



Vlaanderen
is wetenschap

18_066_2
WL rapporten

Oostende schaalmodel golfovertopping bij zeer schuine golven

Deelrapport 2 – Rechte kaaimuur

DEPARTEMENT
**MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN**

waterbouwkundiglaboratorium.be

Oostende schaalmodel golfovertopping bij zeer schuine golven

Deelrapport 2 – Rechte kaaimuur

Willems, M.; Suzuki, T.; 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 2020
D/2020/3241/304

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Willems, M.; Suzuki, T.; Mostaert, F. (2020). Oostende schaalmodel golfovertopping bij zeer schuine golven: Deelrapport 2 – Rechte kaaimuur. Versie 2.0. WL Rapporten, 18_066_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Kust	Ref.:	WL2020R18_066_2
Keywords (3-5):	Fysisch model, golfovertopping, haven Oostende		
Tekst (p.):	64	Bijlagen (p.):	37
Vertrouwelijk:	☒ Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2022
		Uitzondering:	☒ Vlaamse overheid

Auteur(s):	Willems, M.
------------	-------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Suzuki, T.	Getekend door: Tomohiro Suzuki (Signatu Getekend op: 2020-12-18 10:11:17 +00:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Tomohiro Suzuki</i>
Projectleider:	Willems, M.	Getekend door: Marc Willems (Signature) Getekend op: 2020-12-18 09:49:05 +00:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Marc Willems</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-12-18 11:36:53 +00:0 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	--



Abstract

Afdeling Kust voert een actualisatie uit van de maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) voor de overstromingsmaatregelen in de zone Montgomerydok en de zone Station in de haven van Oostende. In dit kader is het van belang om een goede inschatting te maken van de maatregelen die nodig zijn om overstromingen te voorkomen bij een 1000-jarige storm rekening houdend met een zeespiegelstijging over 100 jaar. Afdeling Kust doet een beroep op het Waterbouwkundig Laboratorium om de maatregelen te dimensioneren.

Als overstromingsmaatregelen wordt gedacht aan stormmuren op de kaaivlakken en een gehele of gedeeltelijke afsluiting van de ingang van het Montgomerydok. In een eerste rapport (Willems et al., 2019) werd de zone Montgomerydok in detail bestudeerd. In dit rapport worden de zones RNSYC, Churchillkaai en station onderzocht.

Al deze zones bestaan als het ware uit een rechte kaaimuur en hebben een golfrichting quasi parallel aan de kaai. Vermits dit een specifieke situatie is waarvoor geen algemeen geldende formules bestaan, wordt de golfovertopping over een rechte kaaimuur bij zeer schuine golven gemodelleerd in een schaalmodel. Vervolgens worden de resultaten toegepast op de te bestuderen zones van de haven van Oostende. Op basis van de metingen op het driedimensionaal schaalmodel in de golftank wordt het minimale kruinpeil van de stormmuren bepaald om te voldoen aan het veiligheids criterium zoals vastgelegd in het Masterplan Kustveiligheid (overtoppingsdebiet $< 1 \text{ l/s/m}$).

Uit de schaalmodelproeven kan afgeleid worden dat golfovertopping over de rechte kaaimuren van de zones RNSYC, Churchillkaai en station kan beperkt worden door stormmuren te plaatsen met kruinpeilen die variëren tussen +9.40 m TAW (RNSYC) en +8.50 m TAW (station). Indien de stormmuren op 15 m van de rand geplaatst worden, kan het kruinpeil maximaal 30 cm lager genomen worden.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
2 Schaalmodel	2
2.1 Multidirectionele golftank.....	2
2.2 Verschaling	3
2.3 Lay-out.....	4
2.4 Instrumentatie / metingen	8
2.4.1 Waterstandsmeting.....	8
2.4.2 Golvenmeters	8
2.4.3 Overtopping.....	9
3 Hydrodynamische randvoorwaarden.....	11
3.1 Waterstanden.....	11
3.2 Golfrandvoorwaarden	11
3.2.1 Golfindringing zone RNSYC-Churchillkaai	12
3.2.2 Golfindringing in zone station-Demeysluis.....	16
3.2.3 Windgolven.....	18
3.2.4 Samenvatting golfrandvoorwaarden.....	19
3.3 Vergelijking met randvoorwaarden IMDC (2012)	21
4 Kalibratie schaalmodel	27
4.1 Kalibratie golfhoogte	27
4.2 Validatie reproduceerbaarheid golfhoogte.....	31
4.3 Validatie reproduceerbaarheid overtopping.....	32
5 Metingen overtoppingsdebiet.....	34
5.1 Proeven met waterstand +7.87 m TAW	36
5.2 Proeven met waterstand +7.29 m TAW	41
5.3 Proeven met waterstand +6.88 m TAW	46
6 Bespreking overtoppingsdebieten	50
6.1 Resultaten overtoppingsproeven	50
6.2 Overtopping bij kaaivlakverhoging.....	56

7	Conclusies voor Oostende	58
7.1	1000-jarige storm met 100 jaar zeespiegelstijging.....	58
7.2	1000-jarige storm met 50 jaar zeespiegelstijging.....	61
8	Referenties	64
Bijlage 1	Foto fysisch model.....	B1
Bijlage 2	Memo: berekening waterstanden.....	B2
Bijlage 3	Memo: golfrandvoorwaarden fysisch model	B5

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Schaalfactoren bij een Froude verschaling met lengteschaal 48.....	3
Tabel 2 – Buitengaatsse condities voor een 1000-jarige storm.....	12
Tabel 3 – Randvoorwaarden wind voor een 1000-jarige storm.....	12
Tabel 4 – Golfhoogte H_{m0} in de zone RNSYC-Churchillkaai in beide modellen (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).	15
Tabel 5 – Golfhoogte H_{m0} in de zone RNSYC-Churchillkaai (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).....	16
Tabel 6 – Golfhoogte H_{m0} in de zone station-Demeysluis (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).....	18
Tabel 7 – Totale golfhoogte H_{m0} in de haven (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).....	20
Tabel 8 – Vergelijking randvoorwaarden voor de stormen in de 2 studies.	21
Tabel 9 – Golfhoogte in de zone RNSYC-Churchillkaai bij de studie voor overstromingsmaatregelen in 2012 (IMDC, 2012, §3.2.1).....	23
Tabel 10 – Golfhoogte in de zone station-Demeysluis bij de studie voor overstromingsmaatregelen in 2012 (IMDC, 2012, §3.3-§3.4.2).	24
Tabel 11 – Vergelijking golfhoogte H_{m0} in de haven in de 2 studies (1000-jarige storm met zeespiegelstijging).	25
Tabel 12 – Overzicht van alle figuren met gemeten golfhoogte en overtopping.	35
Tabel 13 – Overzicht legende in alle figuren met gemeten golfhoogte en overtopping.	35
Tabel 14 – Gemeten overtoppingsdebieten voor alle proeven (zone 3).	54
Tabel 15 – Gemeten golfhoogte voor alle proeven (zone 3).....	55
Tabel 16 – Overtoppingsdebieten voor kaaimuren met kaaivlakverhoging bij waterstand +7.87 m TAW.	57
Tabel 17 Waterstand in het numeriek model	B6
Tabel 18 MIKE21 BW: Hydraulische randvoorwaarden op diep water.....	B6
Tabel 19 SWAN: Randvoorwaarden	B7
Tabel 20 – Directionele analyse rond GHM 0 en GHM 1.....	B22
Tabel 21 – Directioneel golfenergiespectrum	B23
Tabel 22– Golfspectra op verschillende locaties in het studiegebied: na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging	B26
Tabel 23 – Golfspectra op verschillende locaties in het studiegebied: na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging + 50 jaar.....	B28
Tabel 24 – Golfspectra op verschillende locaties in het studiegebied: na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging + 100 jaar	B29
Tabel 25 – Significante golfhoogtes $H_{m0,GI}$, $H_{m0,WG}$ en $H_{m0,tot}$ op specifieke locaties voor alle scenario's	B34

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Multidirectionele golftank van het WL.....	2
Figuur 2 – 3D beeld van het schaalmodel in de golftank	5
Figuur 3 – Plattegrond en snede van het schaalmodel in de golftank, en posities golvenmeters.....	6
Figuur 4 – Foto's van het schaalmodel in de golftank.....	7
Figuur 5 – Huidige baggerstreefdieptes in de haven van Oostende.	8
Figuur 6 – Stormmuur op het kaaivlak en overtoppingsbakken achter de kaaimuur.....	10
Figuur 7 – Locatie golvenmeters in het fysisch model van het Montgomerydok.	13
Figuur 8 - Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar (waterstand +7.87 m TAW). Zoom op zone RNSYC-Churchillkaai.....	14
Figuur 9 - Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar (waterstand +7.87 m TAW). Zoom op zone station-Demeysluis.	17
Figuur 10 Significante golfhoogte $H_{m0,w}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u_w , waterstand incl zeespiegelstijging + 100jaar (+7.87 m TAW).....	19
Figuur 11 – RNSYC & Churchillkaai: onderverdeling zones en aanduiding stormmuur (IMDC, 2012, figuur 3-11).	23
Figuur 12 – Zone station: onderverdeling zone en aanduiding stormmuur (IMDC, 2012, figuur 3-20).....	24
Figuur 13 Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed (verschillende waterstanden).	26
Figuur 14 – Gekalibreerde golfhoogte in zone 3 voor waterstand +7.29 m TAW.....	28
Figuur 15 – Gekalibreerde golfhoogte in zone 3 voor waterstand +7.87 m TAW.....	29
Figuur 16 – Invloed positie golvenmeters op gemeten golfhoogte voor de kaaimuur.....	30
Figuur 17 – Invloed positie stormmuur op gemeten golfhoogte voor de kaaimuur.....	31
Figuur 18 – Reproduceerbaarheid golfhoogte.	32
Figuur 19 – Reproduceerbaarheid overtoppingsdebiet.	33
Figuur 20 – Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 2.80$ m.....	36
Figuur 21 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 2.45$ m.....	37
Figuur 22 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 2.10$ m.....	38
Figuur 23 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 1.75$ m.....	39
Figuur 24 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 1.40$ m.....	40
Figuur 25 – Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 2.80$ m.....	41

Figuur 26 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 2.45$ m.....	42
Figuur 27 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 2.10$ m.....	43
Figuur 28 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 1.75$ m.....	44
Figuur 29 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 1.40$ m.....	45
Figuur 30 – Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 2.80$ m.....	46
Figuur 31 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 2.45$ m.....	47
Figuur 32 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 2.10$ m.....	48
Figuur 33 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 1.75$ m.....	49
Figuur 34 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor alle proeven met waterstand +7.87 m TAW (zone 3).	51
Figuur 35 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor alle proeven met waterstand +7.29 m TAW (zone 3).	52
Figuur 36 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor alle proeven met waterstand +6.88 m TAW (zone 3).	53
Figuur 37 – Ontwerpgolfhoogtes voor de zones RNSYC, stormvloedkering & Churchillkaai (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).....	58
Figuur 38 – Kruinpeil van stormmuren voor de zones RNSYC, stormvloedkering & Churchillkaai (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).	59
Figuur 39 – Ontwerpgolfhoogtes voor de zone station (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).....	60
Figuur 40 – Kruinpeil van stormmuren voor de zone station (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).....	61
Figuur 41 – Kruinpeil van stormmuren voor de zones RNSYC, stormvloedkering & Churchillkaai (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +50 jaar, waterstand +7.29 m TAW).	62
Figuur 42 – Kruinpeil van stormmuren voor de zone station (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +50 jaar, waterstand +7.29 m TAW).....	63
Figuur 43 – Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017): snede DW2: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie.....	B8
Figuur 44 Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017): snede DW5: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie	B8
Figuur 45 – Havengeometrie en -bathymetrie (in m TAW), georiënteerd volgens richting -37°.....	B9
Figuur 46 – Locatie golfhoogtemeters op de bathymetrie [m TAW]	B11
Figuur 47 – Pentagonale opstelling van de golfhoogtemeters	B11

Figuur 48 – Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging	B13
Figuur 49 – Zoom op Montgomerydok en Churchillkaai: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging.....	B14
Figuur 50 – Zoom op vaargeul ter hoogte van de Halve Maan: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging.....	B15
Figuur 51 – Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +50 jaar	B16
Figuur 52 – Zoom op Montgomerydok en Churchillkaai: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +50 jaar	B17
Figuur 53 – Zoom op vaargeul ter hoogte van de Halve Maan: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +50 jaar	B18
Figuur 54 – Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +100 jaar	B19
Figuur 55 – Zoom op Montgomerydok en Churchillkaai: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +100 jaar	B20
Figuur 56 – Zoom op vaargeul ter hoogte van de Halve Maan: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +100 jaar	B21
Figuur 57 – Locatie dwarstransect in de vaargeul ter hoogte van de kop van de Halve Maan	B24
Figuur 58 – Verloop van de significante golfhoogte over een dwarstransect in de vaargeul ter hoogte van de Halve Maan.....	B25
Figuur 59 – Significante golfhoogtes $H_{m0,WG}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u , waterstand h zonder zeespiegelstijging.....	B31
Figuur 60 – Significante golfhoogtes $H_{m0,WG}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u , waterstand h met zeespiegelstijging + 50jaar	B32
Figuur 61 – Significante golfhoogtes $H_{m0,WG}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u , waterstand h met zeespiegelstijging + 100jaar	B33
Figuur 62 – Locatie golfhoogtemeters op de bathymetrie [m TAW]: zoom Montgomerydok en Churchillkaai	B36

1 Inleiding

Dit rapport is het 2de rapport van project 18_066 met overtopingsproeven voor de haven van Oostende. Deze overtopingsproeven hebben als doel resultaten aan te leveren die gebruikt kunnen worden bij de actualisatie van de maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) Oostende – zone Montgomerydok en zone station (bestek nr. 16EH/17/39 van afdeling Kust).

In de MKBA worden 2 zones beschouwd: zone Montgomerydok en zone station. Overtoppingsproeven ten behoeve van zone Montgomerydok werden uitgevoerd in een eerste schaalmodel en gerapporteerd in WL2019R18_066_1 (Willems et al., 2019). In een **tweede schaalmodel (voorliggend rapport)** wordt de golfovertopping over een rechte kaaimuur bij zeer schuine golven gemodelleerd¹. De resultaten van deze geschematiseerde opstelling kunnen gebruikt worden voor alle rechte kaaien in de zone station alsook voor de rechte kaaidelen in het basisalternatief *Gesloten Montgomerydok* (zone RNSYC, stormvloedkering ingang Montgomerydok en Churchillkaai).

Golfovertopping bij loodrechte golfaanval valt buiten de scope van dit schaalmodel. Bij de actualisatie van de MKBA (bijv. zone Demeysluis) dient hiervoor beroep gedaan op bestaande formules.

In dit schaalmodel kan enkel golfovertopping opgemeten worden en geen golfkrachten op de stormmuur. Om golfkrachten correct te modelleren, is een groter schaalmodel (kleinere schaalfactor) noodzakelijk. Bovendien bemoeilijkt de extreem hoge waterstand (water OP het kaaivlak, tot tegen de stormmuur) dergelijke meetopstelling. Omdat bij de actualisatie van de MKBA ook golfkrachten op de stormmuur moeten begroot worden om zicht te krijgen op de grootte van de nodige fundering, zullen de krachten benaderend berekend worden in een apart rapport.

Alle afmetingen en resultaten in dit rapport zijn uitgedrukt in werkelijke eenheden tenzij anders vermeld. Eenheden op modelschaal krijgen de notatie “_model”.

¹ Een uitgebreide beschrijving van de te onderzoeken configuraties in de haven van Oostende en de opzet van de 2 schaalmodellen is te vinden in WL2019R18_066_1 §1 (Willems et al., 2019).

2 Schaalmodel

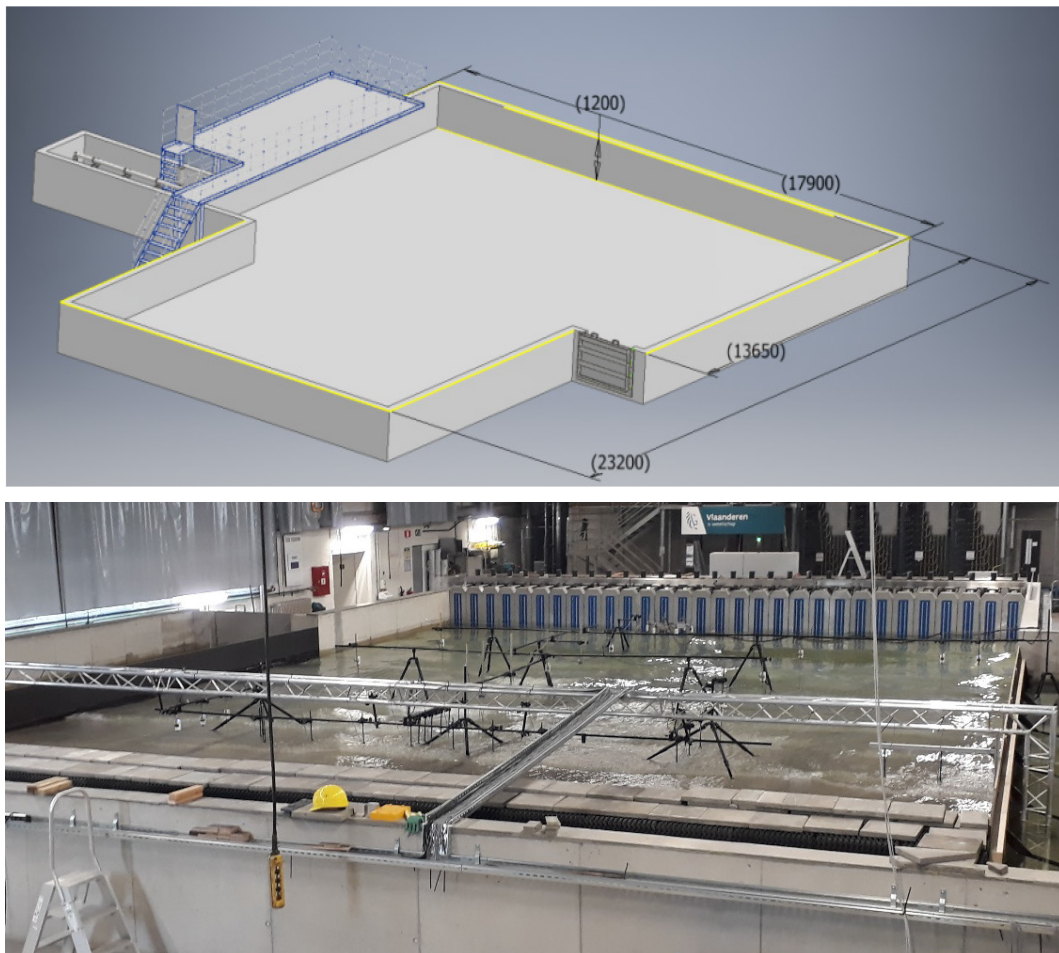
2.1 Multidirectionele golftank

Het schaalmodel wordt gebouwd in de multidirectionele golftank van het Waterbouwkundig Laboratorium (Figuur 1). De golftank is 23.2 m lang en 17.9 m breed. De grootte van de modelzone is afhankelijk van de gewenste golfcondities. De modelzone kan, indien nodig, uitgebreid worden door gebruik te maken van zijmuurreflectie (methode van Dalrymple).

Het 12 m brede golfschot is een piston-type golfgenerator bestaande uit 30 elementen. Zowel regelmatige (sinusoïdale) als onregelmatige (spectrale) golven kunnen gegenereerd worden, evenals langkruinige, kortkruinige en schuine golven.

Het golfschot is bovendien uitgerust met tweede-orde-golfgeneratie en actieve golfabsorptie om te voorkomen dat golven reflecteren aan het golfschot.

Figuur 1 – Multidirectionele golftank van het WL.



2.2 Verschaling

Voor het verscalen van waterbouwkundige constructies onder golfbelasting wordt over het algemeen de zogenaamde Froude verschaling toegepast. Deze verschaling geldt voor processen waarin traagheid en zwaartekracht een dominante rol spelen. Dit is tevens het geval in dit schaalmodel. De verschaling schrijft voor dat het Froude getal hetzelfde is in het model en in de werkelijkheid. Het Froude getal wordt als volgt berekend:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gL}}$$

met

Fr = Froude getal [-]

u = snelheid [m/s]

g = zwaartekrachtsversnelling [m/s²]

L = lengte [m]

De grootst mogelijke schaalfactor wordt nagestreefd om schaaffecten en meetfouten te minimaliseren. Een schaalfactor grootte-orde 50 lijkt aangewezen. Vermits de overtoppingsbakken van het schaalmodel van het Montgomerydok worden hergebruikt (Willems et al., 2019), wordt als lengteschaal $n_L = L_{\text{prototype}}/L_{\text{model}}$ 48 gekozen. Bij een Froude verschaling gelden dan de schaalwetten en schaalfactoren zoals weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1 – Schaalfactoren bij een Froude verschaling met lengteschaal 48.

	schaalwet	schaalfactor
lengteschaal	n_L	48
tijdschaal	$n_t = \sqrt{n_L}$	$\sqrt{48} = 6.93$
volumeschaal	$n_V = n_L^3$	$48^3 = 110592$
debietschaal	$n_Q = n_L^{5/2}$	$48^{5/2} = 15963$
krachtenschaal	$n_F = n_L^3$	$48^3 = 110592$

Aangezien de lengteschaal voor dit model 48 is, is de krachtenschaal zeer groot waardoor het moeilijk wordt om krachten (relatief klein in het model) nauwkeurig op te meten. Bovendien volgt uit de peilen van de kaaivlakken (zie §2.3) en de waterstanden (zie §3.1) dat het water permanent tegen de stormmuren staat, wat een waterdichte meetopstelling sterk bemoeilijkt. En door de vele configuraties is het (te) complex en tijdrovend, waardoor besloten wordt om op dit schaalmodel geen golfkrachten op de stormmuren op te meten.

2.3 Lay-out

Een rechte kaaimuur met een lengte van 590 m (= 12.3 m_{model}) wordt ingebouwd in de langsrichting van de golftank, loodrecht op het golfschot (Figuur 2 - Figuur 4).

Voor de havengeul en de voet van de kaaimuur wordt bodempeil -8.90 m TAW aangenomen. Dit is de toekomstige baggerstreefdiepte volgens het ontwerp van de verbrede Halve Maandijk, en 0.4 m dieper dan de huidige baggerstreefdiepte (zones A1 en A2N in Figuur 5 (Vlaams ministerie van mobiliteit en openbare werken, 2011)). De betonnen bodem van de golftank is dus -8.90 m TAW (ook ter plaatse van het golfschot). Er wordt verder geen bodemprofiel ingebouwd, dus ook geen lokaal hogere bodem aan de voet van de kaaimuur.

Het kaaipeil wordt gekozen op basis van de gps opmeting uitgevoerd op 23/09/2010 (autocad plan met 4 profielen gelegen in de zone RNSYC-Demeysluis²). Het kaaipeil wordt vastgelegd op +6.87 m TAW. Hiermee wordt de kaaimuur 15.77 m hoog (= 0.329 m_{model}).

Op de kaaimuur wordt een stormmuur geplaatst:

- het kruinpeil varieert tussen +8.00 m TAW en +9.63 m TAW, dus muurhoogtes tussen 1.13 m en 2.76 m;
- 4 posities op het kaaivlak: 0 m, 15 m, 30 m en 40 m van de rand van het kaaivlak.
(positie 0 m is eigenlijk een verticale wand, die ook model kan staan voor een stormvloedkering in de ingang van het Montgomerydok).

De kaaimuur wordt achter de stormmuur met dwarse geleidingsmuren opgedeeld in 6 zones waarin de gemiddelde golfovertopping wordt opgemeten in 6 opvangbakken (6 OT (overtopping tanks), Figuur 3). Deze 6 zones hebben een verschillende breedte (variërend tussen 1.63 à 2.67 m_{model}) omdat de opvangbakken van het eerste schaalmodel hergebruikt worden. De dimensionering van het schaalmodel en de opvangbakken (ongeveer 200 liter_{model}/bak) is geoptimaliseerd om kleine overtoppingsdebieten (1-20 l/s/m) nauwkeurig te kunnen opmeten. Bij enkele proeven met grotere debieten wordt het extra water in 5 externe tanks opgeslagen; bij dergelijke proeven wordt geen water opgevangen in zone 6 en is de meetnauwkeurigheid kleiner omdat hierbij een waterstandsval tot 24 cm (5 mm_{model}) optreedt.

Een rij met 14 golvenmeters staat opgesteld vóór de kaaimuur om de golfcondities langs de kaaimuur te registreren (Figuur 3). De eerste golvenmeter (GOLF_00) staat ter hoogte van het begin van de kaaimuur, elke volgende golvenmeter staat 48 m (1 m_{model}) verder. Zodoende staan er minstens 2 golvenmeters voor elke zone. Deze rij kan op 2 posities opgesteld worden om rekening te houden met de reflectie van de kaaimuur: op 10 m en op 20 m voor de kaaimuur (0.208 resp. 0.417 m_{model}).

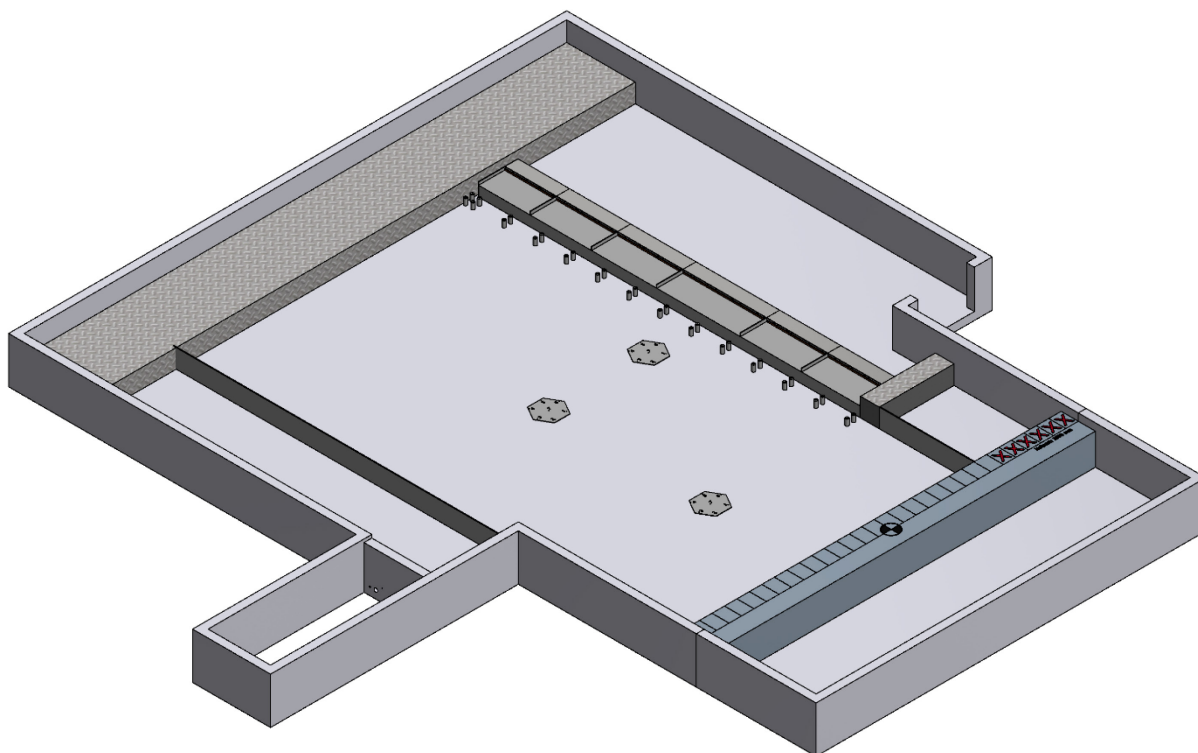
In de golftank staat ook 1 ster array met 7 golvenmeters voor directionele golfanalyse. Deze staat bij de eerste helft van de proeven in de testmatrix opgesteld voor het golfschot ter controle van de golfgeneratie (positie "Ster Schot", Figuur 3). In de tweede helft van de testmatrix, bij proeven met dezelfde golfgeneratie, wordt de ster array verplaatst naar 2 andere posities "Ster Midden" en "Ster OT3").

Vermits de kaaimuur over een breedte van 2.40 m_{model} vóór het golfschot staat, worden 6 individuele elementen van het golfschot uitgeschakeld en worden de golven slechts over een breedte van 9.60 m-model gegenereerd. Geleidingsmuren aan weerskanten zorgen ervoor dat de juiste golfenergie naar de modelzone wordt gestuurd.

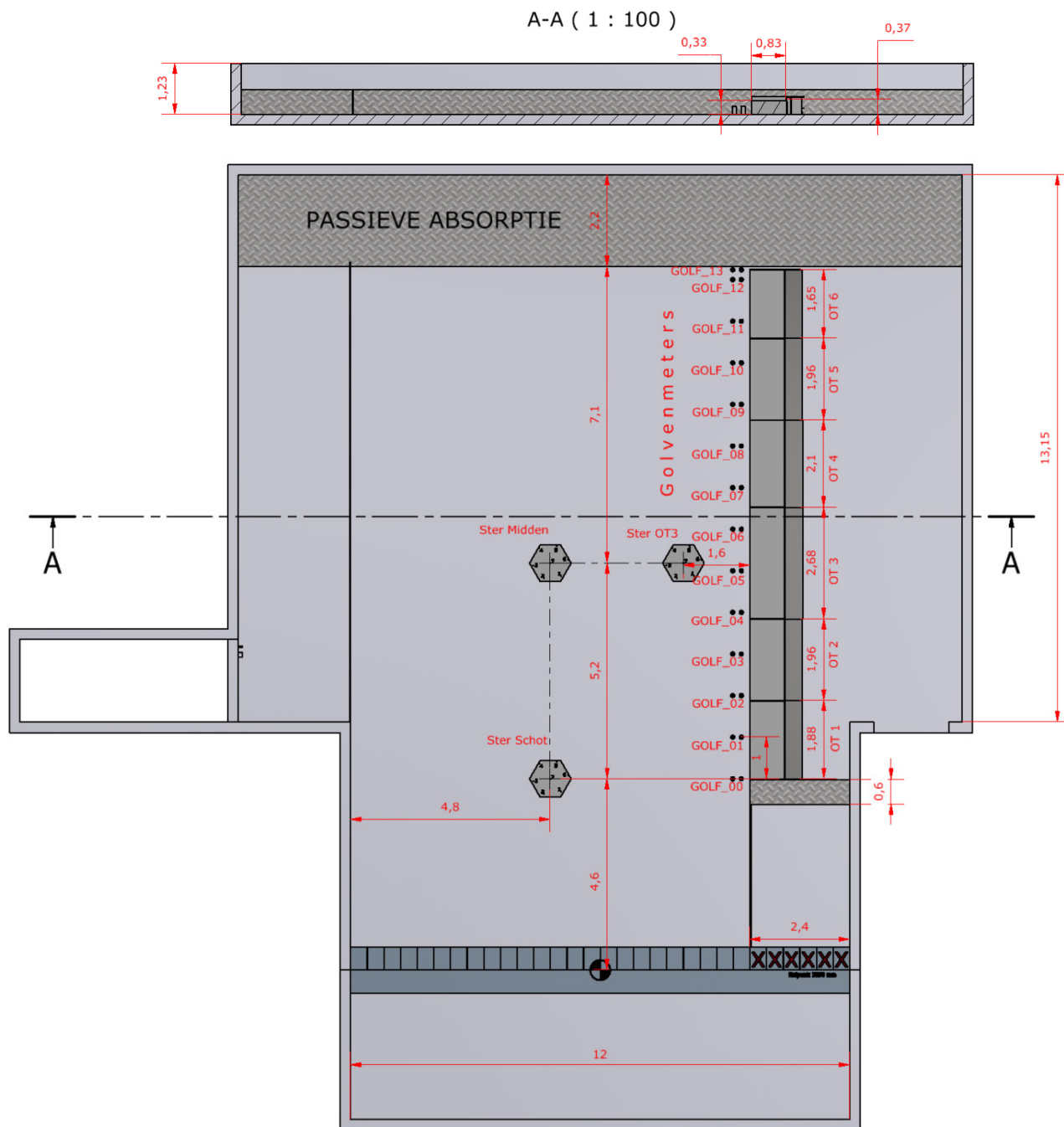
² In de 4 profielen gelegen in de zone RNSYC-Demeysluis heeft de rand van het kaaivlak volgende peilen: profiel 4 = +7.04 mTAW (naast station), profiel 5 = +7.00 mTAW (naast station), profiel 6 = +6.73 mTAW (naast de sporen), profiel 7 = +6.87 mTAW (naast ingang Demeysluis). De peilen in rood in het autocad-bestand zijn afkomstig van minder nauwkeurige luchtopnames. Als gemiddelde waarde wordt +6.87 mTAW gekozen voor het fysisch model.

Achteraan in de golftank wordt absorptiemateriaal geplaatst om golfreflectie aan de achterwand te minimaliseren (Figuur 4, foto linksboven). Alle proeven worden bovendien uitgevoerd met actieve golfabsorptie aan het golfschot om gereflecteerde energie uit het model te halen. Uit analyse van de golfmetingen is gebleken dat beperkte reflectie is opgetreden aan de linkerzijde (geleidingsmuur) van het schaalmodel.

Figuur 2 – 3D beeld van het schaalmodel in de golftank



Figuur 3 – Plattegrond en snede van het schaalmodel in de golftank, en posities golvenmeters.

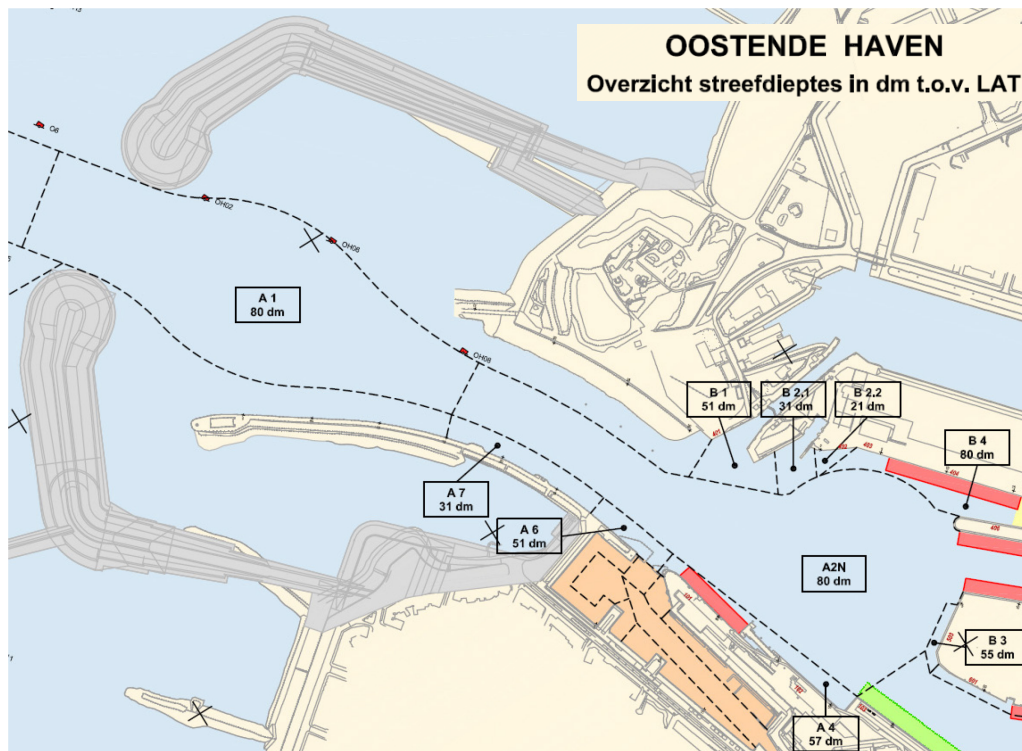


(a) Afmetingen in m_model. Schaalmodel 1/48.

Figuur 4 – Foto's van het schaalmodel in de golftank



Figuur 5 – Huidige baggerstreefdieptes in de haven van Oostende.



(b) Het referentievlak LAT ligt 5 dm onder het referentievlak TAW.

2.4 Instrumentatie / metingen

In het schaalmodel worden waterstand, golven en golfovertopping opgemeten.

De meeste proeven worden gefilmd met een videocamera.

2.4.1 Waterstandsmeting

De waterstand in de golftank wordt opgemeten met een permanent opgestelde Balluff waterhoogtemeter. De vlotter van deze waterhoogtemeter kan de waterstand tot op 4.8 mm (0.1 mm_model) nauwkeurig meten.

2.4.2 Golvenmeters

Figuur 3 geeft een overzicht van de posities van de golvenmeters in het schaalmodel.

Er is 1 directionele golfmeting met een ster array bestaande uit 7 golvenmeters³. Deze ster array kan op 1 van volgende 3 posities opgesteld worden:

- positie 'Ster Schot': op deze positie worden de door het golfschot gegenereerde golven gecontroleerd;
- positie 'Ster Midden': meetpositie in het midden van de golftank;
- positie 'Ster OT3': meetpositie op 76.8 m (1.60 m_model) voor de kaaimuur in meetzone OT3.

Daarnaast staan er nog 14 individuele golvenmeters⁴ op 1 rij voor de kaaimuur. Er zijn 2 posities voor deze rij golvenmeters:

- 14 golvenmeters op 10 m (0.208 m_model) voor de kaaimuur;
- 14 golvenmeters op 20 m (0.417 m_model) voor de kaaimuur.

De golfanalyse wordt uitgevoerd met WaveLab versie 3.827.

2.4.3 Overtopping

De kaaimuur wordt opgedeeld in 6 zones. In elke zone staat een stormmuur op het kaaivlak, en achter de stormmuur (niet ervoor) geleidingsmuren die het water in de zone houden (Figuur 6).

Achter elke zone wordt een inox overtoppingsbak geplaatst om golfovertopping over de stormmuur op te vangen. Met een ultrasone sensor wordt de waterhoogte in deze bakken opgemeten, waarmee het watervolume gekend is. Op basis van het begin- en eindvolume bij een proef wordt het overtoppingsvolume berekend, en rekening houdend met de lengte van de proef het gemiddeld overtoppingsdebiet.

De inox overtoppingsbakken zijn gedimensioneerd om proeven met een overtoppingsdebiet tot 20 l/s/m uit te voeren. Voor proeven met een groter overtoppingsdebiet worden 5 extra opvangcontainers buiten de golftank bijgeplaatst voor zone 1 t.e.m. zone 5 (zone 6 kan dan niet opgemeten worden).

Bij een proef met een overtoppingsdebiet van 5 l/s/m is de waterstandsaling in de golftank minder dan 1 mm_model (5 cm in werkelijkheid). Dit is voldoende klein om een constant waterpeil te veronderstellen en nauwkeurige metingen te kunnen uitvoeren. Voor proeven met een overtoppingsdebiet van 20 l/s/m loopt de waterstandsaling op tot 4 mm_model (20 cm in werkelijkheid) waardoor de nauwkeurigheid sterk daalt. Vemits de focus ligt op kleine debieten (dicht bij het ontwerpcriterium van 1 l/s/m) is dit aanvaardbaar.

³ Deze 7 golvenmeters van het weerstandstype zijn in huis vervaardigde golvenmeters.

⁴ Deze 14 golvenmeters van het weerstandstype zijn vervaardigd door HR Wallingford. Meetnauwkeurigheid ± 0.1 mm_model.

Figuur 6 – Stormmuur op het kaaivlak en overtoppingsbakken achter de kaaimuur.



