



Vlaanderen
is wetenschap

20_059_1
WL rapporten

Ontwerp Nieuwe Sluis Zeebrugge Bijkomend advies

Bijkomend advies golfklimaat

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Ontwerp Nieuwe Sluis Zeebrugge. Bijkomend advies.

Bijkomend advies golfklimaat

Vanneste, D.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.

De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.

Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2021
D/2021/3241/064

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Vanneste, D.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2021). Ontwerp Nieuwe Sluis Zeebrugge. Bijkomend advies.: Bijkomend advies golfklimaat. Versie 2.0. WL Rapporten, 20_059_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	DMOW-aMT, Havens & Districten Kust	Ref.:	WL2021R20_059_1
Trefwoorden (3-5):	Golfrandvoorwaarden, golfspectrum, Nieuwe Sluis Zeebrugge		
Kennisdomeinen:	kustbescherming > constructies in havens > in situ metingen, numerieke modelleringen, literatuur- en desktoponderzoek		
Tekst (p.):	18	Bijlagen (p.):	7
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vanneste, D.
------------	--------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisoren:	Suzuki, T.; Verwaest, T.	Getekend door:Tomohiro Suzuki (Signatu Getekend op:2021-04-15 14:58:50 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Tomohiro Suzuki</i>
		Getekend door:Toon Verwaest (Signature Getekend op:2021-04-15 15:22:10 +02:00 Reden:Ik keur dit document goed <i>Toon Verwaest</i>
Projectleider:	Peeters, P.	Getekend door:Patrik Peeters (Signature) Getekend op:2021-04-15 17:22:52 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Patrik Peeters</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door:Frank Mostaert (Signatur Getekend op:2021-04-15 16:18:52 +02:0 Reden:Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

In dit advies worden beschikbare golfmetingen en modellering in de haven van Zeebrugge opnieuw geanalyseerd teneinde een herziene inschatting te maken van de golfrandvoorwaarden ter plaatse van de zeewaartse deur van de toekomstige zeesluis op de locatie van de bestaande Visartsluis.

Verder wordt ook het effect van de nieuwe analyse van de extreme windsnelheden op basis van HR2020 op de gemodelleerde SWAN golfspectra in kaart gebracht.

Een kwantitatieve analyse van het 'normale' golfklimaat ($T < 1$ jaar) wordt niet in dit advies behandeld.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Context en vraagstelling.....	1
2 Onderzoek golfklimaat	2
2.1 Golfmetingen t.h.v. ingang Visartsluis.....	2
2.1.1 Analyserapporten IMDC	2
2.1.2 Storm 10-10-2013.....	7
2.2 Numerieke modellering extreem golfklimaat	9
2.2.1 Golfindringing	9
2.2.2 Windgolven.....	10
2.2.3 Validatie storm 10-10-2013	12
3 Conclusies en aanbevelingen	14
3.1 Conclusies golfklimaat	14
3.2 Schematisering golfspectrum voor ontwerp.....	15
Referenties	18
Bijlage 1 SWAN golfparameters op basis van HR2020.....	B1
Bijlage 2 Parameters geschematiseerde golfspectra	B4
Parameters spectrum golfindringing.....	B4
Parameters spectrum windgolven	B5
Parameters gecombineerd golfspectrum.....	B6
Bijlage 3 Parameters gesuperponeerde golfspectra.....	B7

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – golfrandvoorwaarden MIKE21-BW modellen haven Zeebrugge	9
Tabel 2 – Spectrale golfparameters M21-BW golfspectra t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1	10
Tabel 3 – SWAN modellen: randvoorwaarde windsnelheid (u_w) en golfparameters t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1	11
Tabel 4 – Offshore windsnelheden u_w volgens HR2014 en HR2020 (op 10 m referentiehoogte).	B1
Tabel 5 – SWAN gemodelleerde spectrale parameters t.h.v. zeewaartse sluisdeur NSZ, u_w 30 min, windrichting N, scenario 2125	B3
Tabel 6 – SWAN gemodelleerde spectrale parameters t.h.v. zeewaartse sluisdeur, u_w 30 min, windrichting NNW, scenario 2125	B3
Tabel 7 – parameters van het geschematiseerd invallend golfspectrum t.h.v. zeewaartse sluisdeur gebaseerd op M21-BW modellering (golfindringing)	B4
Tabel 8 – parameters van het geschematiseerd invallend golfspectrum t.h.v. zeewaartse sluisdeur gebaseerd op SWAN modellering (windgolven)	B5
Tabel 9 – parameters gecombineerd geschematiseerd invallend golfspectrum t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ	B6
Tabel 10 – golfhoogte en equivalente golfpiekperiode van het gecombineerd invallend golfspectrum t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ, golfrichting N alt. 1.	B7
Tabel 11 – golfhoogte en equivalente golfpiekperiode van het gecombineerd invallend golfspectrum t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ, golfrichting N alt. 2.	B8

Lijst van de figuren

Figuur 1 – meetlocatie ZBG_B	2
Figuur 2 – Significante golfhoogte van de HF golven ter hoogte van (a) ZBG_B en (b) ZBG_C in functie van de golfhoogte ter hoogte van Bol van Heist.....	3
Figuur 3 – Significante golfhoogte van de hoog- en laagfrequente golven i.f.v. waterstand, gemeten ter hoogte van ZBG_B tijdens de campagne 2010-2011 (figuren links) en 2012-2015 (figuren rechts).	4
Figuur 4 – Gewogen golfpiekperiode van de (a) hoogfrequente en (b) laagfrequente golven versus significante golfhoogte, gemeten ter hoogte van ZBG_B tijdens de campagne 2012-2015.....	5
Figuur 5 – Piekperiode en gemiddelde golfperiode van de hoogfrequente (figuren links) en laagfrequente (figuren rechts) golven versus waterstand, gemeten ter hoogte van ZBG_B tijdens de campagne 2012-2015.	6
Figuur 6 – Evolutie significante golfhoogte van (a) korte golven, (b) lange golven tijdens de storm van 10-10-2013.....	8
Figuur 7 – M21-BW golfspectra t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1	10
Figuur 8 – SWAN golfspectra t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1.....	11
Figuur 9 – Vergelijking H_{m0} en T_p in Tabel 3 (16_122) met SWAN modellering Hajivalie <i>et al.</i> (2020) voor windrichting NNW Alt. 1.....	12
Figuur 10 – Hindcast storm 10/10/2013	12
Figuur 11 – Schematisatie gecombineerd golfspectrum onder stormcondities	16
Figuur 12 – H_{m0} en T_p i.f.v. opgelegde windsnelheid in het Zeebrugge SWAN model Alt. 1 en Alt.2, waterstand 2125.....	B2

1 Context en vraagstelling

Ten behoeve van het ontwerp Nieuwe Sluis Zeebrugge (NSZ) werd door WL reeds een advies en studie uitgebracht over de golfrandvoorwaarden tijdens stormcondities:

- In een voorbereidende memo 19_124 (Vanneste, 2019) werd d.m.v. beschikbare SWAN en Mike21-BW modellering (ie. voor de bestaande havenconfiguratie) het golfklimaat bepaald voor een T1000 storm anno 2025 en 2125 (met 1 m zeespiegelstijging) ;
- In een rapport uitgebracht in 2020 (Hajivalie *et al.*, 2020) werd bijkomende SWAN modellering uitgevoerd ter bepaling van de lokale windgolven, voor een ruimere set randvoorwaarden en met aanpassing van de bathymetrie (2 alternatieven). Vermits er geen uitsluitel kon bekomen worden over de accurateheid van de SWAN modellering betreffende de golfperiode werd een conservatieve aanpak voorgesteld, die erin bestaat de gemodelleerde windenergie te associëren met de golfpiekperiode van de golven buitengaats.

Na overleg dd. 14 december 2020 werd aan WL de vraag gesteld of de voorgestelde (conservatieve) aanpak in Hajivalie *et al.* (2020) opnieuw onderzocht kan worden, omwille van de significante impact van deze hypothese op de golfbelasting op de zeewaartse sluisdeur.

In het onderhavig advies worden de beschikbare golfmetingen en -modellering opnieuw geanalyseerd om een verbeterde inschatting te maken van de golfrandvoorwaarden ter plaatse van de zeewaartse deur van de toekomstige zeesluis op de locatie van de bestaande Visartsluis te Zeebrugge.

Een kwantitatieve analyse van het 'normale' golfklimaat ($T < 1$ jaar) wordt niet in dit advies behandeld.

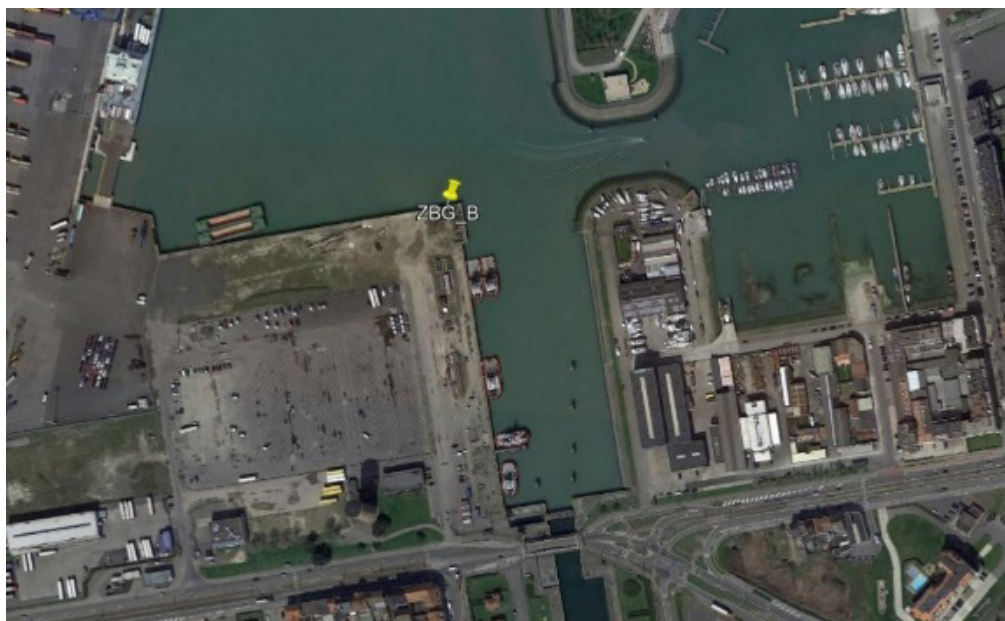
In Bijlage 1 wordt ook het effect in kaart gebracht van de nieuwe analyse van de extreme windsnelheden op basis van HR2020 op de gemodelleerde SWAN golfspectra in Hajivalie *et al.* (2020).

2 Onderzoek golfklimaat

2.1 Golfmetingen t.h.v. ingang Visartsluis

Er werden 2 meetcampagnes uitgevoerd in de haven van Zeebrugge; de eerste tussen februari 2010 en mei 2011, de tweede tussen september 2012 en februari 2015. Voor de analyse van het golfklimaat ter hoogte van de zeewaartse deur NSZ is de meetlocatie ZBG_B relevant (Figuur 1). De meetgegevens werden geanalyseerd door IMDC in verschillende maandrapporten en stormrapporten. Daarnaast zijn er 2 analyserapporten beschikbaar van elke meetcampagne: IMDC (2011) en IMDC (2015).

Belangrijk om te vermelden is dat de analyse van het gemeten golfspectrum opgesplitst werd in 2 delen: een hoogfrequent (HF) deel ($0.05\text{--}0.43^1$ Hz) en een laagfrequent (LF) deel ($0.00833\text{--}0.03$ Hz).



Figuur 1 – meetlocatie ZBG_B

2.1.1 Analyserapporten IMDC

In wat volgt worden de figuren en conclusies uit de 2 IMDC analyserapporten gebruikt om een synthese te maken van het geobserveerde golfklimaat ter hoogte van meetlocatie ZBG_B.

