



**Vlaanderen**  
is wetenschap



15\_109\_1  
WL rapporten

## **Studie golfimpact kaai 101 haven Oostende**

Deelrapport 1  
Numerieke studie opwaartse golfkracht

**DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN**

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

# Studie golfimpact kaai 101, haven Oostende

## Deelrapport 1 – Numerieke studie opwaartse golfkracht

Vanneste, D.; Altomare, C.; De Roo, S.; Peeters, P.; Mostaert, F.



### Juridische kennisgeving

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

### Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017  
D/2017/3241/138

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**Vanneste, D.; Altomare, C.; De Roo, S.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017). Studie golfimpact kaai 101, haven Oostende: Deelrapport 1 – Numerieke studie opwaartse golfkracht. Versie 4.0. WL Rapporten, 15\_109\_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

### Documentidentificatie

Opdrachtgever:	Afdeling Expertise Beton en Staal (MOW)	Ref.:	WL2017M15_109_1
Keywords (3-5):	Golfbelasting, kaaiplateau, numeriek model, DualSPPhysics		
Tekst (p.):	28	Bijlagen (p.):	10
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Vanneste, D.; Altomare, C.; De Roo, S.
------------	----------------------------------------

### Controle

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

### Goedkeuring

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





## Abstract

Voor de ontwerpstudie van een nieuw te bouwen aanmeerplatform (kaai 101) in de haven van Oostende, dient een maatgevende golfbelasting in aanmerking genomen te worden. Golven dringen doorheen de havenmond en vallen de structuur aan uit noordelijke richting. De golfimpact zorgt voor een (hoofdzakelijk) horizontale belasting op de ondersteuningspalen en een opwaartse kracht op het platform. In een eerder advies *WL2016A15\_085* (Suzuki *et al.*, 2015) werd een preliminaire inschatting van de opwaartse kracht gemaakt op basis van de conclusies uit het schaalmodelonderzoek (Kisacik *et al.*, 2012) op een gelijkaardige structuur (een verticale wand met uitkraging). In het hoger vermelde advies werden echter een aantal vereenvoudigingen en hypothesen toegepast die een impact hebben op de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de inschatting van de opwaartse golfimpact.

Deze beperkingen in het advies *WL2016A15\_085* illustreren de noodzaak voor een meer diepgaande studie. Hiertoe werd met behulp van het SPH-gebaseerde model DualSPHysics de golfimpact geassocieerd met een 1000-jarige storm te Oostende gesimuleerd. Uit deze tijdreeks werd een passend tijdsvenster gekozen zodanig dat de maximale golfimpact geassocieerd met de grootste golven gesimuleerd werd.

In eerste instantie werd in een 2D model nagegaan wat de invloed is van het waterpeil op de golfimpact. Van de 4 onderzochte gevallen resulteert een waterpeil van +4.65 m TAW (wat overeenkomt met de onderzijde van het platform) in de grootste opwaartse golfimpact op het platform (8110 kN/m), alsook in de grootste horizontale kracht op de achterste balk van het platform (934 kN/m).

In een vereenvoudigd 3D model zonder palen wordt de reductie van de golfkracht ten gevolge van de schuine golfinval onderzocht. De opwaartse golfkracht daalt tot 740 kN/m voor het meest kritieke geval (SWL +4.65 m TAW).

Uit een simulatie van het volledig 3D model met palenrij blijkt dat de maximale golfimpact nog verder gereduceerd wordt tot 583 kN/m voor het geval met SWL +4.65 m TAW. De inschatting is dat de grootste reductie t.o.v. 2D loodrechte golfinval veroorzaakt wordt doordat de golven schuin invallen op de structuur, eerder dan door de demping veroorzaakt door de palenrij.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren .....	VIII
1 Probleemstelling.....	1
2 Methodologie .....	4
2.1 Verfijning hydraulische randvoorwaarden .....	4
2.2 Numerieke modellering.....	4
2.2.1 Golfgeneratie en actieve golfabsorptie .....	4
2.2.2 Stapsgewijze aanpak modellering .....	4
3 Hydraulische randvoorwaarden .....	5
3.1 Ontwerp retourperiode .....	5
3.2 Waterdiepte .....	5
3.3 Golfhoogte en -periode .....	6
4 2D modellering in DualSPHysics .....	7
4.1 Geval 1 : SWL +2.1 m TAW .....	7
4.1.1 Simulatieduur 300 s.....	7
4.1.2 Simulatieduur 80 s.....	8
4.1.3 Gevoelighedsanalyse initiële tussenruimte partikels .....	9
4.2 Geval 2 : SWL +3.5 m TAW .....	9
4.3 Geval 3 : SWL +4.65 m TAW .....	10
4.3.1 Tijdreeks 1.....	10
4.3.2 Bijkomende simulaties tijdreeksen 2 & 3 .....	10
4.4 Geval 4 : SWL +7.2 m TAW .....	11
4.5 Samenvatting resultaten 2D simulaties.....	12
5 3D modellering in DualSPHysics .....	13
5.1 Vereenvoudigd 3D model.....	13
5.1.1 Voorbereidende test in 2D .....	13
5.1.2 3D model .....	14
5.2 3D model met palen .....	15
5.2.1 Geval 3 (SWL +4.65 m TAW) .....	16



5.2.2	Geval 2 (SWL +3.5 m TAW) .....	17
6	Bepaling resultante opwaartse kracht op kaaivlak .....	18
6.1	2D simulatie .....	18
6.2	3D simulatie .....	19
7	Inschatting horizontale golfimpact op een moot kaaiplatform .....	21
8	Golfkracht op de verdeelbalk .....	23
9	Golfkracht op frontaal gedeelte betonligger en dekzerk .....	26
10	Conclusies .....	27
	Referenties .....	28

MEMO

1	Introductie .....	A1
2	Methodologie .....	A1
2.1	MIKE21 BW: aanpassingen model .....	A1
2.2	Keuze hydraulische randvoorwaarden 'offshore' .....	A3
2.3	Verlenging tijdreeks tot 200 golven .....	A3
3	Resultaten .....	A4
3.1	Invallende significante golfhoogte $H_{m0}$ voor golfrichting $-37^\circ$ .....	A4
3.1.1	Invallende significante golfhoogte $H_{m0}$ en piekgolfperiode $T_p$ door golfindringing (GI) .....	A4
3.1.2	Significante golfhoogte $H_{m0}$ door lokale windgroei (WG) .....	A5
3.1.3	Gesuperponeerde 'invallende' significante golfhoogte $H_{m0}$ .....	A6
3.2	Implicaties tijdreeksverlenging .....	A6
4	Besluit .....	A9
5	Referenties .....	A10

## Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Ontwerpscenario's numerieke studie .....	6
Tabel 2 - Golfrandvoorwaarden voor het SPH model .....	6
Tabel 3 - Samenvatting resultaten 2D simulatie geval 1, SWL +2.1 m TAW voor verschillende tijdsduur simulatie .....	8
Tabel 4 - Invloed $dp$ op golfhoogte en krachten, 2D simulatie geval 1 .....	9
Tabel 5 - Resultaten geval 3 (SWL +4.65 m TAW) voor 3 verschillende golventijdreeksen .....	11
Tabel 6 - Samenvatting 2D model resultaten .....	12
Tabel 7 - Vergelijking resultaten 2D en 3D simulatie voor geval 3 (SWL +4.65 m TAW) .....	14
Tabel 8 - Vergelijking resultaten 3D simulaties, geval 3 (SWL+4.65 m TAW) .....	17
Tabel 9 - Krachten op frontaal gedeelte betonligger en dekzerk .....	26

### MEMO

Tabel 2-1 'offshore' hydraulische randvoorwaarden .....	A3
Tabel 3-1 Maximale significante golfhoogtes $H_{m0,GI}$ in de zone tussen de Churchillkaai en de vaargeul .....	A4
Tabel 3-2 Piek golfperiode $T_{p,GI}$ langs de Churchillkaai, bepaald door tijdreeksanalyse in de uitvoerpunten. ....	A5
Tabel 3-3 Hydraulische randvoorwaarden gebruikt als input voor SWAN (Tabel 1-1 van Bijlage 4 uit Gruwez et al., 2011) .....	A5
Tabel 3-4 Lokale wind gegenereerde golven, uit de meest nadelige windrichting NW (Tabel 5-1 van Gruwez et al., 2011) .....	A6
Tabel 3-5 Maximale gesuperponeerde significante golfhoogte $H_{m0}$ ter hoogte van de Churchillkaai .....	A6

# Lijst van de figuren

Figuur 1 – Plaatsaanduiding kaai 101, haven Oostende.....	1
Figuur 2 – 3D model kaai 101 .....	1
Figuur 3 – Ontwerp inplanting en dwarsdoorsnede kaai 101, haven Oostende.....	3
Figuur 4 – Evolutie waterstand Oostende tijdens 1000-jarige storm volgens vgl. (2) .....	5
Figuur 5 – Dwarsdoorsnede 2D-model (voorbeeld met SWL op +4.65 m TAW).....	7
Figuur 6 – 2D simulatie geval 1 (SWL +2.1 m TAW), tijdopname op t=0 (linkerpaneel) en t=135 s (rechterpaneel).....	8
Figuur 7 – 2D simulatie geval 1 (SWL +2.1 m TAW), opwaartse kracht(linkerpaneel) en horizontale kracht (rechterpaneel).....	8
Figuur 8 – 2D simulatie geval 2 (SWL +3.5 m TAW), opwaartse kracht(linkerpaneel) en horizontale kracht (rechterpaneel).....	9
Figuur 9 – 2D simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW), tijdopname op t=0 (linkerpaneel) en t=108.65 s (rechterpaneel).....	10
Figuur 10 – 2D simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW), opwaartse kracht(linkerpaneel) en horizontale kracht (rechterpaneel).....	10
Figuur 11 – 2D simulatie geval 4 (SWL +7.2 m TAW) : verticale belasting op kaaiplatform.....	11
Figuur 12 – 2D simulatie geval 4 (SWL +7.2 m TAW), tijdopname op t=0 (linkerpaneel) en t=78.05 s (rechterpaneel).....	12
Figuur 13 – 2D simulatie geval 3 : tijdvenster 300 s, dp=0.10 m (linkerpaneel) en tijdvenster 80 s, dp=0.15 m (rechterpaneel).....	13
Figuur 14 – Illustratie van het 3D vereenvoudigd model (in rood aangeduid de zone waar golfdemping plaats vindt).....	14
Figuur 15 – Zone meting opwaartse golfimpact (in zwart aangeduid) .....	15
Figuur 16 – 3D vereenvoudigde simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW) : opwaartse golfkracht .....	15
Figuur 17 – Volledig 3D model incl. voorste palenrij.....	16
Figuur 18 – 3D simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW) : opwaartse golfkracht .....	17
Figuur 19 – Dwarsdoorsnede op tijdstip maximale golfimpact, 2D simulatie. Resultante opwaartse kracht in rood (niet op schaal).....	18
Figuur 20 – Verdeling opwaartse golfkracht, 2D golfimpact.....	19
Figuur 21 – Dwarsdoorsnede op tijdstip maximale golfimpact, 3D simulatie. Resultante opwaartse kracht in groen (niet op schaal).....	19
Figuur 22 – Verdeling opwaartse golfkracht, 3D golfimpact.....	20
Figuur 23 – Bovenaanzicht kaaiplatform.....	22
Figuur 24 – Dwarsdoorsnede betonligger onder kaaivlak.....	22
Figuur 25 – Detail dwarsdoorsnede verdeelbalk en betonligger .....	23
Figuur 26 – Maximale 2D golfimpact op verdeelbalk. SWL +4.65 m TAW .....	24

Figuur 27 – Horizontale kracht op de verdeelbalk, 2D simulatie. SWL +4.65 m TAW.....	25
Figuur 28 – Opwaartse kracht op de verdeelbalk, 2D simulatie. SWL +4.65 m TAW.....	25

## MEMO

Figuur 2-1 Aanpassing bathymetrie ter hoogte van de Churchillkaai (gele lijn) tot een bassin met L x B = 293 x 236m (golfrichting -37°).....	A2
Figuur 2-2 Aanpassing sponslagen (met L=270m) ter hoogte van zuidelijke (artificiële) kaaimuur van het bassin.....	A2
Figuur 3-1 Significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ langs de Churchillkaai na simulaties met lang- (LK) en kortkruinige (KK) golven ‘zonder kaaimuur’, in vergelijking tot het resultaat mét kaaimuur .....	A4
Figuur 3-2 Uitvoerpunten langs Churchillkaai .....	A5
Figuur 3-3 Sponslaag langs de Halve Maan helling voor een tijdreeks met 100 golven .....	A7
Figuur 3-4 Verlengde sponslaag langs de Halve Maan helling voor een tijdreeks met 200 golven.....	A7
Figuur 3-5 Significante golfhoogte $H_{m0,GI}$ langs de Churchillkaai na simulaties met langkruinige golven in een tijdreeks van 100 en 200 golven, en mogelijke toevoeging van extra sponslaag (SL) langs de Halve Maan helling.....	A7
Figuur 3-6 Verdeling van de tijdreeks bestaande uit 100 golven (met extra SL) t.o.v. de theoretische Rayleigh verdeling .....	A8
Figuur 3-7 Verdeling van de tijdreeks bestaande uit 200 golven (met extra SL) t.o.v. de theoretische Rayleigh verdeling .....	A8



# 1 Probleemstelling

Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) is verantwoordelijk voor het ontwerp van een nieuw te bouwen aanmeerplatform (kaai 101) in de haven van Oostende. Deze kadeconstructie is gelegen aan de achterzijde van de Vloot gebouwen (Churchillkaai 2), ten zuiden van de ingang van het Montgomerydok (Figuur 1).

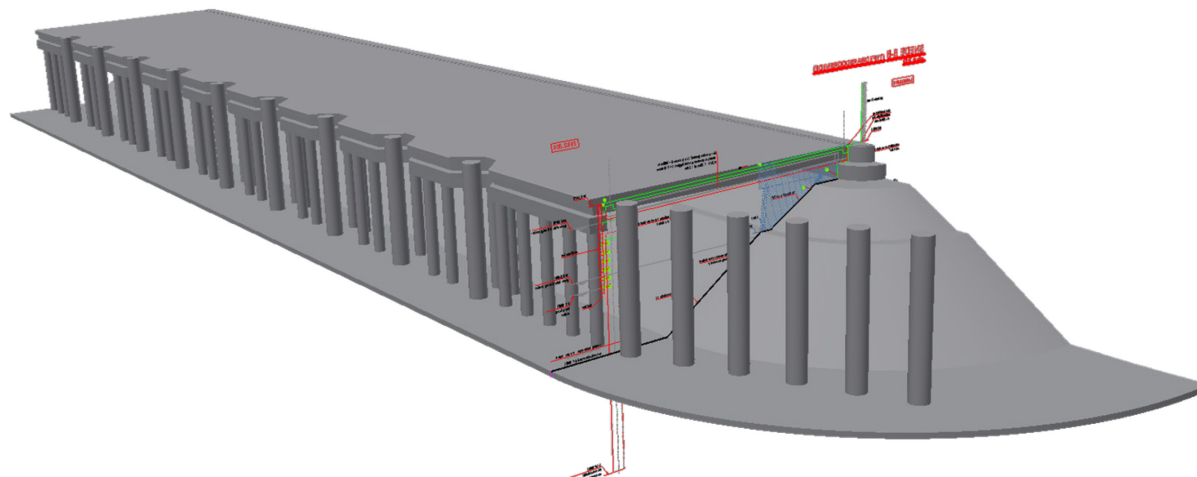
Figuur 1 – Plaatsaanduiding kaai 101, haven Oostende



© Google Maps (2016)

Het ontwerp van de kadeconstructie (Figuur 2) is opgebouwd uit een betondek op liggers ondersteund door cilindrische palen. De bestaande kademuur op paalfundering wordt afgebroken en vervangen door een talud bekleed met stortsteen.

Figuur 2 – 3D model kaai 101



Voor het structureel ontwerp van het kaaipatform dient een maatgevende golfbelasting in aanmerking genomen te worden. Golven dringen doorheen de havenmond en vallen de structuur aan uit noordelijke richting (Figuur 1). De golfimpact zorgt voor een (hoofdzakelijk) horizontale belasting op de ondersteuningspalen en een opwaartse kracht op het platform.

