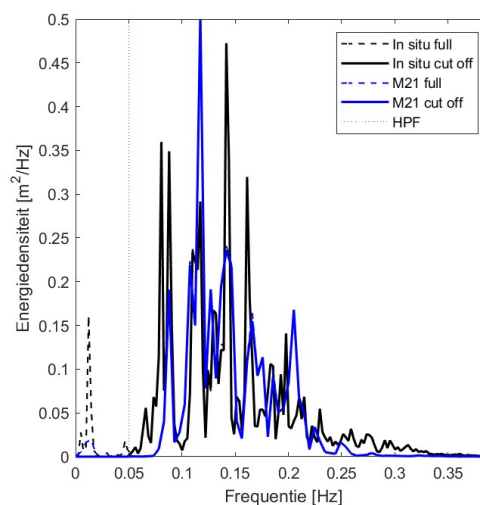
<sup>7</sup> Geanalyseerd golvenspectrum op tijdstip 2<sup>de</sup> hoogwater (14.01.2017 omstreeks 02:00) met randvoorwaarden: SWP +5.65 m TAW,  $H_{m0}$ =3.33 m buitengaats (tpv. golfboei Oostende Oosterstaketsel), golfrichting NW.



Figuur 8 – gemeten golfspectrum aan locatie Vistrap, Montgomerydok tijdens de storm van 13 januari 2017

Mike21-BW is in staat om niet-lineaire golf-golf interacties te beschrijven dewelke aanleiding geven tot een transfer van golfenergie naar het laagfrequent gebied ( $f < 0.05$  Hz). Er zijn echter nog andere fenomenen die een rol kunnen spelen in het ontstaan van laagfrequente golfwerking en die niet in Mike21-BW beschreven worden: (i) laagfrequente golven opgewekt door golfbreking in het ondiepe gedeelte naast de toegangseul of in de nabijheid van de haven (niet/onvoldoende gecapteerd in het beperkte modeldomein), (ii) zg. *vrije* laagfrequente golven elders opgewekt die zich tot binnen in de haven voortplanten en (iii) het ontbreken van atmosferische randvoorwaarden (regionale luchtdrukverschillen). Deze laatste fenomenen zouden theoretisch toegepast kunnen worden via de modelrandvoorwaarden, maar werd vooralsnog nog niet toegepast of gevalideerd in de modelontwikkeling.

De eigenperioden van een gesloten rechthoekig bassin worden volgens de Merian formule berekend als:  $T = \left(\frac{1}{n}\right) * 2L / \sqrt{gh}$  met  $n$  de mode,  $L$  de bekkenlengte (ca. 370 m in het dok, 510 m dok incl. sluistoegang),  $g$  de valversnelling en  $h$  de (gemiddelde) waterdiepte. Voor een gemiddeld bodempeil -3.0 m TAW wordt een laagste resonantiefrequentie ( $n=1$ ) bekomen tussen 0.0087 en 0.0137 Hz, voor resp. de laagste en hoogste gemodelleerde waterstand en het al dan niet meenemen van de sluistoegang in de bekkenlengte. Op basis hiervan wordt een bereik 0-0.05 Hz ingesteld voor de analyse van de laagfrequente golfenergie.



Figuur 9 – vergelijking gemeten en M21-BW gemodelleerd golfspectrum t.p.v. het kaaiplateau Vistrap (De Roo *et al.*, 2020)

## 2.2 Randvoorwaarden golfmodellen (aanlandige wind)

### 2.2.1 Referentiejaar 2020

De richtingsafhankelijke randvoorwaarden die toegepast werden in de golfmodellen Mike21-BW en SWAN werden afgeleid uit het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2014 (De Roo *et al.*, 2016a)<sup>8</sup>. Voor enkele ontbrekende windrichtingen binnen de aanlandige sector (ZW-NO) werden deze met een extra analyse aangevuld (De Roo *et al.*, 2021). De randvoorwaarden omvatten:

- hoogwaterstand te Oostende (beide modellen), terugkeerperiode tussen 1 en 100,000 jaar
- Mike21-BW : golfhoogte en -periode in ondiep water, terugkeerperiode tussen 1 en 100,000 jaar
- SWAN: 2u-gemiddelde windsnelheid  $u_{w,10}$ , terugkeerperiode  $T$  tussen 1 en 100,000 jaar<sup>9</sup>

De simulaties worden gedefinieerd voor vaste retourperiodes tussen 1 en 100,000 jaar, waarbij elke fysische parameter (waterstand, golven en wind) gecombineerd wordt op dezelfde retourperiode op basis van hun respectievelijke marginale kansverdeling uit de HR2014 (er wordt dus geen rekening gehouden met de fysische correlatie tussen waterstand, golven en wind). Merk op dat de beschouwde ondergrens  $T=1$  jaar een praktische keuze betreft gebaseerd op de POT drempelwaarden toegepast in de extremewaardeverdelingen van waterstand en windsnelheid in HR2014<sup>10</sup>. Voor de deelopdrachten in het bestek probabilistische toetsing (16EH/19/06) die betrekking hebben op het Masterplan Kustveiligheid volstaat een bovengrens  $T=1000$  jaar. De simulaties voor  $T=10,000$  en  $100,000$  jaar zijn nodig voor de probabilistische analyse in het kader van de overstromingsrisicoanalyse voor de kustvlakte.

De simulatiematrix (zie Bijlage A) bevat vaste aanlandige richtingssectoren (breedte 22.5 graden) van ZW t.e.m. NO. De kritieke richting voor golfindringing in de havens van Oostende en Zeebrugge ligt tussen de 'vaste' richtingen (- 37°N) en wordt expliciet meegenomen in de simulatiematrix.

Van het maximaal aantal richtingen werden in deze studie de richtingen W t.e.m. NNO gesimuleerd in Mike21-BW voor het scenario 2020. Voor de richtingen ZW, WZW en NO wordt de golfindringing in de haven van Oostende verwaarloosbaar geacht. Voor richtingen W en NNO is de bijdrage t.p.v. de zeewaartse sluisdeur van de Mercatorsluis voldoende gereduceerd (zie Bijlage C).

<sup>8</sup> Op het ogenblik van het bepalen van het opzet van deze studie was het inmiddels gepubliceerde Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2020 (Vuik *et al.*, 2020) nog niet beschikbaar. Het gemodelleerde golfklimaat kan echter bepaald worden met HR2020 als randvoorwaarden op basis van de afgeleide golftransformatie (zie sectie 2.4).

<sup>9</sup> 2u gemiddelde waarde gecorrigeerd voor landwrijving met reductiefactor 0.72 voor aanlandige wind (afgeleid in De Roo *et al.* (2016b) op basis van een analyse van windgegevens buitengaats (MP0 en MP7) op de Zeebrugge daminstrumentatie. Voorheen werd een reductiefactor van 0.8 (of 0.9 voor NW) toegepast voor omzetting van offshore naar land, zie bijlage 4 in Gruwez *et al.* (2011)).

<sup>10</sup> De (richtingsafhankelijke) POT drempel voor waterstand en wind voor  $T=1$  jaar is kleiner dan de mediane waarde van deze respectievelijke parameters in de verdeling. Voor de golfhoogte is hier (nipt) niet aan voldaan.

De SWAN simulaties zijn uitgevoerd voor alle richtingen van ZW t.e.m. NO. Tabel 1 geeft een overzicht.

Tabel 1 – overzicht beschikbare Mike21-BW en SWAN simulaties

	Mike21-BW		SWAN	
	2020	2050	2020	2050
ZW	x	x	✓	✓
WZW	x	x	✓	✓
W	✓	x	✓	✓
WNW	✓	x	✓	✓
NW	✓	✓	✓	✓
-37 °N	✓	✓	✓	✓
NNW	✓	✓	✓	✓
N	✓	x	✓	✓
NNO	✓	x	✓	✓
NO	x	x	✓	✓

### 2.2.2 Referentiejaar 2050

Naast de huidige toestand dient de toetsing van de kunstwerken ook de toestand in het jaar 2050 te beschouwen (de vastgelegde horizon in het lopende Masterplan Kustveiligheid). De invloed van de verwachte klimaatsverandering op de stormvloedpeilen wordt meegerekend op basis van het klimaatscenario dat gehanteerd wordt in het Masterplan Kustveiligheid (Verwaest *et al.*, 2009). Daarbij gaat men uit van geleidelijke versnelling van de zeespiegelstijging en de stormopzetten over de 21<sup>ste</sup> eeuw, volgens onderstaand kwadratisch verband:

$$\Delta_{[m]}(t) = 0,001_{[m]} \cdot (0,04 \cdot (t - 2000)^2 + 4 \cdot (t - 2000))$$

T.o.v. het referentiejaar 2014<sup>11</sup> resulteert bovenstaande formule in een toename van de stormvloedpeilen met 0,236 m in 2050.

De windsnelheden in 2050 blijven ongewijzigd t.o.v. de waarden in HR2014. De golfhoogte en -periode op ondiep water met de zeespiegelstijging voor het referentiejaar 2050 werden niet expliciet onderzocht in HR2014. Deze werden benaderend ingeschat als volgt:

- de golfhoogte (Hm0) werd verhoogd door de verhouding Hm0/waterdiepte constant te houden
- de golfperiode werd aangepast op basis van de gefitte relatie i.f.v. de golfhoogte, zie HR2014.

Mike21-BW simulaties in het scenario 2050 werden enkel uitgevoerd voor richtingen NNW, NW en -37°N. Voor de opmaak van het gecombineerde spectrum voor de richtingen NNE, N, WNW en W werden de Mike21-BW simulaties overgenomen uit 2020. Gelet op de geringe verschillen in Hm0 waarden tussen scenario's 2020 en 2050 voor de richtingen NNW, NW en -37°N wordt de impact op de nauwkeurigheid als minimaal ingeschat.

De randvoorwaarden voor 2050 zijn eveneens opgenomen in de simulatiematrix in Bijlage A.

<sup>11</sup> Het referentiejaar van het gebruikte Hydraulische Randvoorwaardenboek is 2014. De historische meetreeks van waterstanden (1925-2014) werd op datzelfde referentiejaar teruggebracht op basis van de tot dusver waargenomen zeespiegelstijging.

## 2.3 Resultaten hoogwatersituatie (aanlandige wind)

### 2.3.1 Scenario 2020

#### Lange golven ( $f < 0.05$ Hz)

Laagfrequente  $H_{m0}$ -waarden<sup>12</sup> nemen eerst toe, bereiken een maximum en nemen dan weer af met toenemend waterpeil (T0 tem T5). De laagfrequente energie is maximaal bij golfrichting NW en leidt tot een golfhoogte van ca 0.6 m. Het relatieve aandeel laagfrequente energie schommelt rond 3 %<sup>13</sup> en neemt toe voor waterpeilen rond +6.9 m TAW of hoger (gevallen T4 of T5).

Tabel 2 – parameters totale langegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2020

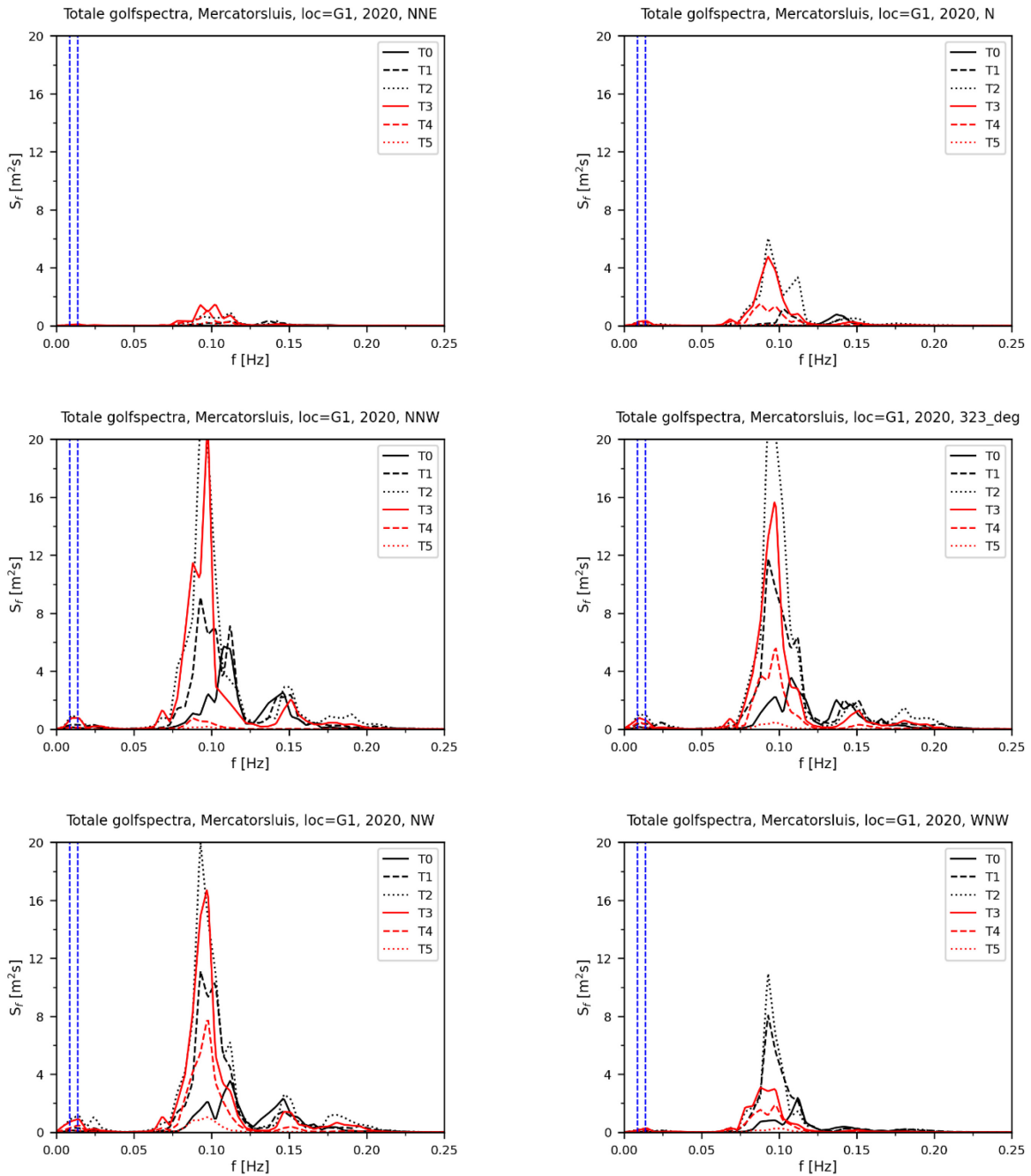
		$H_{m0}$ [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_p$ [s]	Aandeel LF golfenergie (%)			$H_{m0}$ [m]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_p$ [s]	Aandeel LF golfenergie (%)
<b>T0</b>	<b>NNO</b>	0.02	101.32	111.11	1%	<b>NW</b>	0.20	78.41	111.11	1.9%	
<b>T1</b>		0.08	95.34	111.11	3%		0.33	78.74	111.11	2.3%	
<b>T2</b>		0.12	92.01	76.92	3%		0.59	84.00	76.92	4.7%	
<b>T3</b>		0.15	84.12	76.92	4%		0.46	104.21	76.92	3.9%	
<b>T4</b>		0.13	97.41	76.92	6%		0.30	100.34	76.92	3.6%	
<b>T5</b>		0.08	102.14	76.92	11%		0.17	122.15	111.11	7.4%	
<b>T0</b>	<b>N</b>	0.07	114.51	111.11	2%	<b>WNW</b>	0.10	80.83	43.48	1.1%	
<b>T1</b>		0.10	97.78	111.11	3%		0.22	84.31	111.11	1.9%	
<b>T2</b>		0.27	89.94	111.11	3%		0.26	85.26	76.92	2.5%	
<b>T3</b>		0.25	91.80	76.92	4%		0.23	84.35	76.92	3.9%	
<b>T4</b>		0.21	96.14	76.92	7%		0.19	84.42	71.43	4.9%	
<b>T5</b>		0.09	102.24	76.92	25%		0.10	107.42	76.92	9.5%	
<b>T0</b>	<b>NNW</b>	0.23	79.41	43.48	2%	<b>W</b>	0.02	168.87	250.00	0.6%	
<b>T1</b>		0.35	78.41	111.11	3%		0.05	115.40	76.92	2.2%	
<b>T2</b>		0.46	85.95	111.11	3%		0.08	102.70	76.92	1.2%	
<b>T3</b>		0.42	85.56	76.92	3%		0.07	111.08	76.92	2.0%	
<b>T4</b>		0.16	115.27	111.11	10%		0.06	123.37	111.11	1.9%	
<b>T5</b>		0.13	109.09	76.92	23%		0.03	147.63	250.00	5.0%	
<b>T0</b>	<b>-37°N</b>	0.20	78.87	111.11	2%						
<b>T1</b>		0.38	78.34	43.48	3%						
<b>T2</b>		0.52	91.58	111.11	3%						
<b>T3</b>		0.40	111.83	111.11	3%						
<b>T4</b>		0.29	112.04	111.11	5%						
<b>T5</b>		0.15	117.96	111.11	13%						

<sup>12</sup> Berekend als  $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$ , met  $m_0$  het 0-de orde moment (geïntegreerde hoeveelheid spectrale energiedichtheid).

<sup>13</sup> De simulatie NW T=10 jaar benadert het best de condities tijdens de januaristorm 2017 (zie §2.1.4). De gemodelleerde hoeveelheid laagfrequente energie is weliswaar beduidend kleiner dan de gemeten waarde (2.3 % t.o.v. 7%).

**Korte golven ( $f > 0.05$  Hz)**

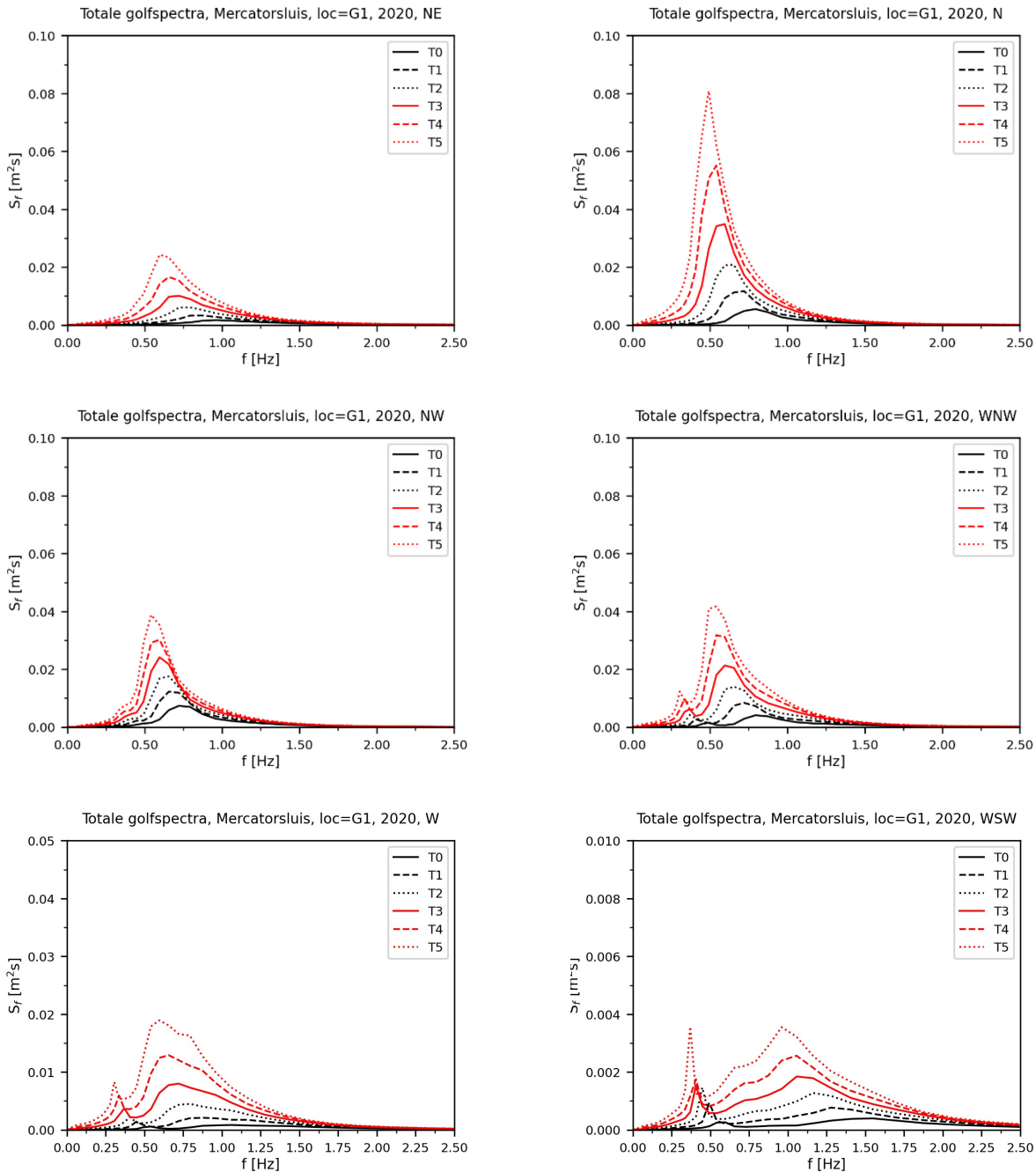
Figuur 10 toont de met Mike21-BW gemodelleerde totale golfspectra t.p.v. de Mercatorsluis. De grootste golfenergie treedt op bij richtingen NNW,  $-37^\circ\text{N}$  en NW. De hoeveelheid golfenergie neemt af voor waterstanden hoger dan  $+6.9$  m TAW (ongeveer het niveau van de kaaien in het Montgomerydok) ten gevolge van de verminderde golfreflectie in het dok.