In het schaalmodel wordt het gemiddeld overtoppingsdebiet per zone geanalyseerd. Dit is immers de maatgevende parameter voor het ontwerp van de overstromingsmaatregelen. Hoewel de ultrasone sensoren continu meten tijdens de proeven, is het niet mogelijk om individuele overtopingsvolumes te bepalen omdat de signalen geen duidelijke trapfuncties zijn (door de lengte van de stormmuren gebeurt het instromen van een golf in een bak verspreid in tijd en ruimte waardoor de signalen geen duidelijke sprongen bevatten).

3 Hydrodynamische randvoorwaarden

3.1 Waterstanden

De 1000-jarige waterstand in Oostende (haven, kustsectie 117), exclusief zeespiegelstijging, bedraagt +6.88 m TAW. Dit is de omnidirectionele waterstand zoals gerapporteerd in §4.3 van het hydraulisch randvoorwaardenboek 2014 (De Roo et al., 2016).

Voor een tijdshorizon van 50 respectievelijk 100 jaar vanaf heden, wordt 2070 respectievelijk 2120 vooropgesteld⁵.

Voor de zeespiegelstijging (ZSS) wordt de formule met kwadratische toename gebruikt. De formule t.o.v. referentiejaar 2000 is:

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

Voor dit project wordt 2014 als referentiejaar genomen. Dit leidt tot volgende waarden:

ZSS (2014) = 0.064 m

ZSS (2070) = 0.476 m

ZSS (2120) = 1.056 m

totaal voor 50 jaar: + 41.2 cm in 2070

totaal voor 100 jaar: + 99.2 cm in 2120

De waterstanden zijn dus:

- 1000-jarige storm (excl. zeespiegelstijging): **waterstand +6.88 m TAW**
- 1000-jarige storm incl. 50 jaar zeespiegelstijging: **waterstand +7.29 m TAW**
- 1000-jarige storm incl. 100 jaar zeespiegelstijging: **waterstand +7.87 m TAW**

De volledige berekening van deze waterstanden is bijgevoegd aan dit rapport in bijlage 2.

3.2 Golfrandvoorwaarden

De golfrandvoorwaarden voor dit schaalmodel worden afgeleid uit een numeriek MIKE21 BW model (De Roo & Nguyen, 2019; zie ook bijlage 3) en uit het eerste fysisch model waarin het Montgomerydok inclusief havengeul gemodelleerd werd (Willems et al., 2019). In beide modellen worden de golven bepaald in de havengeul in de zone RNSYC tot Churchillkaai, in het numeriek model ook in de zone station tot Demeysluis. De buitengaatse condities (op 2 golflengtes voor de havendammen) voor een 1000-jarige storm worden opgesomd in Tabel 2.

Bovendien wordt ook de mogelijke bijdrage van windgegenereerde golven in de haven onderzocht met SWAN (v41.01) voor een 1000-jarige gemiddelde windsnelheid u_w van 23.1 m/s (snelheid op 10 m boven gemiddeld zeeniveau en gecorrigeerd voor het landeffect) (Tabel 3).

⁵ 50 jaar vanaf heden is 2070. Dit is verschillend van het jaar 2050 waarvan sprake in het Masterplan Kustveiligheid.

Tabel 2 – Buitengaatse condities voor een 1000-jarige storm.

	Waterstand h [m TAW]	Significante golfhoogte H_{m0} [m]	Golfpiekperiode T_p [s]
T = 1000 jaar, zonder zeespiegelstijging	+6.88	4.80	10.87
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 50 jaar (2070)	+7.29	4.92	10.87
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 100 jaar (2120)	+7.87	5.10	10.87

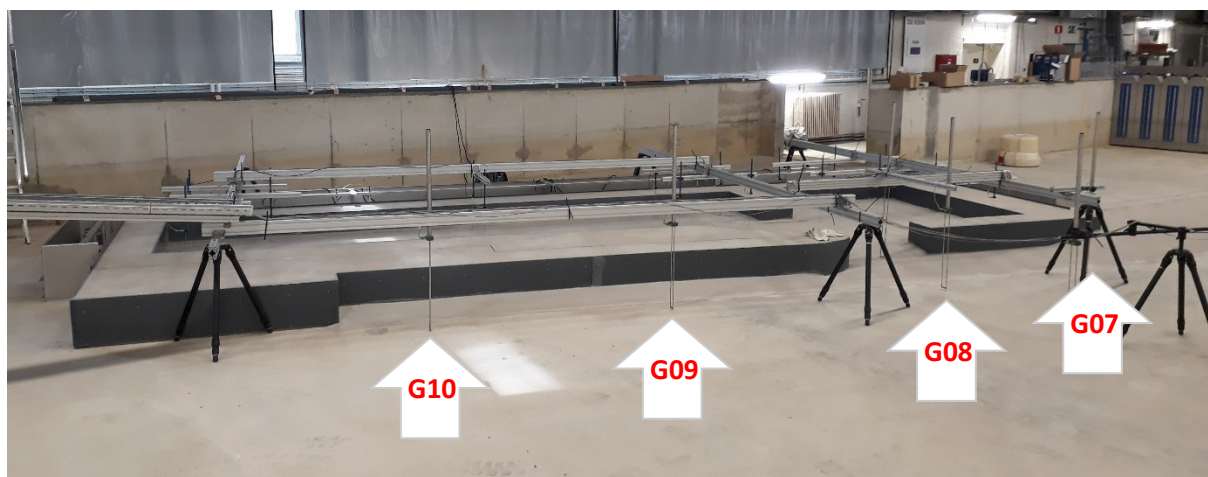
Tabel 3 – Randvoorwaarden wind voor een 1000-jarige storm.

	Waterstand h [m TAW]	Windsnelheid u_w [m/s]
T = 1000 jaar, zonder zeespiegelstijging	+6.88	23.1
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 50 jaar (2070)	+7.29	23.1
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 100 jaar (2120)	+7.87	23.1

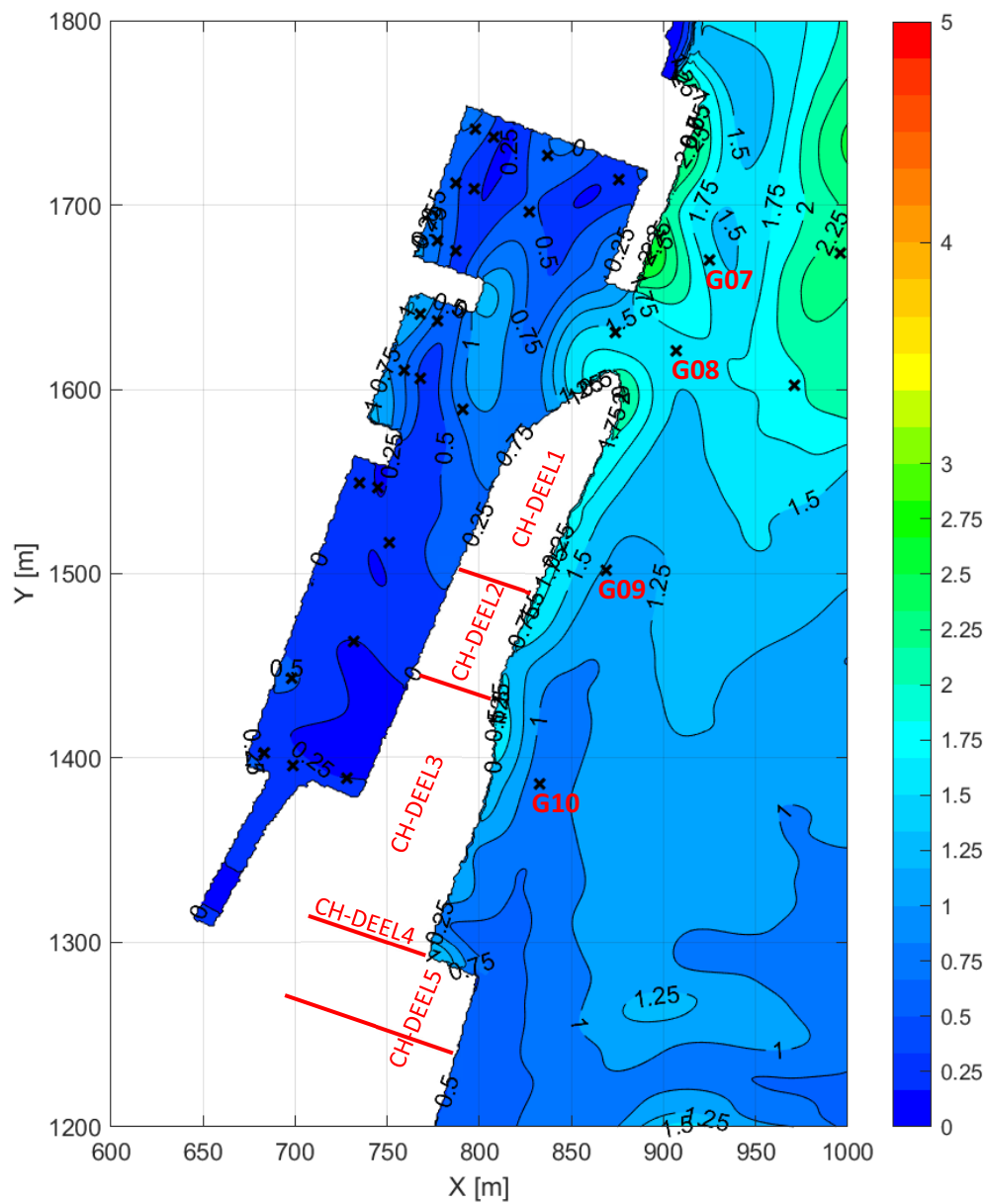
3.2.1 Golfindringing zone RNSYC-Churchillkaai

Figuur 8 toont een contourplot van de significante golfhoogte H_{m0} in het numeriek MIKE21 BW model in de zone RNSYC-Churchillkaai. Daarbij zijn ook de posities van de 4 golvenmeters G07-G08-G09-G10 aangegeven (op enige afstand voor de kaaimuur). Figuur 7 toont dezelfde 4 golvenmeters in het fysisch model van het Montgomerydok (Willems et al., 2019). Tabel 4 geeft een overzicht van de golfhoogte opgemeten door de golvenmeters in zowel het numeriek als het fysisch model en afgelezen op de contourplot tegen de kaaimuur.

Figuur 7 – Locatie golvenmeters in het fysisch model van het Montgomerydok.



Figuur 8 - Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar (waterstand +7.87 m TAW). Zoom op zone RNSYC-Churchillkaai.



(c) Indeling en naamgeving deel1-deel5 overgenomen van Figuur 11.

Tabel 4 – Golfhoogte H_{m0} in de zone RNSYC-Churchillkaai in beide modellen
(1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).

Golvenmeter	Locatie	Fysisch model (golvenmeters)	Numeriek model (golvenmeters)	Numeriek model (contourlijnen)
		H_{m0} [m]	H_{m0} [m]	H_{m0} [m]
G07	RNSYC	2.00	1.75	2.50
G08	Ingang / stormvloedkering	2.45	1.75	
	Churchillkaai deel 1			2.25
G09		2.00	1.25	
	Churchillkaai deel 2			1.75
G10		1.50	1.00	
	Churchillkaai deel 3			1.25
	Churchillkaai deel 4			1.25
	Churchillkaai deel 5			0.75

(d) Golvenmeter en locatie: zie Figuur 7, Figuur 8 en Figuur 11.

Op basis van ‘expert judgement’ kan uit de verschillende golfhoogtes in Tabel 4 de golfhoogte voor elke locatie worden afgeleid (Tabel 5). Ter info wordt ook de golfindringingscoëfficiënt K_d ten opzichte van de buitengaats golfconditie vermeld (ten behoeve van vergelijking met (IMDC, 2012), zie §3.3). $H_{m0,buiten}$ is 5.10 m (De Roo & Nguyen, 2019).

$$K_d = \frac{H_{m0}}{H_{m0,buiten}}$$

Tabel 5 – Golfhoogte H_{m0} in de zone RNSYC-Churchillkaai
(1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).

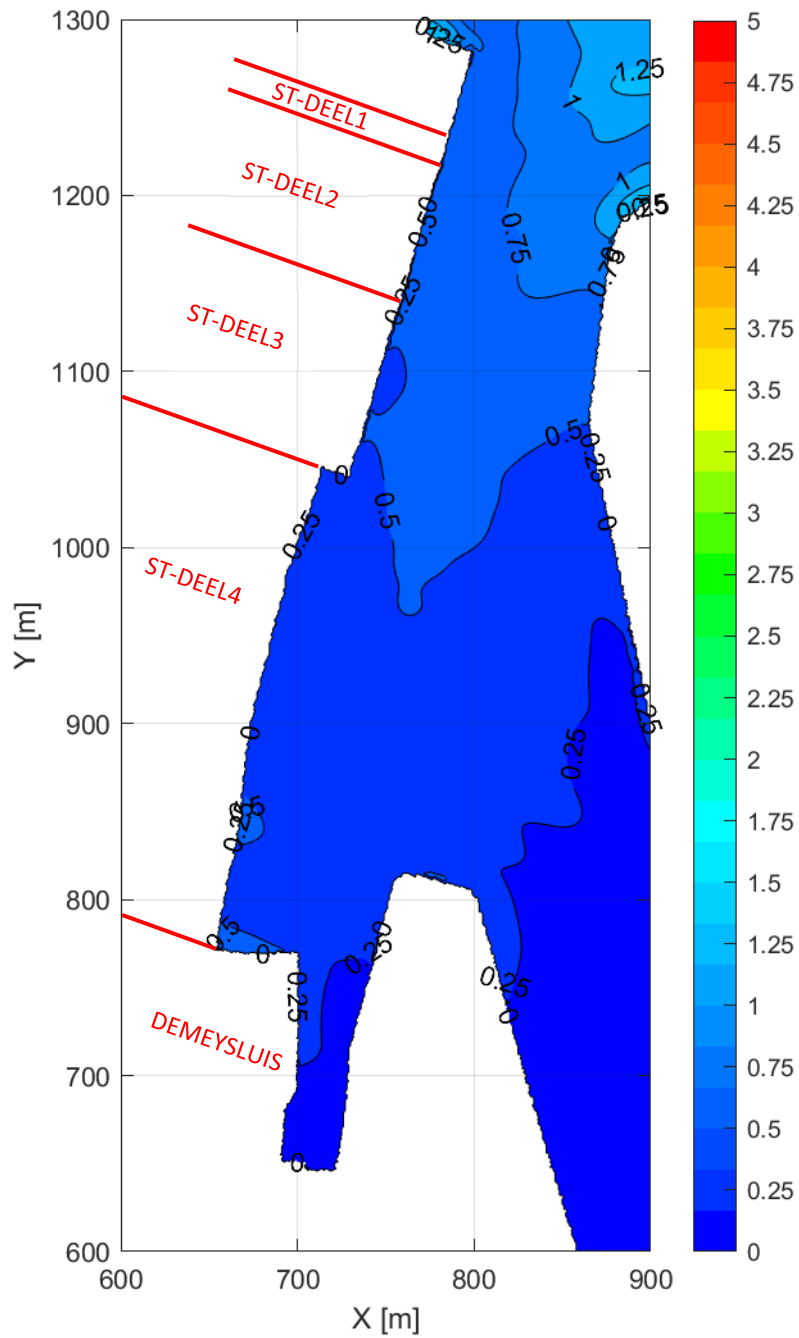
Locatie	H_{m0} [m]	K_d [-]
RNSYC	2.25	0.44
Ingang / stormvloedkering	2.25	0.44
Churchillkaai deel 1	2.25	0.44
Churchillkaai deel 2	2.00	0.39
Churchillkaai deel 3	1.50	0.29
Churchillkaai deel 4	1.25	0.25
Churchillkaai deel 5	0.75	0.15

(e) Locatie: zie Figuur 8.

3.2.2 Golfindringing in zone station-Demeysluis

Figuur 9 toont een contourplot van de significante golfhoogte H_{m0} in het numeriek MIKE21 BW model in de zone station. Tabel 6 geeft een overzicht van de golfhoogte afgelezen op de contourplot tegen de kaaimuur. Ter info wordt ook de golfindringingscoëfficiënt K_d ten opzichte van de buitengaatse golfconditie vermeld (ten behoeve van vergelijking met (IMDC, 2012), zie §3.3). $H_{m0,buiten}$ is 5.10 m (De Roo & Nguyen, 2019).

Figuur 9 - Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar (waterstand +7.87 m TAW). Zoom op zone station-Demeysluis.



(f) Indeling en naamgeving deel1-deel4 overgenomen van Figuur 12.

Tabel 6 – Golfhoogte H_{m0} in de zone station-Demeysluis
(1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).

Locatie	H_{m0} [m]	K_d [-]
station deel 1	0.60	0.12
station deel 2	0.60	0.12
station deel 3	0.50	0.10
station deel 4	0.40	0.08
Demeysluis	0.30	0.06

(g) Locatie: zie Figuur 9.

3.2.3 Windgolven

Figuur 10 illustreert de lokaal gegenereerde windgolven in de haven indien een 1000-jarige waterstand ingesteld is met een zeespiegelstijging van 100 jaar (+7.87 m TAW). Hierbij is de windrichting -37° en de windsnelheid⁶ 23.1 m/s. Zonder zeespiegelstijging is het golfpatroon nagenoeg gelijk, aangezien de waterstand voldoende hoog is en de strijklengte waarover de wind blaast gelijk blijft. (De Roo & Nguyen, 2019; zie ook bijlage 3)

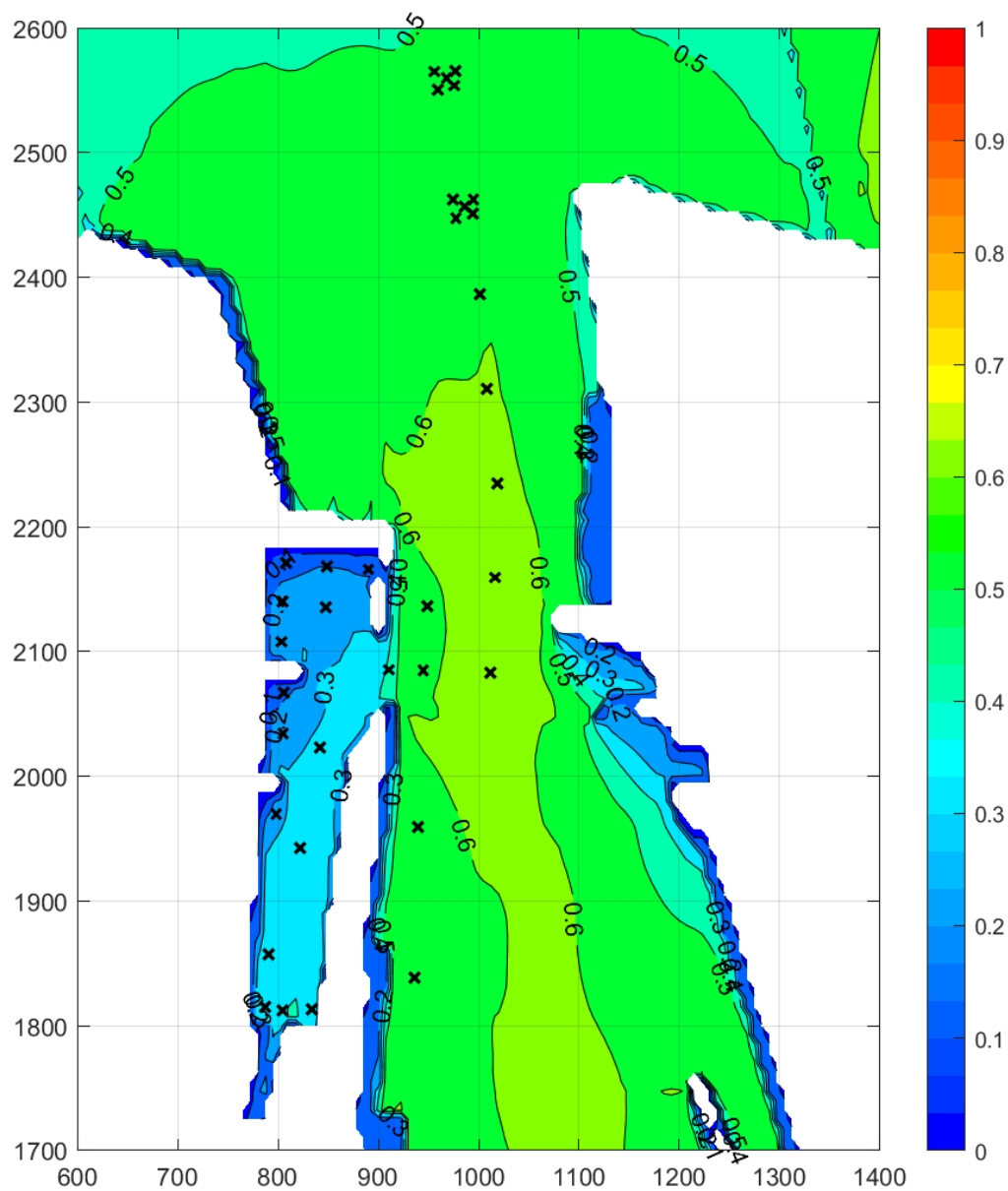
De significante golfhoogte $H_{m0,W}$ bedraagt 0.5 m tot 0.6 m, zowel in de zone RNSYC-Churchillkaai als verder in de zone station-Demeysluis. De aangeduide meetlocaties G07-G10 laten waarden tussen 0.55 m en 0.58 m optekenen.

In beide zones kan een significante golfhoogte $H_{m0,W}$ van 0.60 m aangenomen worden.

De golfperiode van windgolven is veel kleiner dan deze van golfindringing. Volgens de SWAN berekeningen is $T_{m-1,0} = 2.2$ s (Verwaest & Vanneste, 2019). De golfpiekperiode is dan $T_p = 1.1 * T_{m-1,0} = 2.4$ s (Goda, 1985).

⁶ Volgens tabel 4-6 in het hydraulisch randvoorwaardenboek (2014) is de windsnelheid ($T = 1000$ jaar, $dt = 2$ u, hoogte $z = 10$ m) voor NW 25.59 m/s. Met een correctiefactor 0.9 voor het landeffect wordt dit 23.1 m/s.

Figuur 10 Significante golfhoogte $H_{m0,w}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u_w , waterstand incl zeespiegelstijging + 100jaar (+7.87 m TAW).



(h) Rekenrooster volgens richting -37°N.

3.2.4 Samenvatting golfbrandvoorwaarden

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 door middel van de formule

$$H_{m0,tot} = \sqrt{H_{m0,GI}^2 + H_{m0,W}^2}$$

- waarbij:
- $H_{m0,tot}$ totale significante golfhoogte op een bepaalde locatie
 - $H_{m0,GI}$ significante golfhoogte resulterend uit golfindringing (§3.2.1 & §3.2.2)
 - $H_{m0,W}$ significante golfhoogte veroorzaakt door lokale windgroei (§3.2.3)

Tabel 7 geeft een overzicht van de significante golfhoogtes ten gevolge van golfindringing ($H_{m0,GI}$) en lokale windgroei ($H_{m0,W}$) alsook van de totale gesuperponeerde significante golfhoogte $H_{m0,tot}$. De bijdrage van de windgolven is niet significant (en zou eventueel verwaarloosd kunnen worden) indien $H_{m0,W}$ kleiner is dan de helft van $H_{m0,GI}$.

Tabel 7 – Totale golfhoogte H_{m0} in de haven
(1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).

Locatie	$H_{m0,GI}$ [m]	$H_{m0,W}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]
RNSYC	2.25	0.55	2.32
Ingang / stormvloedkering	2.25	0.55	2.32
Churchillkaai deel 1	2.25	0.55	2.32
Churchillkaai deel 2	2.00	0.55	2.07
Churchillkaai deel 3	1.50	0.55	1.60
Churchillkaai deel 4	1.25	0.55	1.37
Churchillkaai deel 5	0.75	0.55	0.93
station deel 1	0.60	0.55	0.81
station deel 2	0.60	0.55	0.81
station deel 3	0.50	0.55	0.74
station deel 4	0.40	0.55	0.68
Demeysluis	0.30	0.55	0.63

De significante golfhoogtes in Tabel 7 zijn dus de golfbrandvoorwaarden voor de modellering van golfovertopping over een rechte kaaimuur met stormmuur.⁷

⁷ Zie echter §4.1 voor de verklaring waarom in het schaalmodel proeven zijn uitgevoerd met $H_{m0,target}$ in de range 1.40-2.80 m.

De andere golfparameters zijn:

- hoofdrichting parallel met de kaaimuur (0° volgens oriëntatie in de golftank, dus 90° t.o.v. de normaal op de kaaimuur)
- golfpiekperiode $T_p = 10.87$ s
- JONSWAP spectrum met piekversterkingsfactor $\gamma = 3.3$
- (eenzijdige) directionele spreiding van de golven $\sigma = 17^\circ$.

3.3 Vergelijking met randvoorwaarden IMDC (2012)

Ten behoeve van de actualisatie van de MKBA worden de randvoorwaarden uit de huidige studie (§3.1 & §3.2) vergeleken met de randvoorwaarden in de studie voor overstromingsmaatregelen in 2012 (IMDC, 2012). Daarin worden 3 stormen gebruikt:

- 1000-jarige storm met 30 cm zeespiegelstijging;
- +7.50 m storm;
- +8.00 m storm.

Bij deze stormen werden andere randvoorwaarden opgelegd dan in de huidige studie. Tabel 8 vergelijkt de verschillen in zowel waterstand als golfcondities. Merk op dat de eerste en laatste storm in de tabel 1000-jarige stormen zijn met verschillende waterstanden, terwijl de twee andere stormen zwaardere stormen zijn. Voor details over de achtergrond van de cijfers van de vorige studie wordt verwezen naar IMDC (2012).

Kortkruinige en langkruinige golven leveren geen significant verschillende K_d op aan de kaaimuren in de binnenhaven (Gruwez et al., 2011).

Tabel 8 – Vergelijking randvoorwaarden voor de stormen in de 2 studies.

	IMDC (2012) +7.20 m TAW	IMDC (2012) +7.50 m TAW	IMDC (2012) +8.00 m TAW	Huidige studie +7.87 m TAW
omschrijving	1000-jarige storm incl. 30 cm zeespiegelstijging (2050)	+7.50 m TAW- storm	+8.00 m TAW- storm	1000-jarige storm incl. 99 cm zeespiegelstijging (2120)
waterstand	+7.20 m TAW	+7.50 m TAW	+8.00 m TAW	+7.87 m TAW
H_{m0} buitengaats	5.12 m	5.40 m	5.70 m	5.10 m
T_p	12 s	12 s	12 s	10.87 s
golfrichting	meest nadelige richting (meestal $-37^\circ N$)	meest nadelige richting (meestal $-37^\circ N$)	meest nadelige richting (meestal $-37^\circ N$)	$-37^\circ N$
golfgeneratie	langkruinig	langkruinig	langkruinig	kortkruinig
Halve Maandijk	fase "T2" (beetje breder dan in huidige studie)	fase "T2" (beetje breder dan in huidige studie)	fase "T2" (beetje breder dan in huidige studie)	ontworpen verbreding die in 2020 wordt gerealiseerd

Figuur 11 toont de onderverdeling van de zone RNSYC-Churchillkaai gebruikt in IMDC (2012), Tabel 9 geeft de golfhoogte van de 3 vermelde stormen.

Figuur 12 toont de onderverdeling van de zone station-Demeysluis gebruikt in IMDC (2012), Tabel 10 geeft de golfhoogte van de 3 vermelde stormen.

Bij Tabel 9 en Tabel 10 hoort volgende informatie (*tekst overgenomen uit IMDC (2012) §1.3.3.4*):

Voor de getabelleerde K_d -factoren werd per zone een afgewogen keuze gemaakt op basis van verschillende numerieke en fysische modellen.

Enkel de waarde van de meest nadelige golfrichting werd weerhouden (voor de meeste zones was dit richting -37°N). De uiteindelijke K_d -waarde voor het ontwerp van de overstromingsmaatregelen was per zone steeds de maximale waarde van de K_d -waarden bekomen per waterstand (+7.20 en +8.00 m TAW). Voor de waterstanden +7.20 en +8.00 m TAW en golfperiode $T_p = 12$ s werd telkens de gemiddelde K_d -waarden van alle resultaten voor die waterstand bepaald. Afhankelijk van de configuratie (vb. loodrechte wand, kaaivlak onder water) gaf de ene, dan wel de andere waterstand de hoogste K_d -waarde.

Hierbij werd echter wel opgemerkt dat in sommige gevallen in het fysisch model hogere K_d -waarden werden bekomen voor testen bij waterstand +7.00 m TAW en golfperiode $T_p = 10$ s. De K_d -waarden zijn dus enkel geldig voor waterstanden +7.20 en +8.00 m TAW en golfperiode $T_p = 12$ s.

Bij het functioneel ontwerp van de overstromingsmaatregelen in de haven van Oostende werden in 2012 volgende ontwerpcondities gehanteerd: $Q < 1$ l/s/m bij de stormen met waterpeil +7.20 m TAW en +7.50 m TAW en een waterkerende functie bij de +8.00 m TAW-storm. Om deze reden zal de +8.00 m TAW-storm niet meegenomen worden in de verdere vergelijking.

De lokaal gegenereerde windgolven bij een 1000-jarige storm⁸ hebben in IMDC (2012) een significante golfhoogte $H_{m0,W}$ van 0.73 m in beide zones (met uitzondering van station-deel4 ($H_{m0,W} = 0.78$ m) en Demeysluis ($H_{m0,W} = 0.80$ m)⁹). Deze bijdrage wordt als verwaarloosbaar beschouwd in de zone RNSYC-Churchillkaai (Tabel 9), maar wordt wel gesuperponeerd op de golven ten gevolge van golfindringing in de zone station-Demeysluis (Tabel 10). Deze werkwijze verklaart de toename van H_{m0} van Churchillkaai-deel5 ($H_{m0} = 1.50$ m) naar station-deel1 ($H_{m0} = 1.67$ m).

Uit onderlinge vergelijking blijkt dat de windgolven in de huidige studie, zijnde 0.60 m, 0.13 m of 1/6de kleiner zijn dan in IMDC (2012), zijnde 0.73 m. Op basis van de beschikbare rapporten kan niet afgeleid worden waaraan dit verschil kan toegeschreven worden.

⁸ Voor de +7.50 m TAW storm is de significante golfhoogte $H_{m0,W}$ 0.92 m.

⁹ Voor details over de berekeningen wordt de lezer verwezen naar IMDC (2012) bijlage A §1.4.

Figuur 11 – RNSYC & Churchillkaai: onderverdeling zones en aanduiding stormmuur (IMDC, 2012, figuur 3-11).



Tabel 9 – Golfhoogte in de zone RNSYC-Churchillkaai bij de studie voor overstromingsmaatregelen in 2012 (IMDC, 2012, §3.2.1).

Locatie	K_d [-]	T1000 storm (+7.20m)	+7.50m storm	+8.00m storm
		H_{m0} [m]	H_{m0} [m]	H_{m0} [m]
RNSYC	0.45	2.25	2.43	2.57
Ingang / stormvloedkering				
Churchillkaai deel 1	0.48	2.40	2.60	2.74
Churchillkaai deel 2	0.48	2.40	2.60	2.74
Churchillkaai deel 3	0.44	2.20	2.38	2.51
Churchillkaai deel 4	0.44	2.20	2.38	2.51
Churchillkaai deel 5	0.30	1.50	1.62	1.71

(i) K_d is de golfindringingscoëfficiënt ten opzichte van de buitengaats golfconditie. De cursieve golfhoogtes H_{m0} zijn ten gevolge van golfindringing exclusief lokale windgolven.

Figuur 12 – Zone station: onderverdeling zone en aanduiding stormmuur
(IMDC, 2012, figuur 3-20).



Tabel 10 – Golfhoogte in de zone station-Demeysluis bij de studie voor overstromingsmaatregelen in 2012
(IMDC, 2012, §3.3-§3.4.2).

Locatie	K_d [-]	T1000 storm (+7.20m)	+7.50m storm	+8.00m storm
		H_{m0} [m]	H_{m0} [m]	H_{m0} [m]
station (deel 1)	0.30	1.67	1.87	2.01
station (deel 2)	0.30	1.67	1.87	2.01
station (deel 3)	0.25	1.45	1.64	1.77
station (deel 4)	0.15	1.09	1.29	1.41
Demeysluis	0.10	0.95	1.17	1.29

(j) K_d is de golfindringingscoëfficiënt ten opzichte van de buitengaats golfconditie. De getabelleerde golfhoogtes H_{m0} zijn echter inclusief lokale windgolven.

Om onderlinge vergelijking te vergemakkelijken, worden de golfhoogtes in de huidige studie (Tabel 7) en in de vorige studie (Tabel 9 & Tabel 10) samengevat in Tabel 11. Voor vergelijking van de randvoorwaarden van de 2 studies wordt verwezen naar Tabel 8.

Tabel 11 – Vergelijking golfhoogte H_{m0} in de haven in de 2 studies (1000-jarige storm met zeespiegelstijging).

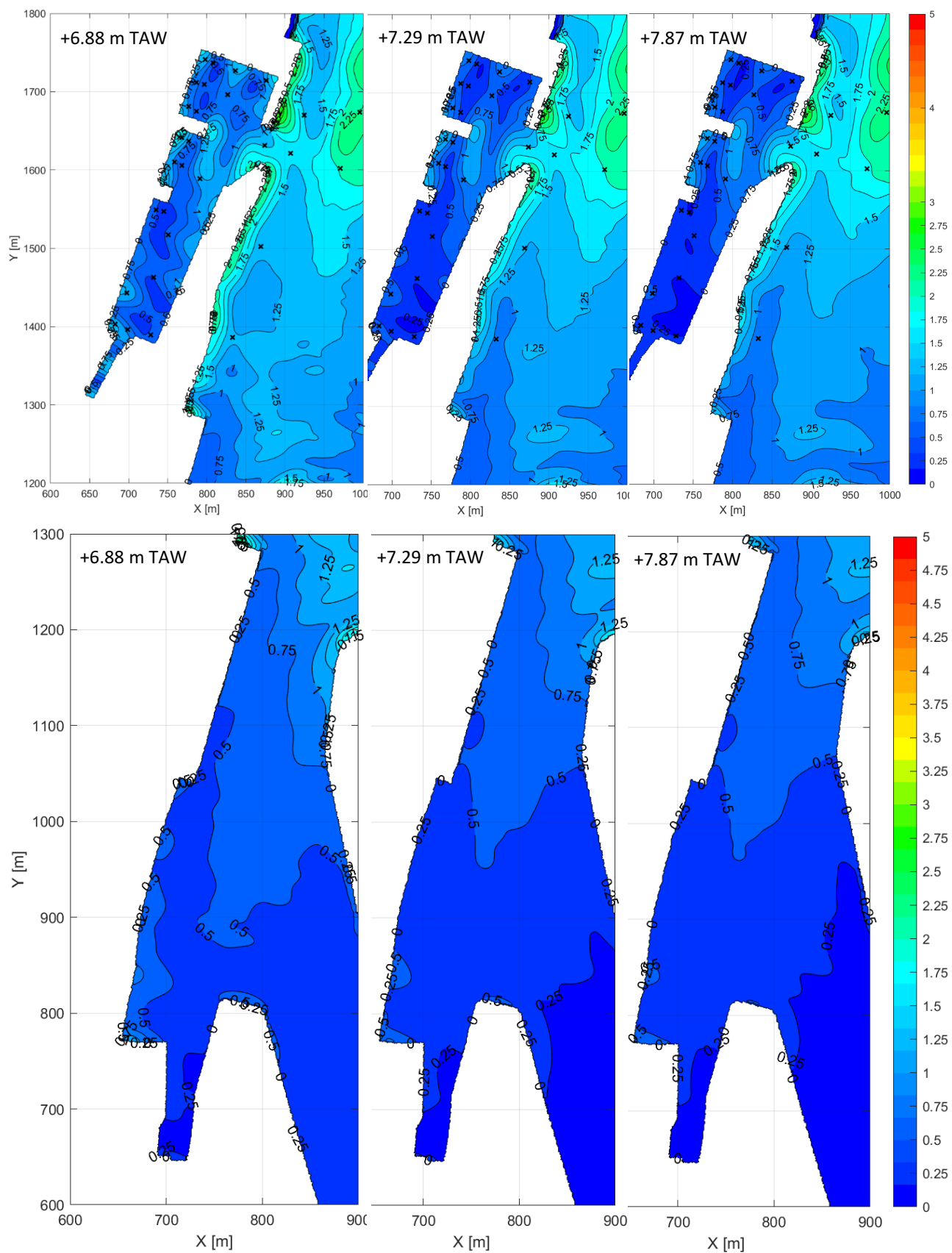
	IMDC (2012)	Huidige studie
Omschrijving	1000-jarige storm incl. 30 cm zeespiegelstijging (2050)	1000-jarige storm incl. 99 cm zeespiegelstijging (2120)
Waterstand	+7.20 m TAW	+7.87 m TAW
H_{m0} buitengaats	5.12 m	5.10 m
Locatie	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]
RNSYC	2.25	2.32
Ingang / stormvloedkering		2.32
Churchillkaai deel 1	2.40	2.32
Churchillkaai deel 2	2.40	2.07
Churchillkaai deel 3	2.20	1.60
Churchillkaai deel 4	2.20	1.37
Churchillkaai deel 5	1.50	0.93
station deel 1	1.67	0.81
station deel 2	1.67	0.81
station deel 3	1.45	0.74
station deel 4	1.09	0.68
Demeysluis	0.95	0.63

(k) Cursieve cijfers: lokale windgolven zijn verwaarloosd.

Uit onderlinge vergelijking blijkt dat de golfhoogte in de haven in het begin van de onderzochte zone (RNSYC tot Churchillkaai-deel1) ongeveer gelijk is, maar verder (Churchillkaai-deel3 tot Churchillkaai-deel5) ongeveer 1/3de kleiner is en in de zone station ongeveer de helft kleiner is. In de zone station is het verschil groter omdat zowel de golfhoogte ten gevolge van golfindringing als de golfhoogte door lokale wind kleiner is.

Er zijn dus zowel overeenkomsten als significante verschillen in de golfhoogtes van beide studies. Het grootste verschil is de afname van de golfhoogte in de zone Churchillkaai deel 2 tot deel 4. Belangrijk hierbij is te weten dat in beide studies verschillende randvoorwaarden gebruikt werden (o.a. verschillende waterstanden en buitengaatsse golfcondities, mogelijks verschillen in (numerieke) parameters) die uiteraard een invloed hebben op de resultaten. Een verschillende waterstand leidt tot een verschillende waterdiepte en verschillende reflectiecoëfficiënten voor de kaaien. Maar een verschillende waterstand alleen kan het verschil niet verklaren, zoals blijkt uit Figuur 13 die alle contourplots van de huidige MIKE21BW berekeningen weergeeft. Verschillende waterstanden leiden hier immers tot lichtjes verschillende golfhoogtes in de haven voor +7.29 m TAW en +7.87 m TAW.

Figuur 13 Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed (verschillende waterstanden).



(I) Randvoorwaarden: zie Tabel 2.

4 Kalibratie schaalmodel

4.1 Kalibratie golfhoogte

De golfgeneratie wordt gekalibreerd voor de waterstanden +7.29 m TAW en +7.87 m TAW.

Voor de keuze van de range van te genereren golfhoogtes wordt in het begin van het project gekeken naar de beschikbare informatie. Dit zijn de golfhoogtes vermeld in de vorige studie van overstromingsmaatregelen (IMDC, 2012) die opgelijst zijn in Tabel 9 en Tabel 10, en de resultaten van de modellering in de zone RNSYC-Churchillkaai zoals weergegeven in Tabel 5. Daaruit wordt besloten om schaalmodelproeven uit te voeren met $H_{m0,target}$ voor de kaaimuur in de range 1.40-2.80 m, met intervallen van 35 cm (dus 5 golfhoogtes: 1.40 m / 1.75 m / 2.10 m / 2.45 m / 2.80 m)¹⁰. De golven worden opgemeten met golvenmeters op 10 m voor de kaaimuur, zoals in het eerste fysisch model van het Montgomerydok (Willems et al., 2019).

