



Vlaanderen
is wetenschap



17_052_1
WL rapporten

Numerieke modellering van het kortkruinig golfklimaat in de haven van Oostende

Huidige en toekomstige havengeometrie

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Numerieke modellering van het kortkruinig golfklimaat in de haven van Oostende

Huidige en toekomstige haven geometrie

De Roo, S.; Vanneste, D.; 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/2020/3241/25

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

De Roo, S.; Vanneste, D.; Suzuki, T.; Mostaert, F. (2020). Numerieke modellering van het kortkruinig golfklimaat in de haven van Oostende: Huidige en toekomstige havengeometrie. Versie 3.0. WL Rapporten, 17_052_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

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

Oprachtgever:	Afdeling Maritieme Toegang	Ref.:	WL2020R17_052_1
Keywords (3-5):	Golfindringing, windgolven, haven, numerieke modellering, storm		
Tekst (p.):	68	Bijlagen (p.):	27
Vertrouwelijk	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2024

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanneste, D.; Suzuki, T.	Getekend door: Dieter Vanneste (Signature) Getekend op: 2020-01-17 16:08:17 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Dieter Vanneste</i>
		Getekend door: Tomohiro Suzuki (Signature) Getekend op: 2020-01-20 11:29:38 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Tomohiro Suzuki</i>
Projectleider:	De Roo, S.	Getekend door: Sieglen De Roo (Signature) Getekend op: 2020-01-17 15:45:44 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Sieglen De Roo</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	Getekend door: Frank Mostaert (Signature) Getekend op: 2020-01-20 14:04:16 +01:00 Reden: Ik keur dit document goed <i>Frank Mostaert</i>
-----------------	--------------	---



Abstract

In 2019 zijn de werken van start gegaan voor de verbreding van de vaargeul ter hoogte van Halve Maan, waarbij de effectieve verbreding zal uitgevoerd worden in 2020. Deze werken kaderen in het Openbare Werken-plan (OW-plan) Oostende en vormen het sluitstuk van de werken om de nautische toegankelijkheid van de haven te verbeteren.

Afdeling Maritieme Toegang wenst de golfcondities in de haven van Oostende te kennen na beëindiging van alle werken aan de havenmond en vaargeul, i.e. 'situatie na verbreding Halve Maan' genoemd in dit rapport. Hiertoe zijn de hydraulische randvoorwaarden in de haven bepaald ten gevolge van kortkruinige golfindringing en lokale windgegenereerde golfgroei. Eén-, tien-, honderd- en duizendjarige stormcondities zijn doorgerekend, en dit voor golven en wind komende uit richtingen -45° (NW), -37° , -30° en -22.5° (NNW). Daarnaast is ook de golfindringing doorgerekend in de 'huidige situatie', i.e. anno 2017: met havendammen, zodat de invloed van de lokale verbreding van de vaargeul op het golfklimaat begroot kon worden (lokale windgegenereerde golfgroei wordt slechts beperkt beïnvloed door deze werken).

De numerieke modellen 'huidige situatie' zijn gevalideerd aan de hand van in situ opgemeten data van 4 stormen. De korte significante golfhoogtes van het numeriek model komen relatief goed overeen met deze verwerkt uit de in situ data. Uit vergelijking van de golfspectra blijkt wel dat de energie van kortere golven ($T < 4s$) steeds ontbreekt in het numeriek model, mogelijks door de noodzakelijke truncatie van het spectrum.

Validatie van de numerieke modellen 'situatie na verbreding Halve Maan' dient uitgevoerd te worden eens er in situ data beschikbaar zijn. Intussen zijn de resultaten van het numeriek model voor een duizendjarige storm (uit richting 323°) wel vergeleken met deze van een fysisch model (WL-project 18_066). Beide modellen tonen langsheen de transecten ongeveer dezelfde trends in golfhoogteverschillen.

Vergelijking van het golfklimaat door kortkruinige golfindringing in de 'huidige situatie' en 'situatie na verbreding Halve Maan' toont aan dat in de 'huidige situatie', dankzij de bouw van de havendammen, golfenergie grotendeels gedissipeerd wordt in de buitenhaven (reflectie richting buitengaats en schaduwzijde van de havendammen). Na verbreding van de vaargeul dringt logischerwijze meer golfenergie de binnenhaven in. De golfindringingscoëfficiënt, i.e. de Kd-waarde, neemt maximaal toe van 0.2 tot 0.7 in de vaargeul centraal in de as kaaivlak NSYC – einde combiwand Halve Maan bij een éénjarige storm (uit alle golfrichtingen). Dit resulteert in een stijging van de significante golfhoogte H_{m0} van 0.5-0.6 tot 1.75-2m. Bij hogere terugkeerperiodes daalt echter het verschil in Kd-waarde tussen de 'huidige situatie' en 'situatie na verbreding Halve Maan' naar 0.45-0.4 tot 0.35 resp. bij een tien- en duizendjarige storm (golfrichtingen 330° - 323°). De significante golfhoogte H_{m0} wordt dus niet veel groter in de as.

Lokaal in het centrale deel van de haven (Churchillkaai, noordelijke kaaimuur Rebo offshore wind terminal, Wandelaarkaai) en in het Montgomerydok (noordelijke zone) neemt de Kd-waarde wel licht toe van een één- naar tienjarige storm door hogere reflectie. Dit effect vertaalt zich evenwel niet door richting voorhaven, waar de grootste Kd-waarden optreden voor een éénjarige storm. Voor zwaardere stormen ($T = 100$ en 1000 jaar) treedt golfoverslag en -overloop over de kaaivlakken op in de binnenhaven, waardoor de reflectie van golven daalt en bijgevolg ook de Kd-waarde.

In de 'situatie na verbreding Halve Maan' zijn de verschillen klein tussen lokale windgegenereerde golfhoogtes uit de verschillende windrichtingen; een stijging van een één- naar duizendjarige windsnelheid resulteert in een verdubbeling van de maximale significante golfhoogte H_{m0} van 0.2m naar 0.4m in de vaargeul (ter hoogte van de Halve Maan), het centrale deel van de haven en de voorhaven.

De bijdrage door golfindringing tot de totale significante golfhoogte H_{m0} in de haven is bijgevolg significant groter, uitgezonderd helemaal achteraan ter hoogte van RYCO en bij een duizendjarige storm in de voorhaven. Daar zijn beide bijdrages ongeveer even groot.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Het OW-plan Oostende	1
1.2 Doel van dit rapport	4
1.3 Leeswijzer	4
2 Keuze numeriek model: Mike 21 BW	5
3 Modelopbouw	7
3.1 Haven: bathymetrie en geometrie	7
3.1.1 Huidige situatie.....	7
3.1.2 Situatie na verbreding Halve Maan	10
3.2 Hydraulische randvoorwaarden	13
3.2.1 Validatiestormen	13
3.2.2 Stormen met terugkeerperiode $T = 1, 10, 100$ en 1000 jaar	14
3.3 Fysische processen	16
3.3.1 Diffractie en transmissie havendammen.....	17
3.3.2 Golfoploop	18
3.3.3 Golfbreking	19
3.3.4 Partiële reflectie in de haven (havendammen, kaaimuren en glooiingen)	19
3.4 Modelopzet	23
3.4.1 Rekenrooster	23
3.4.2 Timestep en simulatieduur	23
3.4.3 Golfgeneratie en -absorptie	24
3.5 Numerieke stabiliteit	26
3.5.1 Numerieke parameters.....	26
3.5.2 Bodemwrijving.....	26
3.5.3 Sponslagen.....	27
4 Gevoeligheidsanalyse	28
4.1 Situatie Klein Strand	28

4.2	Reflectie combiwand Halve Maan.....	28
5	Modelvalidatie.....	30
5.1	NW-storm 14/01/2017 2:00.....	30
5.2	330°-storm 10/10/2013 15:25.....	32
5.3	NNW-storm 4/11/2013 12:25	34
5.4	NW-storm 22/10/2014 0:00.....	36
5.5	Duizendjarige stormvloed uit richting 323°.....	38
5.5.1	Opbouw fysisch model	38
5.5.2	Vergelijking resultaten fysisch en numeriek model	40
6	Golfindringing bij maatgevende stormen.....	46
6.1	Invloed verbreding Halve Maan	46
6.1.1	Huidige situatie.....	46
6.1.2	Situatie na verbreding Halve Maan	49
6.2	Invloed golfrichting.....	52
6.2.1	Huidige situatie.....	52
6.2.2	Situatie na verbreding Halve Maan	52
6.3	Invloed terugkeerperiode maatgevende storm	52
6.3.1	Huidige situatie.....	52
6.3.2	Situatie na verbreding Halve maan	53
6.4	De uitvoering van het OW-plan: invloed op golfindringing.....	58
6.4.1	Oorspronkelijke situatie haven (cf. Figuur 1A) en start bouw havendammen (cf. Figuur 1B)	58
6.4.2	Uitvoering OW-plan: voltooiing verbetering nautische toegankelijkheid.....	60
7	Lokale windgegenereerde golfgroei bij maatgevende stormen	62
8	Besluit	65
9	Referenties	67
Bijlage 1	Figuren met resultaten golfindringing (volledige haven): Kd-waarden – huidige havengeometrie – alle maatgevende stormen	B1
Bijlage 2	Figuren met resultaten golfindringing (HM – centrale deel haven – MGD): significante golfhoogtes – huidige havengeometrie – alle maatgevende stormen	B5
Bijlage 3	Figuren met resultaten golfindringing (volledige haven): Kd-waarden – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen	B7
Bijlage 4	Figuren met resultaten golfindringing (HM – centrale deel haven – MGD): significante golfhoogtes – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen	B15
Bijlage 5	Figuren met resultaten lokale windgegenereerde golven (SWAN): significante golfhoogtes – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen	B19
Bijlage 6	Figuren met resultaten golfindringing (vergelijking FM-NM): Kd-waarden – toekomstige havengeometrie – duizendjarige storm uit richting 323°	B26

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Opbouw bathymetrie en havengeometrie – huidige toestand: overzicht data	8
Tabel 2 – Opbouw bathymetrie en havengeometrie – toekomstige toestand: overzicht data	11
Tabel 3 – Hydraulische data validatiestormen	14
Tabel – 4 Hydraulische data stormen met verschillende terugkeerperiode T	16
Tabel 5 – Bodempeil aftopping bathymetrie zeewaartse zijde van havendammen	18
Tabel 6 – Testmatrix en resultaten partiële reflectie (op basis van reflectie analyse) in 1D numerieke golfgoot	20
Tabel 7 – Reflectie- en absorptiecoëfficiënten, C_r en $1/\mu$ voor modellering partiële reflectie van structuren	21
Tabel 8 Simulatieduur van de verschillende maatgevende stormen	24
Tabel 9 – Toepassing hogere bodemwrijving (Chézy = 11)	26
Tabel 10 – Simulaties met extra sponslagen voor numerieke stabiliteit op de onderwaterberm	27
Tabel 11 – Validatiestorm 04/11/2013: resultaten golfhoogtemeters van verschillende M21 lay-outs tegenover in situ data	28
Tabel 12 – Reflectiecoëfficiënt combiwand: gevoeligheidsanalyse bij een duizendjarige storm uit richting 323°	29
Tabel 13 – Validatiestorm 14/01/2017: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data	32
Tabel 14 – Validatiestorm 10/10/2013: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data (met $HPF > 0.05Hz$)	33
Tabel 15 – Validatiestorm 04/11/2013: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data (met $HPF > 0.05Hz$)	36
Tabel 16 – Validatiestorm 22/10/2014: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data (met $HPF > 0.05Hz$)	36
Tabel 17 – Golfcondities midden vaargeul ter hoogte van kop Halve Maan voor een duizendjarige storm uit 323°	39
Tabel 18 – Windsnelheden u_w (op $z = 10m$ boven MSL) voor alle maatgevende stormen	62

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Het OW-plan voor de haven van Oostende in uitvoering	2
Figuur 2 – Haven Oostende: verbreding van de vaargeul en heraanleg Halve Maan	3
Figuur 3 – Bathymetrie [m TAW] en huidige havengeometrie – golfrichting 323° – storm met T = 1 jaar	9
Figuur 4 – Grondplan haven van Oostende.....	10
Figuur 5 – Bathymetrie (baggerstreefdieptes) [m TAW] en toekomstige havengeometrie – golfrichting 323° – storm met T = 1 jaar	11
Figuur 6 – Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017b): snede DW2: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie	12
Figuur 7 – Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017b): snede DW5: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie	12
Figuur 8 – Terugkeerperiodes van gemeten waterstanden [m TAW] te Oostende.....	15
Figuur 9 – Mogelijkheden om havendam met te steil talud te modelleren	17
Figuur 10 – Grondplan haven: Overzicht indeling kaaimuren en glooiingen volgens gedefinieerde type structuren.....	22
Figuur 11 – Energiespectrum voor NW: $H_{m0} = 3.17\text{m} - T_p = 7.04\text{s}$	25
Figuur 12 – Directionele energieverdeling t.o.v. hoofdgolfrichting	25
Figuur 13 – Energiespectrum voor NW: $H_{m0} = 4.74\text{m} - T_p = 10.74\text{s}$	25
Figuur 14 – Directionele energieverdeling t.o.v. hoofdgolfrichting	25
Figuur 15 – Afname in Kd-waarde bij daling reflectie combiwand: onovertopbaar -> vrijboord = 0.8m	29
Figuur 16 – Afname in Kd-waarde bij daling reflectie combiwand: onovertopbaar -> vrijboord = 0m	29
Figuur 17 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: Demeysluis.....	31
Figuur 18 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: Montgomery	31
Figuur 19 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: Visserijsluis.....	31
Figuur 20 – Gemodelleerd golfspectrum: M21 & SWAN: Visserijsluis.....	31
Figuur 21 – Overzicht meetlocaties - meerjarige meetcampagne (2011-2015).....	33
Figuur 22 – Significante golfhoogte H_{m0} van de lange golfcomponent in vergelijking met de buitengaats golfhoogte (LPF < 0.05 Hz).....	34
Figuur 23 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST A.....	35
Figuur 24 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST B.....	35
Figuur 25 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST C.....	35
Figuur 26 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST E	35
Figuur 27 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST B.....	37
Figuur 28 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST C.....	37
Figuur 29 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST E	37

Figuur 30 – Fysisch model van deel van Oostendse haven: verbrede vaargeul en Montgomerydok	38
Figuur 31 – Detail schaalmodel: (a) Halve Maan talud en combiwand – (b) Montgomerydok	39
Figuur 32 – Positie golfhoogtemeters in het fysisch (rode x) en numeriek model (zwarte x) in bathymetrie [m TAW] lay-out van numeriek model	40
Figuur 33 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] door golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm uit 323° met T = 1000 jaar	41
Figuur 34 – Significante golfhoogte in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) de vaargeul; (b) langs de Churchillkaai en (c) ingang Montgomerydok.....	43
Figuur 35 – Significante golfhoogte in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) Montgomerydok; (b) middellijn parallel aan kaaivlakken Visserskaai; (c) parallel aan Montgomerykaai en (d) parallel aan kaaivlakken Mercatorsluis	44
Figuur 36 – Modelling duizendjarige storm ($h = +6.88m$ TAW) in fysisch model (project 18_066)	45
Figuur 37 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar	47
Figuur 38 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar	48
Figuur 39 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar	48
Figuur 40 – Toename in Kd-waarde [-] voor golfindringing: toekomstige vs. huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar	50
Figuur 41 – Toename in Kd-waarde voor golfindringing: toekomstige vs. huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar	51
Figuur 42 – Toename in Kd-waarde voor golfindringing: toekomstige vs. huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar	51
Figuur 43 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting NW.....	54
Figuur 44 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting 323°	55
Figuur 45 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting 330°	56
Figuur 46 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting NNW.....	57
Figuur 47 – Overzicht meetlocaties – meerjarige meetcampagne	59
Figuur 48 – Oorspronkelijke havengeometrie: Significante golfhoogtes H_{m0} buitengaats en in de haven tijdens stormpiek.....	59
Figuur 49 – Start bouw havendammen: Significante golfhoogtes H_{m0} buitengaats en in de haven tijdens stormpiek.....	60
Figuur 50 – Haven van Oostende: Kd-waarden voor stormcondities tijdens verschillende uitvoeringsfasen van het OW-plan.....	61
Figuur 51 – Lokale windgegenereerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting 323°.....	63
Figuur 52 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar	B1
Figuur 53 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar	B3
Figuur 54 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar	B4
Figuur 55 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar	B5

Figuur 56 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar	B6
Figuur 57 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar	B6
Figuur 58 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 1 jaar	B7
Figuur 59 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 10 jaar	B9
Figuur 60 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 100 jaar	B11
Figuur 61 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar	B13
Figuur 62 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 1 jaar	B15
Figuur 63 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 10 jaar	B16
Figuur 64 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 100 jaar	B17
Figuur 65 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar	B18
Figuur 66 – Lokale windgegenereerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting NW	B20
Figuur 67 – Lokale windgegenereerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting 330°	B22
Figuur 68 – Lokale windgegenereerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting NNW	B24
Figuur 69 – Kd-waarde in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) de vaargeul; (b) langs de Churchillkaai en (c) ingang Montgomerydok	B26
Figuur 70 – Kd-waarde in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) Montgomerydok; (b) middellijn parallel aan kaaivlakken Visserskaai; (c) parallel aan Montgomerykaai en (d) parallel aan kaaivlakken Mercatorsluis	B27

1 Inleiding

1.1 Het OW-plan Oostende

In het begin van de 21^{ste} eeuw startten de onderzoeks- en voorbereidingsfasen voor het Openbare Werkenplan (OW-plan) Oostende. Het doel van dit geïntegreerde project is tweeledig; het verhogen van de veiligheid van Oostende tegen overstromingen uit zee en het verbeteren van de nautische toegang tot de haven. Figuur 1A illustreert de oorspronkelijke toegang tot de haven. Het Ooster- en Westerstaketsel (met lage onderwaterbermen) begrenzen de vaargeul naar de haven.

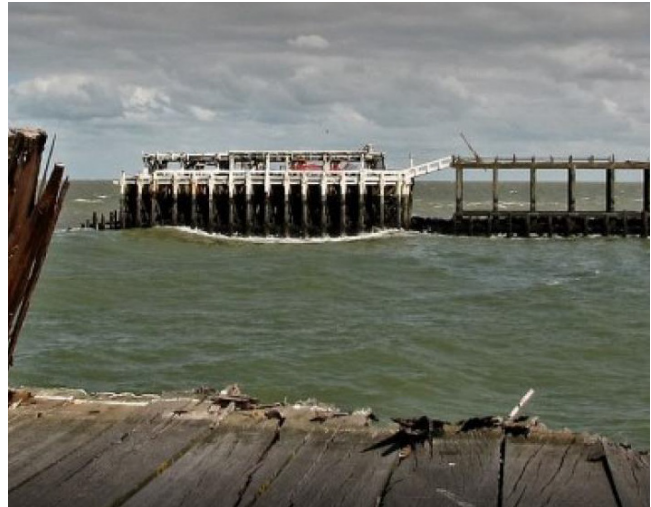
In december 2007 begon de afbraak van het Oosterstaketsel (en lage dam) (Figuur 1B) en de ruwbouw van de Oostelijke havendam. Een jaartje later (september 2008) startte de aanleg van een nieuwe vaargeul. Na het uitbaggeren van deze werd gestart met de bouw van de Westelijke havendam. Tegen 2011 zijn deze grote werken voltooid. Tussen 2012 en eind 2014 worden de nieuwe havendammen volledig afgewerkt, tot een peil van +8 m TAW op de wandelpromenade aan de koppen (Figuur 1C) (Afdeling Maritieme Toegang, 2019).

In 2019 zijn de werken van start gegaan voor de verbreding van de vaargeul ter hoogte van Halve Maan (Figuur 1D) waarbij de effectieve verbreding zal uitgevoerd worden in 2020. Deze vormen het sluitstuk van de werken om de nautische toegankelijkheid van de haven te verbeteren. De vaargeul zal verbreed worden van 85 naar 125m vooraan de Halve Maan en naar 140m achteraan (ter hoogte van hoek naar Visserijsluis) (Tractebel, 2017a). Aan de noordelijke zijde van de Halve Maan wordt het bestaand talud verstevigd met een bijkomende laag HARO-blokken; ter hoogte van de meest noordelijke helft van de westelijke zijde komt een nieuw talud. In het zuidelijke gedeelte van de westelijke zijde sluit een combiwand met onderwaterberm aan op dit nieuwe talud (Figuur 2).

Figuur 1 – Het OW-plan voor de haven van Oostende in uitvoering (Afdeling Maritieme Toegang, 2019)



(a) Beginsituatie: het Ooster- en Westerstaketsel begrenzen de vaargeul



(b) Afbraak van het Oosterstaketsel

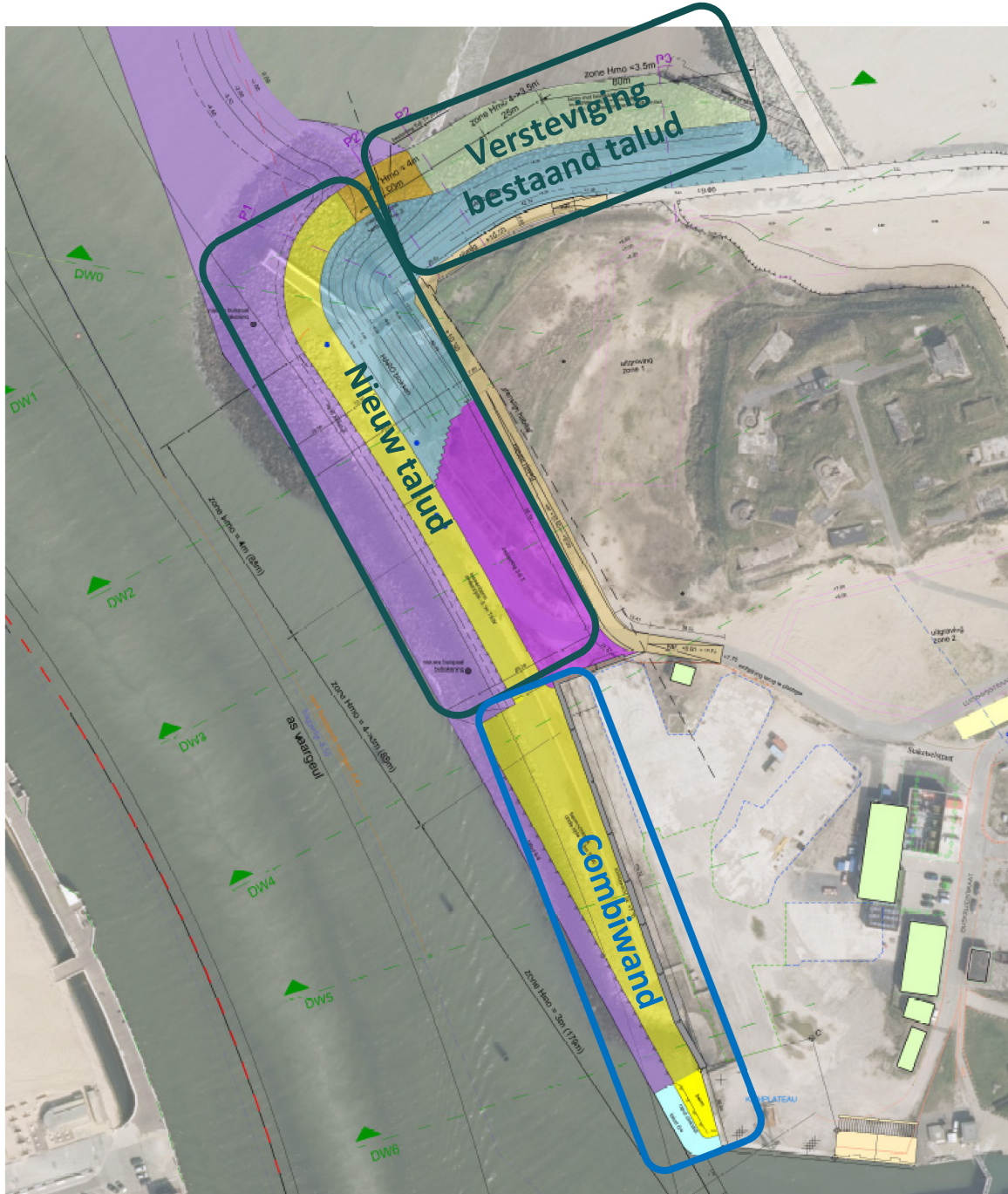


(c) 2 nieuwe havendammen zijn voltooid (Google Earth, 2018)



(d) Halve Maan: locatie sluitstuk van werken verbetering nautische toegankelijkheid haven

Figuur 2 – Haven Oostende: verbreding van de vaargeul en heraanleg Halve Maan (Tractebel, 2017a)



1.2 Doel van dit rapport

Afdeling Maritieme Toegang is vragende partij om de golfcondities in de haven van Oostende te kennen na beëindiging van alle werken aan de havenmond en vaargeul. Hiertoe wenst ze de hydraulische randvoorwaarden door kortkruinige golfindringing en lokale windgegenereerde golfgroei in de haven te kennen voor één-, tien-, honderd- en duizendjarige condities, en dit voor golven en wind komende uit golfrichtingen -45° (NW), -37° , -30° en -22.5° (NNW). Tevens is het interessant om de golfindringing te kennen in de huidige toestand (anno 2017, vóór de verbreding van de vaargeul). Door ook deze laatste te bepalen, kan de invloed van de lokale verbreding van de vaargeul bepaald worden aangezien verondersteld kan worden dat lokale windgolven slechts beperkt beïnvloed worden door deze werken.

Bemerk dat in 2011 de golfindringing ten gevolge van een toekomstige verbrede vaargeul reeds gemodelleerd werd met Mike 21 BW (DHI) en Mildwave (UGent) in het kader van het project 'numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens' (Gruwez *et al.*, 2011). In die studie is echter gebruik gemaakt van een oud ontwerp verbrede vaargeul, en werden de waterstanden +6m TAW, +7.2m TAW (= 1000 jaar incl. zeespiegelstijging) en +8m TAW in combinatie met langkruinige golfindringing uit richtingen NW, -37° en NNW beschouwd (met bijkomend +6.5m TAW, +7.0m TAW, +7.5m TAW en enkel golfrichting NNW). De bijhorende golf randvoorwaarden werden overgenomen uit Technum *et al.*, 2002 in het kader van de studies voor het OW-plan Oostende en uit Verwaest *et al.*, 2008 in het kader van de overstromingsrisicoberekeningen¹.

Aangezien het ontwerp van de verbrede vaargeul intussen geoptimaliseerd werd ter verbetering van het golfklimaat en de reeds gesimuleerde hydraulische randvoorwaarden te beperkt zijn voor de onderzoeksvragen, is een nieuwe studie nodig.

1.3 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de fysica van het geopteerde numerieke model Mike 21 BW samengevat.

Hoofdstuk 3 behandelt uitgebreid de modelopbouw. In 3.1 wordt uitgelegd hoe de ingebouwde bathymetriën en havengeometriën tot stand zijn gekomen. De opgelegde hydraulische randvoorwaarden buitengaats zijn opgelijst in 3.2. Hoe de dominante fysische processen in een haven beschouwd zijn, is beschreven in 3.3. De vertaling van de gewenste hydraulische randvoorwaarden en relevante fysische processen naar de modelopzet staat in 3.4. Bijkomende maatregelen om tot een numeriek stabiel model te komen, staan opgelijst onder 3.5.

Hoofdstuk 4 betreft gevoeligheidsanalyses met betrekking tot het dissipatieve Klein Strand en de reflectie ter hoogte van de combiwand.

In Hoofdstuk 5 worden de opgestelde modellen gevalideerd voor 5 stormen: 4 in situ gemonitorde stormen en 1 duizendjarige storm die fysisch gemodelleerd werd.