Figuur 10 – totale golfspectra M21-BW t.p.v. Mercatorsluis (blauw gearceerd: verwachte frequentieband resonantie)

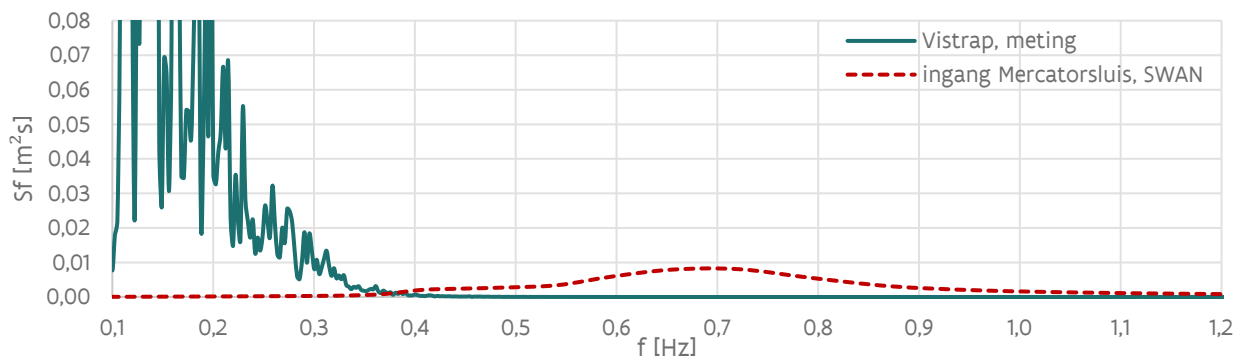


Figuur 11 toont de met SWAN gemodelleerde golfspectra t.p.v. de Mercatorsluis. Het spectrum vertoont 1 piek voor richting NO t.e.m. ZW, waarbij de golfpiekperiode tussen 1 en 2 s is gelegen. De grootste energie en kleinste piekfrequenties treden op bij windrichting N (maximale strijklengte in het dok). Vanaf richting WNW tot ZW neemt de golfenergie stelselmatig af en treedt er een (beperkte) transfer van energie op naar frequenties kleiner dan 0.5 Hz. Dit leidt in bepaalde gevallen tot een verschuiving van de piekfrequentie.



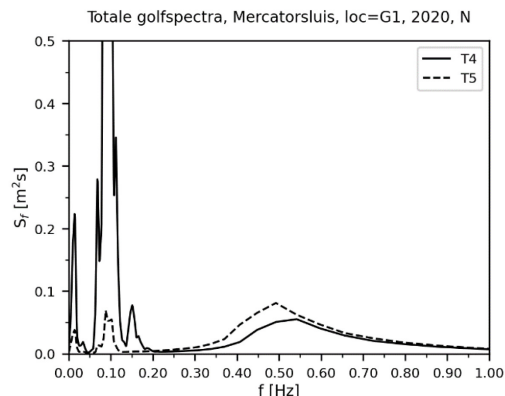
Figuur 11 – totale golfspectra SWAN t.p.v. Mercatorsluis

Hier stelt zich de vraag hoe realistisch de gemodelleerde windgolffrequenties zijn. Figuur 12 toont de vergelijking tussen het gemeten spectrum ter hoogte van de Vistrap tijdens de januaristorm 2017 (§2.1.4) en het door SWAN gemodelleerde spectrum net buiten het toegangskanaal naar de Mercatorsluis. Afgezien van het verschil in spectrale dichtheid valt op dat de ligging van de gemodelleerde energiepiek (rond 0.7 Hz) ver buiten het gemeten frequentiebereik van de windgolven ligt (0.15-0.4 Hz). Het gemeten spectrum laat interactie tussen indringingsgolven (frequentieband 0.08-0.12 Hz) en wind zien waarbij er golfenergie ontstaat tussen 0.1 en 0.4 Hz. De frequentieband tussen de verwachte energiepiek van indringingsgolven (ca 0.1 Hz) en windgolven (ca 0.33 Hz) is naar verwachting opgevuld met golfenergie. Het samengesteld golfspectrum op basis van de bijdragen van de gemodelleerde M21BW en SWAN spectra vertoont een hiaat in dit gebied, hetgeen niet realistisch is. Hier zal op pragmatische wijze rekening mee gehouden worden in de berekening van de golfbelasting, door een uniforme reductie van de SWAN-frequentie met 0.4 Hz (zie Tabel 3).



Figuur 12 – vergelijking gemeten (januaristorm 2017) versus SWAN golfspectrum (windrichting NW, waterpeil +5.65 m TAW)

De ligging van de windgolffrequenties heeft geen praktisch gevolg in de berekening van de golfbelasting a.d.h.v. Goda of lineaire golftheorie (zie §3.1), zolang uitgegaan wordt van de totale hoeveelheid energie en de piekfrequentie resulteert uit de bijdrage van golfindringing. Voor de scenario's met hogere waterpeilen echter, daalt de golfenergie door indringing en kan deze verhoudingsgewijs kleiner worden dan de energie van de windgolven. Indien de maximale spectrale energiedichtheid van de windgolven hoger wordt dan deze van de indringingsgolven, heeft dit een significante reductie van de golfpiekperiode tot gevolg. Uit inspectie van de resultaten blijkt dit slechts het geval voor 1 simulatie (N T5, zie Figuur 13).



Figuur 13 – Gecombineerd spectrum Mike21-BW en SWAN, richting N T4 (SWP +6.96 mTAW) en T5 (SWP +7.5 mTAW).

Tabel 3 – parameters invallende kortgolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2020

	M21BW			SWAN			gecombineerd				
	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> (*) [s]	T <sub>p+2.5s</sub> (**) [s]	
NO	T0			0.07	0.96	1.04	0.07	0.96	1.04	3.54	
	T1			0.10	1.08	1.15	0.10	1.08	1.16	3.66	
	T2			0.13	1.19	1.26	0.13	1.19	1.29	3.79	
	T3			0.16	1.30	1.39	0.16	1.30	1.40	3.90	
	T4			0.19	1.40	1.52	0.19	1.40	1.52	4.02	
	T5			0.23	1.50	1.68	0.23	1.50	1.62	4.12	
NNO	T0	0.11	6.63	7.04	0.10	1.11	1.26	0.14	4.04	6.98	6.98
	T1	0.23	7.76	7.30	0.14	1.28	1.39	0.27	6.01	8.16	8.16
	T2	0.33	8.81	8.93	0.19	1.43	1.53	0.38	7.02	9.27	9.27
	T3	0.37	9.77	9.80	0.23	1.58	1.68	0.44	7.47	10.28	10.28
	T4	0.27	10.41	10.20	0.28	1.71	1.85	0.39	5.88	10.95	10.95
	T5	0.12	10.60	10.20	0.33	1.84	2.03	0.35	2.94	11.15	11.15
N	T0	0.23	7.33	7.30	0.10	1.15	1.26	0.25	6.26	7.72	7.72
	T1	0.30	8.68	9.71	0.15	1.33	1.39	0.33	7.25	9.13	9.13
	T2	0.73	9.95	10.75	0.19	1.48	1.53	0.75	9.40	10.47	10.47
	T3	0.65	10.55	10.75	0.24	1.63	1.68	0.69	9.48	11.10	11.10
	T4	0.40	10.79	11.36	0.29	1.77	1.85	0.50	7.70	11.35	11.35
	T5	0.09	10.89	11.36	0.34	1.91	2.03	0.35	2.45	2.64	5.14
NNW	T0	0.79	8.61	9.26	0.13	1.26	1.39	0.80	8.43	9.06	9.06
	T1	1.04	9.40	10.75	0.17	1.40	1.52	1.05	9.20	9.89	9.89
	T2	1.39	9.89	10.75	0.21	1.52	1.68	1.40	9.71	10.41	10.41
	T3	1.24	10.29	10.20	0.24	1.64	1.85	1.27	9.97	10.82	10.82
	T4	0.26	10.71	11.36	0.28	1.75	1.85	0.38	5.96	11.27	11.27
	T5	0.13	10.74	10.20	0.31	1.84	2.03	0.34	3.21	11.30	11.30
-37°N	T0	0.71	8.51	9.26	0.12	1.26	1.39	0.72	8.29	8.95	8.95
	T1	1.11	9.48	10.75	0.16	1.39	1.52	1.12	9.32	9.98	9.98
	T2	1.39	9.80	10.75	0.19	1.50	1.68	1.40	9.65	10.31	10.31
	T3	1.16	10.14	10.31	0.22	1.59	1.68	1.18	9.85	10.67	10.67
	T4	0.70	10.37	10.20	0.25	1.67	1.85	0.74	9.39	10.91	10.91
	T5	0.21	10.52	10.20	0.28	1.75	1.85	0.35	5.00	11.07	11.07

(\*) gevalideerde T<sub>p</sub>-waarden berekend als  $T_p = c_T T_{m-1,0}$  waarbij T<sub>m-1,0</sub> berekend wordt uit het deelspectrum (Mike21-BW of SWAN) corresponderend met de grootste piekwaarde van spectrale energiedichtheid. Zie §2.4 voor de afleiding van de regressiecoëfficiënt c<sub>T</sub>.

(\*\*) gevalideerde T<sub>p</sub>-waarden verhoogd met 2.5 s indien deze corresponderen met het SWAN deelspectrum.

Tabel 3– parameters invallende kortegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2020 (vervolg)

	M21BW			SWAN			gecombineerd				
	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> (*) [s]	T <sub>p+2.5s</sub> (**) [s]	
NW	T0	0.71	8.37	8.93	0.12	1.24	1.39	0.72	8.17	8.80	8.80
	T1	1.07	9.65	10.75	0.15	1.35	1.52	1.08	9.49	10.15	10.15
	T2	1.33	9.80	10.75	0.18	1.44	1.53	1.34	9.66	10.31	10.31
	T3	1.22	10.15	10.31	0.20	1.53	1.68	1.23	9.92	10.68	10.68
	T4	0.81	10.33	10.20	0.23	1.60	1.68	0.84	9.71	10.87	10.87
	T5	0.33	10.51	10.20	0.25	1.67	1.85	0.41	7.30	11.06	11.06
WNW	T0	0.46	8.57	8.93	0.10	1.14	1.26	0.47	8.24	9.01	9.01
	T1	0.79	9.74	10.75	0.13	1.29	1.39	0.80	9.50	10.25	10.25
	T2	0.82	10.05	10.75	0.17	1.41	1.52	0.84	9.69	10.57	10.57
	T3	0.59	10.87	11.36	0.21	1.52	1.68	0.63	9.82	11.44	11.44
	T4	0.44	10.86	10.20	0.25	1.63	1.85	0.51	8.64	11.42	11.42
	T5	0.16	10.60	10.20	0.28	1.72	1.85	0.33	3.96	11.15	11.15
W	T0	0.15	6.99	7.04	0.06	0.94	0.95	0.16	6.09	7.35	7.35
	T1	0.18	8.72	8.93	0.09	1.09	1.15	0.21	7.13	9.18	9.18
	T2	0.35	9.52	8.93	0.13	1.22	1.26	0.37	8.55	10.01	10.01
	T3	0.25	9.85	10.20	0.16	1.35	1.39	0.30	7.37	10.37	10.37
	T4	0.21	10.05	10.20	0.20	1.47	1.53	0.29	5.98	10.57	10.57
	T5	0.07	10.06	10.20	0.24	1.56	1.68	0.25	2.34	10.59	10.59
WSW	T0				0.04	0.85	0.65	0.04	0.85	0.92	3.42
	T1				0.06	0.96	2.03	0.06	0.96	1.04	3.54
	T2				0.08	1.05	2.23	0.08	1.05	1.13	3.63
	T3				0.09	1.11	0.95	0.09	1.11	1.20	3.70
	T4				0.11	1.17	0.95	0.11	1.17	1.26	3.76
	T5				0.12	1.24	2.70	0.12	1.24	1.34	3.84
SW	T0				0.04	0.90	1.39	0.04	0.90	0.97	3.47
	T1				0.05	0.98	1.52	0.05	0.98	1.05	3.55
	T2				0.07	1.07	1.68	0.07	1.07	1.15	3.65
	T3				0.08	1.15	1.68	0.08	1.15	1.24	3.74
	T4				0.10	1.22	1.85	0.10	1.22	1.31	3.81
	T5				0.11	1.28	2.03	0.11	1.28	1.39	3.89

2.3.2 Scenario 2050

Lange golven (f<0.05 Hz)

Tabel 4 – parameters totale lange golfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2050

		H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	Aandeel LF golfenergie (%)			H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	Aandeel LF golfenergie (%)
<b>T0</b>	<b>NNO</b>	0.02	101.32	111.11	1%	<b>NW</b>	0.21	76.86	111.11	2%	
<b>T1</b>		0.08	95.34	111.11	3%		0.41	70.58	43.48	3%	
<b>T2</b>		0.12	92.01	76.92	3%		0.43	100.65	76.92	4%	
<b>T3</b>		0.15	84.12	76.92	4%		0.38	111.46	76.92	4%	
<b>T4</b>		0.13	97.41	76.92	6%		0.18	107.43	76.92	5%	
<b>T5</b>		0.08	102.14	76.92	11%		0.14	125.48	111.11	12%	
<b>T0</b>	<b>N</b>	0.07	114.51	111.11	2%	<b>WNW</b>	0.10	80.83	43.48	1%	
<b>T1</b>		0.10	97.78	111.11	3%		0.22	84.31	111.11	2%	
<b>T2</b>		0.27	89.94	111.11	3%		0.26	85.26	76.92	2%	
<b>T3</b>		0.25	91.80	76.92	4%		0.23	84.35	76.92	4%	
<b>T4</b>		0.21	96.14	76.92	7%		0.19	84.42	71.43	5%	
<b>T5</b>		0.09	102.24	76.92	25%		0.10	107.42	76.92	10%	
<b>T0</b>	<b>NNW</b>	0.21	87.48	111.11	2%	<b>W</b>	0.02	168.87	250.00	1%	
<b>T1</b>		0.31	84.64	76.92	2%		0.05	115.40	76.92	2%	
<b>T2</b>		0.37	91.26	111.11	3%		0.08	102.70	76.92	1%	
<b>T3</b>		0.31	93.12	111.11	4%		0.07	111.08	76.92	2%	
<b>T4</b>		0.16	103.85	76.92	18%		0.06	123.37	111.11	2%	
<b>T5</b>		0.12	109.33	76.92	29%		0.03	147.63	250.00	5%	
<b>T0</b>	<b>-37°N</b>	0.22	79.25	43.48	2%						
<b>T1</b>		0.37	78.12	43.48	3%						
<b>T2</b>		0.35	108.45	111.11	3%						
<b>T3</b>		0.35	114.34	111.11	4%						
<b>T4</b>		0.16	128.34	76.92	9%						
<b>T5</b>		0.14	115.42	111.11	19%						

Korte golven (f>0.05 Hz)

Tabel 5 – parameters invallende kortegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2050

	M21BW			SWAN			gecombineerd				
	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> (*) [s]	T <sub>p</sub> +2.5s (**) [s]	
NO	T0			0.07	0.96	1.04	0.07	0.96	1.03	3.53	
	T1			0.10	1.08	1.15	0.10	1.08	1.16	3.66	
	T2			0.13	1.19	1.39	0.13	1.19	1.28	3.78	
	T3			0.16	1.30	1.39	0.16	1.30	1.40	3.90	
	T4			0.19	1.40	1.52	0.19	1.40	1.51	4.01	
	T5			0.23	1.50	1.68	0.23	1.50	1.62	4.12	
NNO	T0	0.11	6.63	7.04	0.10	1.11	1.26	0.14	4.04	6.98	6.98
	T1	0.23	7.76	7.30	0.14	1.28	1.39	0.27	6.01	8.16	8.16
	T2	0.33	8.81	8.93	0.18	1.43	1.53	0.38	7.02	9.27	9.27
	T3	0.37	9.77	9.80	0.23	1.57	1.68	0.44	7.47	10.28	10.28
	T4	0.27	10.41	10.20	0.28	1.71	1.85	0.39	5.88	10.95	10.95
	T5	0.12	10.60	10.20	0.33	1.84	2.03	0.35	2.94	11.15	11.15
N	T0	0.23	7.33	7.30	0.11	1.16	1.26	0.25	6.26	7.72	7.72
	T1	0.30	8.68	9.71	0.15	1.32	1.39	0.33	7.26	9.13	9.13
	T2	0.73	9.95	10.75	0.19	1.48	1.53	0.75	9.40	10.47	10.47
	T3	0.65	10.55	10.75	0.24	1.63	1.68	0.69	9.48	11.10	11.10
	T4	0.40	10.79	11.36	0.29	1.77	1.85	0.50	7.70	11.35	11.35
	T5	0.09	10.89	11.36	0.34	1.91	2.03	0.35	2.45	2.64	5.14
NNW	T0	0.82	8.61	8.93	0.13	1.25	1.39	0.83	8.44	9.06	9.06
	T1	1.02	9.54	10.75	0.17	1.40	1.52	1.03	9.32	10.03	10.03
	T2	1.15	10.10	10.31	0.21	1.52	1.68	1.17	9.84	10.63	10.63
	T3	0.83	10.44	10.20	0.24	1.64	1.85	0.87	9.76	10.98	10.98
	T4	0.18	10.74	10.31	0.28	1.75	1.85	0.33	4.42	11.30	11.30
	T5	0.10	10.89	10.20	0.31	1.84	2.03	0.33	2.71	11.46	11.46
-37°N	T0	0.75	8.59	8.93	0.12	1.26	1.39	0.76	8.39	9.04	9.04
	T1	1.14	9.50	10.75	0.16	1.39	1.52	1.15	9.34	9.99	9.99
	T2	1.14	10.01	10.31	0.19	1.50	1.68	1.15	9.79	10.54	10.54
	T3	0.93	10.29	10.20	0.22	1.59	1.68	0.95	9.84	10.83	10.83
	T4	0.29	10.60	10.31	0.25	1.67	1.85	0.38	6.82	11.15	11.15
	T5	0.15	10.56	10.20	0.28	1.75	1.85	0.32	3.83	11.11	11.11

(\*) gevalideerde T<sub>p</sub>-waarden berekend als  $T_p = c_T T_{m-1,0}$  waarbij T<sub>m-1,0</sub> berekend wordt uit het deelspectrum (Mike21-BW of SWAN) corresponderend met de grootste piekwaarde van spectrale energiedichtheid. Zie §2.4 voor de afleiding van de regressiecoëfficiënt c<sub>T</sub>.

(\*\*) de gevalideerde T<sub>p</sub>-waarden verhoogd met 2.5 s indien deze corresponderen met het SWAN deelspectrum.

