



Vlaanderen
is wetenschap

16_069_1
WL rapporten

Golfklimaat ter hoogte van de Halve Maan (haven Oostende)

Kort- en langkruinige golfkarakteristieken
en reflectie-analyse

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Golfklimaat ter hoogte van de Halve Maan (haven Oostende)

Kort- en langkruinige golfkarakteristieken en reflectie-analyse

De Roo, S.; Suzuki, T.; Vanneste, D.; 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 2017

D/2017/3241/21

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

De Roo, S.; Suzuki, T.; Vanneste, D.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2017). Golfklimaat ter hoogte van de Halve Maan (haven Oostende): Kort- en langkruinige golfkarakteristieken en reflectie-analyse. Versie 4.0. WL Rapporten, 16_069_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

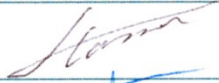
Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

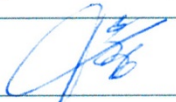
Opdrachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2017R16_069_1
Keywords (3-5):	Hydraulische randvoorwaarden, 1000-jarige storm, golven, numerieke modellering, haven Oostende		
Tekst (p.):	19	Bijlagen (p.):	2
Vertrouwelijk:	☒ Nee	☒ Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Suzuki, T.	
Projectleider:	Vanneste, D.	

Goedkeuring

Coördinator onderzoeksgroep:	Peeters, P.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	



Abstract

Er dient een nieuw talud aangelegd te worden langs de Halve Maan voor de uitvoering van de verbreding van de vaargeul in de haven van Oostende. Voor het ontwerp van dit talud zijn hydraulische randvoorwaarden (waterstand en golfklimaat) vereist.

Hiertoe zijn voor golfrichtingen NW (-45°), -37° en NNW (-22,5°) simulaties uitgevoerd voor een 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing. Directionele spreiding van de golven zorgt ervoor dat meer golfenergie toekomt in de schaduwzones achter de havendammen.

In vergelijking tot simulaties met langkruinige golven resulteren kortkruinige golven enkel in een toename van de golfhoogte voor golfrichting NNW, maar deze zijn niet maatgevend in vergelijking met golfrichtingen NW en -37°. Voor de westelijke zijde van de Halve Maan resulteren de hoogste, kortkruinige golven uit golfrichting -37°; voor de noordelijke zijde uit golfrichting NW.

Belangrijk hierbij op te merken is dat het toevoegen van meerdere sponslagen langs de Halve Maan zorgt voor een irreëel hoge dissipatie van de golfenergie en dientengevolge een onderschatting van de lokale golfhoogtes. Bijkomend is het 1/3 talud van de Halve Maan afgetopt tot een waterdiepte van 4 m, wat eveneens bijdraagt tot een onderschatting van de lokale golfhoogtes.

Uit deze MIKE21-BW simulaties volgt het lokale golfklimaat bestaande uit invallende en gereflecteerde golven. Voor het ontwerp dienen echter enkel invallende golfhoogtes gebruikt te worden.

Uit reflectie-analyse voor golfrichting NNW (waarbij geen sponslagen toegevoegd zijn langs de Halve Maan) blijkt dat de totale golfhoogte op 100 m (loodrechte) afstand van de noordelijke zijde ongeveer 50% gereflecteerde golven bevat; langs de westelijke zijde bedraagt dit aandeel 40%.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
1.1 Voorafgaand	1
1.2 Doel van dit advies	1
2 Hydraulische randvoorwaarden kustsectie 117	2
3 Golfkarakteristieken ter hoogte van de Halve Maan site.....	4
3.1 Significante golfhoogtes $H_{m0,Gl}$ door golfindringing (MIKE21-BW)	4
3.1.1 Contourplots significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven	4
3.1.2 Significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ langs contouren Halve Maan na 1000-jarige storm met kort- en langkruinige golven	8
3.2 Totale significante golfhoogtes $H_{m0,tot}$ (MIKE21-BW + SWAN).....	12
4 Reflectie-analyse	14
4.1 Reflectiecoëfficiënt talud Halve Maan in MIKE21-BW	14
4.2 Configuratie en positionering golfhoogtemeters	14
4.3 Invallende en gereflecteerde significante golfhoogtes	15
5 Besluit	18
6 Referenties	19
Bijlage A: Bathymetrie: Aanduiding snedes ter hoogte van de Halve Maan site	B1

Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Gesimuleerde hydraulische randvoorwaarden (T = 1000 jaar) (data uit IMDC, 2005)	2
Tabel 2 - (Omni)directionele hydraulische randvoorwaarden voor kustsectie 117 (data uit De Roo <i>et al.</i> , 2016).....	2
Tabel 3 - Golfhoogtemeters op verschillende locaties (golfrichting NW)	9
Tabel 4 - Golfparameters op verschillende locaties (golfrichting -37°).....	10
Tabel 5 - Golfhoogtemeters op verschillende locaties (golfrichting NNW)	11
Tabel 6 - Reflectie-analyse significante golfhoogte H_{m0} na simulatie van 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing (hoofdgolfrichting NW).....	16
Tabel 7 - Reflectie-analyse significante golfhoogte H_{m0} na simulatie van 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing (hoofdgolfrichting -37°).....	17
Tabel 8 - Reflectie-analyse significante golfhoogte H_{m0} na simulatie van 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing (hoofdgolfrichting NNW).....	17

Lijst van de figuren

Figuur 1 - Kustsectie 117 (Haven Oostende): (Omni)directionele extreme waardenverdeling voor de significante golfhoogte H_{m0}	3
Figuur 2 - Contourplot significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NW (met aanduiding van de golfhoogtemeters voor reflectie analyse).....	5
Figuur 3 - Contourplot significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting -37° (met aanduiding van de golfhoogtemeters voor reflectie analyse)	6
Figuur 4 - Contourplot significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NNW (met aanduiding golfhoogtemeters voor reflectie analyse).....	7
Figuur 5 - Significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NW (contouren gedefinieerd in Vanneste <i>et al.</i> , 2016).....	9
Figuur 6 - Significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting -37° (contouren gedefinieerd in Figuur 13)	10
Figuur 7 - Significante golfhoogte $H_{m0,Gl}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NNW (contouren gedefinieerd in Figuur 14)	11
Figuur 8 - Significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NW (contouren gedefinieerd in Vanneste <i>et al.</i> , 2016).....	12
Figuur 9 - Significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting -37° (contouren gedefinieerd in Figuur 13)	13
Figuur 10 - Significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NNW (contouren gedefinieerd in Figuur 14)	13
Figuur 11 - Pentagonale opstelling van de golfhoogtemeters (Panicker & Borgman, 1970) met aanduiding van de middellijn (blauwe stippellijn)	14
Figuur 12 - Reflectie-analyse significante golfhoogtes $H_{m0,Gl}$ ter hoogte van de Halve Maan site	16
Figuur 13 - Bathymetrie [m TAW]: richting -37° (volgens de as van de vaargeul) – aanduiding buiten- en binnencontour langs Halve Maan waar significante golfhoogtes H_{m0} geëxtraheerd zijn	B1
Figuur 14 - Bathymetrie [m TAW]: richting NNW – aanduiding buiten- en binnencontour langs Halve Maan waar significante golfhoogtes H_{m0} geëxtraheerd zijn.....	B2

1 Inleiding

1.1 Voorafgaand

In 2011 is de golfindringing in de haven van Oostende gemodelleerd met MIKE21-BW voor 2 extreme stormcondities, i.e. de 1000-jarige storm en de +8m TAW storm waarbij 3 golfrichtingen beschouwd zijn, i.e. NNW, -37° en NW (Gruwez *et al.*, 2011). De resulterende golfrandvoorwaarden (per kaaimuur zone) zijn enkel bepaald uit simulaties met langkruinige golven aangezien aangetoond werd dat directionele spreiding van de golven in de binnenhaven een verwaarloosbaar effect heeft op de golfhoogtes langs de kaaimuren. In deze studie was reeds rekening gehouden met een verbreding van de vaargeul ter hoogte van de Halve Maan site.

Er wordt opgemerkt dat een aftopping van het 1/3 talud ter hoogte van de Halve Maan noodzakelijk is om numerieke stabiliteit te bekomen (zie Sectie 3.3.8 in Gruwez *et al.*, 2011). Hierdoor bedraagt de minimale waterdiepte ter hoogte van deze locatie 4 m.

Samengevat is de 'toekomstige' bathymetrie met verbrede vaargeul opgebouwd gebruik makende van deze plannen:

- Buitenhaven Oostende: plan van Afdeling Maritieme Toegang d.d. 12/02/2010
planOHo20100212HavenVanOostende_OWplan_Ontwerpfase_Grondplan_Alternatief3.dwg
planOHo20100212HavenVanOostende_OWplan_Ontwerpfase_Sneden_Alternatief3.dwg
- Streefdieptes buiten (vaargeul naar de haven) en binnen de haven: plan van Afdeling Maritieme Toegang
CAD plannen met nummers 1M2B6MA00002300 en 1M2B6MA00005200
- Streefdieptes in de jachthaven van Oostende: plan van Afdeling Kust 'Uitvoeren van onderhoudsbaggerwerken in de kustjachthavens Nieuwpoort en Blankenberge en in de jachtdokken van Oostende en Zeebrugge'

Het huidige, finale ontwerp van de verbreding wijkt licht af van bovenvermeld initieel ontwerp (mond. comm. dr. ir. H. Verhaeghe). De vaargeul is o.a. wat smaller naar de binnenhaven toe.

Voor de uitvoering van deze verbreding is de aanleg van een nieuw talud langs de Halve Maan noodzakelijk. Voor het ontwerp van dit talud zijn de hydraulische randvoorwaarden (waterstand en golfklimaat) tijdens een 1000-jarige storm vereist. Gebruik makende van de resultaten uit Gruwez *et al.*, 2011 is een advies opgesteld met het lokale golfklimaat (langkruinige golven) voor de meest nadelige golfrichting, i.e. NW (Vanneste *et al.*, 2016).

1.2 Doel van dit advies

Voortvloeiend uit dit advies kwam de vraag van Afdeling Maritieme Toegang (dr. ir. H. Verhaeghe) om het golfklimaat voor een 1000-jarige storm te modelleren met kortkruinige golven uit de (hoofd)golfrichtingen NW, -37° en NNW. Bijkomend wordt een reflectie-analyse van de golven uitgevoerd.