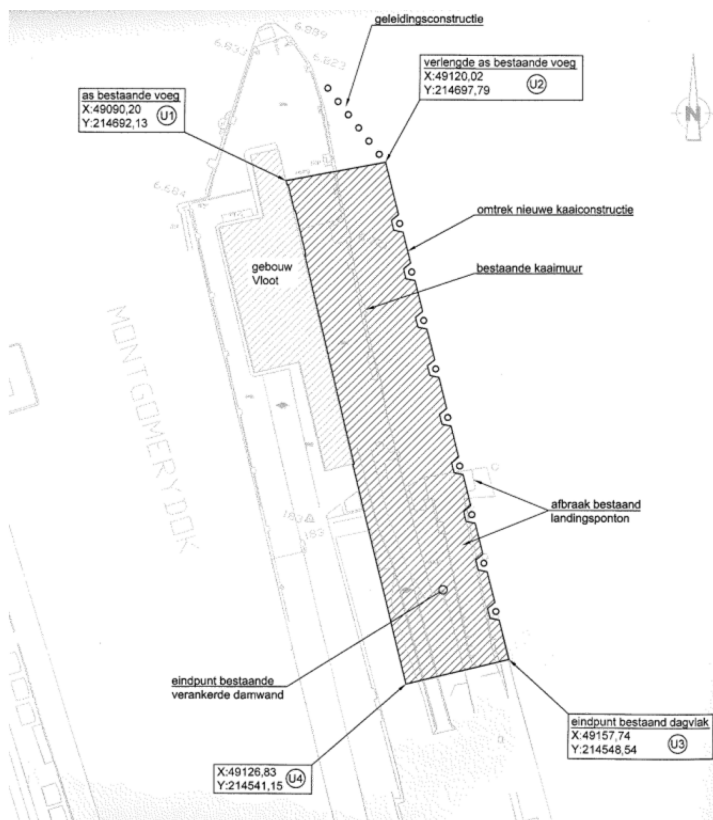
In een eerder advies *WL15\_085* werd een preliminaire inschatting gemaakt van de golfbelasting. De horizontale golfkrachten op de ondersteuningspalen werden berekend op basis van de Morison theorie (Vanneste *et al.*, 2015). In het advies van Suzuki *et al.* (2015) werd de opwaartse kracht ingeschat op basis van de conclusies uit het schaalmodelonderzoek (Kisacik *et al.*, 2012) op een gelijkaardige structuur (een verticale wand met uitkraging). In het hoger vermelde advies werden echter een aantal vereenvoudigingen en hypothesen toegepast die een impact hebben op de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de inschatting van de golfbelasting, in het bijzonder op de opwaartse golfimpact. De belangrijkste beperkingen worden hierna kort opgesomd:

- het schaalmodel (Kisacik) bestaat uit een verticale wand met uitkraging. Het voorgestelde ontwerp (Figuur 3) bevat een talud en ondersteuningspalen die de wijze van golfimpact aanzienlijk kunnen beïnvloeden in vergelijking met een verticale wand;
- de fysische modelproeven werden uitgevoerd in een 2D golfgoot waarbij de golfkruin loodrecht invalt op de structuur. Het te bouwen kaaipatform zal echter onderworpen worden aan sterk schuine golfinval. Het valt te verwachten dat de invalrichting de maximale golfimpact aanzienlijk zal beïnvloeden. In Suzuki *et al.* (2015) werd dit ten dele in rekening gebracht door middel van een reductiefactor volgens Goda. Op deze laatste geldt echter een grote mate van onzekerheid;
- het fysisch model werd beproefd onder golfcondities die slechts ten dele gelijkaardig zijn deze te verwachten in situ (na verschaling);
- de golfrandvoorwaarde in het advies werd bepaald uit bestaande MIKE21-BW golfmodellering (Gruwez *et al.*, 2011). De bepaalde golfhoogte ter hoogte van kaai 101 is echter een totale golfhoogte, inclusief reflectie van de bestaande kaaimuur. Voor een nauwkeurige bepaling van de golfbelasting is de invallende golfhoogte noodzakelijk;
- de golfbelasting werd bepaald voor het hoogwaterpeil bij twee verschillende retourperiodes. Er werd echter niet nader onderzocht welke combinatie van waterpeil en golfhoogte de grootste belasting veroorzaakt.

Deze beperkingen in het advies *WL15\_085* illustreren de noodzaak voor een meer diepgaande studie naar de opwaartse golfimpact op het kaaipatform. In de onderhavige numerieke studie worden de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

1. welke is de maximale opwaartse golfkracht voor loodrechte golfinval, voor de meest ongunstige combinatie van waterpeil, golfhoogte en -periode?
2. hoeveel wordt deze opwaartse golfkracht gereduceerd onder schuine golfinval?
3. wat is de resultante van de opwaartse golfkracht op de betonplaat (het dek van het platform)?
4. wat is de horizontale impact op de betonnen l-liggers die de betonplaat ondersteunen?
5. wat is de golfimpact op de verdeelbalk (aan de voorzijde van het kaaipatform waarop de betonliggers steunen) en het frontale vlak van betonligger en dekzerk ?

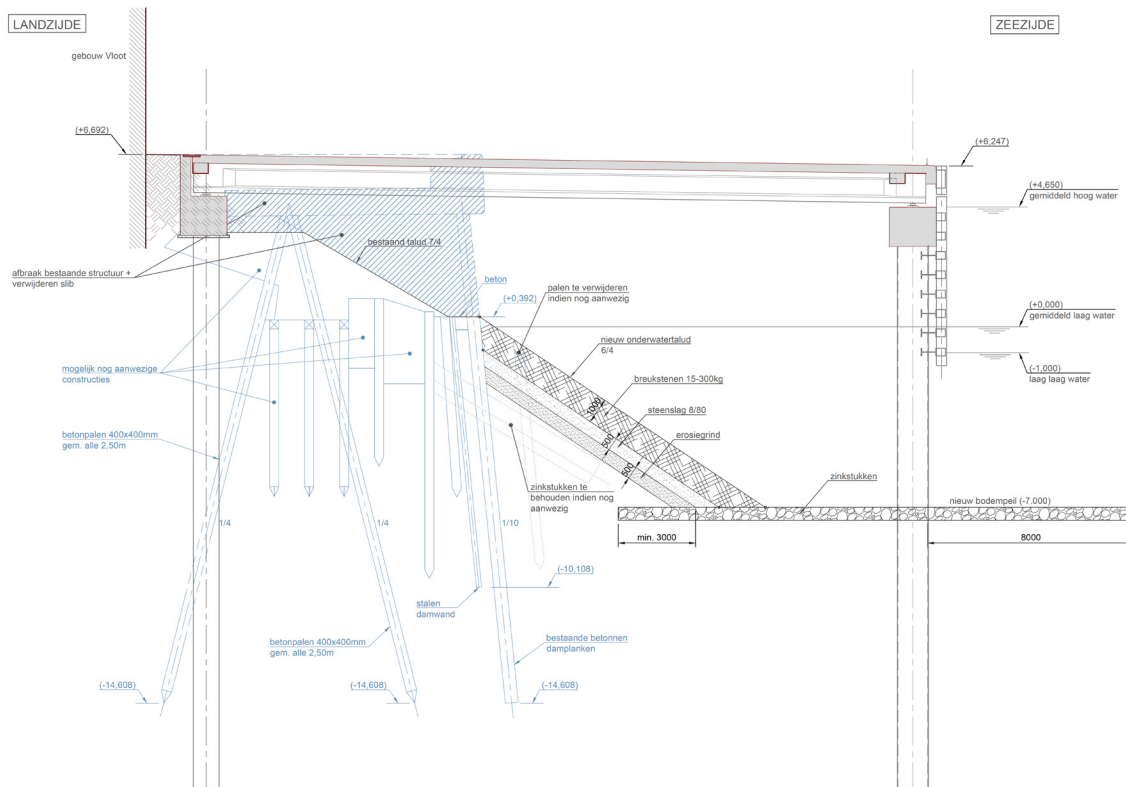
Figuur 3 – Ontwerp inplanting en dwarsdoorsnede kaai 101, haven Oostende



(plan EBS AMS 0455-001 : Haven van Oostende.Vernieuwing kaaimuur 101 – Inplanting)

TYPEDWARSPROFIEL ONDERWATER TALUD

schaal: 1/100



(plan EBS AMS 0455-002 : Haven van Oostende.Vernieuwing kaaimuur 101 – Planzicht)



## 2 Methodologie

### 2.1 Verfijning hydraulische randvoorwaarden

In het advies *WL15\_085* (Suzuki *et al.*, 2015) werd de golfrandvoorwaarde ter hoogte van de bouwplaats bepaald voor twee stormvloedpeilen +7.2 m en +6 m TAW. De gebruikte waarden betreffen echter de *totale* golfhoogte (incl. reflectie op de kaaimuur) en niet de *invallende* golfhoogte, welke nodig is als randvoorwaarde in het numeriek model.

Om de invallende golfhoogte te bepalen werden bijkomende simulaties uitgevoerd met MIKE21-BW. In een numerieke studie werd de bestaande bathymetrie van het Oostende golfmodel aangepast ter hoogte van de Churchillkaai. De kaaimuur werd verwijderd en sponslagen toegevoegd zodat de reflectie op de kaaimuur verdwijnt en de golfhoogte op deze locatie als invallend beschouwd kan worden. Appendix A bevat de memo met resultaten van deze studie met MIKE21-BW.

### 2.2 Numerieke modellering

De numerieke studie naar de opwaartse golfimpact wordt uitgevoerd met DualSPHysics<sup>1</sup>, een open-source numerieke code gebaseerd op de zg. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) methode. Deze steunt op een Lagrangiaanse formulering van de Navier-Stokes vergelijkingen waarbij een ruimtelijke discretisatie met deeltjes (*particles*) toegepast wordt, in tegenstelling tot de meer klassieke Euleriaanse methoden waarbij de ruimte gediscrètiseerd wordt met een celstructuur. Het SPH model werd reeds gevalideerd voor golfimpact op stormmuren (Altomare *et al.*, 2015).

#### 2.2.1 Golfgeneratie en actieve golfabsorptie

Golven worden gegenereerd in DualSPHysics met behulp van een bewegende randvoorwaarde welke het numerieke analogon is van een golfschot in een fysische golfgoot. Het golfschot gebruikt in de simulaties in deze studie is van het type piston. Zowel eerste- als tweede-orde golftheorie zijn beschikbaar voor de beweging van het golfschot. Voor de golfgeneratie voor onregelmatige golven in DualSPHysics zijn twee standaard golfspectra beschikbaar : Jonswap en Pierson-Moskowitz.

De actieve golfabsorptie geïmplementeerd in DualSPHysics is gebaseerd op de methode van Schäffer en Klopman (2000), waarbij de verheffing van de waterstand in de nabijheid van het golfschot als feed-back signaal gebruikt wordt ter voorkoming van ongewenste re-reflectie van golven op het schot.

#### 2.2.2 Stapsgewijze aanpak modellering

De onderzoeksvraag wordt stapsgewijze aangepakt, met toenemende mate van modelcomplexiteit. In eerste instantie worden de golfkrachten in een 2D model gemodelleerd, voor loodrecht invallende golven en waarbij abstractie gemaakt wordt van de invloed van de palenrijen vooraan de structuur. Daarna wordt een vereenvoudigend 3D model opgebouwd voor schuin invallende golven, weliswaar zonder palenrij. In een laatste stap wordt ook de invloed van de voorste palenrij in het 3D model meegenomen.

---

<sup>1</sup> [www.dual.sphysics.org](http://www.dual.sphysics.org)

### 3 Hydraulische randvoorwaarden

#### 3.1 Ontwerp retourperiode

Het golfklimaat bij ontwerp wordt bepaald door de levensduur van de constructie en haar faalkans tijdens levensduur welke vastgelegd worden door de opdrachtgever van de studie:

- levensduur :  $T_L=100$  yr.
- faalkans tijdens levensduur :  $p_L=0.1$ .

De corresponderende retourperiode  $T_R$  voor de ontwerpbelasting bedraagt (volgens een Poisson verdeling):

$$T_R = \frac{1}{1-(1-p_L)^{1/T_L}} \approx 950 \text{ yr} \tag{1}$$

Er wordt in volgende uitgegaan van een maatgevende retourperiode van 1000 jaar voor de constructie, welke gelijk is aan de retourperiode gehanteerd in de evaluatie ‘toetsing kustveiligheid’ (Suzuki *et al.*, 2016).

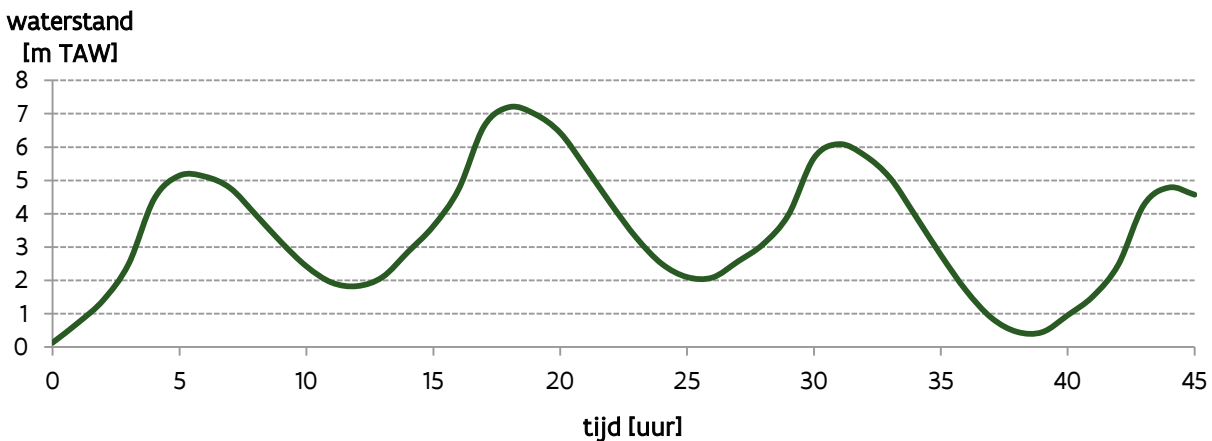
#### 3.2 Waterdiepte

Het hoogwaterpeil tijdens de 1000-jarige storm bedraagt +6.9 m TAW te Oostende (voor een omnidirectionele windrichting, De Roo *et al.* (2016)). Daarbovenop wordt nog 0.3 m zeespiegelrijzing geteld (tegen 2050) wat een totale hoogwaterstand van +7.2 m TAW geeft, waarvan  $S_{max}=2.43$  m de maximale stormopzet.

Verder wordt een asymmetrisch verloop van de stormopzet verondersteld volgens (2). De totale stormduur bedraagt 45 uur met de piek op  $t_{max}=18$ . Dit verloop van de storm wordt ook toegepast in de analyse van het overstromingsrisico van de kust (Verwaest *et al.*, 2008). Figuur 4 toont de evolutie van de waterstand tijdens de 1000-jarige storm.

$$S(t) = S_{max} \cos^2\left(\frac{\pi(t-t_{max})}{T_s}\right); T_s = \begin{cases} 35 \text{ hr}, & t < t_{max} \\ 55 \text{ hr}, & t > t_{max} \end{cases} \tag{2}$$

Figuur 4 – Evolutie waterstand Oostende tijdens 1000-jarige storm volgens vgl. (2)



Aangezien het a priori niet duidelijk is welke waterstand aanleiding geeft tot de grootste opwaartse golfimpact op het platform worden 4 scenario's gedefinieerd (Tabel 1). Geval 1 en 4 corresponderen respectievelijk met het laagwater en hoogwater tijdens de stormpiek (Figuur 4). Geval 3 met waterpeil op +4.65 m TAW valt ongeveer samen met de onderzijde van het kaaiplatform (Figuur 3, tevens een gemiddeld dagelijks hoogwater). Als extra intermediair niveau werd +3.5 m TAW gekozen, tussen geval 1 en 3 in. De totale waterdiepte in Tabel 1 wordt bekomen door rekening te houden met een bodempeil van -7 m TAW ter plaatse van de kaai 101 (Fig. 3).

Tabel 1 - Ontwerpscenario's numerieke studie

Scenario	Waterstand [m TAW]	Waterdiepte [m]
1	+ 2.10	9.10
2	+ 3.50	10.50
3	+ 4.65	11.65
4	+7.20	14.20

### 3.3 Golfhoogte en -periode

De invallende significante golfhoogte aan de voet van de structuur werd bepaald in Appendix A. De totale golfhoogte is de superpositie van golfindringing doorheen de havenmond (bepaald met MIKE21-BW) en lokale windgeneratie (SWAN). De invallende golfcondities worden samengevat in Tabel 2. De invallende significante golfhoogte bedraagt 1.9 m. De maximale golfhoogte bedraagt het dubbele (3.8 m) indien verondersteld wordt dat de golfhoogtes Rayleigh verdeeld zijn. Met de kleinste waterdiepte in Tabel 1 is zelfs deze maximale golfhoogte niet brekend.

Theoretisch kan er een asymmetrische verdeling van golfhoogte en periode toegepast worden zoals in (2). Echter zal voor de numerieke studie verondersteld worden dat dezelfde golfcondities gelden voor alle scenario's gedefinieerd in Tabel 1, wat een conservatieve inschatting is.

Tabel 2 - Golfrandvoorwaarden voor het SPH model

	$H_{m0,inc}$ [m]	$T_p$ [s]	$T_{m-1,0}$ [s]
Aandeel golfindringing	1.74	12.8	-
Lokale windgeneratie	0.73	-	1.3 - 2.8
Totale golfhoogte	1.89	12.8	-

## 4 2D modellering in DualSPHysics

In eerste instantie worden de simulaties in 2D uitgevoerd. De golven vallen loodrecht in op de structuur en er wordt geen rekening gehouden met interactie met de voorste cilindrische ondersteuningspaal.

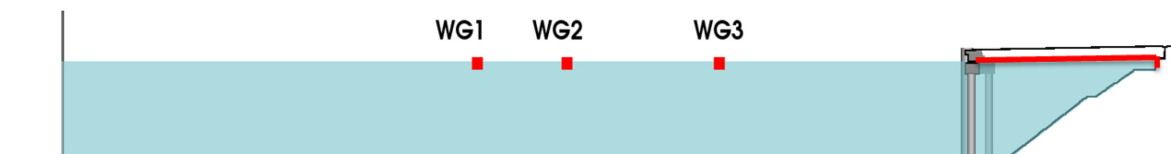
De invallende golftrein wordt samengesteld in het tijdsdomein op basis van een Jonswap golfspectrum (peak enhancement factor 3.3) met parameters  $H_{m0}=1.90$  m,  $T_p=12.8$  s. Het spectrum vertoont in principe 2 pieken ten gevolge van de bijdrage van golfindringing ( $T_p=12.8$  s) en windgeneratie ( $T_{m-1,0} \approx 2$  s). Het spectrum wordt echter vereenvoudigd met een enkele piek op  $f_p=1/12.8$  Hz.

Omwille van rekentijd wordt de invallende golftrein beperkt tot een aantal zorgvuldig gekozen golfimpacten. Daartoe wordt een volledig ontwikkelde golftrein gegenereerd met een totale duur van 13000 s ( $T_p \approx 13$  s). Uit deze tijdreeks wordt een tijdvenster geselecteerd dat een golfgroep bevat met maximale golfhoogtes. De numerieke simulatie wordt vervolgens beperkt tot dit tijdvenster.

Een dwarsdoorsnede van de numerieke golfgoot wordt getoond in Figuur 5. De totale lengte van de golfgoot bedraagt 200 m. De verheffingen worden gemeten in 3 locaties (WG1, WG2 en WG3). In rood aangeduid zijn de zones waar krachten gemeten worden. Om de invallende golfkarakteristieken te bepalen volgen de posities van de numerieke golfhoogtemeters WGi ( $i=1..3$ ) uit de voorwaarden voor het uitvoeren van een reflectieanalyse, op basis van de waterdiepte en theoretische golfperiode.