Tabel 5 – parameters invallende kortegolfspectrum ter hoogte van de Mercatorsluis, scenario 2050 (vervolg)

		M21BW			SWAN			gecombineerd			
		H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> [s]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>m-1,0</sub> [s]	T <sub>p</sub> (*) [s]	T <sub>p+2.5s</sub> (**) [s]
NW	T0	0.77	8.64	8.93	0.12	1.24	1.39	0.78	8.46	9.09	9.09
	T1	1.21	9.67	10.75	0.15	1.35	1.52	1.22	9.55	10.18	10.18
	T2	1.17	10.00	10.75	0.18	1.44	1.53	1.18	9.81	10.52	10.52
	T3	1.01	10.24	10.20	0.20	1.53	1.68	1.03	9.90	10.77	10.77
	T4	0.41	10.43	10.20	0.23	1.60	1.68	0.47	8.37	10.97	10.97
	T5	0.22	10.61	10.20	0.25	1.67	1.85	0.33	5.52	11.16	11.16
WNW	T0	0.46	8.57	8.93	0.10	1.14	1.26	0.47	8.24	9.01	9.01
	T1	0.79	9.74	10.75	0.13	1.28	1.39	0.80	9.50	10.25	10.25
	T2	0.82	10.05	10.75	0.17	1.41	1.52	0.84	9.69	10.57	10.57
	T3	0.59	10.87	11.36	0.21	1.52	1.68	0.63	9.82	11.44	11.44
	T4	0.44	10.86	10.20	0.25	1.63	1.85	0.51	8.64	11.42	11.42
	T5	0.16	10.60	10.20	0.28	1.72	1.85	0.33	3.96	11.15	11.15
W	T0	0.15	6.99	7.04	0.06	0.94	0.95	0.16	6.09	7.35	7.35
	T1	0.18	8.72	8.93	0.09	1.09	1.15	0.21	7.13	9.18	9.18
	T2	0.35	9.52	8.93	0.13	1.22	1.26	0.37	8.55	10.01	10.01
	T3	0.25	9.85	10.20	0.16	1.35	1.39	0.30	7.37	10.37	10.37
	T4	0.21	10.05	10.20	0.20	1.47	1.52	0.29	5.97	10.57	10.57
	T5	0.07	10.06	10.20	0.24	1.56	1.68	0.25	2.34	10.59	10.59
WSW	T0				0.05	0.87	1.85	0.05	0.87	0.94	3.44
	T1				0.06	0.96	2.03	0.06	0.96	1.04	3.54
	T2				0.08	1.05	2.23	0.08	1.05	1.13	3.63
	T3				0.09	1.12	0.95	0.09	1.12	1.20	3.70
	T4				0.11	1.17	0.95	0.11	1.17	1.26	3.76
	T5				0.12	1.24	1.04	0.12	1.24	1.34	3.84
SW	T0				0.04	0.90	1.39	0.04	0.90	0.97	3.47
	T1				0.05	0.98	1.52	0.05	0.98	1.05	3.55
	T2				0.07	1.06	1.68	0.07	1.06	1.15	3.65
	T3				0.08	1.15	1.68	0.08	1.15	1.24	3.74
	T4				0.10	1.22	1.85	0.10	1.22	1.31	3.81
	T5				0.11	1.28	2.03	0.11	1.28	1.39	3.89

## 2.4 Golftransformatie Mercatorsluis

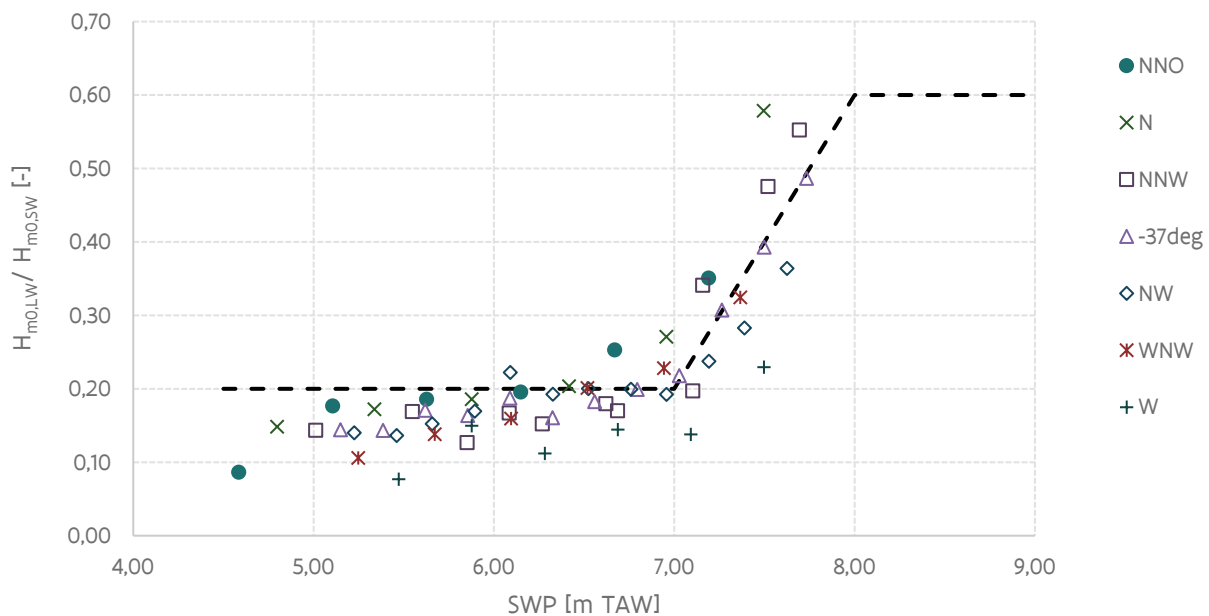
De resultaten worden in deze sectie voorgesteld in een vorm die toelaat de golftransformatie te beschrijven tussen een opgelegde (richtingsafhankelijke) randvoorwaarde (de waterstand en golfcondities buitengaats en de lokale windsnelheid) en de kenmerken van de golf ter plaatse van de deur van de Mercatorsluis. Dit stelt de gebruiker van deze resultaten in staat om het lokale golfveld te berekenen in functie van een gekozen randvoorwaarde.

### 2.4.1 Resonantie ( $f < 0.05$ Hz)

Figuur 14 stelt de verhouding van de significante golfhoogte van de lange golfenergie t.o.v. de indringingsgolven weer in functie van de waterstand. Tot ca. +7 m TAW blijft dit aandeel beperkt tot 20-25%. Voor hogere waterstanden neemt dit aandeel toe ten gevolge van de golfdemping door overslag en overloop over de kaaien van het Montgomerydok. De verhouding is (beperkt) richtingsafhankelijk, met het grootste relatieve aandeel voor richtingen NNW en N. Richting W kent het laagste aandeel lange golven.

Voor toepassing in de probabilistische analyse (zie §3.1.1) wordt voorgesteld om de golfhoogte van de lange golven te bepalen uit de waarde van de korte golven ( $f > 0.05$  Hz, zie verder), op volgende pragmatische wijze (aangeduid in Figuur 14):

- $H_{m0,LW} = 0.2 * H_{m0,SW}$  voor  $SWP \leq +7$  m TAW,
- $H_{m0,LW} = 0.6 * H_{m0,SW}$  voor  $SWP \geq +8$  m TAW
- lineaire interpolatie tussen +7 en +8 m TAW



Figuur 14 – verhouding laagfrequente vs. hoogfrequente  $H_{m0}$  t.p.v. Mercatorsluis

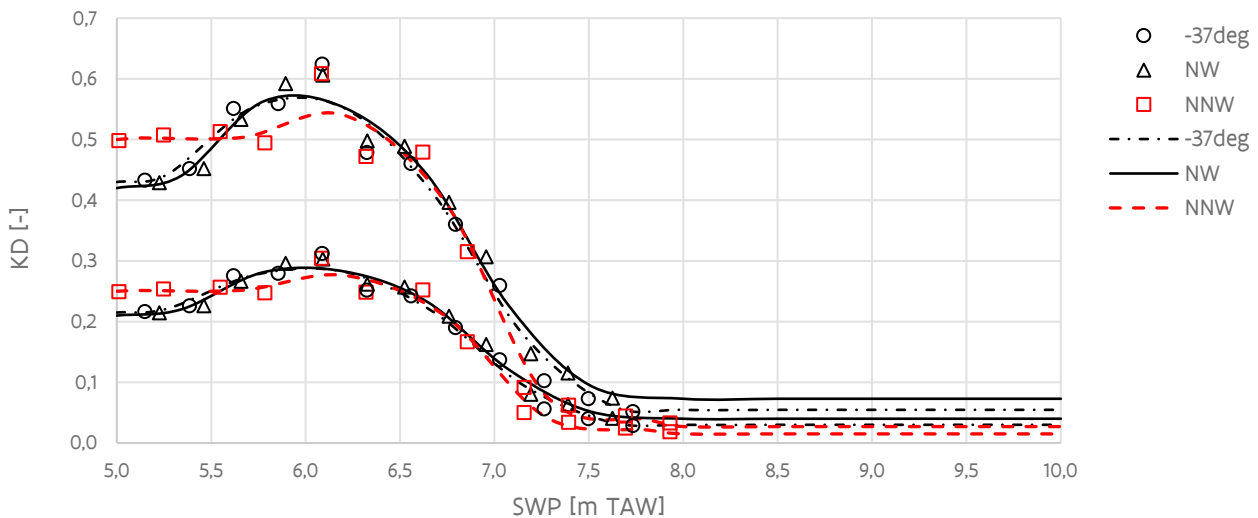


### 2.4.2 Golfindringing ( $f > 0.05$ Hz)

De invallende ( $K_D^{inc}$ ) of totale ( $K_D^{tot}$ ) *diffractiecoëfficiënt* wordt gedefinieerd als de verhouding van de resp. lokale invallende of totale golfhoogte tot de golfhoogte buitengaats,  $H_{m0,bound}$  (opgelegd aan de Mike21-BW modelrand):

$$K_D^{inc} = \frac{H_{m0,loc}^{inc}}{H_{m0,bound}}; K_D^{tot} = \frac{H_{m0,loc}^{tot}}{H_{m0,bound}}$$

De KD-factor is in principe onafhankelijk van de golfhoogte, voor zover er geen brekingsprocessen optreden tussen de modelrand en de haveningang of in bepaalde ondiepe zones van de haven. In de toepassing van de KD factor mag de modelrand gelijkgesteld worden met uitvoerlocatie 117 in het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2020 (Vuik *et al.*, 2020)<sup>14</sup>.



Figuur 15 – KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis, golfrichting NW, NNW en -37° N (bovenste kromme totaal, onderste invallend)

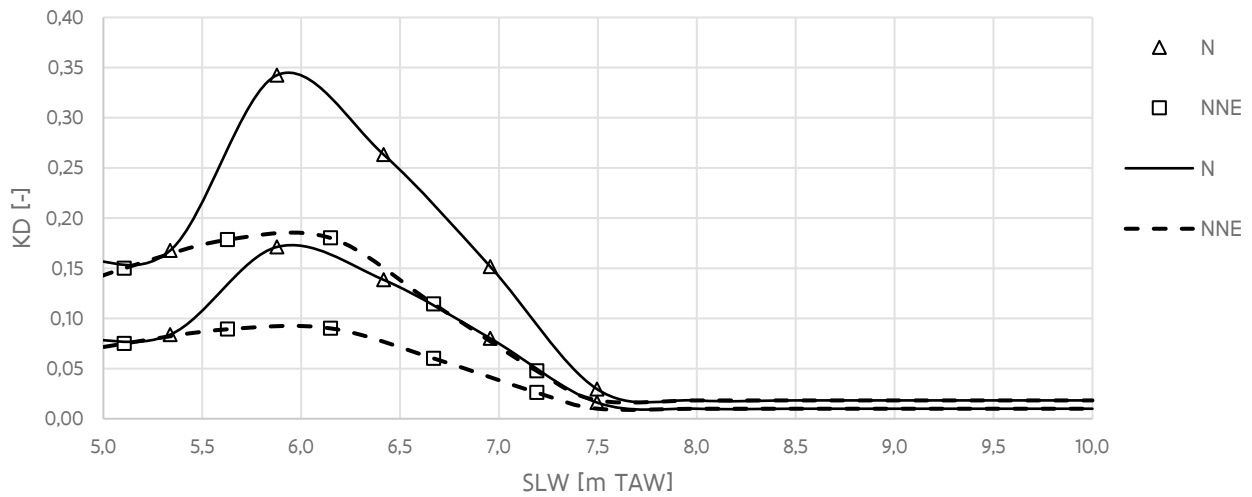
Figuur 15 toont de KD-coëfficiënten voor de golfrichtingen NW, NNW en -37°N in functie van de waterstand (SWP). De symbolen tonen de gemodelleerde waarden. Bemerkt dat deze punten geen monotoon stijgend of dalend verloop kennen, dit is het gevolg van de verschillen tussen de simulaties voor eenzelfde retourperiode met en zonder zeespiegelstijging. Voor een praktische toepassing wordt voorgesteld de uitgemiddelde curves te gebruiken. Het bereik van deze curves werd artificeel uitgebreid tussen +5 en +10 m TAW. De punten (getalwaarden) die deze KD-curves bepalen zijn opgenomen in Bijlage D<sup>15</sup>.

De krommen vertonen een maximum rond + 6.0 m TAW. Dit kan toegeschreven worden aan de maximale reflectie in het Montgomerydok rond deze waterstand. Voor hogere waterstanden neemt de KD-coëfficiënt terug af wegens de golftransmissie over de kaaivlakken.

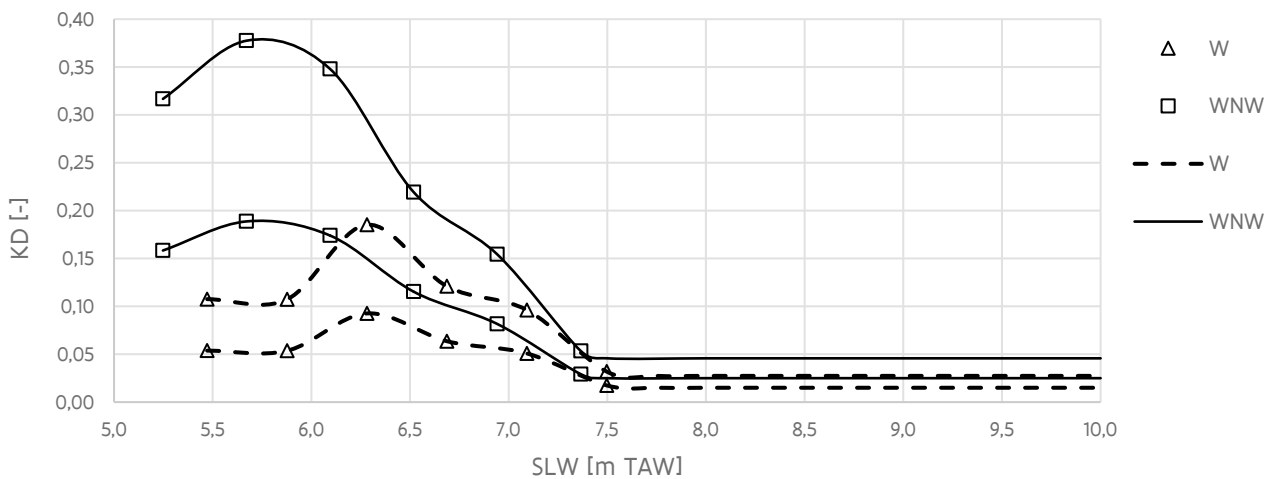
Figuur 16 en Figuur 17 geven de KD-curves weer voor resp. richtingen N, NNO en W,WNW. Het bereik van deze curves werd artificeel uitgebreid tussen +5 en +10 m TAW. Getalwaarden die deze KD-curves bepalen zijn opgenomen in Bijlage D – KD-krommen Mike21-BW.

<sup>14</sup> uitvoerpunt 117 nabij de haveningang Oostende : X=493920.54 m ,Y= 5677439.60 m UTM31 WGS84, Z=-7.78 m TAW volgens BCP2020.

<sup>15</sup> Voor praktisch gebruik kan kubische interpolatie toegepast worden teneinde de krommen in Figuur 15 te benaderen.



Figuur 16 – KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis, golfrichting N en NNO (bovenste kromme totaal, onderste invallend)

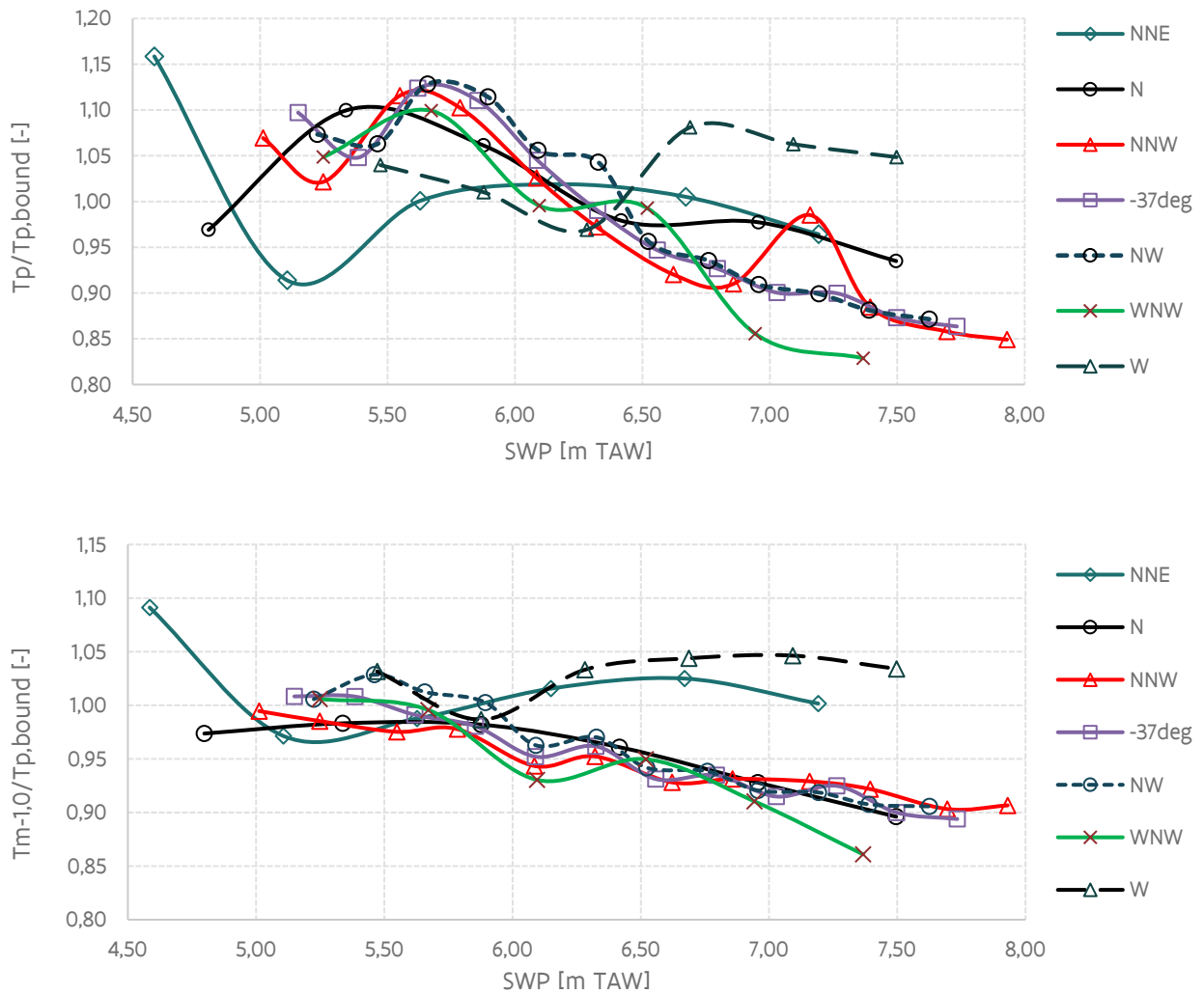


Figuur 17 – KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis, golfrichting W en WNW (bovenste kromme totaal, onderste invallend)

Naast de transformatie van de golfhoogte dient ook de transformatie van de golfperiode in Mike21-BW gekarakteriseerd te worden. Figuur 18 toont de verhoudingen van de gemodelleerde waarden  $T_p$  en  $T_{m-1,0}$ , resp. de golfpiekperiode en spectrale periode, t.o.v. de opgelegde golfpiekperiode  $T_{p,bound}$  op de modelrand.

De verhouding  $T_p/T_{p,bound}$  toont een spreiding rond 1 (tussen 0.80 en 1.2). De fluctuaties in golfpiekperiode zijn mede veroorzaakt door de onzekerheid van de ligging van de energiepiek in de spectraalanalyse.

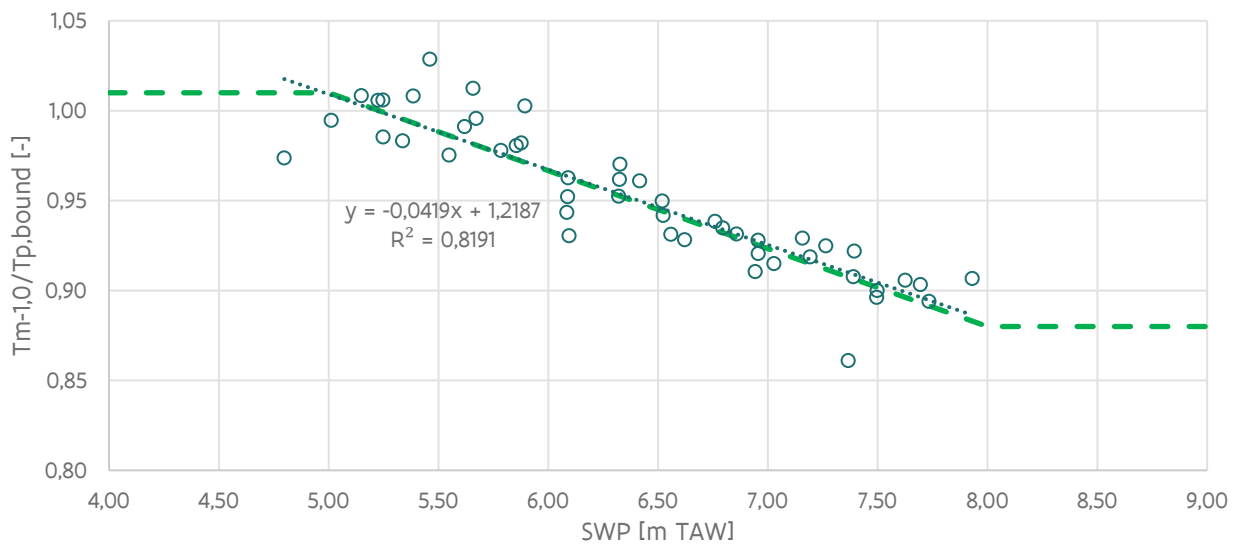
De verhouding  $T_{m-1,0}/T_{p,bound}$  vertoont iets minder spreiding in vergelijking met de piekperiode. De verhouding lijkt iets af te nemen voor hogere waterpeilen (> +6 m TAW), uitgezonderd voor richting W en NNO.