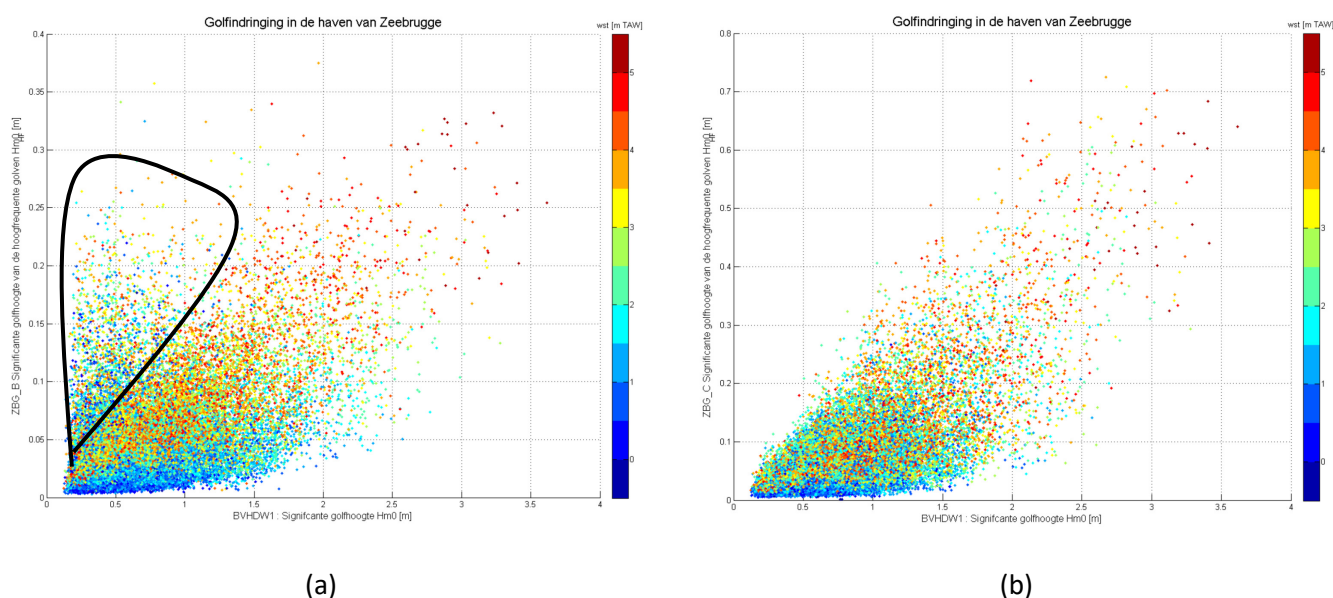
In IMDC (2011) worden de 5 grootste geregistreerde hoogfrequente (HF) Hm0 waarden vergeleken met de simultane golfkarakteristieken gemeten door Bol van Heist (zie p.104). Er wordt geen causaal verband gevonden met de golfhoogte of de windsnelheid op zee. Dit laat uitschijnen dat deze hoge geregistreerde Hm0 waarden (tussen 0.32 en 0.37 m) toegeschreven kunnen worden aan passage van schepen nabij de Visartsluis, of een andere onbekende externe oorzaak.

In IMDC (2015) worden alle HF Hm0 meetpunten van meetlocatie ZBG_B en ZBG_C uitgezet t.o.v. de golfhoogte buitengaats (BVH), zie Figuur 2. Meetlocatie ZBG_C bevindt zich in het Brittaniadok, net ten W

¹ Deze artificiële begrenzing heeft een belangrijke impact op de analyse van de spectrale component gelinkt aan windgolven (zie 0).

van de uitwateringskokers. Er wordt geconcludeerd dat er een verband is tussen de golven buitengaats en de HF golven t.h.v. ZBG_C, dat bovendien onafhankelijk is van de waterstand (zie Figuur 2b). Er wordt echter ook geconcludeerd dat er t.h.v. ZBG_B geen (of een heel zwakke) correlatie gevonden wordt met de golven buitengaats (zie Figuur 2a). Wanneer beide figuren in Figuur 2 met elkaar vergeleken worden lijkt deze laatste conclusie twijfelachtig. Immers, afgezien van het deel metingen in zwart omlijnd in Figuur 2a, tonen de HF Hm0 waarden te ZBG_B eenzelfde trend als te ZBG_C. Daarbij wordt wel opgemerkt dat de metingen te ZBG_B een iets grotere afhankelijkheid van de waterstand vertonen in vergelijking met ZBG_C.

De metingen binnen het afgebakend gebied in Figuur 2a betreffen relatief grote Hm0 waarden die optreden zonder dat daarbij gelijktijdig beduidende golven buitengaats voorkomen. Voor deze laatste dient de oorzaak elders gezocht te worden, zoals hoger ook reeds aangehaald. Merk bovendien op dat deze metingen gecorreleerd lijken te zijn met een lagere waterstand, wat kan wijzen op de invloed van reflectie in het versterken van golven veroorzaakt door externe factoren in de onmiddellijke nabijheid van locatie ZBG_B.



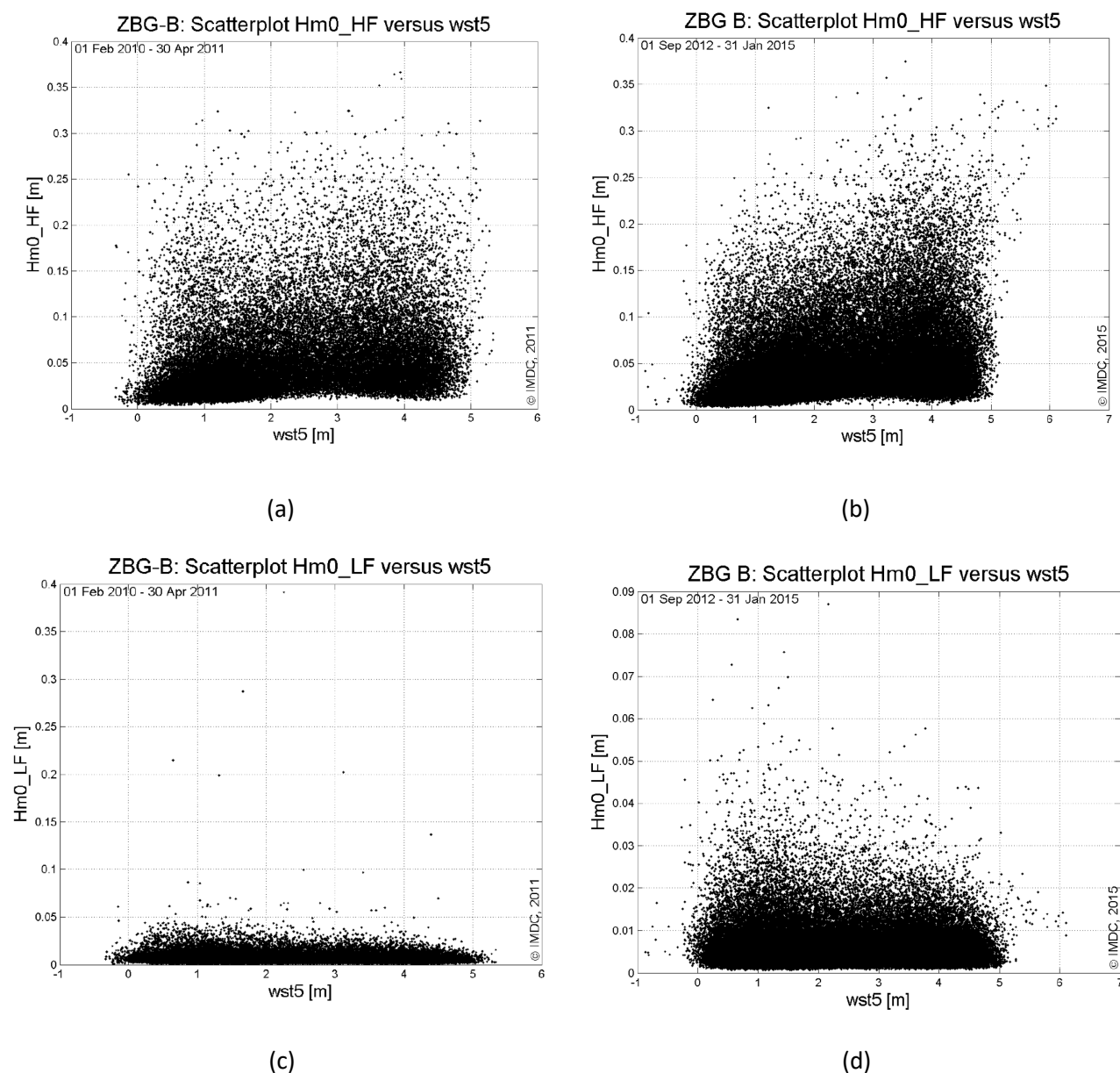
Figuur 2 – Significante golfhoogte van de HF golven ter hoogte van (a) ZBG_B en (b) ZBG_C in functie van de golfhoogte ter hoogte van Bol van Heist. Kleurencode is gerelateerd aan de waterstand. Figuren overgenomen uit IMDC (2015).

Figuur 3 toont de hoog- en laagfrequente Hm0-waarden uit beide meetcampagnes i.f.v. de waterstand. Hieruit wordt bevestigd dat de maximaal gemeten Hm0 waarde van de hoogfrequente golven niet boven 0.4 m uitkomt.

De energie van de laagfrequente (LF) golven vertoont enkele uitschieters tijdens de eerste meetcampagne (Figuur 3c). In totaal zijn er 6 registraties met Hm0 tussen 0.1 en 0.39m. Tijdens de 2^{de} meetcampagne bedraagt de maximale LF Hm0 waarde slechts 0.09 m (Figuur 3d). Dit is opmerkelijk gelet op de langere duur van de 2de meetcampagne. Mogelijks gaat het in het geval van de hoge waarden (>0.2m) tijdens de eerste meetcampagne om zg. 'outliers' in de metingen. Vermits er getwijfeld kan worden aan de betrouwbaarheid van deze meetpunten lijkt het aangewezen om deze niet mee te nemen in de verdere analyse. Merk op dat de grootste laagfrequente Hm0 waarden optreden bij lagere waterstanden (< 2 m TAW), in beide meetcampagnes.

Uit de empirische kansverdeling van de LF Hm0 waarden (Tabel 8-2, IMDC (2015)) volgt een waarde van 0.03 m met 1% overschrijdingskans. Er wordt dan ook geconcludeerd dat LF golfenergie quasi altijd significant kleiner is dan de HF golfenergie.

De correlatie tussen de HF en LF golfenergie in de tijd is niet in detail onderzocht in de IMDC rapporten. Op basis van de vastgestelde verband tussen de LF golfenergie en de waterstand (zie ook de detailanalyse in 0) is het aannemelijk te veronderstellen dat ter hoogte van ZBG_B het maximum in LF en HF golfenergie niet gelijktijdig optreden tijdens een storm.

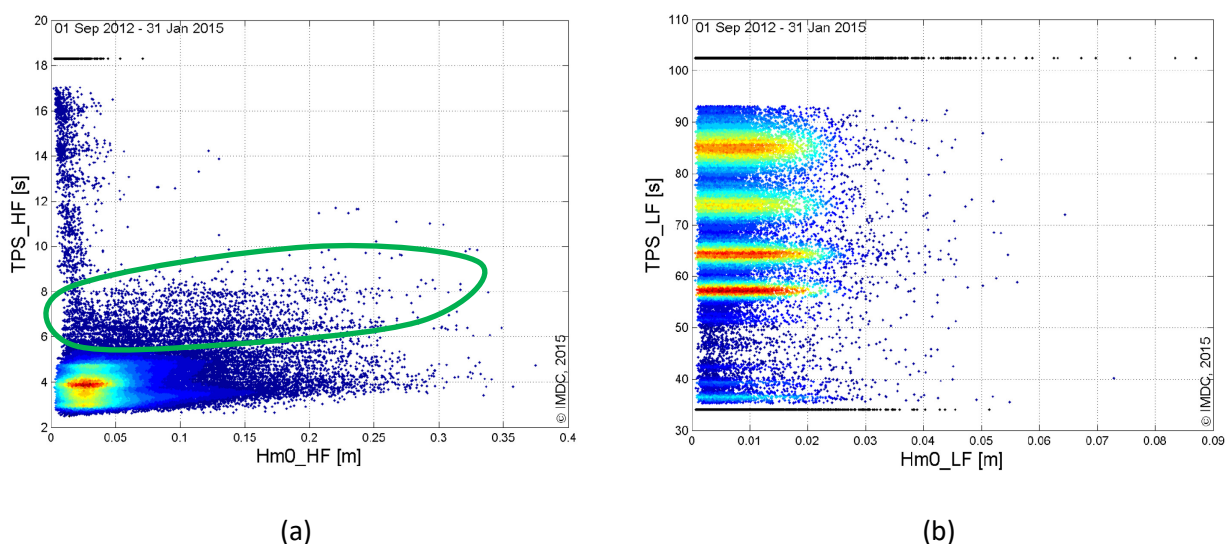


Figuur 3 – Significante golfhoogte van de hoog- en laagfrequente golven i.f.v. waterstand, gemeten ter hoogte van ZBG_B tijdens de campagne 2010-2011 (figuren links) en 2012-2015 (figuren rechts).
Figuren overgenomen uit rapporten (IMDC, 2011), (IMDC, 2015).