Voor elk van de 4 gedefinieerde gevallen (Tabel 1) wordt de invallende golfhoogte en periode bepaald, alsook de opwaartse kracht  $F_{uplift}$  op het dek en de horizontale kracht  $F_H$  op de achterste oplegbalk van het dek.

Figuur 5 – Dwarsdoorsnede 2D-model (voorbeeld met SWL op +4.65 m TAW)



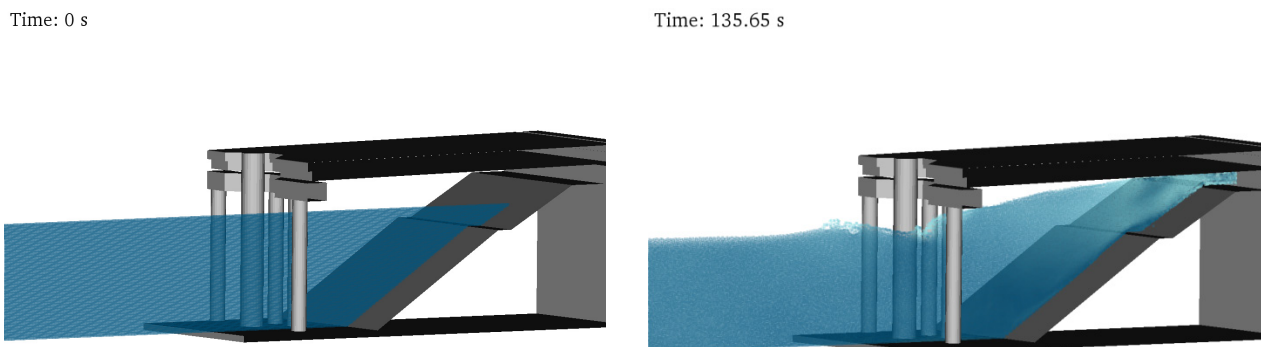
### 4.1 Geval 1 : SWL +2.1 m TAW

#### 4.1.1 Simulatieduur 300 s

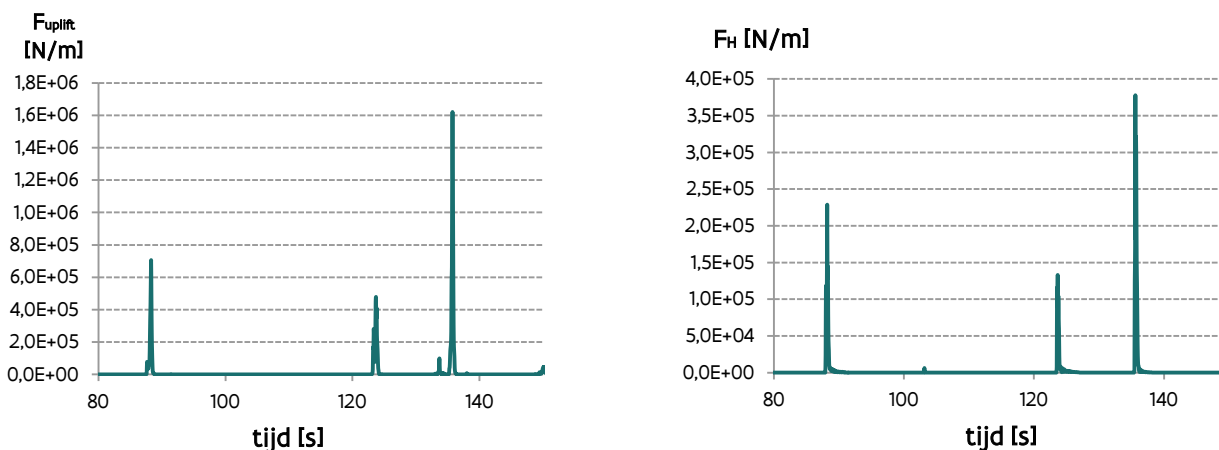
Een tijdvenster van 300 s werd geselecteerd uit de totale tijdreeks, welke de maximale golfhoogte bevat. De tussenafstand tussen WG1 en WG2 bedraagt  $x_{12}=11.6$  m en tussen WG1 en WG3  $x_{13}=20$  m. De gemeten maximale golfhoogte is  $H_{max,inc}=3.6$  m en de corresponderende golfperiode is  $T_{Hmax,inc}=11.7$  s. De maximale golfhoogte benadert goed de verwachte theoretische maximale golfhoogte ( $H_{max} \approx 1.8 - 2.0 * H_{m0}$ ).

De initiële partikel tussenruimte bedraagt 0.1 m. De totale golfkracht (lijnlast per strekkende meter) wordt bepaald door sommatie van de individuele krachten op de partikels, in de richting van golfaanval. Er wordt opgemerkt dat deze kracht volgt uit een statische analyse, d.w.z. geen rekening houdend met de stijfheid van de structuur.

Figuur 6 – 2D simulatie geval 1 (SWL +2.1 m TAW), tijdopname op t=0 (linkerpaneel) en t=135 s (rechterpaneel)



Figuur 7 – 2D simulatie geval 1 (SWL +2.1 m TAW), opwaartse kracht(linkerpaneel) en horizontale kracht (rechterpaneel)



#### 4.1.2 Simulatieduur 80 s

Om het effect van de simulatieduur na te gaan werd een bijkomende simulatie uitgevoerd met een korter tijdvenster (80 s), welke dezelfde golfpiek bevat uit dezelfde tijdreeks als in voorgaande simulatie. Uit de resultaten (Tabel 3) blijkt dat de gewijzigde toestand vóór maximale golfimpact een beperkte invloed heeft. Bijgevolg kunnen de 3D simulaties uitgevoerd worden met een kortere simulatieduur van 80 s.

Tabel 3 - Samenvatting resultaten 2D simulatie geval 1, SWL +2.1 m TAW voor verschillende tijdsduur simulatie

Geval 1 (SWL +2.1 m TAW)	Simulatieduur 300 s	Simulatieduur 80 s
$H_{max,inc}$ [m]	3.60	3.37
$T_{max}$ [s]	11.69	12.76
$F_{uplift}$ [kN/m]	1620	1140
$F_H$ [kN/m]	378	392

### 4.1.3 Gevoeligheidsanalyse initiële tussenruimte partikels

Bijkomend werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van de initiële tussenruimte tussen deeltjes (initial particle interspace,  $dp$ ). Deze tussenruimte is een maat voor de ‘resolutie’ van het gridloze Lagrangiaans model. Er werden 3 bijkomende simulaties uitgevoerd met een waarde voor  $dp$  gelijk aan 0.15, 0.20 en 0.25 m. De resultaten worden samengevat in Tabel 4. Beide types golfkrachten verschillen substantieel voor  $dp$  groter dan 0.15 m. Er wordt dan ook aanbevolen om voor de 3D simulatie minstens een  $dp$  van 0.15 m te gebruiken.

Tabel 4 - Invloed  $dp$  op golfhoogte en krachten, 2D simulatie geval 1

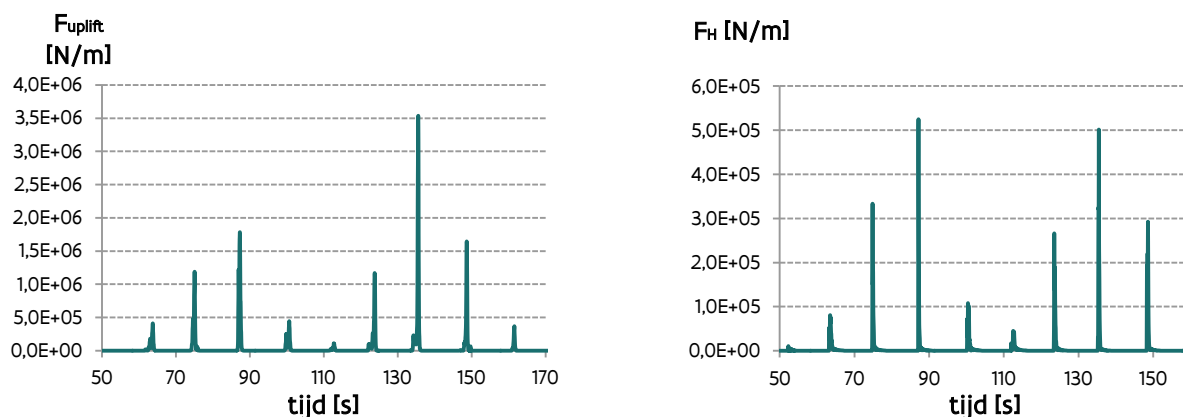
$dp$ [m]	$H_{max,inc}$ [m]	$F_H$ [kN/m]	$F_{uplift}$ [kN/m]
0.25	3.51	192	1430
0.20	3.64	224	1390
0.15	3.52	307	1560
0.10	3.60	378	1620

## 4.2 Geval 2 : SWL +3.5 m TAW

Een tijdvenster van 300 s werd geselecteerd uit de totale tijdreeks, welke de maximale golfhoogte bevat. De tussenafstand tussen WG1 en WG2 bedraagt  $x_{12}=12.4$  m en tussen WG1 en WG3  $x_{13}=40$  m. De gemeten maximale golfhoogte is  $H_{max,inc}=3.21$  m en de corresponderende golfperiode is  $T_{Hmax,inc}=12.48$  s.

Figuur 8 toont het verloop van de opwaartse impact op het dek en de horizontale impact op de achterste oplegbalk.

Figuur 8 – 2D simulatie geval 2 (SWL +3.5 m TAW), opwaartse kracht(linkerpaneel) en horizontale kracht (rechterpaneel)



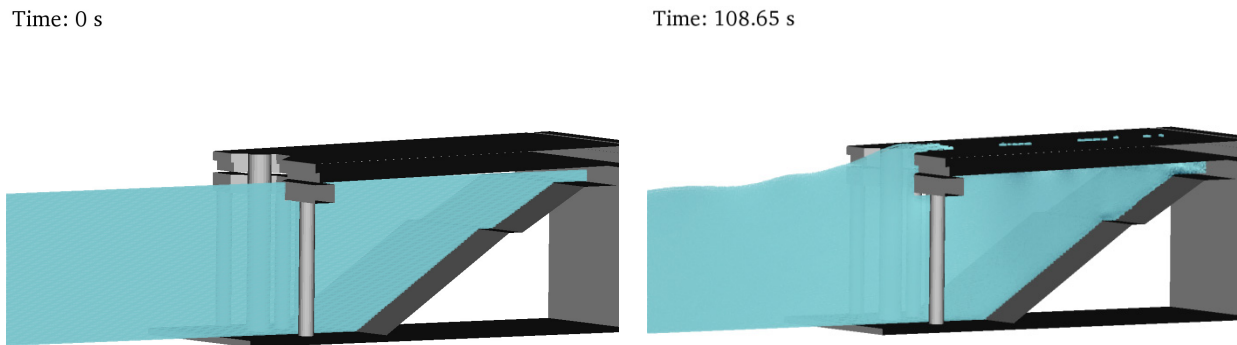
### 4.3 Geval 3 : SWL +4.65 m TAW

#### 4.3.1 Tijdreeks 1

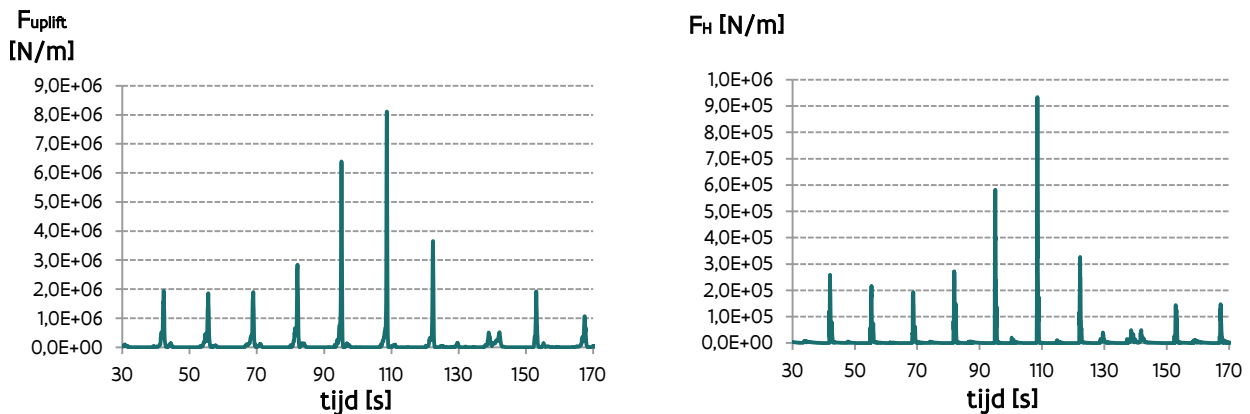
Een tijdvenster van 300 s werd geselecteerd uit de totale tijdreeks, welke de maximale golfhoogte bevat. De tussenafstand tussen WG1 en WG2 bedraagt  $x_{12}=13.0$  m en tussen WG1 en WG3  $x_{13}=35$  m. De gemeten maximale golfhoogte is  $H_{max,inc}=3.31$  m en de corresponderende golfperiode is  $T_{Hmax,inc}=14.5$  s.

In dit geval worden de grootste impacten opgetekend, zowel opwaarts als horizontaal, meer dan dubbel zo groot als in geval 2.

Figuur 9 – 2D simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW), tijdopname op t=0 (linkerpaneel) en t=108.65 s (rechterpaneel)



Figuur 10 – 2D simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW), opwaartse kracht(linkerpaneel) en horizontale kracht (rechterpaneel)



#### 4.3.2 Bijkomende simulaties tijdreeksen 2 & 3

Om de invloed van de golfgroepering na te gaan werd deze testcase twee maal herhaald met een andere tijdreeks gebaseerd op hetzelfde theoretische invoerspectrum. Opnieuw werd een tijdvenster van 300 s geselecteerd zodanig dat het de grootste golven bevat. De resultaten ( $H_{max}$ ,  $F_H$  and  $F_{uplift}$ ) worden samengevat in Tabel 5. Uit deze (beperkte) test blijkt een iets grotere variatie in de horizontale impact op de ligger, terwijl de maximale opwaartse impact niet noemenswaardig verschilt.

Tabel 5 - Resultaten geval 3 (SWL +4.65 m TAW) voor 3 verschillende golventijdreeksen

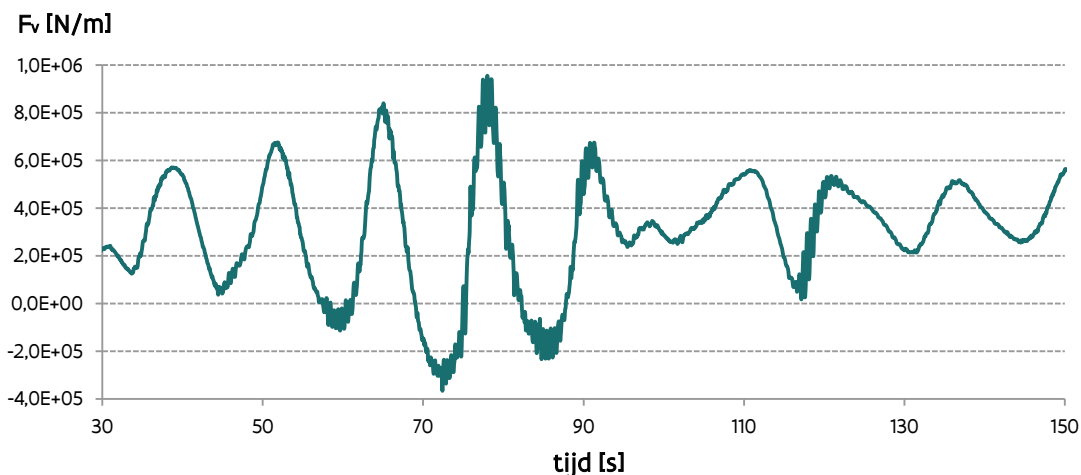
Tijdreeks	$H_{max}$ [m]	$F_H$ [kN/m]	$F_{uplift}$ [kN/m]
1	3.31	934	8110
2	3.69	738	8210
3	3.77	925	8320

#### 4.4 Geval 4 : SWL +7.2 m TAW

Een tijdvenster van 300 s werd geselecteerd uit de totale tijdreeks, welke de maximale golfhoogte bevat. De tussenafstand tussen WG1 en WG2 bedraagt  $x_{12}=14.2$  m en tussen WG1 en WG3  $x_{13}=30$  m. De gemeten maximale golfhoogte is  $H_{max,inc}=3.16$  m en de corresponderende golfperiode is  $T_{Hmax,inc}=12.0$  s.

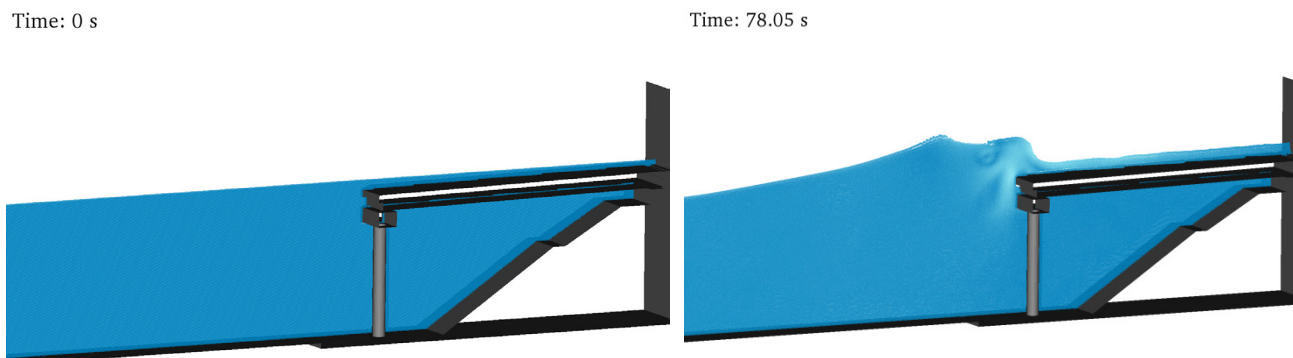
In dit geval ligt het waterpeil hoger dan het niveau van het kaaiplatform. De verticale kracht op het dek bestaat in dit geval uit de hoeveelheid water die over het dek stroomt en de opwaartse gerichte watermassa die van onder uit op het dek aangrijpt. Het verloop van de belasting (Figuur 11) is dan ook anders als in de voorgaande gevallen. De horizontale golfimpact op de achterste ligger is in dit geval verwaarloosbaar tov. de voorgaande gevallen. Een tijdsopname van de initiële toestand en op het moment van maximale impact worden getoond in Figuur 12.