In Hoofdstuk 2 worden de oorspronkelijke (gebruikt in Gruwez *et al.*, 2011), en huidige hydraulische randvoorwaarden met elkaar vergeleken (uit IMDC, 2005 en De Roo *et al.*, 2016 respectievelijk).

Hoofdstuk 3 bespreekt de lokale golfkarakteristieken voor zowel kort- als langkruinige golven; alsook de totale golfhoogtes, resulterend uit golfindringing en lokale windgroei.

Hoofdstuk 4 behandelt de reflectie-analyse van de kortkruinige golven ter hoogte van de Halve Maan site.

2 Hydraulische randvoorwaarden kustsectie 117

Gruwez *et al.* (2011) maakt gebruik van de omnidirectionele hydraulische randvoorwaarden uit IMDC, 2005. Intussen is een nieuw hydraulisch randvoorwaardenboek ter beschikking, dat eveneens de randvoorwaarden oplijst voor een maatgevende storm met terugkeerperiode $T = 1000$ jaar (locatie, zie Figuur 4-13 in De Roo *et al.*, 2016). Voor kustsectie 117, i.e. de haven van Oostende, verschillen beide resultaten slechts weinig van elkaar (zie Tabel 1 en Tabel 2). De gesimuleerde waterstand h bestaat uit de sommatie van het 1000-jarige peil, i.e. +6.9 m TAW en een verwachte hoogwaterstijging van 0.3 m. Hierdoor wordt een gemiddelde hoogwaterstijging van 0.6 cm/jaar in rekening gebracht voor de komende 50 jaar (t.o.v. referentiejaar 2000; IMDC, 2005).

Figuur 1 illustreert de directionele golf randvoorwaarden voor deze kustsectie (voor $T = 1000$ jaar, zie Tabel 2). Sectoren WNW en NNW hebben de belangrijkste bijdrage tot de omnidirectionele significante golfhoogte H_{m0} , terwijl de invloed van sector NNO verwaarloosbaar is.

Voor de simulatie van golfindringing in de haven zijn hoofdgolfrichtingen NW, -37° en NNW beschouwd. Rekening houdend met de directionele bijdrages uit deze sectoren kan gesteld worden dat de gesimuleerde hydraulische randvoorwaarden niet te conservatief zijn.

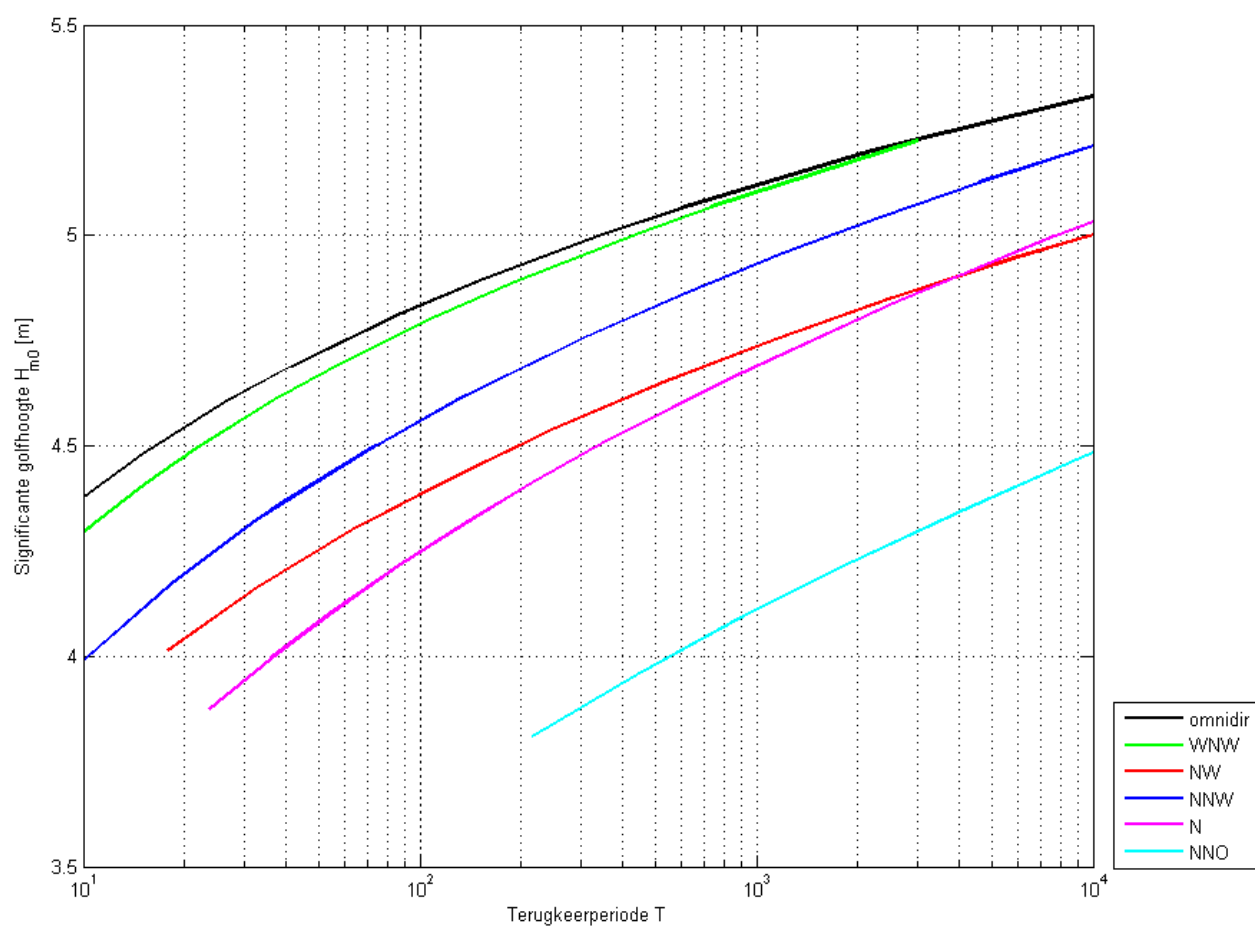
Tabel 1 - Gesimuleerde hydraulische randvoorwaarden ($T = 1000$ jaar) (data uit IMDC, 2005)

Waterstand h [m TAW]	Maximale waterdiepte d [m]	Offshore significante golfhoogte H_{m0} [m]	Piekgolfperiode T_p [s]	Hoofdgolfrichting
+7.20	16.1	5.0	12.0	NW, -37°, NNW

Tabel 2 - (Omni)directionele hydraulische randvoorwaarden voor kustsectie 117 (data uit De Roo *et al.*, 2016)

	H_{m0} [m]	T_p [s]	h [m TAW]
omnidir	5.12	11.29	6.88
WNW	5.11	11.25	
NW	4.74	10.78	
NNW	4.93	11.04	
N	4.69	10.97	
NNO	4.11	9.66	

Figuur 1 - Kustsectie 117 (Haven Oostende): (Omni)directionele extreme waardenverdeling voor de significante golfhoogte H_{m0}



3 Golfkarakteristieken ter hoogte van de Halve Maan site

3.1 Significante golfhoogtes $H_{m0,GI}$ door golfindringing (MIKE21-BW)

Tabel 1 geeft een overzicht van de gemodelleerde hydraulische randvoorwaarden. Buitengaats en in de vaargeul, met bodempeil op -8.9 m TAW, is de maximale waterdiepte $d = 16.1$ m. De golfrandvoorwaarden worden aan de modelrand, i.e. op een afstand van 2 golflengtes L tot de havendammen, opgelegd als een standaard JONSWAP spectrum met piekversterkingsfactor $\gamma = 3.3$. Directionele spreiding van de golven ('kortkruinigheid') in dit spectrum wordt frequentie-onafhankelijk opgelegd gebruik makend van een cosinus⁸ functie met een maximale afwijking van 30° ten opzichte van de hoofdgolfrichting.

De simulatieduur bedraagt 25 min, wat overeenstemt met ongeveer 125 langkruinige golven. Voor een nauwkeurige tijdreeks- en reflectie analyse is dit aantal golven te laag. Door numerieke instabiliteiten die optreden bij langere simulatieduren was het echter niet mogelijk een groter aantal golven te simuleren.