In Hoofdstuk 6 wordt de golfindringing in de haven besproken voor alle maatgevende stormen in de huidige en toekomstige havengeometrie. Ook de invloed van de uitvoering van het OW-plan op de golfindringing wordt hier beknopt besproken.

Naast golfindringing is mogelijks de bijdrage van lokale windgegenereerde golven belangrijk (Hoofdstuk 7).

Het rapport wordt besloten in Hoofdstuk 8.

¹ Bemerk dat de hydraulische randvoorwaarden in het kader van overstromingsrisicoberekeningen eerder gedefinieerd zijn aan vaste waterstanden dan wel aan terugkeerperiodes.

2 Keuze numeriek model: Mike 21 BW

Er is geopteerd voor het model Mike 21 BW (in 2DH: twee dimensies horizontaal en diepte geïntegreerd) om de simulaties uit te voeren (DHI, 2017), net zoals in voorgaande studie van Gruwez *et al.*, 2011. Dit model lost de golfinformatie op per fase in het tijdsdomein gebruik makende van de Boussinesq vergelijkingen.

De oorspronkelijke Boussinesq vergelijkingen zijn opgesteld steunend op deze aannames: een vloeistof is onsamendrukbaar en rotatievrij en heeft een constante dichtheid zodat de vloeistof beschreven kan worden door een 3D snelheidspotentiaal.

Deze Boussinesq vergelijkingen zijn opgebouwd uit een continuïteits- en momentumvergelijkingen (in X- en Y-richting). In Mike 21 BW worden ze gebruikt in termen van fluxdichtheden (snelheidscomponenten P en Q (X- en Y-richting) zijn over de diepte geïntegreerd) (Monteban, 2016, uit DHI, 2017a):

Continuity

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

X-momentum

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + n^2 g h \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + F_x + n\psi_1 = 0$$

y-momentum

$$\underbrace{n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + n^2 g h \frac{\partial \xi}{\partial y}}_{(I)} + \underbrace{\frac{\partial R_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x}}_{(II)} + \underbrace{n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right]}_{(III)} + \underbrace{\frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2}}_{(IV)} + \underbrace{F_y}_{(V)} + \underbrace{n\psi_2}_{(VI)} = 0$$

- Waarin:
- ξ : verheffing van het wateroppervlak [m]
 - t: tijd [s]
 - d: stilwaterpeil [m]
 - h: waterstand [m] = d + ξ
 - F_x, F_y : schuifspanning in X- en Y-richting resp.
 - C: Chézy getal [$m^{0.5}s^{-1}$]
 - α, β : weerstandscoëfficiënten voor laminaire en turbulente stroming resp.
 - R_{xx}, R_{yy}, R_{xy} : te veel aan impuls ten gevolge van de niet-uniforme snelheidsverdeling
 - n: porositeit
 - g: zwaartekrachtversnelling [ms^{-2}]

Alle blauwe termen, i.e. lokale verandering over de tijd, 2 advection termen en een zwaartekrachtsterm, behoren tot de ondiep water vergelijkingen (waarop bijv. het model SWASH gebaseerd is).

De rode, paarse, oranje en grijze term brengen respectievelijk golfbreking (II), energiedissipatie door poreuze media (III), bodemwrijving (IV) en schuifspanning (V) in rekening.

De groene termen (VI) zijn eigen aan de Boussinesqvergelijkingen; ze bevatten de dispersieve hogere orde afgeleiden van de fluxdichtheden P en Q en het vrije wateroppervlak ξ :

$$\begin{aligned}\psi_1 &= -\left(B + \frac{1}{3}\right) d^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^3 Q}{\partial t \partial y \partial x} \right) - n B g d^3 \left(\frac{\partial^3 \xi}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^2 \partial y} \right) \\ &\quad - d \frac{\partial d}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial t \partial x} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial y} + n B g d \left(2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right) \right) - d \frac{\partial d}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial x} + n B g d \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial y} \right) \\ \psi_2 &= -\left(B + \frac{1}{3}\right) d^2 \left(\frac{\partial^3 Q}{\partial t \partial y^2} + \frac{\partial^3 P}{\partial t \partial y \partial x} \right) - n B g d^3 \left(\frac{\partial^3 \xi}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \xi}{\partial x^2 \partial y} \right) \\ &\quad - d \frac{\partial d}{\partial y} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q}{\partial t \partial y} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial t \partial x} + n B g d \left(2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right) \right) - d \frac{\partial d}{\partial x} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial t \partial y} + n B g d \frac{\partial^2 \xi}{\partial x \partial y} \right)\end{aligned}$$

De parameter B hierin, i.e. de lineaire dispersiecoëfficiënt, wordt geschat gebruik makende van *curve fitting* opdat de groeps- en faseceleriteit zo goed mogelijk in overeenstemming zijn met Stokes eerste orde theorie.

Madsen & Sørensen, 1992 stelden voor deze parameter $B = 1/15$ voor. Hierdoor vergroot het toepassingsgebied van de Boussinesq vergelijkingen, dat gebaseerd is op de diepwaterlimiet $kd < 3.1$ (i.p.v. $kd < 1.4$, k is het golfgetal $= 2\pi/L_0$ met L_0 de diepwatergolflengte). De frequentiedispersie verbetert dus, en bijgevolg ook de minimaal te modelleren golfperiode T_{min} (zie verder, Sectie 3.4.1). Randbemerking hierbij is dat de bathymetrie (maximaal) gradueel mag variëren en dat hellingen steiler dan $1/3$ niet gemodelleerd kunnen worden.

De schuifspanningen (grijze termen) worden verder uitgewerkt als volgt (DHI, 2017a):

$$\begin{aligned}F_x &= -\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \right) \right) \\ F_y &= -\left(\frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial Q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right) \right)\end{aligned}$$

Waarbij: - v_t : de turbulente eddy viscositeit is (geschat volgens de Smagorinsky formulering (Sorensen *et al.*, 2004)).

De aanname van rotatievrije stroming maakt het niet eenvoudig om golfbreking (rode term) te modelleren. Dissipatie door golfbreking is in Mike 21 BW geïmplementeerd op basis van een *surface roller*. Een volume van water (met een bepaalde dikte δ) beweegt zich bovenop het wateroppervlak voort met een zekere celeriteit c . Wordt de helling van dit volume steiler dan een voorafbepaalde limiet, treedt golfbreking op. Deze limiet is afhankelijk van het type breking (*spilling*, *plunging* of *surging*).

In bovenstaande momentumvergelijkingen wordt dit als volgt in rekening gebracht (DHI, 2017a):

$$\begin{aligned}R_{xx} &= \frac{\delta}{1 - \frac{\delta}{h}} \left(c_x - \frac{P}{h} \right)^2 \\ R_{xy} &= \frac{\delta}{1 - \frac{\delta}{h}} \left(c_x - \frac{P}{h} \right) \left(c_y - \frac{Q}{h} \right) \\ R_{yy} &= \frac{\delta}{1 - \frac{\delta}{h}} \left(c_y - \frac{Q}{h} \right)^2\end{aligned}$$

Waarbij: - c_x en c_y : de celeriteit in X- en Y-richting zijn.

Volgens Sorensen *et al.*, 2004 is deze celeriteit c evenredig met deze bepaald door de lineaire ondiep water golftheorie ($\sqrt{g d}$), met een evenredigheidsconstante gelijk aan 1 of 1.3 resp. buiten of binnen de brekingszone.

3 Modelopbouw

3.1 Haven: bathymetrie en geometrie

3.1.1 Huidige situatie

De havengeometrie en -bathymetrie zijn opgebouwd op basis van de documenten opgelijst in Tabel 1. Deze bestanden hebben verschillende coördinaatreferentiestelsels, dewelke eerst, indien nodig, omgezet zijn naar het Europese coördinaatreferentiestelsel ETRS89. Als projectiesysteem is geopteerd voor de universele transversale Mercatorprojectie (UTM 31N).

De bathymetrie is opgebouwd uit verschillende peilingen, dewelke met een verschillende meettechniek (single/multibeam sonar) en *sounding*frequentie (33, 300 of 400 kHz) zijn uitgevoerd. De data is samengevoegd in zones waar het verschil tussen beide metingen heel klein is. De peilingen omvatten de ruime zones rond de havendammen (zowel buitengaats als binnen de haven tot max. +3m TAW), de vaargeul en de volledige binnenhaven tot aan de uitwateringsconstructie van de Spuikom en de brug (van de Eduard Moreauxlaan) naar de Noordede. Het Klein Strand is verder opgebouwd volgens ontwerp (tot +6m TAW) en LIDAR data (tot landgrens Zeeheldenplein).

De onderwaterberm ter hoogte van het Westerstaketsel en het talud van de Halve Maan zijn eveneens volgens ontwerp opgenomen in de bathymetrie, en sluiten aan op de gepeilde metingen. Voor het talud is het theoretisch profiel gebruikt, waarbij als peil de bovenkant van de deklaagelementen is genomen. Beide constructies hebben hellingen gelijk aan of flauwer dan 1/3.

De helling van de havendammen is opgenomen in de bathymetrie tot op gepeilde hoogte. Hoger is de gepeilde helling afgetopt tot een plateau, eindigend in een verticale muur tot op de kruin. De helling, variërend tussen 1/1.5 en 1/2, is te steil voor het model Mike 21 BW; de partiële reflectie van de stortsteenhelling dient numeriek behandeld te worden (zie verder, Sectie 3.3.4). De kruinbreedte van de numerieke havendam varieert met de te modelleren waterstand. Diens positie is bepaald als het snijpunt van de deklaagelementen met het stilwaterpeil (zie verder, Sectie 3.3.1).

De geometrie van de binnenhaven is volgens de aangeleverde landcontour, die het einde van de kaaivlakken volgt. De pontons in het Montgomerydok en ter hoogte van de Spuikom (aanlegsteigers pleziervaart), deze op het einde van het Tij- en Zeewezendok en de aanmeersteigers van de veerboot (Montgomerydok en Visserijsluis) zijn bijgevolg niet meegenomen in de opbouw. Aan de Visserijsluis is deze zone vereenvoudigd ingebouwd als een kaaimuur.

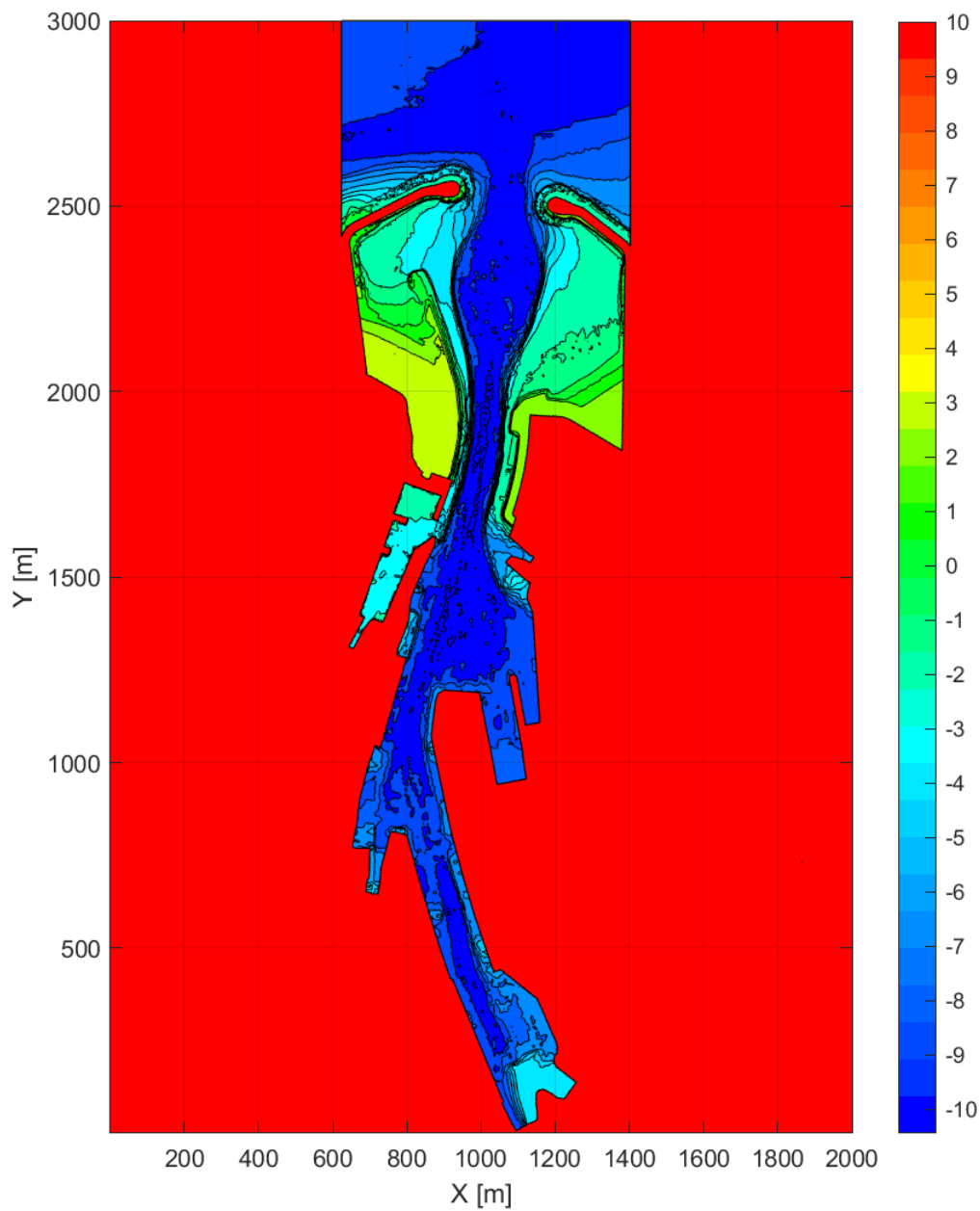
Figuur 3 illustreert de bathymetrie en huidige havengeometrie zoals ingebouwd in Mike 21 BW voor golfrichting 323° en een storm met $T = 1$ jaar.

Figuur 4 toont het grondplan van de haven van Oostende, met vermelding van de belangrijkste zones. In het rapport worden lokale zones zo benoemd.

Tabel 1 – Opbouw bathymetrie en havengeometrie – huidige toestand: overzicht data

Locaties	Bestand	Coördinaat referentiestelsel
Geometrie Halve Maan, onderwaterberm ter hoogte van Westerstaketsel, Oostelijke en Westelijke havendam, Klein strand tot +6m TAW	planOHo20100212HavenVanOostende_OWplan_Ontwerpfase_Grondplan_Alternatief3.dwg planOHo20100212HavenVanOostende_OWplan_Ontwerpfase_Snedes_Alternatief3_17_052.dwg	ED50
Snedes Halve Maan	DR0002-0003-IFA-07 (var snedes vaargeul)-DRAFT.dwg DR0009-IFA-05 (profielen kop)-DRAFT.dwg	LAM72
Landcontour binnenhaven Oostende	Contour_Kust&Schelde_aMT_20151007.kml	ETRS89
Bathymetrie haven	Klein strand – droog strand: LIDAR data Zone rond havendammen (buitengaats en in de haven) en vaargeul tot binnenhaven (ingang Visserijsluis/Montgommerydok): 160226_ost_strd_mb_300_taw.asc Havenmond, vaargeul en volledige binnenhaven uitgezonderd Montgommerydok: 160309_ost_hav_sb_33_taw.asc Montgommerydok: 170307_ost_mgd_mb_400_taw.asc	ETRS89, LAT

Figuur 3 – Bathymetrie [m TAW] en huidige havengeometrie – golfrichting 323° – storm met T = 1 jaar



Figuur 4 – Grondplan haven van Oostende (PoO, 2019)



3.1.2 Situatie na verbreding Halve Maan

De havengeometrie is aangepast ter hoogte van de Halve Maan volgens de aangeleverde plannen van Afdeling Maritieme Toegang, opgelijst in Tabel 2. De vaargeul wordt hierdoor ruim 40m breder ter hoogte van de kop van de Halve Maan, die langs noordelijke en deels westelijke zijde met een nieuw talud uitgevoerd wordt (kruinpeil variërend tussen +10 en +11.4 m TAW). In het zuidelijke gedeelte van de westelijke zijde (naar de binnenhaven toe) sluit een combiwand met lage onderwaterberm aan op dit talud (kruinpeil op +7.7 m TAW).

Als peil is steeds de bovenkant van de deklaagelementen beschouwd. De helling van het nieuwe talud, die 1/2.5 tot 1/3 bedraagt tot aan de onderwaterberm en nog flauwer is tot aan de vaargeulrand, is conform ontwerp ingebouwd (voorbeeld in Figuur 6). Dit geldt ook voor de overgangshelling van 1/3 tussen de talud- en combiwandzone.

Ter hoogte van de combiwand is de helling naar de onderwaterberm echter te steil (1/1.5). Deze werd verflauwd in de bathymetrie naar 1/3 (voorbeeld in Figuur 7). Dit betekent dat de onderwaterberm kleiner is in de modelbathymetrie en dat deze niet meer aanwezig is ter hoogte van de hoek naar de Visserijsluis.

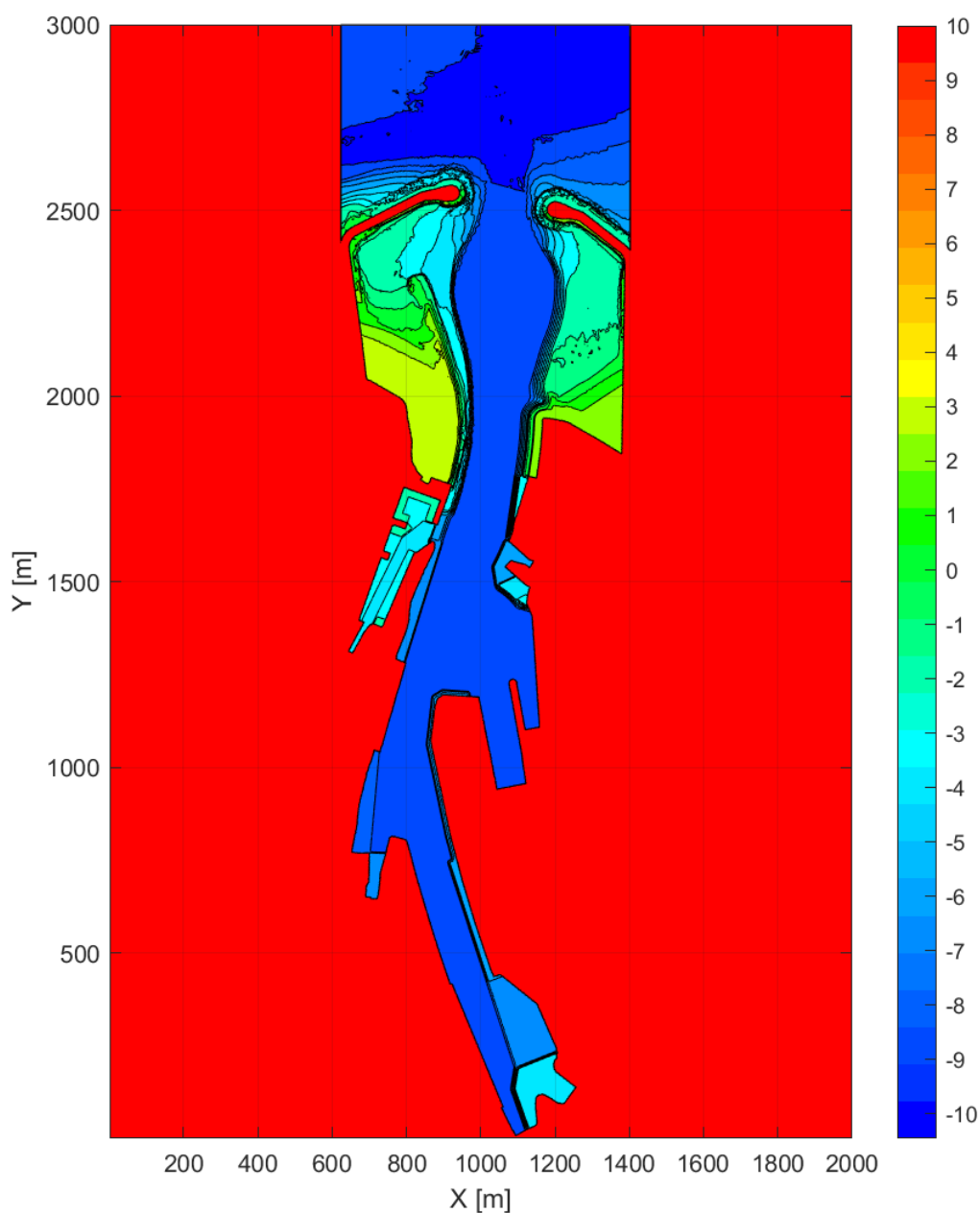
Voor de bathymetrie van de vaargeul en de haven zijn de baggerstreefdieptes aangehouden, om een toestand van maximale golfindringing te modelleren.

Figuur 5 illustreert de bathymetrie en toekomstige havengeometrie zoals ingebouwd in Mike 21 BW voor golfrichting 323° en een storm met T = 1 jaar.

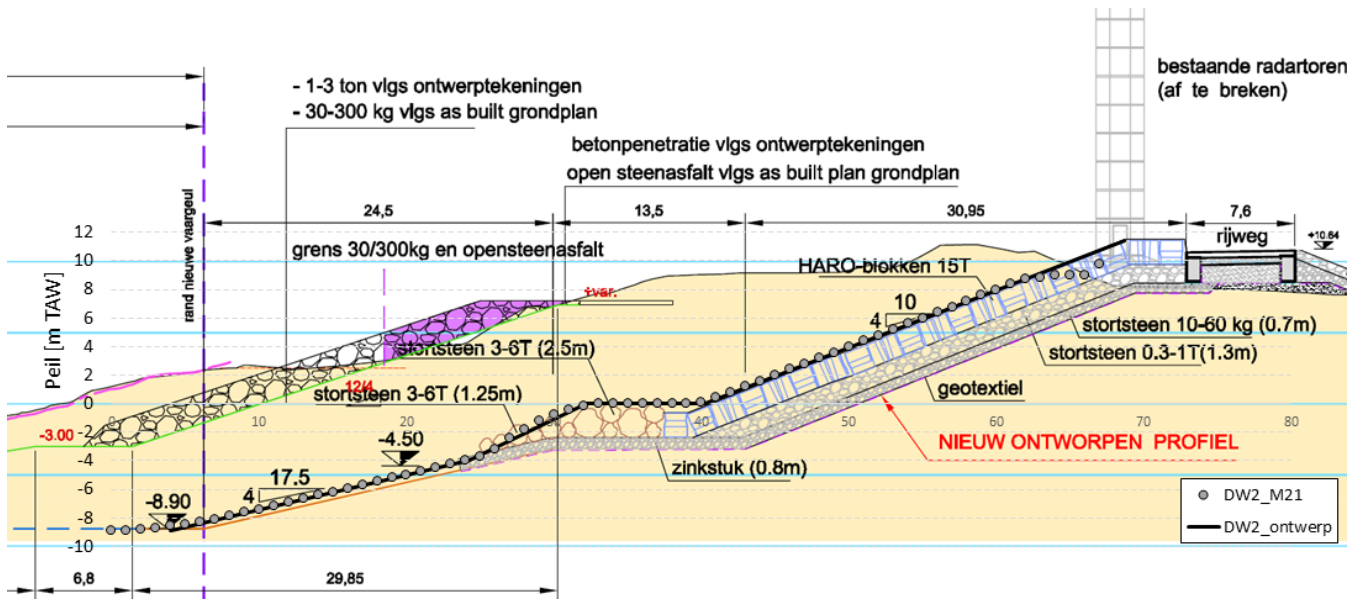
Tabel 2 – Opbouw bathymetrie en havengeometrie – toekomstige toestand: overzicht data

Locaties	Bestand	Coördinaatreferentiestelsel
Geometrie Halve Maan	DR0001-IFA-10(grondplan)-DRAFT.dwg DR0002-0003-IFA-07 (var snedes vaargeul)-DRAFT.dwg DR0009-IFA-05 (profielen kop)-DRAFT.dwg	LAM72
Baggerstreefdieptes	DR0014-IFA-03(baggerzones).dwg	LAM72, TAW

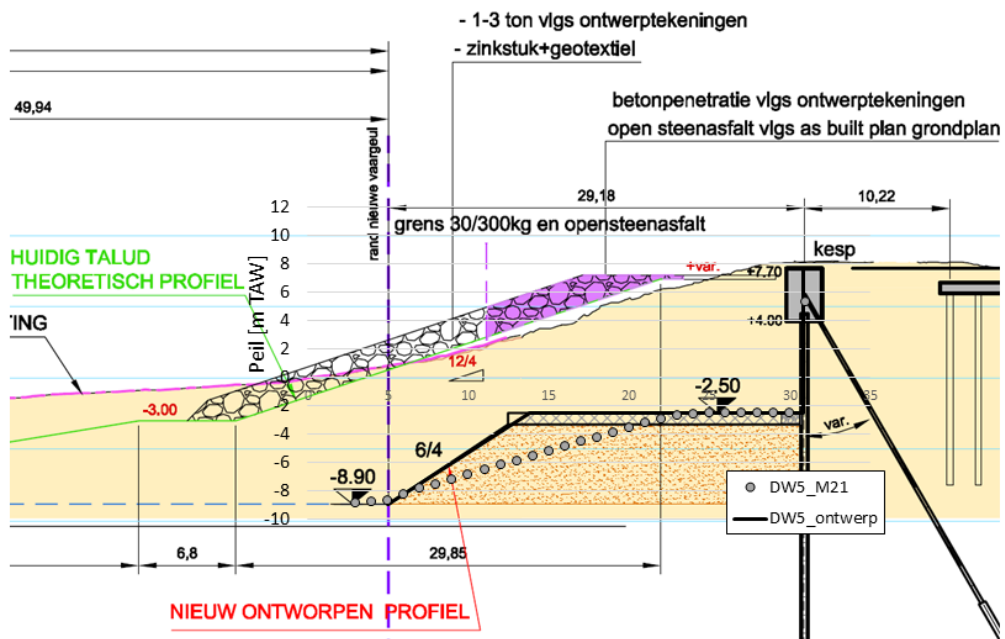
Figuur 5 – Bathymetrie (baggerstreefdieptes) [m TAW] en toekomstige havengeometrie – golfrichting 323° – storm met T = 1 jaar



Figuur 6 – Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017b): snede DW2: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie



Figuur 7 – Ontwerp Halve Maan (Tractebel, 2017b): snede DW5: vereenvoudigd ontwerp + M21 schematisatie



3.2 Hydraulische randvoorwaarden

3.2.1 Validatiestormen

Er wordt gebruik gemaakt van data opgemeten in de haven van Oostende tijdens 2 verschillende meetcampagnes, i.e. de meerjarige meetcampagne (september 2011 - januari 2015) uitgevoerd door Tractebel in opdracht van Afdeling Kust en de ad hoc meetcampagne tijdens de storm van 13-14/01/2017, uitgevoerd door het Waterbouwkundig Laboratorium (Vanneste *et al.*, 2017).

De havendammen werden afgewerkt op hun finale kruinpeil rond de zomer van 2014; echter, na 2012 was de aanleg en opbouw zo goed als voltooid zodat stormen gekozen zijn na deze datum. Er is geen info wat betreft transmissie over de havendammen tijdens de geselecteerde stormen.

Directionele golfinformatie is enkel beschikbaar voor de storm van 14/01/2017. De golfrichting is bijgevolg gelijk gesteld aan de windrichting. In bovenstaande rapporten worden verschillende meetlocaties gebruikt voor winddata (Zeebrugge Daminstallatie, Oostende radartoren, Meetpaal 0). Aangezien voor alle beschouwde validatiestormen winddata beschikbaar zijn van meetstation Meetpaal 0, is de windrichting van deze locatie als maatgevend gekozen.

Voor alle stormen uitgezonderd 14/01/2017 (Directionele Waverider 'Oostende Oosterstaketsel') komen de buitengaatse golfdata van een Waverider boei (idem, 'Oostende Oosterstaketsel'). De H_{33} parameter (gemiddelde hoogte van de 33.3% hoogste golven) is omgezet naar H_{m0} door vermenigvuldiging met 1.06 (cf. Goda, 2010).