Figuur 18 – golfperiode  $T_p$  (boven) en  $T_{m-1,0}$  (onder) ivf.  $T_p$  buitengaats, t.p.v. Mercatorsluis

Figuur 19 stelt de waarden  $T_{m-1,0}/T_{p,bound}$  voor (alle richtingen excl. NO en W) in functie van de waterstand, samen met een lineaire regressie en een geschematiseerd verband. Er wordt voorgesteld om in de toepassing van de probabilistische analyse de lokale  $T_{m-1,0}$  waarde t.p.v. de Mercatorsluis af te leiden op basis van de golfpiekperiode buitengaats (uitvoerlocatie 117 in het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2020) op volgende wijze:

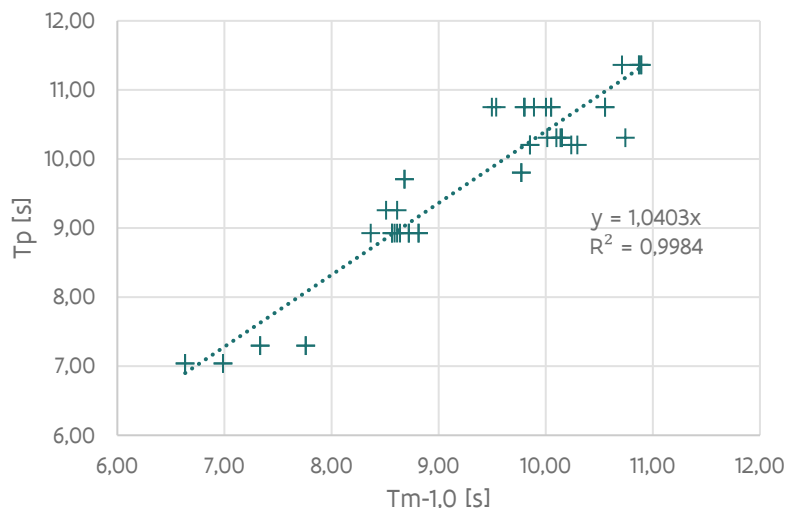
- $T_{m-1,0} = 1.01 * T_{p,loc=117}$  voor  $SWP \leq +5$  m TAW
- $T_{m-1,0} = 0.88 * T_{p,loc=117}$  voor  $SWP \geq +8$  m TAW
- Lineaire interpolatie tussen hoger vermelde waarden voor SWP tussen +5 en +8 m TAW



Figuur 19 – Fit  $T_{m-1,0}/T_{p,bound}$  t.p.v. Mercatorsluis in functie van waterstand (excl. richtingen NNO en W)

Uit analyse van de gemodelleerde M21-BW-golfpiekperiodes (zie

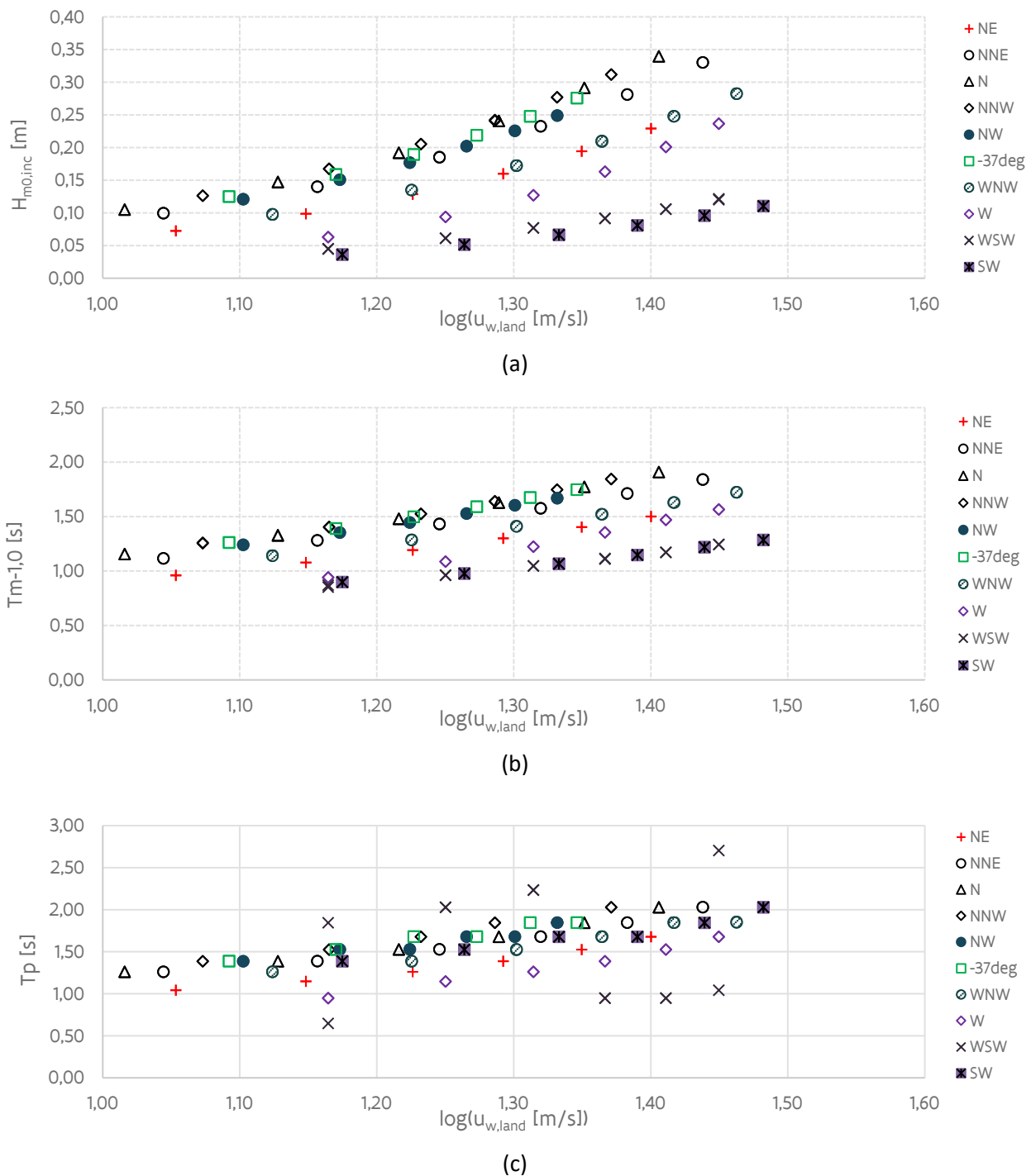
Tabel 3 en Tabel 4) blijkt dat deze niet monotoon stijgend zijn met de terugkeerperiode. Dit is het gevolg van de onzekerheid op de bepaling van de ligging van de energiepiek in de spectraalanalyse. Er wordt geopteerd om de golfpiekperiode onrechtstreeks af te leiden uit de spectrale periode  $T_{m-1,0}$  vermits deze een stabiele parameter is met een monotoon stijgende verloop (zie Figuur 20). De geschatte golfpiekperiode voor gebruik in het golfbelastingmodel (§ 3.1) bedraagt:  $T_{p,M21BW} = 1,05 * T_{m-1,M21BW}$ .



Figuur 20 – Fit M21-BW gemodelleerde  $T_p$  waarden ifv.  $T_{m-1,0}$  t.p.v. Mercatorsluis (excl. richtingen NNO en W)

### 2.4.3 Windgolven

Uit de analyse van de golfhoogte en -periode ter plaatse van de Mercatorsluis blijkt dat deze sterk gecorreleerd zijn met de windsnelheid (Figuur 21). Fysische processen gerelateerd aan de waterdiepte spelen hier niet mee in de lokale opwekking van golven, maar er is wel onrechtstreeks een invloed van de waterstand via de in SWAN toegepaste reflectiecoëfficiënten langs de modelranden van het havenbekken. Merk op dat de beschikbare modelresultaten impliciet een correlatie tussen waterstand en windsnelheid bevatten wegens de geselecteerde combinaties waterstand-windsnelheid op hun beider (richtingsafhankelijke) marginale verdeling.



Figuur 21 – SWAN gemodelleerde  $H_{m0}$  (a),  $T_{m-1,0}$  (b) en  $T_p$  (c) tpv. sluisdeur Mercatorsluis in functie van lokale windsnelheid

Voor de verschillende windrichtingen wordt een lineair verband afgeleid<sup>16</sup> tussen het logaritme van de lokale windsnelheid (zie §2.2) en de invallende golfhoogte en spectrale periode:

$$H_{m0,inc} = h_1 \log u_{w,land} + h_2$$

$$T_{m-1,0} = t_1 \log u_{w,land} + t_2$$

De totale golfhoogte ter plaatse van de sluisdeur kan afgeleid worden uit de invallende golfhoogte als:

$$H_{m0,tot} = (1 + C_R) * H_{m0,inc}$$

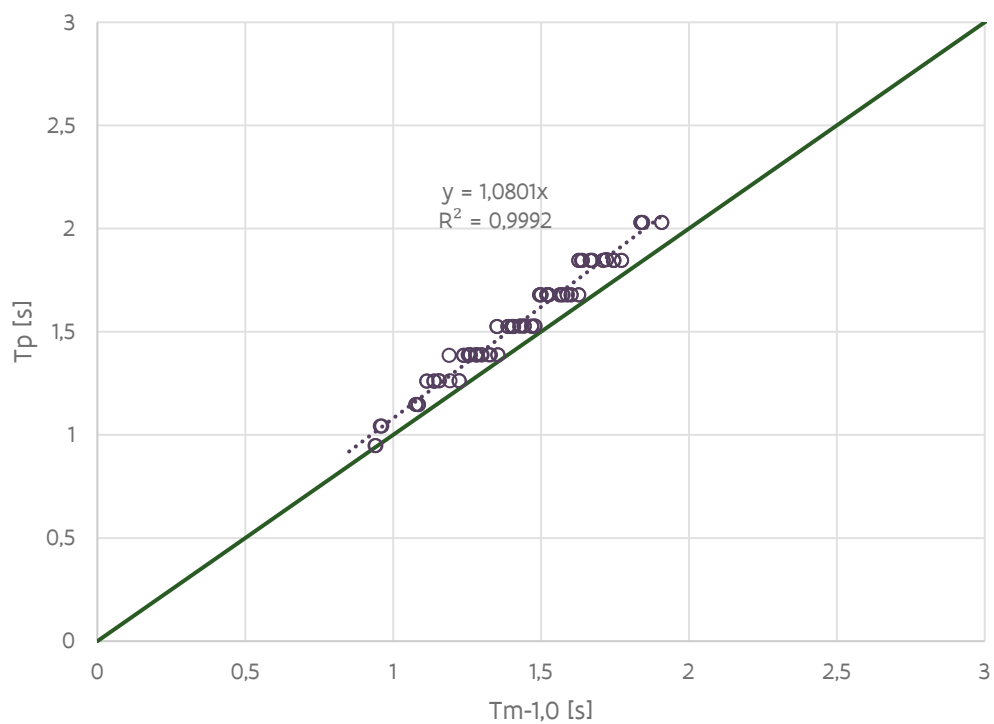
met  $C_R$  de waarde voor de (waterstandsafhankelijke) reflectiecoëfficiënt.

Tabel 6 – Regressiecoëfficiënten SWAN-gemodelleerde golfparameters tpv. Mercatorsluis

	$h_1$ [m*log(s/m)]	$h_2$ [m]	$t_1$ [s*log(s/m)]	$t_2$ [m]
NO	0.516	-0.500	1.677	-0.858
NNO	0.674	-0.648	1.983	-1.028
N	0.692	-0.643	2.091	-1.050
NNW	0.697	-0.650	2.144	-1.107
-37°N	0.644	-0.623	2.034	-0.996
NW	0.617	-0.577	1.997	-0.996
WNW	0.623	-0.634	1.849	-0.992
W	0.633	-0.693	2.253	-1.715
WZW	0.296	-0.310	1.381	-0.769
ZW	0.269	-0.290	1.411	-0.811

Vermits de gemodelleerde golfpiekperiode in SWAN niet altijd een monotoon stijgend verloop kent ifv. de windsnelheid (zie Figuur 21c), wordt eveneens geopteerd om deze parameter af te leiden uit de spectrale periode. Figuur 22 toont de regressie op basis van de resultaten van alle simulaties, uitgezonderd richtingen WZW en ZW, dewelke in bepaalde gevallen een verschuiving van de golfpiekperiode kennen (zie Figuur 11). De geschatte golfpiekperiode voor gebruik in het golfbelastingmodel (§ 3.1) bedraagt:  $T_{p,SWAN} = 1.08 * T_{m-1,0;SWAN}$ .

<sup>16</sup> In de lineaire regressie worden enkel de resultaten T1-T5 meegenomen, vermits dit de kwaliteit van de regressie ten goede komt en bij voorkeur de golfkarakteristieken nauwkeurig(er) voorspeld worden in het extreme(re) bereik van windsnelheden.



Figuur 22 – Fit SWAN gemodelleerde Tp waarden ifv. Tm-1,0 t.p.v. Mercatorsluis (excl. richtingen WZW en ZW)

## 3 Golfbelasting bij aanlandige wind

### 3.1 Methodiek

#### 3.1.1 Invloed resonantie

De invloed van de langegolfcomponent ( $f < 0.05$  Hz) ten gevolge van resonantie in de berekening van het drukprofiel onder een golfkruin resp. golfdal wordt in aanmerking genomen door het verhogen, resp. verlagen, van het stilwaterpeil met de halve laagfrequente *totale* significante golfhoogte  $H_{m0}$  (zie Tabel 2 en Tabel 4). Hierdoor wordt telkens de meest nadelige situatie beschouwd.

#### 3.1.2 Omzetting kortegolfspectrum in golfdrukprofiel en golfkracht

De golfbelasting op het kunstwerk wordt op basis van het golfspectrum op 3 manieren berekend: (i) volgens de methode Goda-Takahashi (2010), (ii) op basis van het golfdrukprofiel volgens de lineaire golftheorie (LWT) en (iii) op basis van een samengesteld drukprofiel afgeleid op basis van een dubbele toepassing van de lineaire golftheorie voor de bijdragen van golfindringing en windgolven afzonderlijk

Bij de methode **Goda-Takahashi** (hierna verder afgekort tot 'Goda methode') zijn de volgende aannames en parameterwaarden van toepassing (zie ook Bijlage D in Bree *et al.*, 2018):

- de *invallende* significante golfhoogte ( $H_s \approx H_{m0}$ ) ter plaatse van het kunstwerk wordt als invoer gebruikt, welke overeenstemt met een significante golfkracht  $F_s$ ;
- de golf lengte wordt berekend op basis van de golfpiekperiode  $T_p$ ;
- een dichtheid van zeewater  $\rho_w = 1025$  kg/m<sup>3</sup>;
- loodrechte golfinval, opgelegd door de relatief smalle toegang tot de Mercatorsluis ;
- de golfdrukformules veronderstellen 100 % golfreflectie, waardoor een eventuele overschatting van de belasting te verwachten is bij optreden van significante golfoverslag of overloop;
- het Goda model heeft betrekking op de belasting onder een golfkruin. Voor een golfdal kunnen de berekeningsdiagrammen in sectie 4.2.3 in Goda (2010) gebruikt worden. Deze leveren de totale kracht onder een golfdal, het aangrijpingspunt van de resultante en druk ter hoogte van de bodem. Deze diagrammen werden theoretisch afgeleid voor staande (niet-brekende) golven. Deze diagrammen werden echter niet toegepast in deze studie;
- de methode is ontwikkeld voor unimodale spectra (vertoont 1 energiepiek) en is minder geschikt indien zowel lokale windgeneratie als golfindringing een gelijkwaardige energie-inhoud vertonen. Als alternatief kan een 'equivalente' waarde  $T_{p,eq}$  gebruikt worden (van der Meer *et al.*, 2002), berekend als:

$$T_{p,eq} = \left( \frac{H_{m0,swell}}{H_{m0,tot}} \right)^2 T_{p,swell} + \left( \frac{H_{m0,wind}}{H_{m0,tot}} \right)^2 T_{p,wind} \quad (1)$$

waarbij  $(H_{m0,swell}, T_{p,swell})$  en  $(H_{m0,wind}, T_{p,wind})$  de combinatie significante golfhoogte, golfpiekperiode van resp. de golfindringings- en windgolfcomponente zijn.



De significante golfkracht  $F_{s,dal}$  (kracht per eenheidsbreedte op een vlakke wand) onder een golfkruin wordt op basis van de **lineaire golftheorie (LWT)** berekend als de geïntegreerde druk tussen de onderzijde van de sluisdeur  $z_{d,bot}$  en  $z_{kr}$  (=minimum van peil golfkruin  $(SWP+0.5 * (1 + CR) * H_{m0,inc})$  of kruinpeil  $z_{d, cr}$  van de constructie):

$$F_{s,kr} = \frac{(1+CR)\rho_w g H_{s,inc}}{2} * \left[ \int_{z_{d,bot}}^0 \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} dz + \int_0^{z_{kr}} \left( 1 - \frac{z}{(1+CR)H_{m0,inc}/2} \right) dz \right] \quad (2)$$

waarbij  $H_{s,inc}$  de invallende significante golfhoogte ( $H_{s,inc} \approx H_{m0,inc}$ ) en  $k = 2\pi/L_p$  het golfgetal op basis van de golfpiekperiode  $T_p$ .

Analoog wordt de golfkracht  $F_{s,dal}$  onder een golfdal (tegengesteld aan de invalrichting van de golven) berekend door integratie van de golfdruk tussen  $z_{d,bot}$  en  $z_{dal}$  (=minimum van peil golfdal  $(SWP-0.5 * (1 + CR) * H_{m0,inc})$  of kruinpeil  $z_{d, cr}$  van de constructie):

$$F_{s,dal} = - \frac{(1+CR)\rho_w g H_{s,inc}}{2} * \int_{z_{d,bot}}^{z_{dal}} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} dz \quad (3)$$

Bij voorkomen van een bimodaal (dubbelpiekig) golfspectrum is het toepassen van **kwadratische sommatie (LWT-QS)** van de resultaten van de lineaire golftheorie van de afzonderlijke componenten van golfindringing  $F_{LWT,swell}$  en windgolven  $F_{LWT,sea}$  een goede benadering van de spectrale lineaire golftheorie (Tuin, 2022):

$$F_{LWT,QS} = \sqrt{F_{LWT,swell}^2 + F_{LWT,sea}^2}$$

### 3.1.3 Kansverdeling golfkrachten en drukprofielen

De verdeling van individuele golfhoogtes binnen een golfspectrum van niet-brekende golven kan met goede benadering d.m.v. een Rayleigh verdeling beschreven worden. Dit geldt zowel voor enkeltoppige als dubbeltoppige golfspectra (Goda, 2010).

De kans op overschrijden van een golfkracht kan conditioneel aan het golfveld beschouwd worden<sup>17</sup>. In Tuin (2022) wordt op basis van experimenteel gemeten golf- en golfkrachtspectra aangetoond dat de krachten Rayleigh verdeeld zijn, zowel voor enkeltoppige als dubbeltoppige spectra.

De overschrijdingskans van de golfkracht  $F$  op basis van de Rayleigh verdeling luidt<sup>18</sup>:

$$P(F) = \exp \left[ -2 \left( \frac{F}{F_s} \right)^2 \right] \quad (4)$$

waarin  $F_s$  de significante golfkracht als schaalparameter, berekend op basis van  $H_s \approx H_{m0}$ . De significante golfkracht heeft een overschrijdingskans van 13.5%. Eenmaal de waarde  $F_s$  gekend, levert vergelijking (2) de golfkrachtwaarde voor een willekeurige overschrijdingskans.

Op dezelfde manier als voor de golfkracht kan ook het significante drukprofiel verschaald worden op basis van een Rayleigh verdeling met de significante golfdruk als schaalparameter.

<sup>17</sup> Indien er destructieve interferentie optreedt tussen de inkomende en gereflecteerde golf kan in principe de 1-op-1 relatie tussen golfhoogte en golfkracht verbroken worden, waardoor de kansverdelingen van golven en krachten onderling kunnen afwijken.

<sup>18</sup> Afgeleid op basis van  $tP \left( \frac{H}{\bar{H}} \right) = \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{H}{\bar{H}} \right)^2 \right]$  en  $H_s \cong 1.6\bar{H}$  (zie hoofdstuk 2 Goda (2010))

### 3.1.4 Geometrische kenmerken Mercatorsluis

Volgende peilen werden afgelezen op het plan “A3 nr. 380 10 plannen: plan H ‘Nieuwe sluis tussen Montgomerydok en Mercator-yachtdokken. Sluisdeuren”. Ministerie van Openbare Werken, Bruggen en Wegen. Dienst der Kust (Maart 1971) “:

- Bodempeil ter plaatse van sluiscolk: -3.33 m TAW.
- Onderzijde vloeddeuren: -3.08 m TAW
- Kruinpeil vloeddeuren: +6.792 m TAW.
- De belastbare breedte van een enkele puntdeur bedraagt 7.52 m. In dit rapport worden de golfkrachten echter per eenheidsbreedte uitgedrukt.