3.1.1 Contourplots significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven

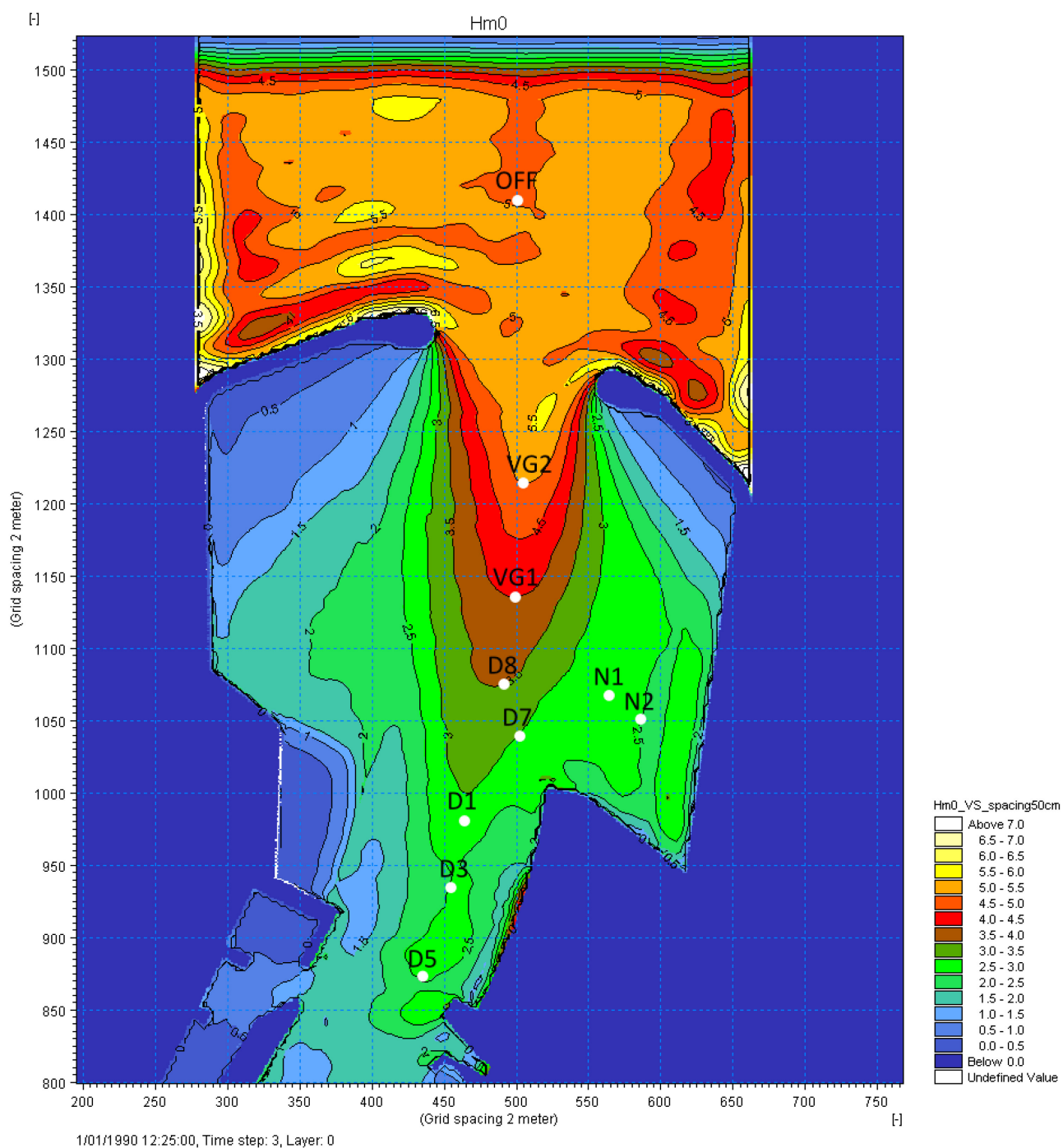
Figuur 2, Figuur 3 en Figuur 4 illustreren de resulterende significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ ter hoogte van de Halve Maan na simulatie van een 1000-jarige storm met kortkruinige golven komende uit de hoofdgolfrichtingen NW, -37° en NNW respectievelijk. In het algemeen zorgt de kortkruinigheid van de golven ervoor dat de golfenergie meer verspreid wordt in de haven. Zeker in de schaduwzones achter de havendammen komt hierdoor meer golfenergie toe (in vergelijking tot de simulaties met langkruinige golven).

De noordelijke zijde van de Halve Maan is ongeveer georiënteerd volgens NW, waardoor deze golfrichting resulteert in de hoogste kortkruinige golven voor deze zone. De as van de vaargeul is georiënteerd volgens -37°. De hoogste kortkruinige golven bereiken diensgevolge voor deze golfrichting de westelijke zijde van de Halve Maan. NNW is georiënteerd richting het Klein Strand. Kortkruinigheid leidt voor deze golfrichting eerder tot een bredere energetisch spreiding waardoor nu wel relatief hoge golven optreden langs de Halve Maan site.

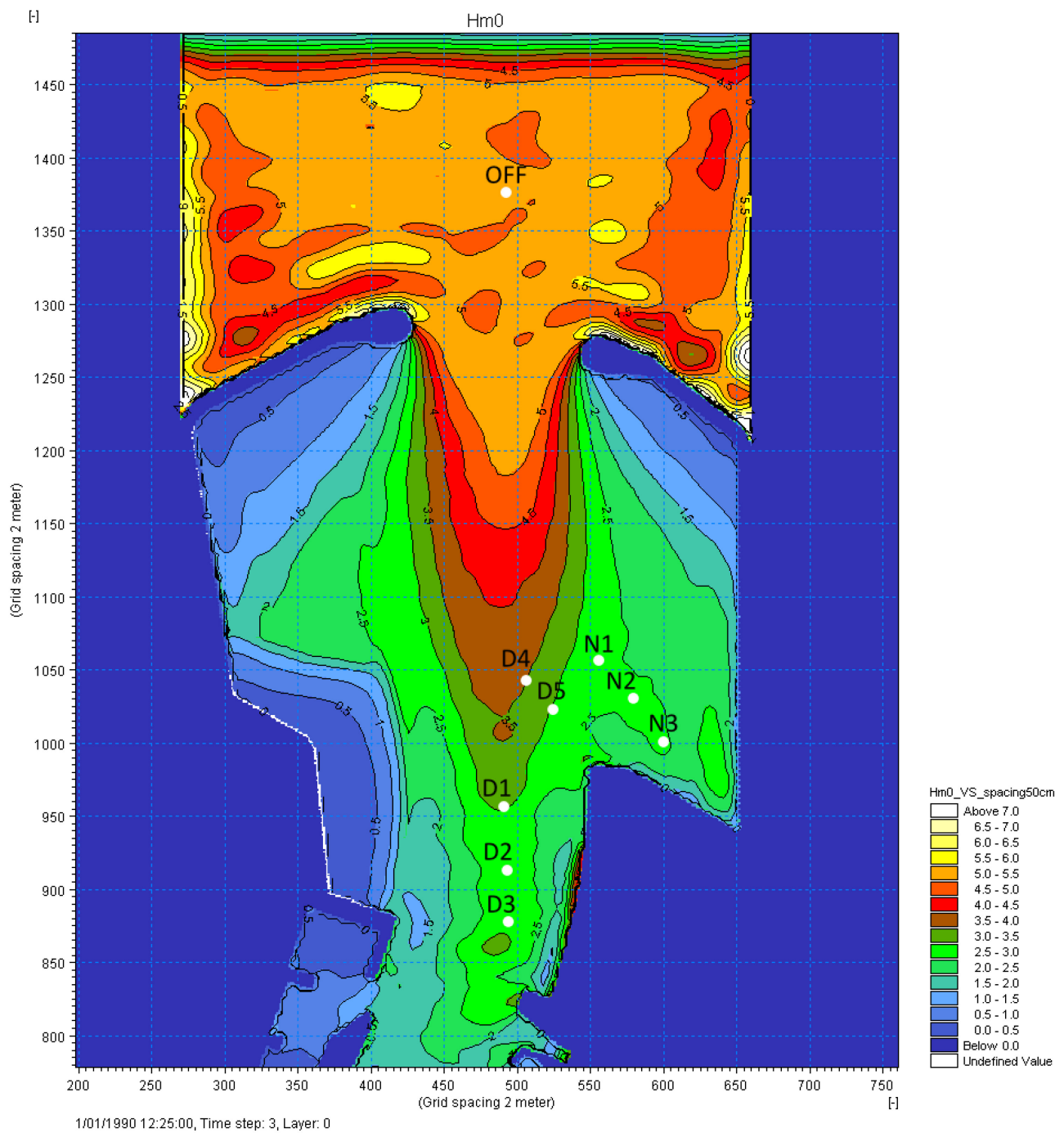
Er zijn twee belangrijke bemerkingen bij deze resultaten. Een eerste algemene bemerking betreft de aftopping van de Halve Maan. Door een waterdiepte van 4 m te behouden ter hoogte van de site wordt de partiële reflectie en refractie op diens talud gewijzigd (zie ook Sectie 3.3.8. in Gruwez *et al.*, 2011). Deze wijziging resulteert in een onderschatting van de lokale golfhoogtes.

Een tweede bemerking betreft de resultaten voor golfrichtingen NW en -37°. Om numerieke stabiliteit te verkrijgen in deze simulaties dienden meerdere sponslagen (6-tal gridcellen) toegevoegd te worden ter hoogte van de noordelijke zijde en de bovenste helft van de westelijke zijde langs de Halve Maan. Deze sponslagen zorgen voor extra dissipatie waardoor minder golfenergie gereflecteerd wordt en dus lagere golfhoogtes optreden langs de site. In Figuur 2 en Figuur 3 is hun locatie af te leiden door het ontbreken van hogere golfhoogtes tegen de rand van de Halve Maan.

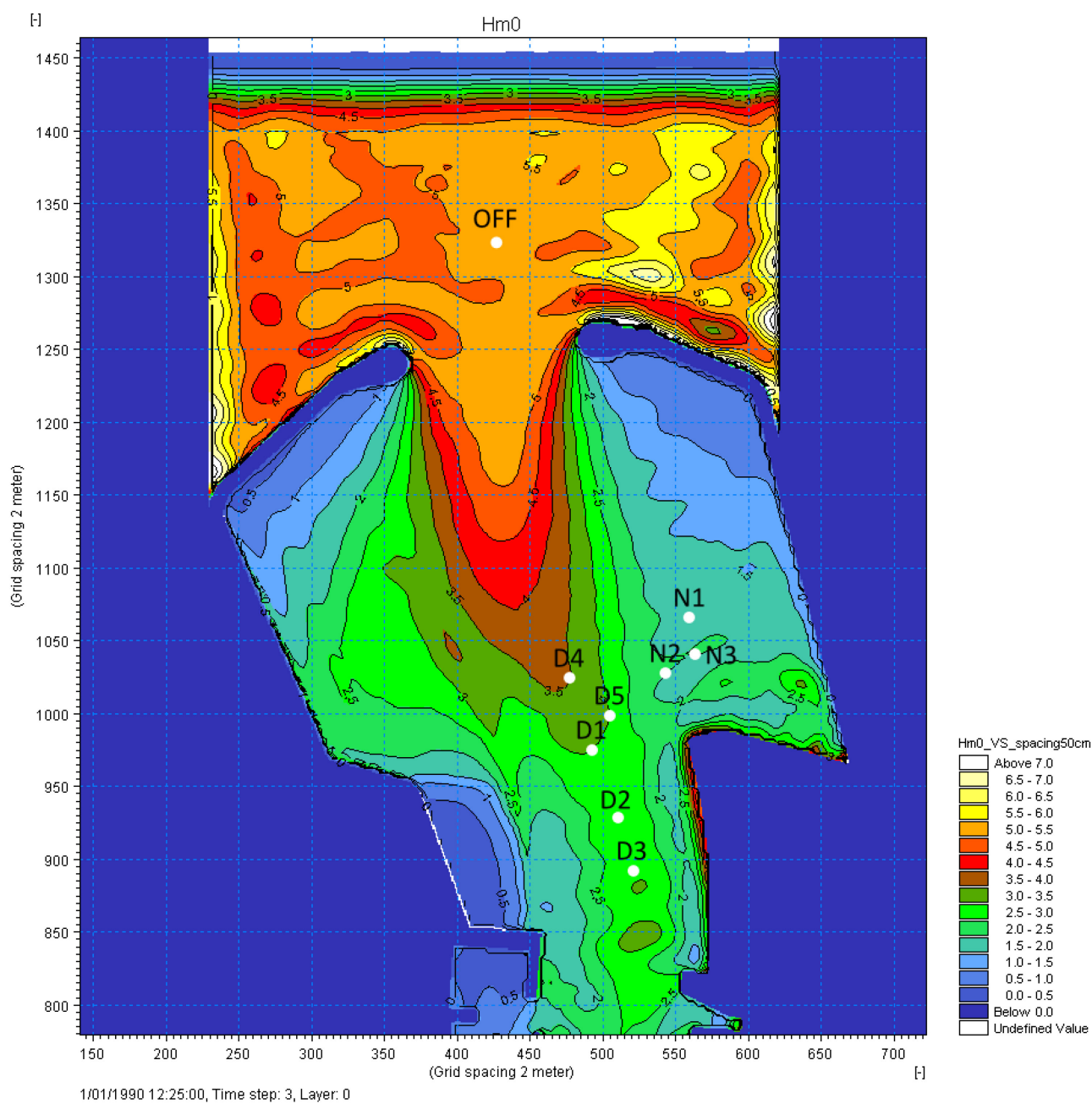
Figuur 2 - Contourplot significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NW (met aanduiding van de golfhoogtemeters voor reflectie analyse)