De kalibratie wordt uitgevoerd met een hoge stormmuur vooraan op de rand van de kaaimuur, zodat de golfmeting niet kan beïnvloed worden door een eventuele aanwezigheid van een kaaivlak.

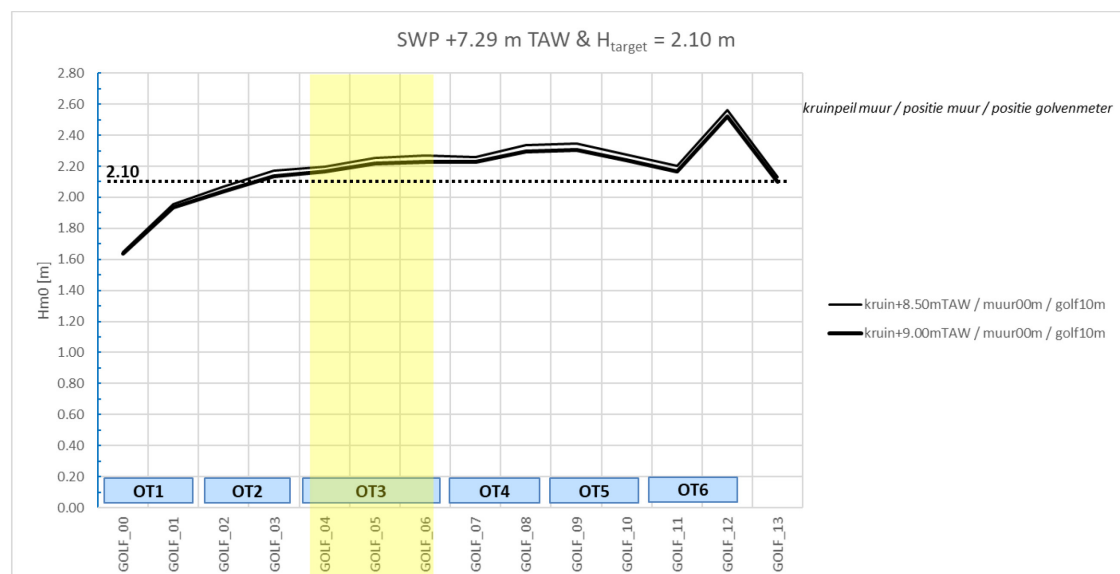
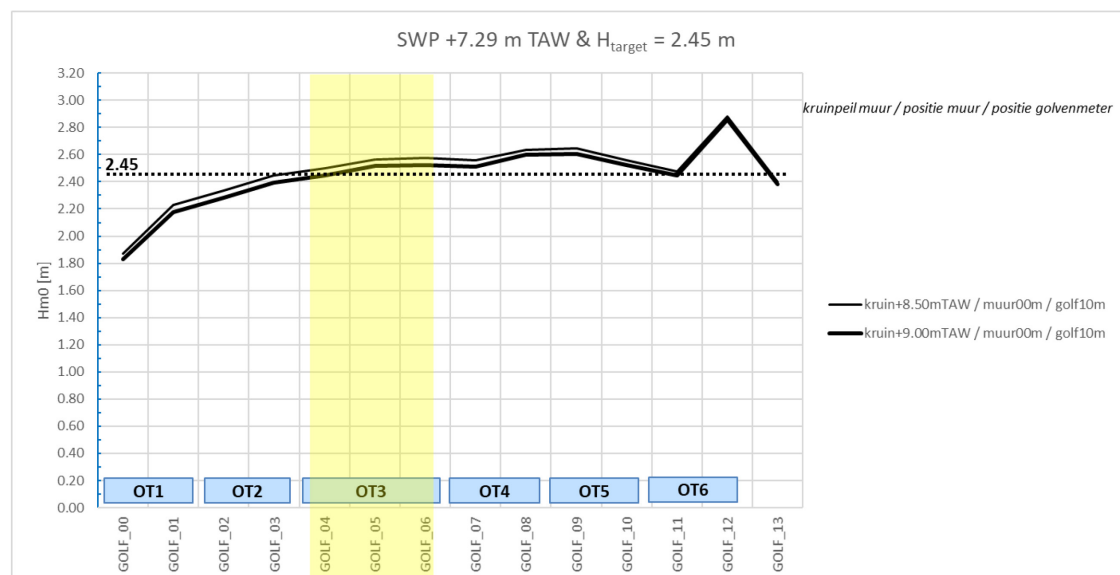
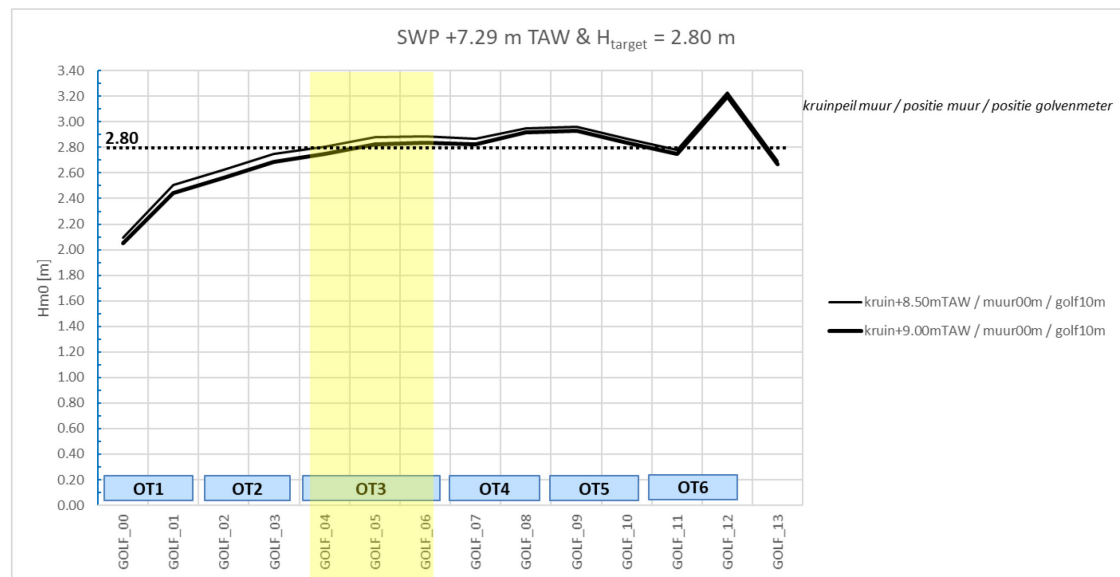
Uiteindelijk worden de golfhoogtes bekomen voorgesteld in Figuur 14 en Figuur 15. Op de horizontale as staan de 14 golvenmeters die opgesteld staan voor de kaaimuur, met aanduiding van de overtoppingtank die zich achter de golvenmeter bevindt (zie ook Figuur 3).

Zoals kan verwacht worden, treden er randeffecten op in zone 1 en zone 6, en in mindere mate in zone 2 en zone 5. In het midden van de kaaimuur is de golfhoogte stabiel. Er wordt besloten om **zone 3 (geel gemarkeerd in de grafieken) te selecteren als meetzone**: deze metingen zullen gebruikt worden voor de analyse van de golfovertopping en de bijhorende golven.

De significante golfhoogte in zone 3 is gelijk of een beetje groter (tot 10 cm groter) dan de gewenste significante golfhoogte (zie puntjeslijnen in de grafieken) voor elk van de 6 condities. **De significante golfhoogte wijkt nooit meer dan 5% af van de gewenste significante golfhoogte en kan hiermee aanvaard worden als nauwkeurig gekalibreerd.**

¹⁰ Later zou blijken dat in de zone station ook kleinere golven optreden, zoals beschreven in §3.2.4.

Figuur 14 – Gekalibreerde golfhoogte in zone 3 voor waterstand +7.29 m TAW.

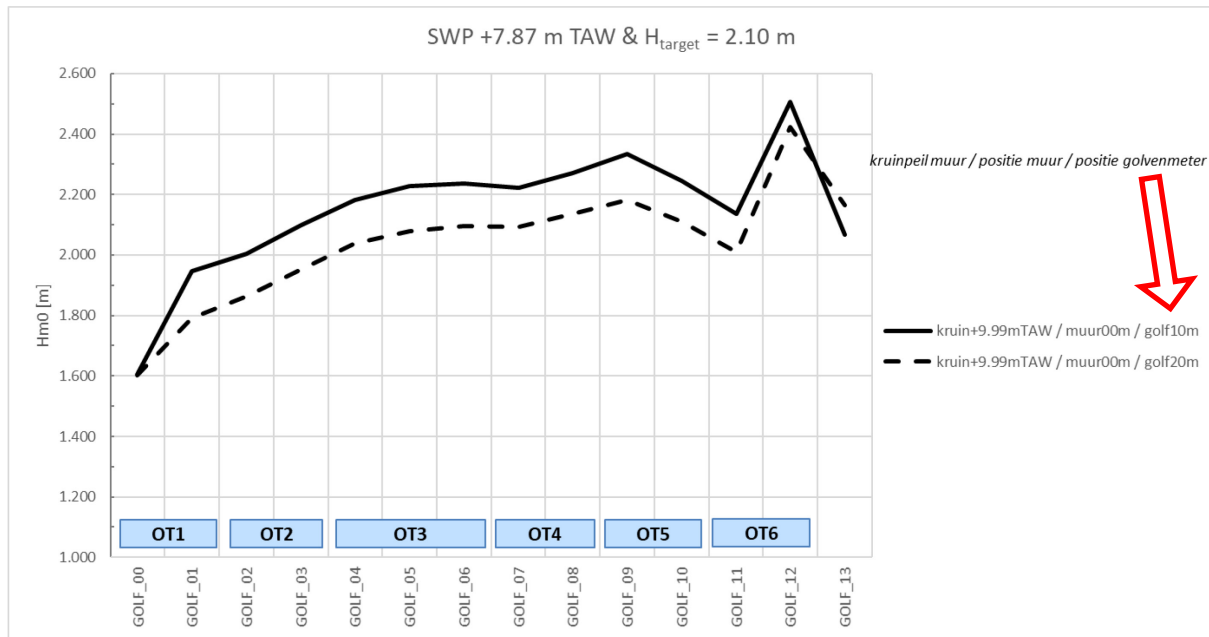


Figuur 15 – Gekalibreerde golfhoogte in zone 3 voor waterstand +7.87 m TAW.



Ter verificatie wordt de invloed van de positie van de golvenmeters (zie ook Figuur 3) op de gemeten golfhoogte voor de kaaimuur onderzocht in Figuur 16. Bij identieke proeven (= identieke golftreinen opgelegd aan het golfshot, dus **gelijke invallende golfhoogte**) wordt op 20 m voor de kaaimuur een lagere totale golfhoogte opgemeten dan op 10 m. Dit verschil is een gevolg van de reflectie aan de stormmuur. Zoals hoger vermeld wordt de analyse uitgevoerd met de golfhoogte gemeten op 10 m voor de kaaimuur, maar de lezer wordt erop gewezen dat in de grafieken in §5 soms metingen op 20 m worden voorgesteld.

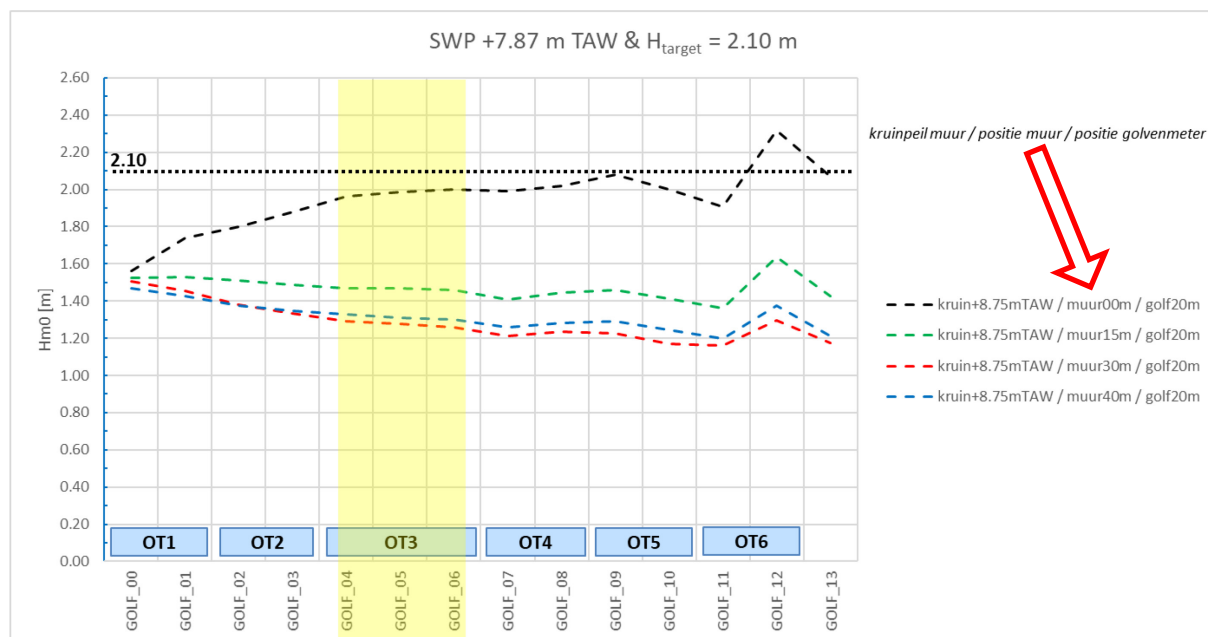
Figuur 16 – Invloed positie golvenmeters op gemeten golfhoogte voor de kaaimuur.



Vermits in de testmatrix de positie van de stormmuur op het kaaivlak een belangrijke parameter is, wordt ter verificatie de invloed ervan op de gemeten golfhoogte voor de kaaimuur onderzocht in Figuur 17. Bij identieke proeven (= identieke golftreinen opgelegd aan het golfshot, dus **gelijke invallende golfhoogte**) met verschillende posities van de stormmuur wordt een lagere H_{m0} opgemeten bij een breder kaaivlak. De gemeten **totale golfhoogte** is dus kleiner hoewel de invallende golfhoogte gelijk is. Dit is een gevolg van golftransformatieprocessen op het kaaivlak en een verschil in reflectie aan de stormmuur.

Bij de analyse van de resultaten zal gebruik gemaakt worden van de gewenste golfhoogte (die dus gelijk is voor de 4 posities) omdat de lagere gemeten golfhoogte bij bredere kaaivlakken tot een foutieve interpretatie zou leiden.

Figuur 17 – Invloed positie stormmuur op gemeten golfhoogte voor de kaaimuur.

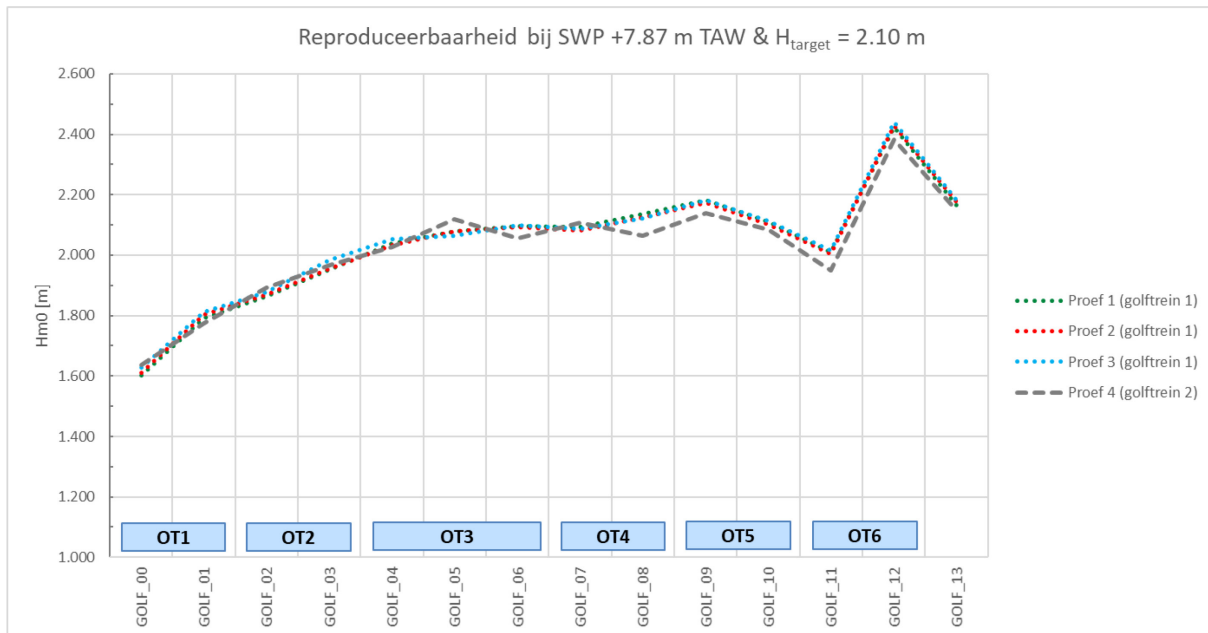


4.2 Validatie reproduceerbaarheid golfhoogte

Ter controle van de reproduceerbaarheid van de golfhoogte voor de kaaimuur wordt een proef met een bepaalde golfconditie 4x uitgevoerd: 3x met een identieke golftrein aan het golfschot en 1x met een andere golftrein met eenzelfde golfspectrum.

De vergelijking wordt voorgesteld in Figuur 18. Hieruit blijkt dat het verschil in golfhoogte beperkt is tot 3%, waaruit kan geconcludeerd worden dat de reproduceerbaarheid zeer goed is.

Figuur 18 – Reproduceerbaarheid golfhoogte.

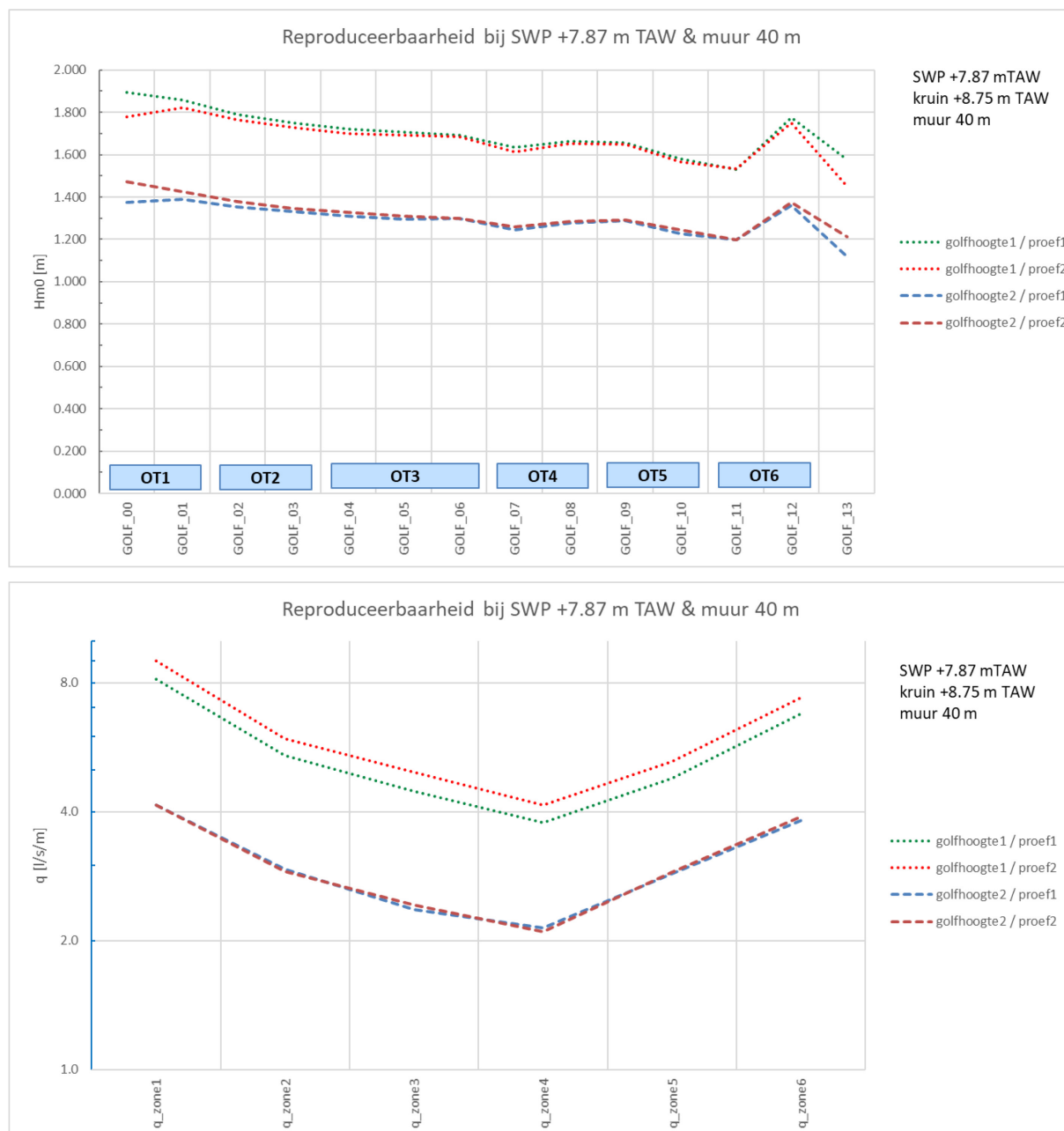


4.3 Validatie reproduceerbaarheid overtopping

Ter controle van de reproduceerbaarheid van het overtoppingsdebiet worden 2 proeven met de stormmuur achteraan op het kaaivlak (muur op 40 m van de voorzijde) elk herhaald. Hiervoor worden 2 proeven geselecteerd met een overtoppingsdebiet tussen 1-10 l/s/m, zijnde de belangrijkste range voor het onderzoek.

De gemeten golfhoogtes en overtoppingsdebieten worden voorgesteld in Figuur 19. Hieruit blijkt dat het verschil in overtoppingsdebiet kleiner is dan 10%, wat een zeer goede reproduceerbaarheid is.

Figuur 19 – Reproduceerbaarheid overtoppingsdebiet.



5 Metingen overtoppingsdebiet

In de testmatrix worden de golfcondities beschreven in §3 gecombineerd met stormmuren zoals beschreven in §2.3. De ingevulde vakjes in Tabel 14 geven aan welke golfcondities met welke stormmuren gecombineerd worden. De testmatrix is geoptimaliseerd naar het overtoppingsdebiet: stormmuren die aanleiding zouden geven tot geen golfovertopping of zeer veel golfovertopping zijn niet beproefd.

De gemeten golfhoogtes voor de kaaimuur en de gemeten gemiddelde overtoppingsdebieten in de 6 zones worden voorgesteld in dit hoofdstuk. Zone 3 die gebruikt wordt voor de verdere analyse, is geel gemarkeerd.

De figuren zijn gegroepeerd per waterstand, en voor elke waterstand worden de proeven per gewenste golfhoogte gegroepeerd in 1 figuur. Zodoende toont elke figuur de invloed van het kruinpeil en de positie van de stormmuur op de gemeten golfhoogte resp. overtoppingsdebiet. Bijkomend wordt ook de positie van de golvenmeters aangegeven; dit is enkel relevant voor de gemeten golfhoogte, niet voor het overtoppingsdebiet. De figuren geven de resultaten weer van de kruinpeilen die op de meeste posities beproefd zijn, zodat ze onderling kunnen vergeleken worden. Alle andere resultaten worden enkel voorgesteld in de samenvatting in §6.

Sommige proeven werden meermaals uitgevoerd om de reproduceerbaarheid te verifiëren (zie §4) maar in deze grafieken wordt slechts 1 proef voorgesteld.

Tabel 12 geeft een overzicht van alle figuren met de metingen die voorgesteld worden in §5.1, §5.2 en §5.3. De bespreking volgt in §6.

In de grafieken is de legende opgebouwd volgens de verklaring in Tabel 13. Dit laat toe om de invloed van het kruinpeil te beoordelen (verschillende lijndiktes) en van de positie van de stormmuur op het kaaivlak (verschillende kleuren). In de grafieken van de golfhoogte kan ook de invloed van de positie van de golvenmeters beoordeeld worden.

Tabel 12 – Overzicht van alle figuren met gemeten golfhoogte en overtopping.

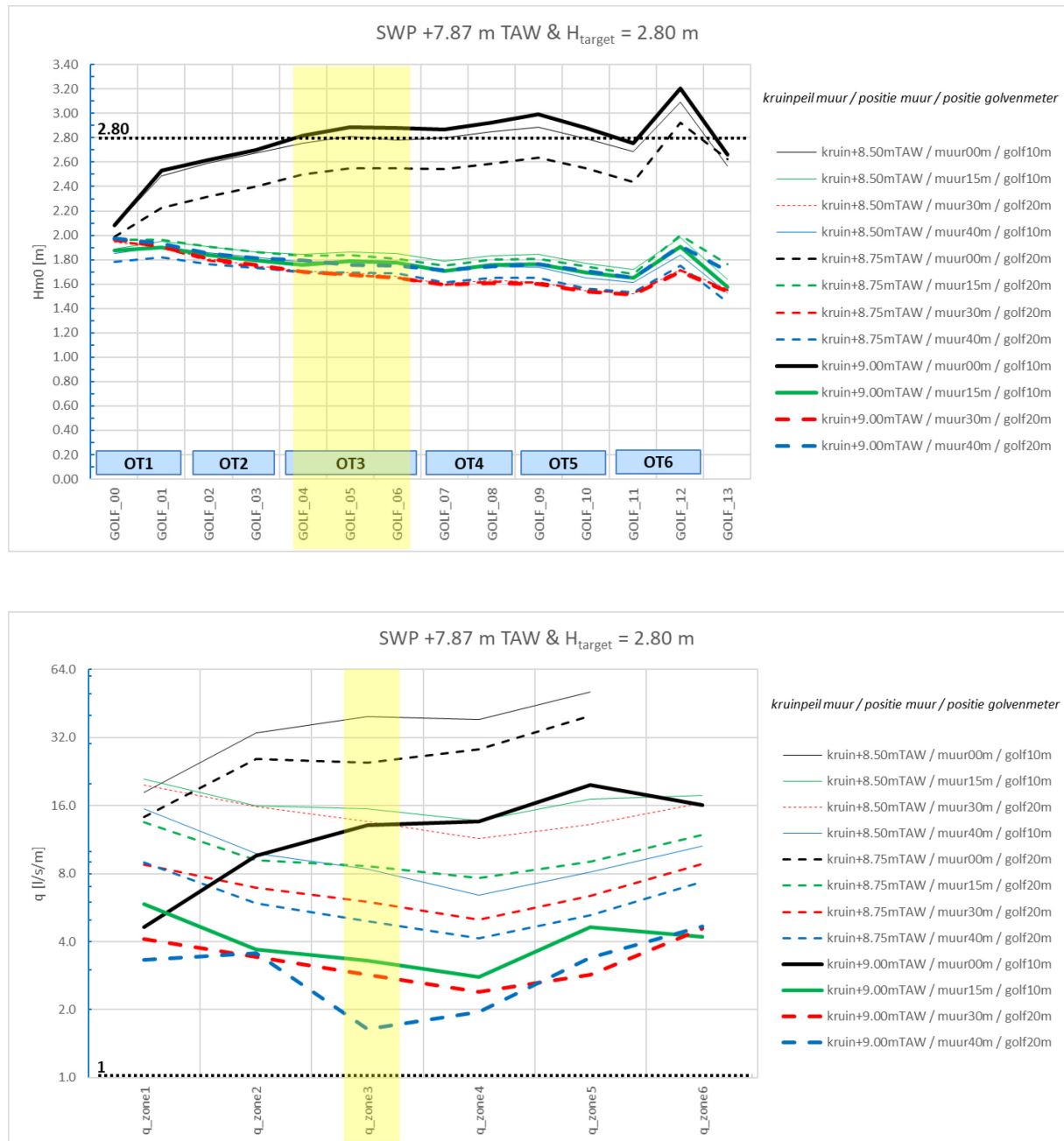
Stilwaterpeil (SWP)	$H_{m0,target}$	Figuur
+7.87 m TAW	2.80 m	§5.1 , Figuur 20
+7.87 m TAW	2.45 m	§5.1 , Figuur 21
+7.87 m TAW	2.10 m	§5.1 , Figuur 22
+7.87 m TAW	1.75 m	§5.1 , Figuur 23
+7.87 m TAW	1.40 m	§5.1 , Figuur 24
+7.29 m TAW	2.80 m	§5.2 , Figuur 25
+7.29 m TAW	2.45 m	§5.2 , Figuur 26
+7.29 m TAW	2.10 m	§5.2 , Figuur 27
+7.29 m TAW	1.75 m	§5.2 , Figuur 28
+7.29 m TAW	1.40 m	§5.2 , Figuur 29
+6.88 m TAW	2.80 m	§5.3 , Figuur 30
+6.88 m TAW	2.45 m	§5.3 , Figuur 31
+6.88 m TAW	2.10 m	§5.3 , Figuur 32
+6.88 m TAW	1.75 m	§5.3 , Figuur 33

Tabel 13 – Overzicht legende in alle figuren met gemeten golfhoogte en overtopping.

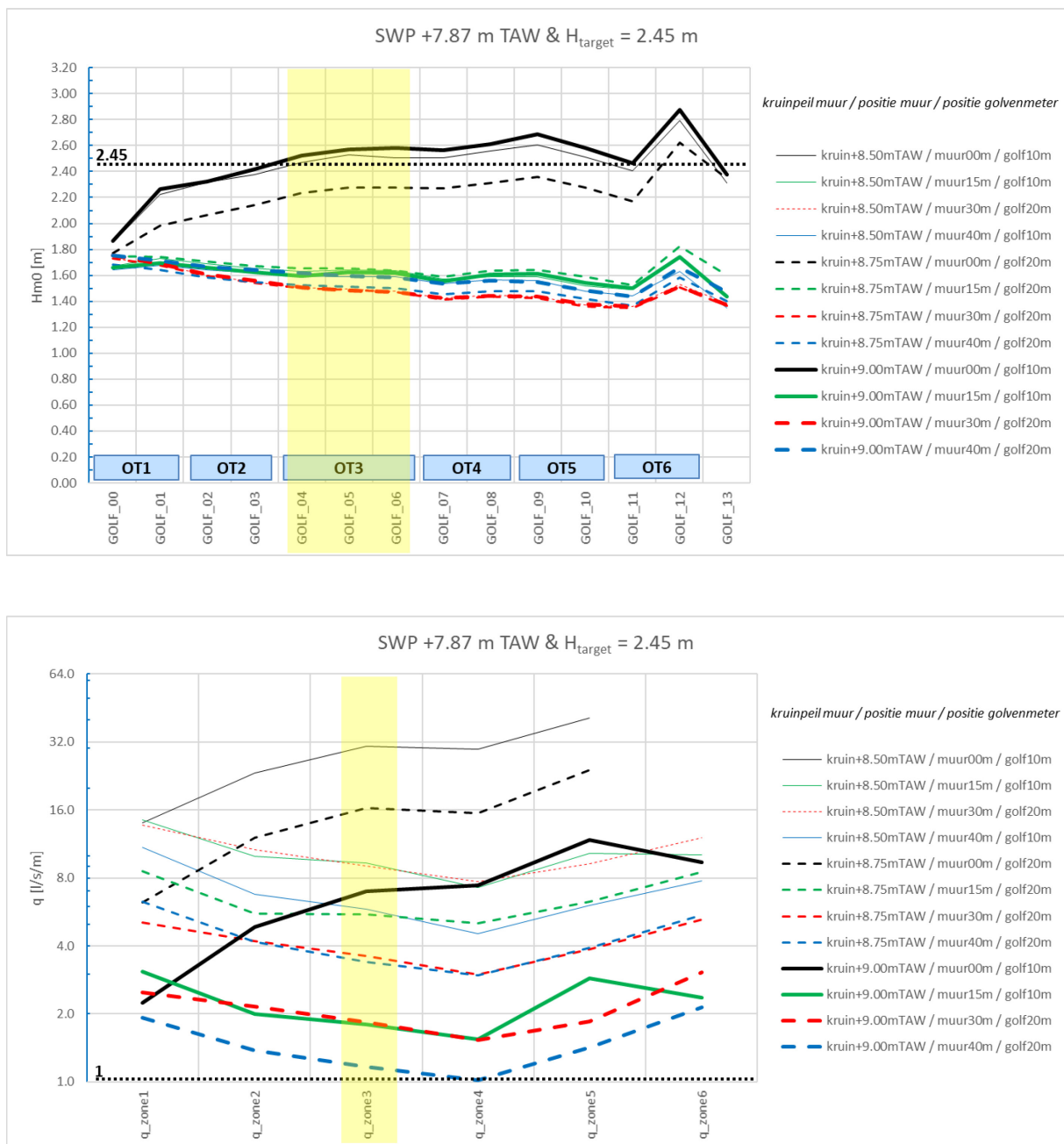
Parameter	Legende
KRUINPEIL MUUR	LIJNDIKTE
kruin+8.50mTAW	
kruin+8.75mTAW	
kruin+9.00mTAW	
POSITIE MUUR	LIJNKLEUR
muur00m	
muur15m	
muur30m	
muur40m	
POSITIE GOLVENMETER	LIJNSOORT
golf10m	
golf20m	

5.1 Proeven met waterstand +7.87 m TAW

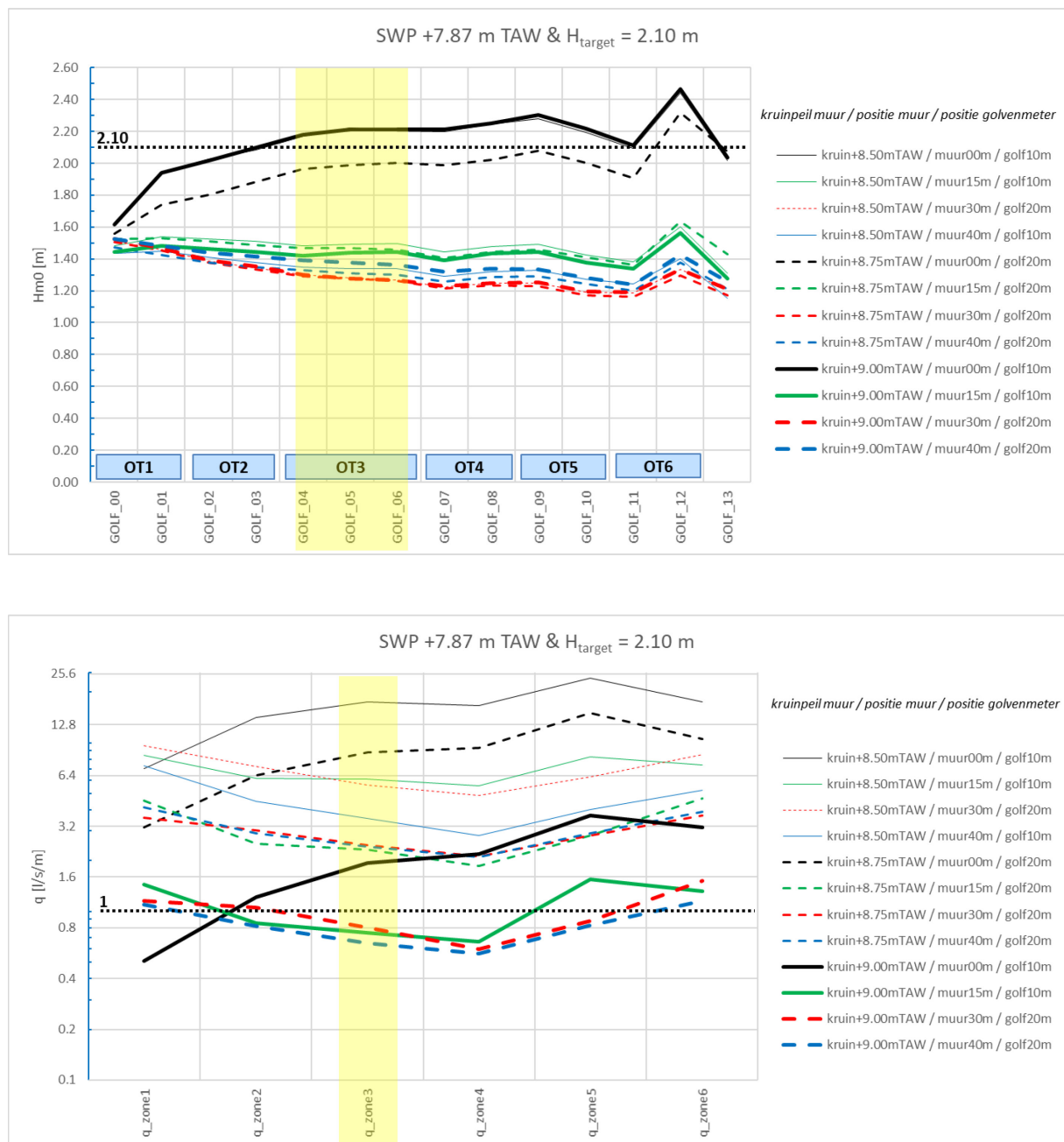
Figuur 20 – Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 2.80$ m

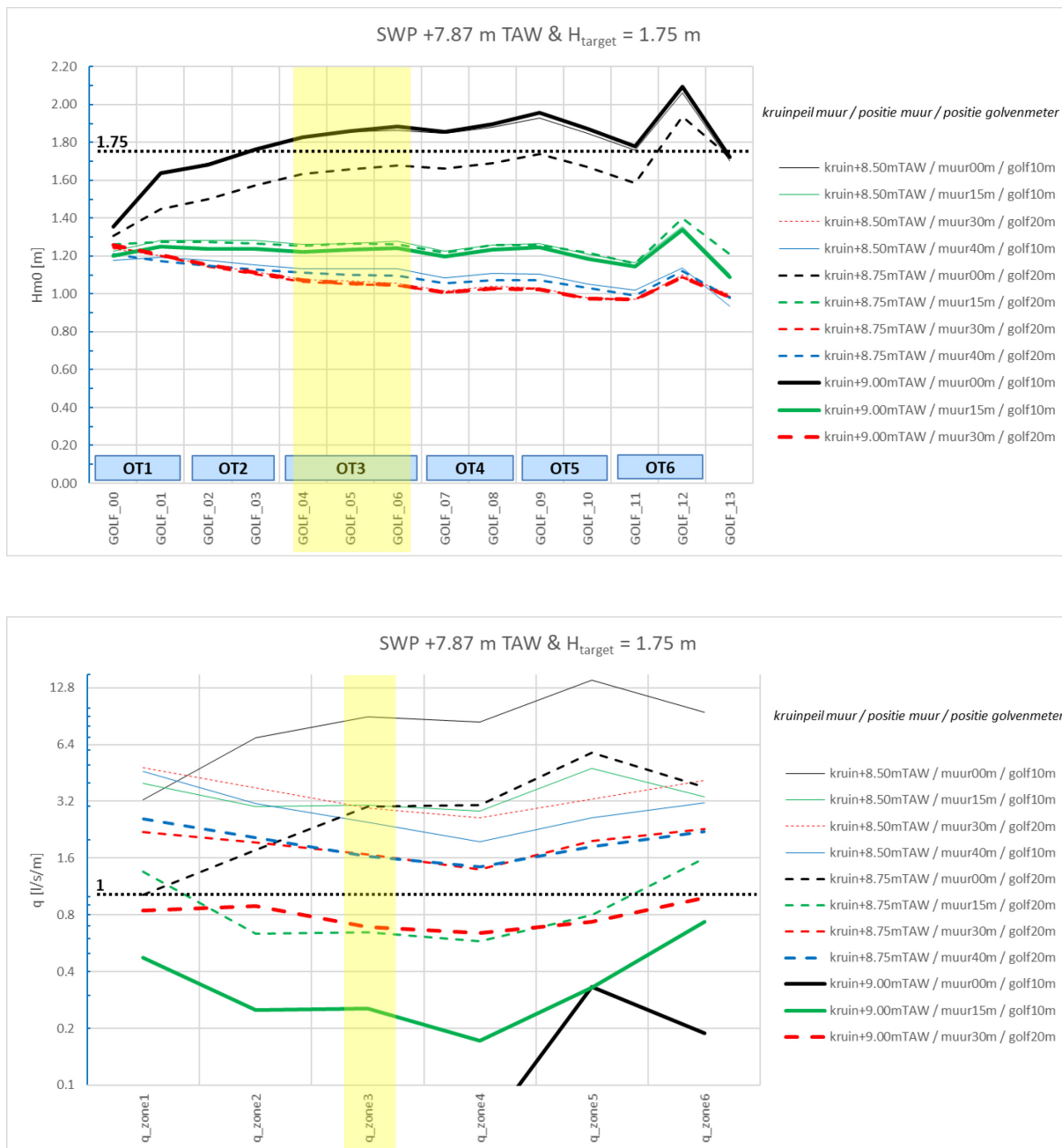


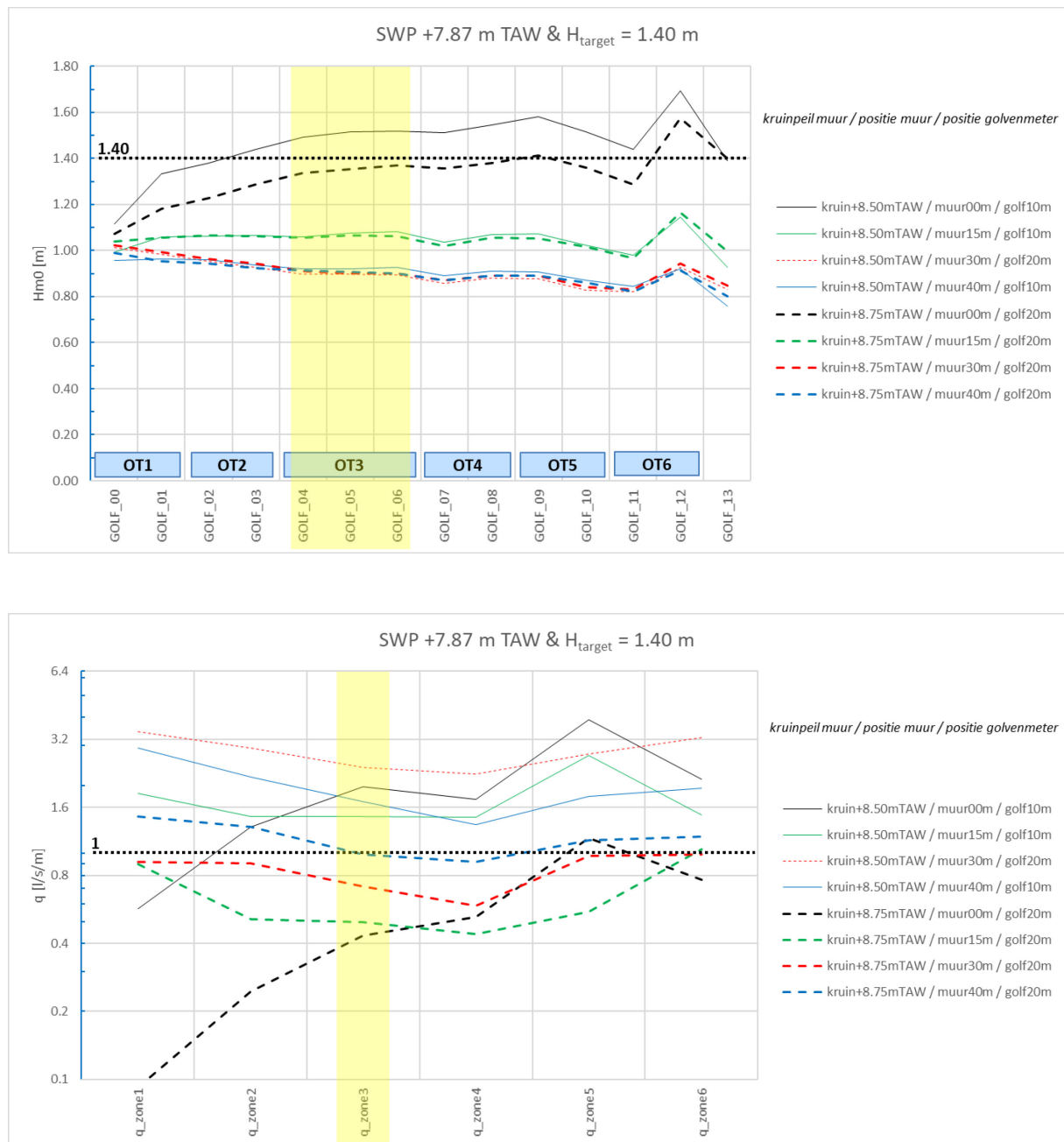
(m) Bij proeven met $q > 20$ l/s/m is er geen meting in zone 6.