## 3.2 Vergelijking methodes

### 3.2.1 Algemeen

Figuur 23 stelt de dimensieloze golfkracht ( $F^* = F/\rho g H_{inc} h$ ) voor i.f.v. de relatieve waterdiepte  $k_p h$ <sup>19</sup>. De golfkrachten onder een golfkruin worden berekend op 5 verschillende manieren:

1. lineaire golftheorie op basis van de golfpiekperiode  $T_p$  van het samengestelde golfspectrum (F\_LWT)
2. lineaire golftheorie op basis van de equivalente golfpiekperiode  $T_{p,eq}$  berekend volgens vgl. (1) (F\_LWT\_eq)
3. lineaire golftheorie kwadratisch gesommeerd op basis van de golfpiekperiode  $T_p$  uit resp. Mike21-BW en SWAN (F\_LWT\_QS)<sup>20</sup>
4. methode Goda op basis van de golfpiekperiode  $T_p$  van het samengestelde golfspectrum (F\_Goda)
5. methode Goda op basis van de equivalente golfpiekperiode  $T_{p,eq}$  berekend volgens vgl. (1) (F\_Goda\_eq)

In de berekeningen met LWT werd 100% reflectie (CR=1) toegepast om te vergelijken met Goda (waar impliciet volledige reflectie aangenomen wordt). Uit de resultaten blijkt dat voor grotere relatieve waterdiepte ( $k_p h > 10$ ) Goda een overschatting oplevert en voor een beperkte waterdiepte ( $k_p h < 1.5$ ) een onderschatting. Er wordt relatief weinig verschil opgemerkt tussen de F\_LWT\_eq en F\_LWT\_QS.

Afhankelijk van onderliggende verhouding piekdichtheid ( $S_f, max$ ) tussen indringings- en windgolven resulteert de overgang van  $T_p$  naar  $T_{p,eq}$  in:

- een toename van golfdruk indien  $T_{p,eq}$  toeneemt in vgl. met  $T_p$  geassocieerd met windgolven. Dit geval wordt echter niet geobserveerd in de simulaties (ook niet bij N T5);
- een afname van golfdruk indien  $T_{p,eq}$  afneemt in vgl met  $T_p$  geassocieerd met golfindringing.

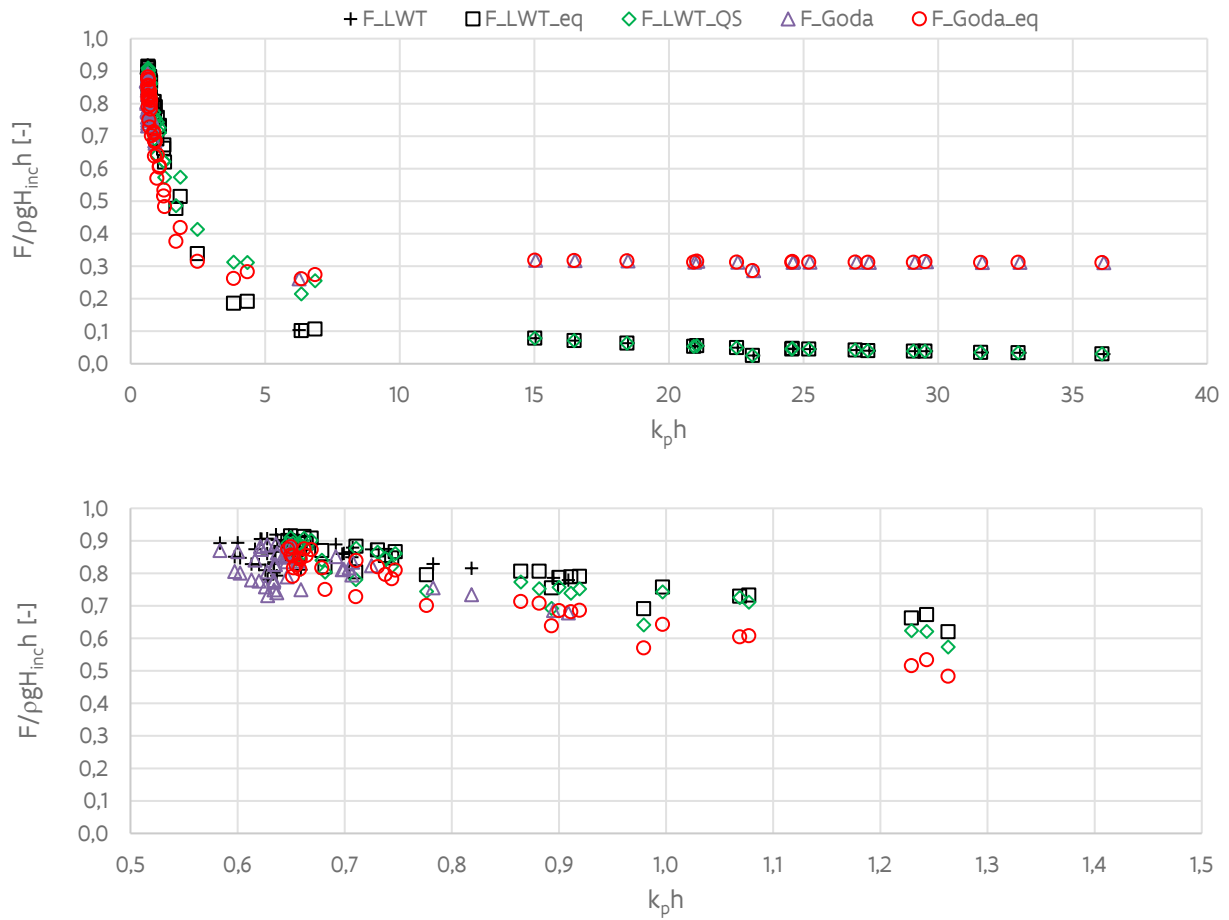
### 3.2.2 Correctie golfpiekperiode SWAN

De verhoging van de SWAN gemodelleerde golfpiekperiode met 2.5 s (zie Tabel 3 en Tabel 5) heeft voornamelijk een invloed op de kracht indien het golfveld gedomineerd door windgolven (lagere waarden  $F^*$ ). De methode Goda is beduidend minder gevoelig aan de correctie van de piekperiode van de windgolven (Figuur 24).

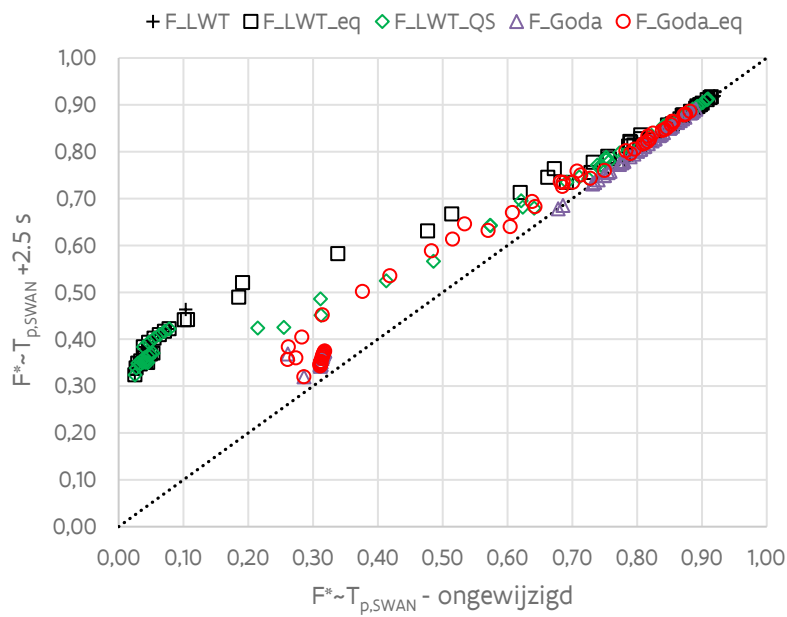
Figuur 25 toont de invloed van de verhoging van de SWAN gemodelleerde golfpiekperiode met 2.5 s (zie Tabel 3 en Tabel 5) op de berekende golfdrukprofielen (aanname CR=1) voor richting N en WNW.

<sup>19</sup>  $k_p = 2\pi/L_p$ , met  $L_p$  de golflengte berekend op basis van de golfpiekperiode en de waterdiepte  $h$

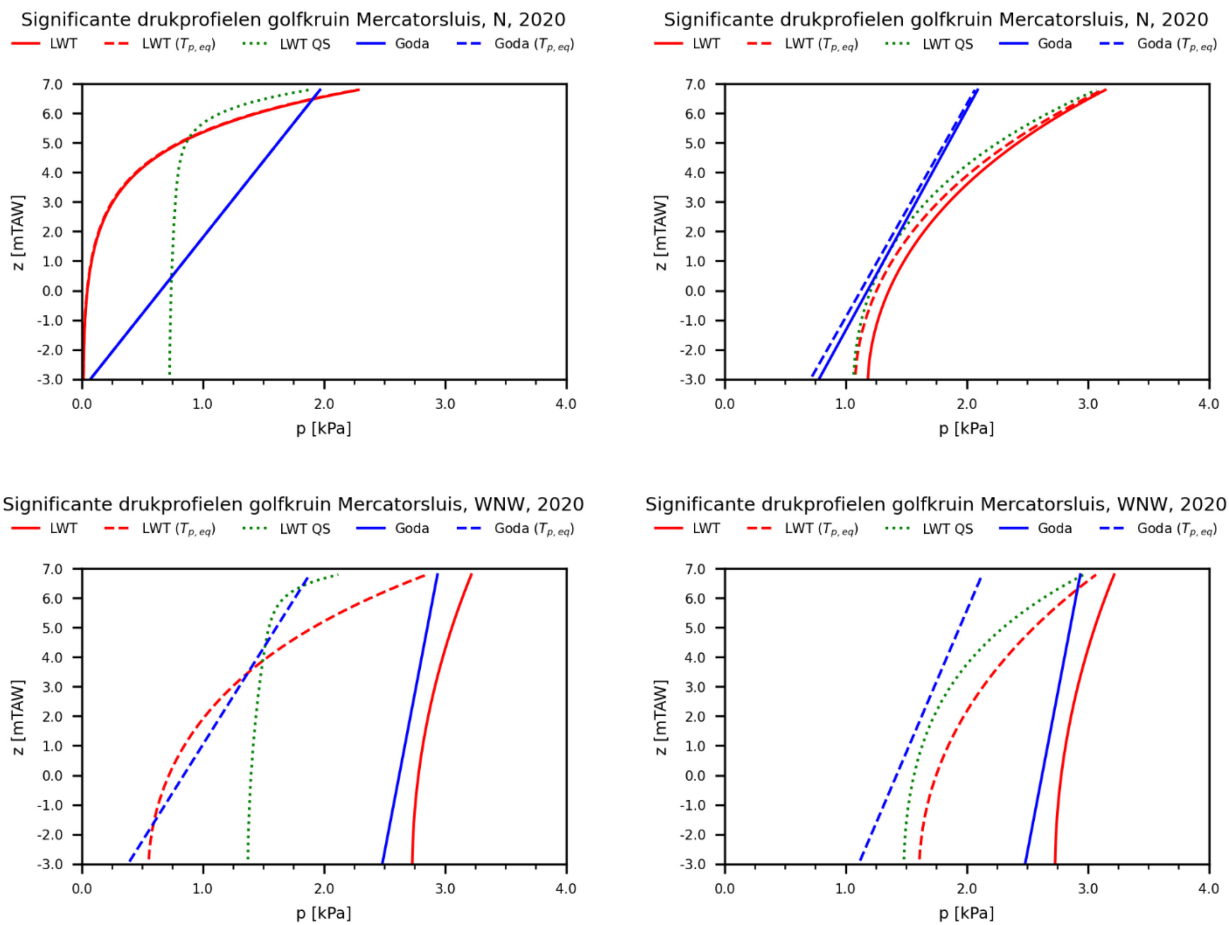
<sup>20</sup> In de grafische voorstellingen wordt  $F^*$  berekend met LWT-QS gelinkt aan  $k_p h$  op basis van  $T_{p,eq}$ .



Figuur 23 – Vergelijking methodes bepaling golfbelasting onder golfkruin (boven: volledig bereik  $k_p h$ , onder: ingezoomd  $k_p h < 1.5$ ).



Figuur 24 – invloed wijziging  $T_{p,SWAN} + 2.5$  s op berekende golfkrachten  $F^*$

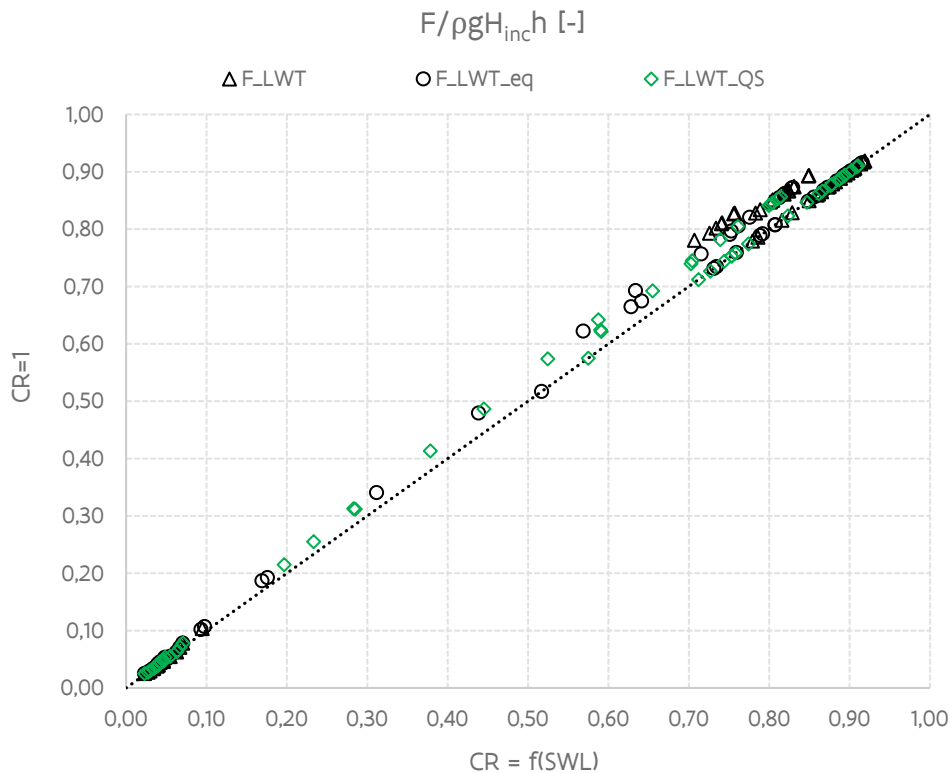


Figuur 25 – golfdrukprofielen T5 simulaties N en WNW (links: originele  $T_{p,SWAN}$ , rechts:  $T_{p,SWAN}$  verhoogd met 2.5 s)

### 3.2.3 Invloed golfreflectie

Figuur 26 toont de vergelijking tussen  $F^*$ -waarden berekend op basis van  $CR=1$  en de (waterstandsafhankelijke) reflectiecoëfficiënt toegepast in de Mike21-BW golfmodellering (Tabel B-1). Vermits de Goda methode volledige reflectie veronderstelt, wordt deze niet opgenomen in vergelijking.

Uit de vergelijking blijkt dat een verlaging van de reflectie voornamelijk invloed heeft op de gevallen gedomineerd door golfindringing die geassocieerd zijn met de hoogste waterstanden.



Figuur 26 – Invloed CR op berekende  $F^*$  waarden.

### 3.2.4 Conclusie

Op basis van bovenstaande vergelijking wordt voorgesteld om voor verdere toepassing in de probabilistische analyse de golfbelasting op de vloeddeuren van de Mercatorsluis te berekenen op volgende wijze:

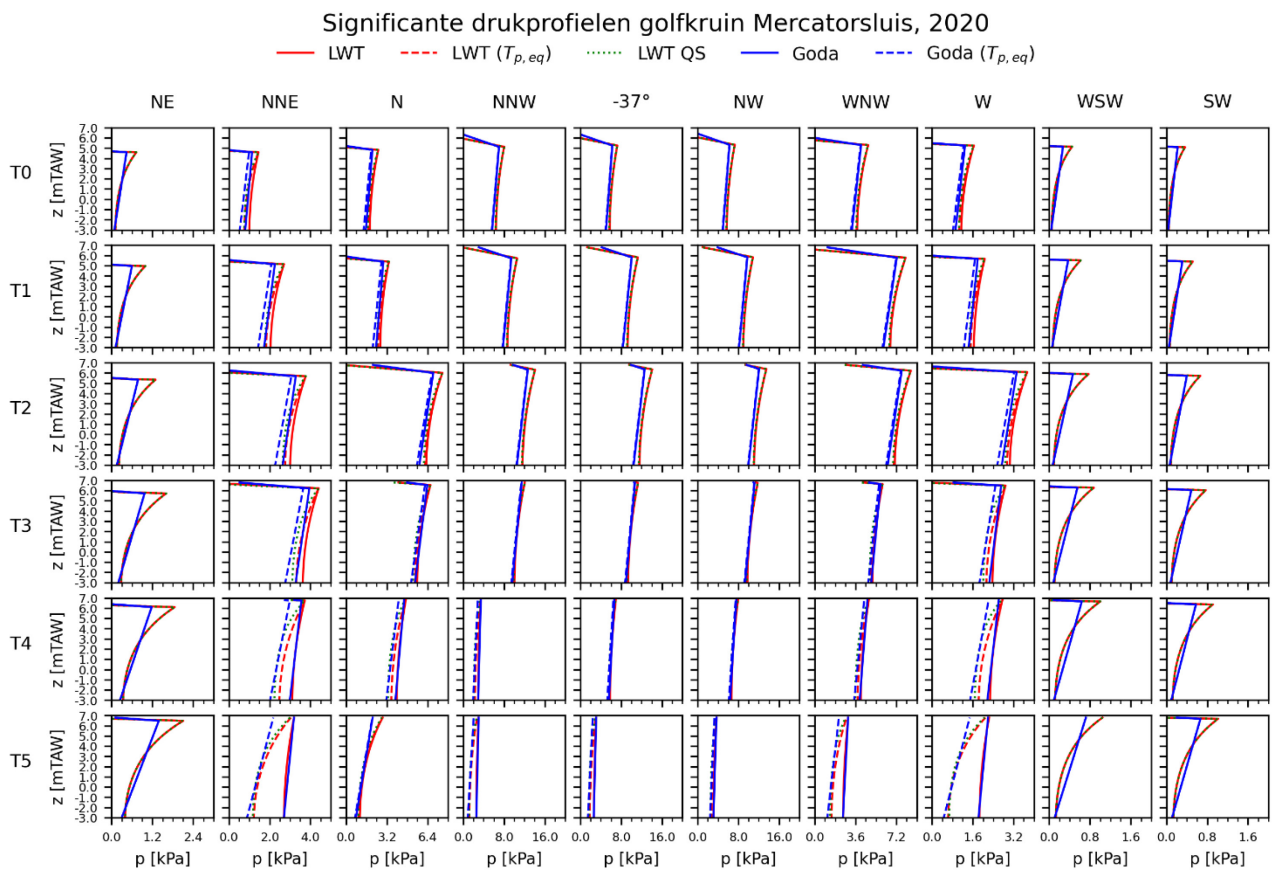
- gebruik makend van de lineaire golftheorie met kwadratische sommering van beide componenten indringing en windgolven (LWT-QS);
- een waterstandsafhankelijke reflectiecoëfficiënt toe te passen in de methode LWT-QS;
- een bias correctie op de golfpiekperiode uit het SWAN model waarbij deze verhoogd wordt met 2.5 s (met behoud van de vorm van het gemodelleerde golfspectrum).

### 3.3 Resultaten hoogwatersituatie

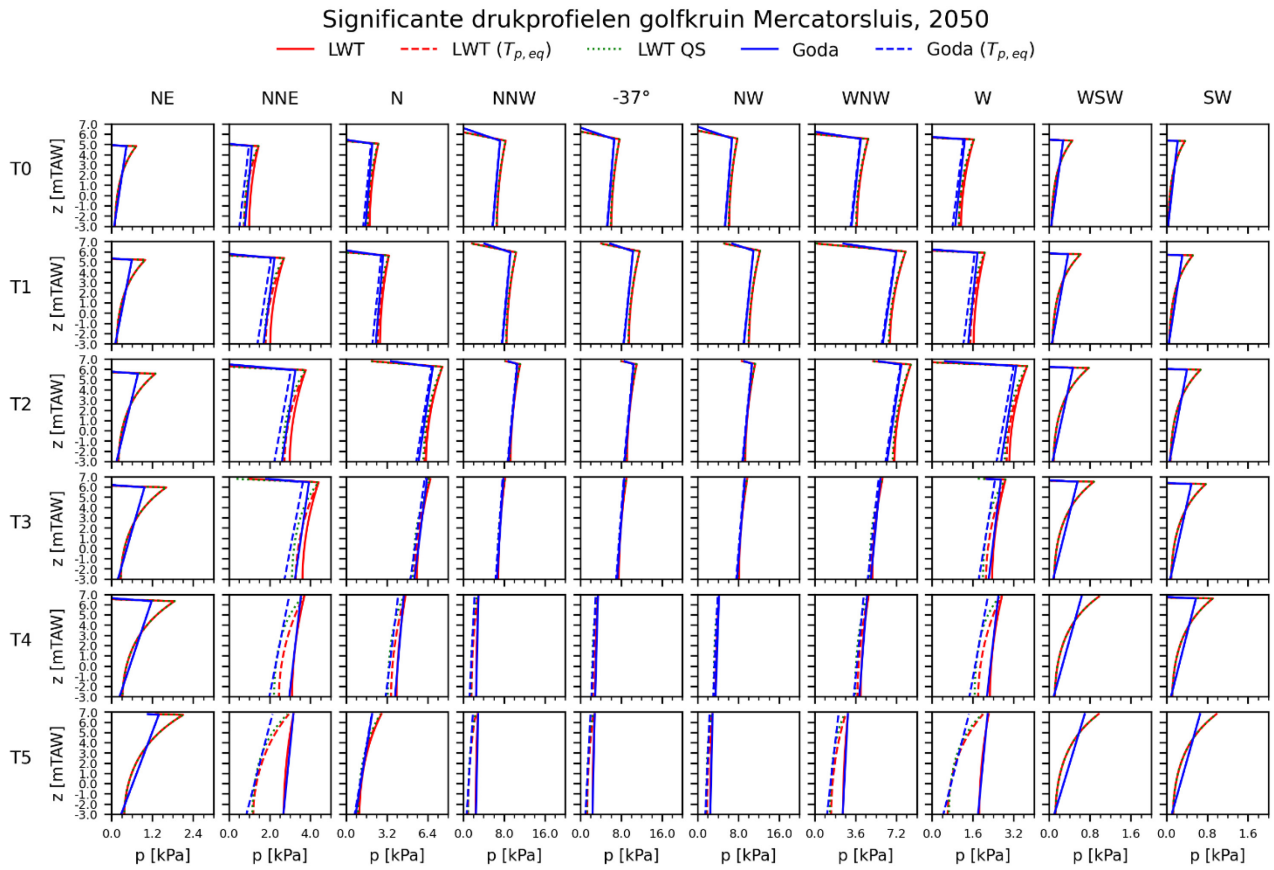
#### 3.3.1 Golfdrukprofielen onder golfkruin

Het overzicht van significante golfdrukprofielen berekend voor de scenario's 2020 en 2050 wordt getoond in resp. Figuur 27 en Figuur 28.