Figuur 4 toont het verband tussen de geregistreerde golfpiekperiode² en de significante golfhoogte³. Uit Figuur 4a leidt men af dat de bulk van de HF spectra gekenmerkt worden door een golfpiekperiode lager dan 8 s en Hm0 waarde tot max. 0.4 m. Golfsystemen die ontstaan louter door lokale opgewekte windgolven komen vaakst voor ($TPS_HF < 5s$ en $Hm0_HF \leq 0.06$ m). De waarnemingen tonen aan dat bij stormachtige wind de energie van dit golfsysteem toeneemt tot 0.4 m, waarbij het spectrum gedomineerd wordt door wind. Dit kan gepaard gaan met een bijdrage van golfindringing, afhankelijk van de windrichting. In bepaalde gevallen kan de energiepiek bij de lagere frequenties van de indringingsgolven hoger uitkomen dan deze geassocieerd met de windgolven (datakoppels in groen omlijnd gebied in Figuur 4a).

HF golfsystemen met piekperiodes hoger dan 10 s hebben quasi altijd een beperkte energie-inhoud ($Hm0 < 0.05$ m). Deze energie kan afkomstig zijn van deiningsgolven die de haven binnendringen in afwezigheid van wind, of te wijten aan lokale resonantie (cross-mode) in de omgeving van ZBG_B.

Figuur 4b toont dat de golfpiekperiodes TPS van de LF golfspectra variëren tussen 30 en 90 s. De golfenergie blijft evenwel steeds beperkt (< 0.1 m). Merk op dat de clustering rond discrete hogere periodes toegeschreven wordt aan het feit dat de TPS waarden gewogen worden op de discrete frequenties uit de Fourieranalyse (IMDC, 2015).



Figuur 4 – Gewogen golfpiekperiode van de (a) hoogfrequente en (b) laagfrequente golven versus significante golfhoogte, gemeten ter hoogte van ZBG_B tijdens de campagne 2012-2015

De kleurintensiteit geeft de voorkomingsfrequentie van de datakoppels weer (roder naarmate vaker voorkomend).

Figuren overgenomen uit IMDC (2015).

Vermits resonantie niet alleen afhangt van de vorm van het havenbekken maar ook van de waterdiepte, kan dit fenomeen onderzocht worden door de gemeten golfperiodes uit te zetten i.f.v. de waterstand (Figuur 5).

Volgens IMDC (2015) blijken de resonantiefrequenties in ZBG_B aanwezig in het verband tussen HF en LF TPS waarden en de waterstand (Figuur 5a en b), zij het minder prominent dan op locatie ZBG_C.

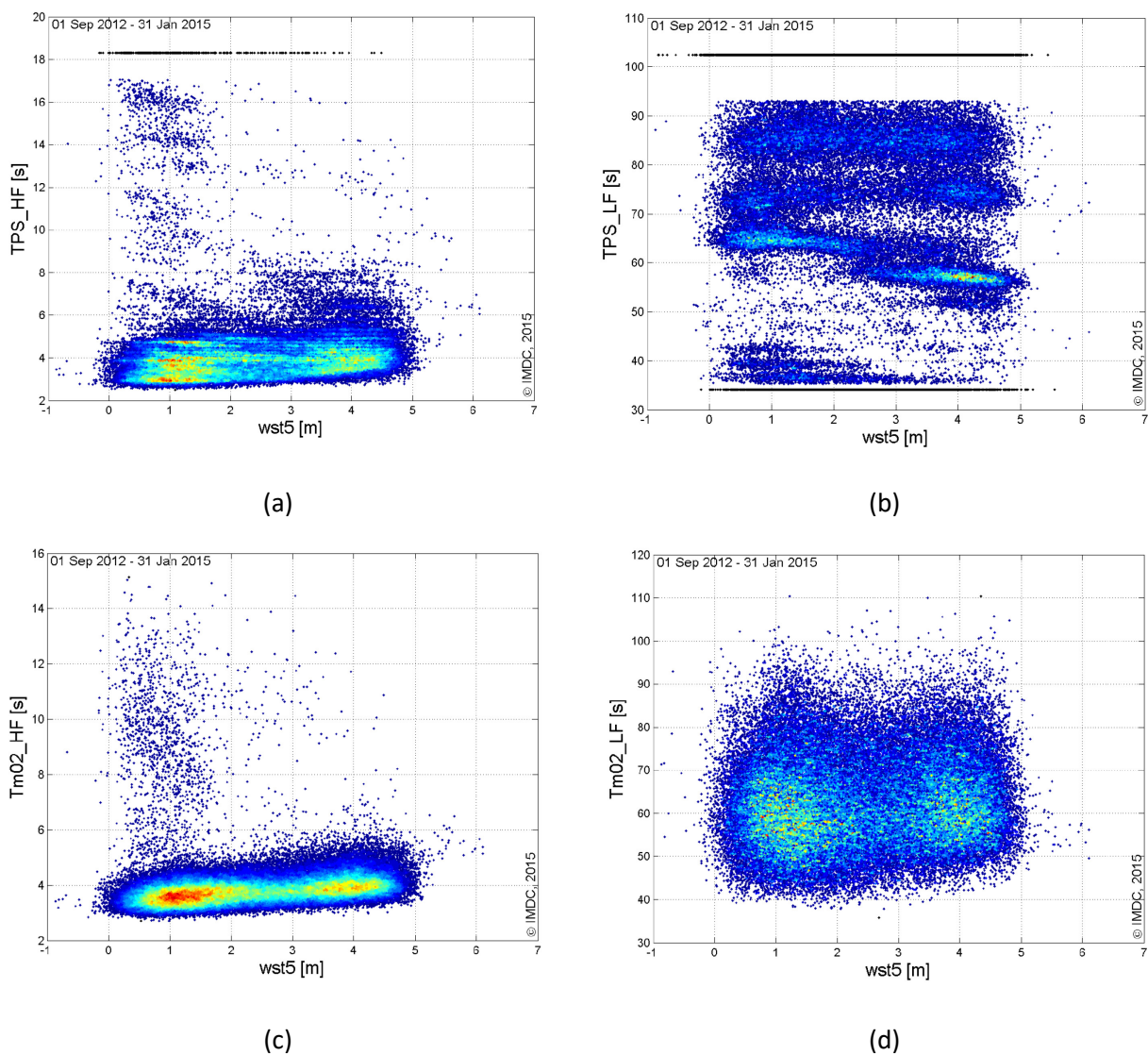
Figuur 5b toont dat de LF TPS waarden geclusterd zijn rond ca. 65 s bij 0 - +2 m TAW en 58s tussen +3 - +5 m TAW. Nog langere resonantiegolven ($TPS > 70$ s) treden op onafhankelijk van de waterstand.

² TPS : 'smoothed peak period' of 'gladgestreken' golfpiekperiode.

³ Merk op dat de behandelde spectra geen energie bevatten in het interval 0.03-0.05 Hz (tussen 20 en 33 s).

De resonantiefrequenties zijn echter weggevaagd in het verband tussen de gemiddelde periode (Tm02) van de LF golven (Figuur 5d). Dit wijst op een grote spreiding van energie in het LF spectrum (meertoppigheid).

De HF golven in ZBG_B tonen een duidelijker verband tussen de gemiddelde periode en de waterstand dan het geval is voor de piekperiode. De relatief korte ($T_{m02} < 6s$) lokale windgolven domineren meestal het windveld.



Figuur 5 – Piekperiode en gemiddelde golfperiode van de hoogfrequente (figuren links) en laagfrequente (figuren rechts) golven versus waterstand, gemeten ter hoogte van ZBG_B tijdens de campagne 2012-2015.
Figuren overgenomen uit IMDC (2015).

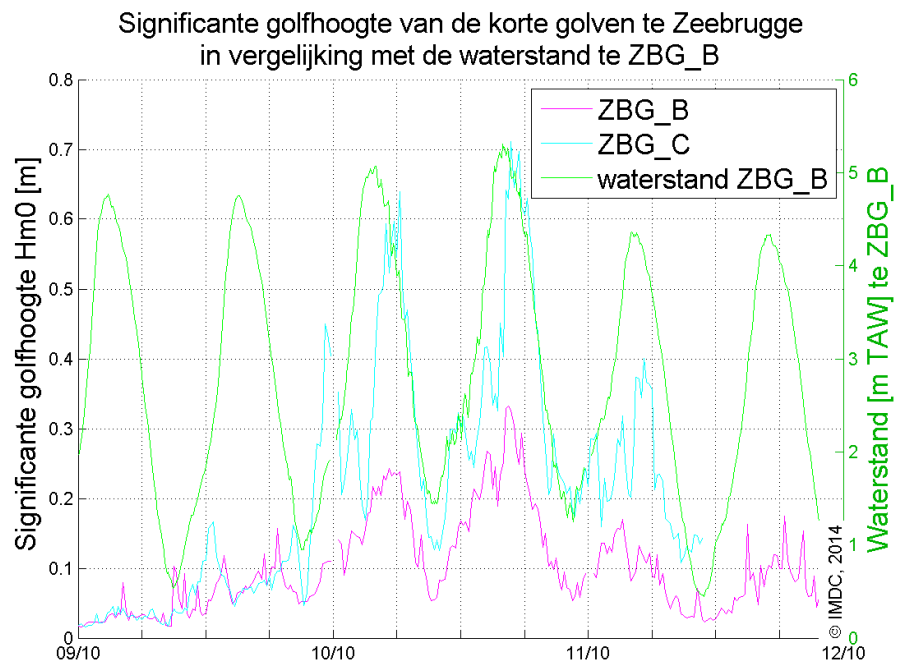
2.1.2 Storm 10-10-2013

De golfmetingen op locatie ZBG_B tijdens de storm op 10-10-2013 werden gebruikt in Hajivalie *et al.* (2020) voor een hindcast van het SWAN en Mike21-BW model. Uit de beschikbare stormrapporten tijdens de meetcampagne werd deze storm eruit gelicht omwille van de voorkomende windrichting, welke relevant is voor het voorkomen van windgolven ter hoogte van de Visartsluis (tussen NNW en NNE). Deze storm wordt opnieuw gebruikt in onderhavig rapport (zie sectie 0). Voor details i.v.m. de metingen wordt verwezen naar het stormrapport van IMDC (2014).