Figuur 21 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 2.45$ m

(n) Bij proeven met $q > 20$ l/s/m is er geen meting in zone 6.

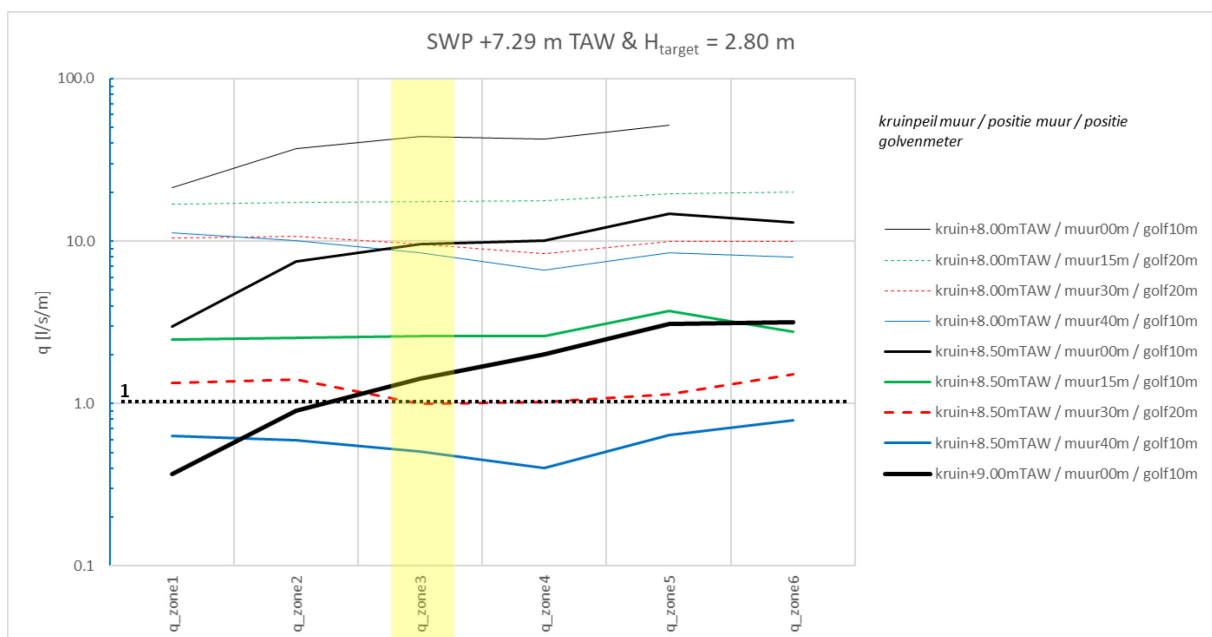
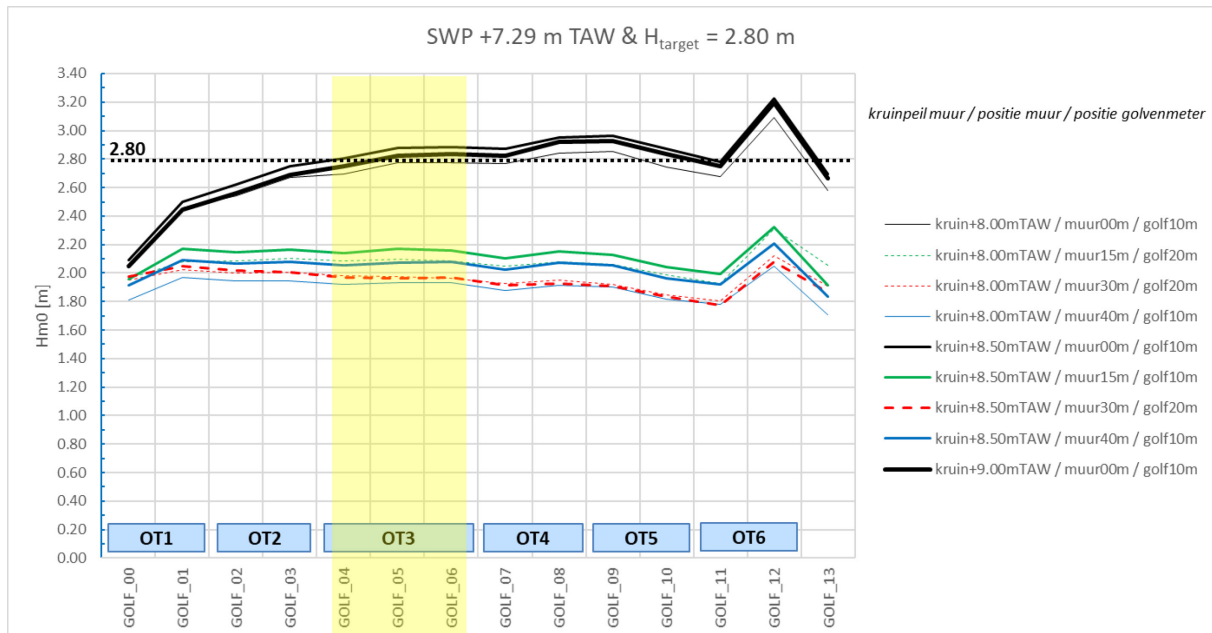
Figuur 22 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 2.10$ m

Figuur 23 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 1.75$ m

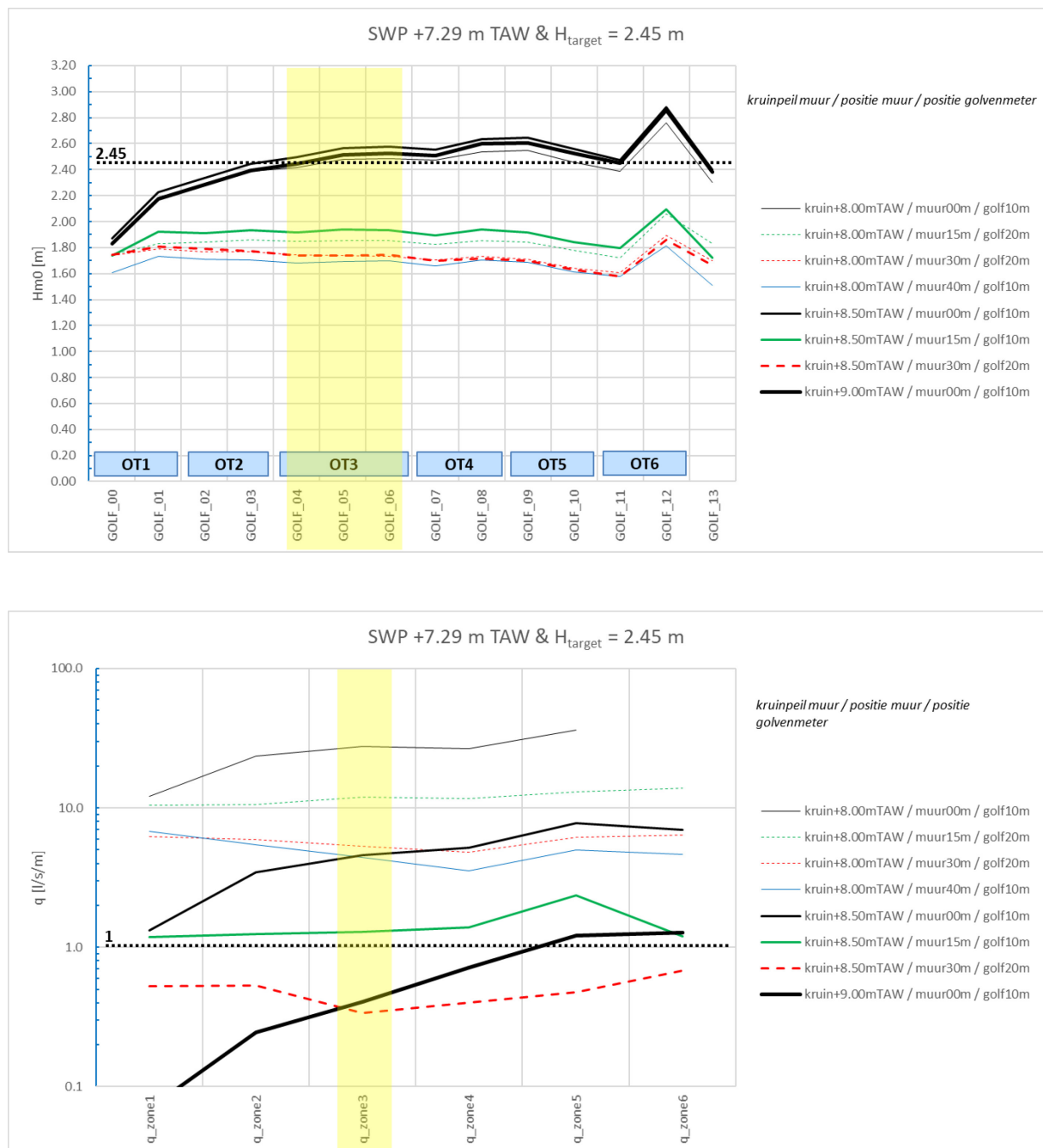
Figuur 24 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.87 m TAW en $H_{m0,target} = 1.40$ m

5.2 Proeven met waterstand +7.29 m TAW

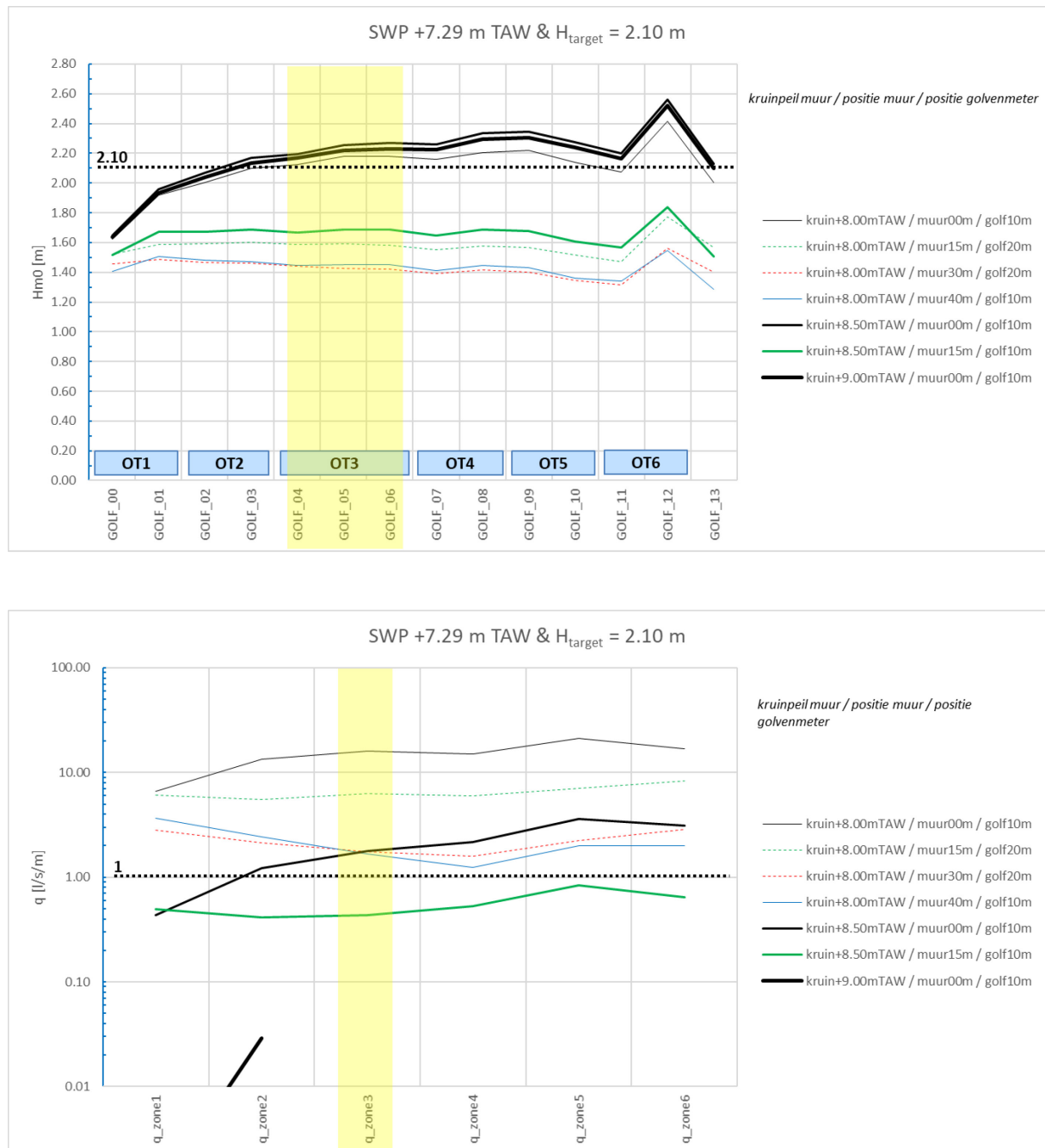
Figuur 25 – Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 2.80$ m

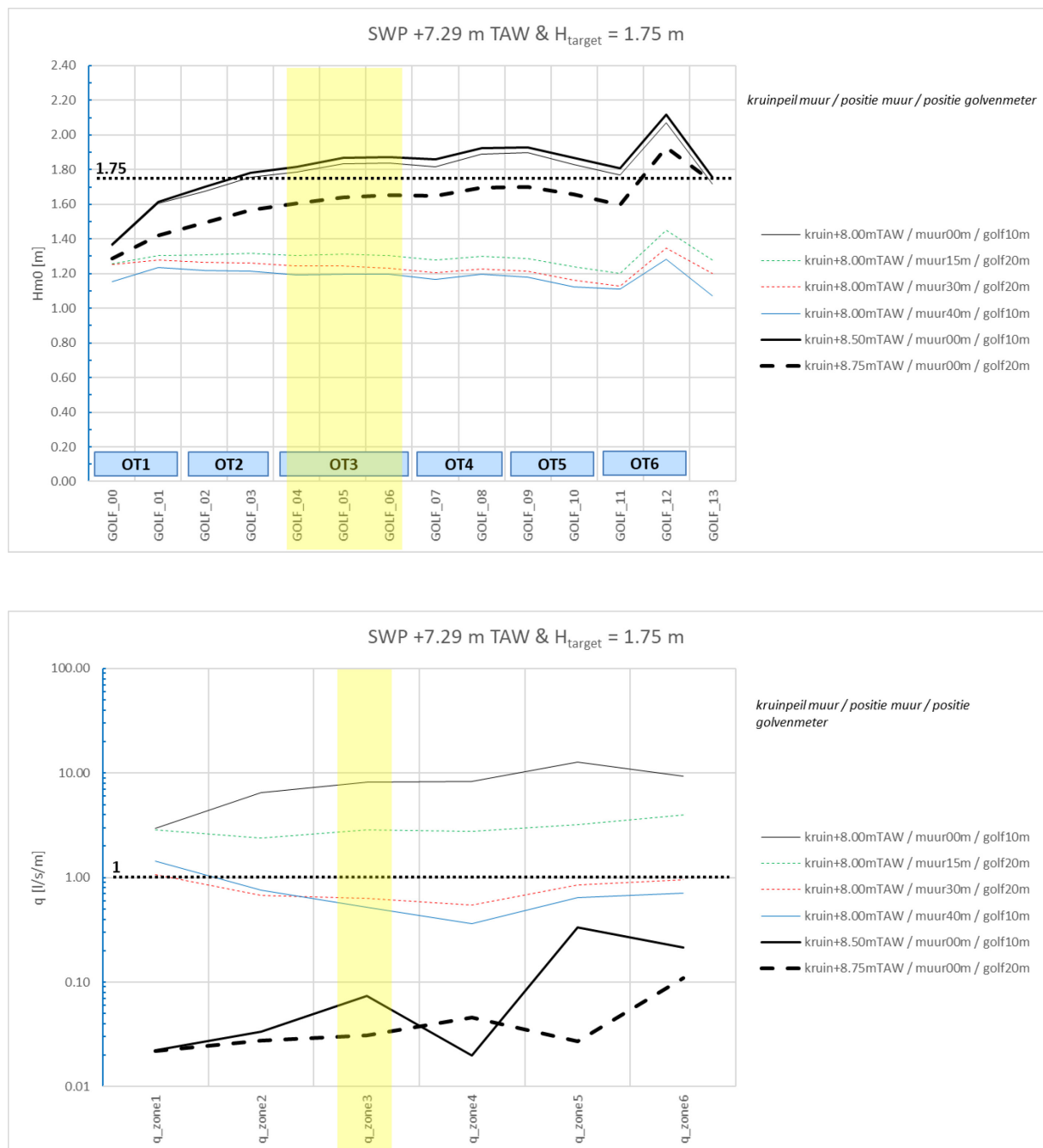


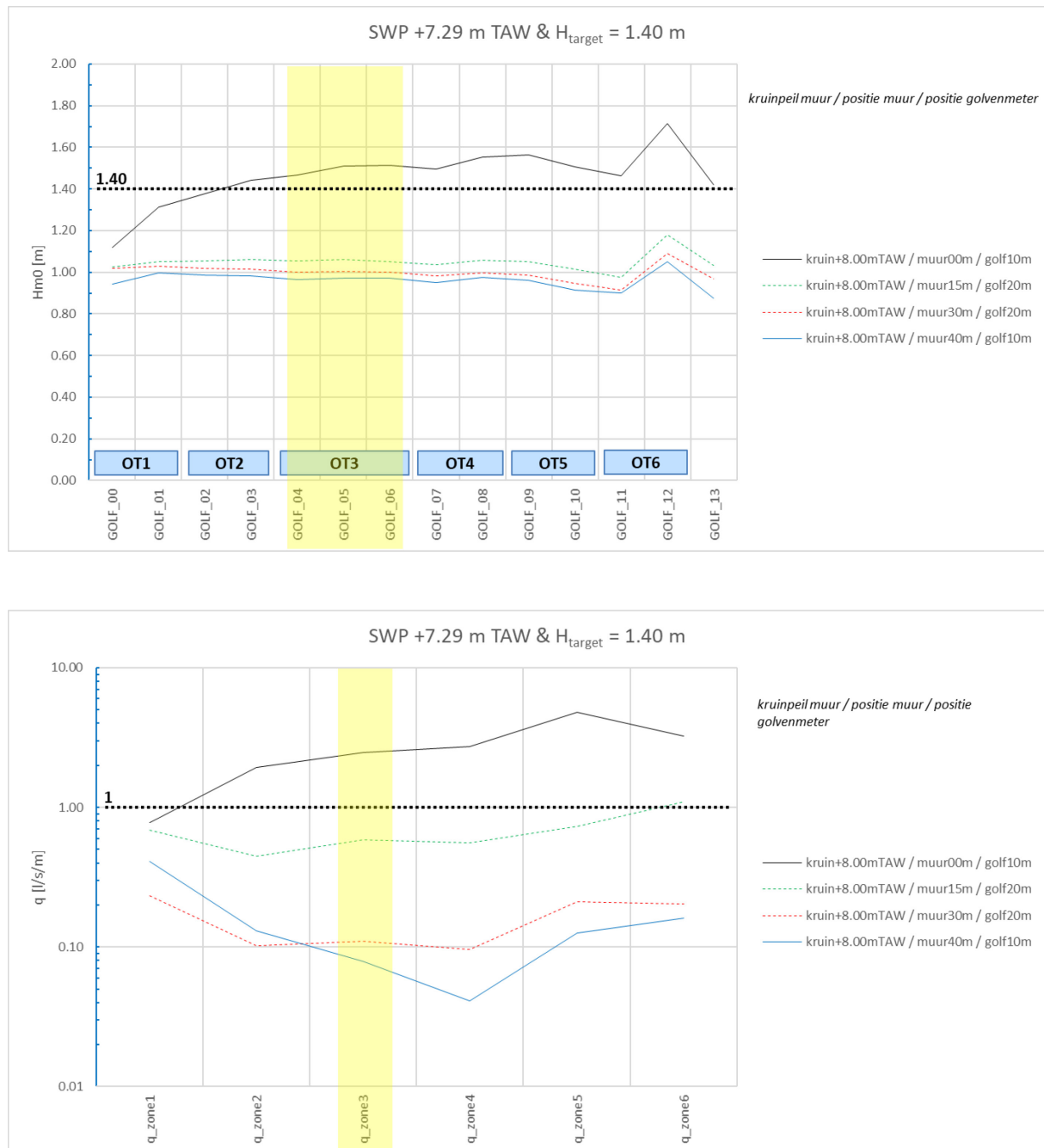
(o) Bij proeven met $q > 20$ l/s/m is er geen meting in zone 6.

Figuur 26 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 2.45$ m

(p) Bij proeven met $q > 20$ l/s/m is er geen meting in zone 6.

Figuur 27 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 2.10$ m

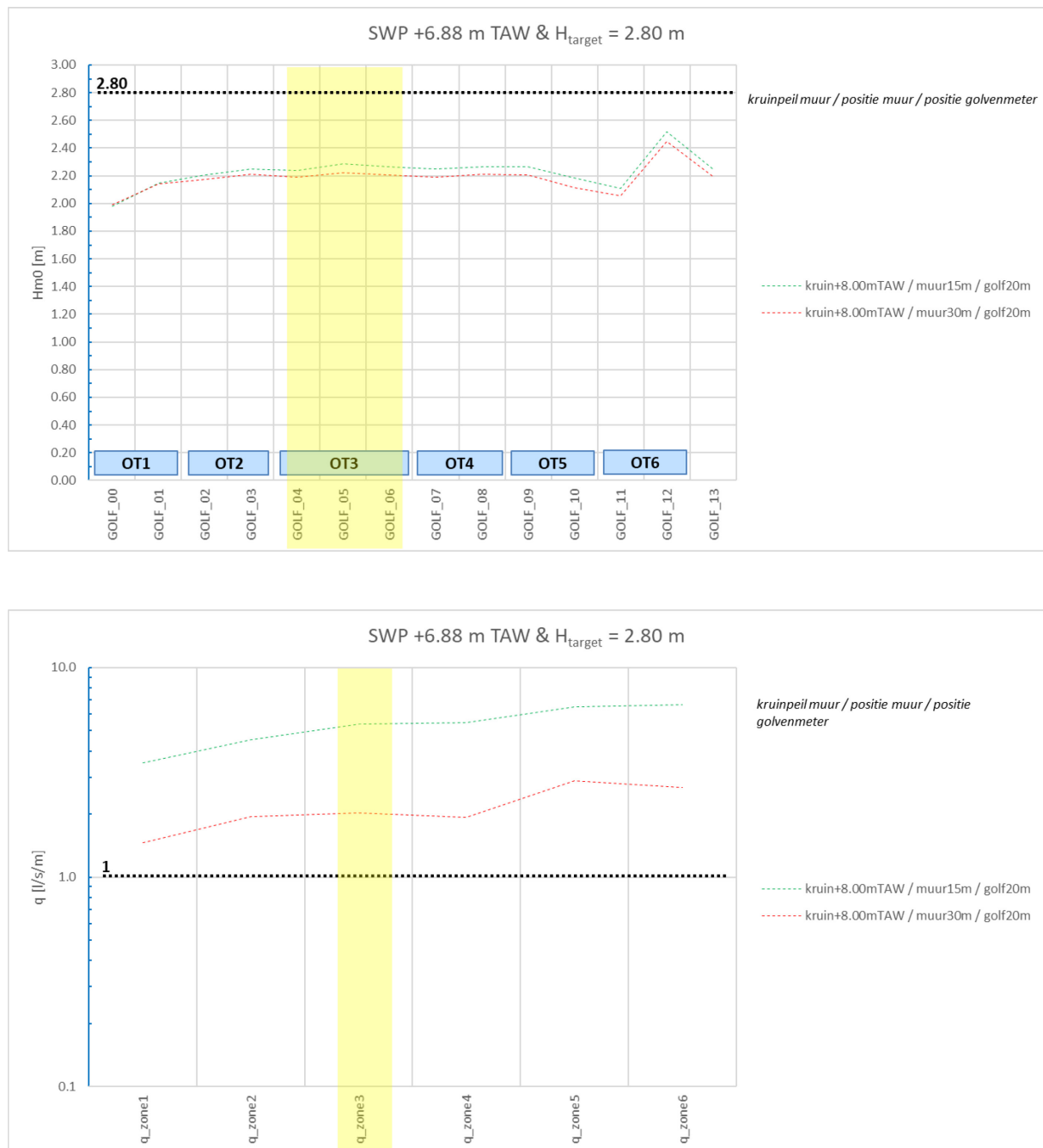
Figuur 28 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 1.75$ m

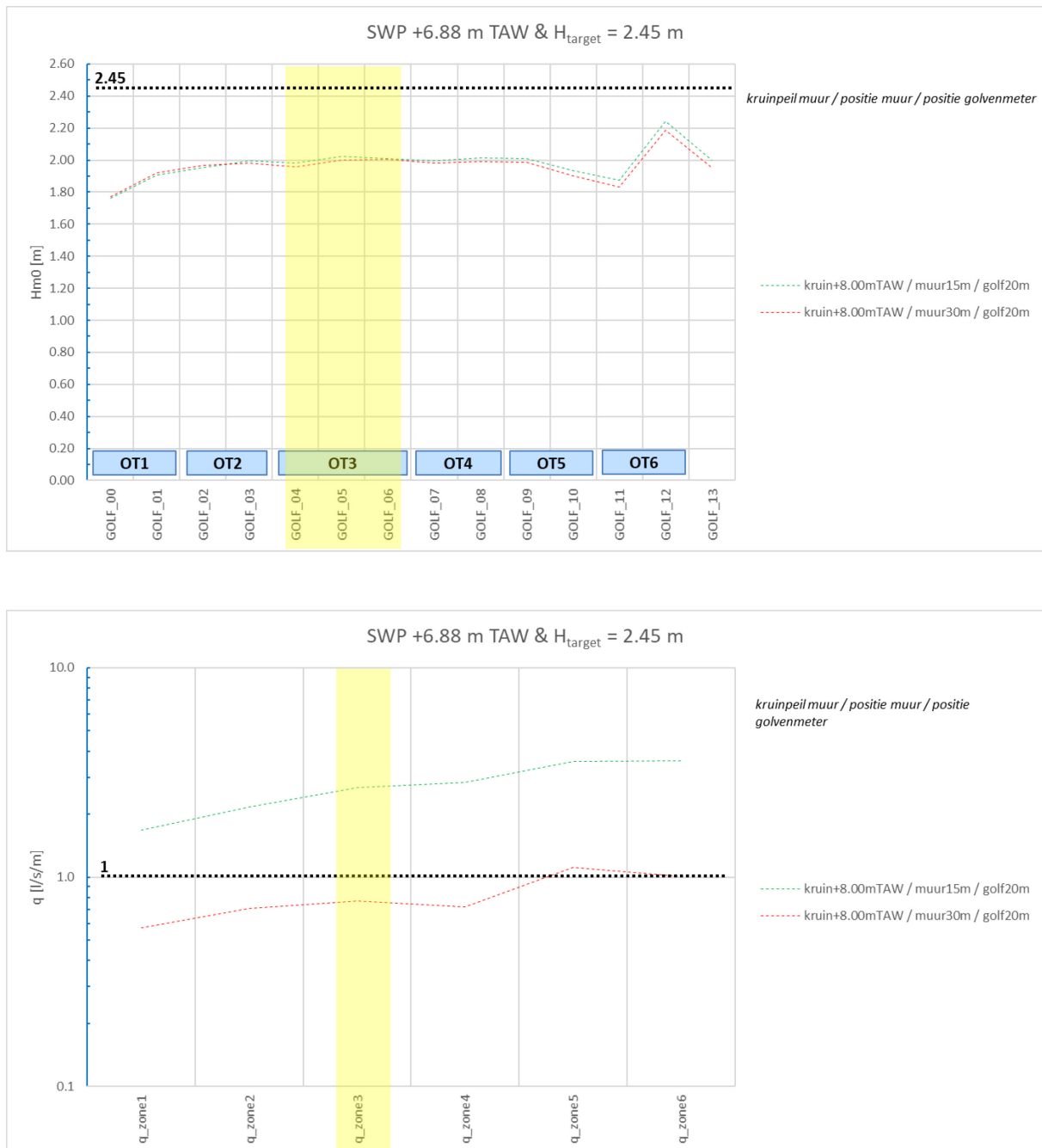
Figuur 29 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +7.29 m TAW en $H_{m0,target} = 1.40$ m

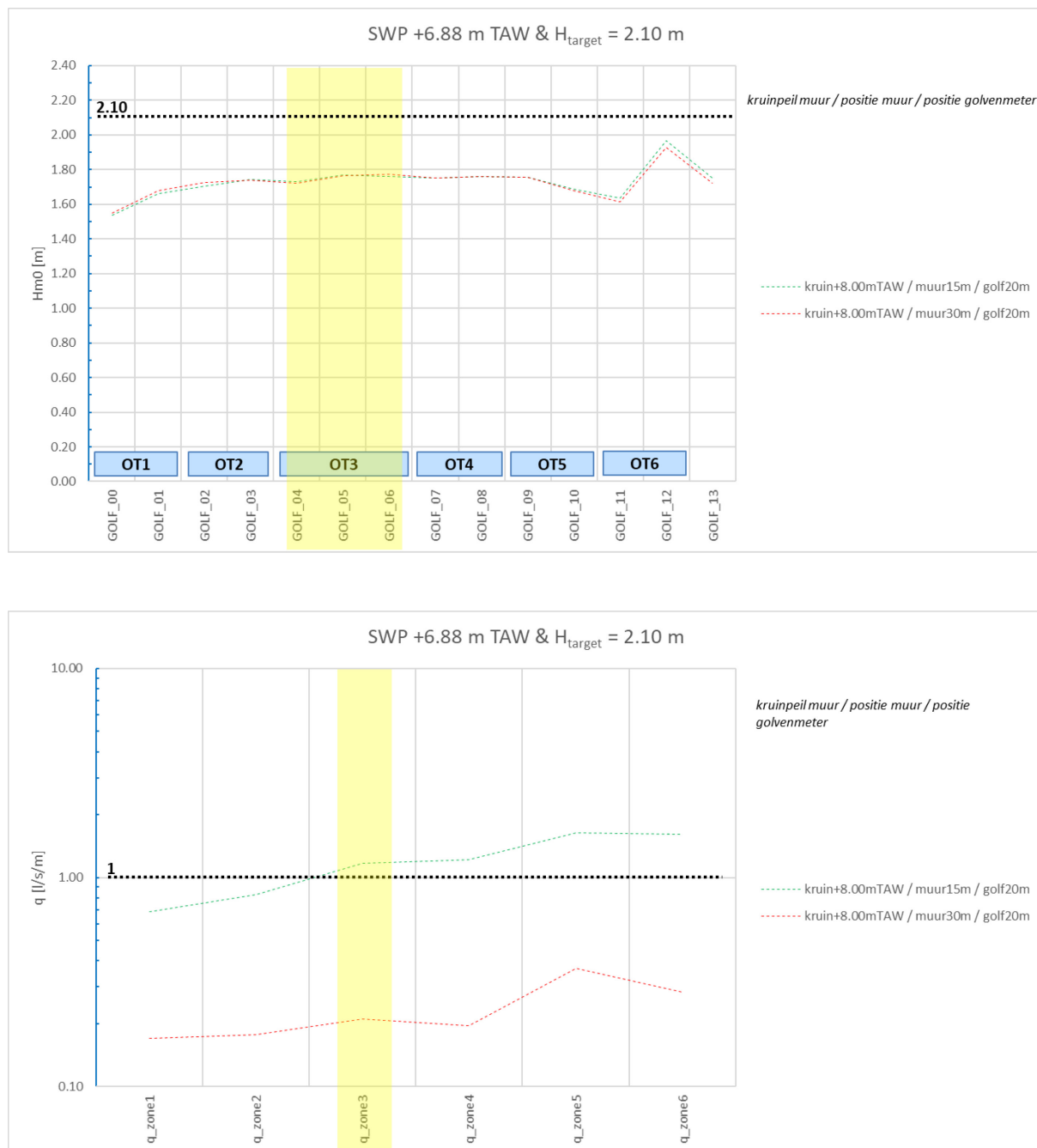
5.3 Proeven met waterstand +6.88 m TAW

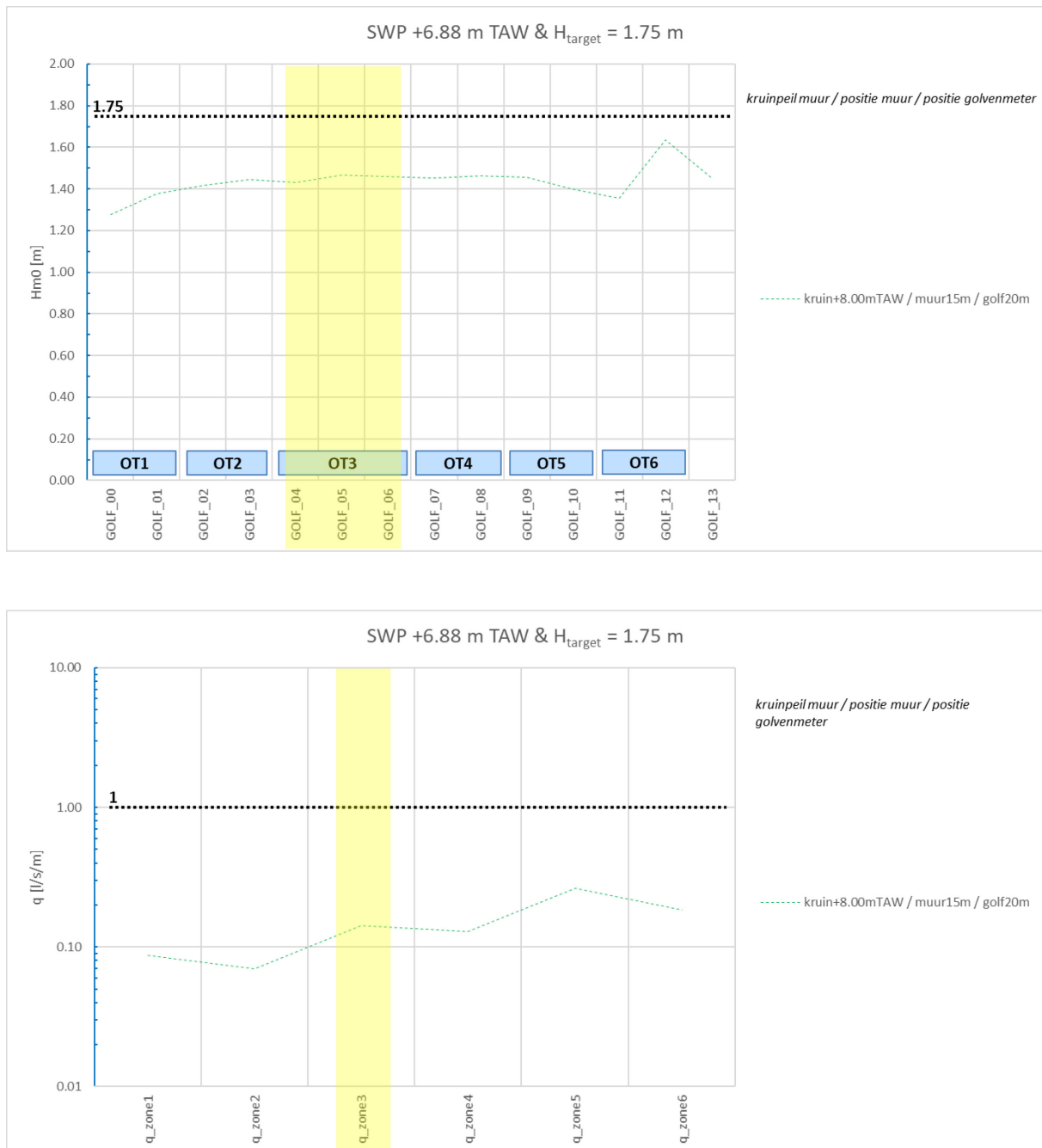
Opmerking: bij waterstand +6.88 m TAW zijn de golfmetingen steeds op 20 m voor de kaaimuur uitgevoerd. Hierdoor lijken in onderstaande figuren de golven steeds te klein maar de gewenste golfhoogte werd wel degelijk gerealiseerd (zie ook §4.1).