Voor de richtingen N, NNW, -37°N, NW en WNW, gekenmerkt door vrij lange indringingsgolven, is er een vrij goede overeenkomst tussen de verschillende berekeningsmethoden. De getalwaarden van alle significante drukprofielen zijn opgenomen in Bijlage E Significante drukprofielen.



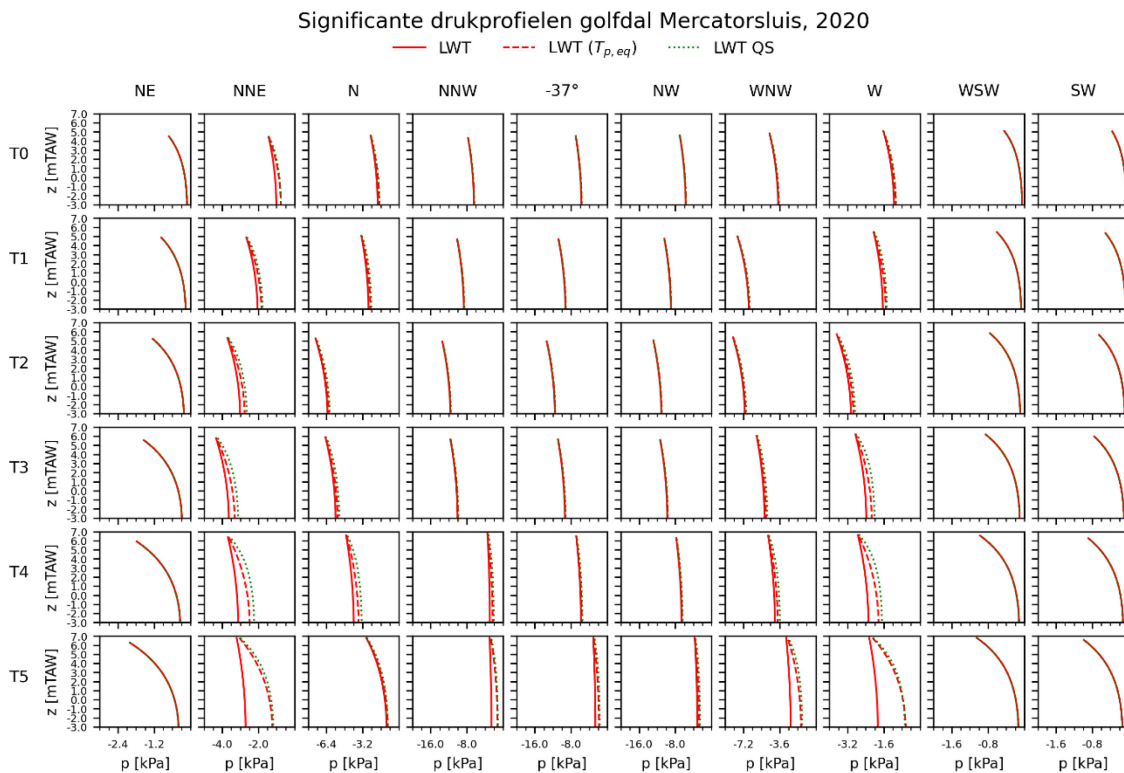
Figuur 27 – Significante golfdrukprofielen onder golfkruin, Mercatorsluis, scenario 2020



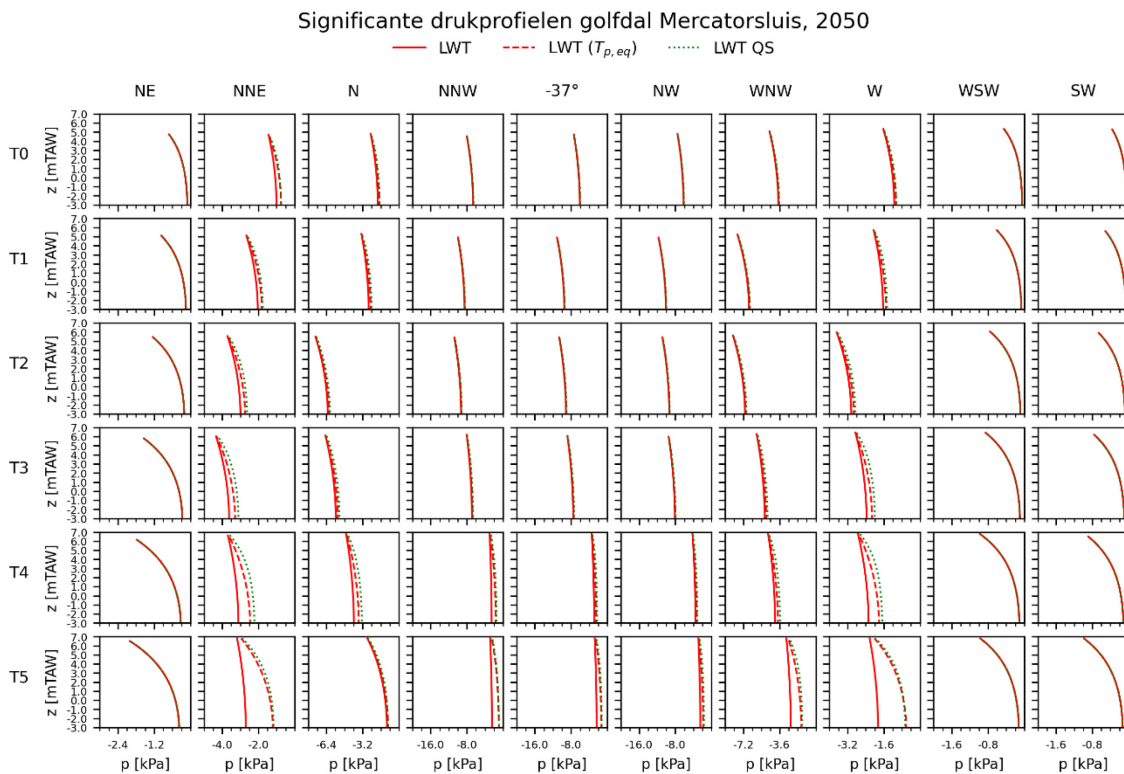
Figuur 28 – Significante golfdrukprofielen onder golfkruin, Mercatorsluis, scenario 2050

### 3.3.2 Golfdrukprofielen onder golfdal

Figuur 29 en Figuur 30 tonen de golfdrukprofielen onder een golfdal berekend met de lineaire golftheorie, voor resp. scenario 2020 en 2050.



Figuur 29 – Significante golfdrukprofielen onder golfdal, Mercatorsluis, scenario 2020



Figuur 30 – Significante golfdrukprofielen onder golfdal, Mercatorsluis, scenario 2050



## 3.3.3 Golfkrachten

Tabel 7 – significante golfkrachten Mercatorsluis, scenario 2020

		SWP(*) [m TAW]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>p,eq</sub> [s]	F <sub>s,kruin</sub> [kN/m]	F <sub>s,dal</sub> [kN/m]		SWP(*) [m TAW]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>p,eq</sub> [s]	F <sub>s,kruin</sub> [kN/m]	F <sub>s,dal</sub> [kN/m]
T0	NO	4.59	0.07	3.54	2.2	-2.1	NW	5.23	0.72	8.65	54.5	-45.8
T1		4.96	0.10	3.67	3.2	-3.1		5.66	1.08	10.01	90.5	-70.8
T2		5.34	0.13	3.79	4.5	-4.3		6.09	1.34	10.19	116.4	-88.2
T3		5.72	0.16	3.91	6.0	-5.6		6.52	1.23	10.48	102.1	-84.2
T4		6.10	0.19	4.02	7.3	-6.8		6.96	0.84	10.37	67.8	-62.5
T5		6.48	0.23	4.12	8.7	-8.1		7.39	0.41	8.59	27.8	-28.1
T0	NNO	4.59	0.14	5.43	7.4	-7.2	WNW	5.25	0.47	8.76	34.5	-31.0
T1		5.15	0.27	7.00	17.1	-16.1		5.67	0.80	10.05	65.4	-54.8
T2		5.69	0.38	7.99	26.6	-24.6		6.10	0.84	10.28	72.1	-60.4
T3		6.22	0.44	8.56	33.1	-30.4		6.52	0.63	10.60	51.0	-45.8
T4		6.74	0.39	7.50	26.1	-24.6		6.94	0.51	9.69	38.4	-37.0
T5		7.23	0.35	5.32	16.6	-16.8		7.37	0.33	6.07	16.9	-17.1
T0	N	4.83	0.25	7.02	15.8	-14.8	W	5.24	0.16	6.77	10.4	-10.0
T1		5.39	0.33	8.11	23.4	-21.7		5.64	0.21	8.02	14.5	-13.9
T2		6.01	0.75	10.03	62.3	-52.7		6.05	0.37	9.27	29.3	-27.2
T3		6.54	0.69	10.26	55.8	-49.3		6.45	0.30	8.48	21.8	-20.7
T4		7.06	0.50	8.96	36.1	-35.0		6.86	0.29	7.49	19.3	-18.9
T5		7.54	0.35	4.98	14.8	-15.1		7.26	0.25	4.77	10.3	-10.3
T0	NNW	5.13	0.80	8.91	59.8	-49.1	WSW	5.14	0.04	3.42	1.3	-1.3
T1		5.72	1.05	9.72	86.6	-67.7		5.52	0.06	3.54	1.9	-1.8
T2		6.32	1.40	10.25	121.7	-92.1		5.90	0.08	3.63	2.5	-2.4
T3		6.83	1.27	10.56	104.5	-87.1		6.28	0.09	3.70	2.9	-2.8
T4		7.24	0.38	7.61	23.7	-24.0		6.65	0.11	3.76	3.5	-3.4
T5		7.76	0.34	5.53	15.4	-15.7		7.03	0.12	3.84	3.7	-3.8
T0	-37°N	5.25	0.72	8.78	53.9	-45.3	SW	5.09	0.04	3.47	1.1	-1.1
T1		5.81	1.12	9.84	93.6	-72.2		5.41	0.05	3.55	1.6	-1.6
T2		6.35	1.40	10.17	121.5	-91.7		5.72	0.07	3.65	2.2	-2.1
T3		6.76	1.18	10.43	97.7	-81.6		6.04	0.08	3.74	2.6	-2.6
T4		7.17	0.74	10.15	58.5	-55.1		6.36	0.10	3.82	3.2	-3.1
T5		7.57	0.35	6.85	19.7	-19.9		6.68	0.11	3.89	3.8	-3.6

(\*) SWP vermeerderd met de halve significante golfhoogte uit de laagfrequente golfenergie

Tabel 8 – significante golfkrachten Mercatorsluis, scenario 2050

		SWP [m TAW]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>p,eq</sub> [s]	F <sub>s,kruin</sub> [kN/m]	F <sub>s,dal</sub> [kN/m]						
		SWP [m TAW]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>p,eq</sub> [s]	F <sub>s,kruin</sub> [kN/m]	F <sub>s,dal</sub> [kN/m]	SWP [m TAW]	H <sub>m0</sub> [m]	T <sub>p,eq</sub> [s]	F <sub>s,kruin</sub> [kN/m]	F <sub>s,dal</sub> [kN/m]	
<b>T0</b>	<b>NO</b>	4.82	0.07	3.53	2.2	-2.1	<b>NW</b>	5.57	0.78	8.95	60.5	-50.6
<b>T1</b>		5.20	0.10	3.66	3.2	-3.1		6.10	1.22	10.06	104.5	-80.3
<b>T2</b>		5.58	0.13	3.79	4.5	-4.3		6.54	1.18	10.36	97.7	-79.3
<b>T3</b>		5.96	0.16	3.90	6.0	-5.6		6.95	1.03	10.49	84.0	-73.6
<b>T4</b>		6.33	0.19	4.01	7.3	-6.8		7.28	0.47	9.38	33.7	-33.7
<b>T5</b>		6.71	0.23	4.12	8.6	-8.1		7.70	0.33	7.25	19.1	-19.3
<b>T0</b>	<b>NNO</b>	4.83	0.14	5.43	7.6	-7.3	<b>WNW</b>	5.53	0.47	8.76	35.3	-31.8
<b>T1</b>		5.38	0.27	7.00	17.5	-16.5		6.02	0.80	10.05	66.9	-56.3
<b>T2</b>		5.92	0.38	7.99	27.2	-25.1		6.46	0.84	10.28	72.7	-62.0
<b>T3</b>		6.46	0.44	8.56	33.8	-31.1		6.87	0.63	10.60	50.7	-46.9
<b>T4</b>		6.97	0.39	7.51	25.7	-25.1		7.27	0.51	9.69	38.1	-37.8
<b>T5</b>		7.47	0.35	5.32	16.1	-16.3		7.65	0.33	6.07	16.5	-16.7
<b>T0</b>	<b>N</b>	5.07	0.25	7.01	16.1	-15.2	<b>W</b>	5.48	0.16	6.77	10.6	-10.3
<b>T1</b>		5.63	0.33	8.12	23.9	-22.2		5.90	0.21	8.01	14.8	-14.2
<b>T2</b>		6.25	0.75	10.03	63.5	-54.1		6.32	0.37	9.27	29.9	-27.8
<b>T3</b>		6.78	0.69	10.26	55.8	-50.5		6.72	0.30	8.48	22.1	-21.1
<b>T4</b>		7.30	0.50	8.96	35.7	-35.7		7.12	0.29	7.48	19.0	-19.1
<b>T5</b>		7.78	0.35	4.98	14.3	-14.6		7.51	0.25	4.77	9.9	-10.0
<b>T0</b>	<b>NNW</b>	5.35	0.83	8.92	63.5	-52.2	<b>WSW</b>	5.38	0.05	3.44	1.3	-1.3
<b>T1</b>		5.94	1.03	9.86	86.6	-68.9		5.76	0.06	3.54	1.9	-1.8
<b>T2</b>		6.51	1.17	10.41	96.6	-78.8		6.14	0.08	3.63	2.5	-2.4
<b>T3</b>		7.01	0.87	10.45	70.1	-63.6		6.51	0.09	3.70	3.0	-2.9
<b>T4</b>		7.47	0.33	6.44	17.9	-18.1		6.89	0.11	3.77	3.4	-3.4
<b>T5</b>		7.99	0.33	5.15	13.3	-13.5		7.27	0.12	3.84	3.5	-3.5
<b>T0</b>	<b>-37°N</b>	5.49	0.76	8.88	58.9	-49.2	<b>SW</b>	5.32	0.04	3.47	1.1	-1.1
<b>T1</b>		6.04	1.15	9.86	98.2	-76.1		5.64	0.05	3.55	1.6	-1.6
<b>T2</b>		6.50	1.15	10.34	95.3	-77.9		5.96	0.07	3.65	2.2	-2.1
<b>T3</b>		6.97	0.95	10.46	77.6	-69.1		6.28	0.08	3.74	2.6	-2.6
<b>T4</b>		7.35	0.38	8.24	25.0	-25.2		6.60	0.10	3.82	3.3	-3.1
<b>T5</b>		7.80	0.32	5.97	15.4	-15.6		6.91	0.11	3.89	3.6	-3.6

### 3.4 Evolutie golfbelasting tijdens stormperiode

In hetgeen voorafging werden golfkarakteristieken en bijhorende belasting op de vloeddeuren van de Mercatorsluis behandeld op het moment van hoogwater (verondersteld de stormpiek) tijdens een storm met stormopzet. De vraag stelt zich echter of er op een ander tijdstip gedurende de storm zich een meer kritieke situatie kan voordoen voor een bepaald faalmechanisme. 2 gevallen worden onderscheiden:

Geval 1: de combinatie van een hoge waterstand (niet noodzakelijk de stormpiek) en maximale golfbelasting is bepalend voor het faalmechanisme (bv. bezwijken van sluisdeur)

Geval 2: de combinatie van een lage waterstand en optredende golfbelasting is bepalend voor het faalmechanisme (bv. stabiliteit van kolk- of keermuren)

Hierna wordt een redenering uiteengezet om de golfbelasting in te schatten die ontstaat op een tijdstip verschillend van hoogwater, tijdens een storm met opzet. Daarbij wordt verondersteld dat de golfhoogte op ondiep water buitengaats constant blijft gedurende een voldoende lange periode (min. 6 uur) vóór of na de stormpiek (hoogwater).

#### 3.4.1 Geval 1: combinatie hoge waterstand en maximale golfbelasting

De KD-factor ter plaatse van de Mercatorsluis (bij golfindringing) is afhankelijk van de waterstand, zoals blijkt uit de analyse van de Mike21-BW resultaten (Figuur 15 t.e.m. Figuur 17). Tabel 9 bevat de waterstanden waarvoor de maximale KD-factor bereikt wordt, gegeven de golfrichting.

Tabel 9 – richtingsafhankelijke limietwaarden waterstand bij maximale KD-factor

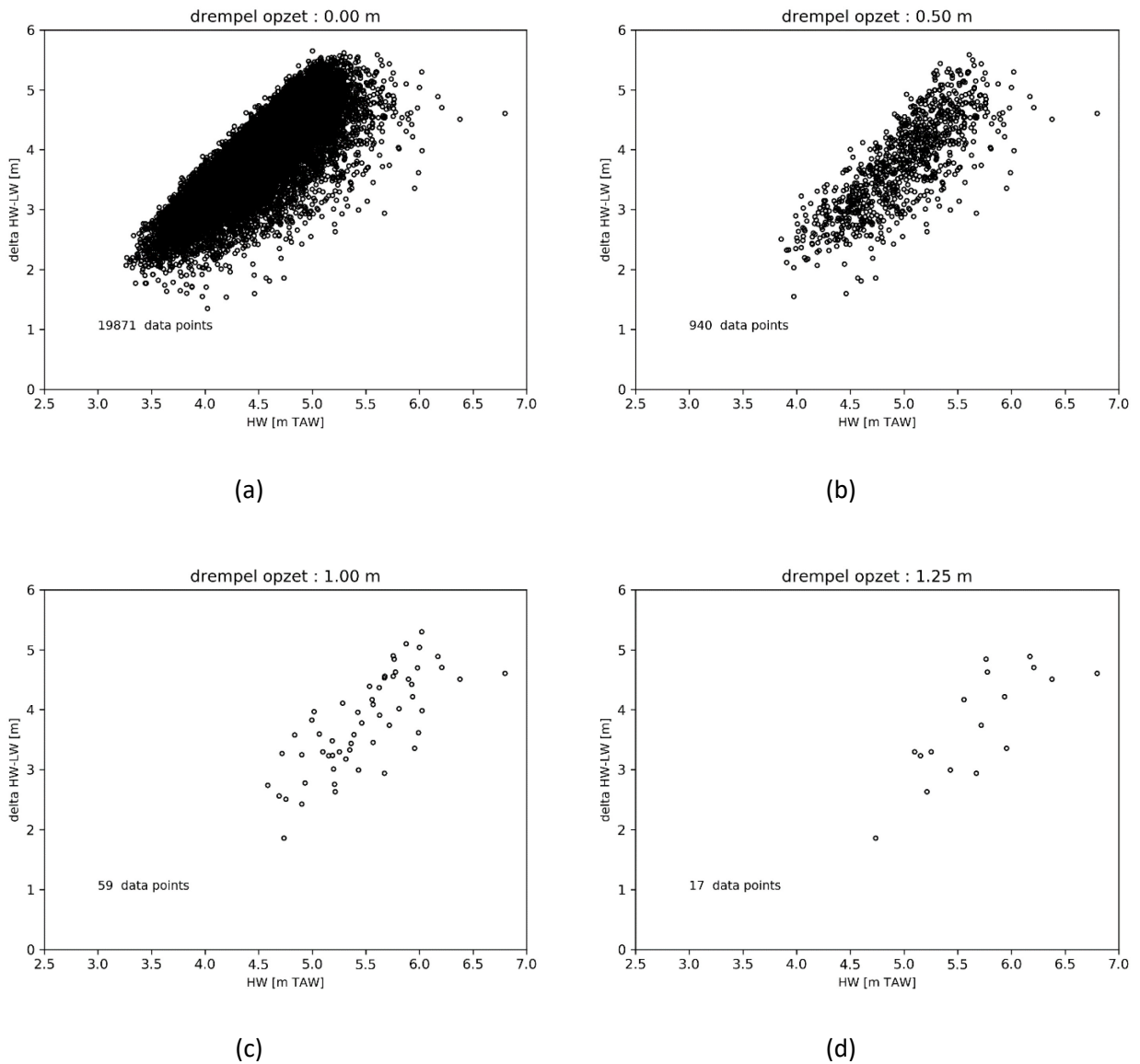
golfrichting	Limietwaterstand [m TAW]	Max. KD (invalend) [-]
W	+6.28	0.09
WNW	+5.67	0.19
NW	+6.1	0.30
-37°N	+6.1	0.31
NNW	+6.1	0.30
N	+5.88	0.17
NNE	+6.15	0.09

Indien de maximale hoogwaterstand tijdens de storm zich onder de waterstand bevindt die hoort bij de maximale KD-factor (Tabel 9), zal de grootste golfbelasting ontstaan op het hoogwater (stormpiek). Dit is de meest kritieke situatie te beschouwen in de studie van het constructief falen.