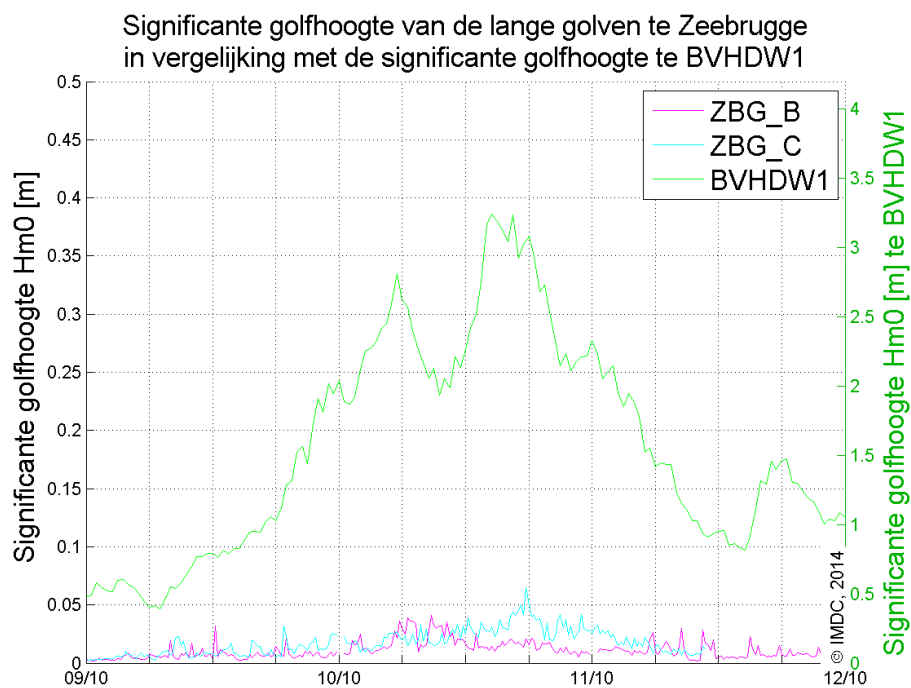
Figuur 6 toont 2 relevante figuren overgenomen uit hoger vermeld stormrapport. Zowel in meetlocatie ZBG_B als in ZBG_C is er een duidelijke afhankelijkheid van de significante golfhoogte t.o.v. de waterstand. Bij laagwater treedt een sterke reductie op van de golfhoogte (zie Figuur 6 a). Dit wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door de daling van de golfhoogte buitengaats (Bol van Heist), al kan ook een toegenomen golfdamping op de taluds in de voorhaven ook een rol spelen hierin.

Een interessante observatie betreft de LF energie t.h.v. meetlocatie ZBG_B (zie Figuur 6 b). Volgens het IMDC stormrapport (p.155) lijkt deze niet of nauwelijks gecorreleerd te zijn met de golfenergie buitengaats. Dit kan enigszins genuanceerd worden: op locatie ZBG_B is er wel degelijk een verhoging van de LF golfenergie tijdens de storm in vergelijking met de dag ervoor en erna. Echter, deze LF energie is maximaal tijdens het laagwater voorafgaand aan het hoogwater op de stormpiek (tussen 6 en 12u op 10 oktober, zie Figuur 6 b). Dit zou kunnen wijzen op de invloed van reflectie en het ontstaan van lange golven. Deze observatie ligt in lijn met het voorkomen van de hoogste LF Hm0 waarden tijdens lagere waterstanden (zie Figuur 3d).

Relatief gezien is de LF energie echter beperkt t.o.v. de HF golfenergie (<10%), zowel in ZBG_B als in ZBG-C. Merk overigens op dat de LF golfenergie op locatie ZBG-C wel in fase is met de HF energie op de piek van de storm.



(a)



(b)

Figuur 6 – Evolutie significante golfhoogte van (a) korte golven, (b) lange golven tijdens de storm van 10-10-2013.
Figuren overgenomen uit IMDC (2014).

2.2 Numerieke modellering extreem golfklimaat

2.2.1 Golfindringing

Voor de haven van Zeebrugge zijn Mike21-BW simulaties beschikbaar opgesteld in het kader van de overstromingsrisicomodellering kust (Nguyen & Vanneste, 2019). De simulaties hebben volgende kenmerken:

- modeldomein incl. vaargeul (5x5 m), huidige layout in de omgeving Visartsluis, marina en militair dok;
- stormvloedpeilen tussen +6.15 (H625⁴) en +7.90 m TAW (H800);
- golfrichting NNW⁵, golfrandvoorwaarden aan de modelrand afgeleid uit een SWAN-2D kustmodel (Tabel 1). Deze werden afgeleid op basis van de mediane retourperiodes geassocieerd aan de waterstand die omnidirectioneel werd geïnterpreteerd volgens de convolutiemethode in De Roo *et al.*, (2016);
- gemodelleerde partiële reflectie volgens vrijboord (niveaus kaaivlakken in de huidige toestand⁶). Deze kaaipeilen situeren zich meestal tussen +7 en +8 m TAW, met een meerderheid rond +7.9 m TAW.

Tabel 1 – golfrandvoorwaarden MIKE21-BW modellen haven Zeebrugge

Storm scenario	water level [m TAW]	T [jaar]	H _{m0} [m]	T _p [s]	water depth [m]
H625	6.15	48	4.46	9.61	22.18
H650	6.40	156	4.66	9.97	22.43
H675	6.65	506	4.82	10.19	22.68
H700	6.90	1645	4.99	10.51	22.93
H750	7.40	17399	5.29	10.92	23.43
H800	7.90	183991	5.60	11.27	23.93

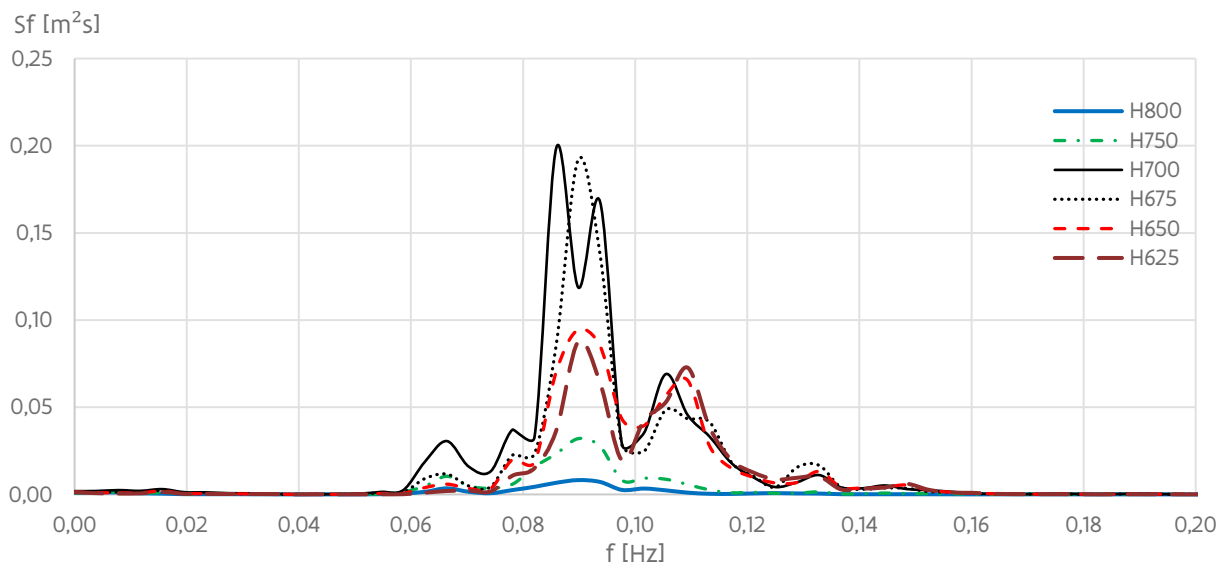
Figuur 7 toont de gemodelleerde spectra ter hoogte van de zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1. Deze spectra kunnen als invallend beschouwd worden wegens het ontbreken van de reflectie van de sluisdeur. De golfenergie is hoofdzakelijk aanwezig in de frequentieband 0.08-0.11 Hz. Daarnaast is er een verwaarloosbare hoeveelheid LF energie aanwezig (<0.02 Hz).

Tabel 2 bevat de spectrale golfparameters van de 6 gemodelleerde stormvloedscenario's. Opvallend is de significante reductie van de golfenergie rond de energiepiek ca. 0.09 Hz bij de scenario's H750 en H800. Ook de energiepiek bij H700 is al enigszins gereduceerd. De oorzaak hiervan is de afname van golfreflectie op de (eventueel overstroomde) kaaivlakken in de voorhaven. Dit leidt uiteindelijk tot een kleinere hoeveelheid golfenergie ter hoogte van de Visartsluis bij de meer extreme stormvloedpeilen (> +7 m TAW). Echter, voor een analyse van het golfklimaat in een toekomstscenario met (extreme) zeespiegelstijging zou men redelijkerwijs kunnen uitgegaan van een verhoging van de kaaivlakken, en deze laten aansluiten op de kruinpeilen van het zeewaartse sluishoofd en -deur. In dat geval zal ook bij de extreme stormvloedpeilen (> +7 m TAW) een niet-verwaarloosbare bijdrage van golfindringing in het golfspectrum te verwachten zijn wegens de aanwezige reflectie op de kademuren in de voorhaven.

⁴ De identificatie van de gemodelleerde scenario's gebeurt adhv. het maximale stormvloedpeil te Oostende.

⁵ Meest nadelige golfrichting voor golfindringing (richting Vandammesluis)

⁶ Zie Bijlage 2 Gruwez et al. (2012)



Figuur 7 – M21-BW golfspectra t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1

Tabel 2 – Spectrale golfparameters M21-BW golfspectra t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1

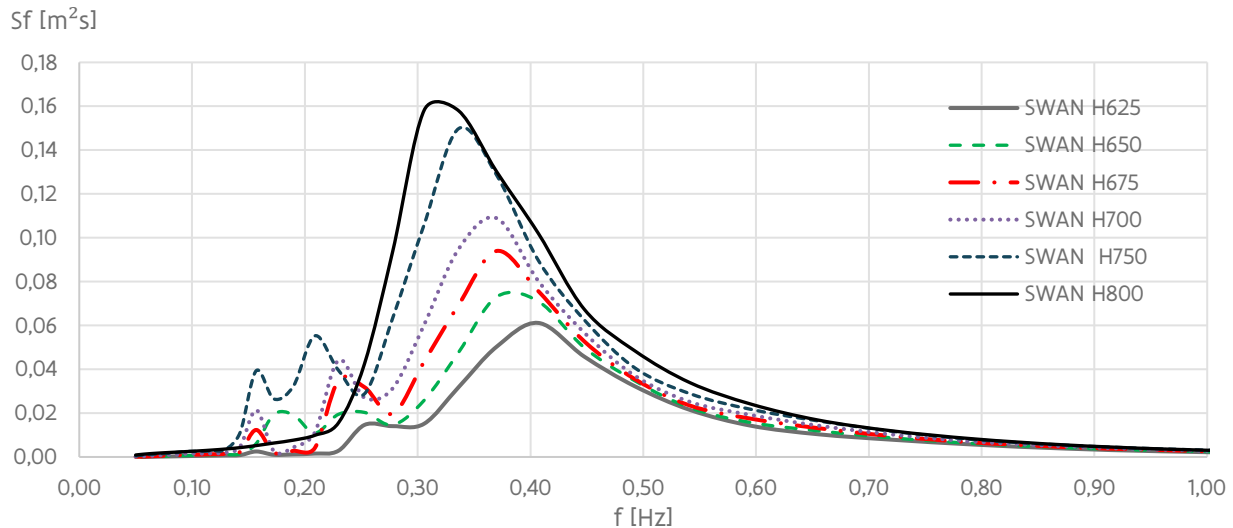
Scenario	SWL [m TAW]	Hm0 [m]	Kd [-]	Tp [s]	Tm-1,0 [s]
H625	+6.15	0.18	0.041	11.1	10.7
H650	+6.40	0.20	0.042	11.1	11.3
H675	+6.65	0.22	0.046	11.1	11.5
H700	+6.90	0.24	0.049	11.6	12.3
H750	+7.40	0.11	0.020	11.1	15.1
H800	+7.90	0.06	0.010	11.13	20.87

2.2.2 Windgolven

Voor de haven van Zeebrugge zijn SWAN simulaties beschikbaar opgesteld in het kader van de overstromingsrisicomodellering kust (WL project 16_122 - Nguyen & Vanneste, 2019). De simulaties hebben volgende kenmerken:

- modeldomein begrensd door de havendammen (geen golfindringing van buitengaats);
- huidige layout in de omgeving Visartsluis, marina en militair dok;
- windrichting NNW, windsnelheden over land ($u_w = 0.8 * u_{w, offshore}$), $2u$ gemiddelde waarde corresponderend met retourperiode omnidirectionele waterstand op basis van HR2014 (De Roo *et al.*, 2016) (Tabel 3);
- gemodelleerde partiële reflectie volgens vrijboord (niveaus kaaivlakken in de huidige toestand⁷).