▪ Storm 13-14/01/2017 HW 2:00

Door de combinatie van springtij en een NW-storm werd door OMS (Oceanografisch Meteorologisch Station) een hoogwater van +6.2m TAW voorspeld te Oostende. De wind ruimde echter op 13/01 rond 15:30 van W naar NW, daarbij geleidelijk afnemend in snelheid (van 17 m/s voorbij het eerste hoogwater op de middag van 13/01 tot 11 m/s voorbij het tweede hoogwater 's nachts). De (buitengaatse) golfhoogte nam geleidelijk toe en bereikte een piek ($H_{m0}=3.52$ m) rond middernacht op 14/01 (net voor hoogwater), om daarna terug af te nemen door de afnemende windsnelheid. Door het beschreven verloop van de wind veranderde ook de opwaaiing tegen de kust waardoor de hoogwaters tijdens de meetcampagne varieerden van +5.21 m TAW tot +5.65 m TAW (Vanneste *et al.*, 2017).

De hydraulische data rond het hoogste hoogwater (14/01 2:00) van de meetcampagne worden gebruikt voor de validatie (zie Tabel 3).

▪ Storm 10/10/2013 HW: 15:25

Op 9/10 's avonds rond 18u ruimde de ZW-wind naar WNW, daarbij toenemend in snelheid tot 16 m/s om 6u 's ochtends (10/10). Nadien ruimde de wind verder naar N, daarbij aanhoudend rond een wat lagere snelheid van 13 m/s. Rond de middag (13u.) kromp de wind echter richting 330°. Ten gevolge van deze winddraaiing nam de snelheid vlug opnieuw toe tot 19 m/s gedurende enkele uren (tot 17:30). De (buitengaatse) golfhoogte nam hierdoor toe tot 2.4m rond het 1^{ste} hoogwater (10/10 3:00), stagneerde even tijdens de ruiming van WNW tot N rond 2.6m om vervolgens toe te nemen tot 3.76m tijdens het 2^{de} hoogwater.

Dit verloop van de wind zorgde voor een waterstand van +5.07m TAW tijdens het 1^{ste} hoogwater (10/10 3:00) en van +5.43m TAW tijdens het 2^{de} hoogwater (10/10 15:25). De hydraulische data rond het hoogste hoogwater worden gebruikt voor de validatie (zie Tabel 3).

▪ **Storm 4/11/2013 HW: 12:25**

Op 04/11/2013 rond de middag bedroeg het gemeten hoogwater +5.39m TAW te Oostende; dit was niet zozeer te wijten aan een hoge stormopzet, slechts 0.33m, maar eerder aan een hoog astronomisch hoogwater.

De voorafgaande uren kromp de wind van N naar NNW, daarbij toenemend van 10 m/s tot 17 m/s. De (buitengaatse) golfhoogte H_{m0} nam hierdoor toe van 0.85 tot 2.46m rond het tijdstip van hoogwater.

▪ **Storm 22/10/2014 HW 0:00**

Ongeveer 12u voor hoogwater (21/10) ruimde de wind van ZZW naar WNW en verder tot NW, waarbij de snelheid toenam tot 22 m/s en dit tot 2.5u voor hoogwater. Door de winddraaiing naar NW luwde de wind tot 17.5 m/s tijdens hoogwater. De (buitengaatse) golfhoogte H_{m0} steeg door dit windverloop tot 3.7m en bedroeg tijdens het hoogwater nog 3.5m.

Dit verloop van de wind resulteerde in een (scheve) stormopzet van ongeveer 1m, waardoor het hoogwater rond 22/10 middernacht een peil van +5.5m TAW bereikte.

Tabel 3 – Hydraulische data validatiestormen

Validatiestorm	Waterpeil h	Significante golfhoogte H_{m0}	Piekgolfperiode T_p	(Eenzijdige) directionele spreiding	Windrichting
	[m TAW]	[m]	[s]	[°]	
10/10/2013 15:25	5.43	3.76	9.1	23	330°
04/11/2013 12:25	5.39	2.46	7.1	23	NNW
22/10/2014 0:00	5.5	3.5	8	23	NW
14/01/2017 2:00	5.65	3.4	9.1	23	NW

3.2.2 Stormen met terugkeerperiode $T = 1, 10, 100$ en 1000 jaar

Tabel 4 geeft een overzicht van de hydraulische condities voor de stormen met verschillende terugkeerperiodes buitengaats de haven van Oostende (kustsectie 117). Uitgezonderd het jaarlijkse golfklimaat, zijn steeds de directionele golfcondities beschouwd samen met de omnidirectionele waterstand aangezien dit de sturende hydraulische variabele is.

In De Roo *et al.*, 2017 is het jaarlijkse golfklimaat voor de haven van Oostende bepaald gebruik makende van 10 jaar data van de golfmeetboei ‘Oostende Oosterstaketsel’. De jaarlijkse, omnidirectionele waterstand is bijkomend bepaald op basis van 88 jaar data van de maregraaf in de haven van Oostende (zie Figuur 8).

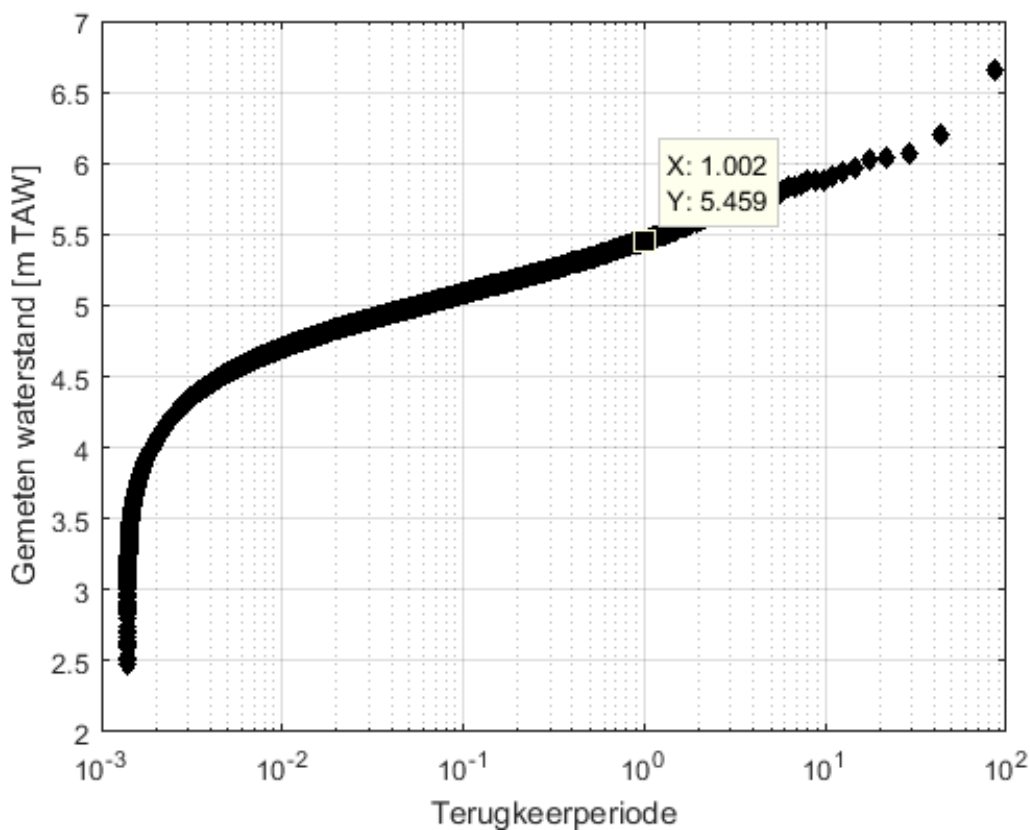
De tienjarige golfcondities zijn eveneens in De Roo *et al.*, 2017 bepaald, door middel van een gelijkaardige transformatie als deze in het Hydraulisch Randvoorwaardenboek (De Roo *et al.*, 2016) maar dan met normale hydraulische randvoorwaarden als invoer (in plaats van extreme). Deze directionele golfkarakteristieken worden toegepast samen met de tienjarige omnidirectionele waterstand (zie Figuur 4-1 in De Roo *et al.*, 2016).

Gebruik makende van opgestelde extreme waardenverdelingen in het kader van het Hydraulisch Randvoorwaardenboek (De Roo *et al.*, 2016) zijn de directionele honderd- en duizendjarige golfcondities bepaald in De Roo, Suzuki *et al.*, 2017 en De Roo, Suzuki *et al.*, 2017a respectievelijk. Deze directionele golfkarakteristieken worden toegepast samen met de 100- en duizendjarige omnidirectionele waterstand.

Directionele hydraulische randvoorwaarden zijn echter enkel beschikbaar voor richtingen NW en NNW. Condities voor de tussenliggende richtingen zijn lineair geïnterpoleerd.

Directionele spreiding voor een duizendjarig golfklimaat bedraagt 16° (De Roo *et al.*, 2016). Deze waarde werd behouden voor de golfcondities met lagere terugkeerperiodes, wat eerder conservatief is.

Figuur 8 – Terugkeerperiodes van gemeten waterstanden [m TAW] te Oostende (1925-2014, uitgezonderd 1980)



Tabel – 4 Hydraulische data stormen met verschillende terugkeerperiode T

Terugkeerperiode T	Waterpeil h	Significante golfhoogte H_{m0}	Piekgolfperiode T_p	(Eenzijdige) directionele spreiding	Windrichting
[jaar]	[m TAW]	[m]	[s]	[°]	[°]
1	5.46	3.17	7.04	16	-45 (NW), -37, -30, -22.5 (NNW)
10	5.90	4.01	9.40	16	-45
	5.90	4.02	9.44		-37
	5.90	4.04	9.48		-30
	5.90	4.05	9.52		-22.5
100	6.40	4.39	10.18	16	-45
	6.40	4.45	10.27		-37
	6.40	4.50	10.35		-30
	6.40	4.56	10.44		-22.5
1000	6.88	4.74	10.78	16	-45
	6.88	4.80	10.87		-37
	6.88	4.87	10.95		-30
	6.88	4.93	11.04		-22.5

3.3 Fysische processen

Het golfklimaat in de haven wordt gekenmerkt door volgende fysische processen:

- Diffractie rond o.a. havendammen, ingang Visserijsluis
- Transmissie over havendammen
- Refractie op de vaargeulhelling en shoaling door verminderde waterdiepte ter hoogte van het Klein Strand en ten noorden van de Halve Maan
- Reflectie tegen kaaimuren en vorming van staande golven
- Golfoploop op glooiingen
- Niet-lineaire golf-golfinteracties
- Bodemwrijving
- Lokale golfgroei door wind in een havenbekken met beperkte strijklengte

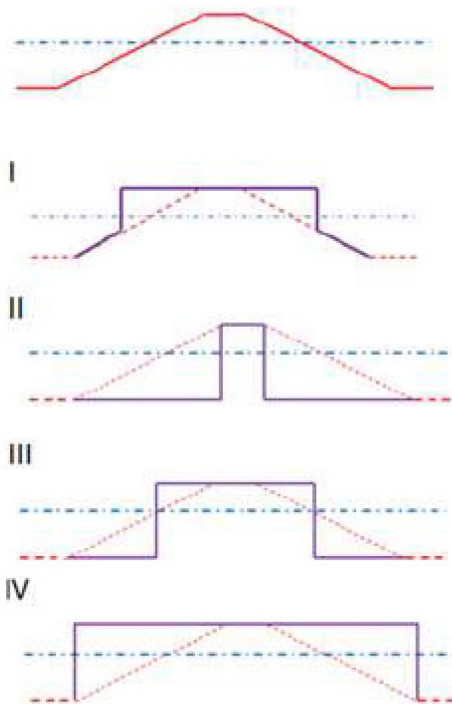
Bovenvermelde processen kunnen allemaal gemodelleerd worden met Mike 21 BW (cf. Hoofdstuk 2, en DHI, 2017a) uitgezonderd lokale golfgroei door wind (zie verder, Hoofdstuk 7). Echter, ze zijn niet allemaal dominant. Om het model werkbaar te houden (stabiliteit en rekentijd), zijn daarom enkele keuzes gemaakt.

Terzijde, golf-stromingsinteracties ter hoogte van de havenmond kunnen invloed hebben op de golfindringing in de haven maar worden hier niet beschouwd.

3.3.1 Diffractie en transmissie havendammen

Zoals vermeld in Sectie 3.1 zijn de havendammen opgenomen in de bathymetrie tot op gepeilde hoogte. Hoger is de helling afgetopt tot een plateau, eindigend in een verticale muur tot op de kruin. De kruinbreedte van de numerieke havendam varieert met de te modelleren waterstand en is bepaald als de afstand tussen de snijpunten van de deklaagelementen met het stilwaterpeil aan de binnen- en buitenzijde (optie III in Figuur 9).

Figuur 9 – Mogelijkheden om havendam met te steil talud te modelleren (uit Monteban, 2016)



Gruwez *et al.*, 2011 onderzocht de invloed van de schematisatie van de havendam door de golfindringingsresultaten bij een breedte volgens optie III en een snijpunt halverwege het stilwaterpeil en de teenconstructie van de havendam (gelijkaardig aan optie I in Figuur 9, maar de havendam werd ook geschematiseerd als verticale muur (en niet als een helling onder het snijpunt)) te vergelijken bij een +8m TAW storm met langkruinige golven. Een verschil in breedte van de havenmond van 35m resulteert hoofdzakelijk in de buitenhaven (ten noorden van NSYC) in een grotere golfindringing; met een breedte volgens optie III is de K_d -waarde ruwweg 0.05 hoger in de as van de vaargeul in de buitenhaven (zie Figuur 3-33 en 3-34 in Gruwez *et al.*, 2011). In de binnenhaven was er geen verschil in K_d -waarde.

In deze studie bedraagt het verschil in breedte van de havenmond tussen de verschillende modelscenario's maximum 4m (verschil tussen één- en duizendjarige waterstand). Er wordt echter een kortkruinig golfklimaat doorgerekend, wat resulteert in een grotere spreiding van de golfenergie achter de havendammen, zodat

verondersteld kan worden dat de golfindringing naar de binnenhaven toe niet overschat wordt (zie ook Hoofdstuk 5, de modelvalidatie).

Aftopping van de havendammen beïnvloedt de diffractie en refractie van de golven. De mate van diffractie is afhankelijk van de lokale golf lengte en de breedte van de havenmond. Hoe zwaarder de storm, hoe meer energie in de schaduwzones van de havendammen terecht komt.

De kruin van de koppen van de havendammen ligt op +8m TAW. Voor de zwaardere stormen treedt transmissie over de kruin bijgevolg op (vanaf +6.5m TAW in Hassan *et al.*, 2011). Hiervoor dienen de havendammen als poreuze structuur gemodelleerd te worden, wat hun geometrische vorm negatief beïnvloed aangezien $L_p/4$ breedte benodigd is. Daarom zijn ze toch als een ondoorlaatbare, onovertopbare structuur ingebouwd. Temeer omdat voor de binnenhaven verondersteld kan worden dat transmissie over de havendammen, grotendeels gericht naar het Klein Strand en ten noorden van de Halve Maan, ondergeschikt is aan golfindringing doorheen de havenmond. Gruwez *et al.*, 2011 verifieerde deze aanname door voor een hoge waterstand $h = +8m$ TAW een storm met langkruinige golven uit NW-richting te simuleren (met het model Mildwave), waarbij transmissie over de havendammen al dan niet mogelijk was. Transmissie over de havendammen leidde tot een Kd-waarde die maximum 0.05 hoger was in de as van de vaargeul in de buitenhaven (zie Figuur 3.-48 en 3-49 in Gruwez *et al.*, 2011). In de binnenhaven was er geen verschil in Kd-waarde.

3.3.2 Golfoploop

Golfoploop op de havendammen en op glooiingen (bijv. Halve Maan en Zeewezendok) is niet beschouwd in het numeriek model. Het inbrengen van een bewegende watergrens in Mike 21 BW resulteert vaak in numerieke instabiliteiten die allerhande numerieke oplossingen vergen (DHI, 2017b). In deze studieopdracht is het niet noodzakelijk golfoploop gedetailleerd te bepalen; er wordt bijgevolg een minimale waterdiepte ingesteld waar nodig, i.e. rond de havendammen, op het Klein Strand en rond de Halve Maan.

Daarnaast dient elke golf lengte 7-10 roosterzellen te beslaan zodat een minimale waterdiepte van 3 tot 4m benodigd is (zie verder, Sectie 3.4.1). Ter hoogte van de Halve Maan is deze diepte ingebouwd; aan de zeewaartse zijde van de havendammen is echter een veel grotere diepte nodig om numerieke stabiliteit te verkrijgen. Tabel 5 geeft een overzicht van de benodigde dieptes voor de verschillende stormen.

Op het Klein Strand bedraagt de minimale waterdiepte steeds 2m omdat de dissipatieve eigenschappen van het strand hier worden opgelegd (zie verder, Hoofdstuk 4).

De glooiingen in de binnenhaven worden ingebouwd als verticale muren. Hun reflectie-eigenschappen worden numeriek behandeld, zie Sectie 3.3.4.

Tabel 5 – Bodempeil aftopping bathymetrie zeewaartse zijde van havendammen

Storm	Aftopping bathymetrie
Validatiestormen en T = 1 jaar	$z \geq -1.5$ m TAW
T = 10 jaar	$z \geq -4$ m TAW (NNW: -5 m TAW)
T = 100 jaar	$z \geq -6$ m TAW
T = 1000 jaar	$z \geq -6$ m TAW

3.3.3 Golfbreking

Golfbreking wegens beperkte waterdiepte is belangrijk in de ondiepere gedeelten van de haven (bijv. onderwaterberm ter hoogte van Westerstaketsel, rond de Halve Maan en de ondiepere zone ten noorden hiervan) en wordt beschouwd in het numeriek model (met de standaard instellingen, zie 5.3.8 in DHI, 2017b).

3.3.4 Partiële reflectie in de haven (havendammen, kaaimuren en glooiingen)

De havendammen en structuren in de haven reflecteren en dissiperen golfenergie. Reflectie tegen een structuur kan in Mike 21 BW gemodelleerd worden met een ééncellige sponslaag, waarbij de absorptiecoëfficiënt de structureigenschappen reflecteert (Brosen & Helm-Petersen, 1998).

In Gruwez *et al.*, 2011 is voor verschillende waterstanden en structuren een absorptiecoëfficiënt $1/\mu$ gekalibreerd aan de overeenkomstige fysische modelresultaten van Hassan *et al.*, 2011 (zie Sectie 3.1.7 in Gruwez *et al.*, 2011). Niet enkel reflectie en dissipatie is zo in rekening gebracht, ook golfoverslag en -overloop over de structuren in de haven zit vervat in de desbetreffende absorptiecoëfficiënten μ . Bemerkt dat transmissie over de havendammen wel waargenomen werd in het fysisch model maar niet is doorvertaald in hun absorptiecoëfficiënt.

De Halve Maan is beschouwd als onovertopbaar in de huidige en toekomstige situatie. Bemerkt dat dit voor het talud (kruinpeil op $z = +10 - 11.4$ m TAW) een aanvaardbare aanname is, maar voor de combiwand met lage onderwaterberm mogelijks wat te conservatief (kruinpeil op $z = +7.7$ mTAW) (zie verder in Sectie 4.2 een gevoeligheidsanalyse van de reflectiecoëfficiënt combiwand).

De golf- en waterstandcondities in deze studie verschillen wat van deze in Gruwez *et al.*, 2011. Daarom is (beperkt) nagegaan wat de invloed van de verschillen is op de absorptiecoëfficiënten in een 1D numerieke golfgoot. Terzijde, een absorptiecoëfficiënt is ook tijdstap afhankelijk maar de tijdstappen in beide studies zijn gelijk.

- Opbouw 1D golfgoot

De numerieke golfgoot is opgebouwd zodat aan de ene zijde alle golfenergie geabsorbeerd wordt (breedte sponslaag = 2 golflengtes), aan de andere zijde bevindt zich de structuur met bijhorende absorptiecoëfficiënt $1/\mu$. De lengte van de goot bedraagt 4 golflengtes; de golfhoogtemeters voor reflectie analyse (volgens Mansard & Funke) bevinden zich op 1 golflengte van de reflecterende structuur.

De waterdieptes in het Montgomerydok en de vaargeul, de kleinste en grootste resp., zijn beschouwd voor een storm met $T = 1$ en 1000 jaar. De overeenkomstige golfcondities ter hoogte van de structuur zijn opgelegd als een JONSWAP spectrum met piekversterkingsfactor $\gamma = 3.3$ (getrunceerd spectrum (zie Sectie 3.4.3), golfrein van 1000 golven).

Tabel 6 geeft de testmatrix weer, alsook de resultaten van de partiële reflectie. Deze reflectiecoëfficiënten zijn bepaald op basis van een reflectie analyse op de numerieke verheffingstijdreeksen.

Tabel 6 – Testmatrix en resultaten partiële reflectie (op basis van reflectie analyse) in 1D numerieke golfgoot

Golf- en waterstandcondities	Reflectiecoëfficiënt $C_r = 1$ ($1/\mu=1$)	$C_r = 0.925$ ($1/\mu=1.00756$)
$H_{m0} = 1.9\text{m}$, $T_p = 7.04\text{s}$ $d = 7.06\text{m}$	0.962	0.915
$H_{m0} = 1.9\text{m}$, $T_p = 7.04\text{s}$ $d = 14.36\text{m}$	0.992	0.944
$H_{m0} = 1.9\text{m}$, $T_p = 11.29\text{s}$ $d = 7.06\text{m}$	0.975	0.938
$H_{m0} = 1.9\text{m}$, $T_p = 11.29\text{s}$ $d = 15.78\text{m}$	0.998	0.964
$H_{m0} = 3.1\text{m}$, $T_p = 11.29\text{s}$ $d = 15.78\text{m}$	0.993	0.960

- Verschil in waterstand

Voor eenzelfde absorptiecoëfficiënt resulteert een kleinere waterdiepte in iets minder reflectie. Dezelfde absorptiecoëfficiënt werd in Gruwez *et al.*, 2011 reeds gebruikt voor hetzelfde type kaaimuur in verschillende waterdieptes.

- Verschil in golfperiode

Een absorptiecoëfficiënt is frequentie afhankelijk; lange golven worden meer gereflecteerd dan korte golven. Voor eenzelfde absorptiecoëfficiënt resulteert een lagere piekgolfperiode in iets minder reflectie. De golfhoogte beïnvloedt de reflectie niet.

- Conclusie

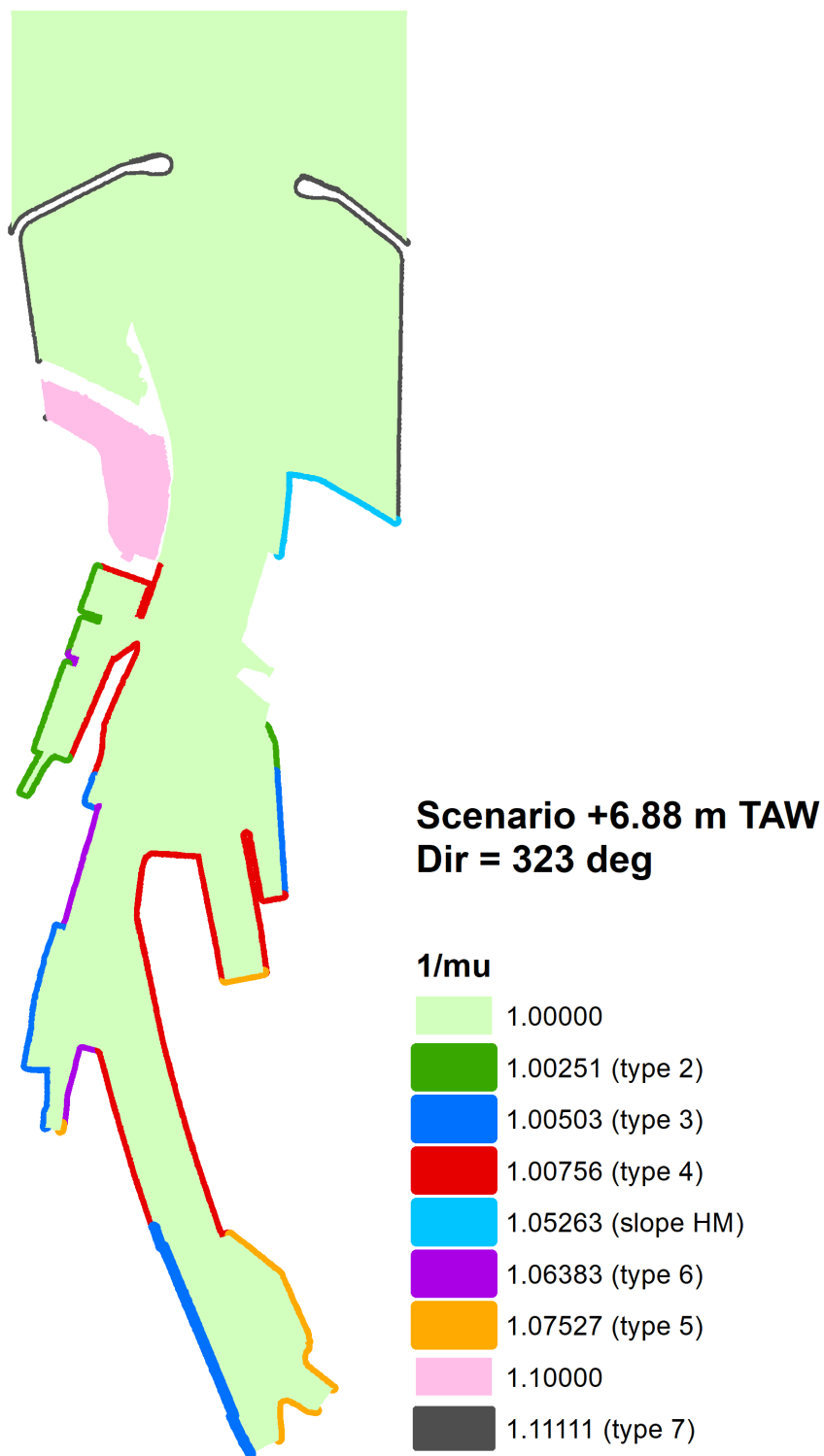
Het verschil in reflectiekenmerken van eenzelfde absorptiecoëfficiënt wanneer waterdiepte en (piek)golfperiode gevarieerd worden, is verwaarloosbaar.

Voor de validatiestormen en maatgevende stormen met $T = 1$ en 10 jaar worden bijgevolg de gekalibreerde absorptiecoëfficiënten van +6m TAW gebruikt, voor maatgevende stormen met $T = 100$ jaar deze van +6.5m TAW en voor maatgevende stormen met $T = 1000$ jaar deze van +7m TAW. Tabel 7 geeft een overzicht van de gebruikte absorptie- en overeenkomstige reflectiecoëfficiënten; Figuur 10 toont de locaties van deze type structuren in de haven.