Indien de maximale hoogwaterstand zich echter boven de waterstand bevindt die hoort bij de maximale KD-factor, zal de meest kritieke situatie ontstaan op het tijdstip voor of na hoogwater wanneer de limietwaterstand uit Tabel 9 bereikt wordt. Er dient echter opgemerkt te worden dat deze situatie zich voordoet bij opkomend of afgaand tij, en van significant kortere duur is dan de hoogwatersituatie (geschat 1-2 uur)<sup>21</sup>. In de uitwerking van de studie van het constructief faalgedrag dient verder beoordeeld te worden of deze situatie al dan niet als kritiek beschouwd dient te worden.

<sup>21</sup> In het meest extreme geval zou de laagwaterstand onder stormopzet de limietwaarde uit Tabel 9 benaderen. Het daartoe benodigde stormopzet is echter dermate groot (waterstand >+10 m TAW) dat dit zou leiden tot een totale overstroming van de Oostendse haven. Dit scenario lijkt niet van praktisch nut in een toets anno vandaag of met een beperkte horizon voor zeespiegelstijging.

Figuur 31 toont de gemeten waarden van getijslag (*delta HW-LW* gedefinieerd als het verschil tussen het hoogwater en het daaropvolgend laagwater) in functie van de gemeten hoogwaters (met stormopzet) in de periode 1925-2019<sup>22</sup>. De figuren tonen een duidelijke correlatie tussen de getijslag en de optredende hoogwaterstand. Op basis hiervan kan men concluderen dat bij extreme hoogwaterstanden (>+7 m TAW) de waterstand vóór of na het hoogwater de limietwaarden uit Tabel 9 zal bereiken.



Figuur 31 – Getijslag i.f.v. waargenomen hoogwaterstanden (1925-2019) voor verschillende drempelwaarden van stormopzet (brondata: Meetnet Vlaamse Banken, Vuik *et al.*, 2020)

<sup>22</sup> Hiertoe werden de waterstandsgegevens in de meetreeks *WP2-waterstanden.csv* uit Vuik *et al.* (2020) gebruikt, dewelke de gemeten hoogwaterstanden en het daarmee corresponderende opzet en windrichting bevatten.

### 3.4.2 Geval 2: combinatie laagwater en optredende golfbelasting tijdens stormopzet

Voor toepassing in de studie naar het constructief faalgedrag wordt aanbevolen de golfbelasting op hoogwater ongewijzigd te combineren met de optredende laagwaterstand. Daarbij dient wel rekening gehouden te worden met de overwegingen uit §3.4.1.

Bovendien kan ook de beperkte waterdiepte bij laagtij (bodempeil t.p.v. de ingang Mercatorsluis op ca. - 3 m TAW) er voor zorgen dat de grootste golven reeds door golfbreking gereduceerd worden, waardoor de kansverdeling van individuele golfhoogtes kan afwijken van de (theoretische) Rayleigh verdeling.

## 4 Golfbelasting bij afluiddige wind

Gelet op de N-Z oriëntatie van de toegang tot de Mercatorsluis wordt aangenomen dat er bij afluiddige wind (windsector ZW tot O) geen merkbare golfbelasting door windgolven ontstaat op de sluisdeuren. Dit geval wordt hier dus niet behandeld.

## 5 Conclusies

In het kader van de probabilistische toetsing van de kunstwerken in de kusthavens werd een studie uitgevoerd naar de golfbelasting op verschillende waterkerende kunstwerken in de haven van Oostende. Dit rapport behandelt de randvoorwaarden van de Mercatorsluis.

Het golfklimaat onder aanlandige wind (stormopzet) werd gemodelleerd op basis van Mike21-BW en SWAN, waarbij enkel de hoogwatersituatie beschouwd werd. De afzonderlijke bijdragen van golfindringing en lokaal gegenereerde windgolven werden gecombineerd (voor de simulatiematrix op basis van HR2014) met aandacht voor de specifieke manier waarop golfreflectie op het kunstwerk in rekening gebracht wordt in beide golfmodellen.

De transformatie van de golfkarakteristieken buitengaats (nabij de haveningang) naar karakteristieken in de onmiddellijke nabijheid van de Mercatorsluis werd analytisch beschreven. Dit laat de gebruiker van dit rapport toe om de transformatie toe te passen vertrekkend van willekeurige (zij het fysische gecorreleerde) randvoorwaarden buitengaats (bv. op basis van HR2020).

Het lokale golfveld ter plaatse van de vloeddeuren van de Mercatorsluis werd vervolgens gebruikt als invoer voor een berekening van de golfbelasting. Voor de belasting onder een golfkruin werd het significante golfdrukprofiel en de golfkracht berekend op basis van de lineaire golftheorie met kwadratische sommatie van de afzonderlijke bijdragen van indringingsgolven en windgolven. De aanwezigheid van lange golven in het Montgomerydok door resonantie werd in rekening gebracht door het verhogen/verlagen van de waterstand in de berekening van het drukprofiel onder resp. golfkruin en golfdal.

De waarden van de significante golfkrachten en -drukprofielen kunnen gebruikt worden als schaalparameter in een Rayleigh verdeling, teneinde de golfkrachten en -drukprofielen te bepalen voor specifieke overschrijdingskansen binnen de beschouwde hoogwatersituatie.

De golfbelasting bij een lagere waterstand tijdens een stormgebeurtenis met aanlandige wind werd niet gemodelleerd. Er wordt aanbevolen de golfbelasting op hoogwater ongewijzigd te combineren met de optredende laagwaterstand.

## Referenties

**Bree, B. van; Delhez, R.; Casteleijn, A.; Jongejan, R.** (2018). Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken – Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie. Groene versie 1 november 2018. Rijkswaterstaat-WVL Waterkeringen

**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.

**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. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=334267>

**De Roo, S.; Vanneste, D.; Suzuki, T.; Mostaert, F.** (2020). Numerieke modellering van het kortkruinig golfklimaat in de haven van Oostende: huidige en toekomstige havengeometrie. Versie 3.0. *WL Rapporten*, 17\_052\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

**Goda, Y.** (2010). Random Seas and Design of Maritime Structures. 3rd ed. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 33 (P. L.-F. Liu, Ed.). World Scientific. ISBN 978-981-4282-39-0. doi:10.1142/7425

**Gruwez, V.; Bolle, A.; Hassan, W.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2011). Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens: deel 1. Haven van Oostende. *WL Rapporten*, 769\_03. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen

**Gruwez, V.; Bolle, A.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2012). Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens: deel 2: haven van Zeebrugge. *WL Rapporten*, 769\_03. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen

**Tuin H.; Voortman H. ; de Almeida E.** (2022). Evaluation and validation of the spectral linear wave theory and ‘traditional’ formulae for pulsating wave loads for unimodal and bimodal seas. *J. Coast. Hydraul. Struct.* 2(21)

**Tuin, H.** (2020). Golfbelastingen Visserijsluis Oostende - toepassing spectrale lineaire golftheorie.. *D10010739:105*. Arcadis Nederland BV

**van der Meer, J.; W. Langenberg, J.; Klein Breteler, M.; Hurdle, D.; den Heijer, F.** (2002). Wave boundary conditions and overtopping in complex areas. *Coast. Eng.*: 2092–2104

**Vanneste, D.; Willems, M.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017). Golfmetingen haven Oostende tijdens storm ‘Dieter’. versie 3.0. *WL Rapporten*, 17\_008\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=285858>

**Verwaest, T.; Reyns, J.; Mostaert, F.** (2009). Overstromingsrisico’s aan de Vlaamse kust: impact van de klimaatsevolutie. *WL Adviezen*, 718\_02m. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen



**Vuik, V.; Kuijper, B.; Geerse, C.P.M.; Strijker, B.; Gautier, C.; Trouw, K.; Vanneste, D.; Suzuki, T.; Nossent, J.; Thoon, D.; De Roo, S.; Mostaert, F.** (2020). Het hydraulisch randvoorwaardenboek (2020): rapport. Versie 2.0. *WL Rapporten, 18\_037\_4*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=332127>

# Bijlage A Simulatiematrix (aanlandige wind)

Tabel A-1 – Simulatiematrix met randvoorwaarden voor de Oostende MIKE21-BW OST en SWAN modellen

Run ID	T	Hoofdgolfrichting	Scenario 2020 (HR2014)			Scenario 2050			Windrichting.	Windsnelheid $u_{w10,land}$ (*)
			$h$ (p50)	$H_{m0}$	$T_p$	$h$ (p50)	$H_{m0}$	$T_p$		
	[jaar]	[-/° N]	[m TAW]	[m]	[s]	[m TAW]	[m]	[s]	[-, °N]	[m/s]
T0_01	1	ZW/225	5.09	1.33	4.30	5.32	1.35	4.34	ZW/225	14.96
T1_01	10	ZW/225	5.41	1.33	5.47	5.64	1.35	5.50	ZW/225	18.36
T2_01	100	ZW/225	5.72	1.63	5.81	5.96	1.66	5.84	ZW/225	21.53
T3_01	1000	ZW/225	6.04	1.96	6.15	6.28	1.99	6.18	ZW/225	24.56
T4_01	10000	ZW/225	6.36	2.24	6.39	6.60	2.28	6.42	ZW/225	27.49
T5_01	100000	ZW/225	6.68	2.48	6.59	6.91	2.52	6.63	ZW/225	30.35
T0_02	1	WZW/247.5	5.14	1.91	5.54	5.38	1.94	5.59	WZW/247.5	14.61
T1_02	10	WZW/247.5	5.52	2.03	6.73	5.76	2.06	6.77	WZW/247.5	17.79
T2_02	100	WZW/247.5	5.90	2.52	7.29	6.14	2.56	7.34	WZW/247.5	20.62
T3_02	1000	WZW/247.5	6.28	2.86	7.64	6.51	2.91	7.69	WZW/247.5	23.26
T4_02	10000	WZW/247.5	6.65	3.13	7.90	6.89	3.18	7.95	WZW/247.5	25.76
T5_02	100000	WZW/247.5	7.03	3.36	8.11	7.27	3.41	8.15	WZW/247.5	28.16
T0_03	1	W/270	5.24	2.80	6.77	5.47	2.85	6.84	W/270	13.64
T1_03	10	W/270	5.64	3.41	8.84	5.88	3.47	8.90	W/270	17.90
T2_03	100	W/270	6.05	3.76	9.21	6.28	3.83	9.28	W/270	22.16
T3_03	1000	W/270	6.45	3.99	9.44	6.69	4.05	9.50	W/270	26.42
T4_03	10000	W/270	6.86	4.15	9.60	7.09	4.22	9.67	W/270	30.68
T5_03	100000	W/270	7.26	4.29	9.73	7.50	4.35	9.79	W/270	34.95
T0_04	1	WNW/292.5	5.25	2.89	8.52	5.48	2.94	8.60	WNW/292.5	13.30
T1_04	10	WNW/292.5	5.67	4.16	9.78	5.91	4.23	9.91	WNW/292.5	16.81
T2_04	100	WNW/292.5	6.10	4.74	10.80	6.33	4.82	10.94	WNW/292.5	20.05
T3_04	1000	WNW/292.5	6.52	5.12	11.45	6.75	5.20	11.58	WNW/292.5	23.14
T4_04	10000	WNW/292.5	6.94	5.40	11.93	7.18	5.48	12.07	WNW/292.5	26.12
T5_04	100000	WNW/292.5	7.37	5.63	12.31	7.60	5.72	12.45	WNW/292.5	29.02
T0_05	1	NW/315	5.23	3.33	8.32	5.46	3.39	8.40	NW/315	12.67
T1_05	10	NW/315	5.66	4.01	9.53	5.89	4.08	9.65	NW/315	14.90
T2_05	100	NW/315	6.09	4.39	10.18	6.33	4.46	10.31	NW/315	16.76
T3_05	1000	NW/315	6.52	4.74	10.78	6.76	4.81	10.91	NW/315	18.44
T4_05	10000	NW/315	6.96	5.00	11.22	7.19	5.08	11.35	NW/315	19.99
T5_05	100000	NW/315	7.39	5.22	11.58	7.63	5.30	11.71	NW/315	21.47

(\*) reductiefactor 0.72 voor aanlandige wind

Tabel A-1 – Simulatiematrix met randvoorwaarden voor de Oostende MIKE21-BW OST en SWAN modellen (vervolg)

Run ID	T	Hoofd- golfrichting	Scenario 2020 (HR2014)			Scenario 2050			Wind- richting.	Windsnelheid u <sub>w10,land</sub> (*)
			h (p50)	H <sub>mo</sub>	T <sub>p</sub>	h (p50)	H <sub>mo</sub>	T <sub>p</sub>		
	[jaar]	[-/° N]	[m TAW]	[m]	[s]	[m TAW]	[m]	[s]	[-, °N]	[m/s]
T0_06	1	-37	5.15	3.27	8.44	5.39	3.33	8.52	-37	12.37
T1_06	10	-37	5.62	4.02	9.57	5.85	4.09	9.69	-37	14.80
T2_06	100	-37	6.09	4.45	10.29	6.32	4.52	10.41	-37	16.87
T3_06	1000	-37	6.56	4.81	10.89	6.79	4.88	11.01	-37	18.75
T4_06	10000	-37	7.03	5.08	11.33	7.26	5.16	11.46	-37	20.52
T5_06	100000	-37	7.50	5.30	11.69	7.73	5.38	11.82	-37	22.19
T0_07	1	NNW/337.5	5.01	3.17	8.66	5.25	3.23	8.74	NNW/337.5	11.83
T1_07	10	NNW/337.5	5.55	4.05	9.64	5.78	4.12	9.75	NNW/337.5	14.63
T2_07	100	NNW/337.5	6.09	4.56	10.48	6.32	4.63	10.61	NNW/337.5	17.07
T3_07	1000	NNW/337.5	6.62	4.93	11.08	6.86	5.01	11.21	NNW/337.5	19.33
T4_07	10000	NNW/337.5	7.16	5.21	11.53	7.39	5.29	11.65	NNW/337.5	21.46
T5_07	100000	NNW/337.5	7.69	5.44	11.89	7.93	5.52	12.01	NNW/337.5	23.50
T0_08	1	N/360	4.80	2.83	7.53	5.03	2.88	7.60	N/360	10.22
T1_08	10	N/360	5.34	3.58	8.83	5.57	3.65	8.95	N/360	13.27
T2_08	100	N/360	5.88	4.25	10.13	6.11	4.32	10.27	N/360	16.29
T3_08	1000	N/360	6.42	4.69	10.98	6.65	4.77	11.12	N/360	19.30
T4_08	10000	N/360	6.96	5.03	11.63	7.19	5.11	11.77	N/360	22.31
T5_08	100000	N/360	7.50	5.32	12.15	7.73	5.40	12.30	N/360	25.30
T0_09	1	NNO/22.5	4.59	1.86	6.08	4.82	1.89	6.14	NNO/22.5	11.08
T1_09	10	NNO/22.5	5.11	3.07	7.99	5.34	3.12	8.08	NNO/22.5	14.34
T2_09	100	NNO/22.5	5.63	3.66	8.92	5.86	3.72	9.02	NNO/22.5	17.61
T3_09	1000	NNO/22.5	6.15	4.13	9.62	6.39	4.19	9.72	NNO/22.5	20.88
T4_09	10000	NNO/22.5	6.67	4.49	10.15	6.91	4.56	10.25	NNO/22.5	24.15
T5_09	100000	NNO/22.5	7.19	4.80	10.58	7.43	4.87	10.68	NNO/22.5	27.42
T0_10	1	NO/45	4.59	1.26	4.99	4.82	1.28	5.04	NO/45	11.31
T1_10	10	NO/45	4.96	-	-	5.20	-	-	NO/45	14.07
T2_10	100	NO/45	5.34	-	-	5.58	-	-	NO/45	16.84
T3_10	1000	NO/45	5.72	-	-	5.96	-	-	NO/45	19.60
T4_10	10000	NO/45	6.10	-	-	6.33	-	-	NO/45	22.37
T5_10	100000	NO/45	6.48	-	-	6.71	-	-	NO/45	25.13

(\*) reductiefactor 0.72 voor aanlandige wind

## Bijlage B Reflectiecoëfficiënten Mercatorsluis

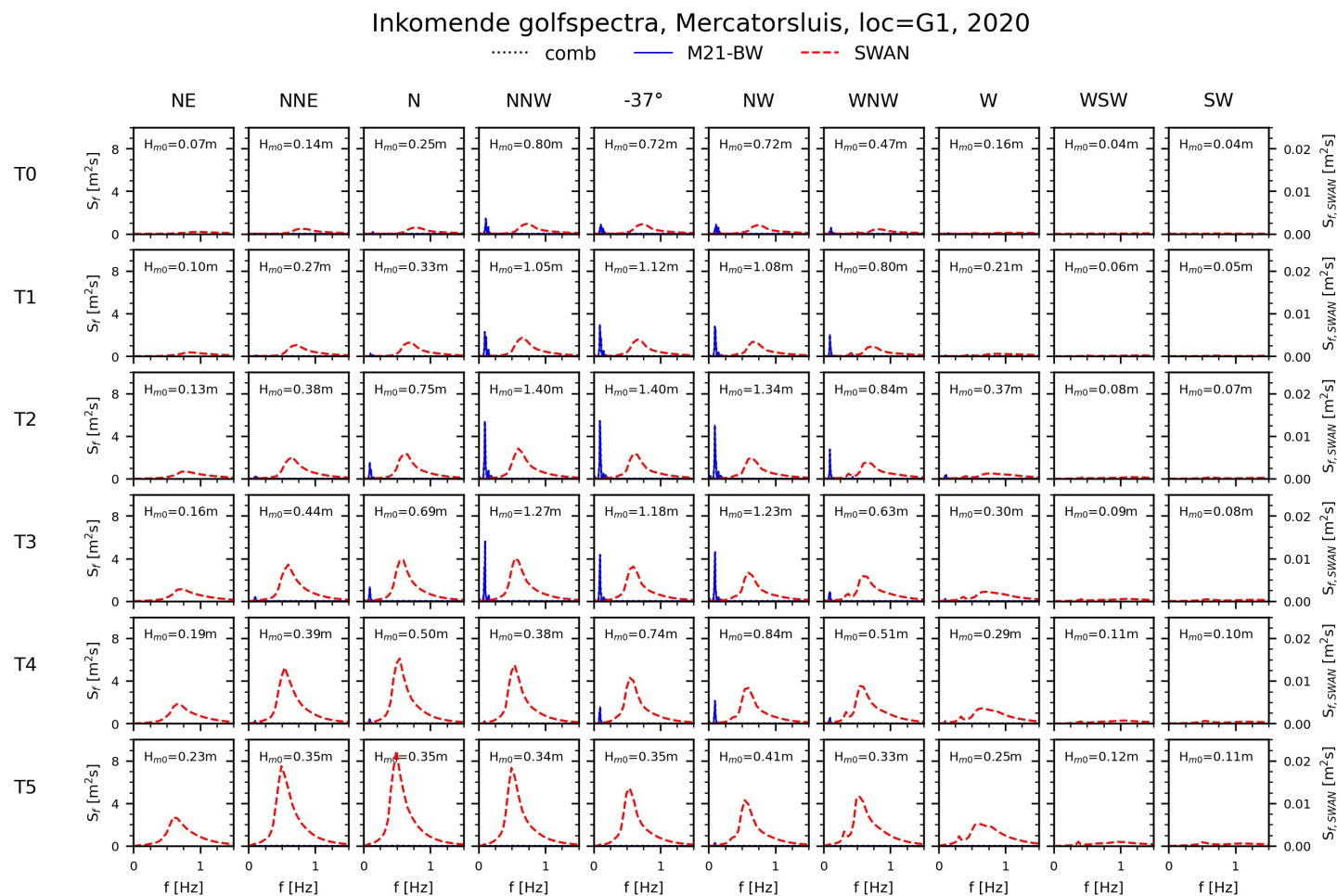
Tabel B-1 – Reflectiecoëfficiënten in het Mike21-BW model t.p.v. de deuren Mercatorsluis