⁷ Zie Bijlage 2 Gruwez *et al.* (2012)



Figuur 8 – SWAN golfspectra t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1

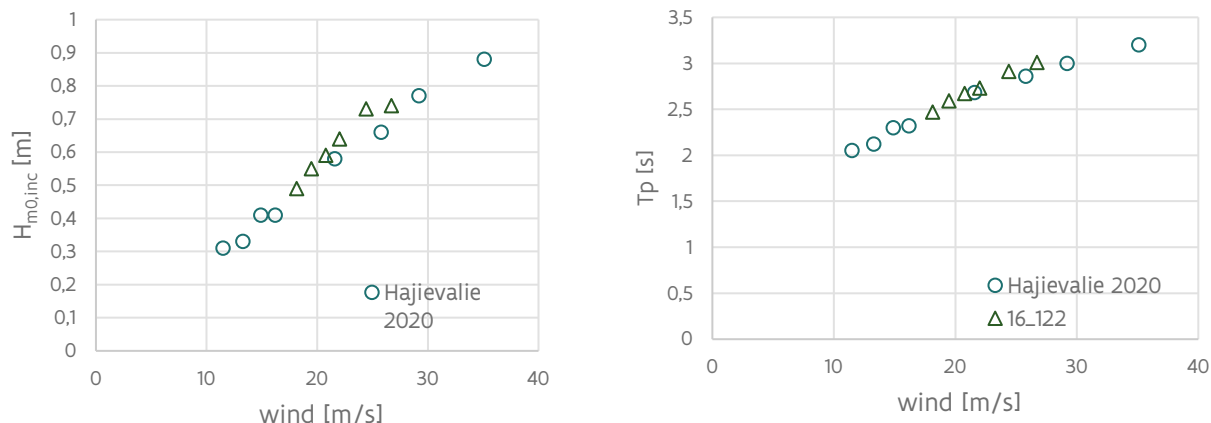
Figuur 8 toont de gemodelleerde SWAN golfspectra voor de 6 stormvloedsscenario's. De piekfrequentie neemt af met toenemende windsnelheid, van 0.4 Hz tot ca. 0.3 Hz.

Tabel 3 toont de resulterende golfparameters t.h.v. de zeewaartse sluisdeur. Merk op dat er geen afname is van golfenergie voor H750 en H800 zoals in de Mike modellering. Dit toont aan dat de windgolven lokaal opgewekt worden en reflectie geen/minder rol speelt in dit proces. Het effect van de gemodelleerde reflectie bij kleine (of negatieve) vrijboorden is evenwel niet van belang gelet op de aanname dat in de toekomst de peilen van de kademuren in de voorhaven verhoogd zouden worden.

Tabel 3 – SWAN modellen: randvoorwaarde windsnelheid (u_w) en golfparameters t.h.v. zeewaartse sluisdeur van de NSZ, Alt.1

Storm scenario	u_w [m/s]	Windrichting [-]	T [jaar]	waterstand [m TAW]	Hm0 [m]	Tp [s]	Tm-1,0 [s]
H625	18.14	NNW	48	6.15	0.49	2.47	2.26
H650	19.48	NNW	156	6.40	0.55	2.59	2.51
H675	20.77	NNW	506	6.65	0.59	2.67	2.51
H700	22.02	NNW	1645	6.90	0.64	2.73	2.60
H750	24.42	NNW	17399	7.40	0.73	2.91	2.83
H800	26.72	NNW	183991	7.90	0.74	3.01	2.67

De SWAN resultaten in Tabel 3 liggen in lijn met de resultaten uit Hajivalie *et al.* (2020), zoals aangetoond in Figuur 9.



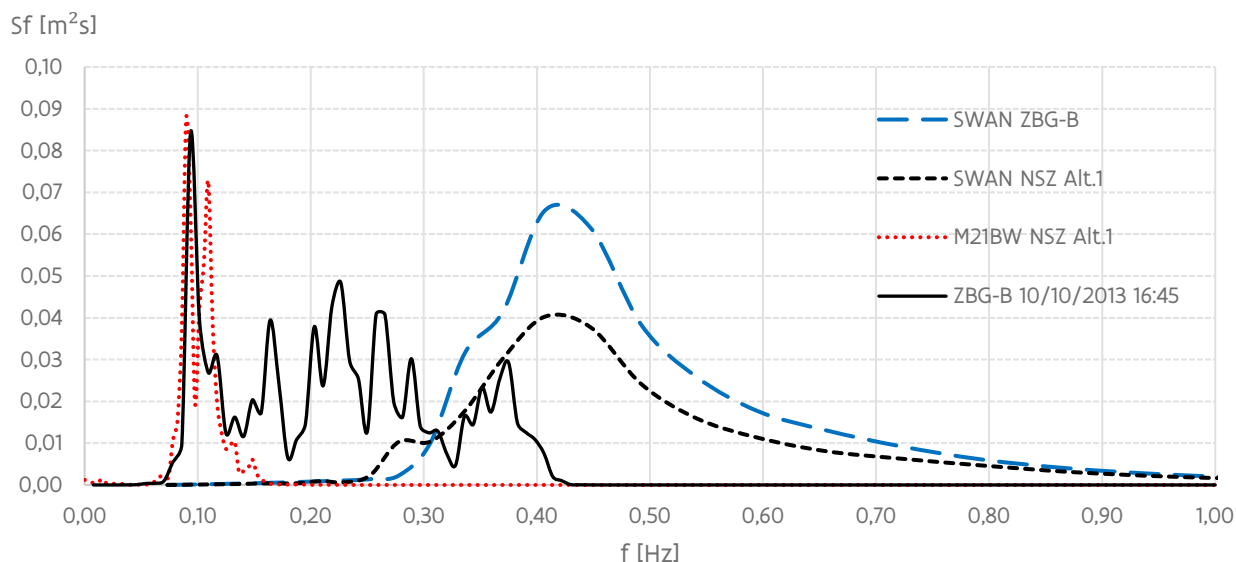
Figuur 9 – Vergelijking H_{m0} en T_p in Tabel 3 (16_122) met SWAN modellering Hajievalie *et al.*(2020) voor windrichting NNW Alt. 1

2.2.3 Validatie storm 10-10-2013

Onderstaande

Figuur 10 toont het HF golfspectrum ter hoogte van locatie ZBG_B, gemeten op 10/10/2013 16:45, het tijdstip van maximale H_{m0} waarde van de korte golven gedurende het 2^{de} hoogwater (ca +5.2 m TAW). Dit gemeten spectrum wordt vergeleken met volgende gemodelleerde spectra:

- M21-BW simulatie +6.25 m TAW storm, ter hoogte van de toekomstige zeewaartse deur NSZ, Alt. 1;
- SWAN modellering met windrandvoorwaarde gemeten tijdens de storm⁸, met als uitvoerlocatie ZBG_B (de locatie van de drukmeting net naast de ingang van de huidige Visartsluis) en een locatie ter hoogte van de toekomstige zeewaartse deur (NSZ, Alt. 1).



Figuur 10 – Hindcast storm 10/10/2013

⁸ windsnelheid 14.8 m/s, windrichting 354°N. Gegevens op basis van Zeebrugge meteopark.

Observaties bij Figuur 10:

- Een eerste energiepiek rond 0.09 Hz wordt gecapteerd in Mike21-BW. Deze is afkomstig van de langere golven die de havenmond binnendringen van buitengaats en via reflectie de locatie Visartsluis bereiken. Niettemin de afwijkende randvoorwaarden (waterstand, golfrandvoorwaarde) t.o.v. de stormcondities stemt de ligging van de gemeten piekfrequentie goed overeen met de gemodelleerde waarde in Mike21-BW. Merk op dat het gemeten spectrum de reflectie door de kademuur t.h.v. ZBG_B bevat, het gemodelleerde golfspectrum niet.
- Een tweede energiepiek geassocieerd met de SWAN gemodelleerde windgolven ligt rond ca. 0.42 Hz. Het energieverschil in de SWAN golfspectra tussen uitvoerlocatie ZBG-B en NSZ, Alt.1 wordt veroorzaakt door reflectie op de kademuur t.h.v. ZBG_B. Deze energiepiek is niet zichtbaar in het gemeten golfsignaal omwille van de manipulatie in de omzetting van de druktijdreeks naar verheffing⁹.
- Tussen beide energiepieken vertoont het gemeten signaal een relevante energie-inhoud. De oorsprong daarvan kan niet met zekerheid vastgesteld worden. Een mogelijke verklaring ligt in een interactie tussen de indringingsgolven met de lokale wind in de voorhaven die een verschuiving van de energie naar lagere frequenties veroorzaakt. Deze interactie is een fysisch reëel effect, al wordt het sowieso niet beschreven door een eenvoudige superpositie van individuele spectra gemodelleerd met M21BW en SWAN. Het is echter ook niet helemaal uit te sluiten dat de frequentieband geassocieerd met de windenergie foutief gemodelleerd wordt in SWAN. Helaas geeft de validatieoefening geen uitsluitsel omwille van het ontbreken van de frequenties > 0.43 Hz in het gemeten druksignaal¹⁰.

⁹ Om een onrealistische energietoename van de hoogfrequente energie-inhoud te voorkomen bij de omzetting van druk naar verheffing wordt de transferfunctie geleidelijk afgebouwd tussen 0.33 en 0.43 Hz. Het resulterende verheffingsspectrum vertoont geen energie boven 0.43 Hz.

¹⁰ Dit vormt tevens de motivatie voor bijkomende golfmetingen op basis van een radar toestel, zodat het meetbereik van golffrequenties opgeschaald kan worden tot minstens 1 Hz.

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Conclusies golfklimaat

De voorgaande analyse van de gemeten en gemodelleerde golfspectra leidt tot volgende conclusies i.v.m. de golfrandvoorwaarden t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ:

- (a) het invallend golfspectrum onder **(extreme) stormcondities** (wind en golven uit sector NNW-N) toont volgende kenmerken:
- een relatief smalle energiepiek rond 0.085-0.11 Hz geassocieerd met golfindringing
De H_{m0} en T_p waarden kunnen ingeschat worden op basis van de beschikbare M21-BW simulaties voor golfrichting NNW, zie Tabel 2¹¹. De golfspectra bij stormen met waterstand $>+7$ m TAW kunnen ingeschat worden op basis van de K_d coëfficiënt ter plaatse van de zeewaartse sluisdeur uit de lagere stormcondities rekening houdend met de aanname van ophoging van de kaaiterreinen in de haven bij een stijgende zeespiegel.
 - een relatief brede energiepiek rond 0.3-0.4 Hz geassocieerd met windgolven (grootste relatieve energiebijdrage). Richting N veroorzaakt de grootste golven aan de huidige Visartsluis. H_{m0} en T_p waarden kunnen gebaseerd worden op SWAN modellering (zie Bijlage 1)
 - waargenomen golfspectra tonen de aanwezigheid van een significante hoeveelheid golfenergie tussen beide energiepieken, op een niveau onder de laagste van de 2 pieken. Vermoedelijk is dit het gevolg van fysische interactie tussen de indringingsgolven met de wind en een energietransfer vanuit de windgolven naar lagere frequenties.
 - de metingen tonen een reductie van H_{m0} aan voor kortere golven ($T < 30$ s) bij laagwater tijdens een milde storm (zie Figuur 6a). De reden hiervoor zijn golfbrekiingsprocessen op de zandbanken ten noorden van de vaargeul. Echter, bij extreem stormtij zal deze reductie (deels) teniet gedaan worden door het stormopzet. Bovendien zijn de lokaal opgewekte windgolven minder onderhevig aan de daling van het waterpeil (een eventuele reductie in wrijving van de wind door de lagere waterspiegel niet te na gesproken). Voor ontwerp kan dan ook conservatief aangenomen¹² worden dat de hoger vermelde golfrandvoorwaarden ook toegepast kunnen worden bij het laagwater tijdens een storm.
- (b) **resonantiegolven** :
- energie-inhoud: H_{m0} tot max. 0.1 m^{13}
 - gekenmerkt door breed spectrum met meerdere pieken:
 - piekperiode TPS (discrete waarden), tussen 12 en 90 s (cluster rond 60 s^{14})
 - gemiddelde T_{m02} tussen 40 en 100 s (continue waarden)

¹¹ Merk op dat in deze simulaties de bathymetrie niet werd aangepast aan de toekomstige alternatieven. De inschatting is dat invloed beperkt is, vooral in het Alt. 1 waar de bestaande ingang tot de marina behouden blijft en de aanpassing aan het talud en kademuren in de omgeving van het militair dok en de marina minder ingrijpend is.