Tabel 7 – Reflectie- en absorptiecoëfficiënten, C_r en $1/\mu$ voor modellering partiële reflectie van structuren (uit Gruwez *et al.*, 2011)

Type structuur	Waterstand [m TAW]		
	+6	+6.5	+7
Onovertopbare kaaimuur	$C_r = 1$ $1/\mu = 1$	$C_r = 1$ $1/\mu = 1$	$C_r = 1$ $1/\mu = 1$
Kaaimuur op +6.9m TAW Stormmuur op korte afstand (< 15m) tot rand	$C_r = 1$ $1/\mu = 1$	$C_r = 0.98$ $1/\mu = 1.001$	$C_r = 0.97$ $1/\mu = 1.00251$
Kaaimuur op +6.9m TAW Stormmuur op enige afstand (> 15m) tot rand	$C_r = 1$ $1/\mu = 1$	$C_r = 0.975$ $1/\mu = 1.0015$	$C_r = 0.95$ $1/\mu = 1.00503$
Kaaimuur op +6.9m TAW Geen stormmuur	$C_r = 1$ $1/\mu = 1$	$C_r = 0.97$ $1/\mu = 1.00251$	$C_r = 0.925$ $1/\mu = 1.00756$
Glooiing met helling 1/2 op +6.9m TAW Geen stormmuur	$C_r = 0.61$ $1/\mu = 1.05263$	$C_r = 0.58$ $1/\mu = 1.06383$	$C_r = 0.54$ $1/\mu = 1.07527$
Kaavlak ondersteund door open palenrij op +6.9m TAW Stormmuur op enige afstand (> 15m) tot rand	$C_r = 0.61$ $1/\mu = 1.05263$	$C_r = 0.615$ $1/\mu = 1.05263$	$C_r = 0.58$ $1/\mu = 1.06383$
Stortsteen havendam met helling 1/1.5	$C_r = 0.44$ $1/\mu = 1.11111$	$C_r = 0.44$ $1/\mu = 1.11111$	$C_r = 0.44$ $1/\mu = 1.11111$

Figuur 10 – Grondplan haven: Overzicht indeling kaaimuren en glooiingen volgens gedefinieerde type structuren



3.4 Modelopzet

3.4.1 Rekenrooster

De maximale waterdiepte d en hydraulische randvoorwaarden bepalen de opzet van het rekenrooster. Een uniform rekenrooster met een resolutie in de X- en Y- richting van $\Delta x = \Delta y = 1\text{m}$ is gekozen op basis van volgende criteria (uit DHI, 2017b):

- De minimale te simuleren golfperiode $L_{0,min}$ wordt bepaald door de diepwaterlimiet $h/L_0 < 0.5$ (cf. Hoofdstuk 2), bijv.:
 - Maatgevende storm met $T = 1$ jaar: $d/0.5 = 14.36/0.5 = L_{0,min} = 28.72\text{m} \rightarrow T_{min} = 4.3\text{s}$
 - Maatgevende storm met $T = 1000$ jaar: $d/0.5 = 15.78/0.5 = L_{0,min} = 31.56\text{m} \rightarrow T_{min} = 4.5\text{s}$
- De minimale golflengte L_{min} dient 7 tot 10 roostercellen te beslaan:
 - Maatgevende storm met $T = 1$ jaar en minimale waterdiepte $d = 3\text{m}$:
 L_{min} (obv T_{min}) in $d = 3\text{m}$: $L_{min} = 20.72\text{m} \rightarrow L_{min}/7 = 2.96\text{m}$ en $L_{min}/10 = 2.07\text{m}$
 - Maatgevende storm met $T = 1000$ jaar en minimale waterdiepte $d = 4\text{m}$:
 L_{min} (obv T_{min}) in $d = 4\text{m}$: $L_{min} = 24.44\text{m} \rightarrow L_{min}/7 = 3.49\text{m}$ en $L_{min}/10 = 2.44\text{m}$
- De meest energetische golven (piekgolfperiode T_p) dienen 20 tot 40 roostercellen te beslaan in de brekingszone:
 - Maatgevende storm met $T = 1$ jaar en minimale waterdiepte $d = 3\text{m}$:
 $T_p = 7.04\text{s}$: $L_p = 36.64\text{m} \rightarrow L_p/30 = 1.22\text{m}$
 - Maatgevende storm met $T = 1000$ jaar en minimale waterdiepte $d = 4\text{m}$:
 $T_p = 10.78\text{s}$: $L_p = 65.97\text{m} \rightarrow L_p/30 = 2.19\text{m}$

Een resolutie van 1-2m wordt ook door DHI vooropgesteld indien golfbreking relevant is (DHI, 2017b). Terzijde, de resolutie van het rekenrooster en de bathymetrie zijn gelijk.

3.4.2 Tijdstap en simulatieduur

De tijdstap $\Delta t = 0.05\text{s}$ is bepaald door de minimale te simuleren golfperiode en de te modelleren golfbreking (uit DHI, 2017b):

- De minimale golfperiode T_{min} dient ten minste 35 tijdstappen te beslaan:
 - Maatgevende storm met $T = 1$ jaar: $T_{min} = 4.3\text{s} \rightarrow T_{min}/35 = 0.12\text{s} \geq \Delta t$
 - Maatgevende storm met $T = 1000$ jaar: $T_{min} = 4.5\text{s} \rightarrow T_{min}/35 = 0.13\text{s} \geq \Delta t$
- Indien golfbreking wordt beschouwd, is een tijdstap $\Delta t = 0.05$ tot 0.1s aan te bevelen (DHI, 2017b)
- De gekozen tijdstap Δt en roosterresolutie Δx dienen bovendien aan het Courant criterium te voldoen, i.e. $C_r < 1$ (voor 2DH simulaties):

$$C_r = c \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$$

$$\Leftrightarrow \Delta t < \frac{\Delta x}{c}$$

Dit is in orde voor alle simulaties.

Modelvalidatie is uitgevoerd door het opleggen van een golftrain van een 200-tal golven (excl. inspeeltijd golven) aan de zeewaartse rand van het model. Dit resulteert in een 300-tal golven in de binnenhaven.

- Simulatieduur (voorbeeld storm 14/01/2017):
 - 200 golven x $9.1\text{s} = 1820\text{s} = 30.3\text{min}$
 - voortplantingssnelheid kortste golf ($L_{0,min} = 31.45\text{m}$ en $T_{min} = 4.5\text{s}$): $c = L_{0,min}/T_{min} = 6.98\text{ m/s}$ over een maximale afstand van ong. $2900\text{m} \rightarrow 415\text{s} \approx 7\text{ min}$ nodig
 - totale simulatieduur: $\sim 40\text{ min} = 48000$ tijdstappen (gebruikt voor alle validatiestormen)

De maatgevende stormen zijn gesimuleerd door het opleggen van een golftrein van een 300-tal golven (excl. inspeeltijd golven) aan de zeewaartse rand van het model. Dit resulteert in een 380-400-tal golven in de binnenhaven.

- Simulatieduur (voorbeeld NNW-storm met $T = 100$ jaar):
 - 300 golven $\times 10.44s = 3132s = 52.2min$
 - voortplantingssnelheid kortste golf ($L_{0,min} = 32.9m$ en $T_{min} = 4.6s$): $c = L_{0,min}/T_{min} = 7.15 m/s$ over een maximale afstand van ong. 2900m $\rightarrow 406s = 6.75min$ nodig
 - totale simulatieduur: 60 min = 72000 tijdstappen (gebruikt voor alle stormen met $T = 100$ jaar)

Tabel 8 geeft een overzicht van de simulatieduur voor de verschillende maatgevende stormen.

Tabel 8 Simulatieduur van de verschillende maatgevende stormen

Storm	T = 1 jaar	T = 10 jaar	T = 100 jaar	T = 1000 jaar
Simulatieduur	42.5min	55min	60min	61.5min
# tijdstappen	51000	66000	72000	73800

Goda suggereert minimum 500 tot optimaal 1000 golven om de statistische golfparameters te bepalen (Goda, 2010) . Echter, een golftrein van minstens een 300-tal golven kan beschouwd worden als een aanvaardbaar compromis tussen het statistisch optimum en een redelijke (numeriek stabiele) simulatieduur.

3.4.3 Golfgeneratie en -absorptie

De golftrandvoorwaarden worden buitengaats opgelegd op een afstand van minstens 2 golflengtes ($L_{0,max} = 128m$) tot de havendammen, als een JONSWAP spectrum met piekversterkingsfactor $\gamma = 3.3$. De spreiding van de golfenergie rond de hoofdgolfrichting bedraagt (eenzijdig) 16° (of 23° voor de validatiestormen), opgelegd volgens een (frequentieonafhankelijke) \cos^n functie, met n :

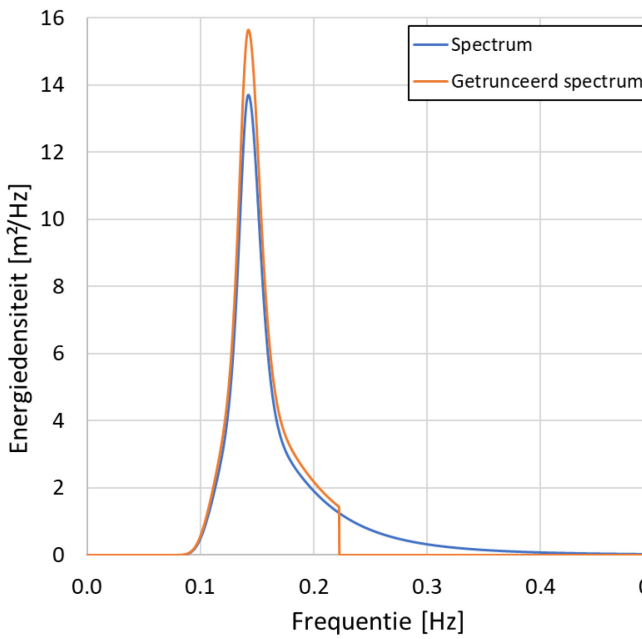
$$16^\circ \frac{\pi}{180^\circ} = \sqrt{\frac{2}{s+1}} \text{ en } s = 2n + 1 \rightarrow n = 12 \text{ (of 5)}$$

Figuur 12 en Figuur 14 illustreren de gerealiseerde directionele energiespreiding naar opgelegde \cos^{12} functie.

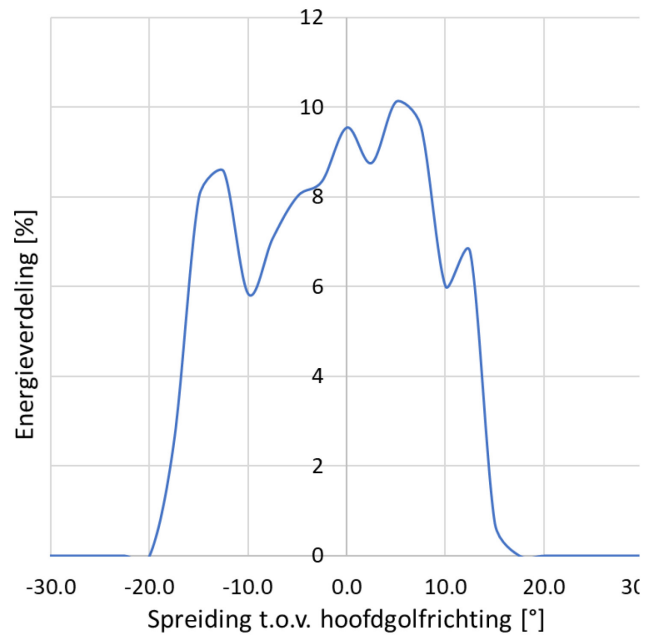
De maximale waterdiepte h bepaalt de minimale te simuleren golfperiode T_{min} . Het gewenste JONSWAP spectrum (blauwe lijn in Figuur 11 en Figuur 13) wordt bijgevolg afgeknipt op deze periode (bijv. $4.5s = 0.22 Hz$). Afhankelijk van de piekgolfperiode T_p gaat zo een klein tot substantieel deel van het energiespectrum verloren. Dat wordt in deze studie gecompenseerd door een getrunceerd spectrum op te leggen, waarbij de verloren energie toegevoegd wordt rond de piek van het spectrum (rode lijn in Figuur 11 en Figuur 13).

Deze buitengaatse golftrandvoorwaarden worden opgelegd als een tijdreeks van debieten op de interne golfgeneratielijn. Voortplanting van de kortkruinige golven gebeurt langs beide zijden (parallel, Y-richting) van deze lijn, zodat zeewaarts van de lijn sponslagen geplaatst worden ter absorptie van zeewaarts gerichte golfenergie. De breedte van de sponslagen dient 1 tot 2 golflengtes van de meest energetische golven te beslaan; in deze studie: breedte = 150 roosterzellen in Y-richting. Aan de laterale zijden van het buitengaatse modeldomein wordt een ééncellige sponslaag met absorptiecoëfficiënt $\mu = 1.6$ geplaatst, zodat quasi alle golfenergie in die richtingen geabsorbeerd wordt ($\mu = 1.6$: reflectie < 10%) (Gruwez *et al.*, 2012).

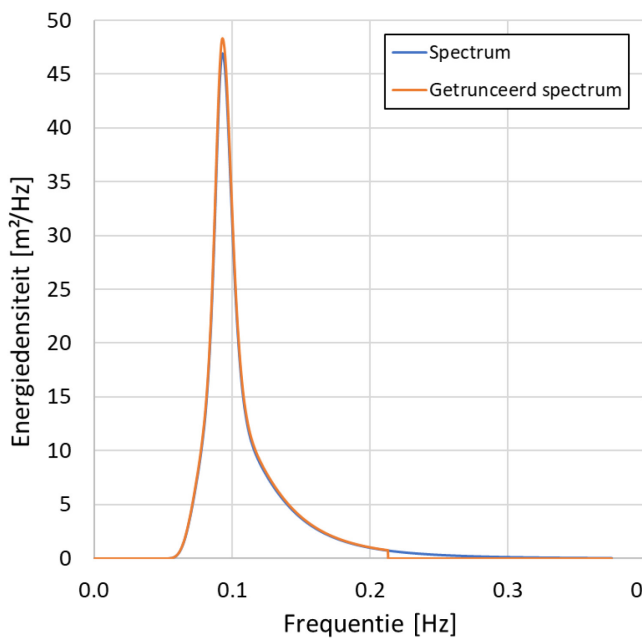
Figuur 11 – Energiespectrum voor NW: $H_{m0} = 3.17\text{m} - T_p = 7.04\text{s}$



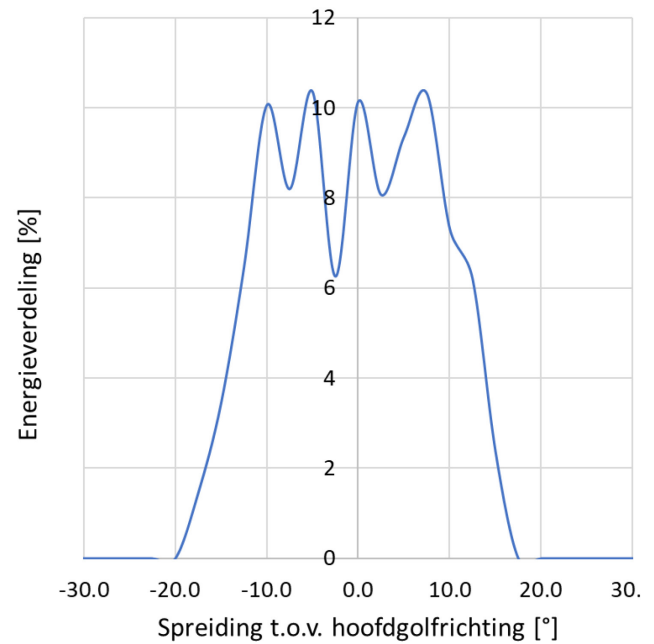
Figuur 12 – Directionele energieverdeling t.o.v. hoofdgolfrichting



Figuur 13 – Energiespectrum voor NW: $H_{m0} = 4.74\text{m} - T_p = 10.74\text{s}$



Figuur 14 – Directionele energieverdeling t.o.v. hoofdgolfrichting



3.5 Numerieke stabiliteit

Rekening houdende met de belangrijkste fysische processen is de modelopzet bepaald. Dit betekent echter nog niet dat een stabiele simulatie bekomen wordt. Een hoge energieconcentratie lokaal kan resulteren in een modelcrash, die zich uit als een negatieve waterdiepte op die locatie.

Mike 21 BW is gevoelig aan numerieke instabiliteiten, waarvoor een oplossing is gezocht gebruik makend van onderstaande mogelijkheden.

3.5.1 Numerieke parameters

Als numeriek schema voor het oplossen van de advectietermen in de Boussinesq vergelijkingen (cf. Hoofdstuk 2) is geopteerd voor *central differencing with simple upwinding at steep gradients and near land* schema. Deze manier om de ruimtelijke discretisatie uit te voeren (*central differencing*) resulteert in de minste numerieke dissipatie (DHI, 2017b).

De tijdsdiscretisatie gebeurt impliciet volgens een tijdsgecentreerd schema. Hierbij is de tijdextrapolatiefactor standaard 1 (geen numerieke dissipatie), maar indien golfbreking en -oploop dienen gemodelleerd te worden, is een verlaging tot 0.8 aan te raden (DHI, 2017b). Deze kleine verlaging impliceert wat numerieke dissipatie maar Gruwez *et al.*, 2011 heeft aangetoond dat deze aanvaardbaar is (voor deze afmetingen als modeldomein).

3.5.2 Bodemwrijving

Bodemwrijving is geen belangrijk dissipatief proces voor korte golven. Ter hoogte van de combiwand aan de Halve Maan bevindt zich wel een onderwaterberm. Aangezien deze minimum 8m diep ligt in de beschouwde maatgevende stormen, is de ruwheid van de zinkstenen op het zinkstuk niet in rekening gebracht.

Het toepassen van een artificieel hoge bodemwrijving, Chézy = 11, in de ondiepere gedeelten van de haven heeft echter het voordeel dat de numerieke stabiliteit verhoogd wordt zonder al te veel extra dissipatie.

Tabel 9 vat samen waar deze hoge coëfficiënt werd toegepast, en dit geldt voor beide havengeometrieën.

Tabel 9 – Toepassing hogere bodemwrijving (Chézy = 11)

Storm	Bathymetrie
Validatiestormen Storm met T = 1 jaar	Bodempeil $z > -1$ mTAW zeewaartse zijde havendammen, Elders $z > +1$ mTAW
Storm met T = 10 jaar	Idem als T = 1 jaar
Storm met T = 1 00 jaar	$z > +2$ mTAW
Storm met T = 1000 jaar	$z > +2.5$ mTAW

3.5.3 Sponslagen

Sponslagen zijn niet enkel gebruikt om de partiële reflectie van structuren te modelleren of de dissipatieve karakteristieken van het Klein Strand na te bootsen (zie verder, Hoofdstuk 4) maar ook om, indien nodig, extra numerieke stabiliteit te creëren op de onderwaterberm (onder het Westerstaketsel, helling naar de vaargeul toe).

Aangezien deze methode zorgt voor meer numerieke dissipatie is deze enkel op deze locaties gebruikt (zie Tabel 10 voor een overzicht).

Tabel 10 – Simulaties met extra sponslagen voor numerieke stabiliteit op de onderwaterberm (huidige / toekomstige havengeometrie)

Storm	NW	323°	330°	NNW
T = 1 jaar	- / -	- / -	- / -	X (z ≥ +3m TAW) / X (z ≥ +3m TAW)
T = 10 jaar	N.v.t / X (z ≥ +1m TAW)	X (z ≥ +2m TAW) / X (z ≥ +2m TAW)	X (z ≥ +1m TAW) / X (z ≥ +1m TAW)	N.v.t / X (z ≥ +1m TAW)
T = 100 jaar	N.v.t / X (z ≥ +1m TAW)	N.v.t / X (z ≥ +1m TAW)	N.v.t / X (z ≥ +1m TAW)	N.v.t / X (z ≥ +1m TAW)
T = 1000 jaar	N.v.t / X (z ≥ +2m TAW)	X (z ≥ +2m TAW) / X (z ≥ +2m TAW)	X (z ≥ +2m TAW) / X (z ≥ +2m TAW)	N.v.t / X (z ≥ +1.7m TAW)

4 Gevoeligheidsanalyse

4.1 Situatie Klein Strand

Het Klein Strand, i.e. het strand ter hoogte van het Zeeheldenplein dat binnen de havendammen ligt, absorbeert golfenergie. Zijn hoogste bodempeil bedraagt +7 m TAW; echter, golfoploop wordt niet beschouwd in deze studie zodat het droge strand afgetopt wordt tot een waterdiepte van 2m.

De absorptie dient evenwel in rekening gebracht te worden. Aangezien het Klein Strand zelf niet tot het interessegebied behoort, kan dit nagebootst worden door sponslagen te gebruiken.

Aan de hand van validatiestorm 04/11/2013, welke als golfrichting NNW heeft die meest gericht is naar dit gebied, wordt het belang van het aantal sponslagen aangetoond. Er zijn 3 simulaties uitgevoerd, waarbij er (a) geen sponslagen, (b) sponslagen op het afgetopte gebied en (c) sponslagen op een gedeelte van het afgetopte gebied geplaatst zijn.

Tabel 11 vat de resultaten samen (meetlocaties, zie Figuur 21). Niet enkel de globale absorptie-karakteristieken van het strand wijzigen, maar ook de reflectie op de onderwaterberm en dus golfindringing richting voorhaven.

Een sponslaag met absorptiecoëfficiënt $1/\mu=1.1$ op het afgetopte gebied resulteert in de beste overeenkomst met de in situ data globaal over alle meetlocaties (modelvalidatie, zie verder in Sectie 5.3). Het strand heeft zo een reflectiecoëfficiënt van ca.45% (op basis van directionele golfanalyse).

Tabel 11 – Validatiestorm 04/11/2013: resultaten golfhoogtemeters van verschillende M21 lay-outs tegenover in situ data

Golfhoogtemeter	Significante golfhoogte H_{m0} [m]			
	M21: geen spons	M21: spons op aftopping	M21: spons op gedeelte aftopping	In situ data
OST A	0.57	0.40	0.49	0.44
OST B	0.43	0.43	0.39	0.44
OST C	0.26	0.27	0.24	0.19
OST E	0.07	0.06	0.06	0.08

4.2 Reflectie combiwand Halve Maan

Zowel het nieuwe talud als de combiwand van de Halve Maan zijn als onovertopbaar beschouwd, en hebben een dienovereenkomstige reflectiecoëfficiënt C_r van 0.61 en 1 resp. (zie Tabel 7). Het kruinpeil van de combiwand ligt echter op +7.7 m TAW (cf. Figuur 7), wat betekent dat in zware stormcondities golfoverslag mogelijk is wel optreedt. Voor een duizendjarige storm is de vrijboord aan de combiwand 0.8m.

Om de invloed van golfoverslag over dit kaavlak op het golfklimaat na te gaan, zijn bijkomend enkele simulaties uitgevoerd met lagere reflectiecoëfficiënten voor deze storm (uit golfrichting 323°). Deze zijn

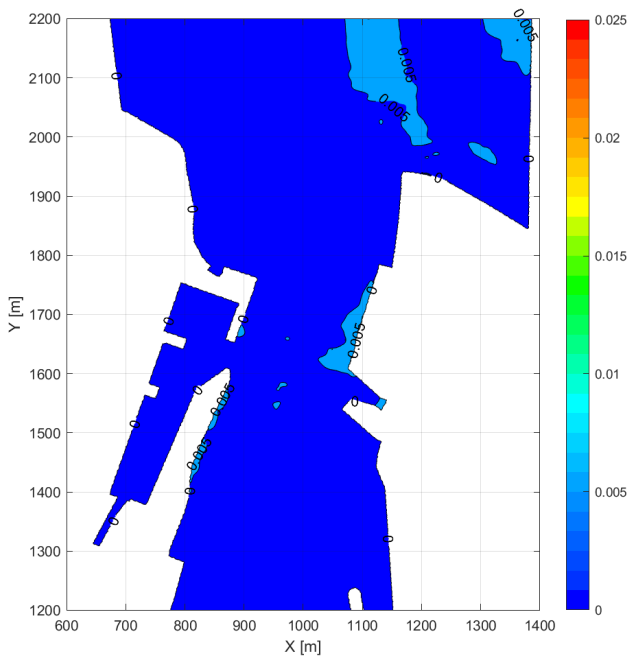
bepaald analoog aan de reflectiecoëfficiënten van een type structuur ‘Kaaimuur op +6.9m TAW - Geen stormmuur’ (cf. Tabel 7), waarbij een daling in vrijboord tot een overeenkomstige lagere reflectie leidt.

Een vrijboord van 0.8m is nog steeds relatief hoog; Figuur 15 illustreert dat de Kd-waarde slechts zeer beperkt en lokaal afneemt t.o.v. de oorspronkelijke aanname, i.e. een onovertopbare combiwand. Een verdere reductie van de vrijboord naar 0m leidt tot een daling van de Kd-waarde van bijna 0.1 aan de structuur zelf en van ruwweg 0.05 langs de tegenovergelegen Churchillkaai (Figuur 16).

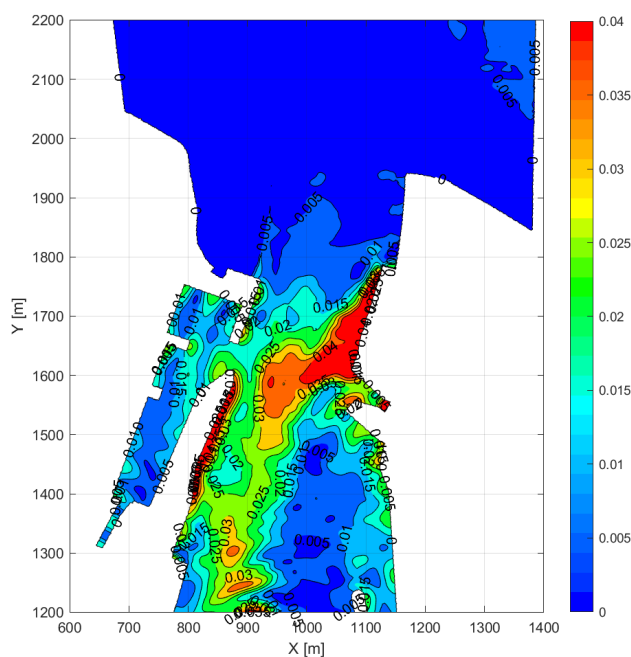
Tabel 12 – Reflectiecoëfficiënt combiwand: gevoeligheidsanalyse bij een duizendjarige storm uit richting 323°

	Reflectiecoëfficiënt C_r	Absorptiecoëfficiënt $1/\mu$
Onovertopbaar	1	1
Vrijboord = 0.8m	0.994	1.00050
Vrijboord = 0.6m	0.982	1.00151
Vrijboord = 0.3m	0.961	1.00352
Vrijboord = 0m	0.934	1.00655

Figuur 15 – Afname in Kd-waarde bij daling reflectie combiwand: onovertopbaar -> vrijboord = 0.8m



Figuur 16 – Afname in Kd-waarde bij daling reflectie combiwand: onovertopbaar -> vrijboord = 0m



5 Modelvalidatie

5.1 NW-storm 14/01/2017 2:00

Druksensoren werden tijdens laagwater 's ochtends op 13/01 op 3 locaties in de haven geplaatst (zie ook figuren in 2.1 van Vanneste *et al.*, 2017):

- Montgomerydok: aan de ladder aan de kop van de Vistrap
- Visserijsluis: aan de ladder aan de zuidelijke toegangsmuur tot de Visserijsluis
- Demeysluis: aan de ladder ter hoogte van de noordelijke zijde van het kaaiplateau ten oosten van de Demeysluis

Tabel 13 toont de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde significante golfhoogtes H_{m0} ; Figuur 17, Figuur 18 en Figuur 19 illustreren de gemeten en gemodelleerde golfspectra op de verschillende locaties (bemerkt dat de Y-as verschilt in schaal). De getabelleerde waarden komen relatief goed overeen en de overeenkomst qua vorm van de golfspectra is aanvaardbaar. De piekenergie ter hoogte van de Visserijsluis is echter overschat en ter hoogte van de Demeysluis gesitueerd rond een te lage frequentie ($T_{p,gemeten} = 5s$). Logischerwijze bevindt de piekenergie zich rond de opgelegde piekgolfperiode buitengaats, wat aangeeft dat een andere energiebron belangrijker is aan de Demeysluis.