Figuur 3 - Contourplot significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting -37°
(met aanduiding van de golfhoogtemeters voor reflectie analyse)



Figuur 4 - Contourplot significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NNW
(met aanduiding golfhoogtemeters voor reflectie analyse)



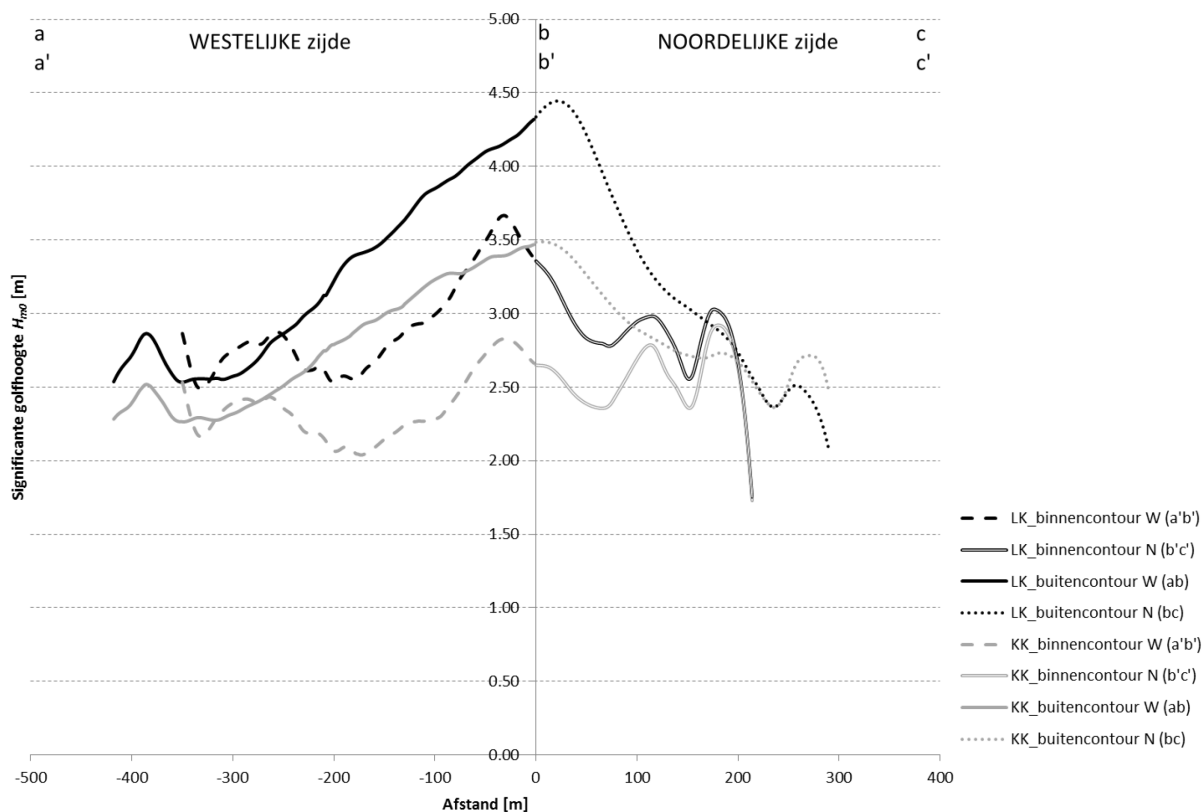
3.1.2 Significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ langs contouren Halve Maan na 1000-jarige storm met kort- en langkruinige golven

Figuur 5, Figuur 6 en Figuur 7 geven de resulterende significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ weer langs een binnen- en buitencontour ter hoogte van de Halve Maan na simulatie van een 1000-jarige storm met kort- en langkruinige golven komende uit de hoofdgolfrichtingen NW, -37° en NNW respectievelijk. Figuur 13 en Figuur 14 in Bijlage A duiden op de bathymetrie aan waar deze contouren gesitueerd zijn voor de hoofdgolfrichtingen -37° en NNW respectievelijk (de NW contouren zijn te vinden in Vanneste *et al.*, 2016).

De hoogste significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ langs de contouren resulteert uit simulaties met langkruinige golven; langs de westelijke zijde uit golfrichting -37° en langs de noordelijke zijde uit golfrichting NW. Voor deze golfrichtingen leidt kortkruinigheid tot een duidelijke daling van de golfhoogte langs de westelijke zijde van de Halve Maan (in tegenstelling tot golfrichting NNW). Langs de noordelijke zijde treden echter vaak hogere golfhoogtes op (uitgezonderd voor NW); voor golfrichting NNW leidt dit zelfs tot een gemiddelde stijging van 65% voor de binnencontour.

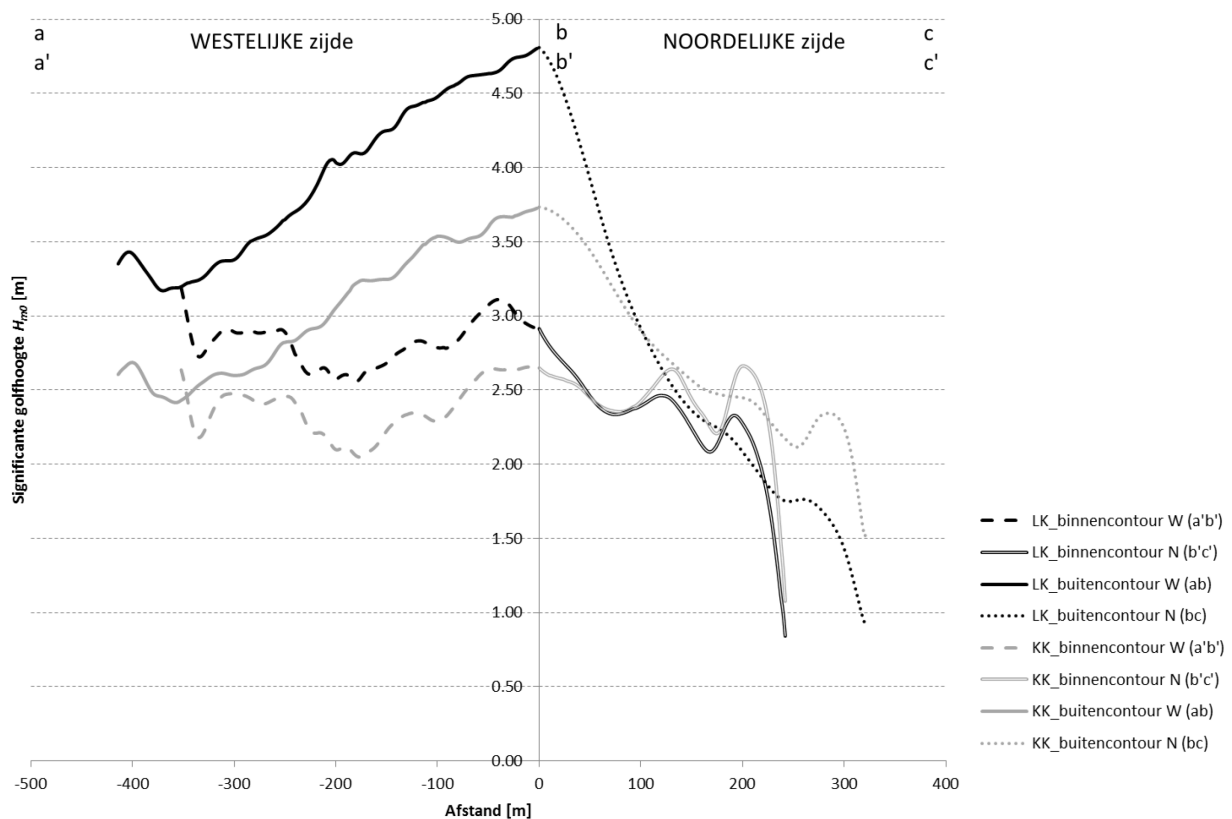
Tijdreeksanalyse van de waterspiegelverheffingen (opgemeten met de golfhoogtemeters, meetfrequentie: 20 Hz) bevestigt dat de piekgolfperiode T_p nagenoeg niet wijzigt ten opzichte van de opgelegde piekgolfperiode $T_p = 12$ s. Tabel 3, Tabel 4 en Tabel 5 vatten de belangrijkste golfparameters samen op verschillende locaties voor golfrichtingen NW, -37° en NNW respectievelijk, waarbij gebruik gemaakt is van de golfhoogtemeter in het middelpunt van de vijfhoek (zie verder; locatie golfhoogtemeters in Figuur 2, Figuur 3 en Figuur 4 resp.).