Figuur 30 – Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 2.80$ m



Figuur 31 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 2.45$ m

Figuur 32 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 2.10$ m

Figuur 33 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor proeven met waterstand +6.88 m TAW en $H_{m0,target} = 1.75$ m

6 Bespreking overtoppingsdebieten

6.1 Resultaten overtoppingsproeven

De golfgeneratie werd gekalibreerd zodat $H_{m0,target}$ gerealiseerd wordt in zone 3 wanneer de stormmuur op de rand van het kaaivlak staat ("muur 0 m") en H_{m0} gemeten wordt op 10 m voor de kaaimuur. De grafieken in §5.1, §5.2 en §5.3 tonen duidelijk aan dat $H_{m0,target}$ steeds gehaald wordt en maximaal 10 cm overschreden wordt ($H_{m0,target} \leq H_{m0} \leq H_{m0,target} + 10 \text{ cm}$). Bij identieke proeven (gelijke invallende golfhoogte) met andere posities van de stormmuur en/of golvenmeters wordt een lagere totale golfhoogte opgemeten (in de grafieken liggen de zwarte lijnen hoger dan de gekleurde lijnen, en de groene lijnen hoger dan de rode en blauwe lijnen), maar dit heeft enkel te maken met golftransformatieprocessen op het kaaivlak en een verschil in reflectie aan de stormmuur. De verschillen in het overtoppingsdebiet zijn enkel te wijten aan de verschillen in geometrie (stormmuur), en niet aan de verschillende gemeten golfhoogtes (alle proeven hebben immers dezelfde invallende golven¹¹).

Omwillen van de duidelijkheid wordt verder **in de analyse in dit rapport steeds $H_{m0,target}$ vermeld** i.p.v. de gemeten H_{m0} tijdens de proef van het gerapporteerde overtoppingsdebiet.

Figuur 34, Figuur 35 en Figuur 36 geven per waterstand een overzicht van alle metingen in zone 3 (dus alle geel gemarkeerde metingen uit Figuur 20 tot Figuur 33).

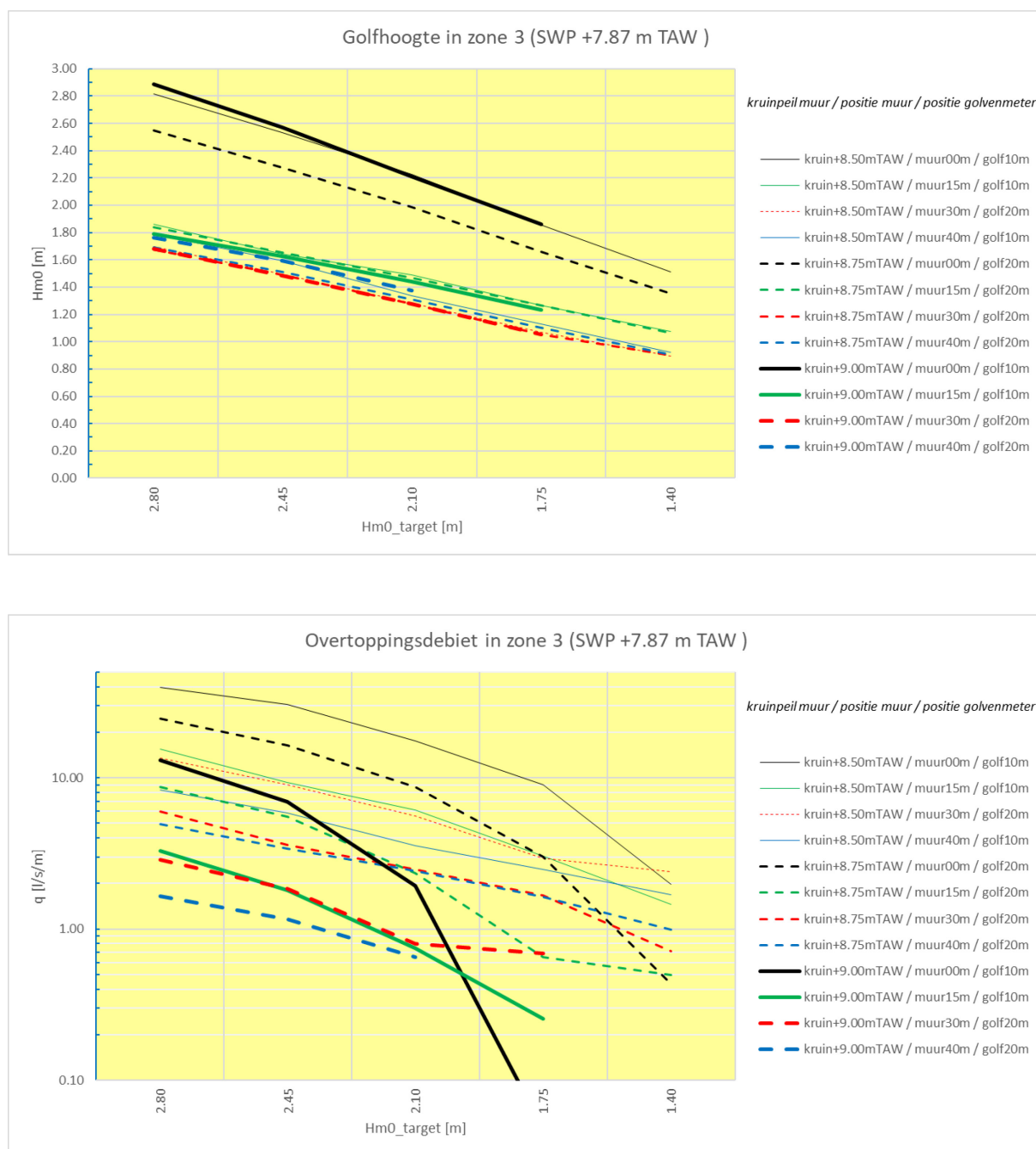
Tabel 14 geeft een overzicht van het overtoppingsdebiet van alle proeven, in functie van het kruinpeil en de positie van de stormmuur, en dit voor de 3 geteste waterstanden in combinatie met de 5 geselecteerde golfhoogtes. Voor de leesbaarheid is $q \leq 1 \text{ l/s/m}$ groen gemarkeerd, $q \leq 10 \text{ l/s/m}$ lichtoranje en $q > 10 \text{ l/s/m}$ donkeroranje. Alle groen gemarkeerde overtoppingsdebieten voldoen aan het veiligheids criterium 1 l/s/m .

Deze Tabel 14 dient als volgt gelezen: bij een bepaalde waterstand en golfhoogte voor de kaaimuur geeft een stormmuur met een zeker kruinpeil en kaaivlak vóór de muur aanleiding tot de getabelleerde overtopping. Of omgedraaid: bij een bepaalde waterstand en golfhoogte voor de kaaimuur kan een stormmuur gekozen worden die het overtoppingsdebiet beperkt tot een bepaalde waarde.

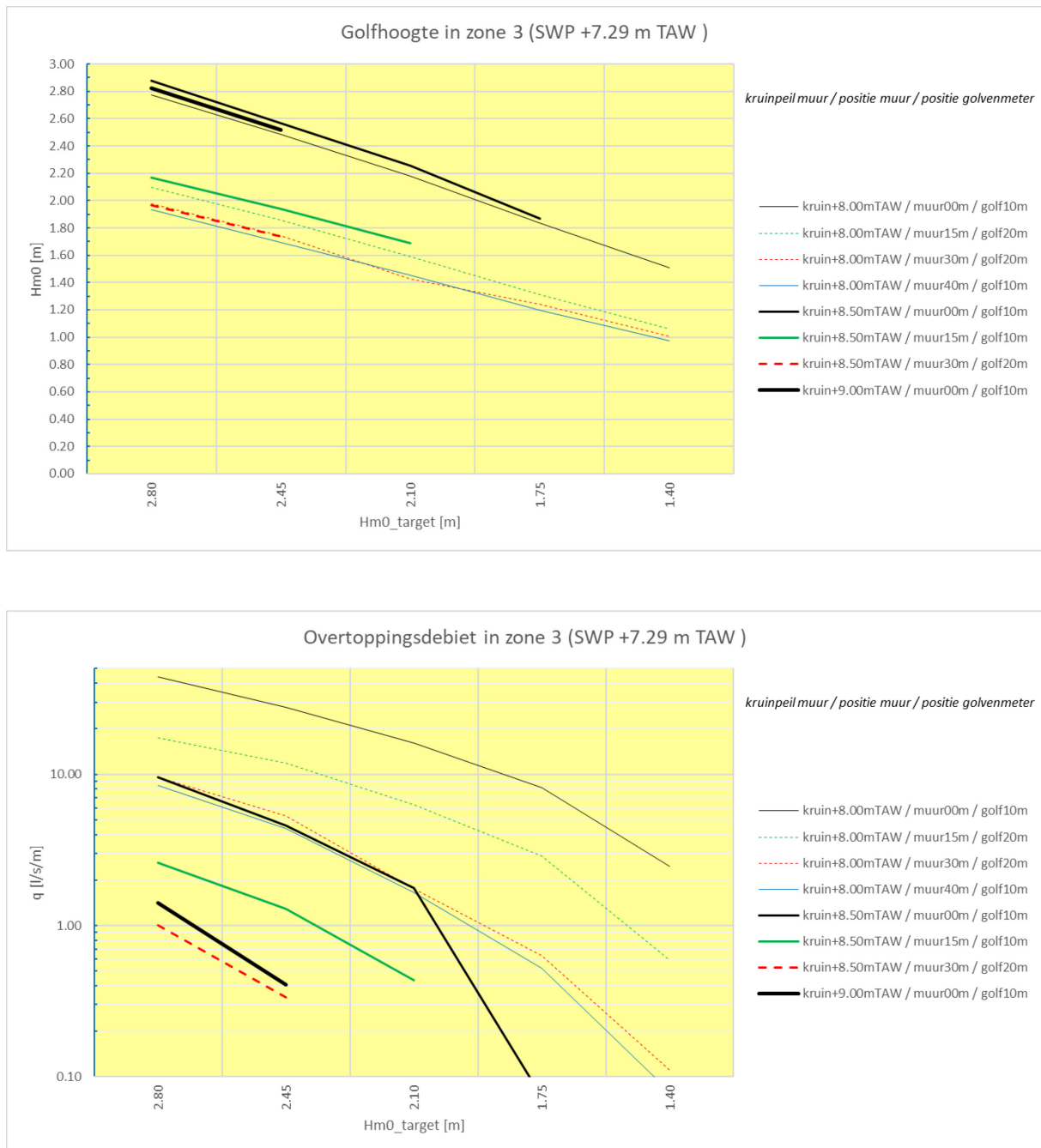
Tabel 15 geeft de gemeten golfhoogte in zone 3 weer van alle proeven waarvan het overtoppingsdebiet in Tabel 14 staat. Dit is enkel ter verificatie van de gewenste golfhoogte. De kleur in de tabel geeft de positie van de golfmeting aan. Voor interpretatie wordt uitdrukkelijk verwezen naar §4.1: de breedte van het kaaivlak en de positie van de golfmeting beïnvloeden de opgemeten golfhoogte terwijl de invallende golfhoogte identiek is aan de overeenkomstige proef met de muur vooraan op het kaaivlak ("muur 0 m"). Zoals gesteld in §4.1 is met "muur 0 m" de golfhoogte op 10 m (blauw) gelijk of een beetje groter (tot 5% groter) dan de gewenste significante golfhoogte.

¹¹ De opgelegde golven aan het golfschot zijn gelijk, maar er zijn kleine verschillen in golfreflectie in het schaalmodel. Hierdoor ontstaan minimale verschillen in de golven in het schaalmodel (modeleffect) die niet significant zijn. Zodoende kan gesteld worden dat de invallende golven gelijk zijn.

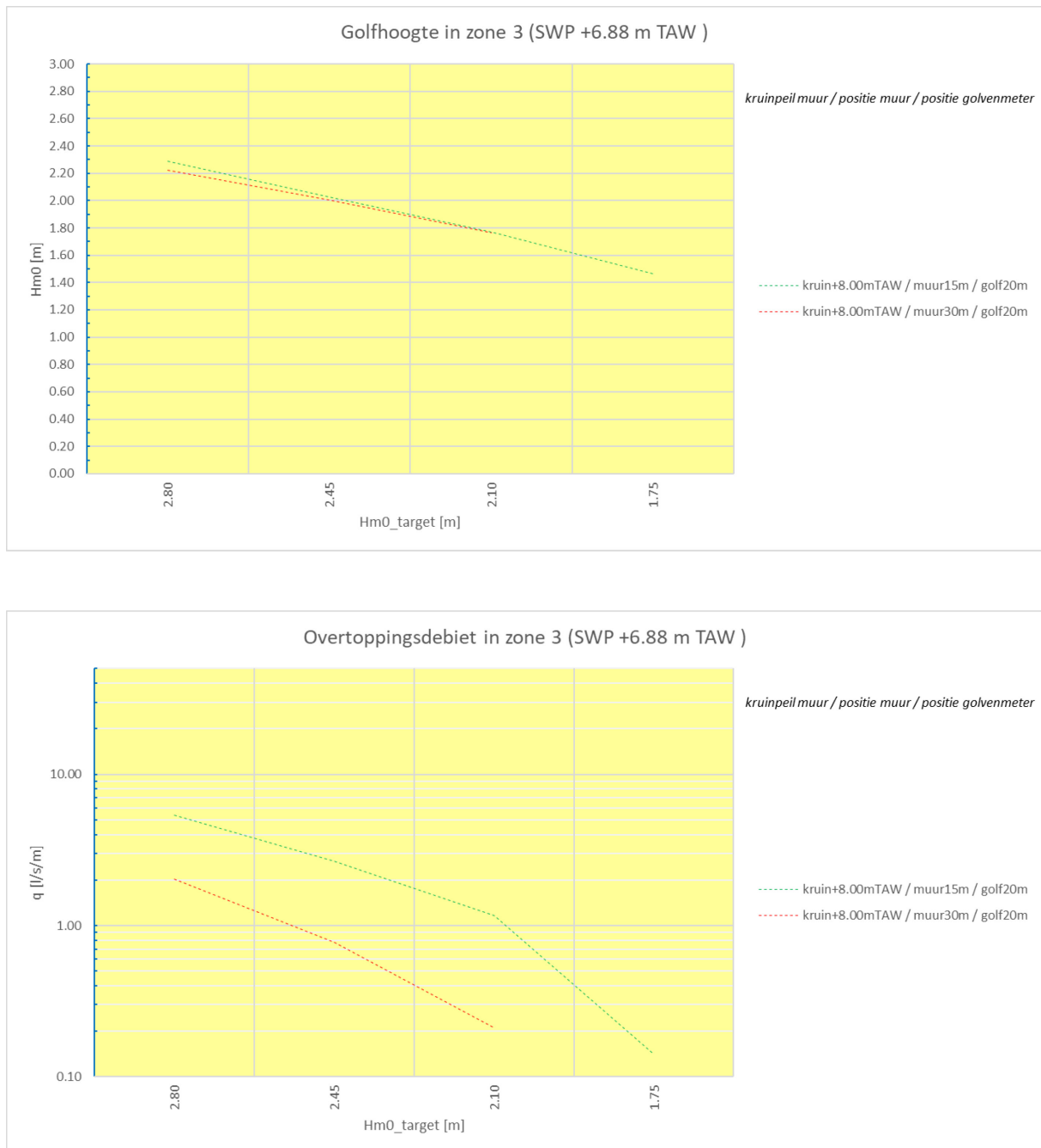
Figuur 34 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor alle proeven met waterstand +7.87 m TAW (zone 3).



Figuur 35 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor alle proeven met waterstand +7.29 m TAW (zone 3).



Figuur 36 - Gemeten golfhoogte en overtopping voor alle proeven met waterstand +6.88 m TAW (zone 3).



Tabel 14 – Gemeten overtoppingsdebieten voor alle proeven (zone 3).

SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW				
Hm0 = 2.80m					Hm0 = 2.80m					Hm0 = 2.80m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]				
+9.63	1.5				+9.63					+9.63				
+9.38	3.5	0.9		0.5	+9.38					+9.38				
+9.00	13.1	3.3	2.9	1.6	+9.00	1.4				+9.00				
+8.75	24.8	8.7	6.0	4.9	+8.75	5.6				+8.75				
+8.50	39.7	15.5	13.6	8.4	+8.50	9.6	2.6	1.0	0.5	+8.50				
+8.00					+8.00	44.1	17.4	9.6	8.5	+8.00	5.4	2.0		
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW				
Hm0 = 2.45m					Hm0 = 2.45m					Hm0 = 2.45m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]				
+9.63					+9.63					+9.63				
+9.38	1.0	0.4		0.4	+9.38					+9.38				
+9.00	7.0	1.8	1.8	1.2	+9.00	0.4				+9.00				
+8.75	16.4	5.5	3.6	3.4	+8.75	1.6				+8.75				
+8.50	30.6	9.3	9.0	5.8	+8.50	4.6	1.3	0.3		+8.50				
+8.00					+8.00	27.7	11.9	5.3	4.4	+8.00	2.7	0.8		
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW				
Hm0 = 2.10m					Hm0 = 2.10m					Hm0 = 2.10m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]				
+9.63					+9.63					+9.63				
+9.38		0.3			+9.38					+9.38				
+9.00	1.9	0.7	0.8	0.6	+9.00	0.0				+9.00				
+8.75	8.7	2.3	2.5	2.4	+8.75	0.6				+8.75				
+8.50	17.5	6.1	5.6	3.6	+8.50	1.8	0.4			+8.50				
+8.00					+8.00	16.1	6.3	1.7	1.7	+8.00	1.2	0.2		
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW				
Hm0 = 1.75m					Hm0 = 1.75m					Hm0 = 1.75m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]				
+9.63					+9.63					+9.63				
+9.38		0.1			+9.38					+9.38				
+9.00	0.0	0.3	0.7		+9.00	0.0				+9.00				
+8.75	3.0	0.6	1.7	1.6	+8.75	0.0				+8.75				
+8.50	9.0	3.0	2.9	2.5	+8.50	0.1				+8.50				
+8.00					+8.00	8.2	2.9	0.6	0.5	+8.00	0.1			
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW				
Hm0 = 1.40m					Hm0 = 1.40m					Hm0 = 1.40m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]				
+9.63					+9.63					+9.63				
+9.38					+9.38					+9.38				
+9.00		0.2	0.6		+9.00					+9.00				
+8.75	0.4	0.5	0.7	1.0	+8.75					+8.75				
+8.50	2.0	1.5	2.4	1.7	+8.50					+8.50				
+8.00					+8.00	2.5	0.6	0.1	0.1	+8.00				

(q) Proef met SWP +7.87 m TAW, H_{m0} 1.75 m, kruinpeil +8.75 m TAW en kaaivlak 15 m: het gemeten debiet lijkt een uitschieter en wordt geschrapt.

Tabel 15 – Gemeten golfhoogte voor alle proeven (zone 3).

					BLAUW = golfhoogte op 10 m voor kaaimuur (golf10m")					ROOD = golfhoogte op 20 m voor kaaimuur (golf20m")									
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW									
Hm0 = 2.80m					Hm0 = 2.80m					Hm0 = 2.80m									
Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]								
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40					
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]									
+9.63	2.87				+9.63					+9.63									
+9.38	2.88	1.83		1.74	+9.38					+9.38									
+9.00	2.88	1.79	1.68	1.76	+9.00	2.83				+9.00									
+8.75	2.55	1.84	1.67	1.69	+8.75	2.31				+8.75									
+8.50	2.81	1.86	1.70	1.79	+8.50	2.88	2.17	1.96	2.07	+8.50									
+8.00					+8.00	2.77	2.10	1.98	1.93	+8.00									
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW									
Hm0 = 2.45m					Hm0 = 2.45m					Hm0 = 2.45m									
Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]								
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40					
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]									
+9.63					+9.63					+9.63									
+9.38	2.56	1.64		1.57	+9.38					+9.38									
+9.00	2.57	1.63	1.48	1.60	+9.00	2.52				+9.00									
+8.75	2.27	1.66	1.49	1.51	+8.75	2.22				+8.75									
+8.50	2.53	1.64	1.49	1.59	+8.50	2.57	1.94	1.74		+8.50									
+8.00					+8.00	2.48	1.86	1.74	1.69	+8.00									
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW									
Hm0 = 2.10m					Hm0 = 2.10m					Hm0 = 2.10m									
Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]								
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40					
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]									
+9.63					+9.63					+9.63									
+9.38		1.48			+9.38					+9.38									
+9.00	2.21	1.44	1.28	1.38	+9.00	2.22				+9.00									
+8.75	1.99	1.47	1.28	1.31	+8.75	1.98				+8.75									
+8.50	2.22	1.49	1.28	1.34	+8.50	2.26	1.69			+8.50									
+8.00					+8.00	2.18	1.59	1.43	1.45	+8.00									
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW									
Hm0 = 1.75m					Hm0 = 1.75m					Hm0 = 1.75m									
Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]								
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40					
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]									
+9.63					+9.63					+9.63									
+9.38					+9.38					+9.38									
+9.00	1.86	1.23	1.06		+9.00					+9.00									
+8.75	1.66	1.27	1.05	1.10	+8.75	1.64				+8.75	1.64								
+8.50	1.86	1.27	1.07	1.13	+8.50	1.87				+8.50	1.87								
+8.00					+8.00	1.83	1.31	1.24	1.20	+8.00									
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.29 m TAW					SWP = +6.88 m TAW									
Hm0 = 1.40m					Hm0 = 1.40m					Hm0 = 1.40m									
Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]				Hm0 [m]	breedte kaaivlak [m]								
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40					
kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]					kruinpeil [mTAW]									
+9.63					+9.63					+9.63									
+9.38					+9.38					+9.38									
+9.00		1.05	1.07		+9.00					+9.00									
+8.75	1.35	1.07	0.90	0.91	+8.75					+8.75									
+8.50	1.51	1.08	0.90	0.92	+8.50					+8.50									
+8.00					+8.00	1.51	1.06	1.01	0.97	+8.00									

(r) BLAUW = H_{m0} gemeten op 10 m voor kaaimuur ("golf10m in grafieken"); ROOD = H_{m0} gemeten op 20 m voor kaaimuur ("golf20m in grafieken").

Het is duidelijk (en evident) dat het overtopingsdebiet afneemt indien

- de waterstand lager is,
- de golfhoogte kleiner is,
- de stormmuur hoger is,
- het kaaivlak breder is.

De overtopping is merkelijk groter wanneer de stormmuur op de rand van het kaaivlak staat. In Figuur 34 en Figuur 35 liggen de zwarte lijnen ("muur00m") duidelijk ver boven de overeenkomstige gekleurde lijnen, en in Tabel 14 is bij waterstanden +7.87 m TAW en +7.29 m TAW een duidelijke daling te zien van de kolom met breedte 0 m naar de kolom met breedte 15 m voor elke $H_{m0,target} \geq 1.75$ m. Bij waterstand +7.29 m TAW is er een verdere afname van het debiet wanneer de stormmuur van 15 m naar 30 m verplaatst wordt. Deze afname is ook merkbaar in de beperkte proeven met waterstand +6.88 m TAW maar nauwelijks/niet merkbaar bij waterstand +7.87 m TAW.

6.2 Overtopping bij kaaivlakverhoging

In principe kan uit de resultaten ook een indicatie afgeleid worden van de invloed van een kaaivlakverhoging. Indien het referentievlak (nulvlak) 0.50 m lager wordt genomen, zijn alle peilen 0.50 m hoger. Zodoende kunnen de proeven uitgevoerd met waterstand +7.29 m TAW geïnterpreteerd worden als proeven met waterstand +7.79 m TAW (als benadering voor +7.87 m TAW) en met 0.50 m kaaivlakverhoging (kaaipeil +7.37 m TAW i.p.v. +6.87 m TAW). Op dezelfde wijze kunnen de proeven uitgevoerd met waterstand +6.88 m TAW geïnterpreteerd worden als proeven met waterstand +7.88 m TAW (als benadering voor +7.87 m TAW) en met 1.00 m kaaivlakverhoging (kaaipeil +7.87 m TAW).

Wanneer deze redenering wordt toegepast op Tabel 14, verschuiven de debieten in de tabel naar een stormmuur met een hoger kruinpeil (Tabel 16). De 3 kolommen met metingen kunnen nu vergeleken worden: bij een (ongeveer) gelijke waterstand en kruinpeil van de stormmuur zit het verschil in de kaaipeilen (*weergegeven in de rode vakken bovenaan*). Er zijn voldoende metingen beschikbaar voor 2 kruinpeilen van de stormmuur: +8.50 m TAW en +9.00 m TAW. Daaruit kan besloten worden dat een kaaivlakverhoging geen verschil maakt wanneer de stormmuur op 15 m staat, maar wel wanneer het kaaivlak breder is en de stormmuur op 30 m staat.

Tabel 16 – Overtoppingsdebieten voor kaaimuren met kaaivlakverhoging bij waterstand +7.87 m TAW.

KAAIPEIL +6.87 m TAW					KAAIVLAKVERHOOGING 0.50 m (+7.37 m TAW)					KAAIVLAKVERHOOGING 1.00 m (+7.87 m TAW)				
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.79 m TAW					SWP = +7.88 m TAW				
Hm0 = 2.80m					Hm0 = 2.80m					Hm0 = 2.80m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]	+9.63	1.5			kruinpeil [mTAW]	+9.50	1.4			kruinpeil [mTAW]	+9.63			
	+9.38	3.5	0.9	0.5		+9.25	5.6				+9.38			
	+9.00	13.1	3.3	2.9		+9.00	9.6	2.6	1.0		+9.00	5.4	2.0	
	+8.75	24.8	8.7	6.0							+8.75			
	+8.50	39.7	15.5	13.6		+8.50	44.1	17.4	9.6		+8.50			
	+8.00										+8.00			
KAAIPEIL +6.87 m TAW					KAAIVLAKVERHOOGING 0.50 m (+7.37 m TAW)					KAAIVLAKVERHOOGING 1.00 m (+7.87 m TAW)				
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.79 m TAW					SWP = +7.88 m TAW				
Hm0 = 2.45m					Hm0 = 2.45m					Hm0 = 2.45m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]	+9.63				kruinpeil [mTAW]	+9.50	0.4			kruinpeil [mTAW]	+9.63			
	+9.38	1.0	0.4	0.4		+9.25	1.6				+9.38			
	+9.00	7.0	1.8	1.8		+9.00	4.6	1.3	0.3		+9.00	2.7	0.8	
	+8.75	16.4	5.5	3.6							+8.75			
	+8.50	30.6	9.3	9.0		+8.50	27.7	11.9	5.3		+8.50			
	+8.00										+8.00			
KAAIPEIL +6.87 m TAW					KAAIVLAKVERHOOGING 0.50 m (+7.37 m TAW)					KAAIVLAKVERHOOGING 1.00 m (+7.87 m TAW)				
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.79 m TAW					SWP = +7.88 m TAW				
Hm0 = 2.10m					Hm0 = 2.10m					Hm0 = 2.10m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]	+9.63				kruinpeil [mTAW]	+9.50	0.0			kruinpeil [mTAW]	+9.63			
	+9.38		0.3			+9.25	0.6				+9.38			
	+9.00	1.9	0.7	0.8		+9.00	1.8	0.4			+9.00	1.2	0.2	
	+8.75	8.7	2.3	2.5							+8.75			
	+8.50	17.5	6.1	5.6		+8.50	16.1	6.3	1.7		+8.50			
	+8.00										+8.00			
KAAIPEIL +6.87 m TAW					KAAIVLAKVERHOOGING 0.50 m (+7.37 m TAW)					KAAIVLAKVERHOOGING 1.00 m (+7.87 m TAW)				
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.79 m TAW					SWP = +7.88 m TAW				
Hm0 = 1.75m					Hm0 = 1.75m					Hm0 = 1.75m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]	+9.63				kruinpeil [mTAW]	+9.50				kruinpeil [mTAW]	+9.63			
	+9.38		0.1			+9.25	0.0				+9.38			
	+9.00	0.0	0.3	0.7		+9.00	0.1				+9.00	0.1		
	+8.75	3.0	0.6	1.7							+8.75			
	+8.50	9.0	3.0	2.9		+8.50	8.2	2.9	0.6		+8.50			
	+8.00										+8.00			
KAAIPEIL +6.87 m TAW					KAAIVLAKVERHOOGING 0.50 m (+7.37 m TAW)					KAAIVLAKVERHOOGING 1.00 m (+7.87 m TAW)				
SWP = +7.87 m TAW					SWP = +7.79 m TAW					SWP = +7.88 m TAW				
Hm0 = 1.40m					Hm0 = 1.40m					Hm0 = 1.40m				
q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]				q [l/s/m]	breedte kaaivlak [m]			
	0	15	30	40		0	15	30	40		0	15	30	40
kruinpeil [mTAW]	+9.63				kruinpeil [mTAW]	+9.50				kruinpeil [mTAW]	+9.63			
	+9.38					+9.25					+9.38			
	+9.00		0.2	0.6		+9.00					+9.00			
	+8.75	0.4	0.5	0.7							+8.75			
	+8.50	2.0	1.5	2.4		+8.50	2.5	0.6	0.1		+8.50			
	+8.00										+8.00			

7 Conclusies voor Oostende

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de schaalmodelproeven toegepast op de haven van Oostende voor de zones RNSYC, Churchillkaai en station.

7.1 1000-jarige storm met 100 jaar zeespiegelstijging

Bij een 1000-jarige storm met 100 jaar zeespiegelstijging treedt een waterstand +7.87 m TAW op. Dit impliceert dat +7.87 m TAW het minimale kruinpeil van een stormmuur is om het water te keren zonder rekening te houden met de golven.

In Tabel 7 worden de golfhoogtes voorgesteld die het resultaat waren van de golfmodellering voor een 1000-jarige storm met 100 jaar zeespiegelstijging (waterstand +7.87 m TAW). Figuur 37 herneemt deze golfhoogtes op het kaartje uit Figuur 11 voor de zones RNSYC, stormvloedkering en Churchillkaai.

Figuur 37 – Ontwerpgolfhoogtes voor de zones RNSYC, stormvloedkering & Churchillkaai (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).



Op basis van Tabel 14 kan voor elke zone het kruinpeil van een stormmuur¹² gekozen worden dat voldoet aan het veiligheids criterium $q = 1 \text{ l/s/m}$ (groene markering in de tabel). Dit wordt voorgesteld in Figuur 38. Voor RNSYC en Churchillkaai worden 2 kruinpeilen opgegeven, respectievelijk voor een muur op de rand van het kaaivlak en een muur op 15 m van de rand. Door de muur 15 m achteruit te verschuiven, kan het kruinpeil 30 cm lager worden in de zones RNSYC en Churchillkaai deel 1¹³. Verder langs de Churchillkaai (deel 2 en deel 3) neemt het verschil af, tot niets meer in Churchillkaai deel 5. Een verdere verschuiving van de muur naar 30 m van de rand levert geen wijziging in het kruinpeil op.

Een verhoging van het kaaivlak bij de stormmuur op 15 m heeft geen invloed op het kruinpeil.

Op de stormvloedkering staat de stormmuur sowieso vooraan. Aan weerszijden moeten de stormmuren van de naburige zone nauwkeurig aangesloten worden op de stormvloedkering.

Vermits de stormmuur in Churchillkaai deel 4 een andere oriëntatie heeft, kan het kruinpeil voor deze zone niet afgeleid worden uit de schaalmodelproeven. Er dient opgemerkt dat een oriëntatie zoals getekend in Figuur 38, haaks op Churchillkaai deel 3, zeer nadelig is voor overtopping omdat het water ophoopt in de hoek tussen de 2 muren. Er wordt dan ook aanbevolen om de muur in Churchillkaai deel 4 schuin te oriënteren ten opzichte van deel 3 (bijv. 45° i.p.v. 90°), zoals ook het geval is in zone station deel 1. De kruinhoogte van deel 3 dient aangehouden te worden.

Figuur 38 – Kruinpeil van stormmuren voor de zones RNSYC, stormvloedkering & Churchillkaai (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).



¹² Kruinpeil +9.38 m TAW uit Tabel 14 wordt afgerond op +9.40 m TAW.

¹³ Voor kaai 101 in de zone Churchillkaai deel 1 wordt het nog te bouwen nieuwe kaaiplateau buiten beschouwing gelaten.

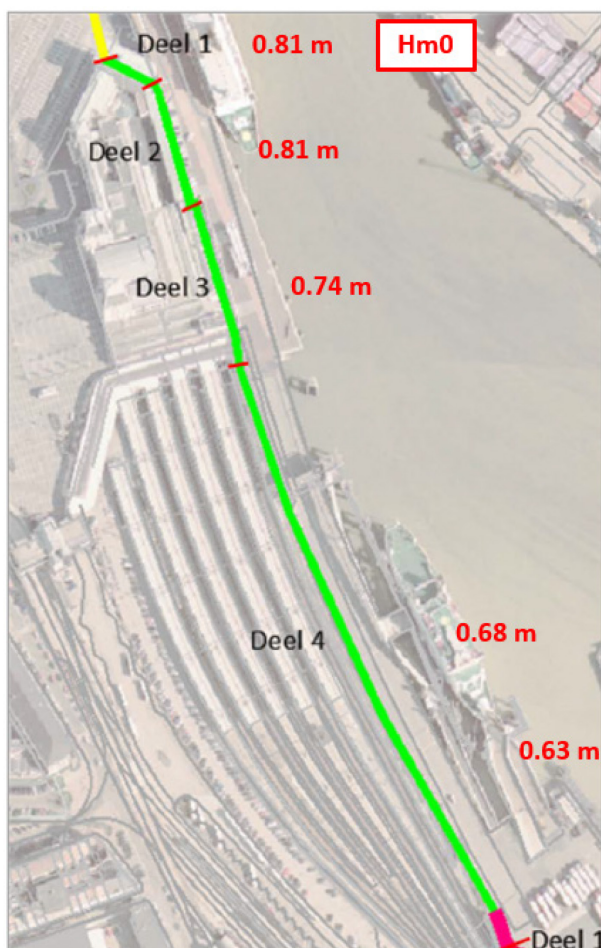
(s) Voor het kruinpeil in zone Churchillkaai deel 4 wordt een aanbeveling gedaan in de tekst.

Voor de zone station worden de golfhoogtes voor een 1000-jarige storm met 100 jaar zeespiegelstijging (waterstand +7.87 m TAW) uit Tabel 7 hernomen en voorgesteld in Figuur 39. De significante golfhoogte varieert tussen 0.63 m en 0.81 m.

Deze golfhoogtes zijn kleiner dan in de testmatrix van de schaalmodelproeven. Rekening houdend met de waterstand +7.87 m TAW, met het feit dat windgolven in deze zone een groter aandeel hebben en deze ook minder parallel met de kaaimuur kunnen zijn, en met de vaststelling dat de golfhoogte slechts 10 à 30 cm verschilt met de naburige zone Churchillkaai deel 5, wordt geoordeeld dat het kruinpeil +8.50 m TAW dient aangehouden te worden in zone station.

Bij de relatief kleine golven hebben de proeven aangetoond dat een verschuiving van de stormmuur op het kaaivlak geen invloed heeft op het kruinpeil.

Figuur 39 – Ontwerpgolfhoogtes voor de zone station
(1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).



Figuur 40 – Kruinpeil van stormmuren voor de zone station
(1000-jarige storm met zeespiegelstijging +100 jaar, waterstand +7.87 m TAW).

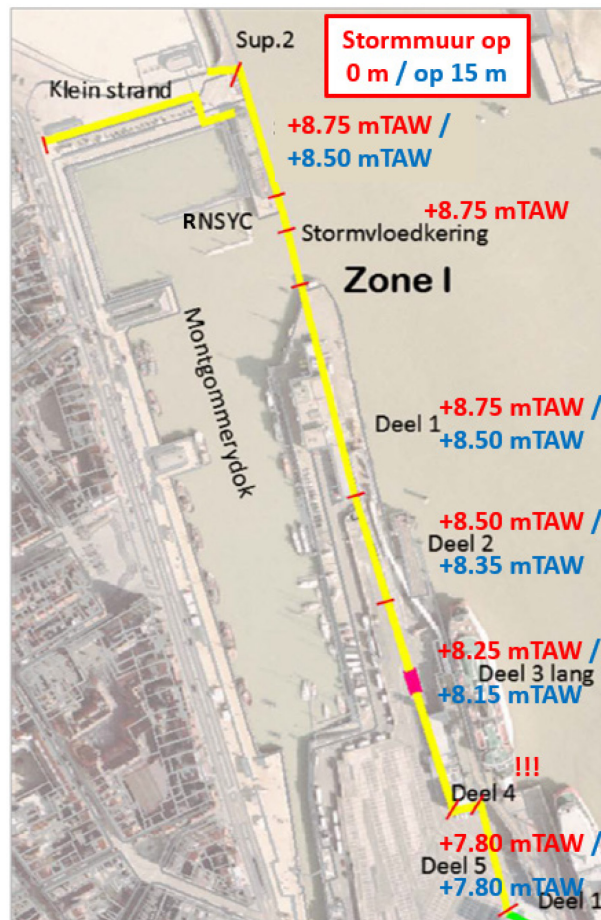


7.2 1000-jarige storm met 50 jaar zeespiegelstijging

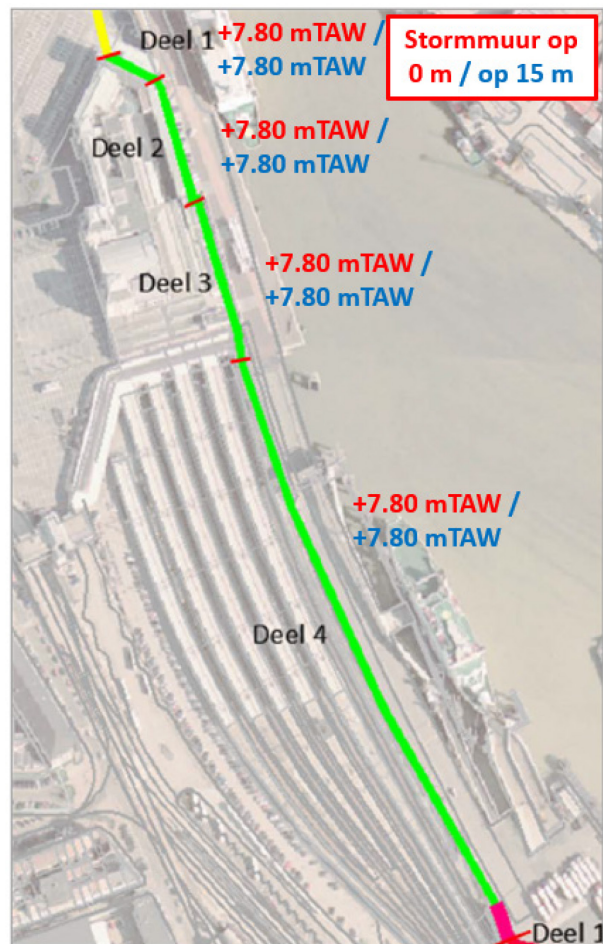
Bij een 1000-jarige storm met 50 jaar zeespiegelstijging treedt een waterstand +7.29 m TAW op. Dit is 58 cm lager dan bij 100 jaar zeespiegelstijging (§3.1). De golven in de haven zijn 5 à 10 cm kleiner. Dit laatste kan afgeleid worden uit het verschil in buitengaats golf (18 cm ; zie Tabel 2) en de golfindringingscoëfficiënt (0.20 à 0.44 ; zie Tabel 5). Beide fenomenen samen leiden tot de conclusie dat het kruinpeil van stormmuren ongeveer 65 cm lager mag zijn dan bij een 1000-jarige storm met 100 jaar zeespiegelstijging.