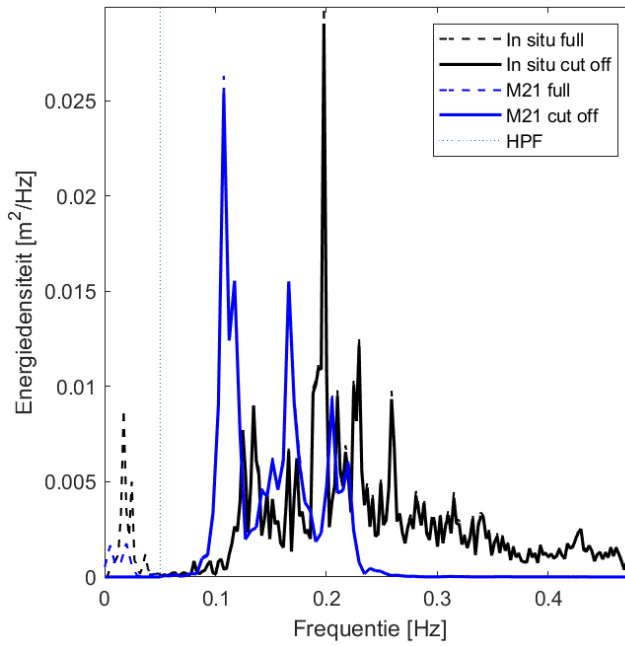
Daarnaast verschilt de verhouding tussen lange ($T > 20s$) en korte golfenergie. Tijdens de storm (1.5u rond HW) is er een lange golfcomponent opgemeten die respectievelijk 6%, 7.5% en 10% van de totale energie bedraagt ter hoogte van de Demeysluis, in het Montgomerydok en aan de Visserijsluis. Deze lange golfcomponent is deels het gevolg van een energietransfer naar subharmonische componenten (ten gevolge van niet-lineaire golfinteracties) en deels het gevolg van seiches geïnduceerd door regionale weersverschijnselen (bijv. drukverschillen, variabele winden). Mike 21 is in staat om niet-lineaire golf-golf interacties te modelleren; echter, aangezien het rekendomein beperkt is buitengaats en nagenoeg niet resulteert in diepte-geïnduceerde golfbreking is enkel een klein aandeel van de lange golfcomponent te zien in de simulatie. Het aandeel van vrije lange golven die resulteren in resonantie in (een) havenbekken(s) kan bovendien niet gemodelleerd worden.

Het numeriek model is daarom ook vergeleken met de in situ meetdata na gebruik van een high pass filter $HPF > 0.05$ Hz, m.a.w. enkel analyse van korte golven. Deze ondergrens wordt de facto gebruikt in de maand- en stormrapporten van de meerjarige meetcampagne en zal verder in deze studie ook gebruikt worden.

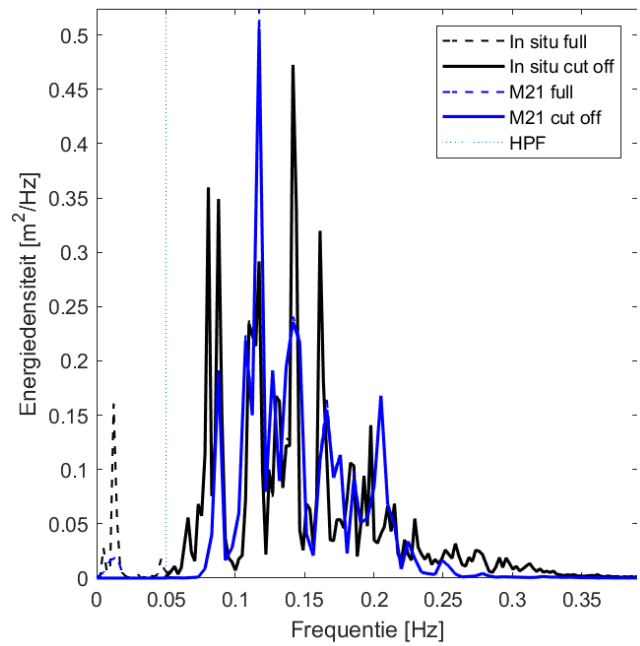
De energie van kortere golven ($T < 4s$) ontbreekt ook, wat vnl. relevant is ter hoogte van de Demey- en Visserijsluis. Daarom werd bijkomend een SWAN simulatie uitgevoerd om na te gaan wat het aandeel van lokale golfgroei door wind kan zijn. Figuur 20 illustreert bijv. het golfspectrum resulterend uit SWAN ter hoogte van de Visserijsluis wanneer de gemiddelde NW-wind van 4u voorafgaand aan hoogwater (15.1×0.9 (landeffect) = 13.6 m/s) tot convergentie gesimuleerd wordt met gesloten havenmond. Het energetisch aandeel is te klein en de piekgolfperiode te laag (rond 1.8s).

Echter, het gewenste spectrum is ook afgeknipt op de minimale te modelleren golfperiode (hier: $4.5s = 0.22$ Hz, cf. Sectie 1). De totale energie-inhoud is gecompenseerd (cf. voorbeeld in Figuur 11) maar de energie afkomstig uit hogere frequenties is zowiezo niet inbegrepen. Dit is zichtbaar in de spectrale figuren maar of deze truncatie volledig het ontbreken van deze energie verklaart dan wel er nog andere invloeden spelen, is niet duidelijk.

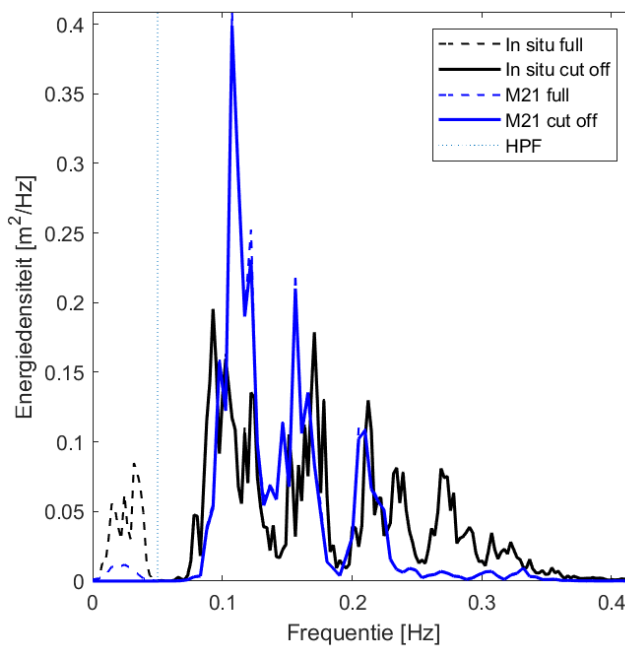
Figuur 17 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: Demeysluis



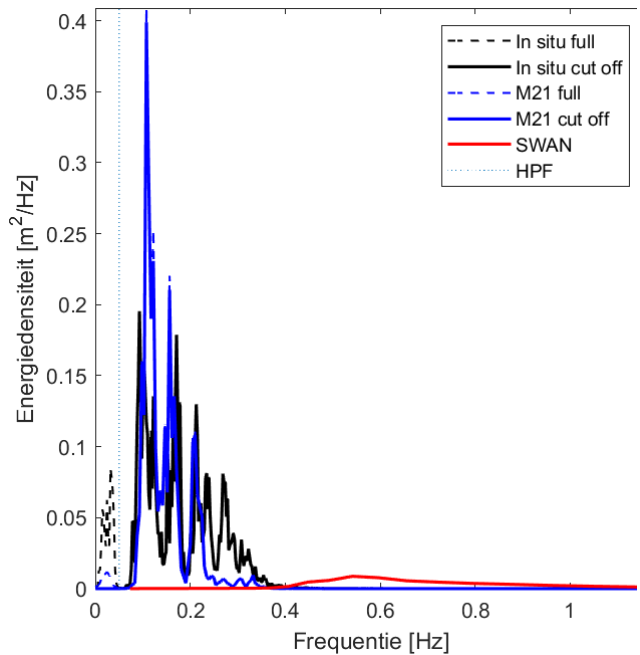
Figuur 18 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: Montgomery



Figuur 19 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: Visserijsluis



Figuur 20 – Gemodelleerd golfspectrum: M21 & SWAN: Visserijsluis



Tabel 13 – Validatiestorm 14/01/2017: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data (waarden zonder high pass filter HPF > 0.05Hz)

Golfhoogtemeter	Significante golfhoogte H_{m0} [m]	
	M21	In situ data
Montgomerydok	0.52 (0.53)	0.53 (0.55)
Visserijsluis	0.49 (0.51)	0.49 (0.52)
Demeysluis	0.12 (0.12)	0.14 (0.15)

5.2 330°-storm 10/10/2013 15:25

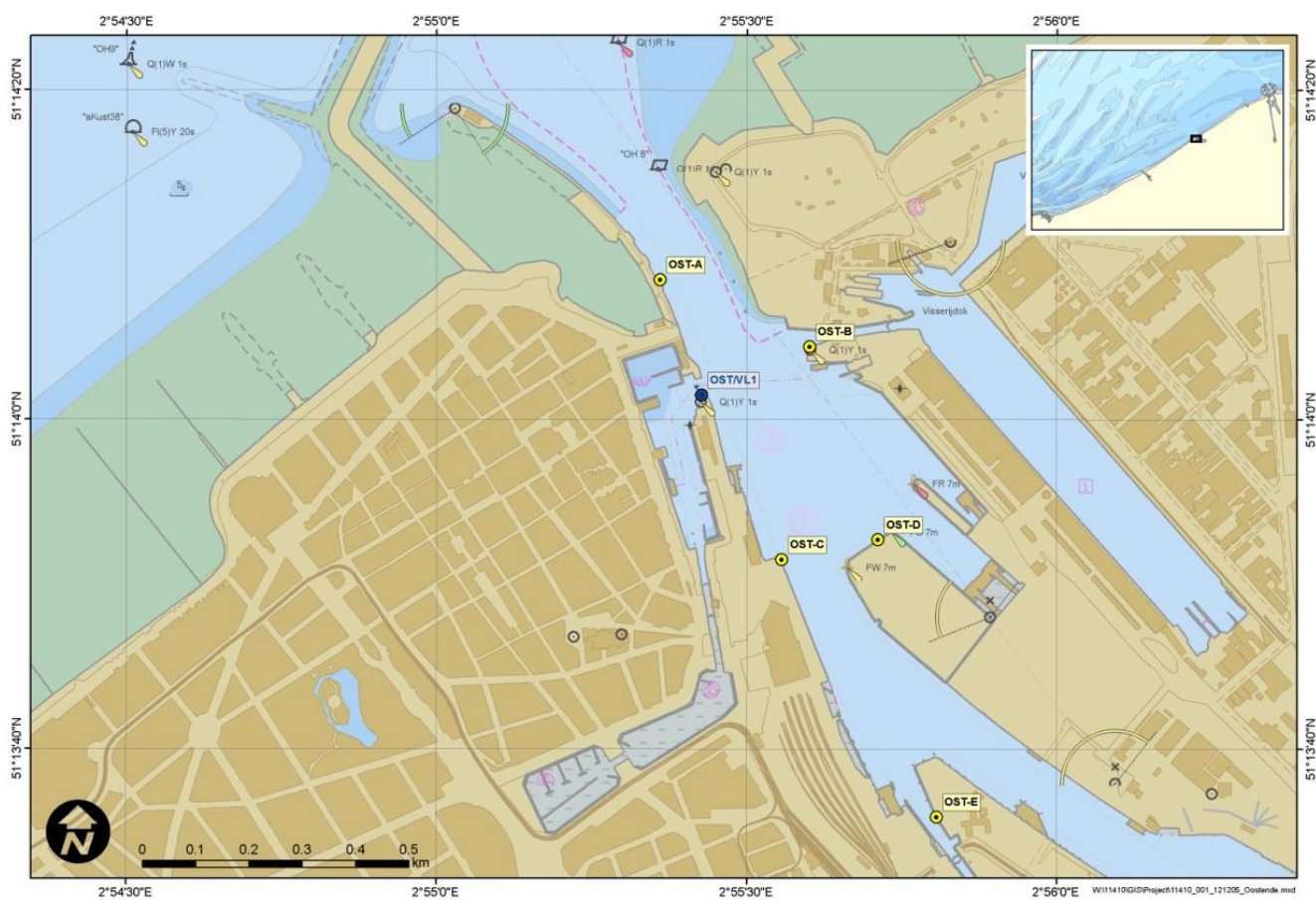
Gedurende de meerjarige meetcampagne werden druksensoren op 5 locaties in de haven geplaatst (zie Figuur 21):

- OST A: Westerstaketsel: ongeveer tegenover het midden van het (huidige) westelijke talud van de Halve Maan
- OST B: Visserijsluis: aan het begin van de zuidelijke toegangsmuur tot de Visserijsluis
- OST C: ter hoogte van de Churchillkaai: aan het begin van het kaaiplateau op palen
- OST D: ter hoogte van het Zeewezendok: aan de kop van het kaavlak ten westen van het dok
- OST E: Demeysluis: aan de oostelijke toegangsmuur tot de Demeysluis

Tabel 14 toont de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde significante ('korte') golfhoogtes H_{m0} (HPF > 0.05 Hz) (in situ data uit IMDC, 2014). De getabelleerde waarden komen relatief goed overeen uitgezonderd OST C waar de golfhoogte 17% overschat wordt. De locatie dichtbij een diffractie punt met kaaimuren errond die verschillende reflectiecoëfficiënten hebben, maakt validatie niet eenvoudig. Mogelijks wordt golfenergie ook teveel gereflecteerd tegen de omgeving rond de aanlegsteiger van de veerboot aan de Visserijsluis, die vereenvoudigd ingebouwd is als kaaimuur.

De gemeten data (en dus golfspectra) zijn niet beschikbaar; de korte en lange significante golfhoogtes werden afgelezen uit het stormrapport. Daaruit blijkt dat de lange golfcomponent ook een significante golfhoogte H_{m0} heeft van ruwweg 0.1-0.15m (alle locaties) (Figuur 22). Dit betekent dat, ter hoogte van de Demeysluis, deze bijdrage even groot is als deze uit korte golfenergie.

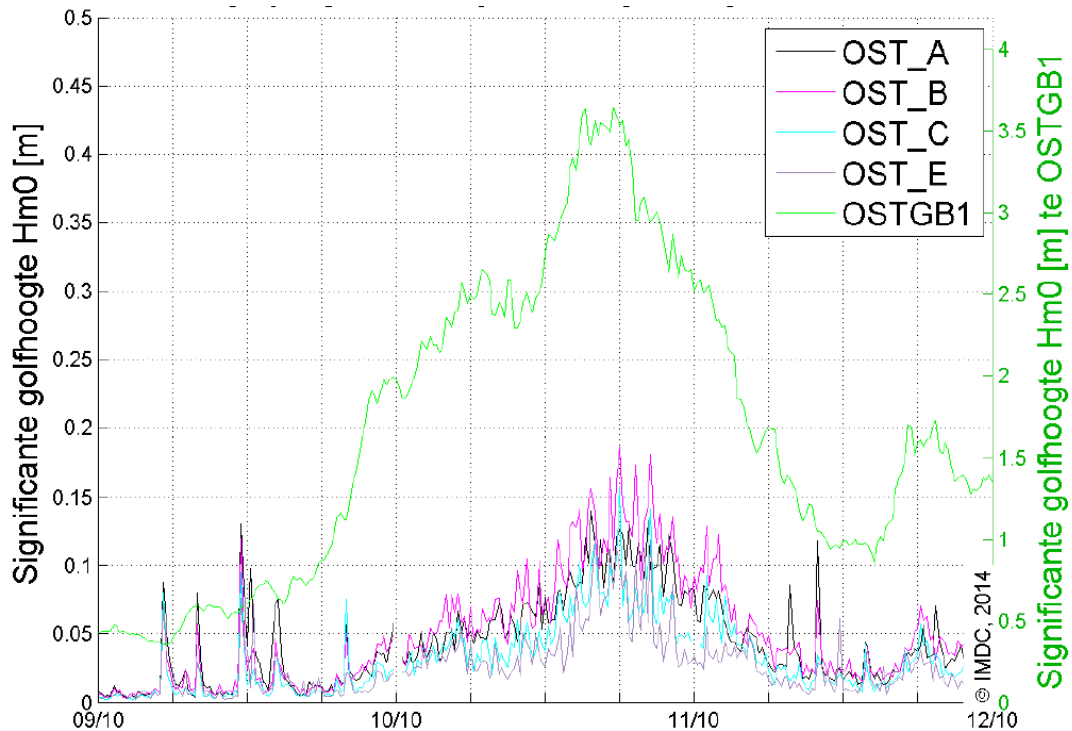
Figuur 21 – Overzicht meetlocaties - meerjarige meetcampagne (2011-2015) (IMDC, 2014b)



Tabel 14 – Validatiestorm 10/10/2013: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data (met HPF > 0.05Hz)

Golfhoogtemeter	Significante golfhoogte H_{m0} [m]	
	M21	In situ data
OST A	0.59	0.58
OST B	0.5	0.52
OST C	0.34	0.29
OST E	0.07	0.1

Figuur 22 – Significante golfhoogte H_{m0} van de lange golfcomponent in vergelijking met de buitengaatse golfhoogte (LPF < 0.05 Hz)(IMDC, 2014b)



5.3 NNW-storm 4/11/2013 12:25

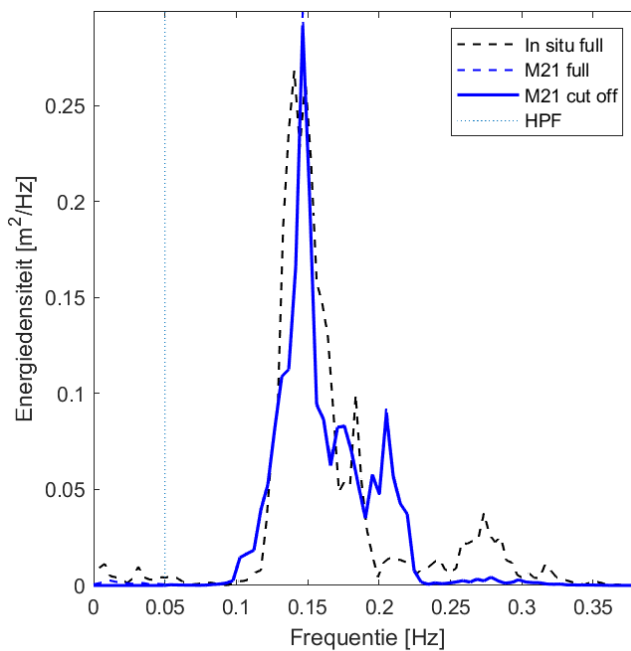
Tabel 15 toont de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde significante ('korte') golfhoogtes H_{m0} (HPF > 0.05 Hz) (in situ data uit IMDC, 2014a); Figuur 23 t.e.m. Figuur 26 illustreren de gemeten en gemodelleerde golfspectra op de verschillende locaties (bemerkt dat de Y-as verschilt in schaal).

De getabelleerde waarden komen relatief goed overeen uitgezonderd OST C waar de golfhoogte 40% overschat wordt. Verder is de overeenkomst qua vorm van de golfspectra (voor $F > 0.05$ Hz) aanvaardbaar voor OST A en B maar uiteraard niet goed voor OST C (te grote energie-inhoud) en E (piek energiespectrum rond te lage frequentie). Zowieso ontbreekt wederom voor alle locaties het energieaandeel van kortere golven ($T \geq 4$ s), dat opnieuw voor de Visserij- (OST B) en Demeysluis (OST E) een substantieel tot zeer belangrijk aandeel heeft in de totale energie.

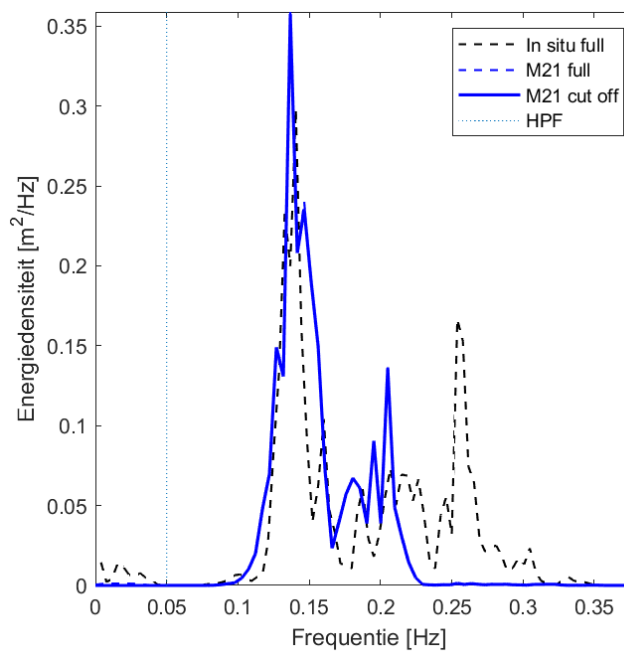
Voor deze NNW-golfrichting, gericht hoofdzakelijk naar het Klein Strand, lijkt de hoeveelheid golfenergie die het centrale deel van de haven binnenkomt goed gemodelleerd maar er treedt (lokaal) te veel reflectie op.

De grote overschatting ter hoogte van de Demeysluis kan deels het gevolg zijn van de numerieke reflectiecoëfficiënt toegekend aan het kaaiplateau ten westen van de sluis. In werkelijkheid staat dit plateau op palen, maar in het numeriek model is dit als (overtopbare) kaaimuur gecategoriseerd, dewelke een hogere reflectiecoëfficiënt heeft (1 i.p.v. 0.61).

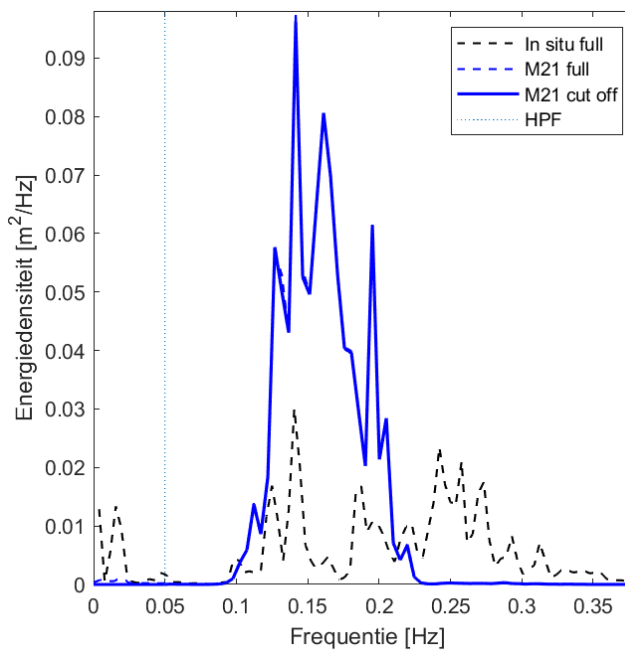
Figuur 23 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST A



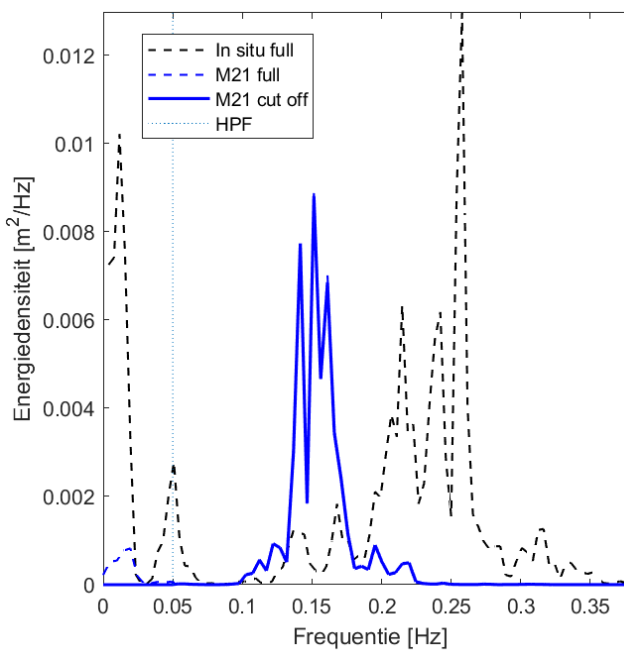
Figuur 24 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST B



Figuur 25 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST C



Figuur 26 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST E



Tabel 15 – Validatiestorm 04/11/2013: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data (met HPF > 0.05Hz)

Golfhoogtemeter	Significante golfhoogte H_{m0} [m]	
	M21	In situ data
OST A	0.40	0.44
OST B	0.43	0.44
OST C	0.27	0.19
OST E	0.06	0.08

5.4 NW-storm 22/10/2014 0:00

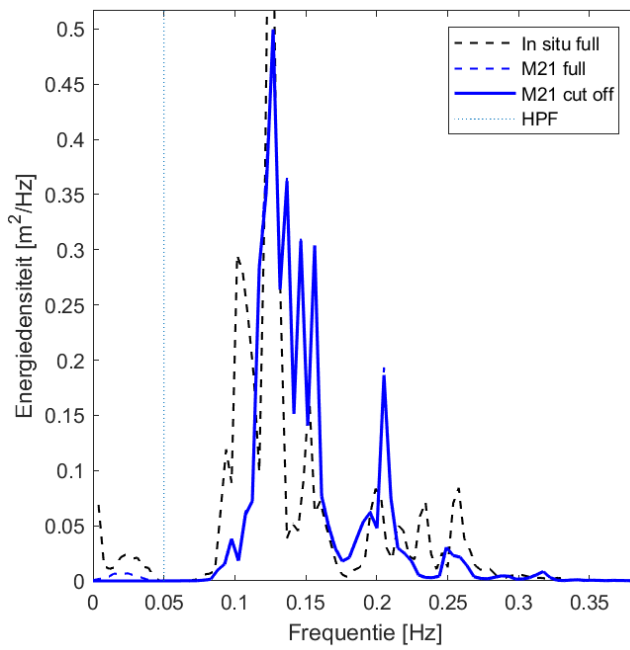
Tabel 16 toont de vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde significante ('korte') golfhoogtes H_{m0} (HPF > 0.05 Hz) (in situ data uit IMDC, 2015); Figuur 27 t.e.m. Figuur 29 illustreren de gemeten en gemodelleerde golfspectra op de verschillende locaties (bemerkt dat de Y-as verschilt in schaal).

De getabelleerde waarden komen goed overeen uitgezonderd OST E waar de golfhoogte 35% onderschat wordt. De overeenkomst qua vorm van de golfspectra is ook goed uitgezonderd opnieuw de kortere golven ($T \geq 4s$) die ontbreken, vnl. aan de Demeysluis (OST E).