Figuur 5 - Significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NW (contouren gedefinieerd in Vanneste *et al.*, 2016)

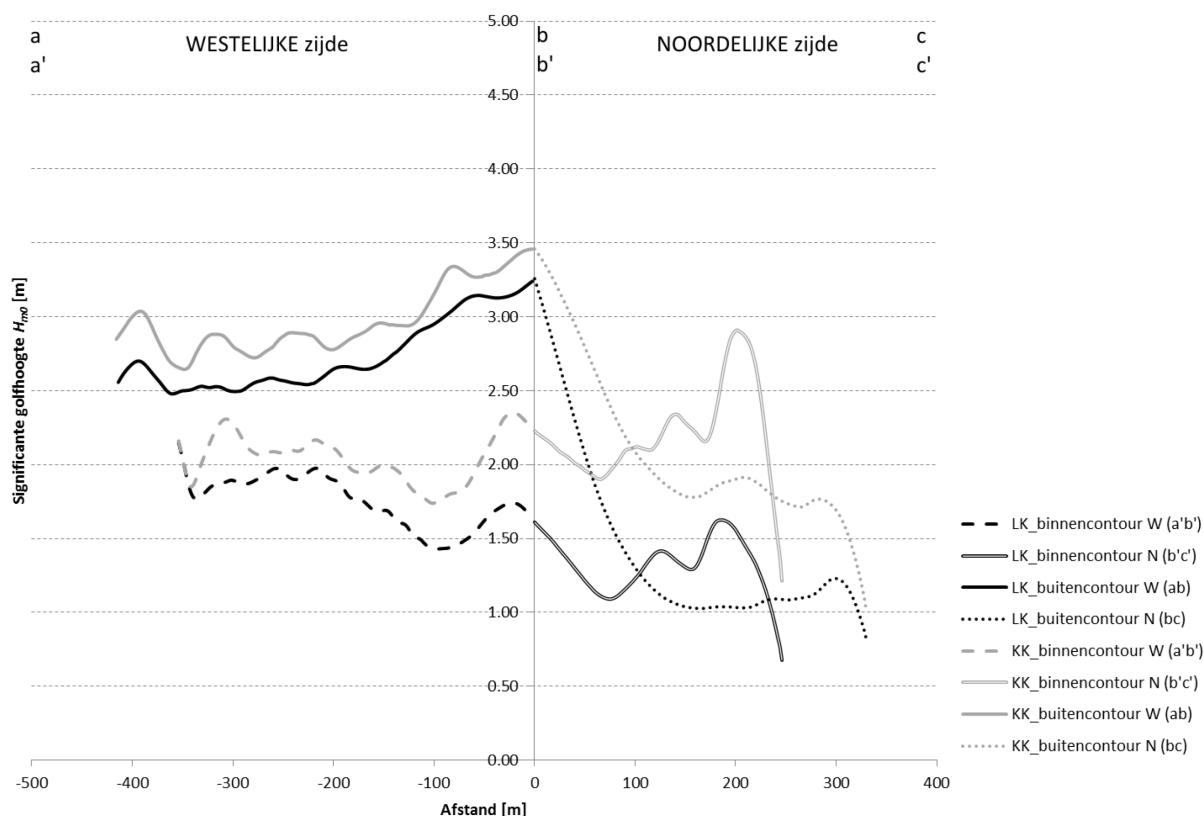


Tabel 3 - Golfhoogtemeters op verschillende locaties (golfrichting NW)

Golfhoogtemeter	Frequentiedomein						Tijdsdomein	
	H_{m0} [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_{m0,1}$ [s]	$T_{m0,2}$ [s]		# golven	H_s [m]
OFF	4.91	12.05	11.06	10.08	9.61		147	4.89
VG2	4.71	12.05	11.01	9.97	9.46		145	4.69
VG1	3.74	12.05	10.72	9.60	9.09		147	3.76
D1	2.71	11.38	10.82	9.41	8.90		157	2.66
D3	2.35	12.05	10.63	8.62	7.85		167	2.31
D5	2.33	12.80	10.30	8.33	7.60		164	2.32
D7	2.89	12.05	10.91	9.59	9.04		148	2.83
D8	3.33	12.05	10.80	9.66	9.14		150	3.27
N1	2.59	12.05	11.25	9.43	8.64		134	2.80
N2	2.41	12.05	10.70	8.58	7.82		144	2.54

Figuur 6 - Significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting -37° (contouren gedefinieerd in Figuur 13)

 Tabel 4 - Golfparameters op verschillende locaties (golfrichting -37°)

Golfhoogtemeter	Frequentiedomein					Tijdsdomein	
	H_{m0} [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_{m0,1}$ [s]	$T_{m0,2}$ [s]	# golven	H_s [m]
OFF	4.90	12.05	10.9	9.84	9.35	149	4.92
D1	2.83	11.38	10.67	9.42	8.92	149	2.80
D2	2.53	12.05	10.63	8.95	8.25	166	2.50
D3	2.71	12.05	9.78	7.62	6.79	169	2.80
D4	3.26	12.05	11.09	9.98	9.48	143	3.20
D5	2.78	12.05	11.24	10.01	9.50	143	2.72
N1	2.53	12.05	11.60	10.39	9.88	139	2.51
N2	2.36	12.05	11.65	9.76	8.99	137	2.41
N3	2.45	12.05	10.51	8.22	7.39	131	2.68

Figuur 7 - Significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NNW (contouren gedefinieerd in Figuur 14)


Tabel 5 - Golfhoogtemeters op verschillende locaties (golfrichting NNW)

Golfhoogtemeter	Frequentiedomein					Tijdsdomein	
	H_{m0} [m]	T_p [s]	$T_{m-1,0}$ [s]	$T_{m0,1}$ [s]	$T_{m0,2}$ [s]	# golven	H_s [m]
OFF	5.27	11.36	10.81	9.76	9.27	147	4.98
D1	3.02	12.05	11.37	10.21	9.69	145	2.86
D2	2.81	12.05	11.60	10.21	9.60	142	2.70
D3	2.83	12.05	10.85	8.80	7.80	155	2.86
D4	3.44	12.05	11.41	10.38	9.87	141	3.36
D5	2.94	12.05	11.55	10.40	9.82	141	2.87
N1	1.79	12.05	12.15	10.41	9.48	132	1.76
N2	2.00	12.05	12.09	10.34	9.43	139	1.96
N3	2.00	12.05	12.02	10.30	9.35	136	2.01

3.2 Totale significante golfhoogtes $H_{m0,tot}$ (MIKE21-BW + SWAN)

De combinatie van golfindringing en lokaal gegenereerde windgolven resulteert in een totale significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ die bekomen wordt door sommatie van de significante golfhoogtes, berekend met MIKE21-BW en SWAN respectievelijk:

$$H_{m0,tot} = \sqrt{H_{m0,GI}^2 + H_{m0,WG}^2} \quad (1)$$

waarbij: $H_{m0,tot}$ totale significante golfhoogte op een bepaalde locatie

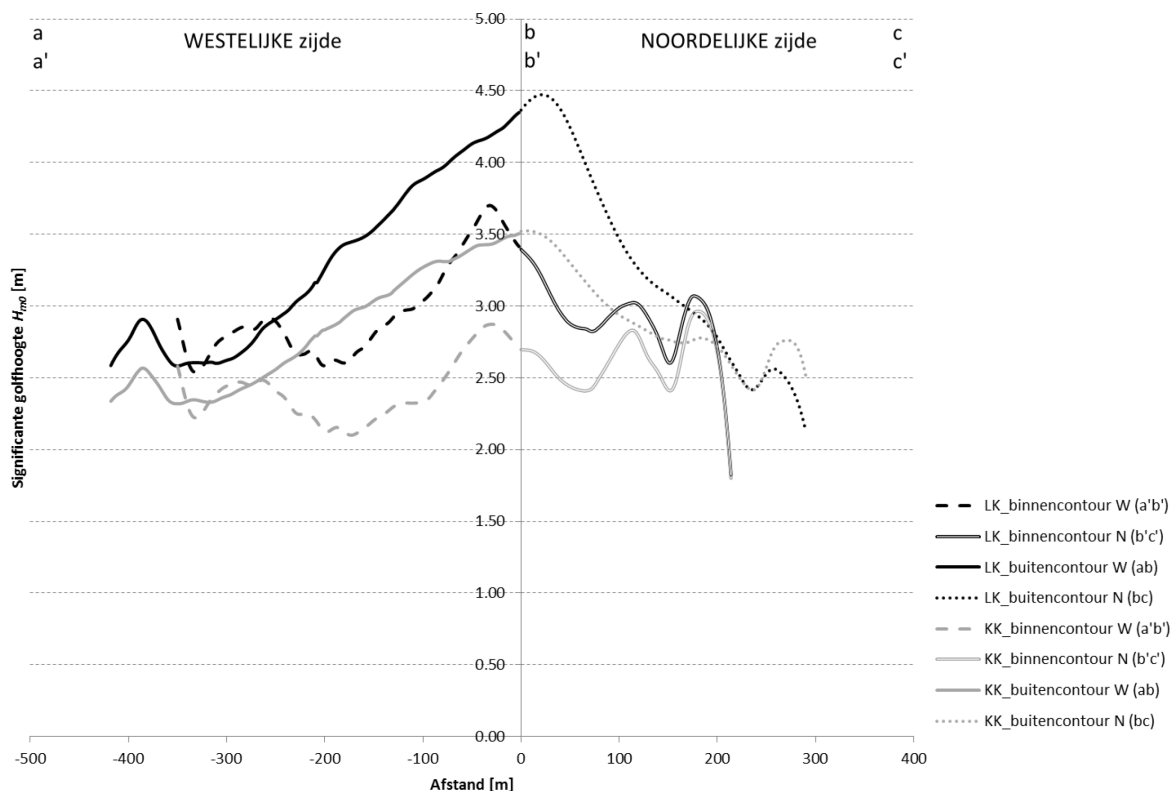
$H_{m0,GI}$ significante golfhoogte resulterend uit golfindringing (cf. Sectie 3.1.2)

$H_{m0,WG}$ significante golfhoogte veroorzaakt door lokale windgroei (zie bijlage 3 in Gruwez *et al.*, 2011)