Deze inschatting is inderdaad in overeenstemming met de metingen van de schaalmodelproeven met waterstand +7.29 m TAW zoals voorgesteld in Tabel 14. Op basis van deze tabel kan voor elke zone het kruinpeil van een stormmuur gekozen worden dat voldoet aan het veiligheids criterium $q = 1 \text{ l/s/m}$. Deze kruinpeilen worden voorgesteld in Figuur 41 voor de zones RNSYC, stormvloedkering & Churchillkaai, en in Figuur 42 voor de zone station.

Figuur 41 – Kruinpeil van stormmuren voor de zones RNSYC, stormvloedkering & Churchillkaai (1000-jarige storm met zeespiegelstijging +50 jaar, waterstand +7.29 m TAW).



Figuur 42 – Kruinpeil van stormmuren voor de zone station
(1000-jarige storm met zeespiegelstijging +50 jaar, waterstand +7.29 m TAW).



8 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.

De Roo, S.; Nguyen, D. (2019). Bepaling golfrandvoorwaarden fysisch model gebruik makende van numerieke modellering met MIKE21 BW en SWAN. WL Memo's, 18_066_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press: Tokyo. ISBN 0-86008-369-1. x, 323 pp.

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. Versie 2_0. WL Rapporten, 769_03. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen.

IMDC. (2012). Oostende haventoeegang - overstromingsmaatregelen in de haven: fase 2 en 3. I/RA/11213/11.1112/VGR. IMDC.

Kim Y.C. (2010). Handbook of Coastal and Ocean Engineering. World Scientific: New Jersey. ISBN 978-981-281-929-1. p.463 e.v: Development of Caisson Breakwater Design Based on Failure Experiences (S. Takahashi).

TAW (2003). Leidraad kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW): Delft. ISBN 90-369-5544-0.

Verwaest, T.; Vanneste, D. (2019). Update kenmerken ontwerpstormen stormkeringen achterhaven Oostende. WL Memo's, 17_090_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Vlaams ministerie van mobiliteit en openbare werken (2011). Oostende haven, overzicht streefdieptes in dm t.o.v. LAT [KAART]. Versie 28/01/2011.

Willems, M.; Suzuki, T.; Mostaert, F. (2019). Oostende schaalmodel golfovertopping bij zeer schuine golven: Deelrapport 1 – Montgomerydok. Versie 2.0. WL Rapporten, 18_066_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Bijlage 1 Foto fysisch model



////////////////////////////////////

////////////////////////////////////

De 1000-jarige waterstand in Oostende (haven, kustsectie 117), exclusief zeespiegelstijging, bedraagt +6.88 m TAW. Dit is de omnidirectionele waterstand zoals gerapporteerd in §4.3 in Het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2014. Dit is ook de waterstand die in andere projecten wordt gebruikt.

Voor de zeespiegelstijging (ZSS) met als referentiejaar 2014 kunnen 2 verschillende formules gebruikt worden: een lineaire toename en een kwadratische toename.

1. Lineair: 6 mm/jaar tot 2050, 10 mm/jaar na 2050
 2014-2050: 36 jaar x 6 mm/jaar = 21.6 cm
 2050-2070: 20 jaar x 10 mm/jaar = 20 cm
 2050-2120: 70 jaar x 10 mm/jaar = 70 cm
 totaal voor 50 jaar: + 41.6 cm in 2070 t.o.v. 2014
 totaal voor 100 jaar: + 91.6 cm in 2120 t.o.v. 2014

2. Kwadratisch: formule t.o.v. referentiejaar 2000:

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

ZSS (2014) = 0.064 m

ZSS (2070) = 0.476 m

ZSS (2120) = 1.056 m

totaal voor 50 jaar: + 41.2 cm in 2070 t.o.v. 2014

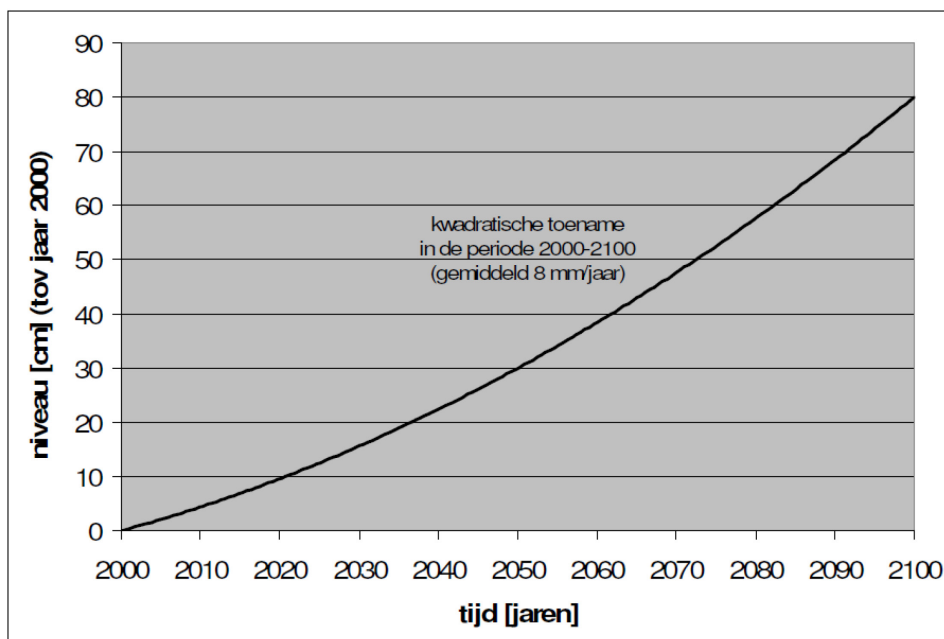
totaal voor 100 jaar: + 99.2 cm in 2120 t.o.v. 2014

Kwadratische formule overgenomen uit:

WL memo "Klimaatscenario's Vlaamse Baaien" dd. 20/12/2011:

2.1 Gemiddeld klimaatscenario

Figuur 1 geeft het verloop van de stijging van de stormvloedniveaus. Men leest af op de figuur, een toename van de stormvloedniveaus met 30cm tegen 2050 en met 80cm tegen 2100 (tov 2000).



Figuur 1: stijging van de stormvloedniveaus bij gemiddeld klimaatscenario

De geleidelijke toename van de stormvloedniveaus in formulevorm (een kwadratische toename):

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

Beide formules geven dus een verschil van 1 cm voor 50 jaar en 7 cm voor 100 jaar. Gezien de (statistische) onzekerheid op zeespiegelstijging is dit verschil niet significant en is eender welke keuze verdedigbaar. Voor consistente cijfers tussen verschillende projecten is het aan te bevelen om steeds dezelfde keuze te maken en dit is in het recente verleden niet altijd gebeurd. *(in het project Middelkerke [14_131] werd de lineaire benadering gebruikt, in het project Achterhaven Oostende de kwadratische benadering)*

Voor dit project wordt voorgesteld om de zeespiegelstijging te bepalen m.b.t. de kwadratische formule. Dit leidt dan tot volgende waterstanden voor de schaalmodelproeven:

- 1000-jarige storm (excl. zeespiegelstijging): waterstand **+6.88 m TAW**
- 1000-jarige storm incl. 50 jaar zeespiegelstijging: waterstand **+7.29 m TAW**
- 1000-jarige storm incl. 100 jaar zeespiegelstijging: waterstand **+7.87 m TAW**

Bijlage 3 Memo: golfrandvoorwaarden fysisch model

Memo

////////////////////////////////////

Titel: Bepaling golfrandvoorwaarden fysisch model gebruik makende van numerieke modellering met MIKE21 BW en SWAN

Datum: 25/03/2019

Auteurs: De Roo, Sieglien; Nguyen, Duc Anh

Referentie: WL2019M18_066_4

De Roo, Sieglien; Nguyen, Duc Anh (2019). Bepaling golfrandvoorwaarden fysisch model gebruik makende van numerieke modellering met MIKE21 BW en SWAN. Versie 1.0. WL Memo's, 18_066_4. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

////////////////////////////////////

Een fysisch schaalmodel wordt gebouwd van (een deel van) de binnenhaven van Oostende. Het stilwaterpeil kan eenvoudig ingesteld worden rekening houdende met de schaalfactor. Echter, de golfrandvoorwaarden die opgelegd dienen te worden aan het golfschot, zijn niet a priori gekend. Deze worden bepaald door numerieke modellering met MIKE21 BW en SWAN, waarmee respectievelijk de golfbijdrages ten gevolge van golfindringing door de havenmond en ten gevolge van lokale windgroei begroot worden.

Deze memo beschrijft de resultaten van de numerieke modellering en geeft de golfrandvoorwaarden voor de verschillende te beproeven condities.

1. Randvoorwaarden numerieke modellering

1.1. Hydraulische randvoorwaarden

Alle fysische modelcondities betreffen een stormvloed uit zee met een terugkeerperiode $T = 1000$ jaar, waarbij geen dan wel een zeespiegelstijging van resp. 50 en 100 jaar in rekening wordt gebracht (Willems *et al.*, 2019). Tabel 17 geeft een overzicht van de overeenkomstige waterstanden (in prototype schaal). Deze worden zowel in het MIKE21 BW en SWAN model opgelegd.

Tabel 17 Waterstand in het numeriek model

	Waterstand h [m TAW]
T = 1000 jaar, zonder zeespiegelstijging	+6.88
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 50 jaar (2070)	+7.29
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 100 jaar (2120)	+7.87

1.1.1. MIKE21 BW

MIKE21 BW (versie 2014) wordt gebruikt voor de modellering van de golfindringing doorheen de havenmond. De golfrichting die zorgt voor de hoogste golven in de binnenhaven is deze parallel aan de vaargeul, i.e. -37° .

Op diep water (2 golflengtes verwijderd van de havendammen) wordt het golfklimaat opgelegd van een 1000-jarige stormvloed uit richting -37° . Hiervoor zijn de golfcondities (golfhoogte en -periode) lineair geïnterpoleerd tussen de directionele waarden van NW en NNW (De Roo *et al.*, 2017). Indien zeespiegelstijging in rekening wordt gebracht, is de golfhoogte aangepast overeenkomstig een constante verhouding, i.e. 0.3, tussen de waterdiepte en golfhoogte.

De golfparameters worden opgelegd volgens een JONSWAP spectrum met een piekversterkingsfactor $\gamma = 3.3$ en een (eenzijdige) directionele spreiding van de golven $\sigma = 16^\circ$.

Tabel 18 geeft een overzicht van de hydraulische randvoorwaarden voor de 3 gemodelleerde scenario's.

Tabel 18 MIKE21 BW: Hydraulische randvoorwaarden op diep water

	Waterstand h [m TAW]	Significante golfhoogte H_{m0} [m]	Golfpiekperiode T_p [s]
T = 1000 jaar, zonder zeespiegelstijging	+6.88	4.80	10.87
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 50 jaar (2070)	+7.29	4.92	10.87
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 100 jaar (2120)	+7.87	5.10	10.87

1.1.2. SWAN

SWAN (v41.01) wordt gebruikt voor de modellering van windgegenereerde golven in de haven; de havenmond is bijgevolg afgesloten. De 1000-jarige windsnelheid (op referentiehoogte $z = 10\text{m}$ boven MSL) wordt gecorrigeerd voor het landeffect, dat 0.9 bedraagt voor windrichting NW (windrichting dichtst bij -37°) (De Roo *et al.*, 2016). Bemerk dat deze noordwestenwind wel gemodelleerd wordt als komende uit richting -37° .

Tabel 19 geeft een overzicht van de randvoorwaarden voor de 3 gemodelleerde scenario's.

Tabel 19 SWAN: Randvoorwaarden

	Waterstand h [m TAW]	Gemiddelde windsnelheid u [m/s]
T = 1000 jaar, zonder zeespiegelstijging	+6.88	23.1
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 50 jaar (2070)	+7.29	23.1
T = 1000 jaar, zeespiegelstijging + 100 jaar (2120)	+7.87	23.1

1.2. Haven geometrie en -bathymetrie

1.2.1. MIKE21 BW

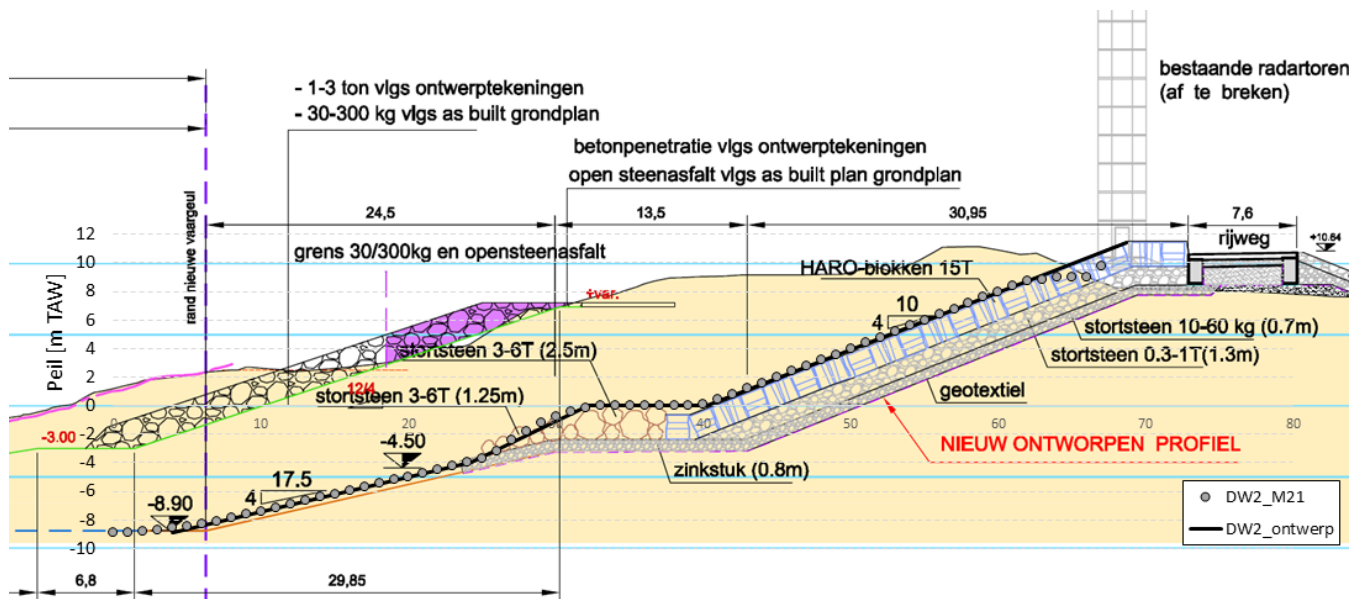
De haven geometrie en -bathymetrie voor het scenario zonder zeespiegelstijging is overgenomen uit project 17_052; de resolutie bedraagt 1m in X- en Y-richting. De geometrie bevat reeds de geplande verbreding van de Halve Maan; de bathymetrie bevat de baggerstreefdieptes in de binnenhaven en de vaargeul, welke aansluiten op gepeilde dieptes achter de havendammen en buitengaats.

Enkele kenmerken van de bathymetrie (zie Figuur 45):

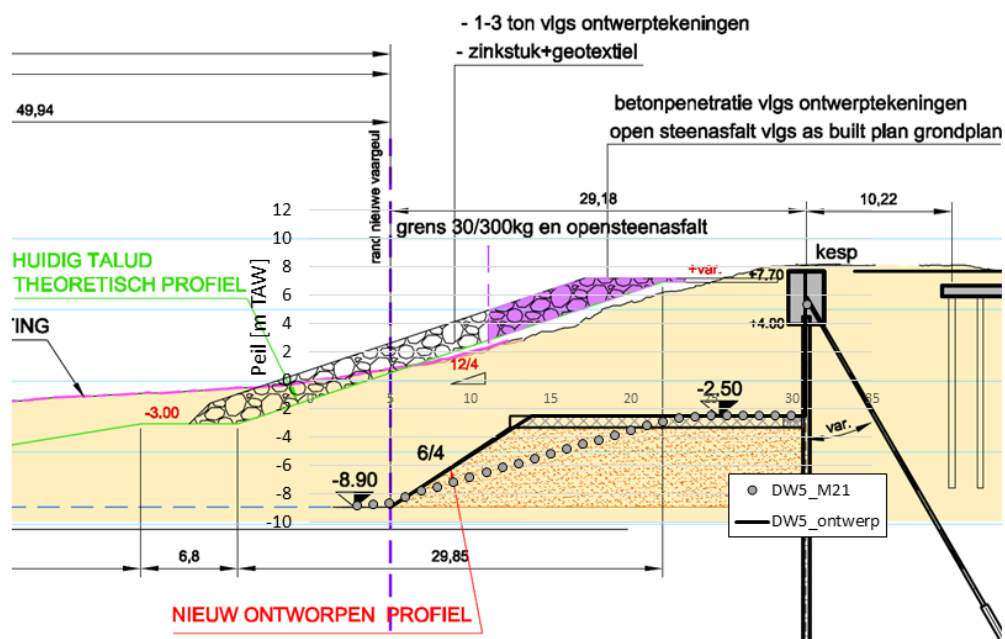
- havendammen ingebouwd als onovertopbaar (zie Sectie 3.1.2 en 3.3.1 in De Roo *et al.*, 2019), geometrie aan zeewaartse zijde afgetopt op 12m waterdiepte (zie Sectie 3.3.2 in De Roo *et al.*, 2019);
- Halve Maan ingebouwd als onovertopbaar, geometrie afgetopt op 4m waterdiepte (zie Sectie 3.3.2 in De Roo *et al.*, 2019), een schematisatie van hoe de ontwerpgeometrie in Mike 21 is ingebracht, zie Figuur 43 en Figuur 44 voor het talud en de combiwand met onderwaterberm respectievelijk;
- onderwatertalud ter hoogte van kaaimuur Halve Maan verflauwd tot helling 1/3 waardoor er dichtbij fuik naar Visserijsluis toe geen onderwaterberm meer aanwezig is op -2.5m TAW (zie Sectie 3.1.2 en in De Roo *et al.*, 2019, en Figuur 2);
- bathymetrie ter hoogte van Klein Strand afgetopt op 2m waterdiepte;
- de wijzigende reflectie ter hoogte van de kaaivlakken ten gevolge van golfoverslag en -overloop is numeriek behandeld door reflectiecoëfficiënten te variëren met de waterdiepte; het landoppervlak zelf is onovertopbaar (zie Sectie 3.3.4 in De Roo *et al.*, 2019). Deze reflectiecoëfficiënten zijn gekalibreerd rekening houdende met een uniform peil van de kaaivlakken op +6.9m TAW. Bemerkt dat bijvoorbeeld het peil van de kaaivlakken rond het Montgomerydok in werkelijkheid varieert tussen +6.6 en ~+6.9m TAW. Deze kleine verschillen in peil hebben echter weinig invloed (< 5%) op de numerieke reflectiecoëfficiënt (zie Sectie 3.3.4 in De Roo *et al.*, 2019 en Sectie 3.1.7 in Gruwez *et al.*, 2011).

De bathymetrie voor de 2 scenario's met een hogere waterstand zijn overeenkomstig deze kenmerken afgeleid van bovenvermelde bathymetrie uit project 17_052, uitgezonderd de breedte van de havendammen (vast op $h = +6.88$ m TAW).

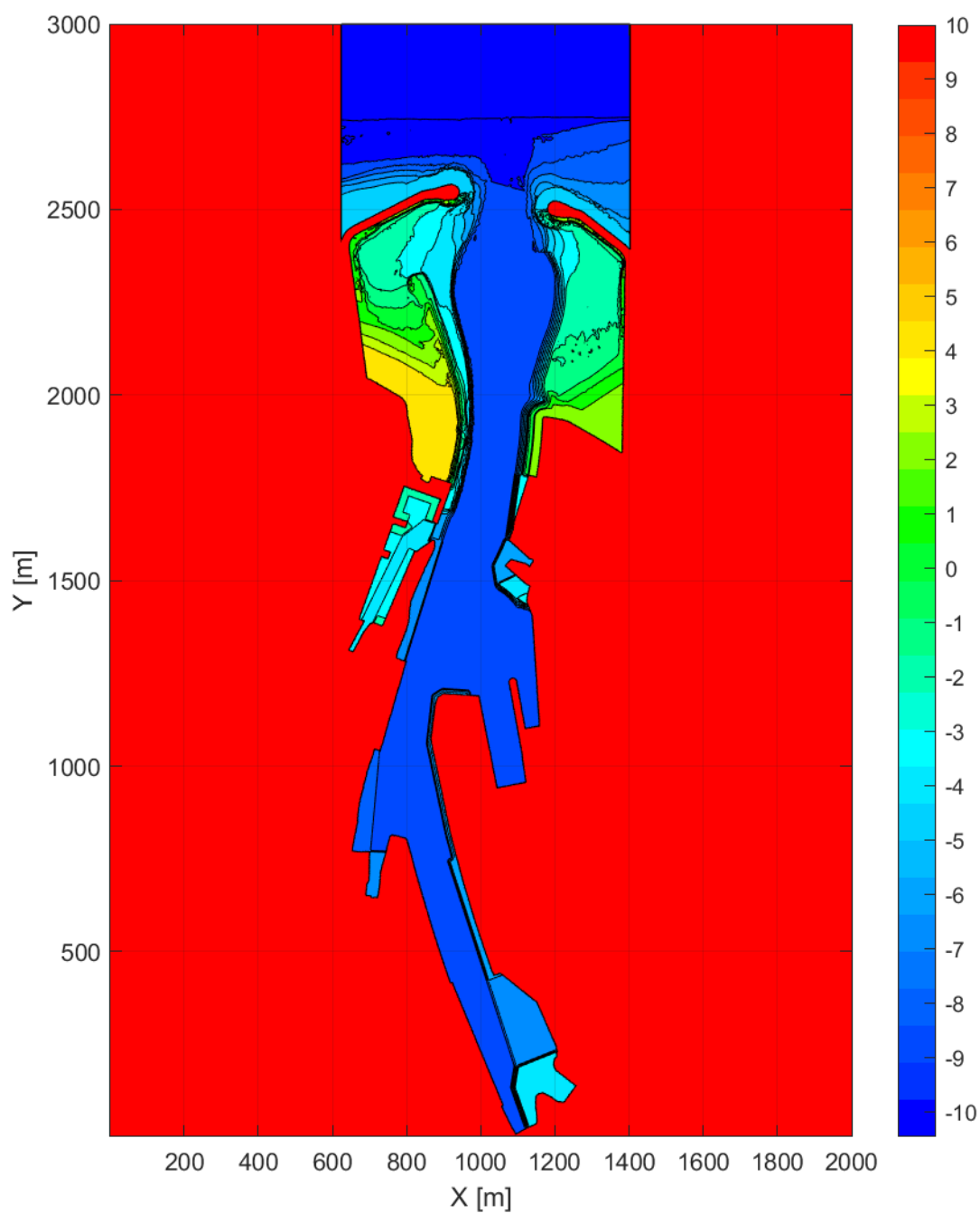
Figuur 43 – Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017): snede DW2: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie



Figuur 44 Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017): snede DW5: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie



Figuur 45 – Havengeometrie en -bathymetrie (in m TAW), georiënteerd volgens richting -37°



1.2.2. SWAN

De havengeometrie en -bathymetrie is overgenomen uit project 17_052 (golfrichting -37° en $h = +6.88\text{m TAW}$) en gebruikt voor alle scenario's. De resolutie bedraagt 7.5m in X- en Y-richting.

1.3. Locaties uitvoerpunten

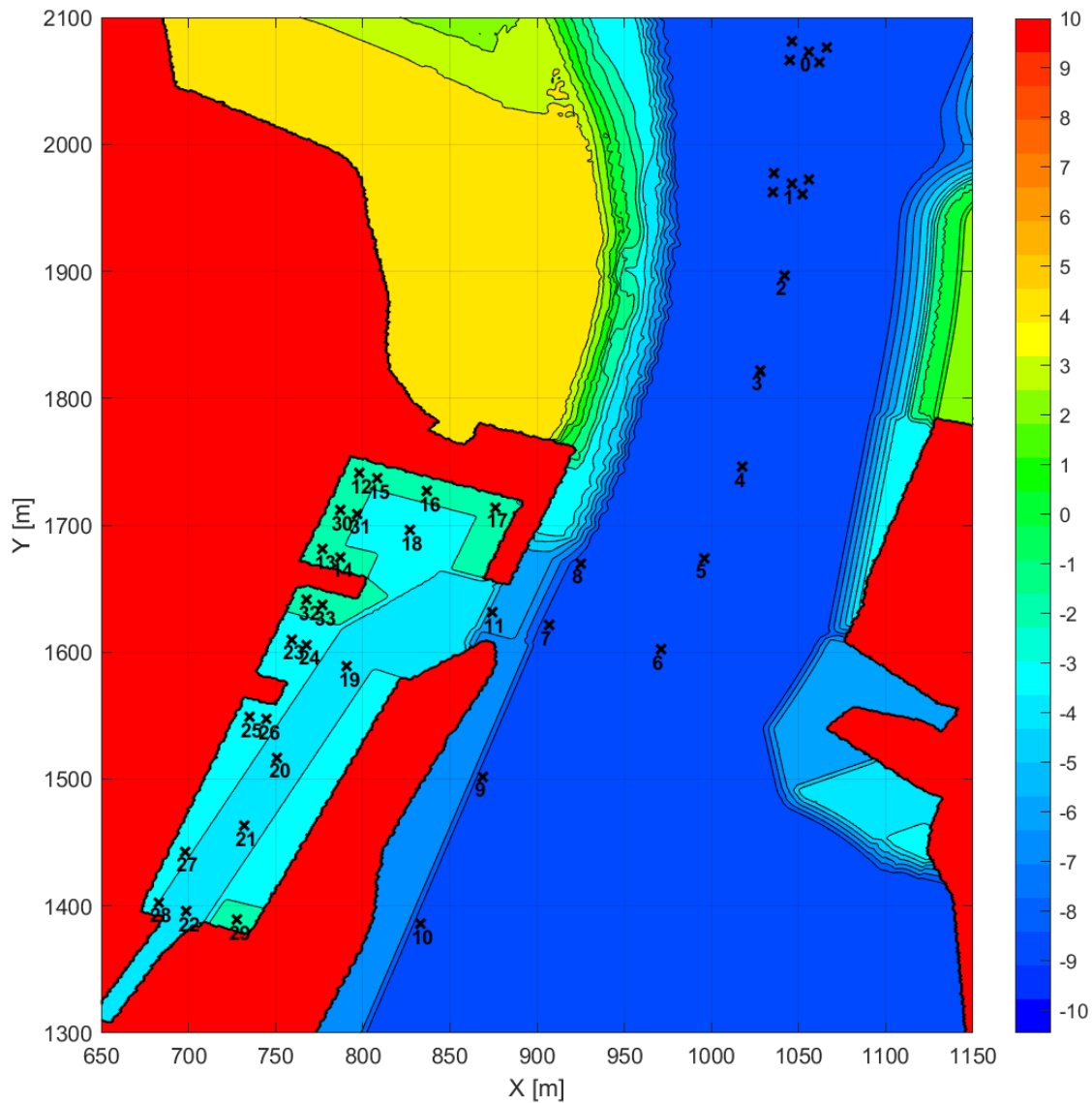
Figuur 46 geeft een overzicht van de locaties waar verheffingstijdreeksen worden geregistreerd (meetfrequentie 20Hz). Ter hoogte van golfhoogtemeters (verder GHM) 0 en 1 is een ster array van GHM geplaatst in MIKE21 BW, opdat een directionele golfanalyse kan gebeuren. GHM 0 en 1 zijn het middelpunt van de ster. GHM 0 t.e.m. 6 bevinden zich op de as van de vaargeul; GHM 7 t.e.m. 10 bevinden zich op de rand van de vaargeul.

In het Montgomerydok bevinden GHM 12, 15, 16, 17, 30, 13, 14, 32, 33, 23, 25, 27, 28 en 29 zich op een afstand van 10m tot de kaaimuur. De onderlinge afstand tussen GHM 12-15, 30-31, 13-14, 32-33, 23-24 en 25-26 bedraagt eveneens 10m. GHM 16, 18, 19, 20, 21, 22 bevinden zich ongeveer op de middenlijn van het dok.

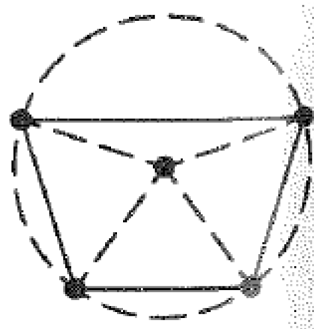
De ster array bestaat uit 5 golfhoogtemeters, gepositioneerd ten opzichte van elkaar volgens Figuur 47. Rekening houdende met de respectievelijke golflengtes in de vaargeul bedraagt de straal van de ster 10m.

Bemerk dat in SWAN GHM 15, 31, 14, 33, 24 en 26 niet geplaatst zijn omdat de resolutie van het model te klein is.

Figuur 46 – Locatie golfhoogtemeters op de bathymetrie [m TAW]



Figuur 47 – Pentagonale opstelling van de golfhoogtemeters (Panicker & Borgman, 1970)



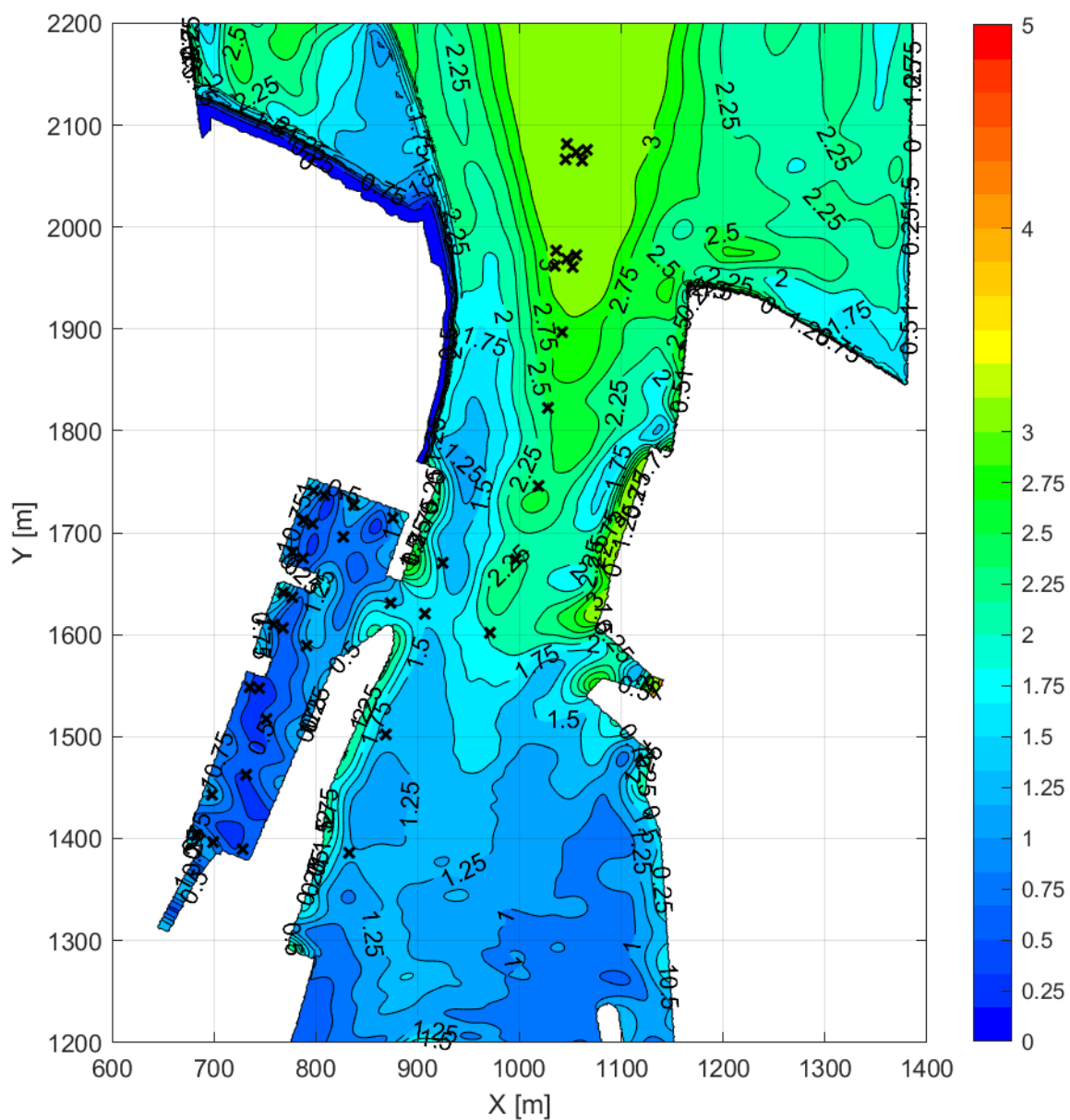
2. Resultaten numerieke modellering

2.1. Golfindringing doorheen havenmond: MIKE21 BW

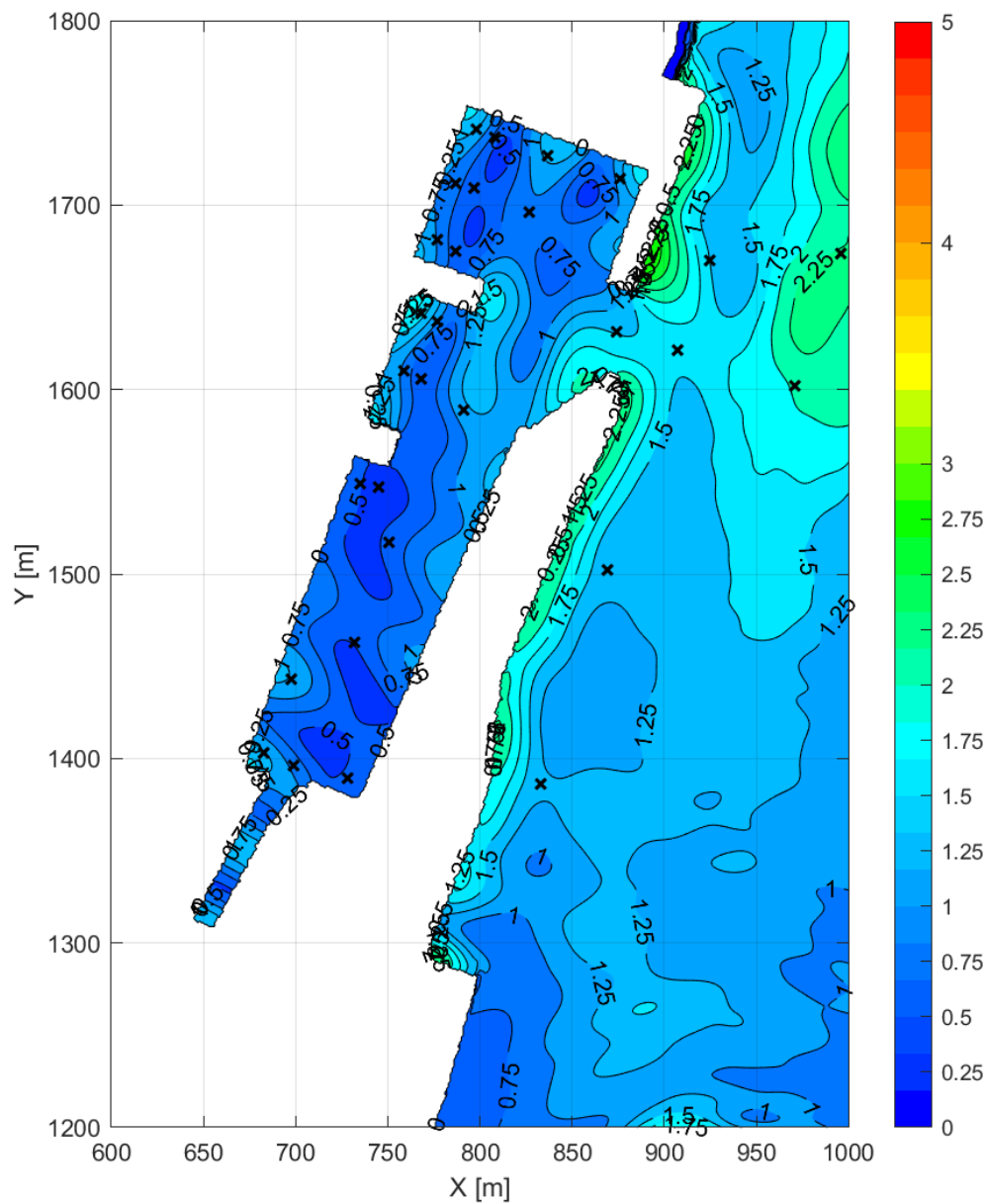
2.1.1. Golfindringing in de binnenhaven

Figuur 48, Figuur 51 en Figuur 54 illustreren respectievelijk de golfindringing van een 1000-jarige stormvloed zonder dan wel met een zeespiegelstijging van 50 en 100 jaar (Figuur 49, Figuur 52 en Figuur 55). Figuur 8 de respectievelijke zoom op het Montgomerydok en de Churchillkaai; op de vaargeul ter hoogte van de Halve Maan). Hoe hoger de waterstand, hoe groter de penetrerende golven in de vaargeul, langs de verbrede (onovertopbare) Halve Maan. Echter, +7.29 en +7.87m TAW zijn waterstanden die hoger komen dan de kaaivlakken in de binnenhaven, en bijgevolg treedt steeds meer golfoverslag en -overloop op. Daardoor dalen de golfhoogtes in het Montgomerydok en langs de kaaimuren achter het station met stijgende waterdiepte.