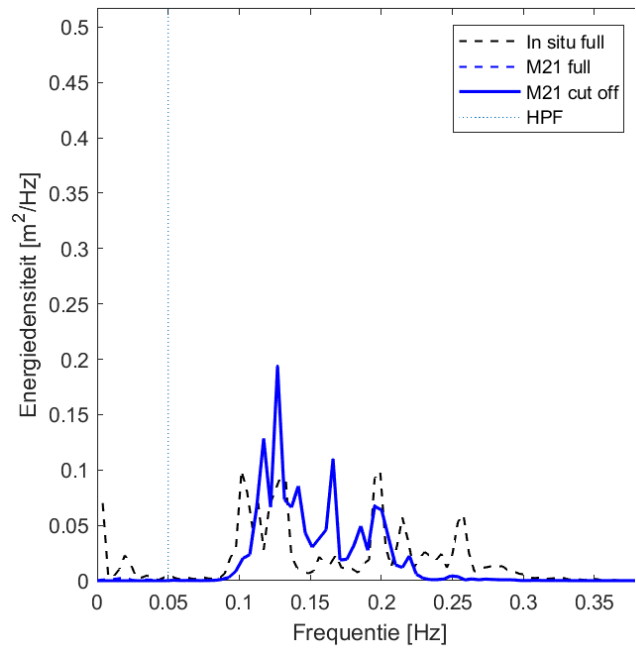
Tabel 16 – Validatiestorm 22/10/2014: vergelijking golfhoogtemeters numeriek model tegenover in situ data (met HPF > 0.05Hz)

Golfhoogtemeter	Significante golfhoogte H_{m0} [m]	
	M21	In situ data
OST B	0.55	0.54
OST C	0.33	0.35
OST E	0.07	0.11

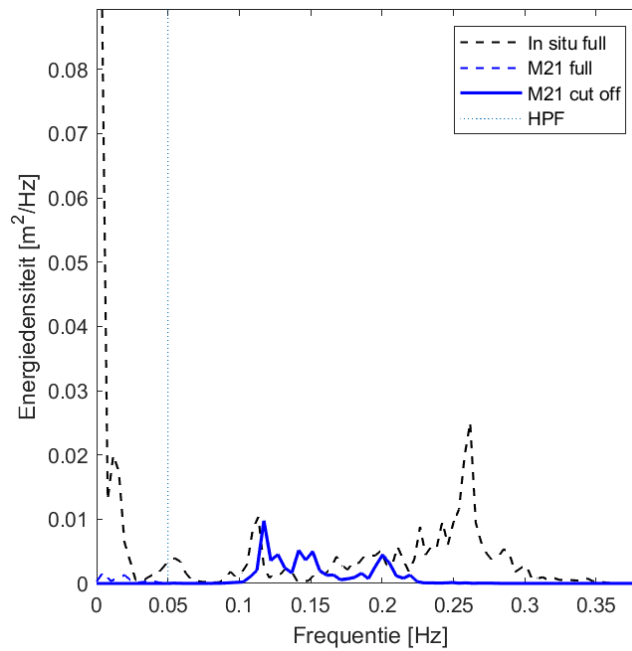
Figuur 27 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST B



Figuur 28 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST C



Figuur 29 – Gemeten en gemodelleerd golfspectrum: OST E



5.5 Duizendjarige stormvloed uit richting 323°

Gemodelleerde scenario's van extreme stormen kunnen niet gevalideerd worden met in situ meetdata maar kunnen wel vergeleken worden met andere modelresultaten, bijv. van een fysisch model. Ter bepaling van golfoverslag in het Montgomerydok voor verschillende extreme stormvloedsenario's is een fysisch model van een deel van de haven gebouwd op schaal 1/50 in de golftank (Figuur 30, WL-project 18_066).

Figuur 30 – Fysisch model van deel van Oostendse haven: verbrede vaargeul en Montgomerydok (schaal 1/50)



5.5.1 Opbouw fysisch model

In dit fysisch model is de situatie na verbreding van de vaargeul beschouwd. Het model start ter hoogte van de kop van de Halve Maan en eindigt enerzijds aan de Churchillkaai net voor de cruiseterminal en anderzijds ongeveer aan het begin van de Wandelaarkaai (Figuur 30). De vaargeul wordt lateraal begrensd door de onderwaterberm ter hoogte van het Westerstaketsel (kruinpeil uniform = +5.7m TAW), en het nieuwe talud en de combiwand van de Halve Maan (kruinpeil uniform = +11.4m TAW) (Figuur 31 (a)). De fuiken naar de Mercator- en Visserijsluis zijn niet opgenomen in het model, net als het uitstekend kaavlak op palen (locatie Noordzeeaquarium) in het Montgomerydok (Figuur 31 (b)). Het bodempeil in het Montgomerydok bedraagt uniform -3m TAW.

Aan het golfschot worden de hydraulische randvoorwaarden opgelegd die optreden in het midden van de vaargeul ter hoogte van de kop van de Halve Maan ten gevolge van golfindringing. Deze randvoorwaarden zijn numeriek bepaald gebruik makende van dit Mike 21 BW model (zie Tabel 4 voor de buitengaats hydraulische randvoorwaarden) (De Roo & Nguyen, 2019). Tabel 17 geeft een overzicht van de beoogde en gegenereerde directionele golfcondities voor een duizendjarige storm (waterstand = +6.88 mTAW). De directionele spreiding van de golven en de lokale reflectie zijn bepaald door golfhoogtemeters (GHM) in een ster lay-out te plaatsen ter hoogte van locatie 1 in Figuur 32.

Bemerkt dat tijdens een duizendjarige storm golven niet enkel binnendringen door de havenmond ($H_{m0,GI}$) maar ook lokaal gegenereerd worden door wind ($H_{m0,WG}$). Deze laatste bijdrage is numeriek bepaald gebruik makende van het SWAN model. Door beide numerieke resultaten kwadratisch te sommeren ($H_{m0,tot} = \sqrt{H_{m0,GI}^2 + H_{m0,WG}^2}$), bekomt men de totale significante golfhoogte. Illustratief is de bijdrage van lokale windgegenereerde golven ter hoogte van de kop van de Halve Maan toegevoegd in Tabel 17. Gezien de eerder lage significante golfhoogte $H_{m0,WG}$, is deze (kwadratische) bijdrage tot de totale invallende significante golfhoogte $H_{m0,tot}$ beperkt.

Tabel 17 – Golfcondities midden vaargeul ter hoogte van kop Halve Maan voor een duizendjarige storm uit 323°

	Mike 21 BW	SWAN	Numeriek: M21 + SWAN	Fysisch model
H_{m0} [m]	3.2 ²	0.53	3.24	3.15 ³
Spreiding golven [°]	16.5	Niet bepaald	n.v.t.	23.1
Reflectie t.h.v. GHMs op locatie 1	7.3%	Niet bepaald	n.v.t.	21%
T_p [s]	10.35 ²	2.2	n.v.t.	11 ³

Figuur 31 – Detail schaalmodel: (a) Halve Maan talud en combiwand – (b) Montgomerydok



(a)



(b)

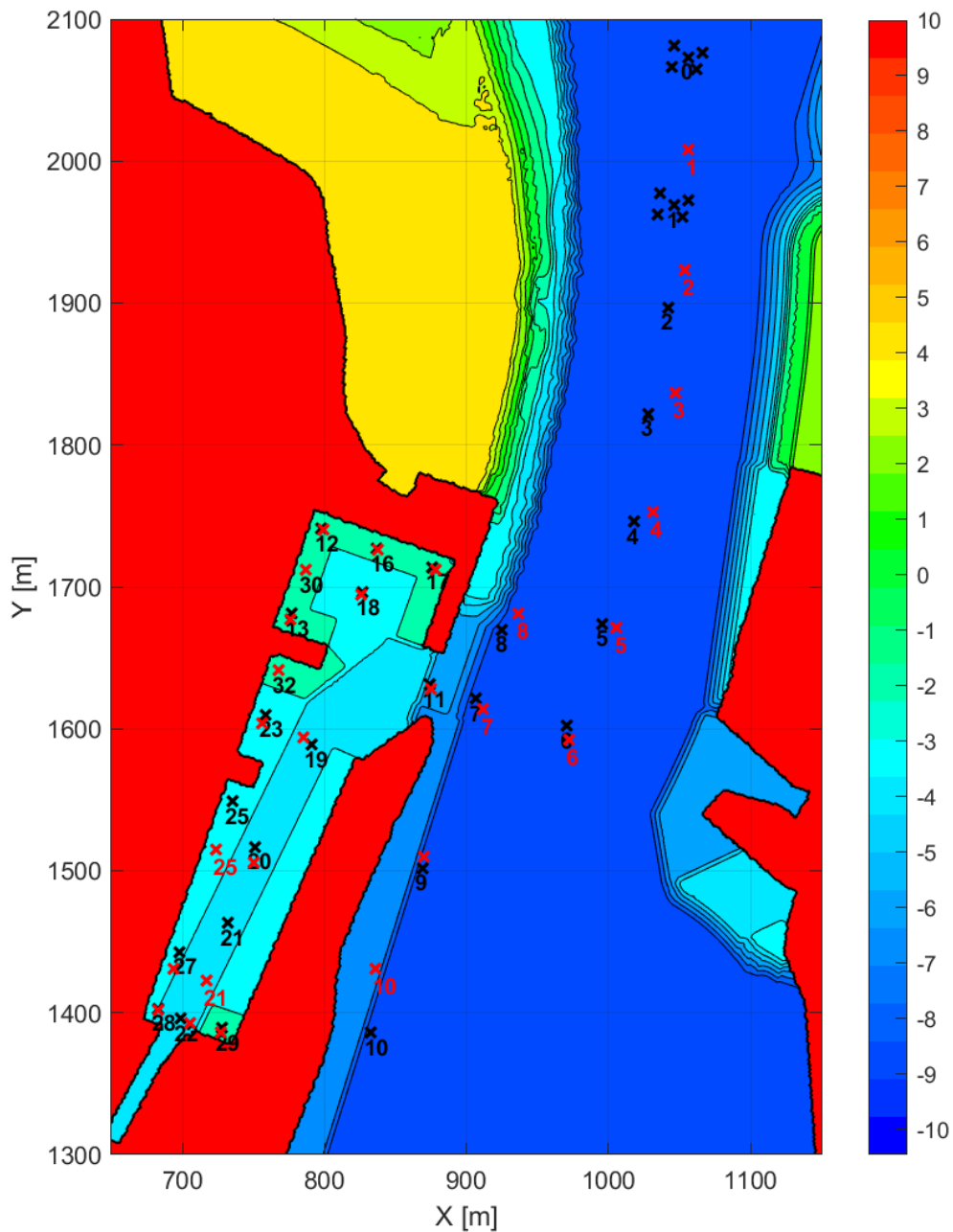
² Gemiddelde uit 5 golfhoogtemeters (standaardafwijking = 0.08 m)

³ Gemiddelde uit 7 golfhoogtemeters (standaardafwijking = 0.13m)

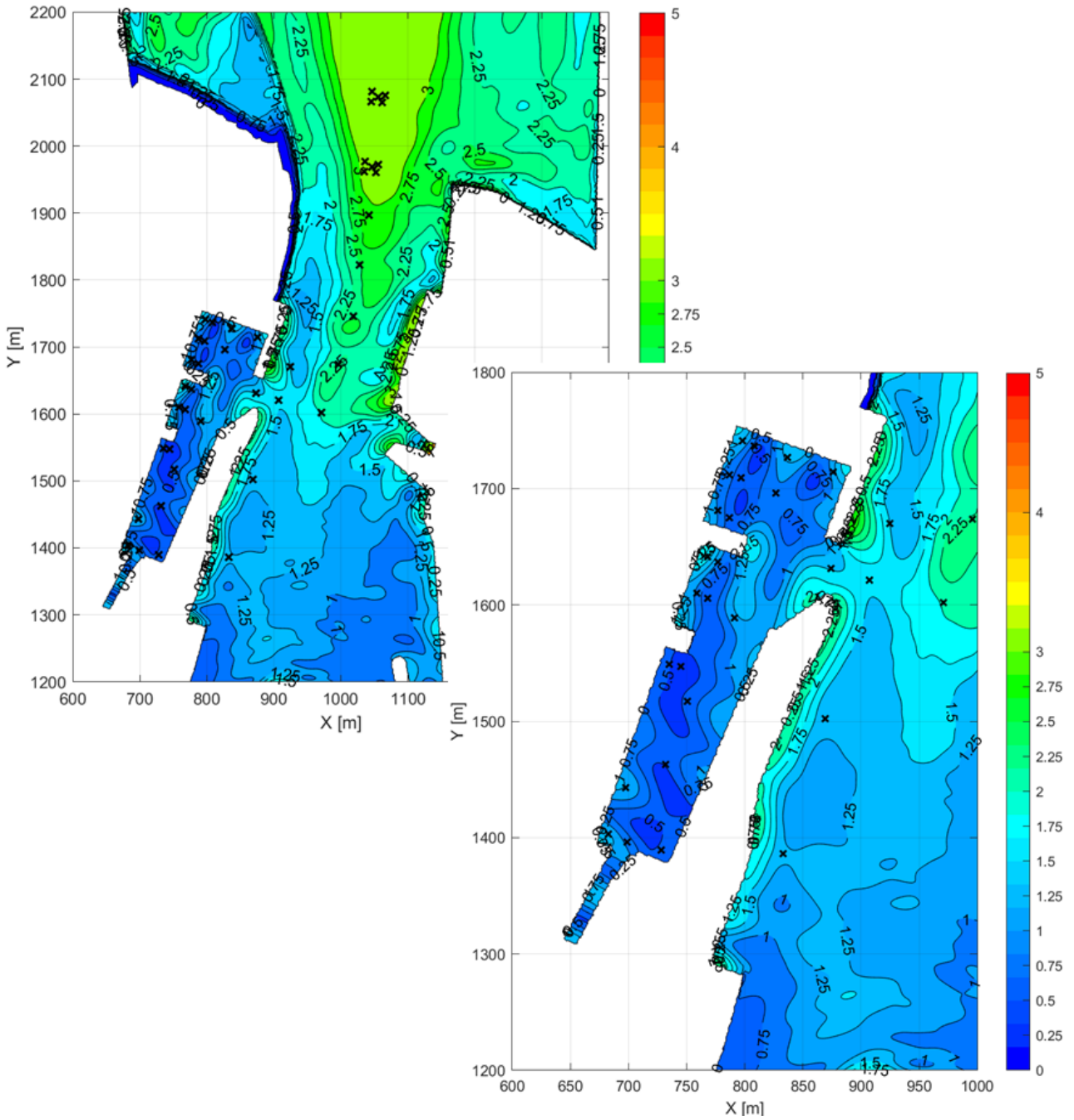
5.5.2 Vergelijking resultaten fysisch en numeriek model

Deze sectie betreft de vergelijking tussen de fysische en numerieke Mike 21 BW modelresultaten (op prototype schaal). Figuur 32 illustreert de positie van de golfhoogtemeters in beide modellen. Merk op dat sommige golfhoogtemeters (licht) verschillend geplaatst zijn; bijvoorbeeld GHM 10, 21 en 25. Figuur 33 toont een contourplot van de numeriek gemodelleerde significante golfhoogtes.

Figuur 32 – Positie golfhoogtemeters in het fysisch (rode x) en numeriek model (zwarte x) in bathymetrie [m TAW] lay-out van numeriek model



Figuur 33 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] door golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm uit 323° met T = 1000 jaar (zwarte x: locatie golfhoogtemeters)



Figuur 34 (a) t.e.m. (c) tonen de significante golfhoogtes voor beide modellen langs een transect in de vaargeul en langs de NSYC- en Churchillkaai respectievelijk; Figuur 35 (a) t.e.m. (d) tonen deze resultaten langs transecten in het Montgomerydok. In Bijlage 6 vind je de respectievelijke Kd-waarden, waarbij deze golfindringingscoëfficiënt Kd de verhouding tussen de gemiddelde significante golfhoogte ter hoogte van de ster golfhoogtemeters op locatie 1 (cf. Tabel 17 en Figuur 32) en de lokale significante golfhoogte weergeeft.

Algemeen zijn de significante golfhoogtes in de vaargeul en langs de Churchillkaai hoger in het fysisch model terwijl deze in het Montgomerydok voornamelijk lager zijn. Beide modellen tonen langsheen de transecten wel ongeveer dezelfde trends in golfhoogteverschillen.

In de vaargeul neemt de significante golfhoogte sterker af in het numeriek model (Figuur 34 (a)). Ook al is de randvoorwaarde, i.e. de golfhoogte ter hoogte van GHM 1, nagenoeg gelijk; in het fysisch model wordt deze opgelegd over de volledige lengte van het golfschot. In werkelijkheid, en in het numeriek model, treedt deze golfhoogte niet uniform op over de gehele vaargeulbreedte ter hoogte van de kop van de Halve Maan (Figuur 33). Dit zorgt voor een hogere energietransfer naar het modelgebied dan in realiteit.

Reflectie ter hoogte van het nieuwe talud van de Halve Maan is hoger in het fysisch model (zie ook Tabel 17). Het getrapte ontwerpprofiel met onderwaterberm is vereenvoudigd ingebracht als een uniforme 1/3.4 betonnen helling tot op kruinpeil +11.4 m TAW terwijl in het numeriek model het ontwerpprofiel is ingebouwd tot een waterdiepte van 3m (cf. Sectie 3.3.2), waaraan de reflectiecoëfficiënt van een stortsteenhelling is toegekend (cf. Sectie 3.1.2 en 3.3.4). De combiwand zorgt in beide modellen voor 100% reflectie.

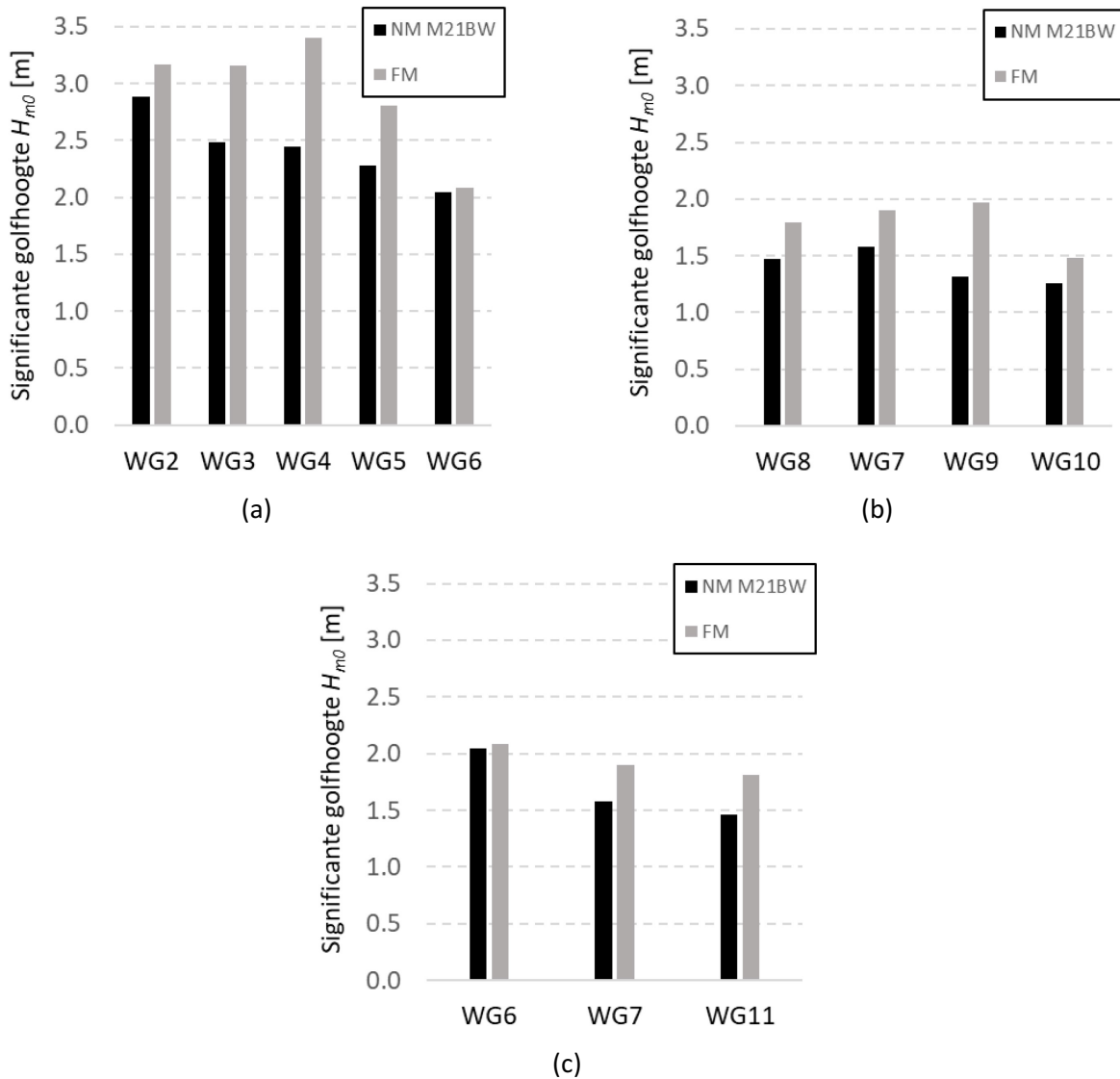
De kaaivlakken rondom het Montgomerydok (incl. NSYC- en Churchillkaai) zijn in het fysisch model ingebouwd volgens de realiteit (kruinpeil variërend van +6.6 tot +6.9m TAW) terwijl in het numeriek model een uniform kruinpeil = +6.9m TAW gehanteerd wordt. Ondanks de correctere kruinpeilen, resulterend in golfoverslag over de NSYC- en Churchillkaai naar het Montgomerydok (Figuur 36 (b)), zijn de golfhoogtes langs deze kaaien, alsook in de ingang naar het Montgomerydok, toch hoger in het fysisch model ten gevolge van de hogere reflectie (ook geen diffractie naar fuik Visserijsluis) en energietransfer richting binnenhaven.

In het Montgomerydok resulteert het water op de kaaivlakken en de significante golfoverslag voornamelijk in lagere golfhoogtes in het fysisch model (Figuur 36 (a) en (c)). Golfhoogtemeter 25, gepositioneerd achter het uitstekend kaaivlak op palen, vormt hierop een uitzondering aangezien dit kaaivlak niet ingebouwd is in het fysisch model. Het patroon van staande golfoscillaties (bijv. t.h.v. GHMs 12-16-17, en 27-28) is meer uitgesproken in het numeriek model, en wordt daar mogelijks overschat (cf. optredende overslageffecten in Figuur 36 (c)). Bemerkt dat dit staande golfpatroon beïnvloed wordt door de golfperiode.

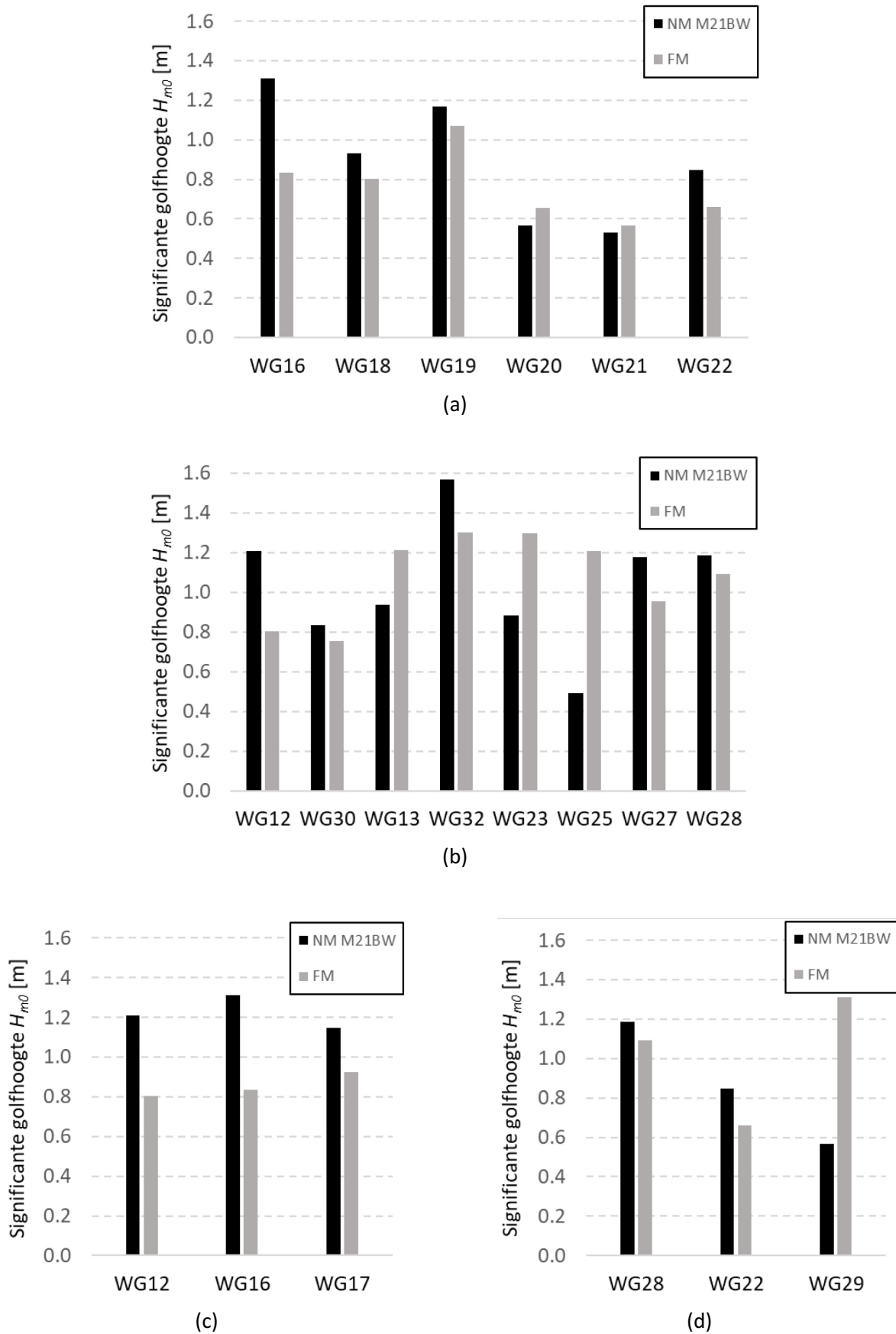
Aangezien de fuik naar de Mercatorsluis niet ingebouwd is in het fysisch model, treedt zo'n oscillatie ook daar op (GHMs 28-22-29 in Figuur 35 (d)). In het numeriek model is er diffractie naar de sluis, waar de golfenergie 100% gereflecteerd wordt tegen de sluisdeuren.

Voor een gedetailleerde analyse van de fysische modelresultaten wordt verwezen naar Willems *et al.*, 2020.

Figuur 34 – Significante golfhoogte in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) de vaargeul; (b) langs de Churchillkaai en (c) ingang Montgomerydok



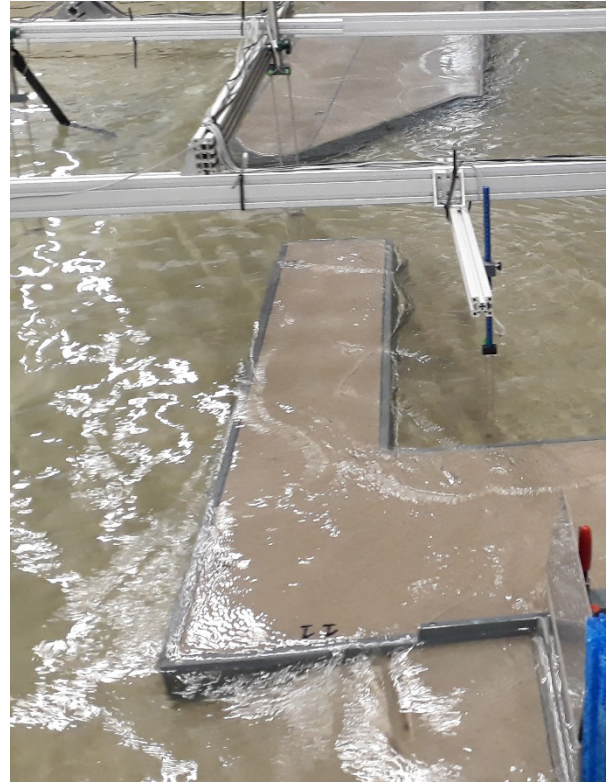
Figuur 35 – Significante golfhoogte in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) Montgomerydok; (b) middellijn parallel aan kaaivlakken Visserskaai; (c) parallel aan Montgomerykaai en (d) parallel aan kaaivlakken Mercatorsluis



Figuur 36 – Modelling duizendjarige storm ($h = +6.88\text{m TAW}$) in fysisch model (project 18_066): (a) situatie voor start proef; (b) golfoverslag over NSYC kaai en (c) golfoverslag over kaavlakken rond en in Montgomerydok



(a)



(b)



(c)

6 Golfindringing bij maatgevende stormen

Om de mate van golfindringing weer te geven wordt de golfindringingscoëfficiënt of Kd-waarde gebruikt, die gedefinieerd is als de verhouding tussen de buitengaatse en de lokale significante golfhoogte.