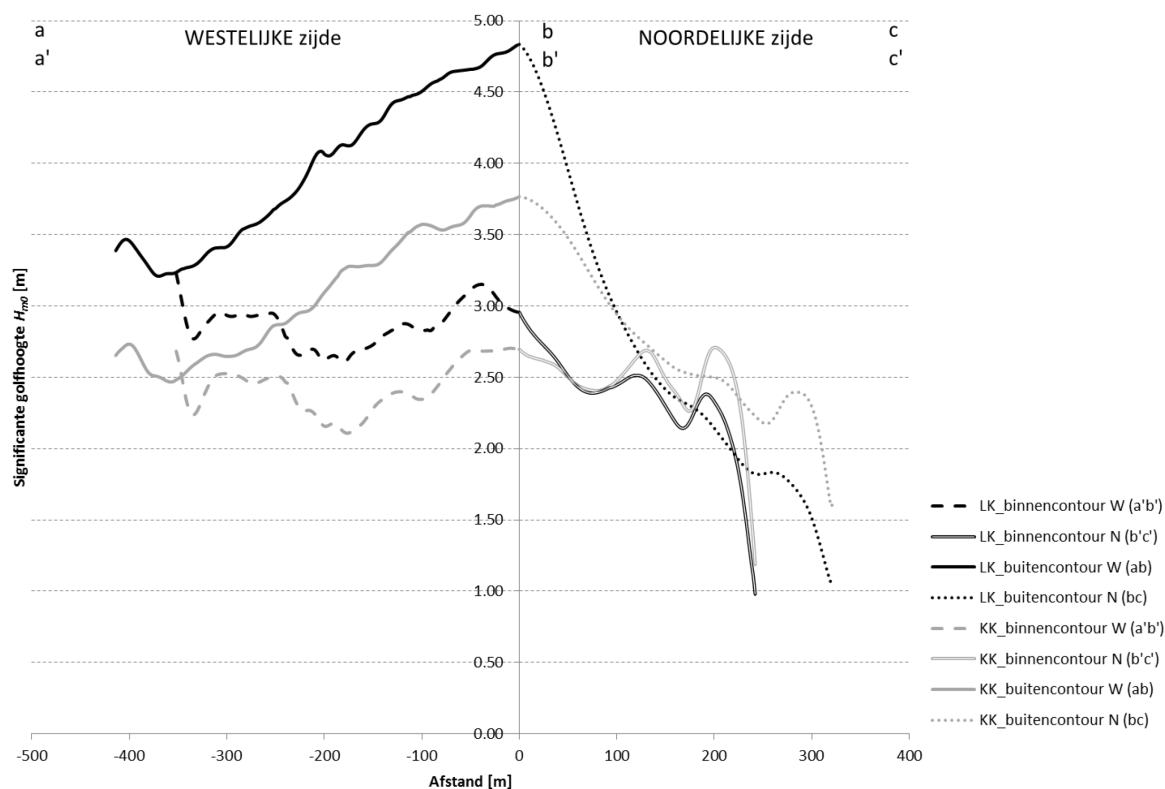
Figuur 8, Figuur 9 en Figuur 10 geven de totale significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ weer langs een binnen- en buitencontour ter hoogte van de Halve Maan na simulaties van een 1000-jarige storm met kort- en langkruinige golven en lokale windgroei komende uit de (hoofdgolf)richtingen NW, -37° en NNW respectievelijk. Deze figuren verschillen slechts met een constante ten opzichte van de voorgaande aangezien voor de significante golfhoogte $H_{m0,WG}$ een uniforme waarde van 0.5m genomen is (op basis van Figuren 6-28, 6-30 en 6-32 uit bijlage 3 van Gruwez *et al.*, 2011).

Bemerk dat dit voor de buitencontouren van NNW en -37° , waar $H_{m0,WG} = 0.4\text{m}$, een eerder conservatieve waarde is, die echter een verwaarloosbaar effect heeft op de resulterende totale significante golfhoogte $H_{m0,tot}$.

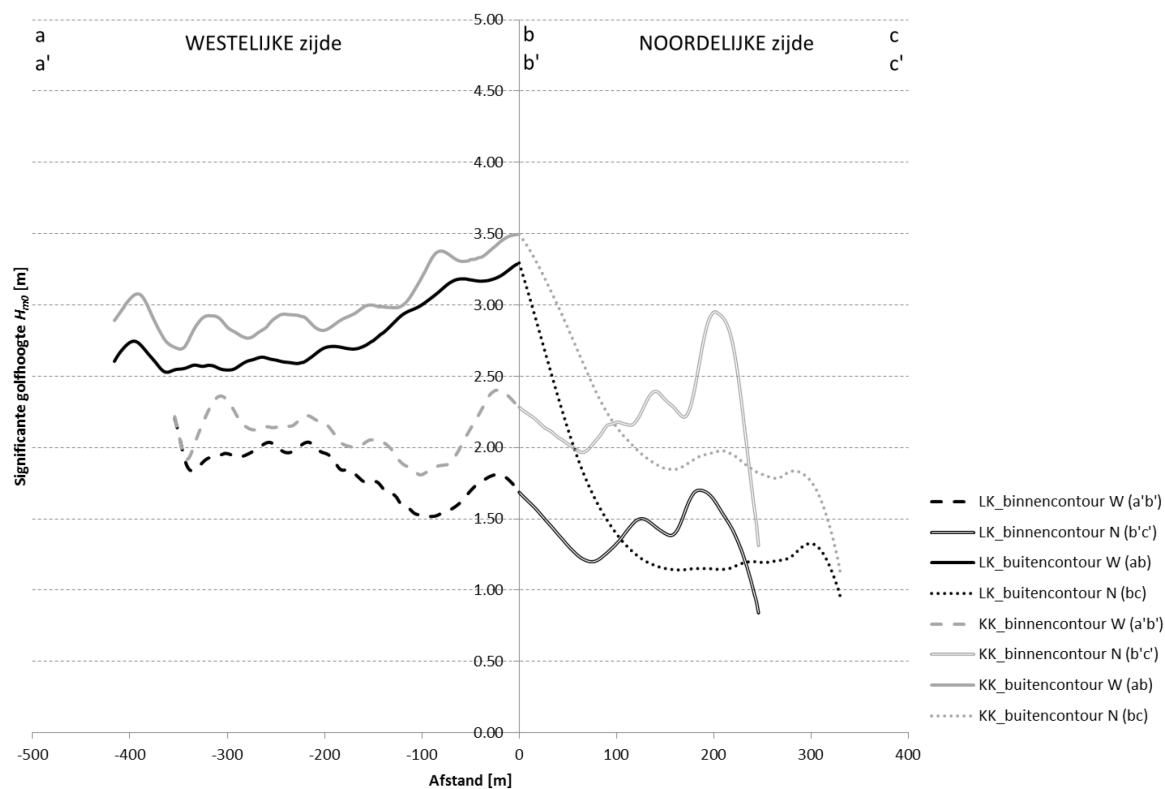
Figuur 8 - Significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NW (contouren gedefinieerd in Vanneste *et al.*, 2016)



Figuur 9 - Significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting -37° (contouren gedefinieerd in Figuur 13)



Figuur 10 - Significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ langs binnen- en buitencontour t.h.v. Halve Maan na 1000-jarige storm met kortkruinige golven uit richting NNW (contouren gedefinieerd in Figuur 14)



4 Reflectie-analyse

4.1 Reflectiecoëfficiënt talud Halve Maan in MIKE21-BW

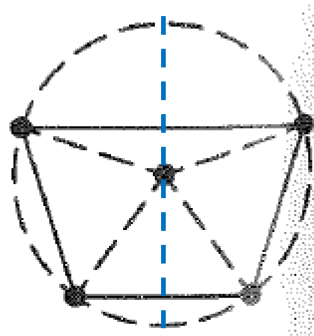
In MIKE21-BW is de partiële reflectie op structuren meegenomen in een uit 1 cel bestaande sponslaag, net voor de reflecterende structuur. Aan deze sponslaag wordt een waterstandafhankelijke reflectiecoëfficiënt toegekend gebruik makende van een gerelateerde absorptiecoëfficiënt. Echter, langs het talud van de Halve Maan werd geen absorptiecoëfficiënt gedefinieerd omdat getracht is om golfbreking, refractie en partiële reflectie zoveel mogelijk te integreren door het talud van de Halve Maan zo hoog mogelijk op te nemen in de bathymetrie (Gruwez *et al.*, 2011).

Dit leidt echter tot een onderschatting van de golfhoogtes langs de Halve Maan (zie bemerkingen in Sectie 3.1.1.)

4.2 Configuratie en positionering golfhoogtemeters

Voor de analyse van kortkruinige golven zijn golfhoogtemeters (meetfrequentie 20 Hz) op verschillende locaties in een pentagonale configuratie (CERC wave array, Panicker & Borgman, 1970) opgesteld (zie locaties in Figuur 2, Figuur 3 en Figuur 4, voor hoofdgolfrichtingen NW, -37° en NNW respectievelijk).

Figuur 11 - Pentagonale opstelling van de golfhoogtemeters (Panicker & Borgman, 1970) met aanduiding van de middellijn (blauwe stippellijn)



Hierbij is steeds de middellijn van de vijfhoek volgens de lokale hoofdgolfrichting georiënteerd. De straal r van de vijfhoek is afhankelijk van de golflengte L (berekend met de piekgolfteriode T_p) (Mansard & Funke, 1980):

$$\frac{r}{L} \cong 0.1 \quad (2)$$

Indeling van de vijfhoek in 2 halve cirkels (hoofdrichting $\pm 90^\circ$), die elk de invallende en reflecterende richtingen omvatten, resulteert in een bepaling van de invallende en gereflecteerde golfhoogte, $H_{m0,i}$ en $H_{m0,r}$ respectievelijk, op deze locatie. Voor deze analyse van de directionele golfspectra wordt voor de *Bayesian Directional spectrum estimation Method* (BDM) geopteerd, dewelke wordt toegepast in WaveLab (AAU, 2015). Hierbij wordt voorafgaand geen aanname gemaakt met betrekking tot de vorm van het directioneel spectrum. Bemerk dat deze methode aan betrouwbaarheid verliest dichtbij sterk reflecterende structuren. Er is daarom steeds minstens 1 golflengte L afstand tot de rand van de Halve Maan site gehouden.

De buitengaats geplaatste vijfhoek (op ongeveer 1 golflengte van de havendammen) dient ter controle van het opgelegde directionele golfspectrum. Verder zijn er 2 vijfhoeken geplaatst in de vaargeul, en een 8-tal langs zowel de westelijke als noordelijke zijde van de Halve Maan.