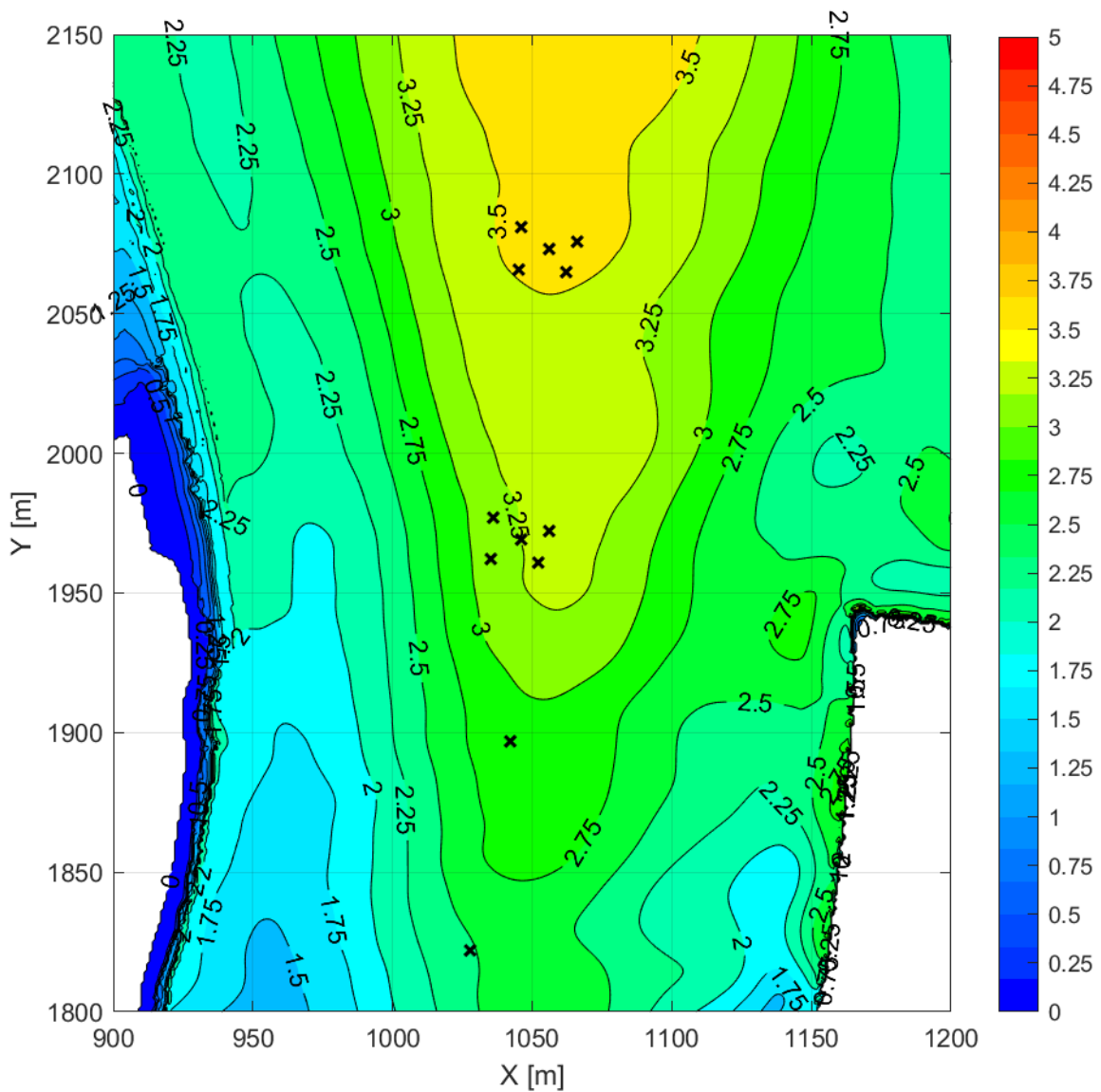
Figuur 48 – Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging



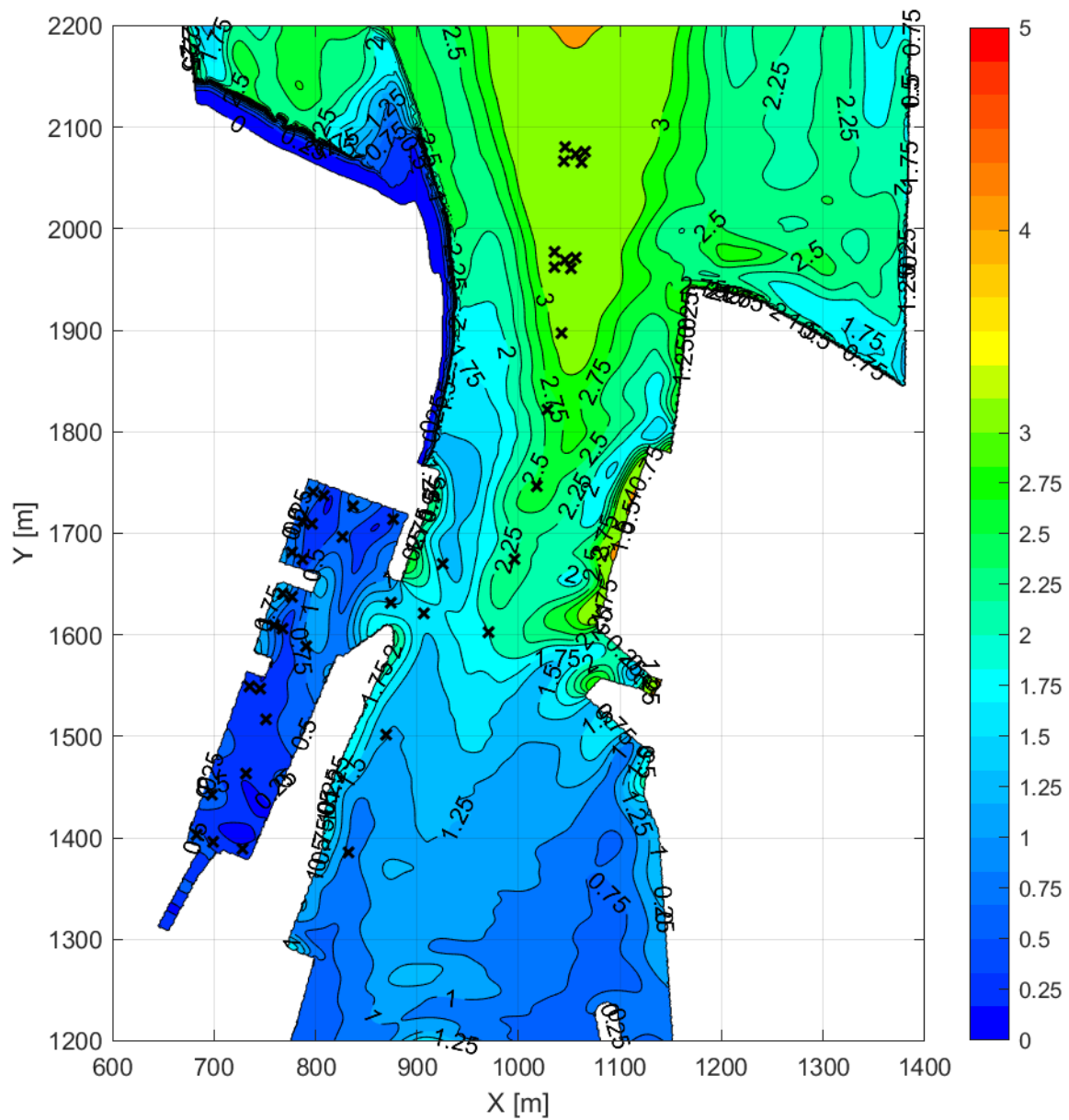
Figuur 49 – Zoom op Montgomerydok en Churchillkaai: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging



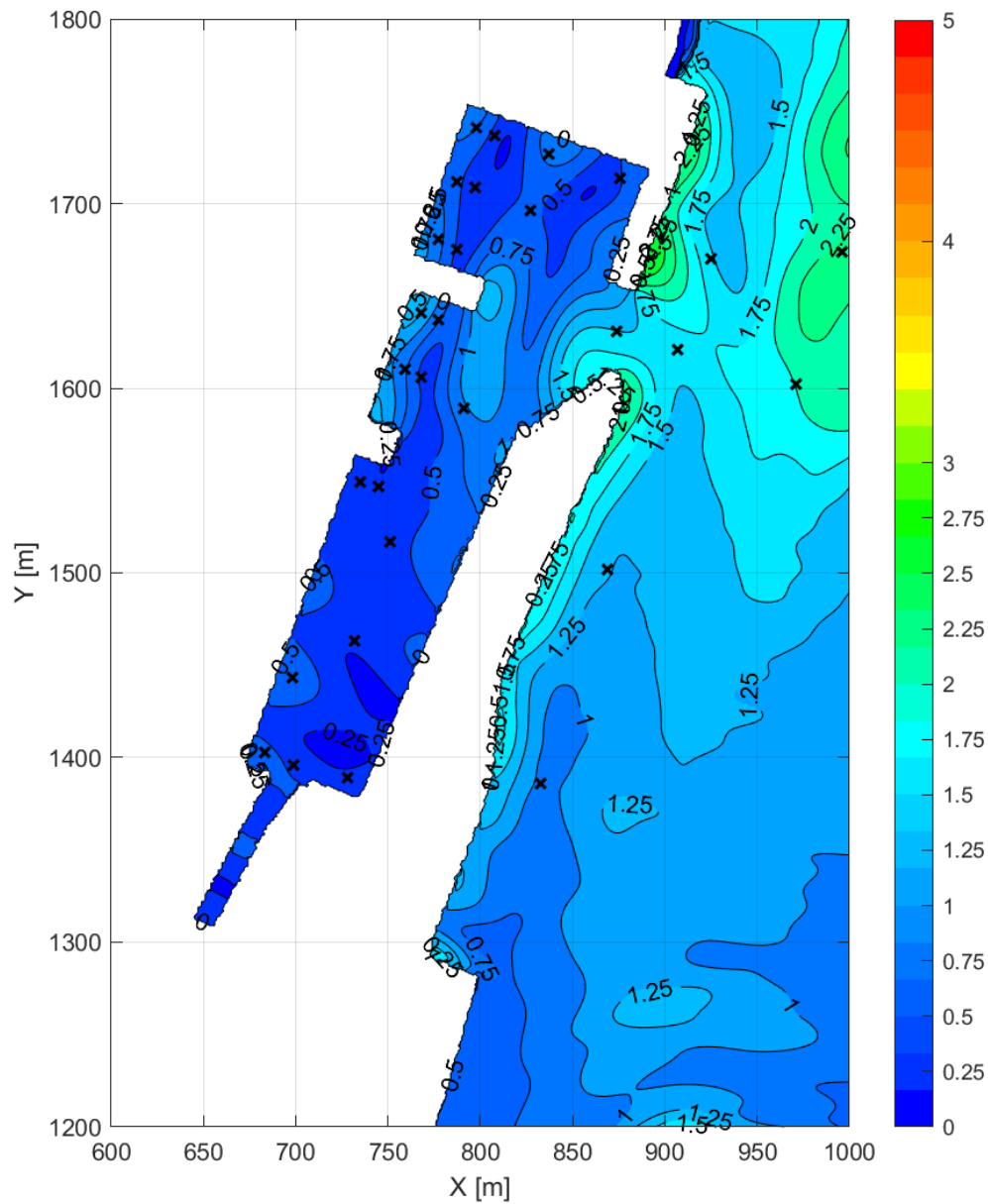
Figuur 50 – Zoom op vaargeul ter hoogte van de Halve Maan: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging



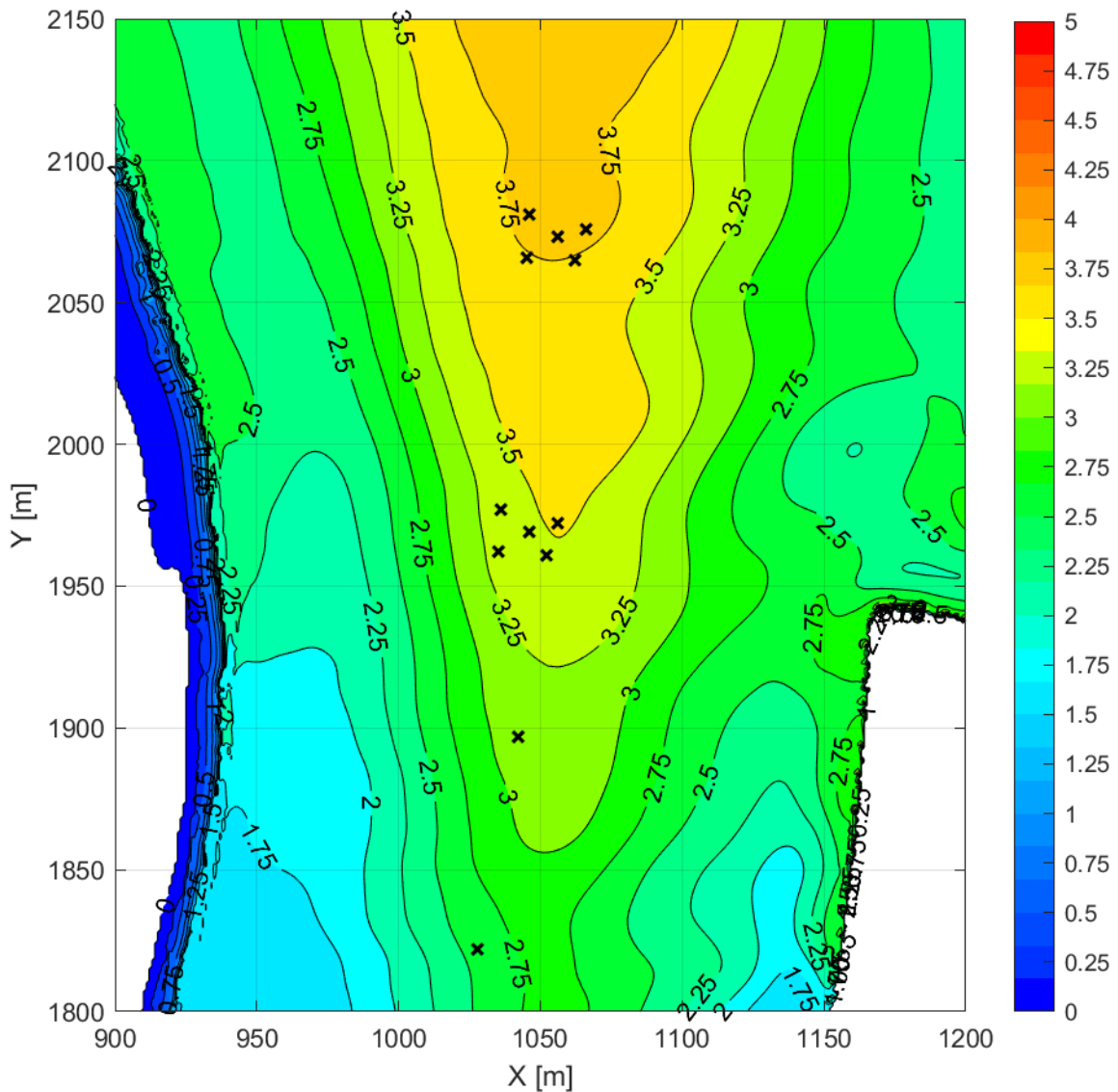
Figuur 51 – Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +50 jaar



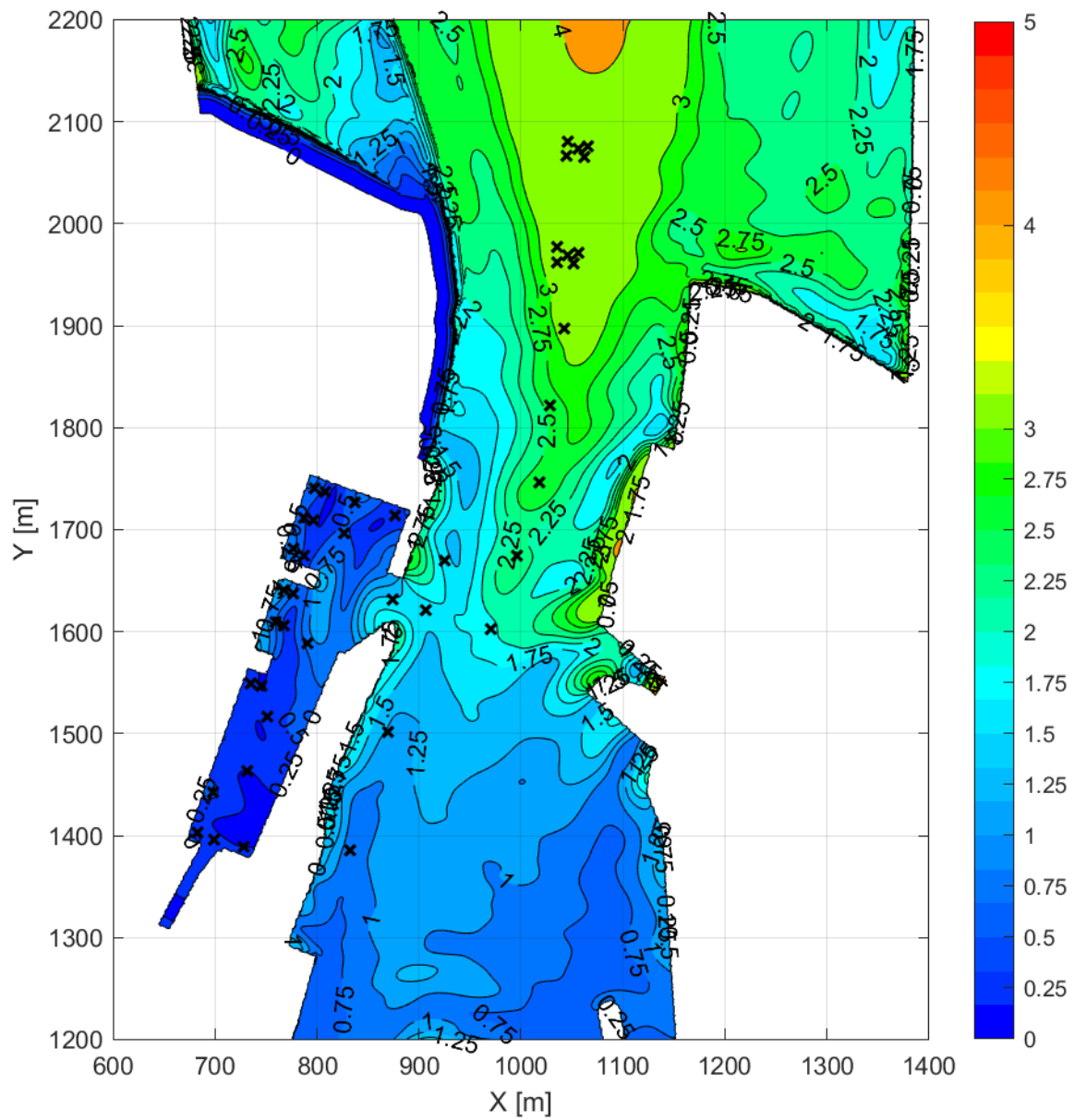
Figuur 52 – Zoom op Montgomerydok en Churchillkaai: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +50 jaar



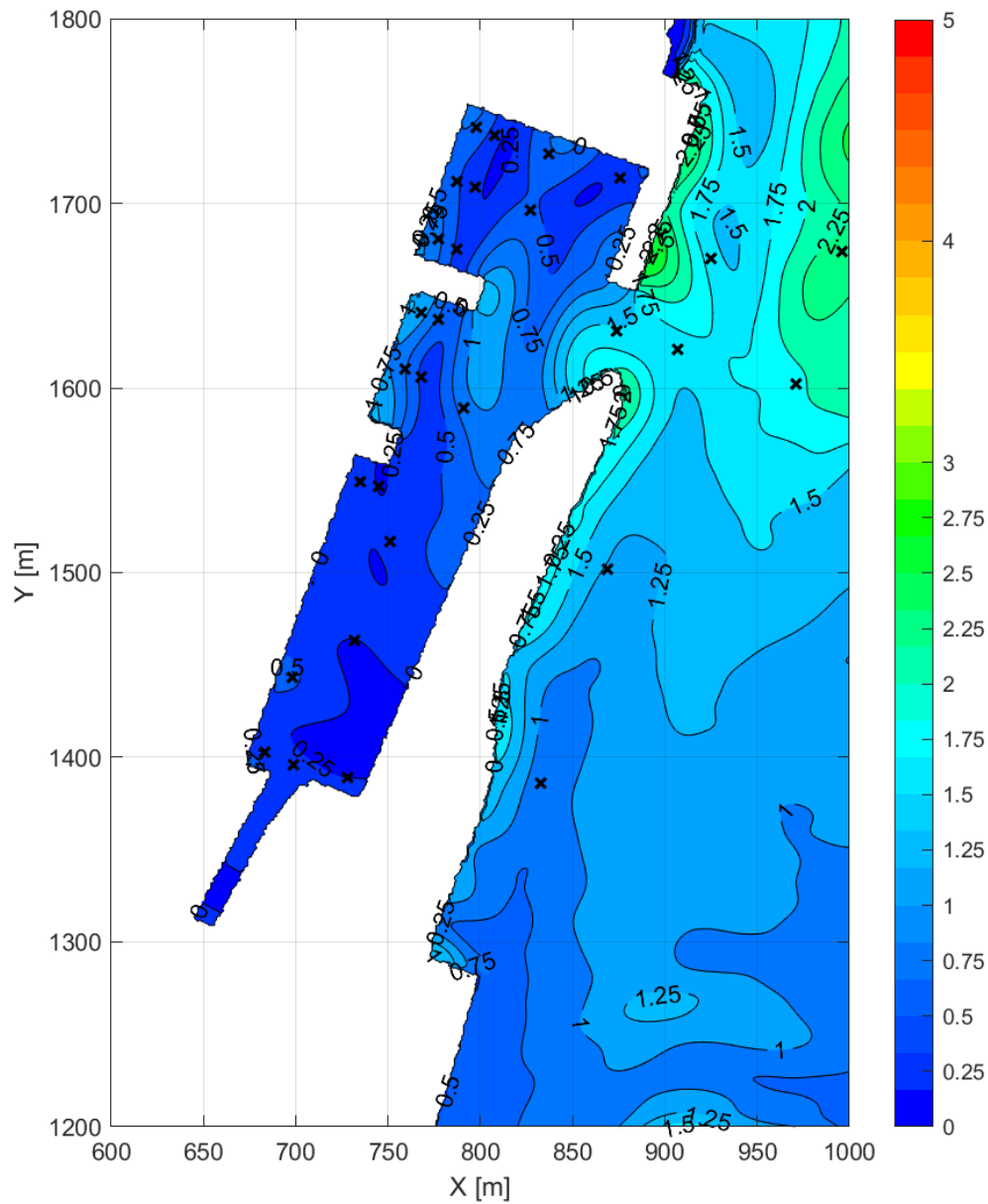
Figuur 53 – Zoom op vaargeul ter hoogte van de Halve Maan: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +50 jaar



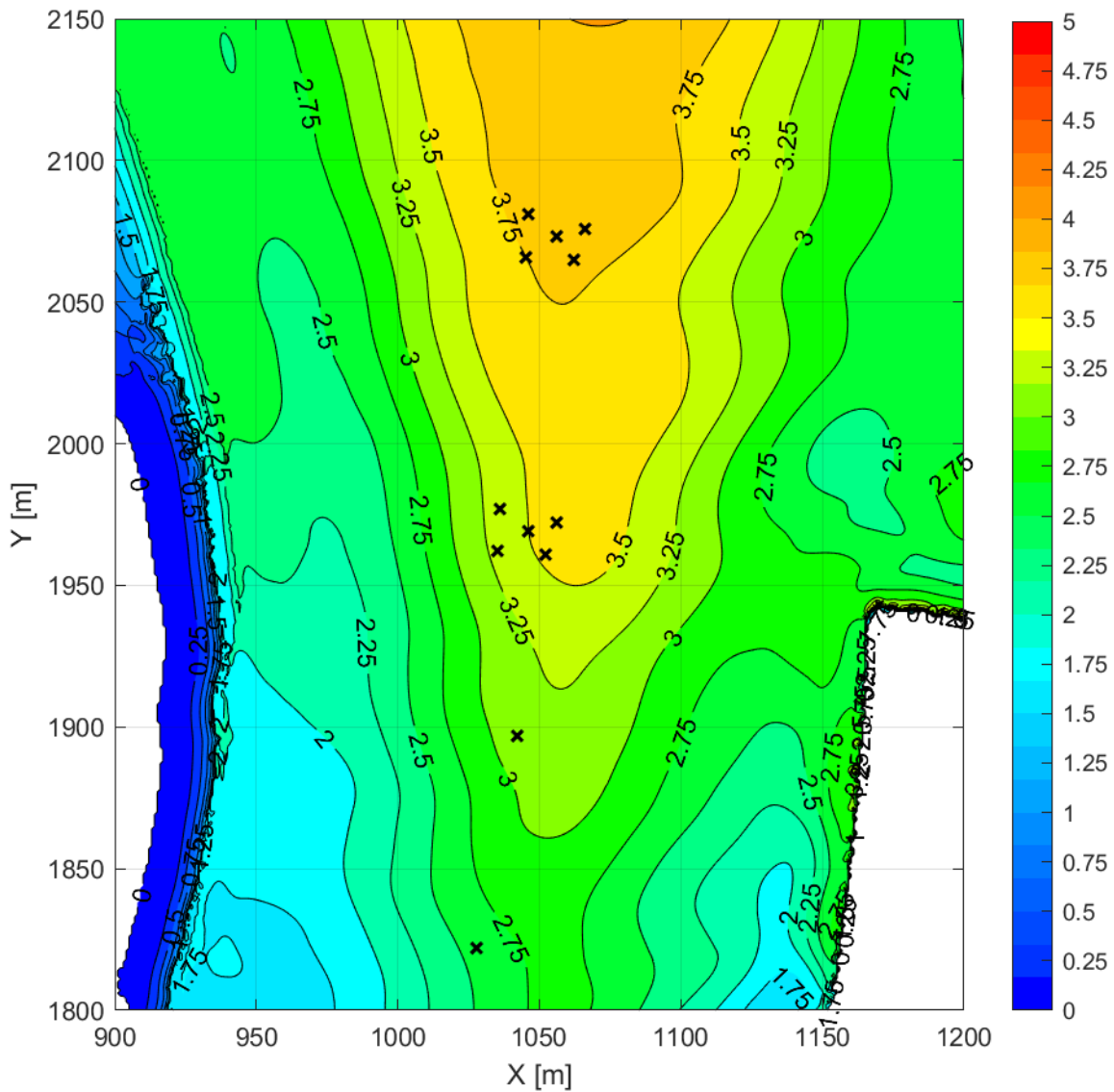
Figuur 54 – Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +100 jaar



Figuur 55 – Zoom op Montgomerydok en Churchillkaai: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +100 jaar



Figuur 56 – Zoom op vaargeul ter hoogte van de Halve Maan: Significante golfhoogtes (in m) in de binnenhaven na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging +100 jaar



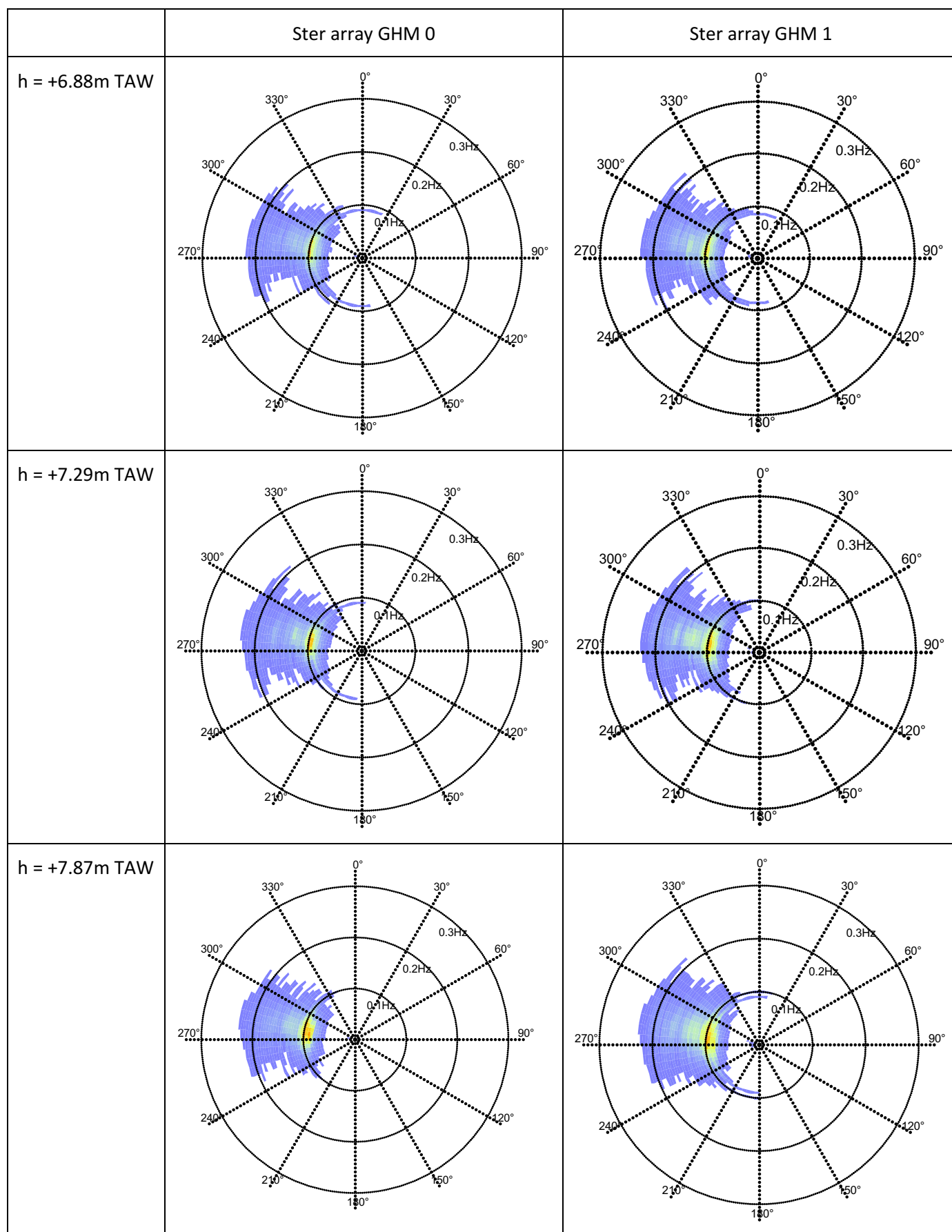
2.1.2. Directionele golfanalyse ter hoogte van kop Halve Maan

Tabel 20 en Tabel 21 geven respectievelijk een overzicht van de directionele analyse en de directionele golfenergiespectra ter hoogte van de kop van de Halve Maan. De (eenzijdige) directionele spreiding van de golven is een weinig meer dan buitengaats opgelegd. De invallende en gereflecteerde significante golfhoogte, $H_{m0,i}$ en $H_{m0,r}$ respectievelijk, worden eveneens weergegeven met dienovereenkomstige reflectie.

Tabel 20 – Directionele analyse rond GHM 0 en GHM 1

h [m TAW]	Ster array	(eenzijdige) spreiding σ [°]	$H_{m0,i}$ [m]	$H_{m0,r}$ [m]	Reflectie [%]
+6.88	GHM 0	17.3	3.47	0.22	6.5
	GHM 1	18.5	3.18	0.23	7.3
+7.29	GHM 0	16.2	3.70	0.17	4.5
	GHM 1	17.6	3.39	0.16	4.6
+7.87	GHM 0	14.8	3.75	0.1	2.6
	GHM 1	18.6	3.42	0.18	5.2

Tabel 21 – Directioneel golfenergiespectrum

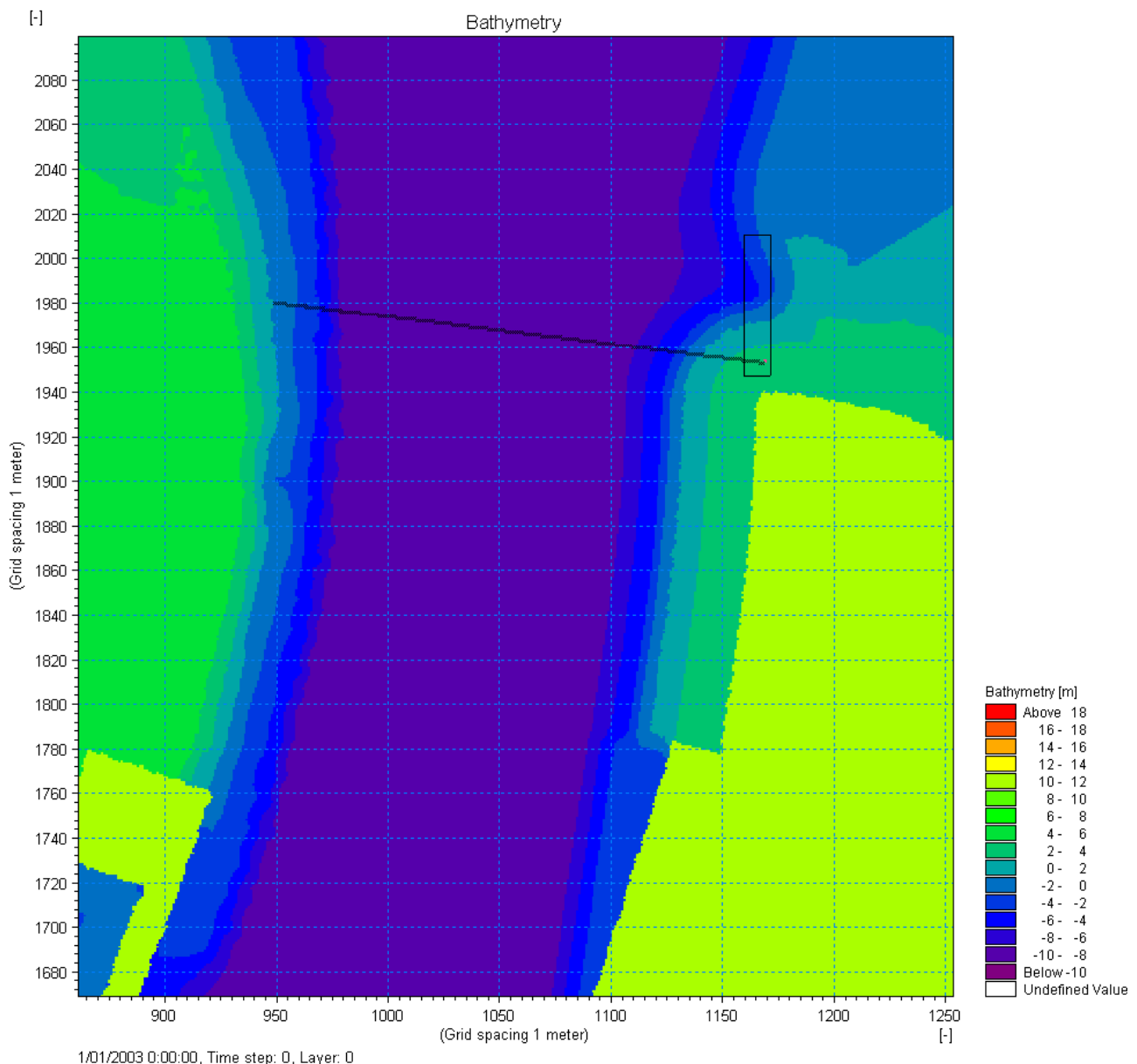


2.1.3. Significante golfhoogtes op specifieke locaties

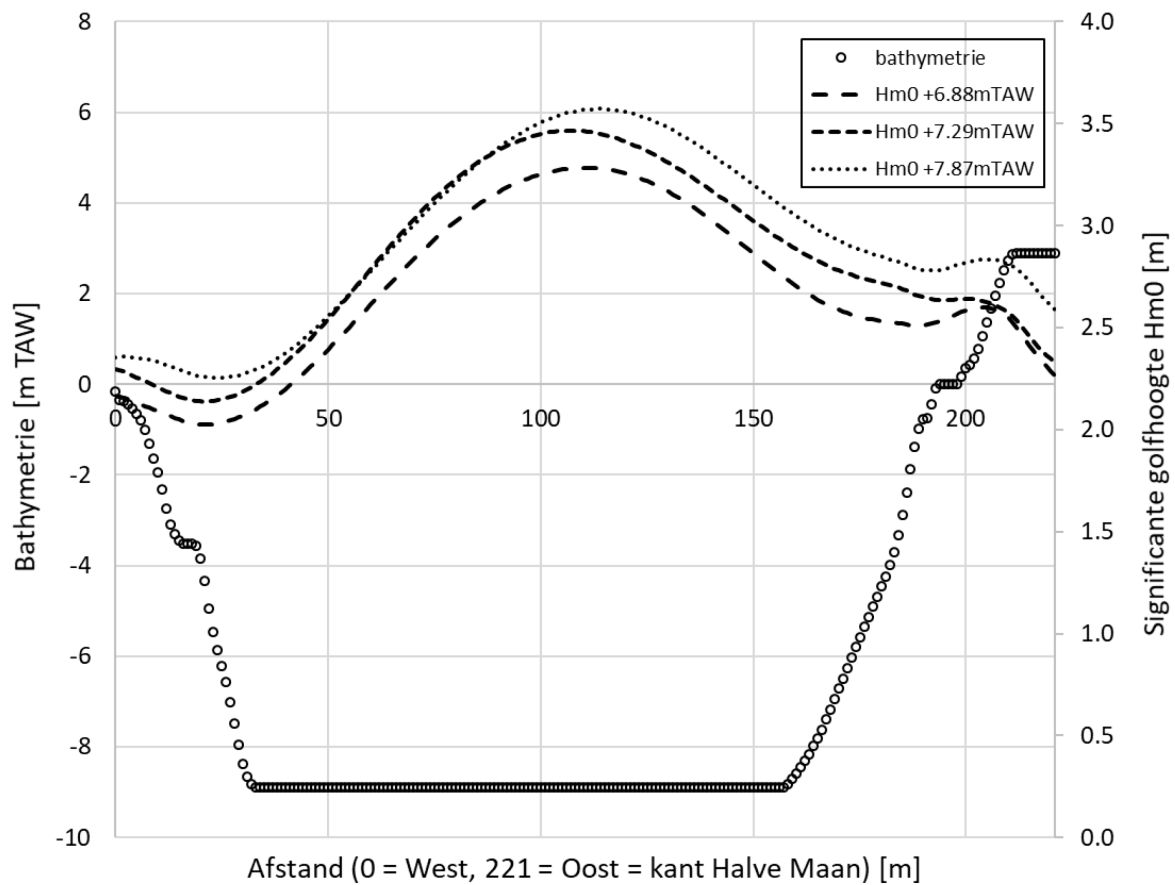
▪ Dwarstransect over de vaargeul ter hoogte van de kop van de Halve Maan

Om een idee te krijgen van de hoeveelheid golfenergie die binnendringt richting de binnenhaven is de variatie in golfhoogte over een dwarstransect in de vaargeul ter hoogte van de kop van de Halve Maan uitgezet tegenover het bodempeil in Figuur 58, en dit voor de 3 gemodelleerde klimaatscenario's. Figuur 57 illustreert waar de snede genomen is in de bathymetrie.

Figuur 57 – Locatie dwarstransect in de vaargeul ter hoogte van de kop van de Halve Maan



Figuur 58 – Verloop van de significante golfhoogte over een dwarstransect in de vaargeul ter hoogte van de Halve Maan

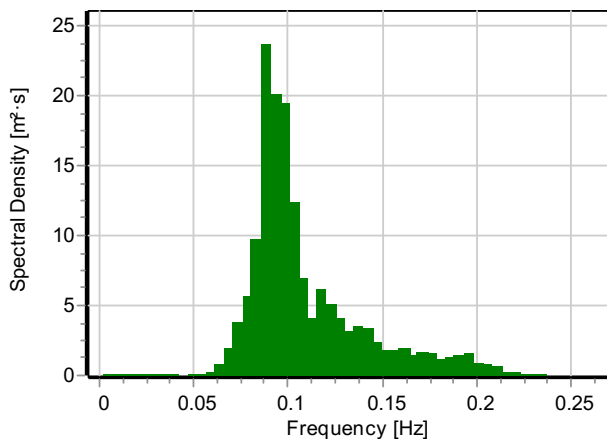


▪ Ter plaatse van de golfhoogtemeters

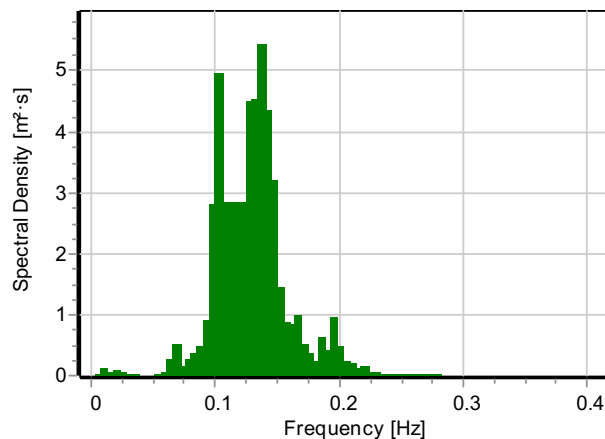
Tabel 25 geeft een overzicht van de resultaten op specifieke locaties, zoals aangeduid in Figuur 46. Tabel 22, Tabel 23 en Tabel 24 illustreren de golfspectra op enkele specifieke locaties voor respectievelijk de scenario's zonder en met zeespiegelstijging van 50 en 100 jaar. Voor deze laatste scenario's zijn enkel de golfspectra van enkele locaties in het Montgomerydok weergegeven aangezien enkel deze wezenlijk van vorm verschillen.