¹² Dit is in principe afhankelijk van de (geometrische) eigenschappen van de toekomstige zeeweringen en kademuren in de voorhaven.

¹³ Worst-case 0.4 m volgens de metingen in (IMDC, 2011), hoewel deze metingen onbetrouwbaar lijken (zie 2.1.1).

¹⁴ Dit is de eerste eigenmode van een bekken met 3km lengte.

- in afwezigheid van wind (storm) : vermoedelijk onder impuls van lokale externe factoren (scheepsgolven?) die resonantie opwekken, vooral bij lagere waterstanden.
- de analyse van één storm (sectie 2.1.2) toont aan dat resonantiegolven ook voorkomen tijdens een storm, met een hogere kans van voorkomen tijdens laagwater. Over de kans van optreden van resonantie bij hoogwater tijdens een storm kan op basis van de beschikbare info (IMDC analyserapporten) evenwel geen sluitende uitspraak gedaan worden.

Voor **ontwerpdoeleinden** wordt voorgesteld een invallend golfspectrum te gebruiken dat correspondeert met bijdragen van golfindringing en wind onder stormcondities. De interactie tussen de langere indringingsgolven met de lokale wind kan niet gemodelleerd worden. De piekfrequenties geassocieerd met windgolven en golfindringing uit de modellen liggen relatief ver uit elkaar en er is geen overlapping van spectrale dichtheden (zie Figuur 10). De golfmetingen t.h.v. ZBG_B tonen echter aan dat er tussen beide gemodelleerde piekfrequenties energie aanwezig is. Het lijkt dan aannemelijk te veronderstellen dat er een hoeveelheid energie (voornamelijk van de windgolven) getransfereerd wordt naar intermediaire frequenties. Dit effect zal hierna pragmatisch beschreven worden door middel van een schematisatie van het resulterend invallend golfspectrum, te gebruiken voor ontwerpdoeleinden.

De resonantiegolven kunnen als een quasi-statische belasting beschouwd worden (verhoging van de ontwerpwaterstand met de amplitude van de resonantiegolf tijdens stormcondities¹⁵). Er zijn evenwel argumenten om de resonantiegolf buiten beschouwing te laten in de golfbelasting op hoogwater (zie hoger).

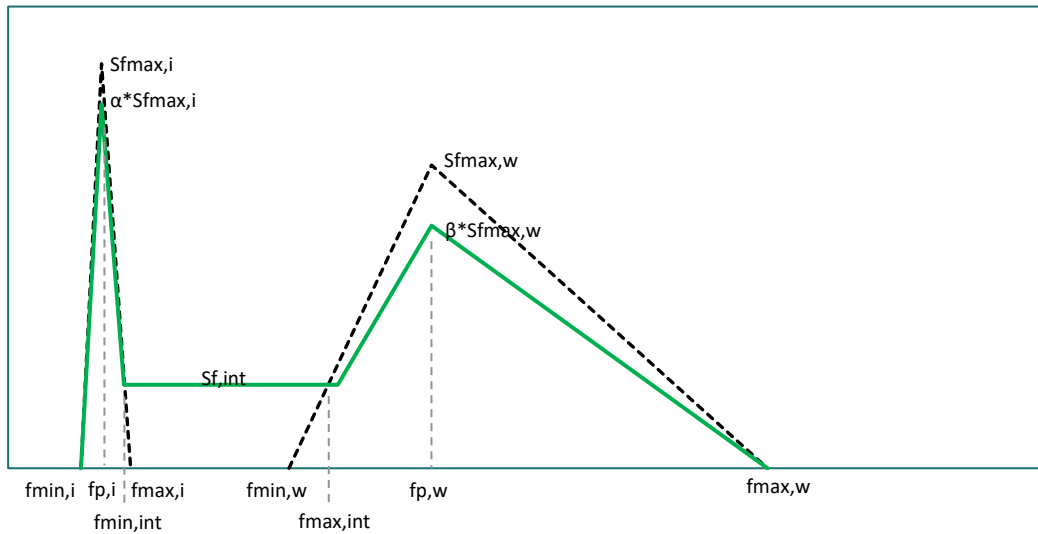
3.2 Schematisering golfspectrum voor ontwerp

Het invallend gecombineerd golfspectrum onder stormcondities kan op basis van de volgende aannames geschematiseerd worden:

- de individuele spectra geassocieerd met golfindringing en wind worden lineair benaderd met behoud van de piekfrequenties ($f_{p,i}$; $f_{p,w}$) en bijhorende spectrale dichtheden ($S_{fmax,i}$; $S_{fmax,w}$). Daarbij worden de minimale frequenties vastgelegd (zie Bijlage 0) en de maximale frequenties berekend op basis van de gekende totale energie (H_{m0});
- er wordt een hoeveelheid energie getransfereerd naar het frequentiegebied tussen beide piekfrequenties van golfindringing en windgolven. Hierbij wordt de limietfrequenties van de lineair benaderde (driehoekige) spectra behouden met reductie van de pieken in spectrale dichtheden ($\alpha S_{fmax,i}$ en $\beta S_{fmax,w}$). Als praktische waarden voor de reductie worden $\alpha = 0.9$ en $\beta = 0.8$ vooropgesteld. Gelet op het relatieve aandeel van de windgolvenenergie is het vooral de beta factor die bepaalt hoeveel energie getransfereerd wordt. De waarde 0.8 is gebaseerd op een schematisatie van het golfspectrum bij de storm 10-10-2013 (Figuur 10), waarbij rekening gehouden wordt met het feit dat het gemeten golfspectrum t.h.v. ZBG_B de reflectie van de kademuur bevat.
- de energietoename in het tussenliggende gebied is gelijk aan de afname in beide individuele golfspectra (behoud van energie). Eenvoudigheidshalve wordt dit voorgesteld door een uniforme waarde van de energiedichtheid $S_{f,int}$.

¹⁵ Een conservatieve benadering bestaat erin de waterstand te verhogen met de amplitude van de lange golf bij hoogwater, maar niet bij laagwater.

Een concrete voorstelling van deze schematisatie is gegeven in onderstaande Figuur 11



Figuur 11 – Schematisatie gecombineerd golfspectrum onder stormcondities

Hieronder worden in enkele stappen de bepalende punten van het geschematiseerd spectrum berekend op basis van de gegeven parameters van de individuele spectra:

- golfindringingsspectrum : $f_{p,i}$, $f_{min,i}$, $S_{fmax,i}$, $H_{m0,i}$
- windgolfspectrum : $f_{p,w}$, $f_{min,w}$, $S_{fmax,w}$, $H_{m0,w}$

stap 1 : benader individueel spectrum lineair tussen $f_{min,i}$ en $f_{p,i}$ en $f_{p,i}$ en $f_{max,i}$ met behoud van $S_{fmax,i}$

stap 2 : bereken $f_{max,i}$ en $f_{max,w}$ volgens¹⁶ :

$$f_{max,i/w} = f_{min,i/w} + \frac{H_{m0,i/w}^2}{8S_{fmax,i/w}}$$

stap 3 : bereken hoeveelheid energie E^+ die getransfereerd wordt naar intermediaire frequenties:

$$E^+ = \frac{1}{2} \left[(1 - \alpha) S_{fmax,i} (f_{max,i} - f_{min,i}) + (1 - \beta) S_{fmax,w} (f_{max,w} - f_{min,w}) \right]$$

stap 4 : de intermediaire energiedichtheid $S_{f,int}$ volgt als reële oplossing van de vierkantsvergelijking:

$$\left[\left(\frac{f_{max,i} - f_{p,i}}{2\alpha S_{fmax,i}} \right) + \left(\frac{f_{p,w} - f_{min,w}}{2\beta S_{fmax,w}} \right) \right] S_{f,int}^2 + (f_{min,w} - f_{max,i}) S_{f,int} = E^+$$

stap 5 : de snijpunten van het intermediair energieniveau $S_{f,int}$ met beide spectra volgen uit:

$$f_{min,int} = f_{max,i} - \frac{(f_{max,i} - f_{p,i}) S_{f,int}}{\alpha S_{fmax,i}}; f_{max,int} = f_{min,w} + \frac{(f_{p,w} - f_{min,w}) S_{f,int}}{\beta S_{fmax,w}}$$

¹⁶ Controleer of $f_{max,i} \leq f_{min,w}$. Zoniet overlappen de individuele golfspectra en is er een aanpassing van de rekenmethode nodig.

Gelet op het voorkomen van een dubbelpiekig spectrum wordt aanbevolen de lineaire spectrale golftheorie voor golfbelasting toe te passen indien mogelijk. Uit eerder onderzoek (Tuin, 2020) is gebleken dat de Goda methode in dergelijk geval een onderschatting van de golfbelasting oplevert. Als alternatief kan SWASH of eventueel een CFD model ingezet worden. In dat geval moet aandacht besteed worden aan het modelleren van een voldoende lange tijdreeks (of herhalen van voldoende sequenties invallende golfspectra), teneinde de variabiliteit van de krachten te kwantificeren d.m.v. een krachtenverdeling.

Voor beide berekeningsmethodes, zowel de spectraalmethode als numerieke modellering, is het tevens van belang de reflectie op de sluisdeur zo realistisch mogelijk in rekening te brengen, rekening houdend met de opbouw (geometrie) en golfdempende eigenschappen van de sluisdeur.

Referenties

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

Hajivalie, F.; Suzuki, T.; De Roo, S.; Vanneste, D.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2020). Design of new Visart lock in Zeebrugge: wave boundary conditions. Version2.0. *FHR reports*, 20_016_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

IMDC. (2011). Golfmetingen in de havens van Nieuwpoort, Blankenberge en Zeebrugge. Analyserapport. *I/RA/11348/11.084/SDO*

IMDC. (2014). Golfmetingen in de kusthavens. Stormrapport 1 : 10 oktober 2013. *I/RA/11410/14.007/SDO*

IMDC. (2015). Golfmetingen in de kusthavens. Analyserapport. *I/RA/11410/15.039/SDO*

Nguyen, D.; Vanneste, D. (2019). Numerical modeling of the extreme wave climate in the port of Zeebrugge. *WL Memo's*, 16_122_10. Flanders Hydraulics: Antwerp

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. (2019). Golf randvoorwaarden ten behoeve van voorontwerp Nieuwe Sluis Zeebrugge. *WL Memo's*, 19_124_1

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). *WL Rapporten*, 18_037_4. Waterbouwkundig Laboratorium

Willems, P. (2019). Actualisatie van de extremewaardestatistiek van de stormvloed aan de kust, KU Leuven voor Waterbouwkundig Laboratorium

Bijlage 1 SWAN golfparameters op basis van HR2020

Tabel 4 bevat de offshore windsnelheden voor richting NNW en N op basis van HR2014 (De Roo *et al.*, 2016) en HR2020 (Vuik *et al.*, 2020). Een directe vergelijking is enkel mogelijk voor de 2u-gemiddelde waarden¹⁷, deze zijn algemeen iets kleiner in HR2020 t.o.v. HR2014 (tot max. 7% verschil bij de grootste retourperioden voor richting N).