In dit hoofdstuk zijn enkel contourplots weergegeven van een deel van de haven (Halve Maan – centrale deel van haven – Montgomerydok (MGD)); in Bijlagen 1 en 3 zijn contourplots met Kd-waarden voor de volledige haven opgenomen in de huidige en toekomstige havengeometrie resp. Daarnaast vind je contourplots van de significante golfhoogtes voor bovenvermeld deel van de haven in Bijlagen 2 en 4 voor respectievelijk de huidige en toekomstige havengeometrie.

6.1 Invloed verbreding Halve Maan

6.1.1 Huidige situatie

Figuur 37 (a) tot (d) illustreert de golfindringing bij een buitengaatse significante golfhoogte H_{m0} van 3.17m ($T = 1$ jaar) uit resp. golfrichtingen NW, 323° , 330° en NNW in de huidige havengeometrie.

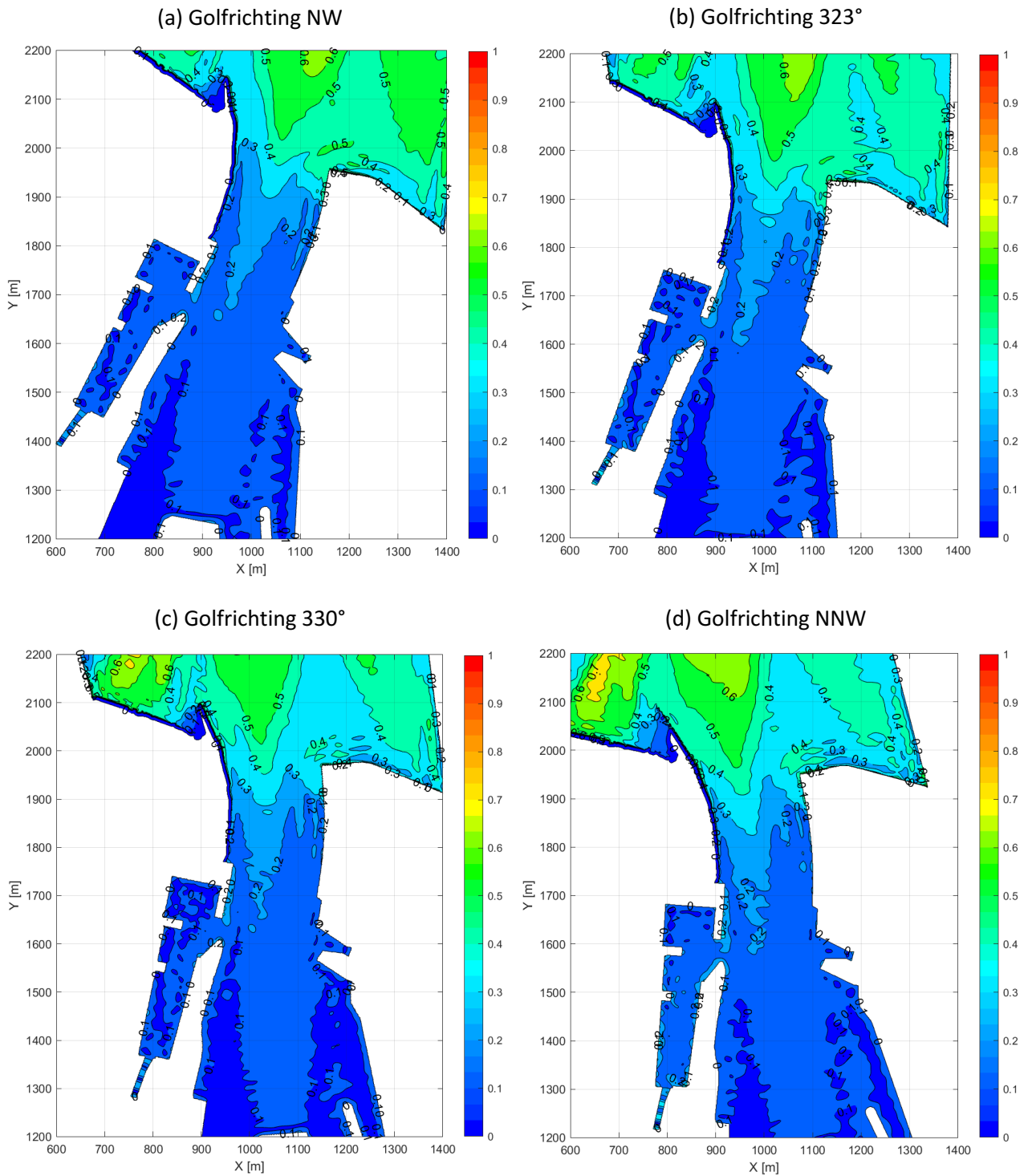
Algemeen dringt weinig golfenergie de haven binnen. In het centrale deel van de haven (einde vaargeul) bedraagt de Kd-waarde slechts 0.1. In het Montgomerydok kan deze lokaal tot 0.2 bedragen (richting NNW), alsook langs de Wandelaarkaai (in het Tijdok, richting 323°) en de Churchillkaai (richting NNW, 323° & 330°). In de voorhaven is de Kd-waarde maximum 0.1 (Cockerillkaai, richting NNW), vaak zijn er quasi geen golven op te merken.

Ter hoogte van de fuik naar de Visserijsluis bedraagt de Kd-waarde 0.1; naar de Demeysluis 0.03.

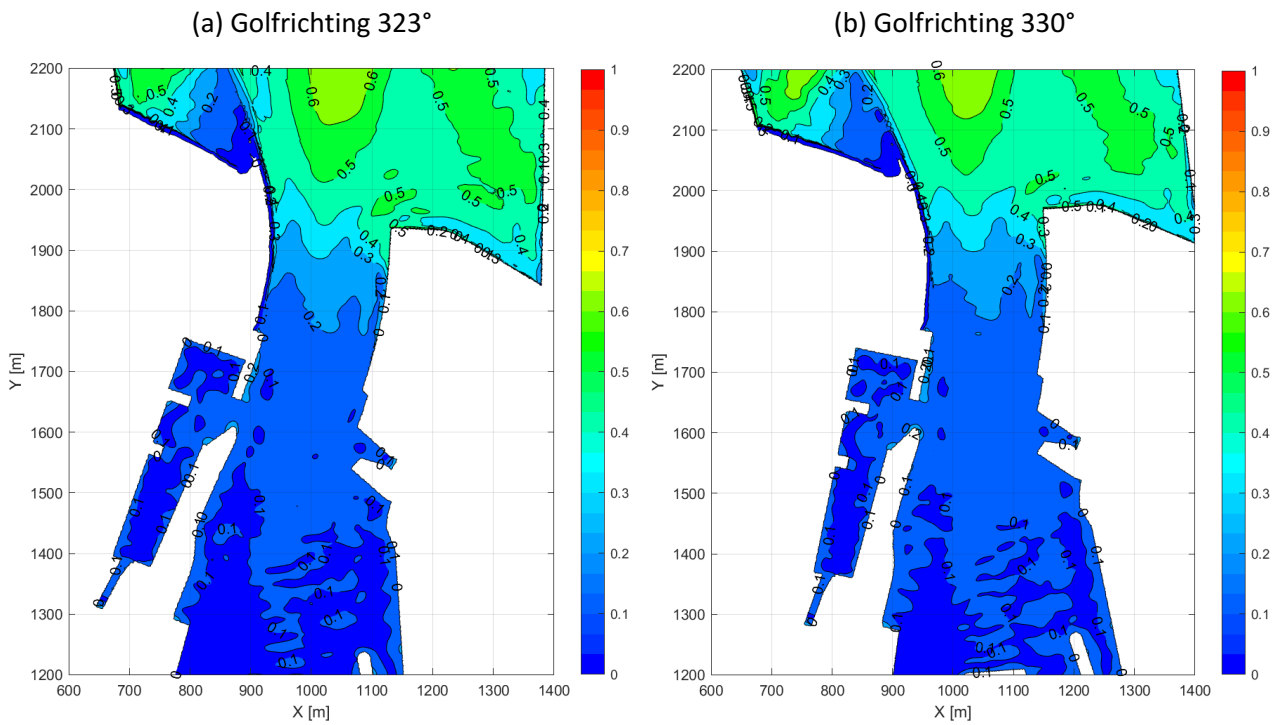
Bij hogere terugkeerperiodes, $T = 10$ jaar en 1000 jaar (buitengaatse significante golfhoogte H_{m0} van ~ 4 m en ~ 4.85 m resp.), daalt de Kd-waarde in de binnenhaven (Figuur 38 en Figuur 39). Ten noorden van de Halve Maan neemt de Kd-waarde wel toe.

De invloed van de terugkeerperiode van de maatgevende stormen op golfindringing wordt gedetailleerd besproken onder Sectie 6.3.

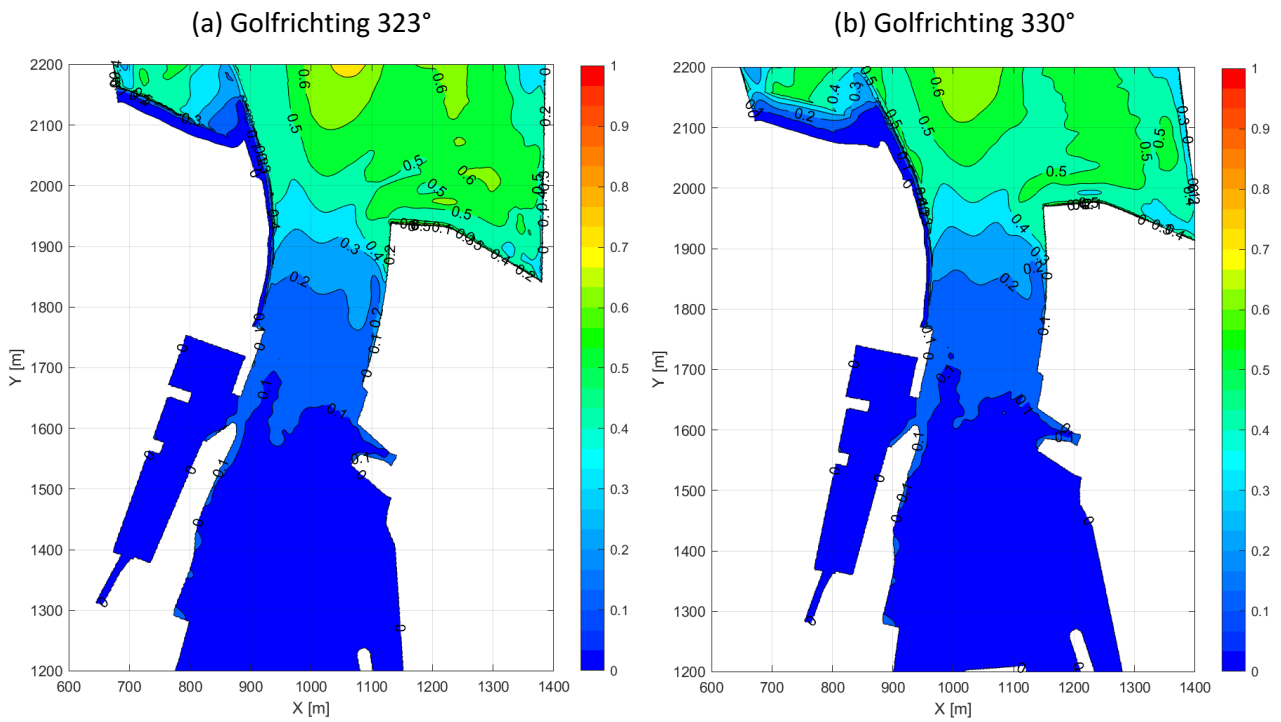
Figuur 37 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar



Figuur 38 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar



Figuur 39 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar



6.1.2 Situatie na verbreding Halve Maan

Figuur 40 (a) tot (d) illustreert het verschil in golfindringing bij een buitengaatse significante golfhoogte H_{m0} van 3.17m ($T = 1$ jaar) uit resp. golfrichtingen NW, 323° , 330° en NNW tussen de toekomstige en huidige havengeometrie.

De verbreding van de vaargeul resulteert logischerwijze in een hogere golfindringing in de binnenhaven. De heraanleg van de westelijke zijde van de Halve Maan in een talud en een combiwand zorgt voor minder energiedissipatie en een sterkere reflectie van de golven richting binnenhaven.

In de vaargeul ter hoogte van deze combiwand stijgt de Kd-waarde met 0.5. Bemerkt hierbij dat de configuratie van de onderwaterberm (kruin op -2.5 m TAW en talud 1/1.5 tot rand vaargeul) ter hoogte van de combiwand aangepast opgenomen is in het numeriek model (cf. Sectie 3.1.2). Hierdoor is de breedte van de onderwaterberm kleiner dan in werkelijkheid en is er geen plateau meer aanwezig ter hoogte van de hoek naar de Visserijsluis.

Verder in het centrale deel van de haven (einde vaargeul) stijgt de Kd-waarde voornamelijk in de westelijke zone, o.a. ter hoogte van de Churchillkaai. In het Montgomerydok (noordelijke zone, richting NNW en 330°) en langs de Wandelaarkaai (Tijdok, richting 330°) neemt de Kd-waarde lokaal toe met resp. 0.25 en 0.4. Door reflectie tegen de Churchillkaai stijgt de Kd-waarde aan de noordelijke en westelijke kaaimuur van de Rebo offshore wind terminal met resp. 0.5 en 0.35. De Kd-waarde van de westelijke kaaimuur in het Zeewezendok neemt ook toe met 0.3. In de voorhaven neemt de Kd-waarde toe met 0.25 (Cockerillkaai, richting 323° en 330°). Bemerkt wel dat de open verbinding naar de Noordede in het numeriek model ingebouwd is als een verticale muur (met reflectiecoëfficiënt 1) waardoor de Kd-waarden in de nabijheid van deze 'structuur' te hoog zijn.

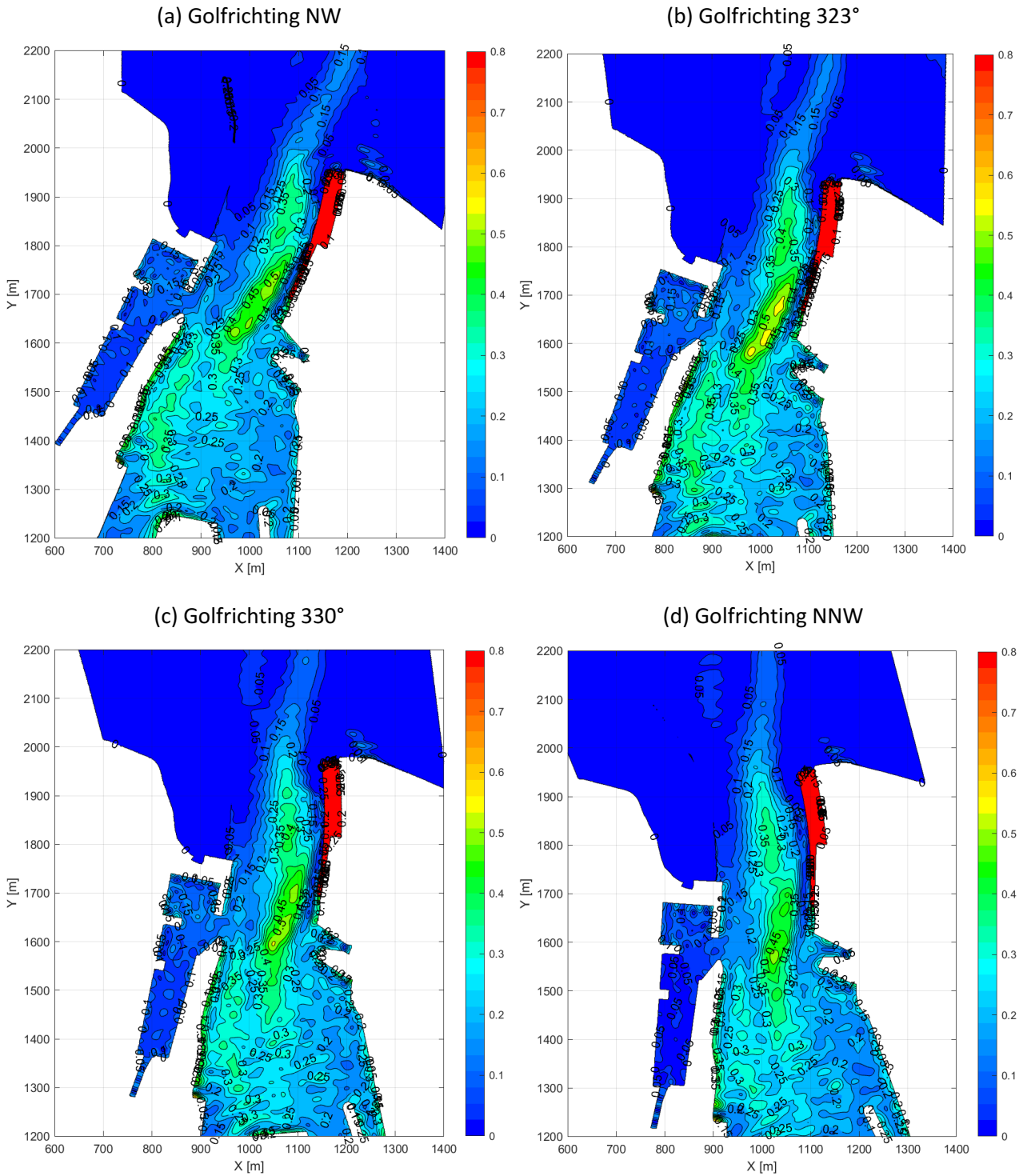
Diffractie naar de Visserijsluis neemt toe; de Kd-waarde stijgt met 0.3, wat resulteert in 1m hogere (totale) significante golfhoogtes H_{m0} in het begin van de fuik voor een éénjarige storm. Dit is het meest uitgesproken voor golfrichtingen 323° en NW (Kd van 0.1 (huidig) naar 0.4-0.5 (toekomstig) voor alle terugkeerperiodes van stormen).

De Kd-waarde ter hoogte van de fuik naar de Demeysluis neemt met 0.07 toe (alle richtingen), wat resulteert in 0.25m hogere (totale) significante golfhoogtes H_{m0} voor een éénjarige storm.

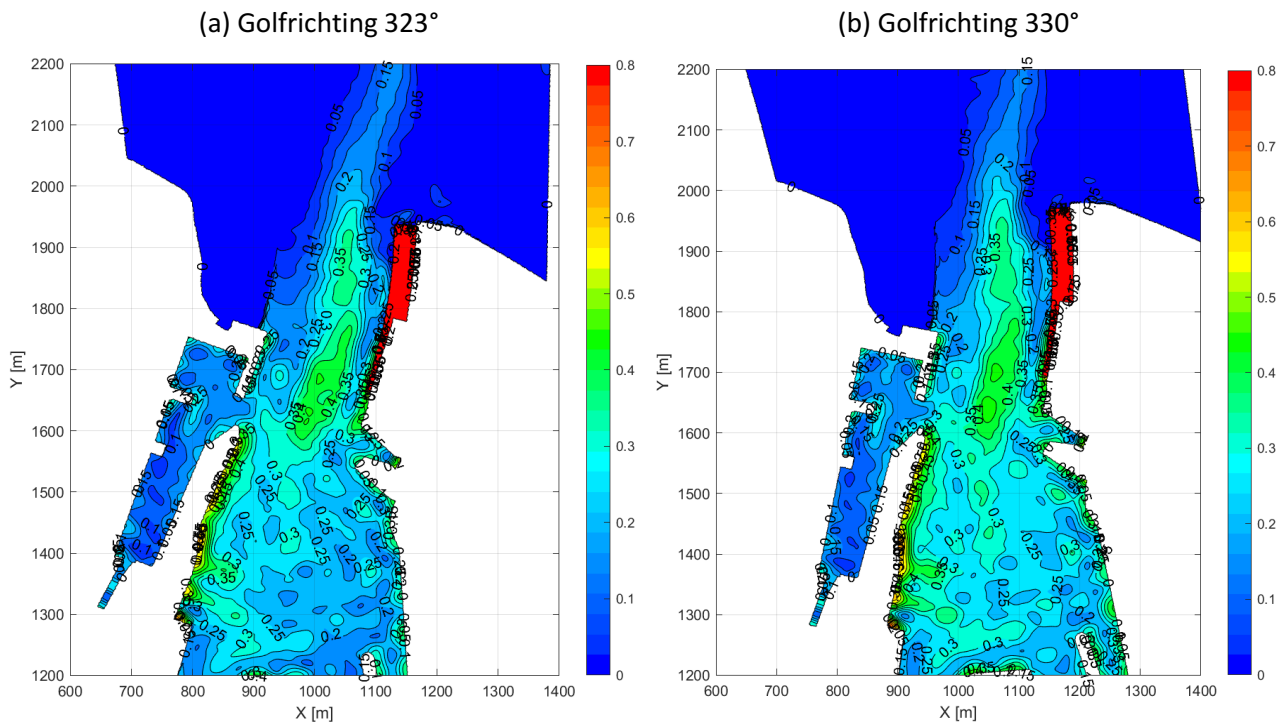
Bij hogere terugkeerperiodes daalt in de vaargeul langs de Halve Maan het verschil in Kd-waarde tussen de toekomstige en huidige havengeometrie van 0.5-0.55 (330° - 323°) bij een éénjarige storm naar 0.45-0.4 tot 0.35 resp. bij een tien- en duizendjarige storm (Figuur 41 en Figuur 42 resp.). Golfindringing uit richting 330° wordt bijgevolg belangrijker na verbreding van de vaargeul.

De invloed van de terugkeerperiode van de maatgevende stormen op de golfindringing wordt gedetailleerd besproken onder Sectie 6.3.

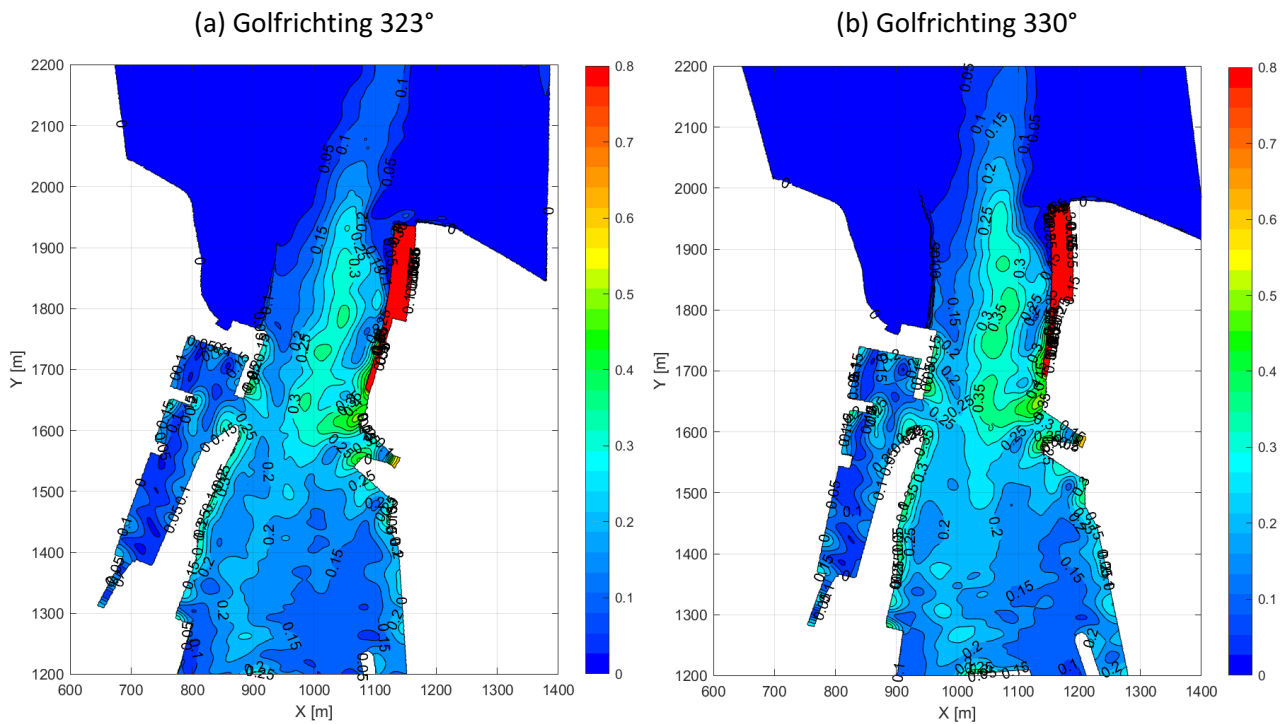
Figuur 40 – Toename in Kd-waarde [-] voor golfindringing: toekomstige vs. huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar
(rood = land: verschil in geometrie Halve Maan)



Figuur 41 – Toename in Kd-waarde voor golfindringing: toekomstige vs. huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar (rood = land: verschil in geometrie Halve Maan)



Figuur 42 – Toename in Kd-waarde voor golfindringing: toekomstige vs. huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar (rood = land: verschil in geometrie Halve Maan)



6.2 Invloed golfrichting

6.2.1 Huidige situatie

De NNW-golfindringing is hoofdzakelijk gericht naar het Klein Strand maar door refractie op de onderwaterberm (onder het Westerstaketsel) en het westelijk talud van de Halve Maan wordt een deel van de golfenergie naar de Churchillkaai en in het Montgomerydok geleid (Figuur 37 (d)). De NW-golfindringing is eerder naar de Halve Maan gericht, waarbij het grootste deel van de energie wordt gedissipeerd en gereflecteerd door de kop en het noordelijke talud. De golfindringing uit richtingen 323° en 330° verschilt slechts weinig. Een kleine draaiing van richting NNW naar 330° vermindert de golfindringing in het Montgomerydok reeds substantieel, van 0.70m naar 0.55m significante golfhoogte H_{m0} in de ingang van het dok (0.55m geldt voor alle richtingen behalve NNW).

6.2.2 Situatie na verbreding Halve Maan

De verschillen in golfindringing tussen de 4 richtingen verkleinen na verbreding van de vaargeul en met toenemende terugkeerperiode van de maatgevende stormen (Figuur 43 t.e.m. Figuur 46 voor alle stormen uit golfrichtingen NW, 323°, 330° en NNW resp.).

Ter hoogte van het noordelijk en westelijk talud van de Halve Maan resulteren logischerwijze de grootste golven uit richtingen NW en 323° (voor stormen met eenzelfde terugkeerperiode). Door reflectie op (de onderwaterberm en) de combiwand van de Halve Maan wordt de Churchillkaai zwaar belast uit alle golfrichtingen (Kd-waarde van 0.5-0.6 bij storm met $T = 1$ jaar). Golfrichtingen NNW en 330° zorgen voor de grootste golfindringing in het Montgomerydok, waarbij 330° belangrijker wordt met toenemende terugkeerperiode. De noordelijke kaaimuur van de Rebo offshore wind terminal, de noordelijke zone van diens westelijke kaaimuur en diens oostelijke kaaimuur in het Zeewezendok worden gelijkaardig geïmpacteerd uit alle richtingen uitgezonderd NW. De Wandelaarkaai ondervindt eveneens een gelijkaardige invloed uit alle richtingen. Golfrichtingen 323° en NW resulteren in de grootste diffractie naar de Visserijsluis.

6.3 Invloed terugkeerperiode maatgevende storm

Hoe zwaarder de storm, hoe groter de kans op golfoverslag en -overloop in de binnenhaven. Vanaf een honderdjarige storm treedt deze situatie op in de simulaties, m.a.w. de reflectie van golven tegen kaaimuren en glooiingen daalt.

6.3.1 Huidige situatie

Figuur 37 t.e.m. Figuur 39 illustreren respectievelijk de golfindringing bij maatgevende stormen met $T = 1$, 10 en 1000 jaar uit de meest centrale golfrichtingen 323° en 330° in de huidige havengeometrie.

Zoals vermeld in Sectie 6.1.1 daalt de Kd-waarde in de vaargeul langs de Halve Maan met toenemende terugkeerperiode, waardoor de Kd-waarde in het centrale deel van de haven (einde vaargeul) zelfs gereduceerd wordt tot minder dan 0.1. Dit betekent dat de indringende significante golfhoogte H_{m0} in de vaargeul nagenoeg gelijk blijft, ruwweg 0.75m centraal in de as NSYC – einde talud Halve Maan.