Figuur 11 – 2D simulatie geval 4 (SWL +7.2 m TAW) : verticale belasting op kaaiplatform





Figuur 12 – 2D simulatie geval 4 (SWL +7.2 m TAW), tijdopname op t=0 (linkerpaneel) en t=78.05 s (rechterpaneel)



### 4.5 Samenvatting resultaten 2D simulaties

De resultaten van de 2D simulaties worden samengevat in Tabel 6. Uit de volledige tijdshistoriek van opwaartse golfimpact op het kaaiplatform worden 2 pieken geselecteerd: de eerste piek stemt overeen met de golf die voorafgaat aan de maximale golf in de tijdreeks, de tweede piek met de maximale golf. De grootste golfimpacten worden genoteerd voor geval 3 (SWL +4.65 m TAW). De gesimuleerde golfimpact is zeer hoog. Dit is te wijten aan het water dat opgesloten raakt tussen het platform en geen zijdelingse ontsnappingsroute heeft, vermits hier in 2D gesimuleerd wordt. Er wordt verwacht dat deze golfimpact zal verminderen voor de 3D simulatie, vermits dan de golven schuin invallen op de structuur en de golfkruin niet meer gevangen geraakt onder de plaat.

Tabel 6 - Samenvatting 2D model resultaten

Geval	SWL [m TAW]	H <sub>max</sub> [m]	F <sub>H</sub> [kN/m]	F <sub>uplift</sub> [kN/m]	
				1 <sup>ste</sup> piek	2 <sup>de</sup> piek (H <sub>max</sub> )
1	+2.1	3.60	378	479	1620
2	+3.5	3.21	525	1170	3540
3	+4.65	3.31	934	6400	8110
4	+7.2	3.16	5.60	648	950

## 5 3D modellering in DualSPHysics

### 5.1 Vereenvoudigd 3D model

In eerste instantie wordt een vereenvoudigende 3D modelopzet gedaan waarbij de voorste rij ondersteuningspalen weggelaten worden.

Er wordt vereenvoudigend (en conservatief) ingeschat dat het golffront invalt onder een hoek van 45 graden t.o.v. de voorzijde van de kadestructuur. In realiteit zal deze invallende hoek wellicht nog groter zijn, tot 80 graden.

Een tijdsvenster van 80 s wordt geselecteerd uit de volledige golventijdreeks, en de initiële tussenruimte tussen partikels werd verhoogd tot 0.15 m. Uit de testen met het 2D model (secties 4.1.2 en 4.1.3) blijkt dat dit een aanvaardbaar compromis betekent tussen modelnauwkeurigheid en rekentijd.

Geval 3 met SWL op +4.65 m TAW werd geselecteerd, vermits deze aanleiding gaf tot de grootste golfimpacten.

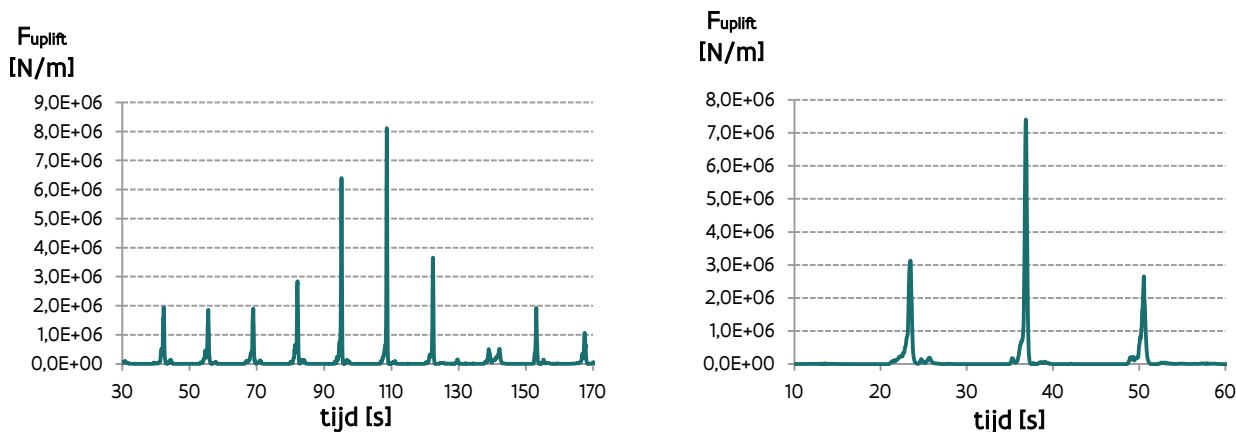
#### 5.1.1 Voorbereidende test in 2D

Voorafgaand op het 3D model wordt eerst een testcase gedefinieerd in 2D met dezelfde instellingen als in het 3D model, behalve voor de oriëntatie van de golfrichting tov het kaaiplateau.

Een tijdsvenster van 80 s werd geselecteerd uit de totale tijdreeks, welke de maximale golfhoogte bevat. De tussenafstand tussen WG1 en WG2 bedraagt  $x_{12}=13.0$  m en tussen WG1 en WG3  $x_{13}=35$  m. De gemeten maximale golfhoogte is  $H_{max,inc}=3.37$  m en de corresponderende golfperiode is  $T_{Hmax,inc}=14.6$  s.

Figuur 13 toont het verschil tussen beide 2D simulaties van geval 3. Het verschil in maximale opwaartse golfimpact is relatief beperkt (7400 kN/m vs 8110 kN/m). De impact voorafgaand aan de maximale is echter wel dubbel zo groot in de simulatie met kleinere initiële partikel tussenruimte. Dit verschil is voor een deel toe te schrijven aan het verschil in gesimuleerde tijdreeks, maar vooral aan de kleinere initiële partikel tussenruimte in deze voorbereidende test.

Figuur 13 – 2D simulatie geval 3 : tijdsvenster 300 s,  $dp=0.10$  m (linkerpaneel) en tijdsvenster 80 s,  $dp=0.15$  m (rechterpaneel)

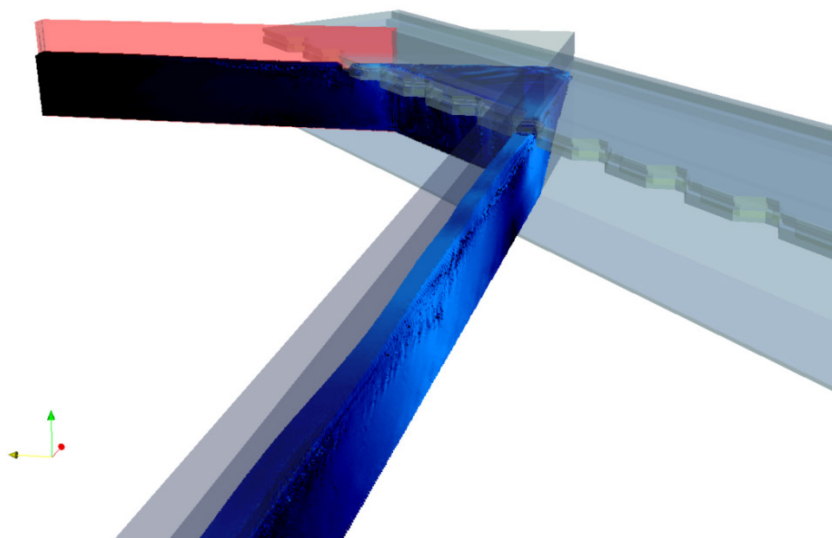


### 5.1.2 3D model

Het 3D model bestaat uit 3 delen (Figuur 14):

- een 3 m brede golfgoot waarin langkruinige golven opgewekt worden en zich voortplanten in de richting van de structuur;
- de structuur met een oriëntatie van 45 graden tov. de golfrichting (zonder voorste palenrij);
- een 3 m breed kanaal waarin de gereflecteerde golven zich voortplanten weg van de structuur en waarin ze geabsorbeerd worden zodat ze niet teruggekaatst worden naar de structuur toe.

Figuur 14 – Illustratie van het 3D vereenvoudigd model (in rood aangeduid de zone waar golfdemping plaats vindt)



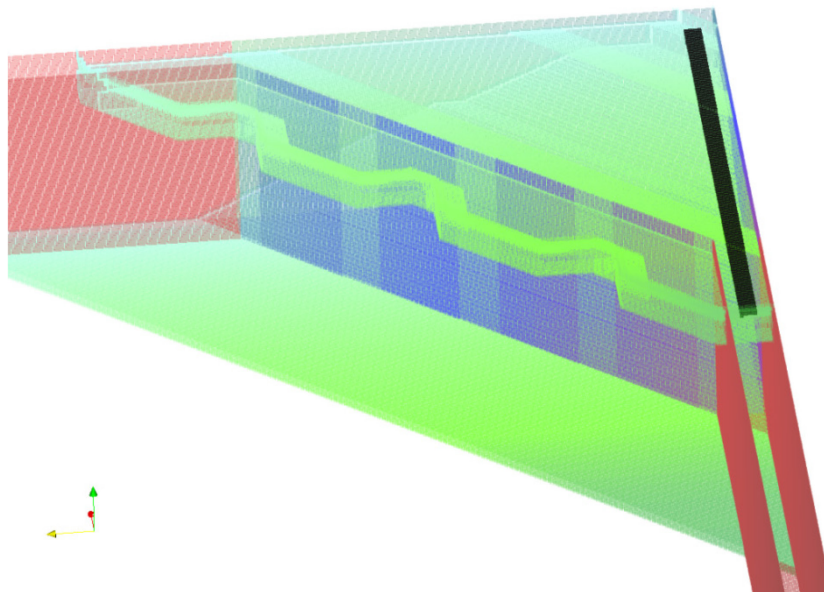
De opwaartse golfkracht wordt bepaald in een sectie van 1 m breed zoals aangeduid in Figuur 15. De golfkracht per lopende meter, gemeten in de meetsectie, wordt nog gecorrigeerd voor het feit dat de meetsectie niet loodrecht op de lengte-as van het kaaiplatform staat, maar georiënteerd is volgens de golfrichting.

De gemeten maximale golfhoogte is  $H_{max,inc}=3.19$  m en de corresponderende golfperiode is  $T_{Hmax,inc}=13.6$  s. Het verloop van de opwaartse golfkracht op de plaat is voorgesteld in Figuur 16. De krachten zijn aanzienlijk lager dan in de 2D simulatie (Figuur 13). Het grootste verschil is te vinden in de tweede golfimpact. In vergelijking met de 2D simulatie is de eerste krachtpiek 4.3 keer kleiner, en de 2<sup>de</sup> krachtpiek 18 keer kleiner dan in de 2D simulatie.

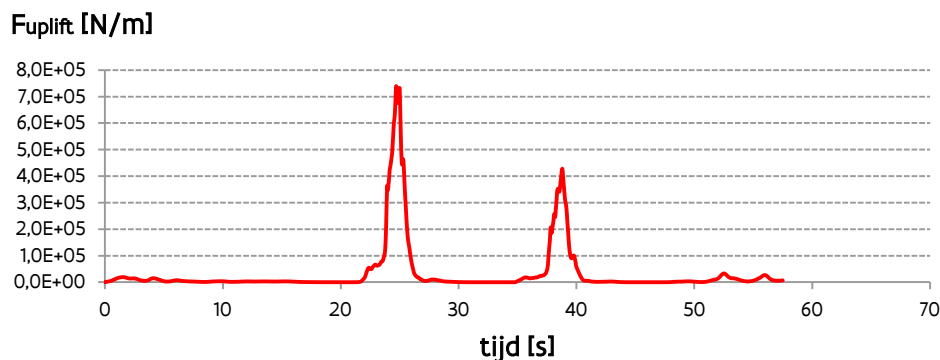
Tabel 7 - Vergelijking resultaten 2D en 3D simulatie voor geval 3 (SWL +4.65 m TAW)

Test	duurtijd [s]	$H_{max}$ [m]	$F_{uplift}$ [kN/m]	
			1 <sup>ste</sup> piek	2 <sup>de</sup> piek ( $H_{max}$ )
2D	300	3.31	6400	8110
2D voorbereidend	80	3.37	3130	7403
3D vereenvoudigd	80	3.19	740	428

Figuur 15 – Zone meting opwaartse golfimpact (in zwart aangeduid)



Figuur 16 – 3D vereenvoudigde simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW) : opwaartse golfkracht



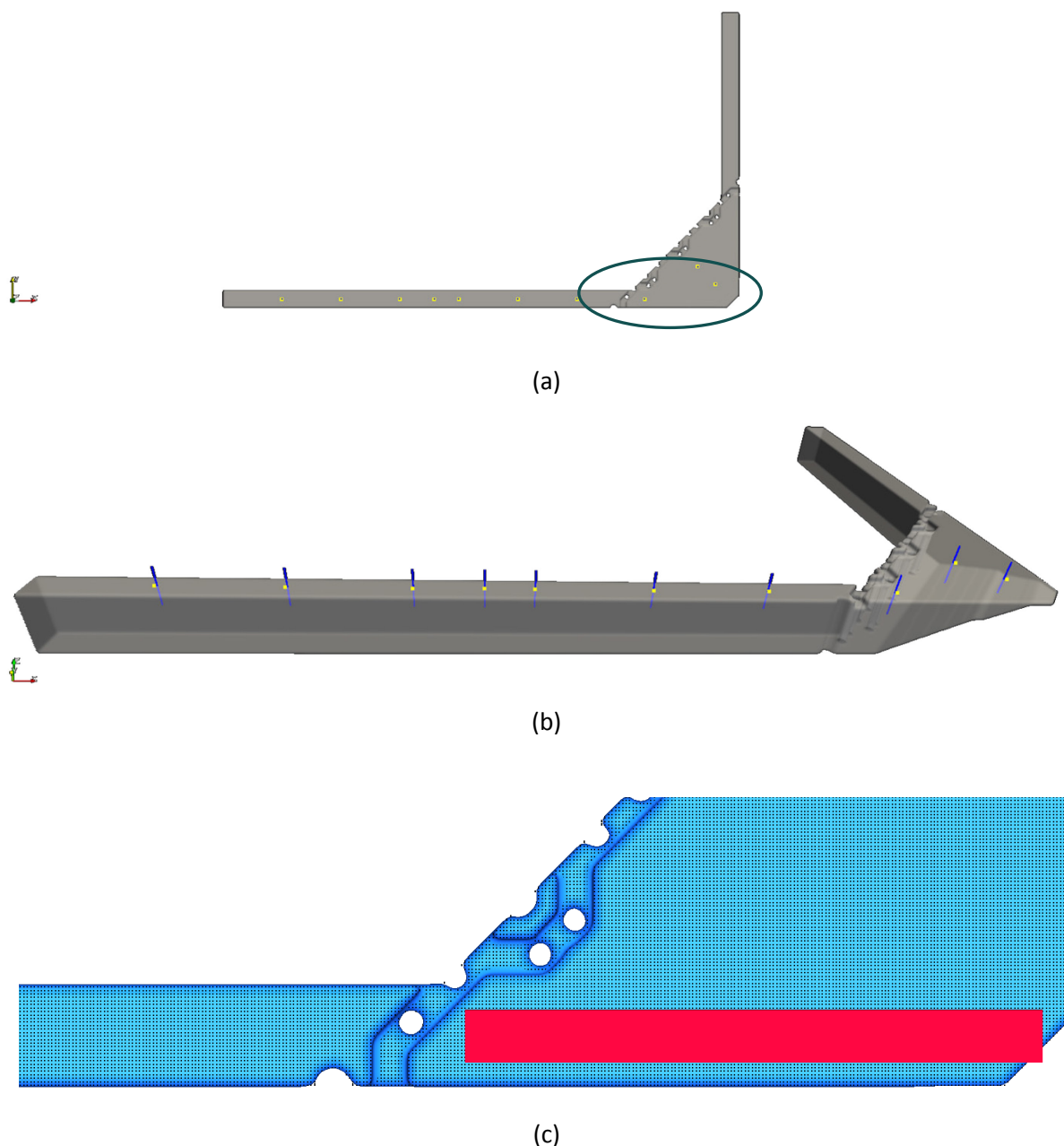
## 5.2 3D model met palen

In een volledig 3D model wordt de invloed van de voorste rij ondersteuningspalen op de golfbelasting onderzocht. Het 3D model is als volgt opgebouwd (Figuur 17) :

- een 6 m brede golfgoot waarin langkruinige golven opgewekt worden en zich voortplanten in de richting van de structuur;
- de structuur met een oriëntatie van 45 graden tov. de golfrichting (inclusief voorste palenrij), de connectie tussen de golfgoot en de structuur bevat 1 volledige ondersteuningspaal diameter 1.2 m en 1 halve fenderpaal diameter 1.8 m (Figuur 17 (c))
- een 6 m breed kanaal waarin de gereflecteerde golven zich voortplanten weg van de structuur en waarin ze geabsorbeerd worden zodat ze niet teruggekaatst worden naar de structuur toe.

De breedte van beide kanalen (6 m) is een compromis tussen de nodige breedte voor het inpassen van minstens 1 ondersteuningspaal, en een haalbare rekenduur.