In verband met de 2 grootste opgenomen terugkeerperiodes in Hajivalie *et al.* (2020) wordt het volgende opgemerkt:

- de waarde $T=180,000$ jaar betreft de uitgeïntegreerde waarde waarbij de statistische onzekerheid in de extremewaardeanalyse van de hoogwaterstand verdisconteerd werd. Het is echter aangewezen om deze statistische onzekerheid te negeren om consistentie te behouden in het verband tussen hoogwaterstand en retourperiode (de lagere waterstanden zijn gekoppeld aan de mediane retourperioden¹⁸).
- De waarde $T=119,000$ jaar stemt overeen een omnidirectionele hoogwaterstand bij stormvloed van +8 m TAW te Oostende (dit is het stormvloeds scenario dat overeenstemt met de strengste veiligheidsnorm in het Masterplan Kustveiligheid). Deze waarde werd afgeleid door Willems (2019) en betreft een mediane retourperiode d.w.z. zonder rekening te houden met de statistische onzekerheid op de extremewaardeanalyse. Deze waarde wordt hieronder verder gebruikt om de windsnelheid te bepalen die overeenstemt met de +8 m TAW storm te Oostende anno 2020 en vervangt aldus de waarde 180,000 jaar in voorgaande rapportering (Hajivalie *et al.*, 2020).

Tabel 4 – Offshore windsnelheden u_w volgens HR2014 en HR2020 (op 10 m referentiehoogte).

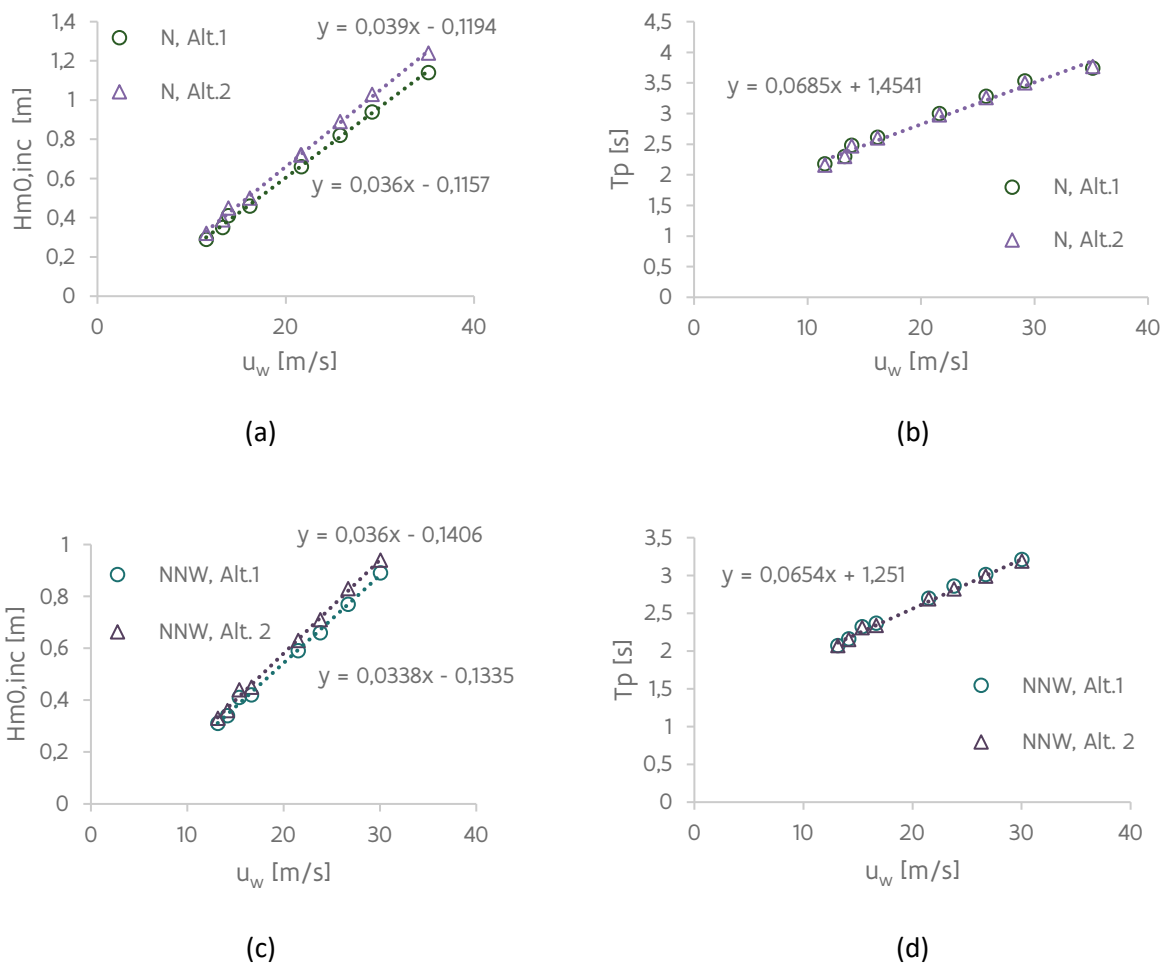
	HR2014				HR2020			
	u_w , 10 min [m/s]		u_w , 2u [m/s]		u_w , 30 min [m/s]		u_w , 2u [m/s]	
T [jaar]	N	NNW	N	NNW	N	NNW	N	NNW
1	16.6	17.7	14.4	16.4	15.3	16.5	14.2	15.8
5	20.2	20.8	17.4	19.2	18.7	19.6	17.4	18.8
100	27.0	26.0	22.9	23.7	24.4	24.0	22.6	23.1
1,000	32.2	29.7	27.0	26.9	28.5	27.0	26.2	25.9
10,000	37.4	33.3	31.22	29.8	32.4	29.8	29.7	28.7
119,000	43.0	36.9	35.7	32.9	36.4	32.7	33.2	31.5
180,000	43.9	37.5	36.5	33.4	37.1	33.2	33.8	31.9

¹⁷ In HR2014 bedraagt de kleinste geanalyseerde middelingsduur van de windsnelheid 10/15 min, in HR2020 30 min.

¹⁸ Merk op dat de statistische onzekerheid tot dusver nooit in rekening gebracht werd bij het afleiden van ontwerpwaarden in diverse projecten voor afdeling Kust en Maritieme Toegang, en er steeds gewerkt werd met mediane retourperioden. Enkel in de analyse van het overstromingsrisico in de kustvlakte wordt gewerkt met uitgeïntegreerde waterstandskrommen.

De wijziging van golfparameters (H_{m0} , T_p) van de SWAN windgolfspectra onder invloed van de herziene windsnelheden op basis van HR2020 wordt als volgt ingeschat:

1. eerst wordt het verband opgesteld tussen de gemodelleerde H_{m0} en T_p waarden (anno 2125) en de toegepaste¹⁹ windsnelheid in de SWAN modellering (Hajivalie *et al.*, 2020). Het blijkt dat een eenvoudig lineair verband nauwkeurig deze relaties beschrijft, althans binnen het gemodelleerde bereik (Figuur 12);
2. vervolgens worden aan de hand van de afgeleide lineaire verbanden de golfparameters berekend voor de HR2020 windsnelheden (30 min waarden²⁰). Deze analyse wordt uitgevoerd voor beide beschouwde alternatieven in de SWAN modellering.



Figuur 12 – H_{m0} en T_p i.f.v. opgelegde windsnelheid in het Zeebrugge SWAN model Alt. 1 en Alt.2, waterstand 2125.

¹⁹ Merk op dat de opgelegde windsnelheid in SWAN de wind boven land voorstelt die berekend wordt als 80% van de offshore waarde in Hajivalie *et al.* (2020).

²⁰ Uit een berekening blijkt dat voor de gegeven strijklengte (ca 1600 m voor richting N) de nodige tijd om het golfveld volledig te ontwikkelen c.a. 25-34 min bedraagt, afhankelijk van de windsnelheid. Dit rechtvaardigt het gebruik van de 30 min gemiddelde waarde, die iets minder conservatief is dan de 15 min waarde in Hajivalie *et al.* (2020).

De golfparameters voor windrichting N en NNW (anno 2125²¹) worden voorgesteld in respectievelijk Tabel 5 en Tabel 6. De Hm0 waarden liggen c.a. 5-17 % lager in vergelijking met de resultaten in Hajivalie *et al.* (2020), hetgeen toegeschreven wordt aan de iets lagere windsnelheden in HR2020 t.o.v. HR2014 en het feit dat in de berekening een 30 min i.p.v. 15 min gemiddelde waarde gebruikt wordt voor de windsnelheid.

Merk op dat het gebruik van de mediane retourperiode 119,000 ipv. 180,000 jaar slechts een kleine invloed heeft op het golfspectrum t.h.v. de zeewaartse sluisdeur. Dit is enerzijds te wijten aan een asymptotisch gedrag van de windsnelheid voor extreem grote retourperiodes, anderzijds aan een fysische begrenzing aan de toename van golfenergie voor de gegeven strijklengte in de haven.

Tabel 5 – SWAN gemodelleerde spectrale parameters t.h.v. zeewaartse sluisdeur NSZ, u_w 30 min, windrichting N, scenario 2125 (in cursief de reductie in Hm0 t.o.v. Hajivalie *et al.* (2020)).

T [jaar]	N u_w [m/s]	Alt. 1			Alt. 2		
		Hm0,inc [m]	Tp [s]	% reductie	Hm0,inc [m]	Tp [s]	% reductie
1	12.2	0.32	2.29	8%	0.36	2.29	9%
5	15.0	0.42	2.48	8%	0.46	2.48	7%
100	19.5	0.59	2.79		0.64	2.79	11%
1,000	22.8	0.71	3.02	14%	0.77	3.02	14%
119,000	29.1	0.93	3.45		1.02	3.45	
180,000	29.7	0.95	3.49	17%	1.04	3.49	16%

Tabel 6 – SWAN gemodelleerde spectrale parameters t.h.v. zeewaartse sluisdeur, u_w 30 min, windrichting NNW, scenario 2125 (in cursief de reductie in Hm0 t.o.v. Hajivalie *et al.* (2020)).

T [jaar]	NNW u_w [m/s]	Alt. 1			Alt. 2		
		Hm0,inc [m]	Tp [s]	% reductie	Hm0,inc [m]	Tp [s]	% reductie
1	13.2	0.31	2.12	8%	0.34	2.12	7%
5	15.7	0.40	2.28	5%	0.43	2.28	6%
100	19.2	0.52	2.51		0.55	2.51	
1,000	21.6	0.60	2.66	10%	0.64	2.66	10%
119,000	26.2	0.75	2.96		0.80	2.96	
180,000	26.6	0.76	2.99	14%	0.82	2.99	13%

²¹ De SWAN modelresultaten in (Hajivalie *et al.*, 2020) vertonen slechts een beperkte toename in Hm0 en Tp t.h.v. de zeewaartse sluisdeur wanneer het hoogwaterpeil met 1 m gestegen is in 2125 t.o.v.. 2025.

Bijlage 2 Parameters geschematiseerde golfspectra

Parameters spectrum golfindringing

Om de vorm van de gemodelleerde (invallende) golfspectra te schematiseren tot een driehoek werden volgende aannames toegepast op basis van de gemodelleerde M21-BW golfspectra (voor de bestaande havenconfiguratie, d.w.z de golfspectra bevatten niet de (beperkte) invloed van de wijziging havenlayout in de omgeving marina en Militair Dok):

- Hm0 waarden berekend op basis van waterstandsafhankelijke K_d factor uit M21-BW modellering volgens afgeleid lineair verband : $K_d = 0.0103 \cdot \text{SWL [mTAW]} - 0.0229$. De waterstand toegepast in deze vergelijking is de waterstand volgens NNW gegeven de retourperiode (op basis van HR2014). De offshore golfhoogte waarmee de K_d factor vermenigvuldigd wordt is de richtingsafhankelijke waarde (NNW) op de locatie van de golfgeneratielijn in M21-BW (op basis van HR2014), gegeven de retourperiode;
- een vaste verhouding (1/3) van de afstand tussen minimale en piekfrequentie en de totale frequentieband werd aangenomen, gebaseerd op de vorm van de gemodelleerde golfspectra,
- een vaste verhouding van de maximale spectrale dichtheid t.o.v. de significante golfhoogte $S_{fmax}/Hm0 = 0.8$, afgeleid op basis van de gemodelleerde golfspectra

De parameters die deze geschematiseerde golfspectra bepalen zijn samengevat in Tabel 7.