	<b>NNO</b>	<b>N</b>	<b>NNW</b>	<b>-37°N</b>	<b>NW</b>	<b>WNW</b>	<b>W</b>
<b>2020</b>							
T0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T3	1.000	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902	0.902
T4	0.902	0.891	0.828	0.891	0.891	0.891	0.891
T5	0.828	0.830	0.811	0.830	0.830	0.830	0.828
<b>2050</b>							
T0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
T2	1.000	1.000	0.902	0.902	0.902	1.000	1.000
T3	1.000	0.902	0.891	0.896	0.896	0.902	0.902
T4	0.902	0.891	0.830	0.828	0.828	0.891	0.891
T5	0.828	0.830	0.793	0.811	0.811	0.830	0.828

Tabel B-2 – Reflectiecoëfficiënten in het SWAN model t.p.v. de deuren Mercatorsluis

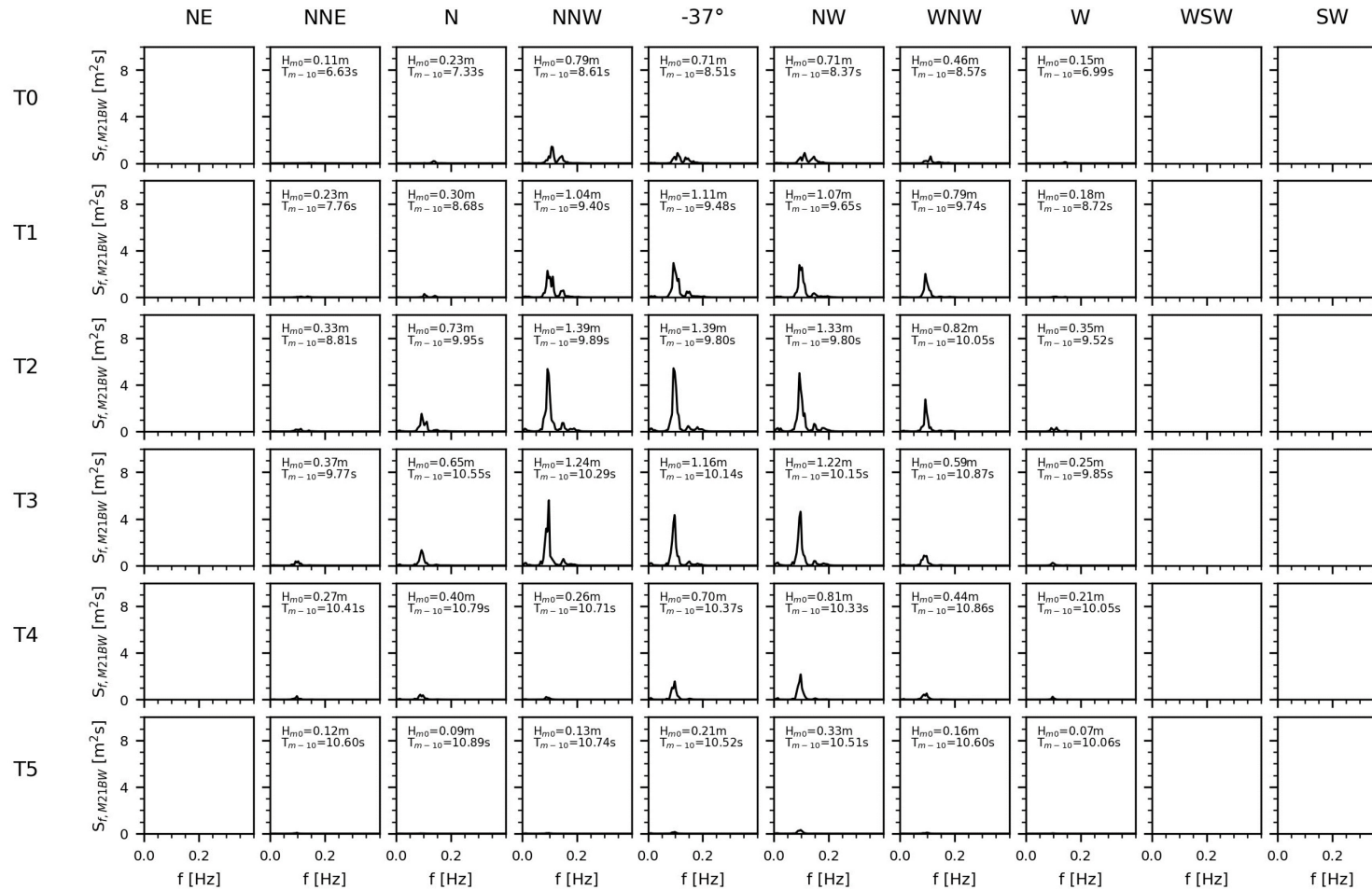
	<b>NO</b>	<b>NNO</b>	<b>N</b>	<b>NNW</b>	<b>-37°N</b>	<b>NW</b>	<b>WNW</b>	<b>W</b>	<b>WSW</b>	<b>SW</b>
<b>2020</b>										
<b>T0</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T1</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T2</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T3</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T4</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T5</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>2050</b>										
<b>T0</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T1</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T2</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T3</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T4</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
<b>T5</b>	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900

# Bijlage C Matrixplots invallende golfspectra t.p.v. Mercatorsluis



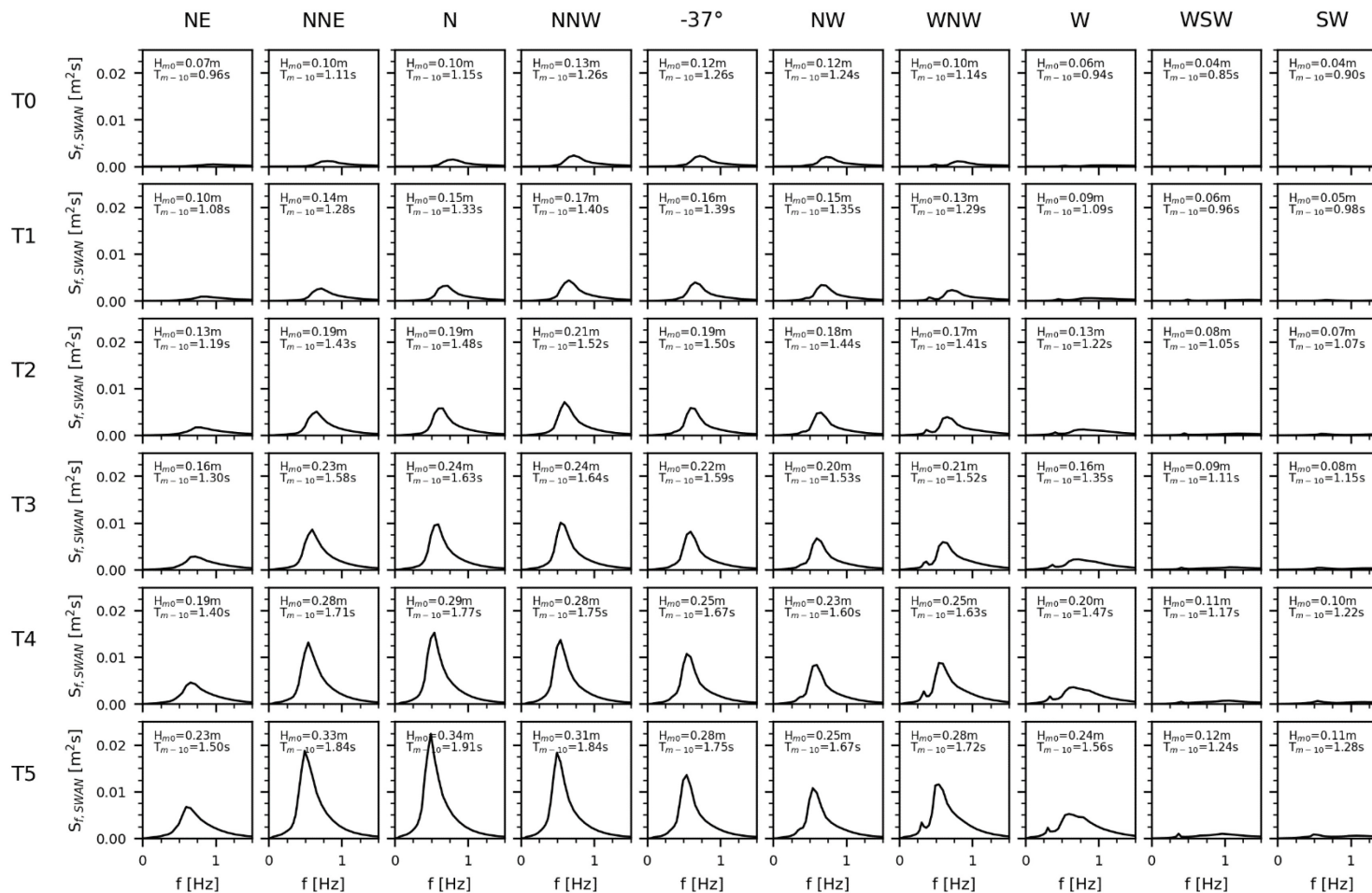
Figuur C-1 – Matrixplot invallende kortegolfspectra (f>0.05Hz), scenario 2020 (Mike21-BW en gecombineerde golfspectra op linkeras, SWAN golfspectra op rechteras).

Inkomende golfspectra M21-BW, Mercatorsluis, loc=G1, 2020

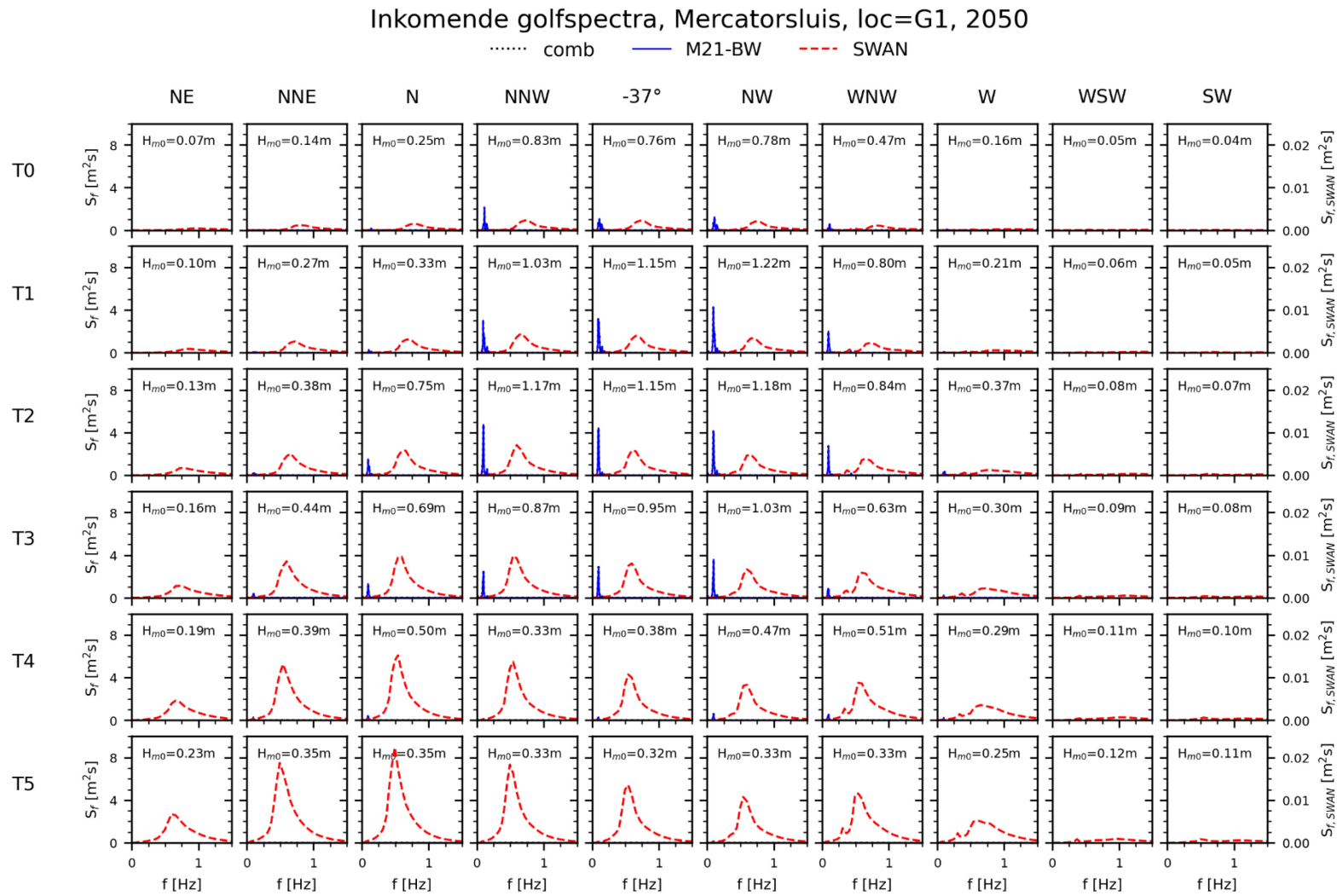


Figuur C-2 – Matrixplot invallende kortegolfspectra M21-BW, scenario 2020

Inkomende golfspectra SWAN, Mercatorsluis, loc=G1, 2020



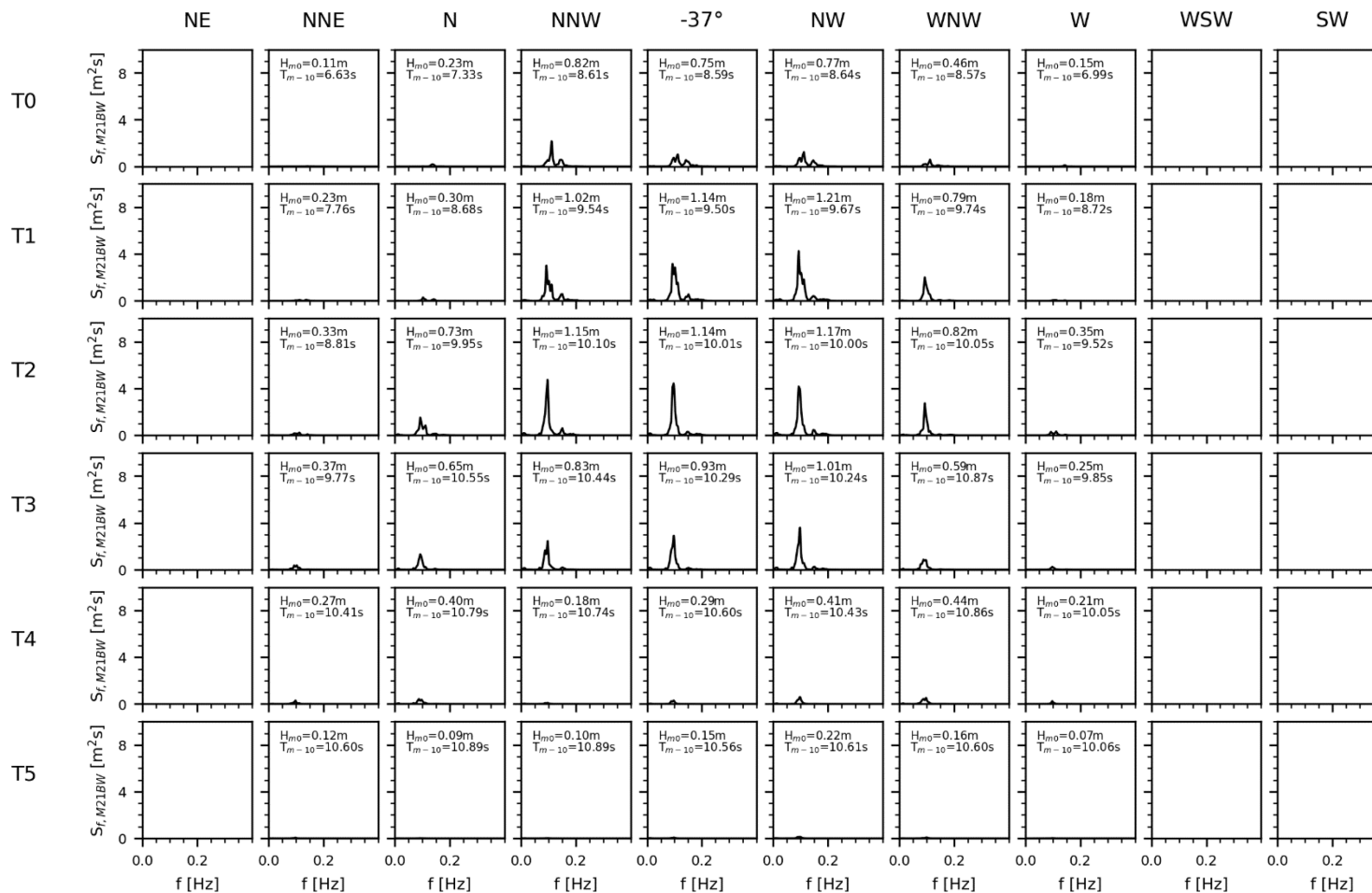
Figuur C-3 – Matrixplot invallende kortgolfspectra SWAN Mercatorsluis scenario 2020



Figuur C-4 – Matrixplot invallende golfspectra, scenario 2050 (Mike21-BW en gecombineerde golfspectra op linkerass, SWAN golfspectra op rechterass).



Inkomende golfspectra M21-BW, Mercatorsluis, loc=G1, 2050



Figuur C-5 – Matrixplot invallende kortgolfspectra M21-BW, scenario 2050

Inkomende golfspectra SWAN, Mercatorsluis, loc=G1, 2050



Figuur C-6 – Matrixplot invallende kortegolfspectra SWAN, scenario 2050

## Bijlage D KD-krommen Mike21-BW

Tabel D-1 – Mike21-BW KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis

<b>NNE</b>			<b>N</b>		
SWL [m TAW]	KD_inc [-]	KD_tot [-]	SWL [m TAW]	KD_inc [-]	KD_tot [-]
4.585	0.057	0.113	4.798	0.081	0.162
5.106	0.075	0.150	5.337	0.084	0.168
5.628	0.089	0.178	5.877	0.171	0.342
6.149	0.090	0.180	6.416	0.138	0.263
6.670	0.060	0.114	6.956	0.080	0.152
7.192	0.026	0.048	7.495	0.016	0.030
7.500	0.010	0.018	8.000	0.010	0.018
8.000	0.010	0.018	8.500	0.010	0.018
8.500	0.010	0.018	9.000	0.010	0.018
9.000	0.010	0.018	9.500	0.010	0.018
9.500	0.010	0.018	10.000	0.010	0.018
10.000	0.010	0.018			
<b>W</b>			<b>WNW</b>		
SWL [m TAW]	KD_inc [-]	KD_tot [-]	SWL [m TAW]	KD_inc [-]	KD_tot [-]
5.472	0.054	0.108	5.248	0.158	0.317
5.877	0.054	0.107	5.672	0.189	0.378
6.282	0.093	0.185	6.095	0.174	0.348
6.687	0.064	0.121	6.519	0.115	0.219
7.092	0.051	0.096	6.943	0.082	0.154
7.497	0.017	0.032	7.366	0.029	0.053
7.750	0.015	0.027	7.500	0.025	0.046
8.000	0.015	0.027	8.000	0.025	0.046
8.500	0.015	0.027	8.500	0.025	0.046
9.000	0.015	0.027	9.000	0.025	0.046
9.500	0.015	0.027	9.500	0.025	0.046
10.000	0.015	0.027	10.000	0.025	0.046

Tabel D-1 – Mike21-BW KD-coëfficiënten t.p.v. Mercatorsluis (vervolg)

<b>NNW</b>			<b>-37°N</b>		
SWL [m TAW]	KD_inc [-]	KD_tot [-]	SWL [m TAW]	KD_inc [-]	KD_tot [-]
5.000	0.250	0.500	5.000	0.215	0.430
5.130	0.251	0.503	5.267	0.221	0.442
5.667	0.252	0.504	5.737	0.278	0.555
6.203	0.276	0.540	6.207	0.282	0.551
6.740	0.209	0.397	6.676	0.216	0.410
7.276	0.042	0.077	7.146	0.097	0.181
7.813	0.021	0.038	7.616	0.034	0.062
8.000	0.015	0.027	8.000	0.030	0.055
8.500	0.015	0.027	8.500	0.030	0.055
9.000	0.015	0.027	9.000	0.030	0.055
9.500	0.015	0.027	9.500	0.030	0.055
10.000	0.015	0.027	10.000	0.030	0.055
<b>NW</b>					
SWL [m TAW]	KD_inc [-]	KD_tot [-]			
5.000	0.210	0.420			
5.343	0.220	0.441			
5.776	0.281	0.563			
6.209	0.282	0.552			
6.642	0.233	0.443			
7.075	0.121	0.227			
7.507	0.052	0.095			
8.000	0.040	0.073			
8.500	0.040	0.073			
9.000	0.040	0.073			
9.500	0.040	0.073			
10.000	0.040	0.073			

## Bijlage E Significante drukprofielen

Digitale bijlage bij het rapport : *p\_profiles\_Mercatorsluis.zip*.

Dit zip bestand bevat \*.txt bestanden met getalwaarden van positie  $z$  [m TAW] en corresponderende significante golfdruk [kPa].

Naamgeving betanden: b.v. **N\_T0\_2050\_LWT\_QS\_kruin.txt** of **323\_deg\_T3\_2020\_LWT\_QS\_dal.txt**

- N/323\_deg : windrichting
- Tn : retourperiode  $10^n$  jaar
- 2020/2050 : scenario
- LWT\_QS : significant drukprofiel berekend met lineaire golftheorie kwadratisch gesommeerd
- kruin/dal : drukprofiel onder golfkruin/golfdal

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)