Figuur 17 – Volledig 3D model incl. voorste palenrij

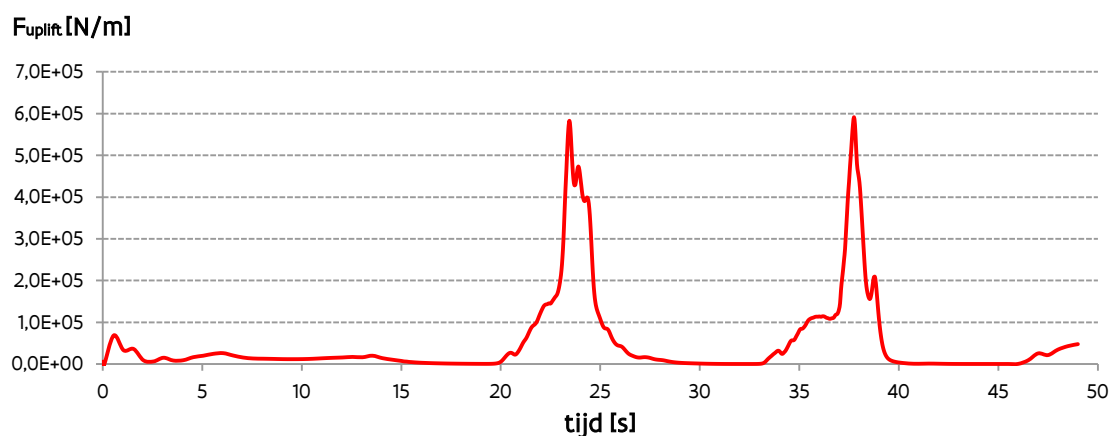


Voorstelling opbouw volledig 3D model met palen: (a) bovenaanzicht met aanduiding connectie golfgoot – structuur; (b) perspectief volledig model met aanduiding locaties golfhoogtemeters (blauwe lijnen) ; (c) detail connectie golfgoot – kademuur met halve meerpaal en ondersteuningspaal in de zone van golfimpact. Meetsectie golfkrachten aangeduid in rood.

### 5.2.1 Geval 3 (SWL +4.65 m TAW)

De gemeten maximale golfhoogte is  $H_{max,inc}=3.15$  m en de corresponderende golfperiode is  $T_{Hmax,inc}=13.5$  s. Het verloop van de opwaartse golfkracht op de plaat is voorgesteld in Figuur 18. Beide krachtpieken zijn nu quasi gelijk aan elkaar, terwijl in het model zonder palen de eerste krachtpiek groter was dan de tweede. Het verschil kan verklaard worden door de obstructie van de watermassa door de paal. Desalniettemin zijn de verschillen tussen de 3D modellen relatief beperkt (Tabel 8).

Figuur 18 – 3D simulatie geval 3 (SWL +4.65 m TAW) : opwaartse golfkracht



Tabel 8 - Vergelijking resultaten 3D simulaties, geval 3 (SWL+4.65 m TAW)

Case	simulatie <span>­</span> duur [s]	H <sub>max</sub> [m]	F <sub>uplift</sub> [kN/m]	
			1 <sup>ste</sup> piek	2 <sup>de</sup> piek (H <sub>max</sub> )
3D zonder palen	80	3.19	740	428
3D met palen	80	3.15	583	581

### 5.2.2 Geval 2 (SWL +3.5 m TAW)

De simulatie toont geen significante opwaartse golfimpact voor dit geval, de maximale impact bedraagt 360 N/m.

## 6 Bepaling resultante opwaartse kracht op kaaivlak

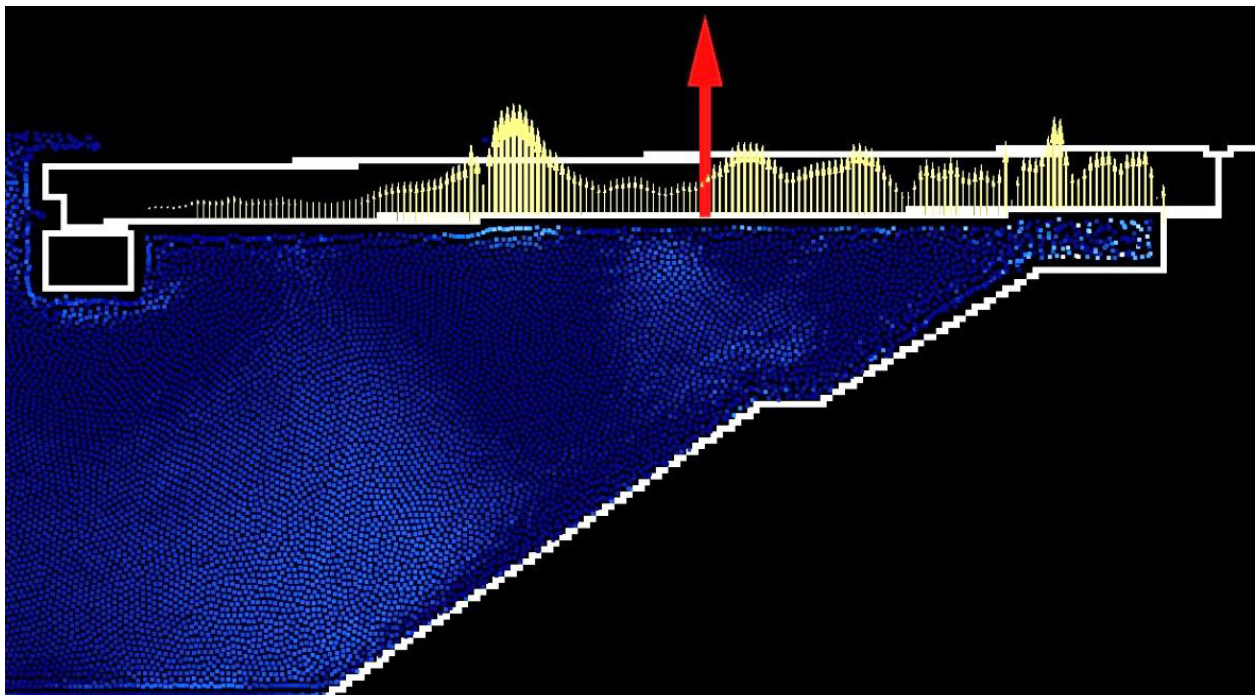
### 6.1 2D simulatie

In de voorbereidende 2D test (paragraaf 5.1.1) werd een maximale totale opwaartse golfkracht van 7400 kN/m bepaald. Figuur 19 toont een dwarsdoorsnede op het tijdstip van maximale golfimpact met aanduiding van de opwaartse golfkrachten en resultante (rode pijl, niet op schaal). Bemerkt dat deze loodrecht invallende kracht aanzienlijk groter is dan bij schuine golfinval, waarvoor een maximale opwaartse golfkracht bepaald werd gelijk aan 583 kN/m indien ook rekening gehouden wordt met de aanwezigheid van de buispalen die de verdeelbalk ondersteunen.

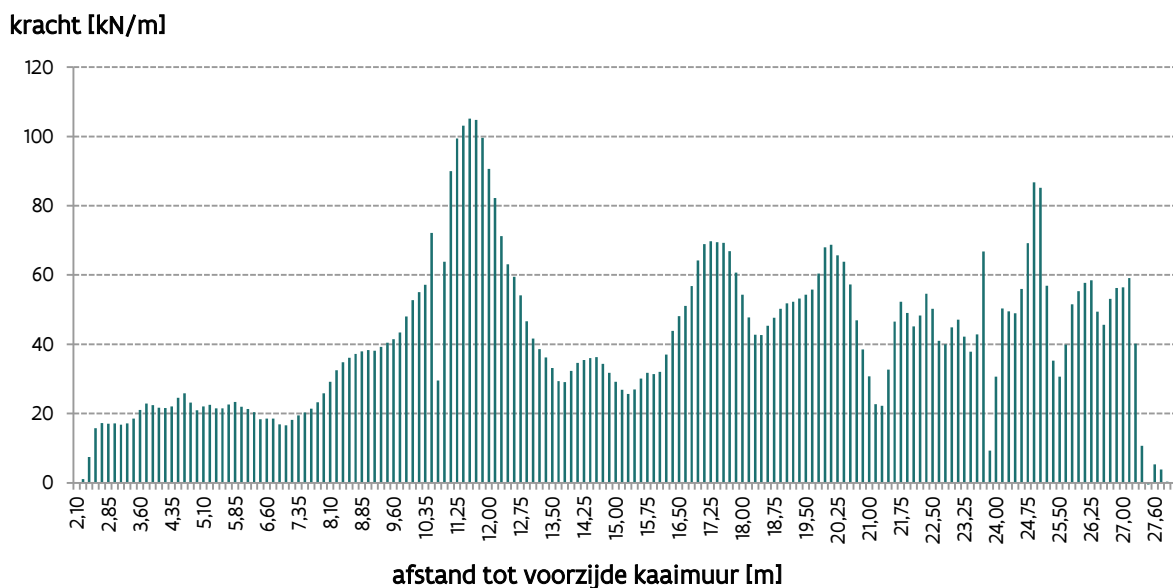
De verdeling van deze opwaartse kracht (per eenheidsbreedte kaaivlak) wordt in Figuur 20 voorgesteld. Bemerkt dat in dit staafdiagram de krachten op discrete wijze voorgesteld worden (totale kracht per eenheidsbreedte kaaimuur op een partikel met tussenafstand 0.15 m).

De resultante grijpt aan op **16.29 m** afstand loodrecht gemeten vanaf de zeevaartse zijde van de kaaimuur.

Figuur 19 – Dwarsdoorsnede op tijdstip maximale golfimpact, 2D simulatie. Resultante opwaartse kracht in rood (niet op schaal).



Figuur 20 – Verdeling opwaartse golfkracht, 2D golfimpact

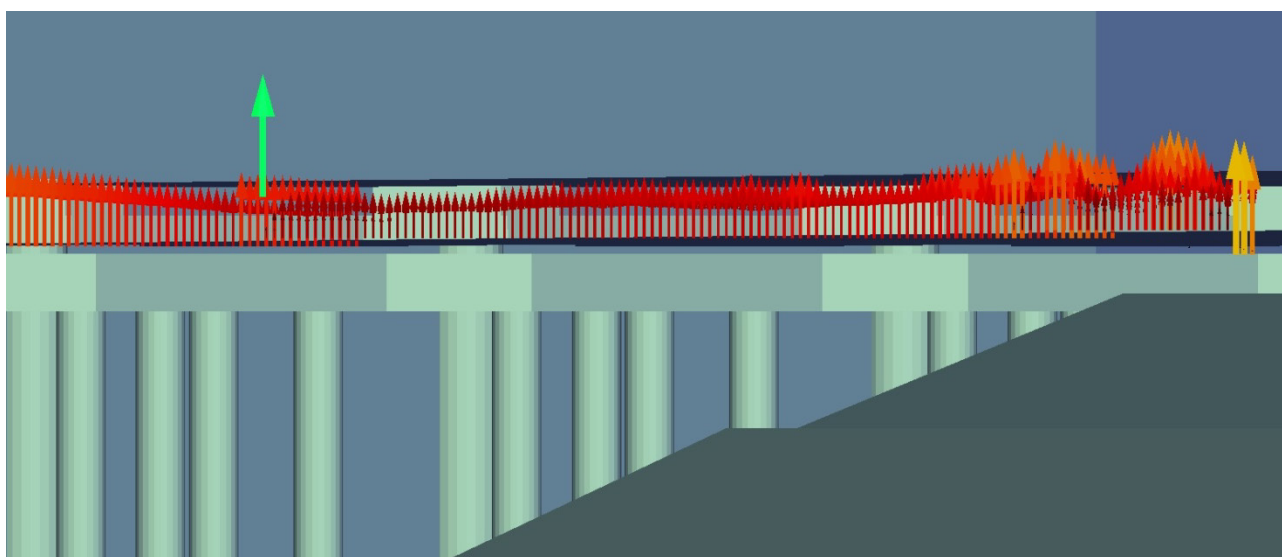


## 6.2 3D simulatie

In de 3D simulatie (paragraaf 5.2) heeft het water een zijdelingse ontsnappingsroute en verschuift de resultante van de opwaartse kracht in de richting van de vaargeul.

Figuur 21 toont een dwarsdoorsnede op het tijdstip van maximale golfimpact met aanduiding van de opwaartse golfkrachten en resultante (groene pijl, niet op schaal).

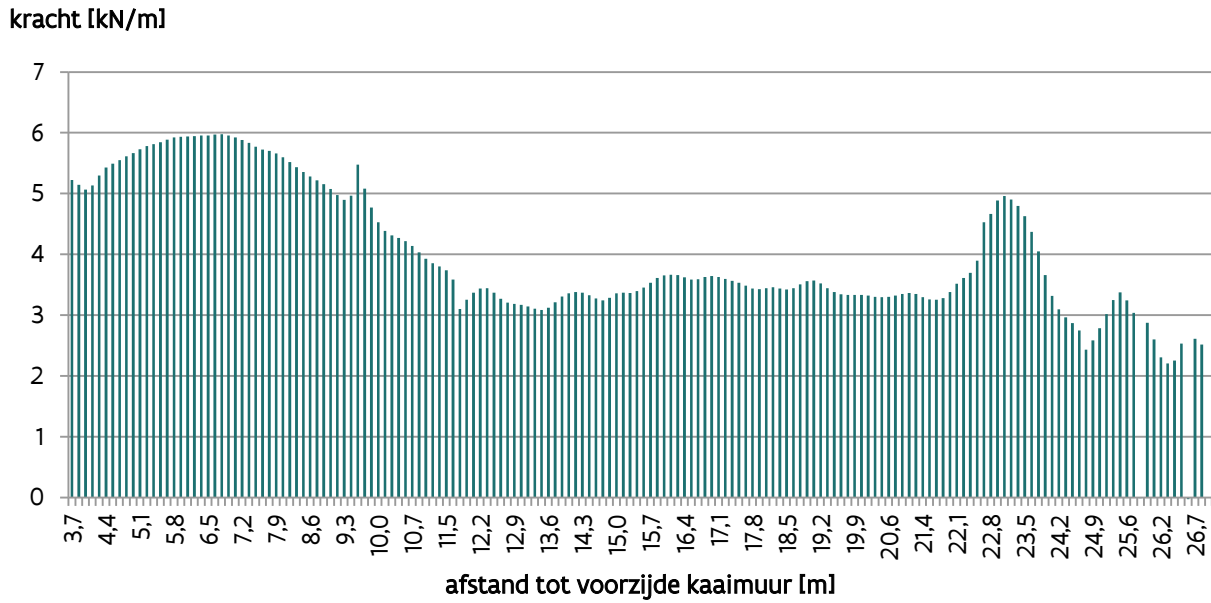
Figuur 21 – Dwarsdoorsnede op tijdstip maximale golfimpact, 3D simulatie. Resultante opwaartse kracht in groen (niet op schaal).





Figuur 22 toont in meer detail de verdeling van de opwaartse golfkracht op een moot met eenheidsbreedte, gedefinieerd loodrecht op het kaavlak (i.e. dwars op de lengteas van het kaaiplatform). Bemerk dat de totale opwaartse kracht beduidend lager is dan in de 2D simulatie. Het aangrijpingspunt van de resultante (583 kN/m) bevindt zich op **13.92 m** afstand loodrecht gemeten vanaf de zeevaartse zijde van de kaaimuur.

Figuur 22 – Verdeling opwaartse golfkracht, 3D golfimpact



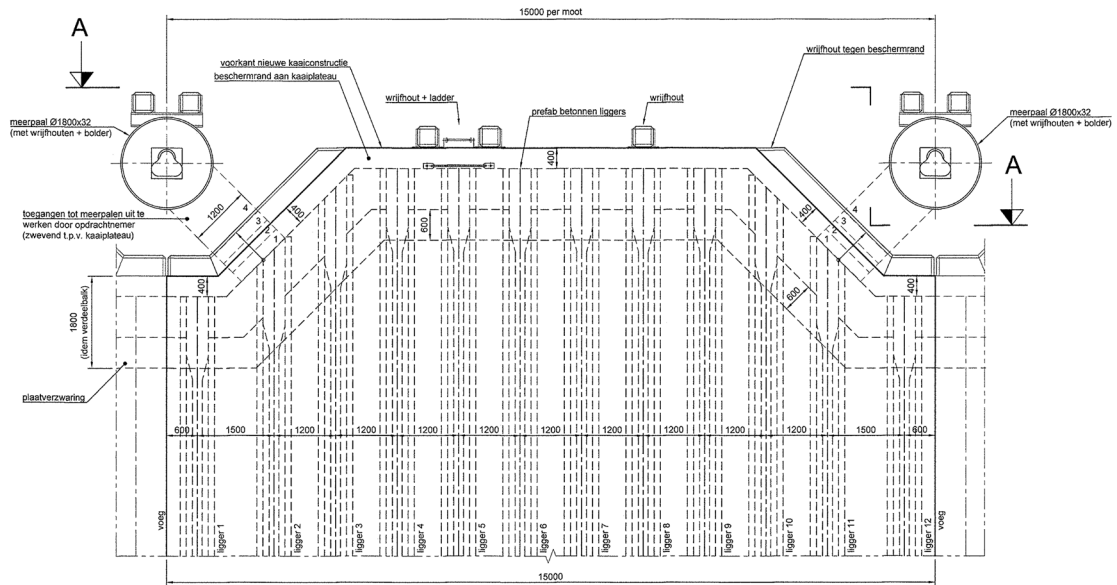
## 7 Inschatting horizontale golfimpact op een moot kaaiplatform

Om een inschatting te maken van de horizontale golfbelasting op de betonliggers onder het kaaivlak (geplaatst met tussenafstand 1.2 m, zie Figuur 23) worden verschillende aannames gemaakt:

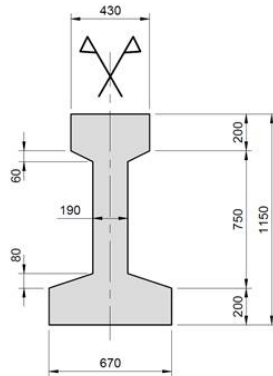
- (i) De kadeconstructie is opgebouwd uit verschillende moten van 15 m breed waartussen zich een uitzettingsvoeg bevindt (Figuur 23). Aangezien de mootlengte veel kleiner is dan de golflengte (>100 m) kan veilig verondersteld worden dat niet meer dan 1 golfkruin een moot kan treffen op hetzelfde moment. Een moot wordt ondersteund door verschillende betonliggers die zich op een tussenafstand van 1.2 m bevinden. Al deze liggers zijn aan de bovenzijde ingeklemd in het dek, waardoor deze zich samen met het dek als een monolithisch geheel gedragen;
- (ii) Een golfkruin die (zeer) schuin invalt tov. de lengteas van de ligger zal meerdere liggers simultaan treffen, waarbij 1 ligger een afscherming veroorzaakt voor een naastgelegen ligger verder verwijderd van de golfkruin. In de 3D simulatie (paragraaf 5.2.1) wordt echter slechts 1 ligger gemodelleerd waardoor dit afschermend effect niet beschouwd wordt. Er wordt aangenomen dat de totale kracht op 1 ligger minstens even groot is als de som van de horizontale krachten op de verschillende liggers binnen een moot van 15 m breed, veroorzaakt door de impact van 1 golfkruin;
- (iii) De horizontale golfimpact op één ligger kan benaderend gelijk gesteld worden aan de opwaartse impact op het kaaivlak, die bepaald werd voor een strook van 1 m breed gemeten dwars op de lengteas van de ligger. Daarbij wordt aangenomen dat een uniforme waterdruk heerst over de volledige hoogte van de ligger (1.15 m, zie Figuur 24). In deze veronderstelling is de totale horizontale kracht op een ligger gelijk aan  $1.15 \cdot 583 = 670.5$  kN. Bemerkt dat deze kracht opgenomen kan worden door de volledige moot kaaivlak van 15 m breed, vermits alle liggers stijf verbonden zijn met het kaaidek.
- (iv) Ter bepaling van de aangrijpingskracht van de horizontale last op één ligger wordt uitgegaan van de hoger vermelde afleiding op basis van het 3D model. Dwz dat voor de dimensionering van de oplegging van de liggers mag uitgegaan worden van een resulterende horizontale kracht die aangrijpt op 13.9 m gemeten vanaf de voorzijde van het kaaivlak. Dit is een veilige inschatting vermits in werkelijkheid de totale horizontale kracht verspreid zal worden over meerdere aanpalende liggers.