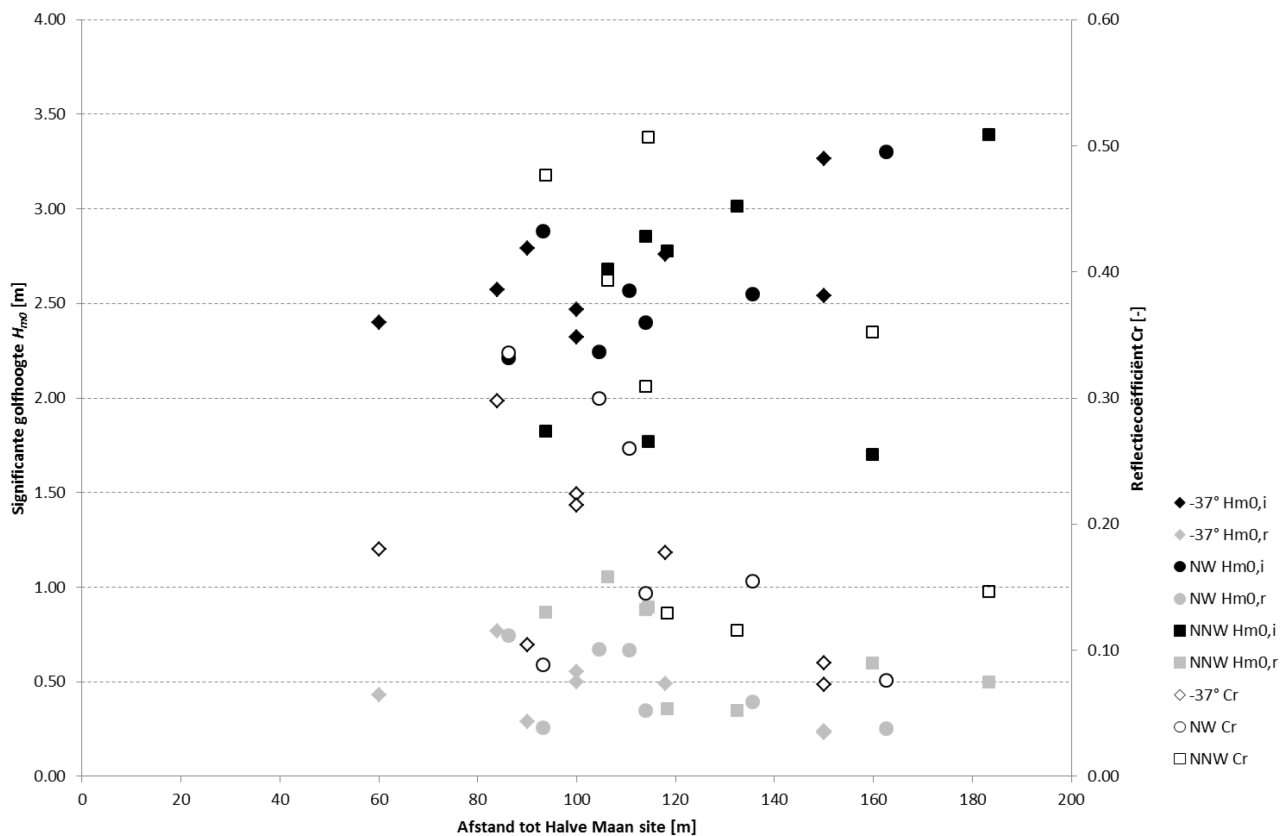
4.3 Invallende en gereflecteerde significante golfhoogtes

Figuur 11 vat de reflectie-analyse samen: de invallende en significante golfhoogte, $H_{m0,i}$ en $H_{m0,r}$ respectievelijk, worden weergegeven met dienovereenkomstige reflectiecoëfficiënt Cr. Tabel 6, Tabel 7 en Tabel 8 geven een overzicht voor golfrichtingen NW, -37° en NNW respectievelijk van enerzijds de significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ resulterend uit de simulatie, en anderzijds de invallende en gereflecteerde componenten van deze golfhoogte en de samengestelde significante golfhoogte $H_{m0,i+r}$ resulterende uit

$\sqrt{H_{m0,i}^2 + H_{m0,r}^2}$ (aangezien er geen transmissie is over het kruinniveau van de Halve Maan site). Ook de (loodrechte) afstand tot de reflecterende structuur en de reflectiecoëfficiënt Cr zijn getabelleerd.

Het dissipatieve effect van de sponslaag is duidelijk zichtbaar in het verschil in reflectiecoëfficiënten tussen bijv. golfhoogtemeter D5 (NNW) enerzijds, en golfhoogtemeters D5 en D7 (-37° en NW resp.) anderzijds. Hoewel D5 (NNW) iets verder van de kop van de Halve Maan gelegen is, bedraagt diens reflectiecoëfficiënt Cr nog 0.31 in tegenstelling tot 0.10 en 0.09 voor D5 (-37°) en D7 (NW) respectievelijk. Dit verschil in reflectie is het meest uitgesproken voor de golfhoogtemeters ter hoogte van de noordelijke zijde van de Halve Maan. Voor het meest inwaarts gelegen deel van de westelijke zijde van de Halve Maan zijn de reflectiecoëfficiënten (voor een gelijkaardige afstand) al meer overeenkomstig (bijv. NW $Cr_{D3} = 0.30$; -37° $Cr_{D2} = 0.22$; NNW $Cr_{D3} = 0.39$).

De invloed van de reflecterende structuur op het golfklimaat dempt uit met toenemende afstand tot de structuur. Uit de reflectie analyse voor golfrichting NNW (waarbij geen sponslagen toegevoegd zijn langs de Halve Maan) blijkt dat de totale golfhoogte $H_{m0,GI}$ op 100 m (loodrechte) afstand van de noordelijke zijde ongeveer 50% gereflecteerde golven bevat; langs de westelijke zijde bedraagt dit aandeel 40% (op eenzelfde (loodrechte) afstand).

Figuur 12 - Reflectie-analyse significante golfhoogtes $H_{m0,Gl}$ ter hoogte van de Halve Maan site

 Tabel 6 - Reflectie-analyse significante golfhoogte H_{m0} na simulatie van 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing (hoofdgolfrichting NW)

Golfhoogte meter	$H_{m0,Gl}$ [m]	afstand tot structuur [m]	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,i}$ [m]	$T_{p,i}$ [s]	$H_{m0,r}$ [m]	$T_{p,r}$ [s]	Cr [-]	(Eenzijdige) spreiding $H_{m0,i}$ [°]
OFF	4.913	-	4.95	4.92	11.38	0.55	12.80	0.11	21.5
VG2	4.709	-	4.68	4.67	12.05	0.31	12.05	0.07	18.0
VG1	3.74	-	3.80	3.76	12.05	0.58	12.05	0.15	15.5
D1	2.714	110.6	2.65	2.57	11.38	0.67	12.05	0.26	24.0
D3	2.352	104.6	2.34	2.25	12.05	0.67	12.05	0.30	26.0
D5	2.332	86.2	2.33	2.21	12.05	0.74	12.80	0.34	31.0
D7	2.891	93.2	2.89	2.88	12.05	0.25	5.25	0.09	15.5
D8	3.326	162.6	3.31	3.30	12.05	0.25	11.38	0.08	15.5
N1	2.59	135.5	2.58	2.55	12.05	0.39	12.05	0.15	21.0
N2	2.41	114.0	2.43	2.40	12.05	0.35	11.36	0.15	20.0

Tabel 7 - Reflectie-analyse significante golfhoogte H_{m0} na simulatie van 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing (hoofdgolfrichting -37°)

Golfhoogte meter	$H_{m0,Gl}$ [m]	afstand tot structuur [m]	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,i}$ [m]	$T_{p,i}$ [s]	$H_{m0,r}$ [m]	$T_{p,r}$ [s]	Cr [-]	(Eenzijdige) spreiding $H_{m0,i}$ [°]
OFF	4.9	-	4.92	4.87	12.05	0.68	12.05	0.14	22.5
D1	2.83	118	2.80	2.76	12.05	0.49	11.38	0.18	19.3
D2	2.53	100	2.53	2.47	12.05	0.55	12.80	0.22	22.0
D3	2.71	84	2.69	2.57	12.05	0.77	12.80	0.30	27.0
D4	3.26	150	3.27	3.26	12.05	0.24	4.99	0.07	16.0
D5	2.78	90	2.81	2.79	12.05	0.29	5.12	0.10	17.0
N1	2.53	150	2.55	2.54	12.05	0.23	12.05	0.09	17.0
N2	2.36	100	2.38	2.32	12.05	0.50	12.05	0.21	21.0
N3	2.45	60	2.44	2.40	12.05	0.43	11.38	0.18	19.0

 Tabel 8 - Reflectie-analyse significante golfhoogte H_{m0} na simulatie van 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing (hoofdgolfrichting NNW)

Golfhoogte meter	$H_{m0,Gl}$ [m]	afstand tot structuur [m]	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,i}$ [m]	$T_{p,i}$ [s]	$H_{m0,r}$ [m]	$T_{p,r}$ [s]	Cr [-]	(Eenzijdige) spreiding $H_{m0,i}$ [°]
OFF	5.23	-	5.19	5.14	11.36	0.77	11.36	0.15	21.4
D1	3.03	132	3.03	3.01	12.05	0.35	11.36	0.12	18.8
D2	2.80	118	2.80	2.78	12.05	0.36	10.78	0.13	18.5
D3	2.90	106	2.88	2.68	12.05	1.05	12.05	0.39	34.0
D4	3.50	183	3.43	3.39	12.05	0.50	12.05	0.15	24.4
D5	2.98	114	2.99	2.86	12.05	0.88	12.05	0.31	35.9
N1	1.76	160	1.80	1.70	12.05	0.60	11.36	0.35	26.0
N2	1.84	94	2.02	1.83	12.05	0.87	12.05	0.48	44.7
N3	2.00	115	1.98	1.77	12.05	0.90	12.05	0.51	37.8

5 Besluit

Volgend op Gruwez *et al.*, 2011 en Vanneste *et al.*, 2016 zijn in dit advies 3 bijkomende simulaties uitgevoerd met MIKE21-BW voor een 1000-jarige storm met kortkruinige golfindringing. Hierbij lag de focus op het resulterende golfklimaat ter hoogte van de Halve Maan site.

In het algemeen zorgt het toevoegen van directionele spreiding in het golfspectrum ervoor dat de golfenergie meer verspreid wordt in de haven. Zeker in de schaduwzones achter de havendammen komt hierdoor meer golfenergie toe.