Tabel 7 – parameters van het geschematiseerd invallend golfspectrum t.h.v. zeewaartse sluisdeur gebaseerd op M21-BW modellering (golfindringing)

T [j]	SWL (omni) [mTAW]	Hm0 [m]	Tp [s]	fp [Hz]	Sf,max,i [m ² s]	df_max_min [Hz]	df_p_min [Hz]	fmin,i [Hz]	fmax,i [Hz]
2025									
1	5.38	0.10	8.5	0.118	0.0762	0.015	0.005	0.113	0.128
5	5.73	0.12	8.5	0.118	0.0930	0.018	0.006	0.112	0.130
100	6.37	0.18	9.9	0.101	0.1402	0.027	0.009	0.091	0.119
1000	6.87	0.22	10.6	0.095	0.1734	0.034	0.011	0.083	0.117
10000	7.37	0.26	11.0	0.091	0.2064	0.040	0.013	0.077	0.118
119000	7.90	0.30	11.4	0.088	0.2421	0.047	0.016	0.072	0.119
180000	7.99	0.31	11.5	0.087	0.2481	0.048	0.016	0.071	0.119
2125	+1 m zsr								
1	6.38	0.14	8.7	0.114	0.1099	0.021	0.007	0.107	0.129
5	6.73	0.16	8.8	0.114	0.1295	0.025	0.008	0.105	0.130
100	7.37	0.23	10.3	0.097	0.1859	0.036	0.012	0.085	0.121
1000	7.87	0.28	10.9	0.092	0.2236	0.044	0.015	0.077	0.121
10000	8.37	0.33	11.4	0.088	0.2602	0.051	0.017	0.071	0.122
119000	8.90	0.37	11.8	0.085	0.2993	0.058	0.019	0.065	0.124
180000	8.99	0.38	11.9	0.084	0.3058	0.060	0.020	0.064	0.124

Parameters spectrum windgolven

Om de vorm van de gemodelleerde (invallende) golfspectra te schematiseren tot een driehoek werden volgende aannames toegepast op basis van de gemodelleerde SWAN golfspectra (voor beide alternatieven Alt.1 en 2)

- verband u_w en (H_{m0}, T_p) op basis van SWAN modellen voor de waterstand 2125 (zie Bijlage 1, Figuur 12), waarbij enkel windrichting N beschouwd wordt (meest nadelig voor windgolven t.h.v. de sluisdeur NSZ)
- een vaste verhouding (0.17) van de afstand tussen minimale en piekfrequentie en de totale frequentieband werd aangenomen, gebaseerd op de vorm van de gemodelleerde SWAN golfspectra,
- een verhouding van de maximale spectrale dichtheid t.o.v. de significante golfhoogte in functie van de windsnelheid u_w volgens volgend verband afgeleid op basis van de gemodelleerde golfspectra $S_{fmax}/H_{m0} = 0.0157 * u_w [m/s] - 0.1083$

De parameters die deze geschematiseerde golfspectra bepalen zijn samengevat in Tabel 8.

Tabel 8 – parameters van het geschematiseerd invallend golfspectrum t.h.v. zeewaartse sluisdeur gebaseerd op SWAN modellering (windgolven)

T [j]	u_w [m/s]	H_{m0} [m]	T_p [s]	f_p [Hz]	$S_{f,max,i}$ [m ² s]	$df_{max,min}$ [Hz]	$df_{p,min}$ [Hz]	$f_{min,i}$ [Hz]	$f_{max,i}$ [Hz]
N, Alt.1									
1	12.20	0.32	2.29	0.44	0.027	0.49	0.08	0.354	0.84
5	14.96	0.42	2.48	0.40	0.054	0.42	0.07	0.333	0.75
100	19.54	0.59	2.79	0.36	0.117	0.37	0.06	0.295	0.67
1000	22.80	0.71	3.02	0.33	0.176	0.35	0.06	0.272	0.62
10000	25.91	0.82	3.23	0.31	0.244	0.34	0.06	0.252	0.59
119000	29.12	0.93	3.45	0.29	0.325	0.33	0.06	0.233	0.57
180000	29.65	0.95	3.49	0.29	0.340	0.33	0.06	0.230	0.56
N, Alt.2									
1	12.20	0.36	2.29	0.44	0.030	0.54	0.09	0.346	0.88
5	14.96	0.46	2.48	0.40	0.059	0.46	0.08	0.326	0.78
100	19.54	0.64	2.79	0.36	0.128	0.40	0.07	0.289	0.69
1000	22.80	0.77	3.02	0.33	0.192	0.39	0.07	0.266	0.65
10000	25.91	0.89	3.23	0.31	0.266	0.37	0.06	0.246	0.62
119000	29.12	1.02	3.45	0.29	0.355	0.36	0.06	0.228	0.59
180000	29.65	1.04	3.49	0.29	0.370	0.36	0.06	0.225	0.59

Parameters gecombineerd golfspectrum

Tabel 9 bevat de punten die het gecombineerd invallend golfspectrum t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ vastleggen (zie ook Figuur 11). Beide pieken van de geschematiseerde golfspectra van golfindringing en windgolven werden gereduceerd met aanname $\alpha = 0.9$, $\beta = 0.8$ (zie sectie 3.2).

Voor de berekening van deze punten wordt verwezen naar het Excel rekenblad 'design_spectra_NSZ.xlsx' dat als digitale bijlage bij dit rapport wordt toegevoegd.

Tabel 9 – parameters gecombineerd geschematiseerd invallend golfspectrum t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ

	T1		T5		T100		T1000		T119000	
Alt.1, 2025	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]
min,i	0.006	0.0000	0.112	0.0000	0.091	0.0000	0.083	0.0000	0.072	0.0000
p,i	0.118	0.0686	0.118	0.0837	0.101	0.1262	0.095	0.1561	0.088	0.2179
min,int	0.127	0.0074	0.128	0.0109	0.115	0.0242	0.112	0.0393	0.106	0.0881
max,int	0.382	0.0074	0.351	0.0109	0.311	0.0242	0.288	0.0393	0.252	0.0881
p,w	0.437	0.0216	0.403	0.0428	0.358	0.0934	0.332	0.1408	0.290	0.2604
max,w	0.840	0.0000	0.750	0.0000	0.665	0.0000	0.625	0.0000	0.567	0.0000
Alt.2, 2025	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]
min,i	0.006	0.0000	0.112	0.0000	0.091	0.0000	0.083	0.0000	0.072	0.0000
p,i	0.118	0.0686	0.118	0.0837	0.101	0.1262	0.095	0.1561	0.088	0.2179
min,int	0.126	0.0087	0.128	0.0134	0.115	0.0294	0.110	0.0474	0.104	0.1053
max,int	0.379	0.0087	0.348	0.0134	0.309	0.0294	0.286	0.0474	0.251	0.1053
p,w	0.437	0.0238	0.403	0.0470	0.358	0.1021	0.332	0.1537	0.290	0.2837
max,w	0.881	0.0000	0.784	0.0000	0.694	0.0000	0.652	0.0000	0.592	0.0000
Alt.1, 2125	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]
min,i	0.107	0.0000	0.105	0.0000	0.085	0.0000	0.077	0.0000	0.065	0.0000
p,i	0.114	0.0989	0.114	0.1165	0.097	0.1673	0.092	0.2012	0.085	0.2693
min,int	0.128	0.0060	0.129	0.0113	0.118	0.0253	0.115	0.0412	0.110	0.0931
max,int	0.377	0.0060	0.351	0.0113	0.312	0.0253	0.289	0.0412	0.253	0.0931
p,w	0.437	0.0216	0.403	0.0428	0.358	0.0934	0.332	0.1408	0.290	0.2604
max,w	0.840	0.0000	0.750	0.0000	0.665	0.0000	0.625	0.0000	0.567	0.0000
Alt.2, 2125	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]	f [Hz]	Sf [m²s]
min,i	0.107	0.0000	0.105	0.0000	0.085	0.0000	0.077	0.0000	0.065	0.0000
p,i	0.114	0.0989	0.114	0.1165	0.097	0.1673	0.092	0.2012	0.085	0.2693
min,int	0.128	0.0074	0.128	0.0138	0.117	0.0305	0.114	0.0495	0.108	0.1109
max,int	0.374	0.0074	0.348	0.0138	0.310	0.0305	0.287	0.0495	0.252	0.1109
p,w	0.437	0.0238	0.403	0.0470	0.358	0.1021	0.332	0.1537	0.290	0.2837
max,w	0.881	0.0000	0.784	0.0000	0.694	0.0000	0.652	0.0000	0.592	0.0000

Bijlage 3 Parameters gesuperponeerde golfspectra

In het (voor)ontwerp kan er eventueel geopteerd worden om de ontwerpgolven te kenmerken door een eenvoudige superpositie van de individuele golfspectra uit golfindringing en wind²². Men kan het werkelijke (dubbelpiekige) golfspectrum vereenvoudigen tot een equivalent enkelpiekig golfspectrum dat gekenmerkt wordt door een totale (invalende) golfhoogte en equivalente golfpiekperiode op basis van de afzonderlijke bijdragen van golfindringing (subscript 'i', Mike21-BW) en windgolven (subscript 'w', SWAN). De totale golfhoogte wordt berekend door sommatie van de golfenergie:

$$H_{m0,tot} = \sqrt{H_{m0,i}^2 + H_{m0,w}^2}$$

De equivalente golfpiekperiode wordt berekend als een gewogen gemiddelde van de afzonderlijke golfpiekperiodes van resp. golfindringing ($T_{p,i}$) en windgolven ($T_{p,w}$) (zie b.v. van der Meer *et al.*, 2002):

$$T_{p,eq} = \left(\frac{H_{m0,i}}{H_{m0,tot}} \right)^2 T_{p,i} + \left(\frac{H_{m0,w}}{H_{m0,tot}} \right)^2 T_{p,w}$$

Tabel 10 en Tabel 11 geven voor resp. Alt. 1 en 2 de totale invalende golfhoogte en equivalente golfpiekperiode van het gesuperponeerd golfspectrum (windgolven beschouwd voor richting N).

Merk op dat de waarden van de equivalente golfpiekperiode sterk bepaald wordt door de waarde van de piekfrequentie in het SWAN gemodelleerde golfspectrum. Voor ontwerpdoeleinden is het aan te bevelen de equivalente golfpiekperiode niet kleiner te nemen dan de grootste waarde die uit de gemeten golfspectra voor retourperiodes kleiner dan 1 jaar. Dit omwille van de onzekerheid op de piekfrequentie in het SWAN gemodelleerde golfspectrum (zie sectie 2.2.3).

Tabel 10 – golfhoogte en equivalente golfpiekperiode van het gecombineerd invallend golfspectrum t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ, golfrichting N alt. 1.

N, Alt.1 T [jaar]	2025		2125	
	H _{m0} [m]	T _{p,eq} [s]	H _{m0} [m]	T _{p,eq} [s]
1	0.34	2.79	0.35	3.28
5	0.44	2.90	0.45	3.29
100	0.61	3.38	0.63	3.81
1,000	0.74	3.67	0.76	4.09
119,000	0.98	4.21	1.00	4.61

²² Superpositie van de afzonderlijke spectra zonder aanpassing van de vorm van het spectrum of energietransfer naar tussenliggende frequenties, zie sectie 3.2).

Tabel 11 – golfhoogte en equivalente golfpiekperiode van het gecombineerd invallend golfspectrum
t.h.v. de zeewaartse sluisdeur NSZ, golfrichting N alt. 2.

N, Alt.2 T [jaar]	2025		2125	
	H_{m0} [m]	T_{p,eq} [s]	H_{m0} [m]	T_{p,eq} [s]
1	0.37	2.70	0.38	3.13
5	0.48	2.83	0.49	3.16
100	0.67	3.29	0.68	3.66
1,000	0.80	3.57	0.82	3.94
119,000	1.06	4.10	1.08	4.44

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

www.waterbouwkundiglaboratorium.be