Figuur 23 – Bovenaanzicht kaaiplatform

**BOVENAANZICHT KAAIPLATEAU**  
 schaal: 1/50



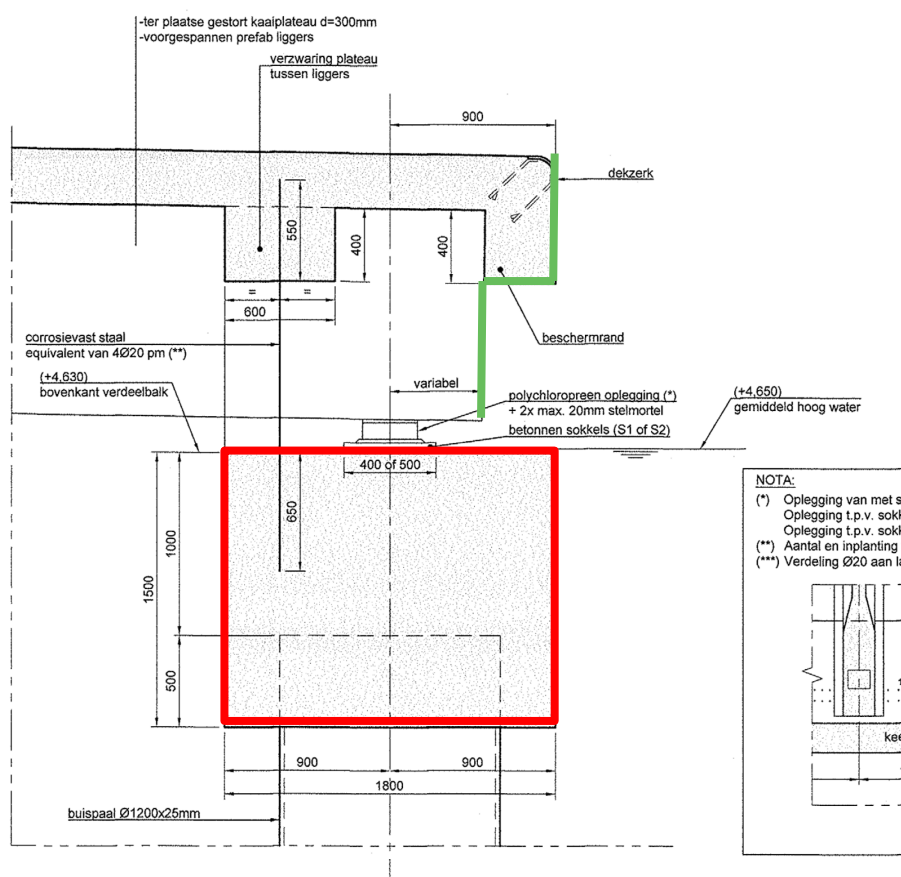
Figuur 24 – Dwarsdoorsnede betonligger onder kaaivlak



## 8 Golfkracht op de verdeelbalk

De golfkracht op de 1.5 m hoge verdeelbalk (in rood aangeduid in Figuur 25) wordt afgeleid op basis van het 2D model (paragraaf 5.1.1). In het 3D model is er immers afscherming van het gemodelleerde stuk verdeelbalk door een meerpaal. De golfimpact in het 2D model leidt tot een meer conservatieve inschatting van de golfkracht op de verdeelbalk. Het stuk verdeelbalk dat gemodelleerd werd is 1 m breed en parallel met de lengterichting van het kaaiplatform (zie Figuur 23).

Figuur 25 – Detail dwarsdoorsnede verdeelbalk en betonligger

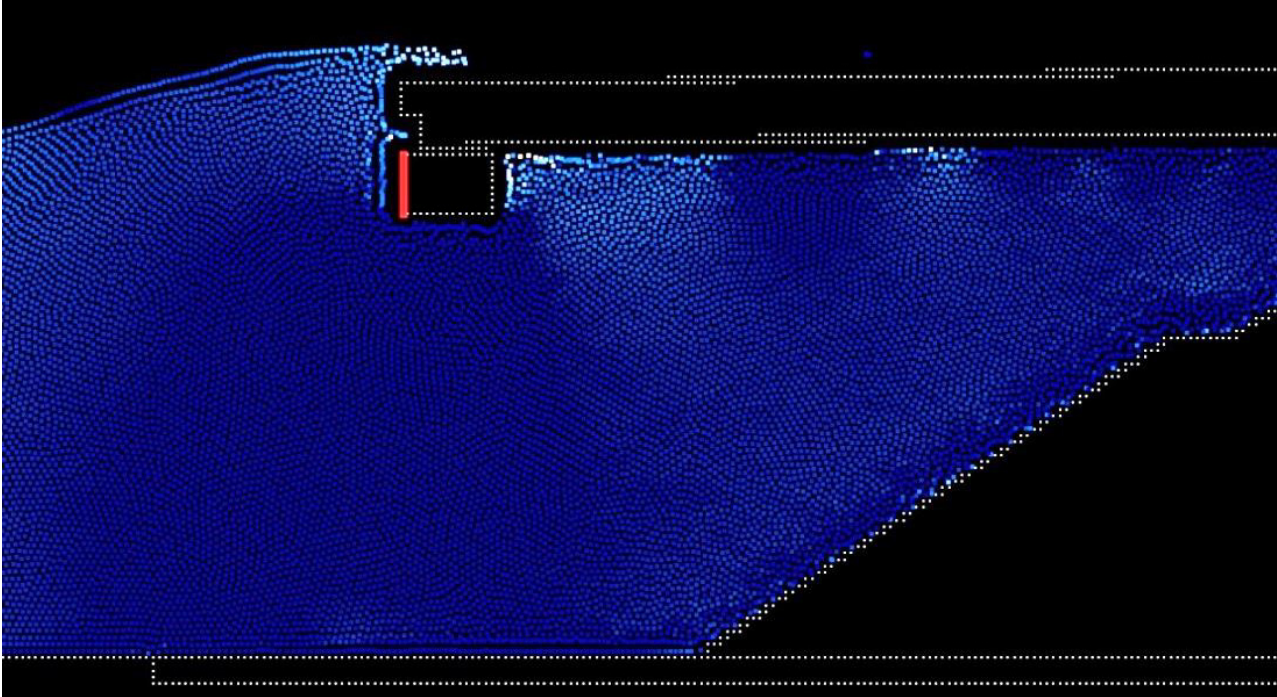


Het tijdsverloop van de grootste gemodelleerde horizontale en verticale golfimpact (per eenheidsbreedte verdeelbalk) in de 2D simulatie wordt voorgesteld in respectievelijk Figuur 27 en Figuur 28. Deze simulatie werd bekomen met waterpeil op +4.65 m TAW. In Figuur 27 wordt enkel de horizontale kracht op de voorzijde van de verdeelbalk weergegeven, d.w.z. er wordt veiligheidshalve geen rekening gehouden met de tegendruk uitgeoefend door de watermassa die zich op dat moment onder het kaaivlak aan de landzijde van de balk bevindt (zie Figuur 26). De maximaal in aanmerking te nemen **horizontale golfkracht** bedraagt dan **254 kN/m**. Hierin zit ook de hydrostatische druk vervat, welke in feite gecompenseerd wordt aan de andere zijde van de balk. Het aandeel van de hydrostatische kracht (ca 7.4 kN/m) in de totale impact is echter verwaarloosbaar.

De maximale **opwaartse golfkracht** op de volle verdeelbalk (in een zone waar geen buispaal aanwezig is) bedraagt **541 kN/m**.

Voor een simulatie met waterpeil op **+2.1 m TAW** zijn de weerhouden horizontale en opwaartse krachten op de verdeelbalk resp. 23 kN/m en 62 kN/m.

Figuur 26 – Maximale 2D golfimpact op verdeelbalk. SWL +4.65 m TAW



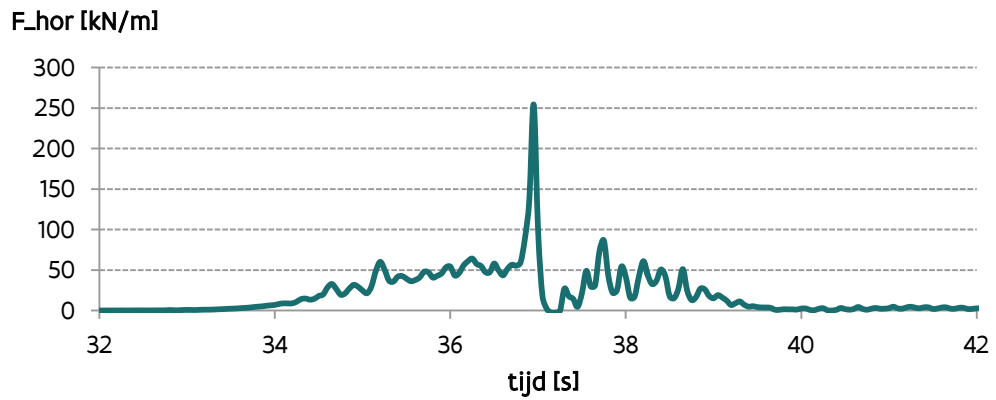
Er wordt opgemerkt dat de 2D simulatie met loodrechte golfinval een overschatting van de golfbelasting op de verdeelbalk oplevert, vermits de golven in realiteit zeer schuin zullen invallen. Om in te schatten hoeveel deze belasting zal dalen ten gevolge van de schuine golfinval wordt een beroep gedaan op het WL-onderzoeksproject *00\_050* naar golfkrachten op stormmuren bij zeer schuine golfinval. In Dan *et al.* (2016) wordt in de conclusies een reductiefactor voor een stormmuur op een kaaimuur voorgesteld:

$$\gamma_{quay} = \frac{F_{quay, \beta > 0}}{F_{quay, \beta = 0}} = 0.5(1 + \cos \beta) \quad (1)$$

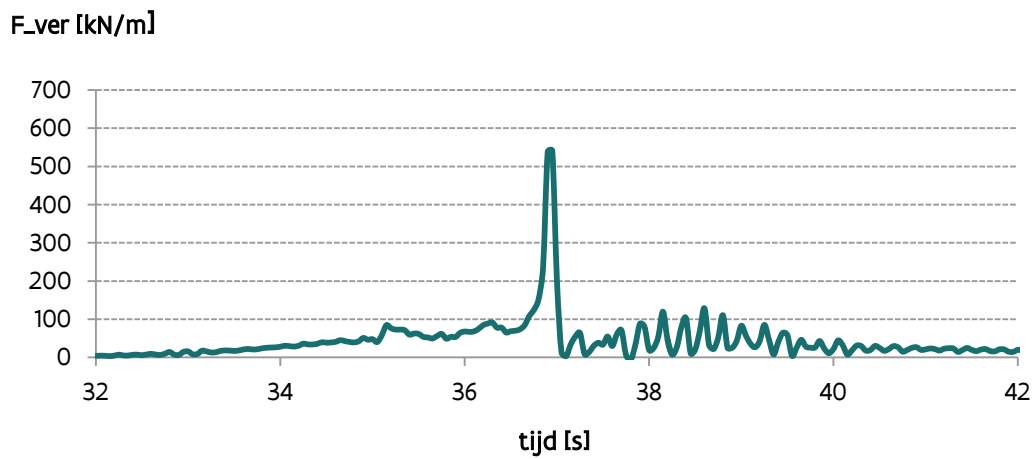
waarbij  $\beta$  de hoek van golfinval voorstelt ( $\beta=0$  voor loodrechte inval). De reductiefactor volgens (1) is gebaseerd op de analyse van golfdrukken op caisson golfbrekers volgens Goda (2010).

Vermits de golven zeer schuin invallen ( $\beta \approx 90^\circ$ ) is het te rechtvaardigen een maximale reductiefactor 0.5 toe te passen op de eerder bepaalde golfkrachten op de verdeelbalk. Deze dalen dan tot **127 kN/m** en **270.5 kN/m** voor respectievelijk de horizontale en opwaartse kracht.

Figuur 27 – Horizontale kracht op de verdeelbalk, 2D simulatie. SWL +4.65 m TAW



Figuur 28 – Opwaartse kracht op de verdeelbalk, 2D simulatie. SWL +4.65 m TAW



## 9 Golfkracht op frontaal gedeelte betonligger en dekzerk

De totale horizontale ( $F_{hor}$ ) en opwaartse ( $F_{ver}$ ) kracht op het geheel van betonligger en dekzerk wordt weergegeven in Tabel 9. Analoog als in sectie 8 volgen deze krachten uit een 2D simulatie.

Het oppervlak waar deze kracht (per lopende meter) aangrijpt wordt aangegeven door de groene lijn in Figuur 25. Merk op dat dit vlak in het model als een continu vlak ingebracht werd. In realiteit zitten er openingen tussen de l-liggers.

In het scenario met waterpeil +2.1 m TAW komt de golfkruin niet tot aan de bovenzijde van de dekzerk, vandaar ook dat de opwaartse kracht beperkt is.

Tabel 9 - Krachten op frontaal gedeelte betonligger en dekzerk

	<b>+4.65 m TAW</b>	<b>+2.1 m TAW</b>
$F_{hor}$ [kN/m]	15	9
$F_{ver}$ [kN/m]	52	3

In principe kan op deze krachten dezelfde reductiefactor 0.5 (zie hoger) toegepast worden om het milderende effect van de schuine golfval in rekening te brengen.

## 10 Conclusies

Voor het ontwerp van een nieuw te bouwen kaaipatform (kaai 101) in de haven van Oostende werd de golfimpact gesimuleerd met behulp van het SPH-gebaseerde model DualSPHysics. De invallende golftrein werd samengesteld op basis van een JONSWAP spectrum met spectrale golfparameters  $H_{m0}=1.90$  m,  $T_p=12.8$  s welke overeenstemmen met een 1000-jarige storm te Oostende. Uit deze tijdreeks werd een passend tijdsvenster gekozen zodanig dat de maximale golfimpact geassocieerd met de grootste golven gesimuleerd werd.

In eerste instantie werd in een 2D model nagegaan wat de invloed is van het waterpeil op de golfimpact. Van de 4 onderzochte gevallen resulteert een waterpeil van +4.65 m TAW (wat overeenkomt met de onderzijde van het platform) in de grootste opwaartse golfimpact op het platform (8110 kN/m), alsook in de grootste horizontale kracht op de achterste balk van het platform (934 kN/m).

In een vereenvoudigd 3D model zonder palen wordt de reductie van de golfkracht ten gevolge van de schuine golfinval onderzocht. De opwaartse golfkracht daalt tot 740 kN/m voor het meest kritieke geval (SWL +4.65 m TAW).

Uit een simulatie van het volledig 3D model met palenrij blijkt dat de maximale golfimpact nog verder gereduceerd wordt tot **583 kN/m** voor het geval met SWL +4.65 m TAW. De inschatting is dat de grootste reductie t.o.v. 2D loodrechte golfinval veroorzaakt wordt doordat de golven schuin invallen op de structuur, eerder dan door de demping veroorzaakt door de palenrij. Het aangrijpingspunt van de resultante (583 kN/m) bevindt zich op **13.92 m** afstand loodrecht gemeten vanaf de voorzijde van het kaaipatform.

De horizontale impact op een betonligger binnen een moot van 15 m kaaipatform wordt op basis van de opwaartse golfkracht ingeschat als **670.5 kN** (aangrijpend op 13.9 m vanaf de voorzijde van het kaaipatform). Daarbij wordt aangenomen dat elke ligger binnen een moot belast kan worden met deze kracht, maar dat slechts 1 ligger binnen een moot van 15 m tegelijk belast kan worden.

De opwaartse en horizontale belasting op de verdeelbalk (rustend op de buispalen) en het frontaal geheel van betonligger en dekzerk werden (conservatief) ingeschat op basis van de 2D numerieke simulatie, voor waterpeilen op +2.1 en +4.65 m TAW. De belasting is het grootst voor SWL +4.65 m TAW. Voor de verdeelbalk bedraagt deze (per eenheidsbreedte) 254 kN/m en 541 kN/m, respectievelijk horizontaal en opwaarts. De gezamenlijke horizontale belasting op de kop van de I-ligger en de dekzerk bedraagt (per eenheidsbreedte) 15 kN/m. De opwaartse belasting op de dekzerk bedraagt 52 kN/m.