In vergelijking tot simulaties met langkruinige golven resulteren kortkruinige golven enkel in een toename van de golfhoogte voor golfrichting NNW, maar deze zijn niet maatgevend in vergelijking met golfrichtingen NW en -37°.

Voor de westelijke zijde van de Halve Maan resulteren de hoogste, kortkruinige golven uit hoofdgolfrichting -37°; voor de noordelijke zijde uit hoofdgolfrichting NW. Belangrijk hierbij op te merken is dat:

- (i) de aftopping van het 1/3 talud van de Halve Maan zodat een minimale waterdiepte van 4 m behouden blijft, leidt tot een onderschatting van de lokale golfhoogtes.
- (ii) het toevoegen van meerdere sponslagen aan de noordelijke en deels de westelijke zijde van de Halve Maan (voor de golfrichtingen NW en -37°) zorgt voor een irreëel hoge dissipatie van de golfenergie en dientengevolge een onderschatting van de lokale golfhoogtes.

Uit deze simulaties resulteert het lokale golfklimaat bestaande uit invallende en gereflecteerde golven. Voor het ontwerp van een structuur, hier het nieuwe talud ter hoogte van de Halve Maan, dienen echter invallende golfhoogtes gebruikt te worden.

Uit de reflectie-analyse voor golfrichting NNW (waarbij geen sponslagen toegevoegd zijn langs de Halve Maan) blijkt dat de totale golfhoogte op 100 m (loodrechte) afstand van de noordelijke zijde ongeveer 50% gereflecteerde golven bevat; langs de westelijke zijde bedraagt dit aandeel 40% (op eenzelfde (loodrechte) afstand).

6 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.; 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

IMDC. (2005). Hydraulisch randvoorwaardenboek Vlaamse Kust

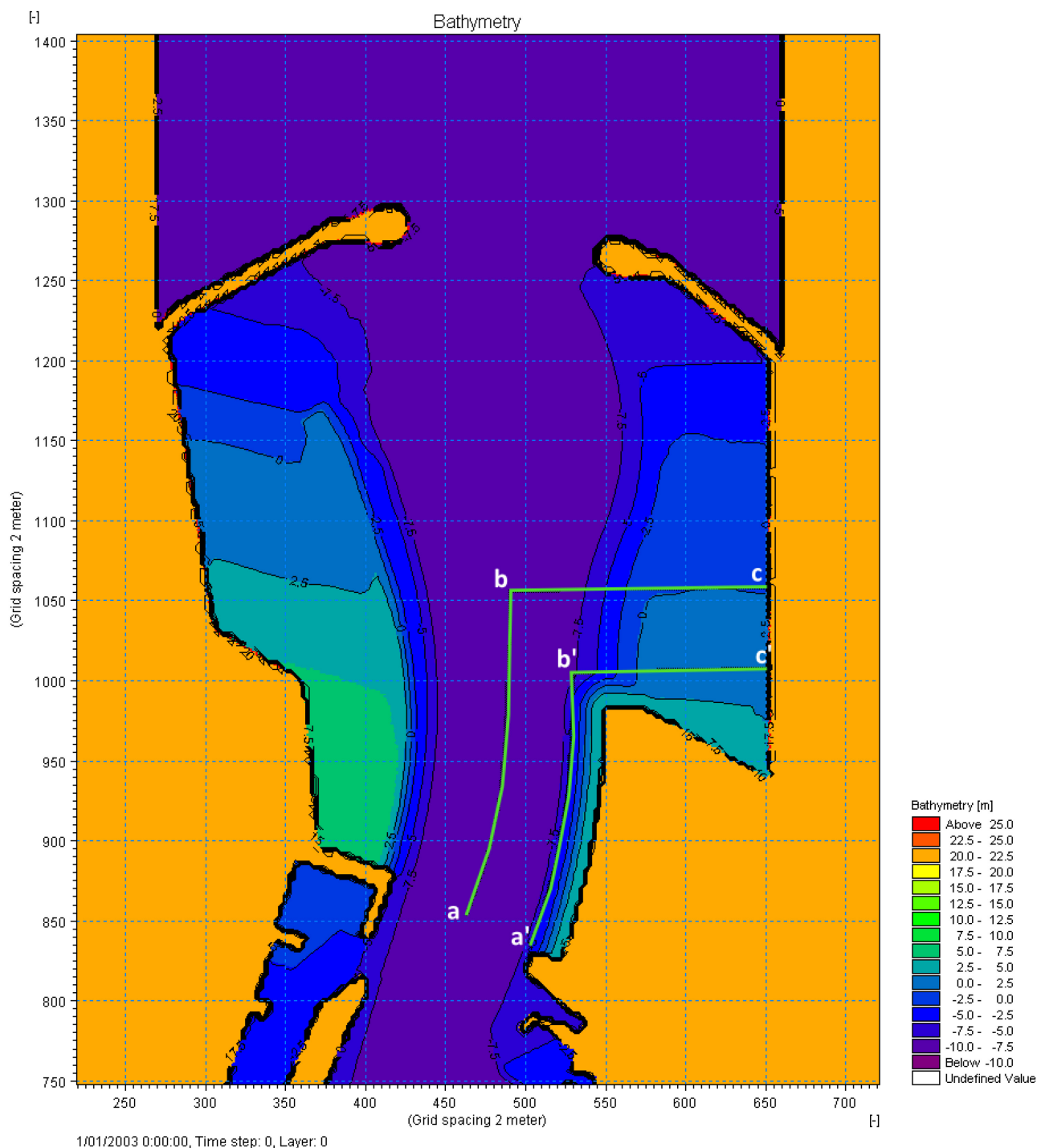
Panicker, N.N.; Borgman, L.E. (1970). Directional Spectra From Wave-Gage Arrays. *Coast. Eng. Proc. 1*: 117–136. Available at: <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/2612>

Vanneste, D.; De Roo, S.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2016). Golfrandvoorwaarden Halve Maan, haven Oostende Versie 4.0. *WL Adviezen*, 16_051_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Versie 4.0.

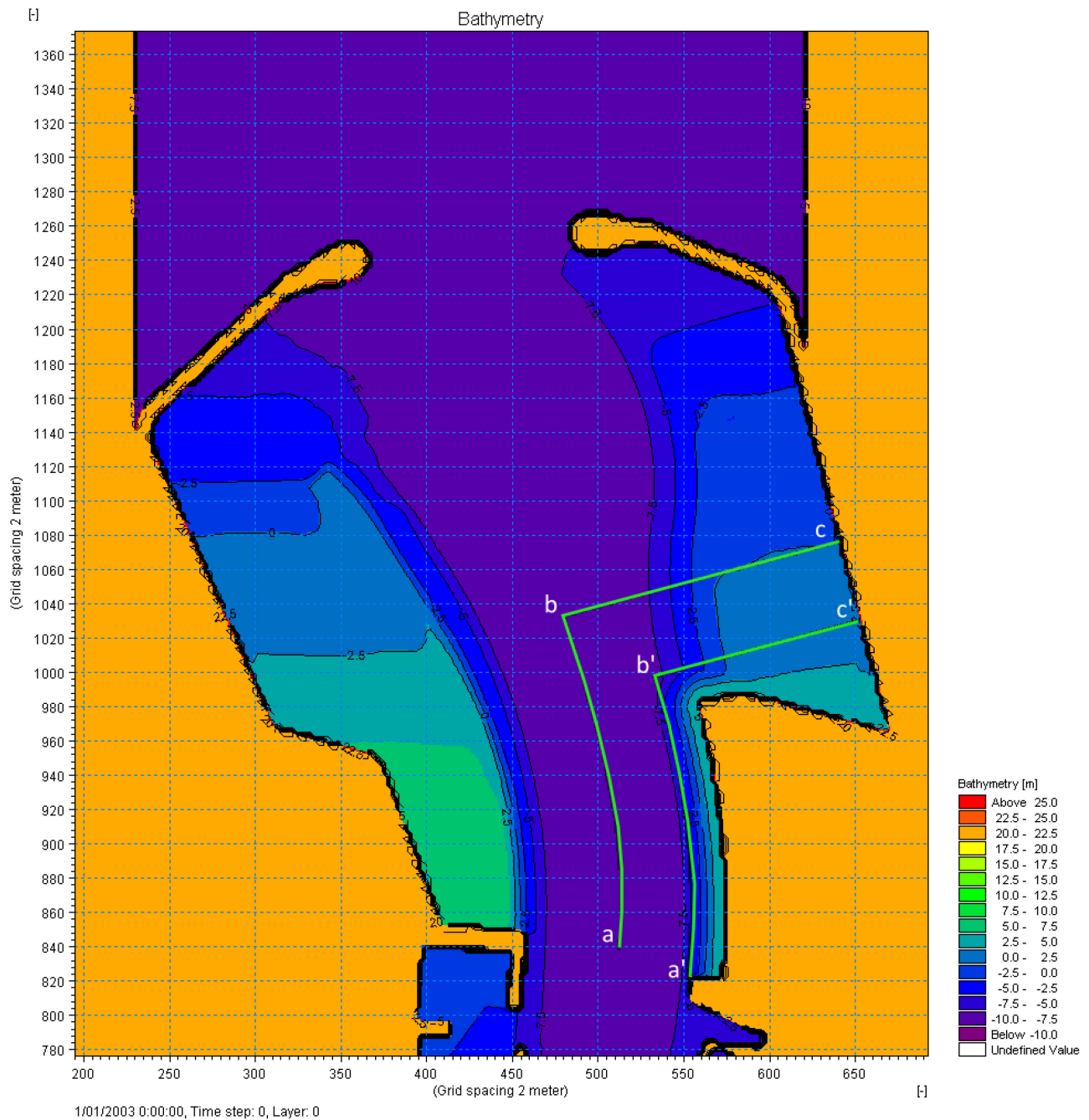
AAU (Aalborg University) (2015). WaveLab 3.66. Software voor golfanalyses.

Bijlage A: Bathymetrie: Aanduiding snedes ter hoogte van de Halve Maan site

Figuur 13 - Bathymetrie [m TAW]: richting -37° (volgens de as van de vaargeul) – aanduiding buiten- en binnencontour langs Halve Maan waar significante golfhoogtes H_{m0} geëxtraheerd zijn



Figuur 14 - Bathymetrie [m TAW]: richting NNW – aanduiding buiten- en binnencontour langs Halve Maan waar significante golfhoogtes H_{m0} geëxtraheerd zijn



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