Voor de GHM aan de achterzijde van het Montgomerydok (ter hoogte van de Mercatorsluis) is de resonantie van bepaalde lange golffrequenties ten gevolge van de configuratie van het dok zichtbaar. Hoe meer golfoverslag over de kaaivlakken, hoe minder uitgesproken de resonantie wordt. Sowieso blijft het aandeel van deze lange golfenergie kleiner dan deze van de korte golven.

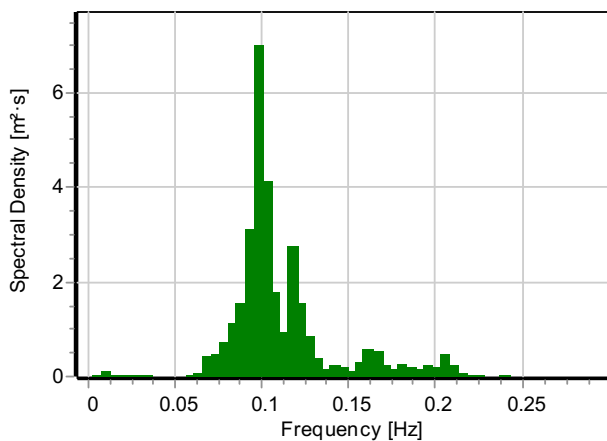
Tabel 22– Golspectra op verschillende locaties in het studiegebied: na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, zonder zeespiegelstijging (! Y-as verschilt van schaal in subfiguren)



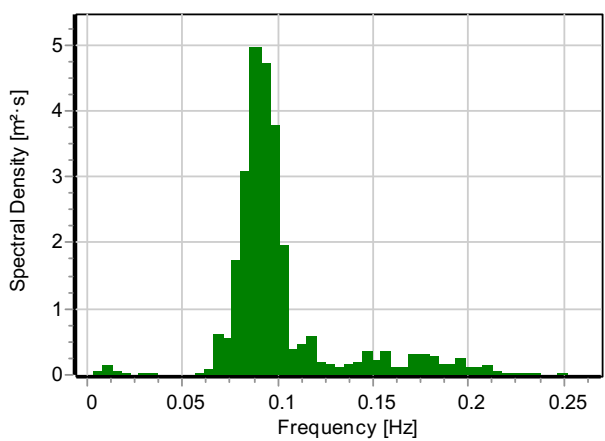
(a) GHM 0



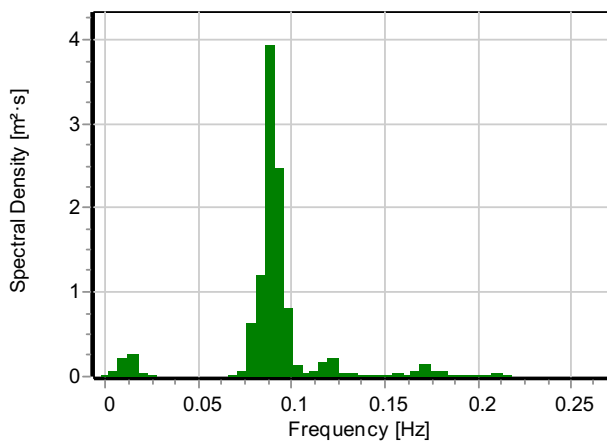
(b) GHM 6



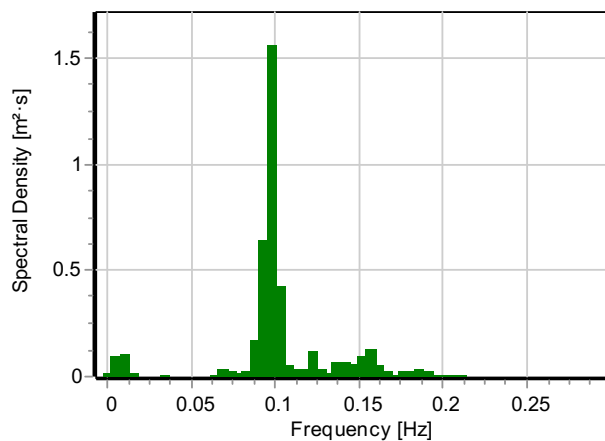
(c) GHM 7



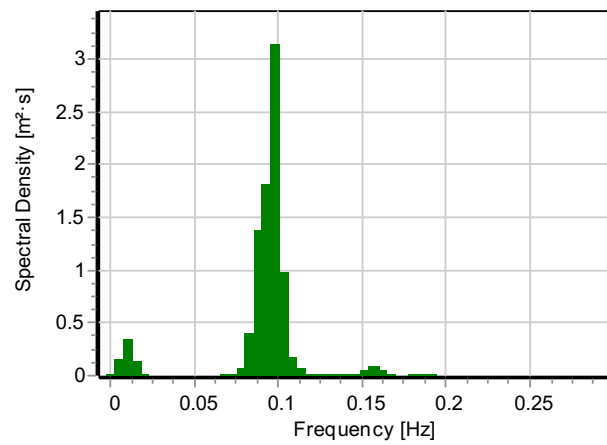
(d) GHM 11



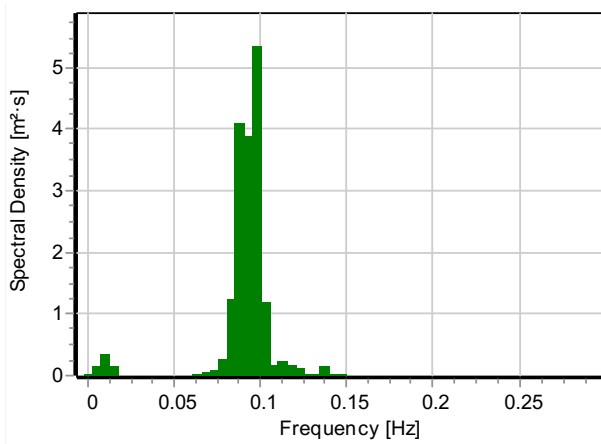
(e) GHM 18



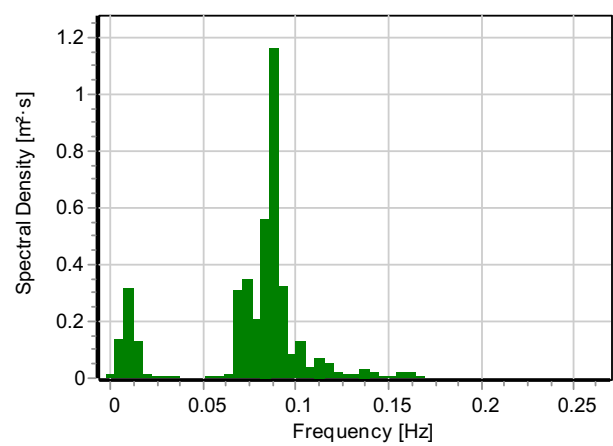
(f) GHM 20



(g) GHM 22

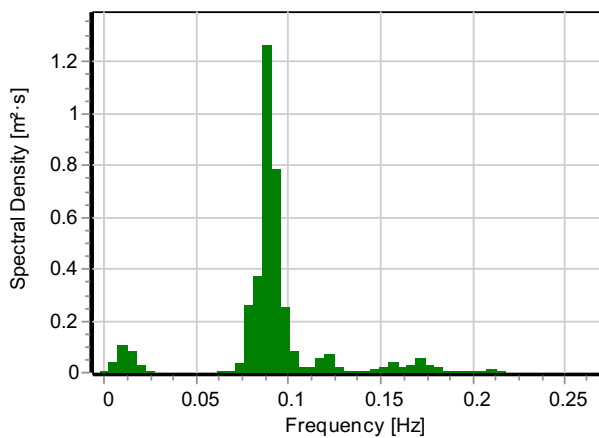


(h) GHM 28

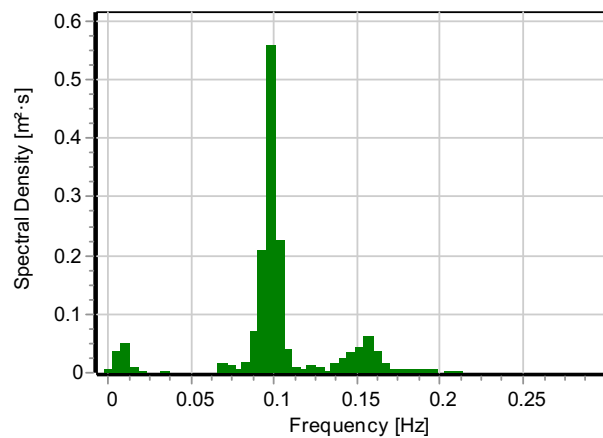


(i) GHM 29

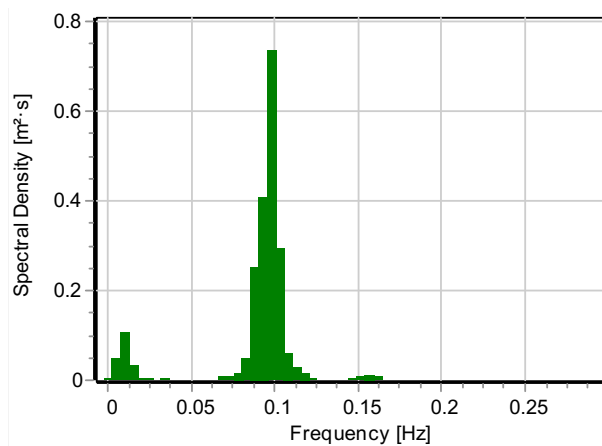
Tabel 23 – Golfspectra op verschillende locaties in het studiegebied: na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging + 50 jaar (! Y-as verschilt van schaal in subfiguren)



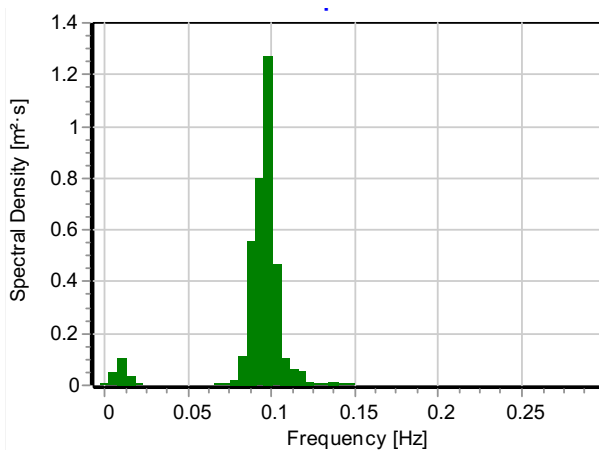
(a) GHM 18



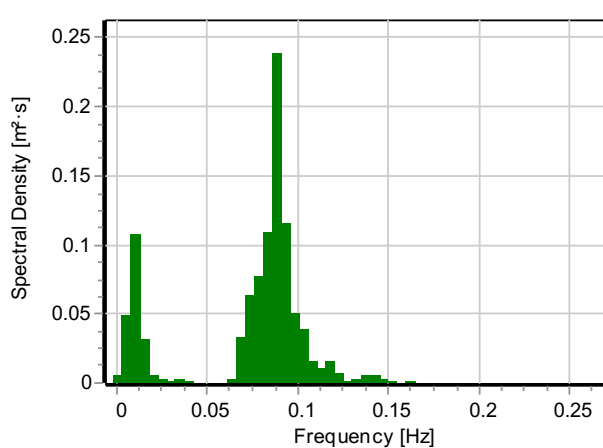
(b) GHM 20



(c) GHM 22

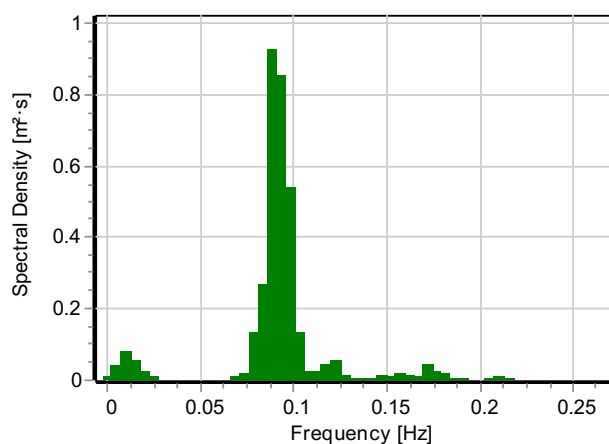


(d) GHM 28

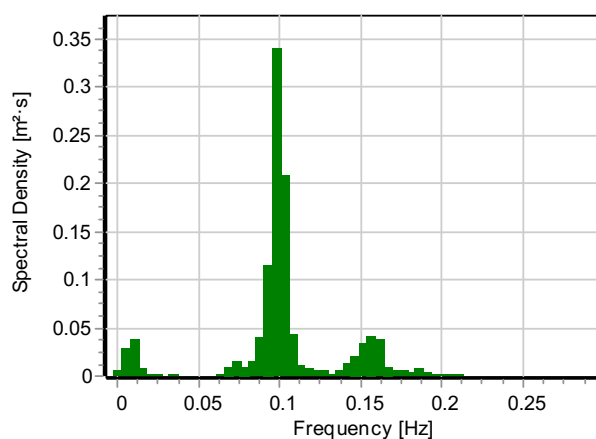


(e) GHM 29

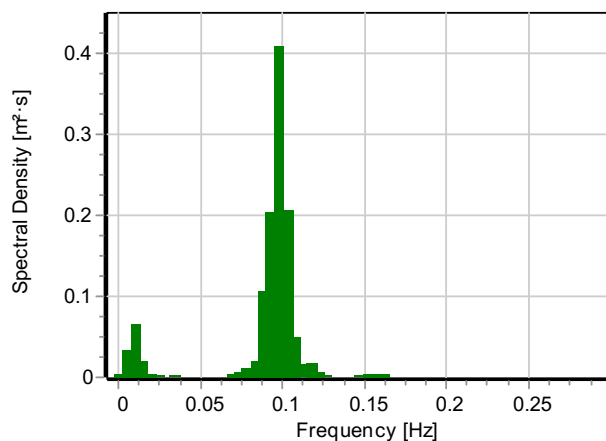
Tabel 24 – Golfspectra op verschillende locaties in het studiegebied: na simulatie van een 1000-jarige stormvloed, met zeespiegelstijging + 100 jaar (! Y-as verschilt van schaal in subfiguren)



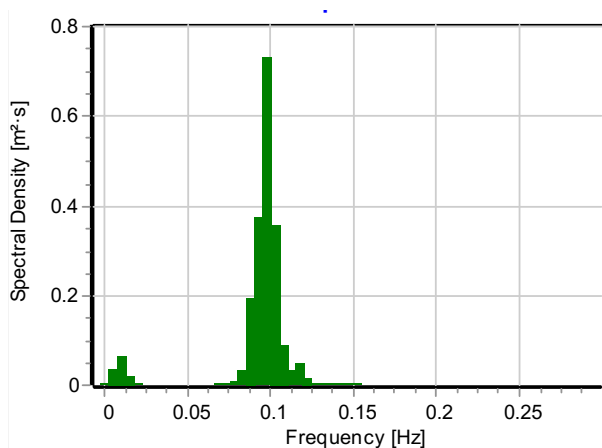
(a) GHM 18



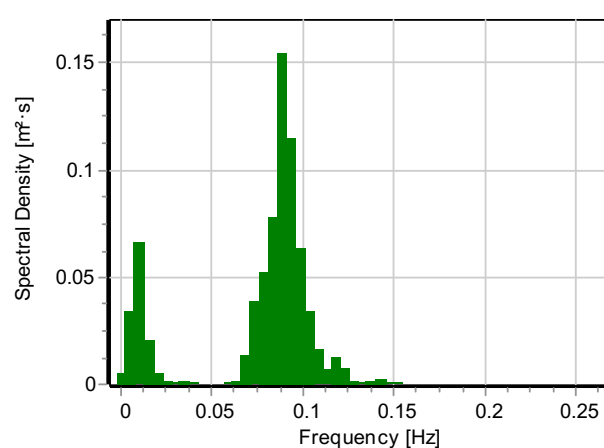
(b) GHM 20



(c) GHM 22



(d) GHM 28



(e) GHM 29

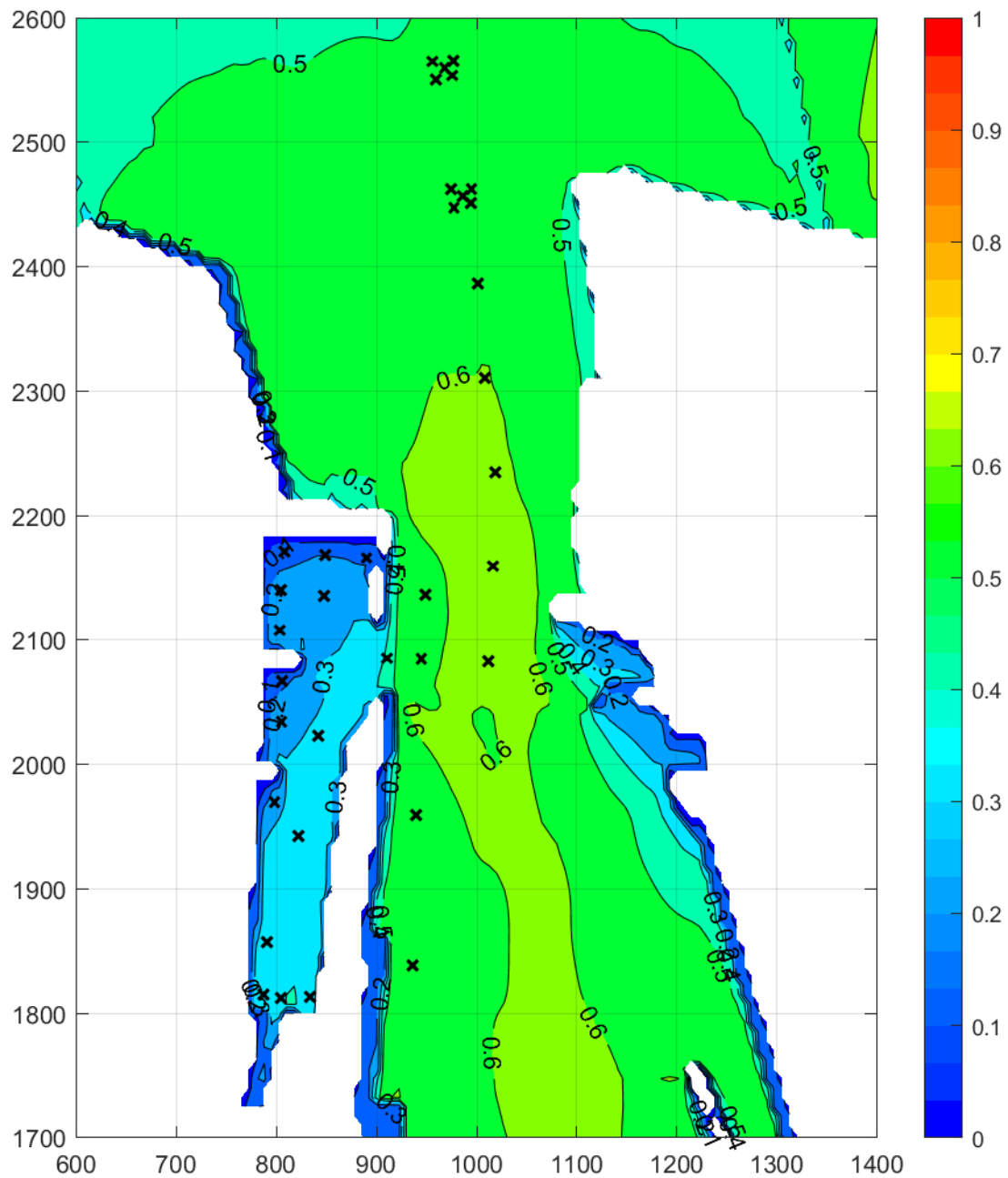
2.2. Lokale windgegenereerde golven: SWAN

2.2.1. Lokale golfgroei door wind

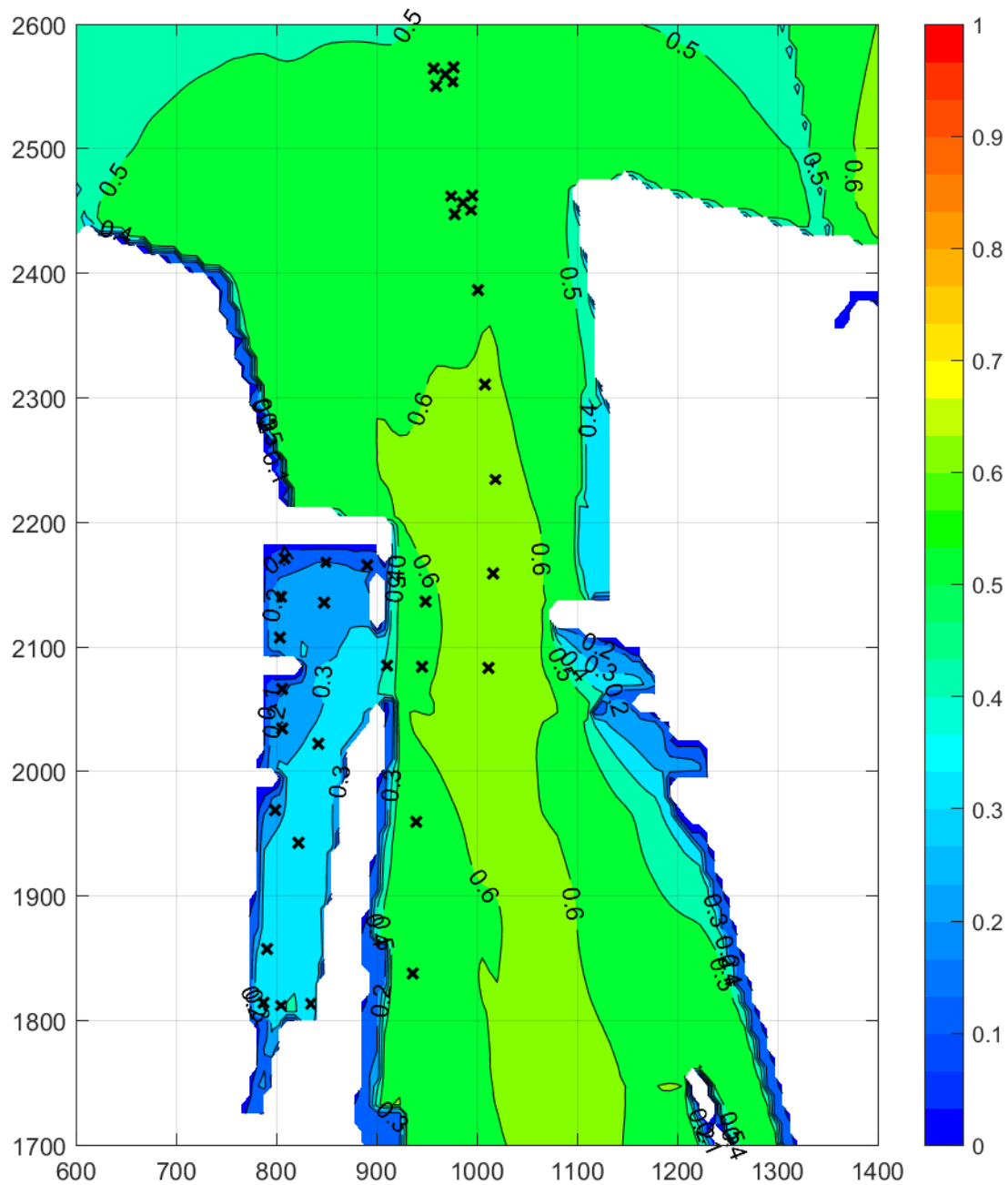
Figuur 59, Figuur 60 en Figuur 61 illustreren respectievelijk de lokale windgegenereerde golven in het havenbekken indien een 1000-jarige waterstand ingesteld is zonder dan wel met een zeespiegelstijging van 50 en 100 jaar. Aangezien de strijklengte waarover de wind blaast, gelijk blijft en de waterstand voldoende hoog is, is het golfpatroon nagenoeg gelijk voor de 3 scenario's.

De significante golfhoogte $H_{m0, WG}$ bedraagt 0.5 tot 0.6m in de vaargeul en zwaaicirkel terwijl deze 0.2 tot 0.3m bedraagt in het Montgomerydok.

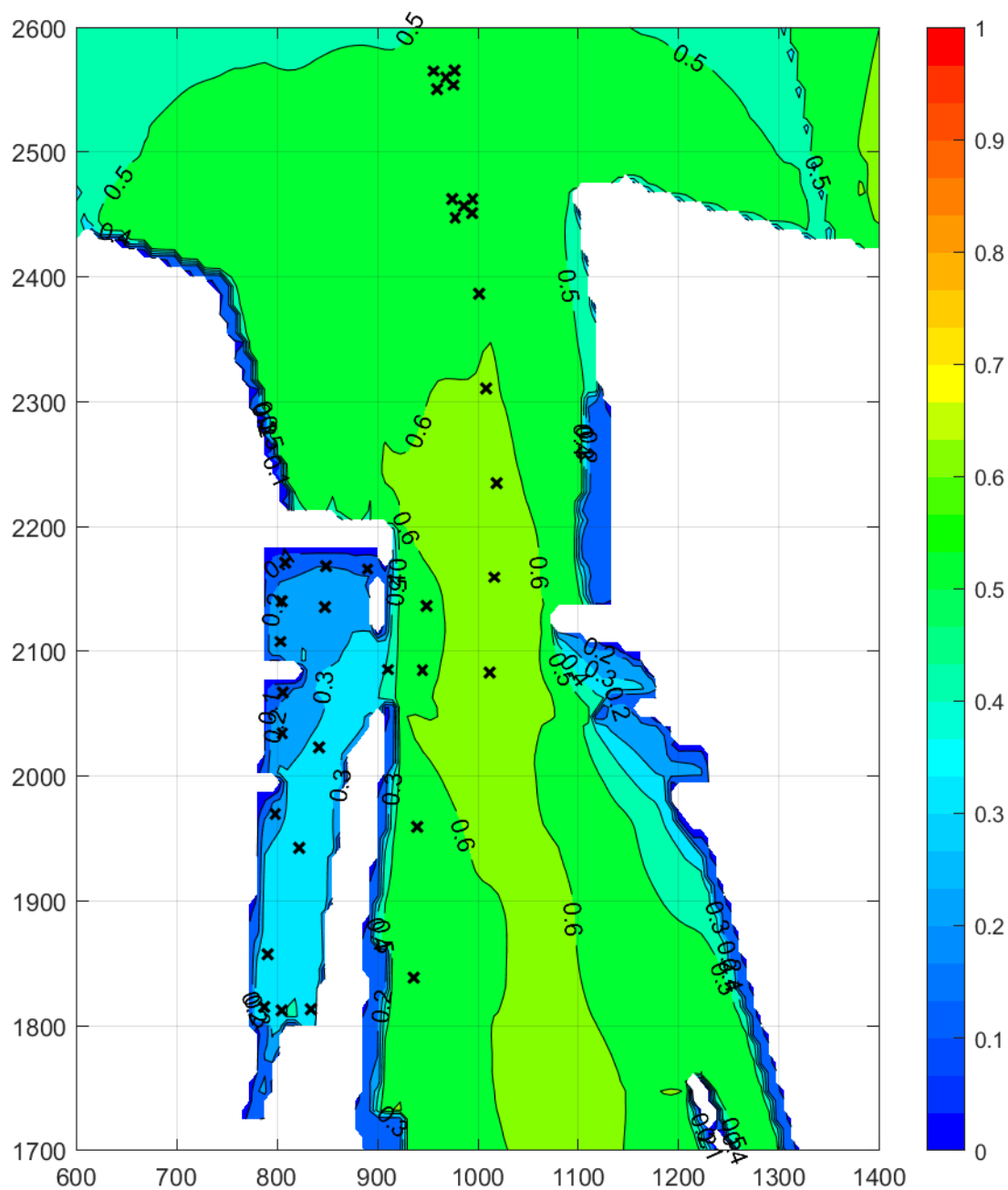
Figuur 59 – Significante golfhoogtes $H_{m0,WG}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u , waterstand h zonder zeespiegelstijging



Figuur 60 – Significante golfhoogtes $H_{m0,WG}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u , waterstand h met zeespiegelstijging + 50jaar



Figuur 61 – Significante golfhoogtes $H_{m0,WG}$ (in m) in de binnenhaven na simulatie van een lokale 1000-jarige windsnelheid u , waterstand h met zeespiegelstijging + 100jaar



2.2.2. Significante golfhoogtes op specifieke locaties

Tabel 25 geeft een overzicht van de resultaten op specifieke locaties, zoals aangeduid in Figuur 46.

3. Superpositie golfindringing en lokale windgolven

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 0)

$H_{m0,WG}$ significante golfhoogte veroorzaakt door lokale windgroei (cf. Sectie 0)

Tabel 25 geeft een overzicht van de significante golfhoogtes ten gevolge van golfindringing en lokale windgroei, $H_{m0,GI}$ en $H_{m0,WG}$ resp., alsook van de totale gesuperponeerde significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ (waar output van beide modellen ter beschikking is). De locaties van de GHMs zijn aangeduid in Figuur 46 en Figuur 62 (zoom op Montgomerydok).

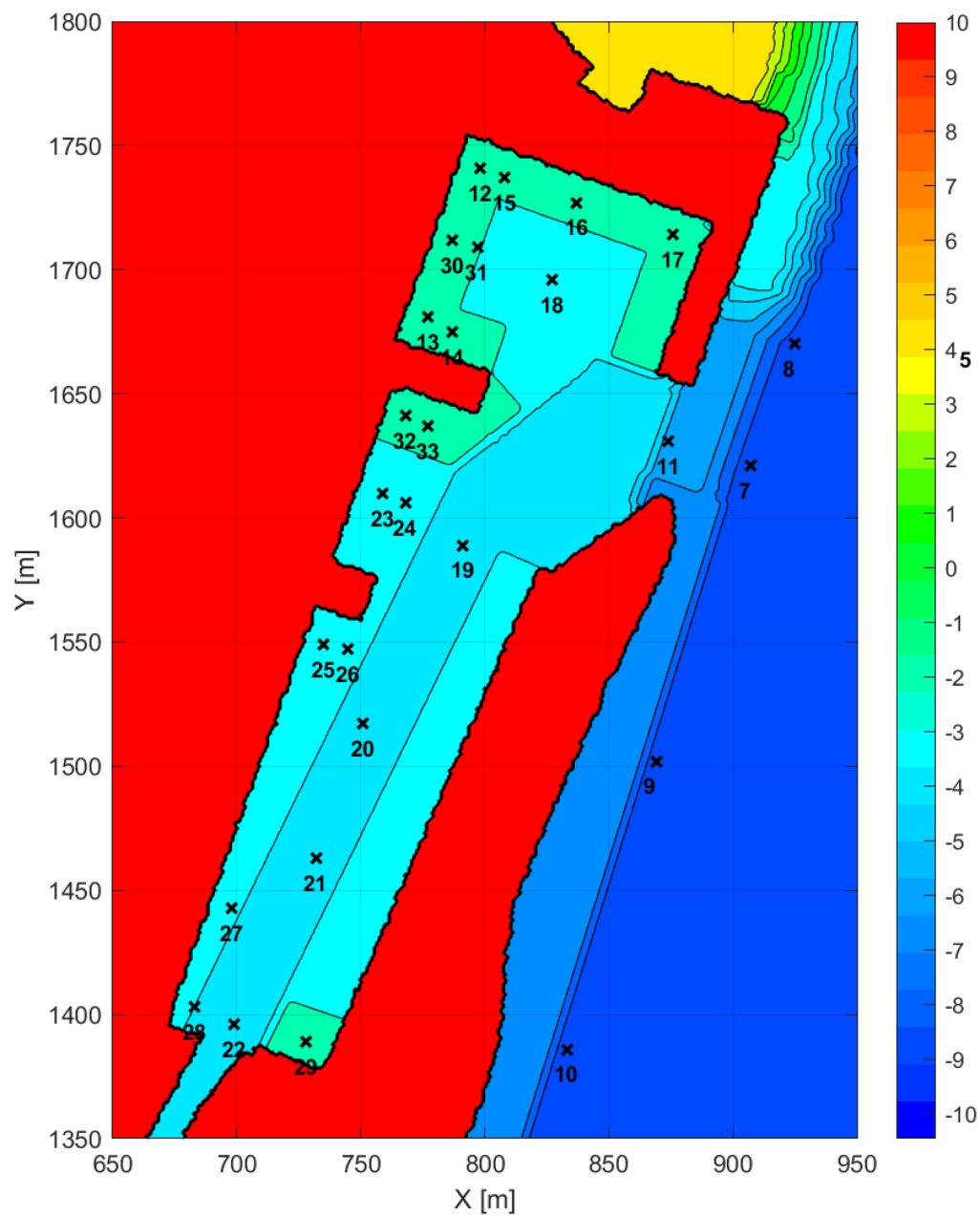
Bemerk dat de significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ van GHM 0 en 1 verschillen van de getabelleerde waarden in Tabel 20 omdat het hier de totale golfhoogte (invalende + gereflecteerde) betreft van enkel de middelste GHM van de ster array.

Tabel 25 – Significante golfhoogtes $H_{m0,GI}$, $H_{m0,WG}$ en $H_{m0,tot}$ op specifieke locaties voor alle scenario's

GHM	Locatie	Bodemdiepte [m TAW]	$h = +6.88\text{m TAW}$			$h = +7.29\text{m TAW}$			$h = +7.87\text{m TAW}$		
			$H_{m0,GI}$ [m]	$H_{m0,WG}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,GI}$ [m]	$H_{m0,WG}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,GI}$ [m]	$H_{m0,WG}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]
0	Vaargeul, voor Halve Maan	-8.9	3.51	0.56	3.55	3.78	0.56	3.82	3.79	0.56	3.83
1	Vaargeul, thv kop Halve Maan	-8.9	3.23	0.53	3.27	3.43	0.54	3.47	3.48	0.54	3.52
2	Vaargeul, thv talud Halve Maan	-8.9	2.88	0.59	2.94	3.09	0.59	3.15	3.09	0.59	3.15
3	Vaargeul, langs Halve Maan	-8.9	2.49	0.60	2.56	2.59	0.60	2.66	2.58	0.61	2.65
4	Vaargeul, langs Halve Maan	-8.9	2.44	0.61	2.52	2.54	0.61	2.61	2.59	0.62	2.66
5	Vaargeul, langs Halve Maan	-8.9	2.28	0.61	2.36	2.30	0.62	2.38	2.32	0.63	2.40
6	Vaargeul, langs Halve Maan	-8.9	2.05	0.61	2.14	2.02	0.61	2.11	1.94	0.62	2.04
7	Vaargeul, ingang Montgomerydok	-8.9	1.58	0.58	1.68	1.63	0.58	1.73	1.63	0.58	1.73

GHM	Locatie	Bodemdiepte [m TAW]	$h = +6.88\text{m TAW}$			$h = +7.29\text{m TAW}$			$h = +7.87\text{m TAW}$		
			$H_{m0,Gl}$ [m]	$H_{m0,WG}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,Gl}$ [m]	$H_{m0,WG}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]	$H_{m0,Gl}$ [m]	$H_{m0,WG}$ [m]	$H_{m0,tot}$ [m]
8	Vaargeul, thv RYCO	-8.7	1.47	0.57	1.58	1.53	0.58	1.64	1.61	0.58	1.71
9	Vaargeul, thv Station	-8.9	1.32	0.56	1.43	1.24	0.56	1.36	1.22	0.56	1.34
10	Vaargeul, thv Station	-8.9	1.26	0.55	1.37	0.94	0.55	1.09	0.87	0.55	1.03
11	Ingang Montgomerydok	-5.6	1.46	0.43	1.52	1.49	0.42	1.55	1.53	0.42	1.59
12	Montgomerydok	-1.6	1.21	0.17	1.22	0.73	0.17	0.75	0.67	0.17	0.69
13	Montgomerydok	-1.6	0.94	0.29	0.98	0.82	0.29	0.87	0.78	0.29	0.83
14	Montgomerydok	-1.6	0.59			0.45			0.44		
15	Montgomerydok	-1.6	0.65			0.38			0.36		
16	Montgomerydok	-1.6	1.31	0.20	1.33	0.81	0.20	0.83	0.70	0.20	0.73
17	Montgomerydok	-1.6	1.15	0.18	1.16	0.50	0.18	0.53	0.39	0.18	0.43
18	Montgomerydok	-2.1	0.93	0.25	0.96	0.55	0.26	0.61	0.52	0.26	0.58
19	Montgomerydok	-3.1	1.17	0.32	1.21	0.96	0.32	1.01	0.87	0.32	0.93
20	Montgomerydok	-3.1	0.57	0.34	0.66	0.35	0.34	0.49	0.29	0.34	0.45
21	Montgomerydok	-3.1	0.53			0.30			0.24		
22	Montgomerydok	-3.1	0.85	0.36	0.92	0.41	0.36	0.55	0.31	0.36	0.48
23	Montgomerydok	-2.6	0.89	0.25	0.92	0.77	0.25	0.81	0.74	0.25	0.78
24	Montgomerydok	-2.6	0.56			0.44			0.43		
25	Montgomerydok	-2.6	0.49	0.25	0.55	0.33	0.25	0.41	0.31	0.25	0.40
26	Montgomerydok	-2.6	0.38			0.25			0.24		
27	Montgomerydok	-2.6	1.18	0.35	1.23	0.63	0.35	0.72	0.50	0.35	0.61
28	Montgomerydok	-3.0	1.19	0.38	1.25	0.54	0.38	0.66	0.40	0.38	0.55
29	Montgomerydok	-1.6	0.57	0.33	0.66	0.28	0.33	0.43	0.24	0.33	0.41
30	Montgomerydok	-1.6	0.83	0.23	0.86	0.56	0.24	0.61	0.52	0.24	0.57
31	Montgomerydok	-1.8	0.56			0.32			0.30		
32	Montgomerydok	-1.6	1.57	0.19	1.58	1.21	0.19	1.22	1.08	0.20	1.10
33	Montgomerydok	-1.6	0.99			0.77			0.70		

Figuur 62 – Locatie golfhoogtemeters op de bathymetrie [m TAW]: zoom Montgomerydok en Churchillkaai



4. Referenties van deze memo

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. VII, 19 + 2 p. bijlagen pp.

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

De Roo, S.; Vanneste, D.; Suzuki, T.; Mostaert, F. (2019). Numerieke modellering van het kortkruinig golfklimaat in de haven van Oostende. Huidige en toekomstige havengeometrie. Versie 2.0. *WL Rapporten*, 17_052_1. Waterbouwkundig Laboratorium: 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

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>

Tractebel. (2017). Overzichtsplan profielen zijde vaargeul - Halve Maan Oostende: verbreding vaargeul (P.009723-DR0002-IFA-07 (snedes vaargeul).pdf)

Willems, M.; De Roo, S.; Vanneste, D. (2019). Waterstand in het schaalmodel. *WL Memo's*, 18_066_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. 3 pp.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be