Er mag aangenomen worden dat hoger vermelde krachten op de verdeelbalk, kop van de I-liggers en dekzerk gereduceerd mogen worden met een factor 0.5 om het effect van de schuine golfinval in rekening te brengen.

Ten slotte wordt opgemerkt dat bepaalde vereenvoudigingen en hypothesen werden gemaakt voor de uitgevoerde numerieke modellering in dit rapport. De gerapporteerde waarden van golfimpact kunnen als een realistische inschatting beschouwd worden. Het wordt echter aanbevolen om een veiligheidsmarge te beschouwen wanneer deze gebruikt worden in het structureel ontwerp van het kaaipatform.



## Referenties

- Altomare, C.; Crespo, A.J.C.; Domínguez, J.M.; Gómez-Gesteira, M.; Suzuki, T.; Verwaest, T.** (2015). Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. *Coast. Eng.* 96: 1–12. doi:10.1016/j.coastaleng.2014.11.001
- Dan, S.; Altomare, C.; Spiesschaert, T.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Oblique wave attack on storm walls: report 2. Force reduction. Version 3.. *FHR reports*, 00\_050\_2. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- 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
- Godá, Y.** (2010). Random Seas and Design of Maritime Structures. 3rd ed.. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 33 (P. L.-F. Liu, Ed.). World Scientific. ISBN 978-981-4282-39-0. doi:10.1142/7425
- Gruwez, V.; Bolle, A.; Hassan, W.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2011). Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens: deel 1. Haven van Oostende. *WL Rapporten*, 769\_03. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen
- Kisacik, D.; Troch, P.; Van Bogaert, P.** (2012). Description of loading conditions due to violent wave impacts on a vertical structure with an overhanging horizontal cantilever slab. *Coast. Eng.* 60: 201–226. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.10.001
- Suzuki, T.; De Roo, S.; Altomare, C.; Zhao, G.; Kolokythas, G.K.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016). Toetsing kustveiligheid-2015 - Methodologie: toetsingsmethodologie voor dijken en duinen. versie 10. *WL Rapporten*, 14\_014. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- Suzuki, T.; Vanneste, D.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2015). Force estimation on a quay structure in Ostend: a quick estimation of uplifting force acting on a horizontal plate. *WL Adviezen*, 15\_085. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- Vanneste, D.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2015). Force estimation on a quay structure in Ostend: horizontal force estimation on support pile. *WL Adviezen*, 15\_085. Flanders Hydraulics Research: Antwerp
- Verwaest, T.; Vanpoucke, P.; Vanderkimpfen, P.; Van der Biest, K.; Reyns, J.; Peeters, P.; Kellens, W.; Vanneuville, W.; Mostaert, F.** (2008). Overstromingsrisico's aan de Vlaamse kust. Evaluatie van de zeekering: deel 1. Methodologie. *WL Rapporten*, 718\_2A. Waterbouwkundig Laboratorium/Universiteit Gent: Antwerpen

## Memo

Titel: Studie golfimpact kaai 101, haven Oostende

Datum: 3/02/2016

Auteurs: De Roo, S.

Ref.: WL2017M15\_109\_1

## 1 Introductie

Afdeling Expertise Beton en Staal (EBS) plant een nieuw kaaiplateau, ondersteund door palen, ter hoogte van de Churchillkaai in de haven van Oostende. De huidige kaaiwand zal eveneens aangepast worden tot een talud. Teneinde de golfkrachten op deze palen en het kaaiplateau te bepalen, dienen de (meest nadelige) hydraulische randvoorwaarden (invallende golfcondities en waterstand) gekend te zijn voor deze locatie (rekening houdend met de levensduur van de structuur).

Deze memo beschrijft de hydraulische randvoorwaarden voor deze locatie, bepaald gebruik makende van de numerieke modellen MIKE21 BW (DHI, 2009) en SWAN (Booij et al., 1996).

## 2 Methodologie

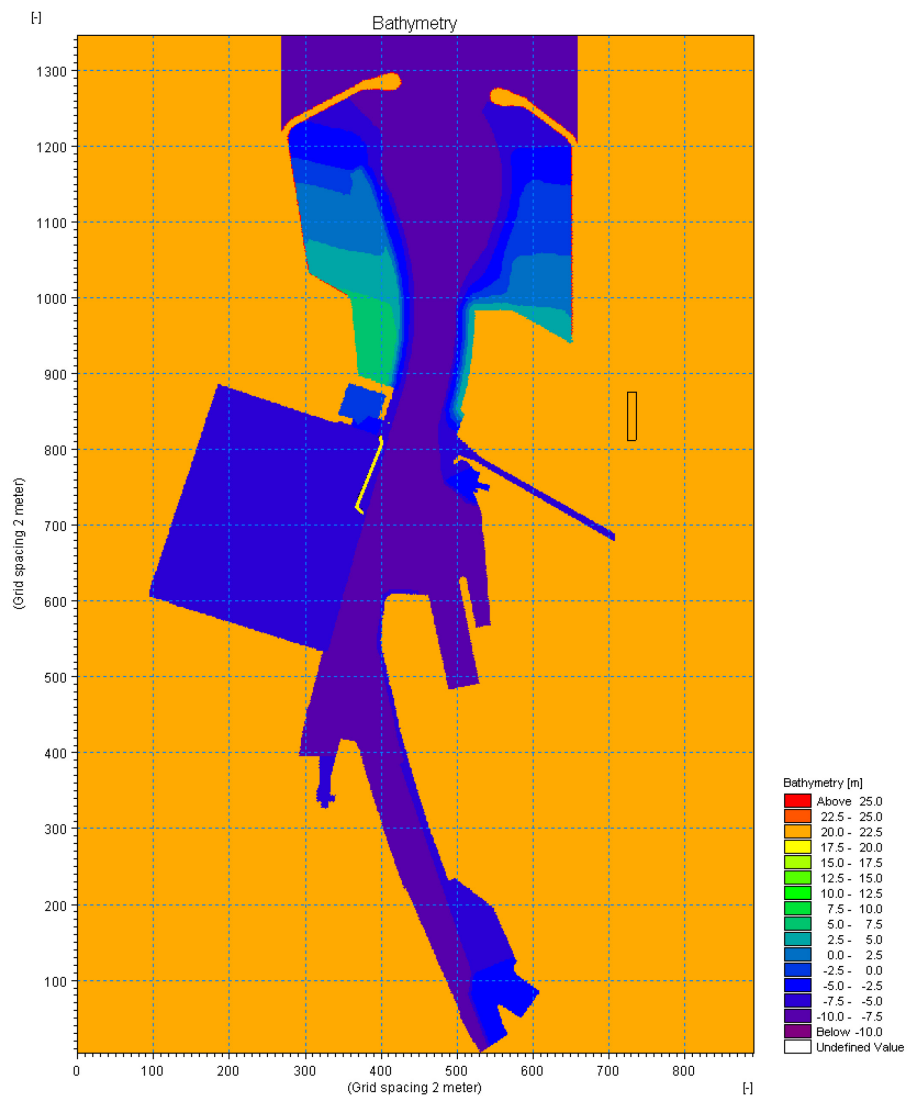
### 2.1 MIKE21 BW: aanpassingen model

Een numeriek model is opgesteld voor de haven van Oostende in het kader van project 796\_03 (Gruwez et al., 2011), waarbij de golfindringing in de haven bepaald is rekening houdende met de toekomstige lay-out van de haven (volgens plan Afdeling Maritieme Toegang, 2010). De verbreding van de vaargeul ter hoogte van de Halve Maan is echter tot op heden niet uitgevoerd zodat een nieuw model met de huidige lay-out van de haven is geïmplementeerd, vertrekkende van bovenstaand model (De Roo, 2014).

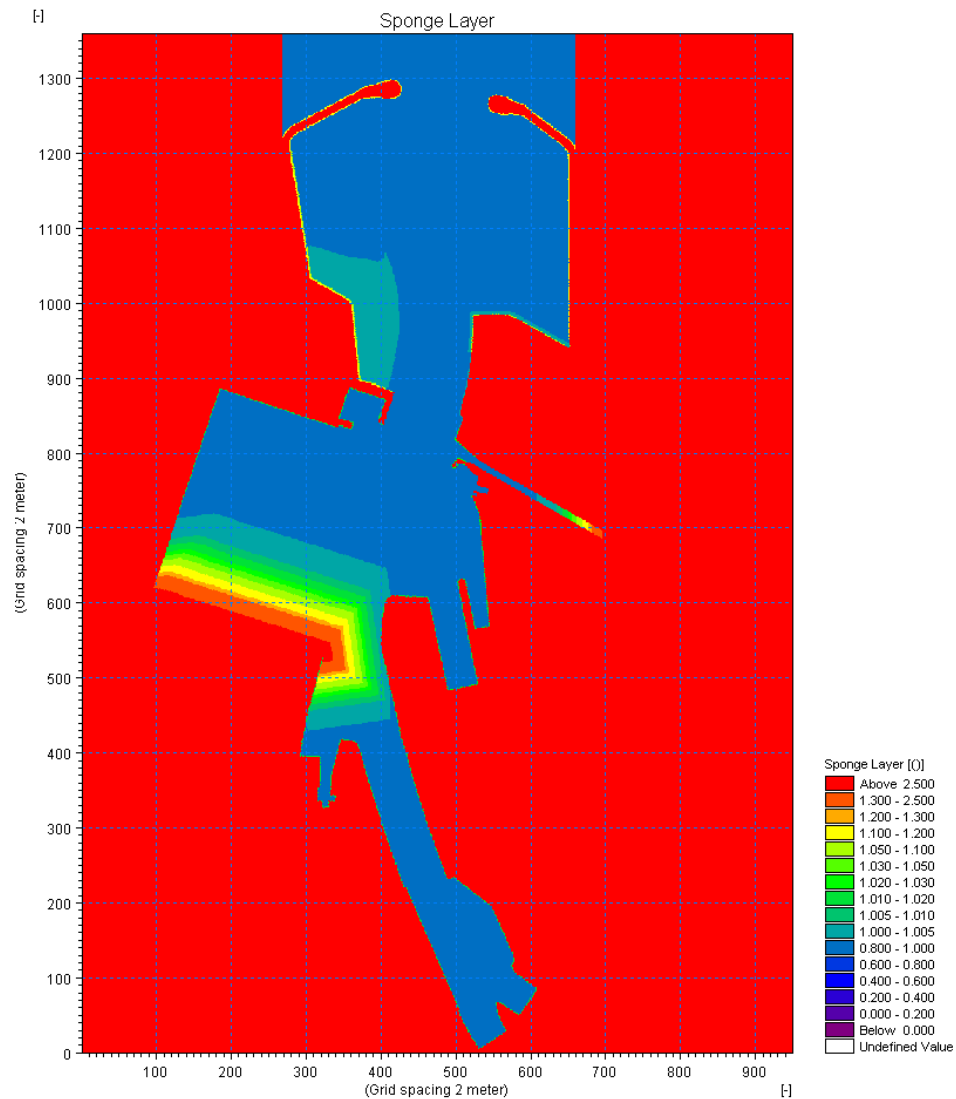
Dit model 'huidige lay-out' is bijkomend aangepast ter hoogte van de Churchillkaai (gele lijn in Figuur 2-1). Het Montgomerydok (MGD) is grotendeels te vervangen door een rechthoekig bassin (Figuur 2-1) met bodempeil op -6.2m TAW, i.e. het bodempeil ter hoogte van de Churchillkaai, dat voldoende groot is zodat aan de zuidelijke (artificiële) kaaiwand sponslagen kunnen toegevoegd worden met een lengte ruwweg gelijk aan tweemaal de waterdiepte-afhankelijke golflengte  $\lambda = \sim 140\text{m}$  (gerelateerd aan de piekgolfperiode  $T_p$ ) (Figuur 2-2). Zo wordt plaatselijk quasi alle invallende golfenergie geabsorbeerd. De Churchillkaai ligt op ongeveer 1 golflengte van deze sponslaag en voldoende ver van de westelijke rand van het bassin, zodat hier het golfklimaat voornamelijk bepaald wordt door de invallende golven (Klopman & van der Meer, 1999).

Modelparameters zijn gelijk aan deze gebruikt in de voorgaande studies.

Figuur 2-1 Aanpassing bathymetrie ter hoogte van de Churchillkaai (gele lijn) tot een bassin met L x B = 293 x 236m (golfrichting -37°).



Figuur 2-2 Aanpassing sponslagen (met L=270m) ter hoogte van zuidelijke (artificiële) kaaimuur van het bassin.



## 2.2 Keuze hydraulische randvoorwaarden ‘offshore’

Steunend op de resultaten van Gruwez et al. (2011) en De Roo (2014), is enkel de meest nadelige golfrichting wat betreft het golfklimaat in de binnenhaven, i.e. -37°, beschouwd. De ‘offshore’ hydraulische randvoorwaarden zijn getabelleerd in Tabel 2-1, en beschouwen de condities van de maatgevende storm met een terugkeerperiode  $T = 1000$ jaar (MDK, 2011).

De golfrandvoorwaarden worden geparameteriseerd als een JONSWAP spectrum met piekversterkingsfactor  $\gamma=3.3$ . Er worden simulaties uitgevoerd met kort- en langkruinige golven.

Tabel 2-1 ‘offshore’ hydraulische randvoorwaarden

Waterstand $SWL$	[m TAW]	7.20
Significante golfhoogte $H_{m0}$	[m]	5.0
Piekgolfperiode $T_p$	[s]	12
Directionele spreiding $\sigma$	[°]	0 / 16°

## 2.3 Verlenging tijdreeks tot 200 golven

Significante golfhoogtes, en golfindringingscoëfficiënten, zijn in voorgaande MIKE21 BW studies steeds bekomen na simulaties van een tijdreeks van 100 golven. Vanuit statistisch oogpunt is dit eerder weinig, i.e. er bestaat een redelijke kans dat de grootste golven uit het golfspectrum niet meegenomen werden.

Dientengevolge is ook een tijdreeks van 200 golven, met identieke golfkarakteristieken, gesimuleerd.

### 3 Resultaten

#### 3.1 Invallende significante golfhoogte $H_{m0}$ voor golfrichting $-37^\circ$

##### 3.1.1 Invallende significante golfhoogte $H_{m0}$ en piekgolfperiode $T_p$ door golfindringing (GI)

Figuur 3-1 illustreert de resulterende invallende significante golfhoogte  $H_{m0,GI}$  langs de Churchillkaai voor een lang- (LK, blauwe  $\diamond$ ) en kortkruinige (KK, zwarte  $\diamond$ ) golftrein van 100 golven zonder kaaimuur ten opzichte van het vroegere resultaat met kaaimuur (rode  $\diamond$ , uit De Roo, 2014). Het verschil in significante golfhoogte  $H_{m0,GI}$  tussen lang- en kortkruinigheid bedraagt gemiddeld 8%; tussen de ‘invallende’ en ‘totale’ significante golfhoogte  $H_{m0,GI}$  gemiddeld 30%. Hierbij is de extra verhoging in golfhoogte ten gevolge van convergentie van golfenergie in de hoek van de kaai (vanaf  $x=80$  in Figuur 3-1) buiten beschouwing gelaten.

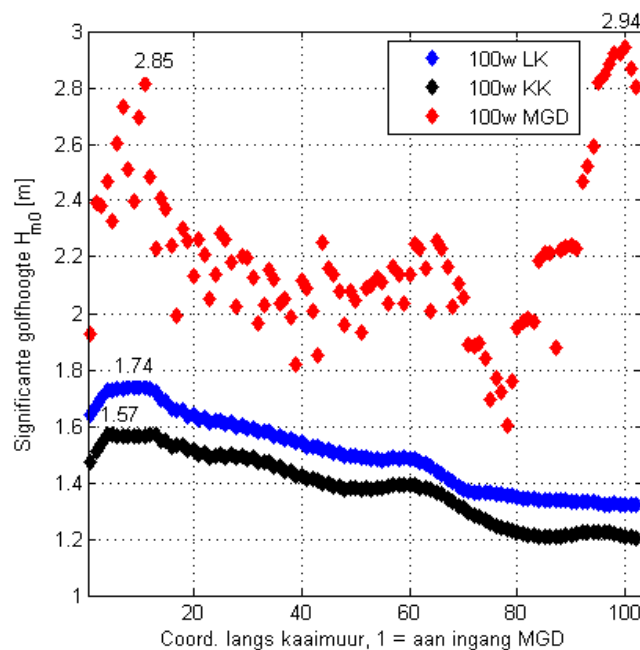
Tabel 3-1 geeft de maximale significante golfhoogtes  $H_{m0,GI,max}$  voor de verschillende situaties indien een zone beschouwd wordt tussen de kaaimuur, met bodempeil op  $-6.2m$  TAW, tot aan het begin van de vaargeul, met bodempeil op  $-8.9m$  TAW.

Tabel 3-2 geeft de piekgolfperiode  $T_{p,GI}$  voor een lang- (LK) en kortkruinige (KK) golftrein van 100 golven (zonder kaaimuur) in een aantal uitvoerpunten langs de Churchillkaai (zie Figuur 3-2), berekend uit tijdreeksanalyse met WaveLab (AAU, 2013). Bemerkt dat een tijdreeks van 100 golven eigenlijk te kort is om een betrouwbare analyse te doen van golfparameters.

Tabel 3-1 Maximale significante golfhoogtes  $H_{m0,GI,max}$  in de zone tussen de Churchillkaai en de vaargeul

$H_{m0,GI}$ 100 golven LK	[m]	2.11
$H_{m0,GI}$ 100 golven KK	[m]	1.92

Figuur 3-1 Significante golfhoogte  $H_{m0,GI}$  langs de Churchillkaai na simulaties met lang- (LK) en kortkruinige (KK) golven ‘zonder kaaimuur’, in vergelijking tot het resultaat mét kaaimuur

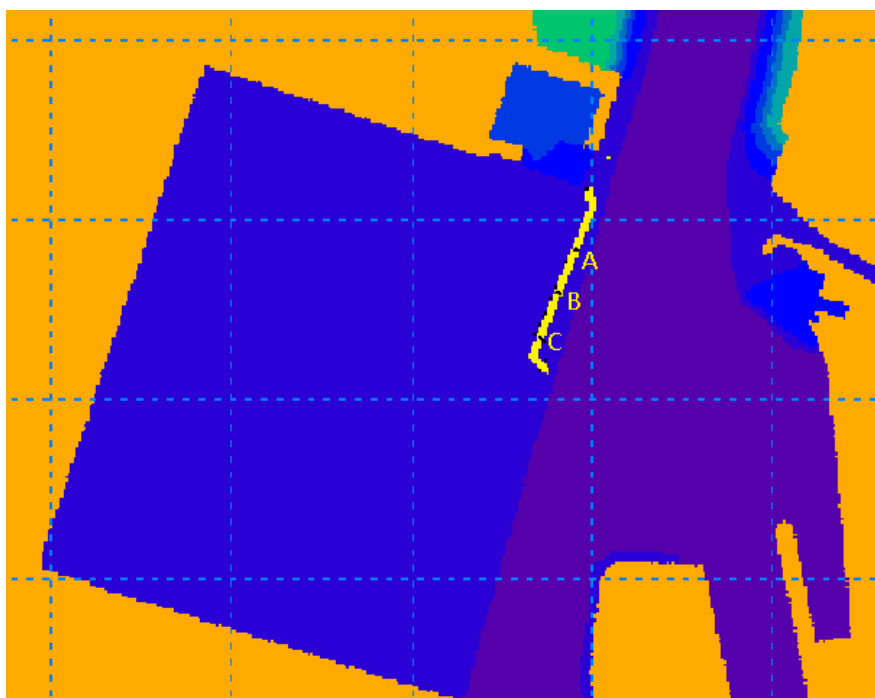


(X-as is de roostercel afstand vanaf de ingang naar MGD, werkelijke afstand in [m] = roostercel afstand \* dx (= 2m)).

Tabel 3-2 Piek golfperiode  $T_{p,GI}$  langs de Churchillkaai, bepaald door tijdreeksanalyse in de uitvoerpunten.

$T_{p,GI}$ 100 golven LK	[s]	12.8
$T_{p,GI}$ 100 golven KK	[s]	12.8

Figuur 3-2 Uitvoerpunten langs Churchillkaai



### 3.1.2 Significante golfhoogte $H_{m0}$ door lokale windgroei (WG)

Lokale wind gegenereerde golven zijn niet opnieuw berekend. Tabel 3-3 geeft de SWAN resultaten weer uit Gruwez et al., 2011 voor kaaimuurzone 7c, dewelke deels overeenkomt met de Churchillkaai (cf. Tabel 5-1, gebaseerd op Bijlage 4). Enkel de meest nadelige windrichting is gerapporteerd, en deze is NW voor deze zone.

Bemerk dat deze resultaten ook de gereflecteerde golfenergie bevatten, en dat deze, bijkomend, als conservatief dienen beschouwd te worden door de toepassing van hoge reflectiecoëfficiënten voor de kaaimuren (Gruwez et al., 2011). De waterstand horende bij de maatgevende storm met terugkeerperiode  $T=1000$ jaar verschilt ook licht van deze gebruikt voor de golfindringingsberekeningen (Tabel 3-2).

Tabel 3-3 Hydraulische randvoorwaarden gebruikt als input voor SWAN (Tabel 1-1 van Bijlage 4 uit Gruwez et al., 2011)

Waterstand SWL	[m TAW]	7.05
Windrichting		NW
Windsnelheid (op $z=10$ m, incl. landeffecten)	[m/s]	24.3

Tabel 3-4 Lokale wind gegenereerde golven, uit de meest nadelige windrichting NW (Tabel 5-1 van Gruwez et al., 2011)

Minimale significante golfhoogte $H_{m0,WGmin}$	[m]	0.45
Maximale significante golfhoogte $H_{m0,WGmax}$	[m]	0.73
Golfrichting	[° loodrecht]	90-45

### 3.1.3 Gesuperponeerde ‘invallende’ significante golfhoogte $H_{m0}$

Superpositie van significante golfhoogtes  $H_{m0}$  ten gevolge van golfindringing en lokale windgroei resulteert in de totale invallende significante golfhoogte (Van der Meer et al., 2002):

$$H_{m0} = \sqrt{H_{m0,GI}^2 + H_{m0,WG}^2} \quad (3.1)$$

Waarin:  $H_{m0}$  gesuperponeerde significante golfhoogte, rekening houdend met golfindringing en lokale windgroei

$H_{m0,GI}$  significante golfhoogte door golfindringing

$H_{m0,WG}$  significante golfhoogte door lokale windgroei

Tabel 3-4 geeft een overzicht van de gesuperponeerde ‘invallende’ significante golfhoogte  $H_{m0}$  voor een lang- en kortkruinige golftrein van 100 golven. In vergelijking 3.1 is steeds de maximale significante golfhoogte  $H_{m0,GI}$  gebruikt (zoals aangeduid in Figuur 3-1).

Tabel 3-5 Maximale gesuperponeerde significante golfhoogte  $H_{m0}$  ter hoogte van de Churchillkaai

		Min	Max
Significante golfhoogte $H_{m0}KK$ [m]	[m]	1.63	1.73
Significante golfhoogte $H_{m0}LK$ [m]	[m]	1.79	1.89

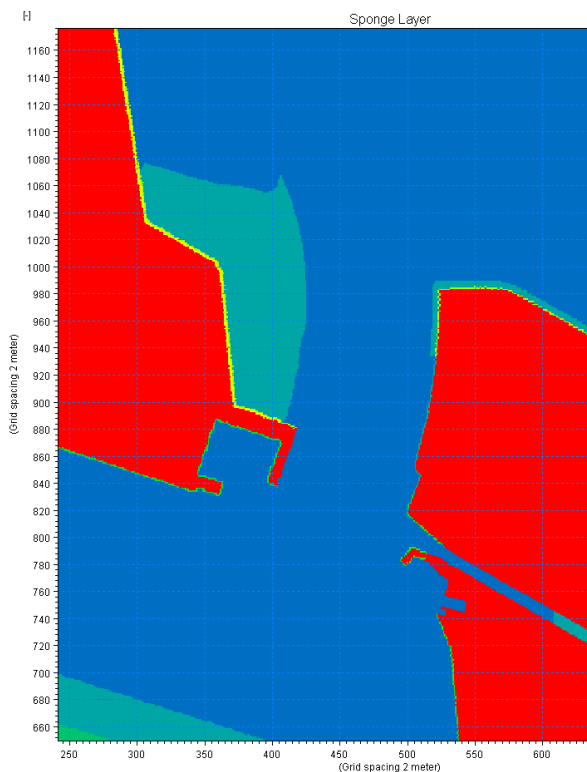
## 3.2 Implicaties tijdreeksverlenging

Voor ‘offshore’ golfrichting  $-37^\circ$  was het niet mogelijk een numeriek stabiel resultaat te bekomen gebruik makende van dezelfde modelinvoer. Een ‘blow-up’, i.e. een negatieve waterhoogte, werd bekomen kort na het simuleren van 100 golven in die tijdreeks. De locatie was steeds op de ‘afgeknotte’ helling van de Halve Maan (cf. Figuur 3-63 in Gruwez et al., 2011), net onder de sponslaag die reeds toegevoegd was op de kop en een deel van de helling om dissipatie op de helling te verhogen.

In de veronderstelling dat een Rayleigh verdeling voor deze golftijdreeksen een goede (conservatieve) benadering is, duidt het verschil tussen Figuur 3-6 en Figuur 3-7 aan dat de tijdreeks van 200 golven deze beter volgt. Deze langere tijdreeks is bijgevolg een nauwkeurigere weergave van het golfspectrum. Uit Figuur 3-5 (100w SL, zwarte  $\diamond$  vs. 200w SL, rode  $\diamond$ ) blijkt dat deze verlenging niet resulteert in een significant verschil in golfhoogtes  $H_{m0,GI}$  ter hoogte van de Churchillkaai. Gemiddeld zijn deze 2% hoger voor de uit 200 golven bestaande tijdreeks, waarbij het grootste plaatselijk verschil optreedt ongeveer 40m van de ingang naar het Montgomerydok.

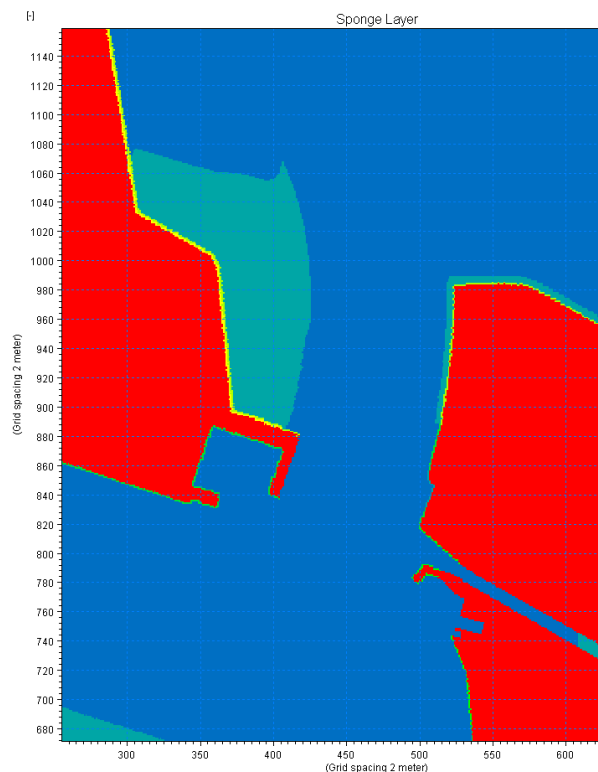
Echter, de noodzakelijke verlenging van de sponslaag langs de Halve Maan voor deze langere tijdreeks resulteert in een sterke verlaging (30 %) van de significante golfhoogtes  $H_{m0,GI}$  ter hoogte van de Churchillkaai. De toegevoegde numerieke dissipatie met deze sponslaag lijkt te hoog.

Figuur 3-3 Sponslaag langs de Halve Maan helling voor een tijdreeks met 100 golven

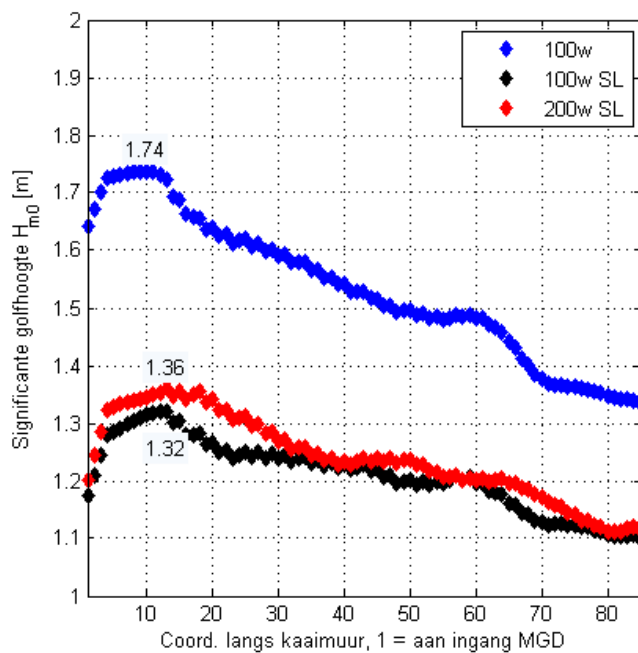


(zoals in Gruwez et al., 2011 en De Roo, 2014)

Figuur 3-4 Verlengde sponslaag langs de Halve Maan helling voor een tijdreeks met 200 golven



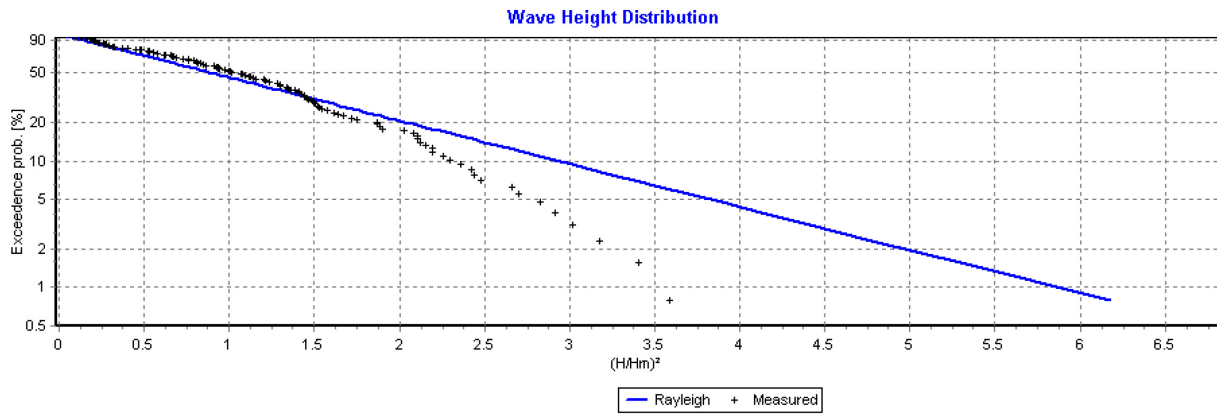
Figuur 3-5 Significante golfhoogte  $H_{m0,G}$  langs de Churchillkaai na simulaties met langkruinige golven in een tijdreeks van 100 en 200 golven, en mogelijke toevoeging van extra sponslaag (SL) langs de Halve Maan helling.



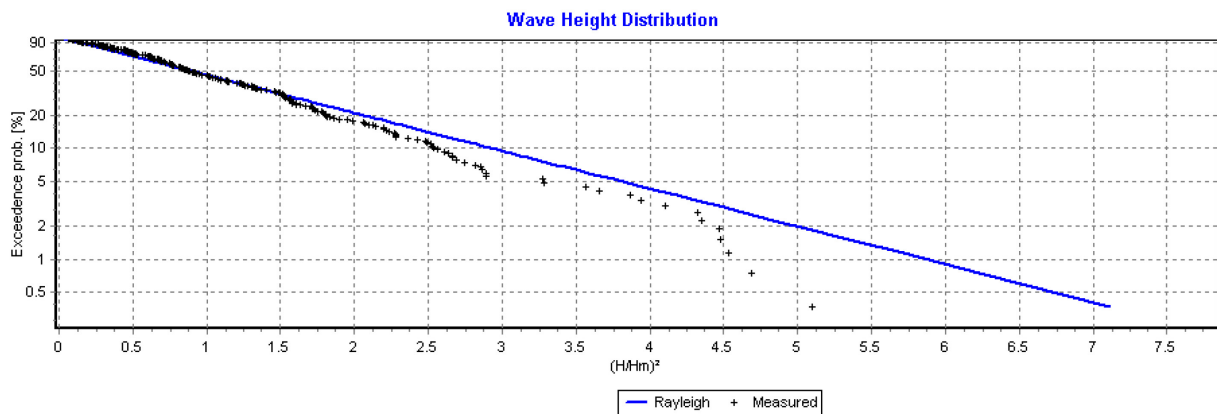
(X-as is de roostercel afstand vanaf de ingang naar MGD, werkelijke afstand in [m] = roostercel afstand \* dx (= 2m))



Figuur 3-6 Verdeling van de tijdreeks bestaande uit 100 golven (met extra SL) t.o.v. de theoretische Rayleigh verdeling



Figuur 3-7 Verdeling van de tijdreeks bestaande uit 200 golven (met extra SL) t.o.v. de theoretische Rayleigh verdeling



## 4 Besluit

Voor het ontwerp van een nieuw kaaiplateau ter hoogte van de Churchillkaai (haven van Oostende) dienen de meest nadelige hydraulische randvoorwaarden, i.e. de waterstand en het invallende golfklimaat, op deze locatie gekend te zijn.

Door de Churchillkaai te vervangen door een artificieel bassin met diens bodempeil op -6.2m TAW is getracht de invallende significante golfhoogte  $H_{m0,GI}$  te bepalen door golfindringing, gebruik makende van het numerieke MIKE21 BW model. Voor de meest nadelige 'offshore' golfrichting voor de binnenhaven, i.e. -37°, en een waterstand SWL = +7.20m TAW, i.e. deze van een maatgevende storm met terugkeerperiode T=1000jaar, is het golfklimaat berekend. De maximale invallende significante golfhoogte  $H_{m0,GI} = 1.74\text{m}$ , resulterend uit een tijdreeks van 100 langkruinige golven. Diens piekgolfperiode  $T_{p,GI}$  bedraagt 12.8s.

Superpositie met de maximale significante golfhoogte ten gevolge van lokale windgroei  $H_{m0,WG} = 0.73\text{m}$ , geeft een totale significante golfhoogte  $H_{m0} = 1.89\text{m}$  ter hoogte van de Churchillkaai. Bemerkt wel dat deze maximale golfhoogte  $H_{m0,WG}$  bepaald werd bij een iets lagere waterstand SWL = +7.05m TAW en windrichting NW.

## 5 Referenties

**AAU** (2013). Software WaveLab 3.54.

**Afdeling Maritieme Toegang** (2010) Haven van Oostende. OW-plan: geometrie en bathymetrie – Haventoeegang. Autocadtekening:

planOHo20100212HavenVanOostende\_OWplan\_Ontwerpfase\_Grondplan\_Alternatief3.dwg

**Booij, N.; Holthuijsen, L.H. ; Ris, R.C.** (1996). The SWAN wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, USA, Vol. 1, pp. 668-676.

**De Roo, S.** (2014). Incident significant wave heights at the Visserijsluis. WL Memo, 13\_033. Waterbouwkundig laboratorium: Antwerpen, België. 19p.

**DHI** (2009). Boussinesq Waves Module – User guide. 210p.

**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, België. 203p.

**Klopman, G.; van der Meer, J.W.** (1999). Random wave measurements in front of reflective structures. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering

**MDK & WL** (2011). Masterplan Kustveiligheid. 90p.

**van der Meer, J.W.; Langenberg, J.W.; Klein Breteler, M.; Hurdle, D.P.; den Heijer, F.** (2002). Wave boundary conditions and overtopping in complex areas. 13p.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**  
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

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

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