Voor het noordelijke talud van de Halve Maan neemt de Kd-waarde wel toe, van 0.3 tot 0.5, zelfs 0.6 voor golfrichting 323° in de centrale zone achter de Oostelijke havendam. Ter hoogte van het talud is het verschil tussen de golfrichtingen minder uitgesproken.

6.3.2 Situatie na verbreding Halve maan

Figuur 43 t.e.m. Figuur 46 illustreren respectievelijk de golfindringing bij maatgevende stormen met $T = 1$ tot 1000 jaar (subfiguren (a) tot (d)) uit golfrichtingen NW, 323° , 330° en NNW in de toekomstige havengeometrie.

Algemeen daalt de Kd-waarde in de vaargeul langs de Halve Maan met toenemende terugkeerperiode, wat zich vertaalt in gelijkaardige significante golfhoogtes H_{m0} van 2 (NNW en NW) tot 2.25m (323°) en 2.5m (330°) centraal in de as NSYC – einde combiwand Halve Maan voor alle terugkeerperiodes. Ter hoogte van de (onovertopbare) Halve Maan neemt de Kd-waarde wel toe, aan de kop en het noordelijke talud tot een maximale Kd-waarde van 0.5 en 0.4 resp. (richting NW (en 323°)) en aan het westelijk talud tot een Kd-waarde van 0.5 (richting 323° en NW). In de centrale zone achter de Oostelijke havendam neemt de Kd-waarde toe tot maximaal 0.5 tot 0.6 (richting NW).

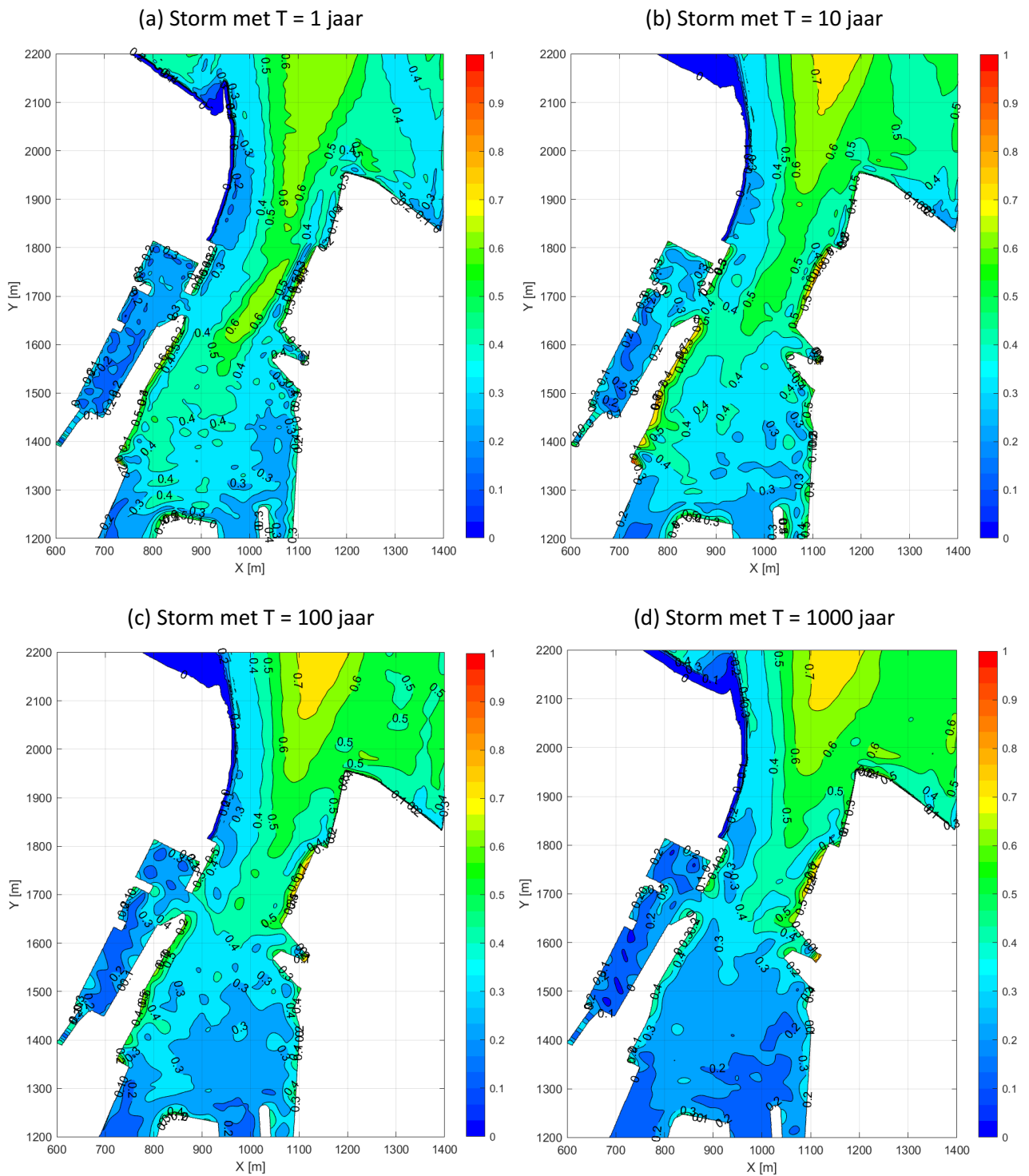
In het centrale deel van de haven (einde vaargeul) neemt de Kd-waarde toe tot een storm met $T = 10$ jaar (buitengaatse significante golfhoogte $H_{m0} \approx 4\text{m}$). Aan de Churchillkaai en aan de noordelijke kaaimuur van de Rebo offshore wind terminal resulteert dit in maximale Kd-waarden van 0.7 en 0.5 resp.; langs de Wandelaarkaai en in het Tijdok in een maximale Kd-waarde van 0.5 (voor alle richtingen). In het Zeewezendok is de Kd-waarde maximaal 0.4 (richting 330°).

In het Montgomerydok is de toename in Kd-waarde het belangrijkste voor golfrichtingen 330° en NNW (max Kd = 0.4-0.5, richting 330°). Hoewel de verschillen tussen de golfrichtingen vaak klein zijn, lijkt het dat de reflectie op de combiwand van de Halve Maan uit golfrichting 330° voor de nadeligste golfindringing in het centrale deel van de haven en het Montgomerydok zorgt.

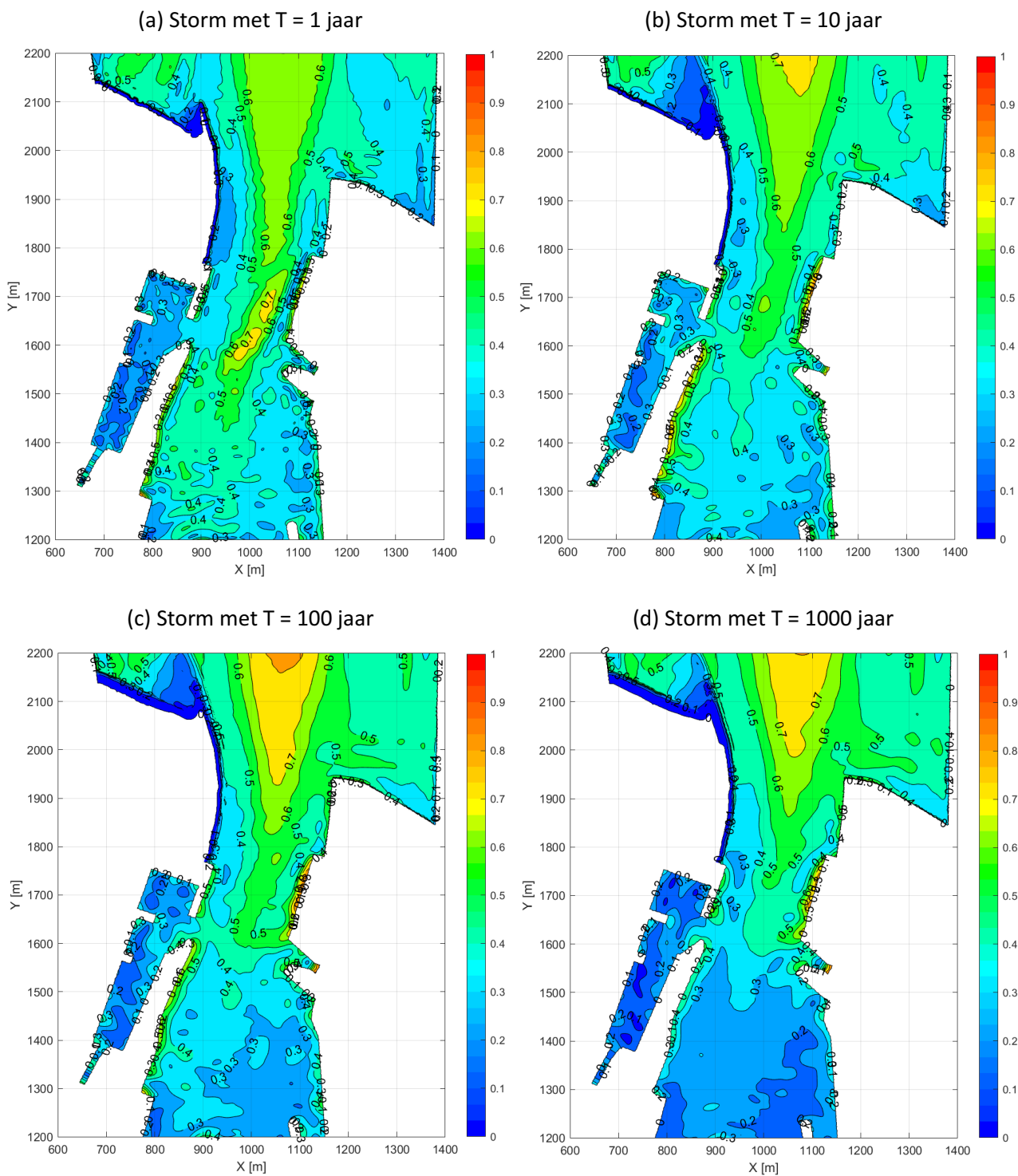
In de voorhaven is de Kd-waarde het grootst aan de Cockerillkaai voor een éénjarige storm (max Kd = 0.3, richting 323°).

Voor hogere terugkeerperiodes daalt de Kd-waarde ruwweg met 0.1 en 0.2 voor $T = 100$ jaar en $T = 1000$ jaar resp. ten opzichte van $T = 10$ jaar.

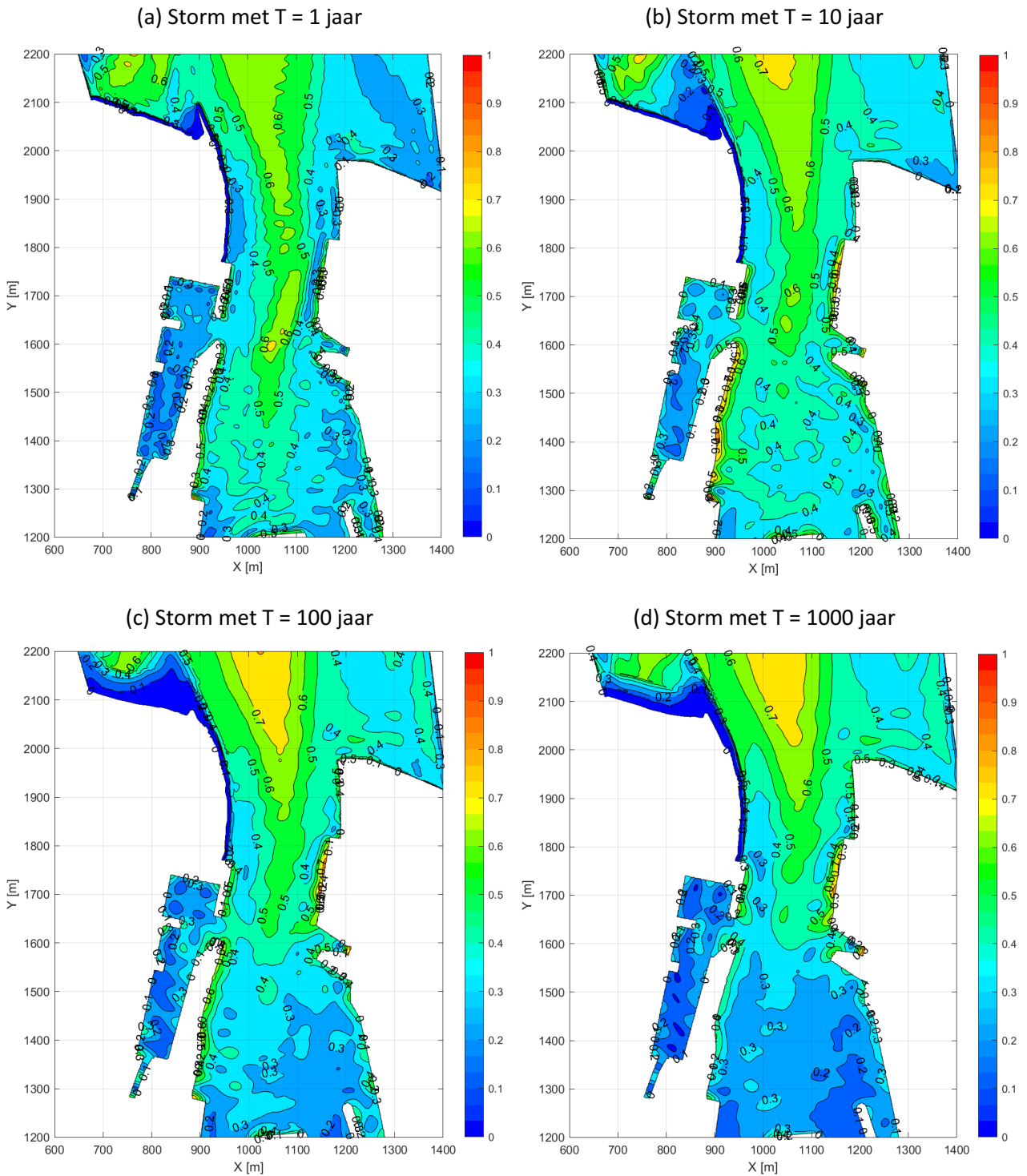
Figuur 43 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting NW – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen



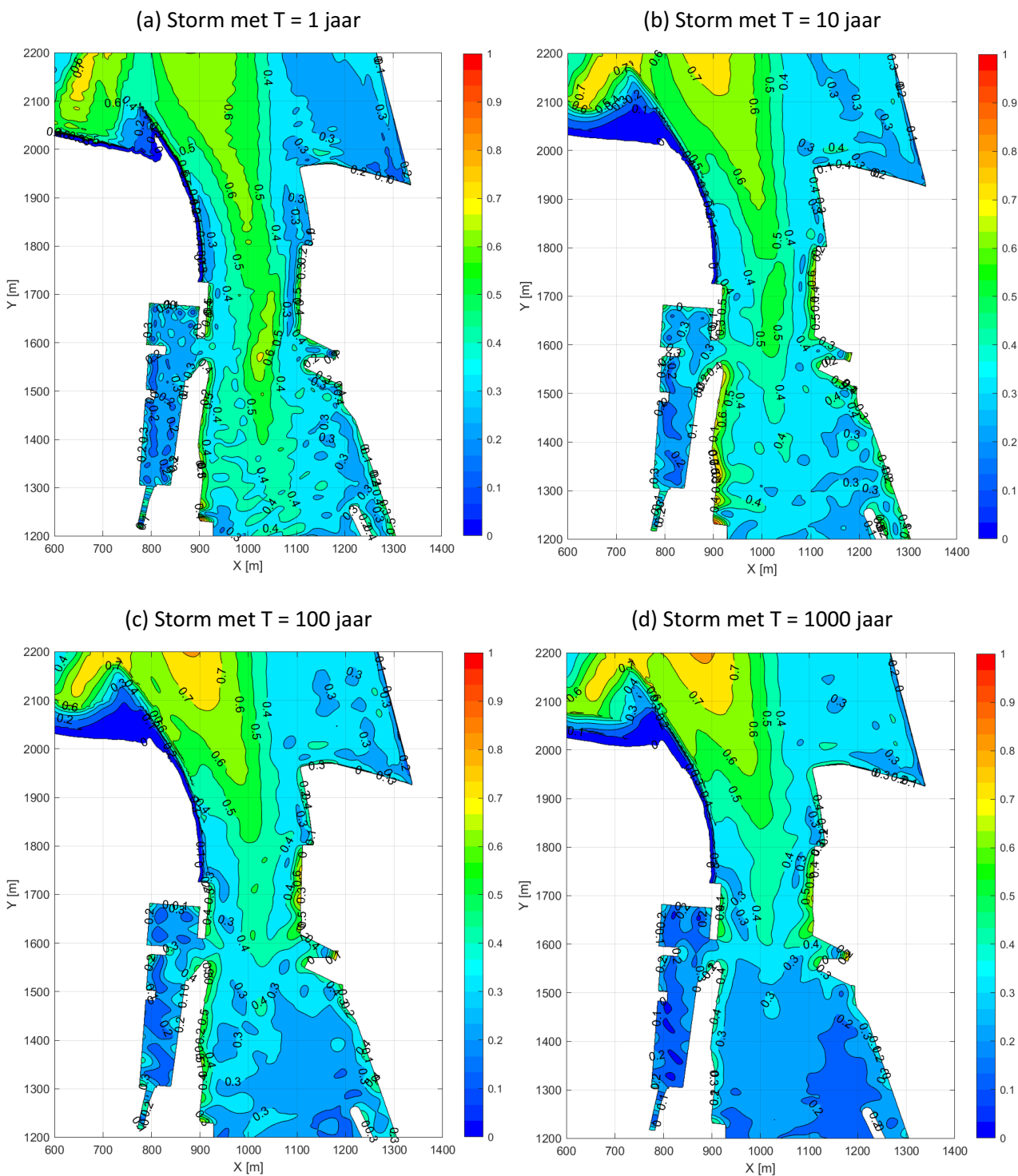
Figuur 44 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting 323° – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen



Figuur 45 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting 330° – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen



Figuur 46 – Kd-waarde voor golfindringing uit richting NNW – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen



6.4 De uitvoering van het OW-plan: invloed op golfindringing

Gebruik makende van historische in situ opgemeten data van stormen en het numeriek gemodelleerde golfklimaat van een éénjarige storm in de toekomstige havengeometrie is beknopt geanalyseerd wat de invloed is van de uitvoering van het OW-plan op golfindringing in de haven.

6.4.1 Oorspronkelijke situatie haven (cf. Figuur 1A) en start bouw havendammen (cf. Figuur 1B)

Tussen 2005 en 2011 is een meerjarige meetcampagne uitgevoerd in de haven van Oostende door UGent in opdracht van Afdeling Kust (meetlocaties op Figuur 47).

Uit deze meetcampagne zijn stormen geselecteerd waarbij de windrichting tijdens de stormpiek (ter hoogte van Meetpaal 0) overeenkomstig 1 van de gemodelleerde windrichtingen (i.e. tussen NW en NNW) was (Verhaeghe & Versluys, 2005, 2008; Versluys, 2008a; b; c; d, 2009). De buitengaatse golfdata zijn eveneens van de Waverider boei 'Oostende Oosterstaketsel' afkomstig (cf. Sectie 3.2.1).

Figuur 48 en Figuur 49 illustreren respectievelijk de opgemeten significante golfhoogtes in de haven ten opzichte van de buitengaatse golfhoogte in stormcondities tijdens de oorspronkelijke situatie (2004-2007) en de start van de bouw van de havendammen (2008-2009). Hoe hoger de waterstand, hoe groter de golfhoogtes in de haven bij een gelijkaardige storm.

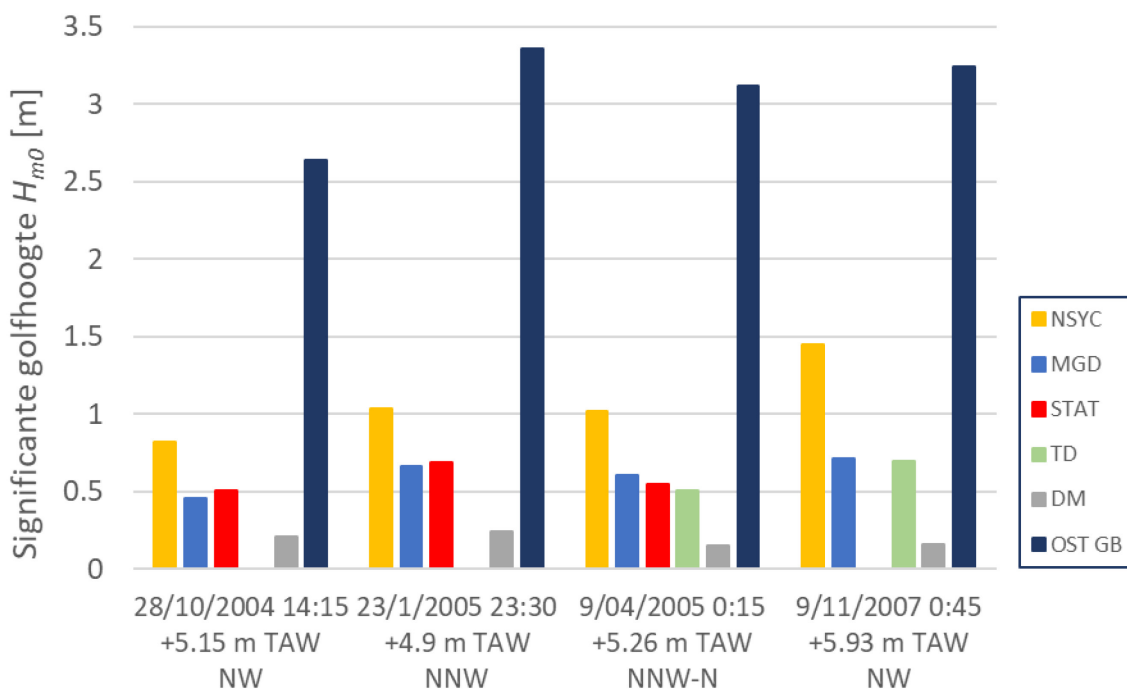
Tijdens de afbraak van het Oosterstaketsel en de ruwbouw van de Oostelijke havendam wordt duidelijk een verhoogde golfindringing waargenomen (cf. meetlocatie NSYC). Om deze te reduceren in het Montgomerydok (MGD) werd de ingang tot het dok tijdelijk vernauwd tot 20m door aan weerszijden van de ingang combiwanden op te trekken bestaande uit buispalen en damplanken (de zogenaamde 'neus' en 'vinger', ter plaatse tussen feb 2008 – mei/juni 2015). Dit is merkbaar voor de maartstormen van 2008; de golfhoogtes blijven beperkt in het dok. De damplanken tussen de buispalen van de neus hadden echter de neiging om te zakken (Verhaeghe & Versluys, 2008). In latere stormen in Figuur 49 is dan ook een verhoging van het golfklimaat in het dok op te merken. Bemerkt dat nazicht, en indien nodig herstelling, van de damplanken op geregelde tijdstippen plaatsvond.

De werken aan de havenmond beïnvloedden evenwel niet het golfklimaat in het centrale deel van de haven, cf. meetlocatie Tijdok (TD), en de voorhaven, cf. meetlocatie Demeysluis (DM).

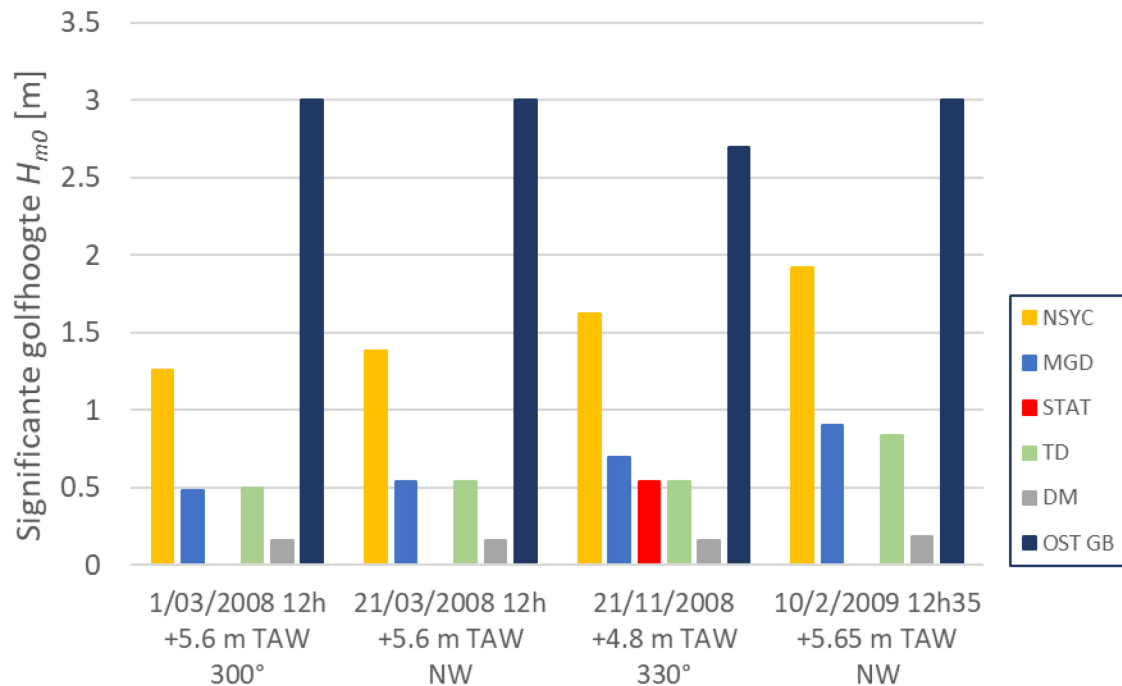
Figuur 47 – Overzicht meetlocaties – meerjarige meetcampagne (2005-2011)



Figuur 48 – Oorspronkelijke havengeometrie: Significante golfhoogtes H_{m0} buitengaats en in de haven tijdens stormpiek



Figuur 49 – Start bouw havendammen: Significante golfhoogtes H_{m0} buitengaats en in de haven tijdens stormpiek



6.4.2 Uitvoering OW-plan: voltooiing verbetering nautische toegankelijkheid

De invloed van de uitvoering van het OW-plan op golfindringing in de haven is geanalyseerd op basis van de Kd-waarden, die bepaald zijn als volgt :

- Oorspronkelijke situatie (2004-2007): Kd-waarden bepaald uit data stormen (cf. Figuur 48)
- Start bouw havendammen (2008-2009): Kd-waarden bepaald uit data stormen (cf. Figuur 49)
- Bouw havendammen gefinaliseerd (eind 2013-2017): Kd-waarden bepaald uit data validatiestormen (cf. Sectie 3.2.1 en Sectie 5.1 t.e.m. 5.4) en bijkomend uit simulaties validatiestormen voor meetlocaties NSYC en MGD (cf. Figuur 47)
- Havendammen en verbreding vaargeul (vanaf 2020): Kd-waarden bepaald uit simulaties van éénjarige storm (randvoorwaarden in Tabel 4), op dezelfde meetlocaties als validatiestormen en bijkomend meetlocaties NSYC en MGD. Dit is uitgezonderd richting 323° aangezien geen validatiestormen beschikbaar zijn hiervoor.

Figuur 50 geeft een overzicht van Kd-waarden op verschillende locaties in de haven tijdens verschillende uitvoeringsfasen van het OW-plan. Aangezien de meetlocaties van de UGent en Tractebel monitoringscampagnes, uitgezonderd locaties ‘Station’(STAT) en ‘Demeysluis’, verschillen (zie Figuur 21 en Figuur 47 resp.), is de invloed van de werken niet eenduidig te bepalen. Daarom is bijkomend data opgevraagd uit de numerieke simulaties ter hoogte van locaties ‘NSYC’ en ‘MGD’.

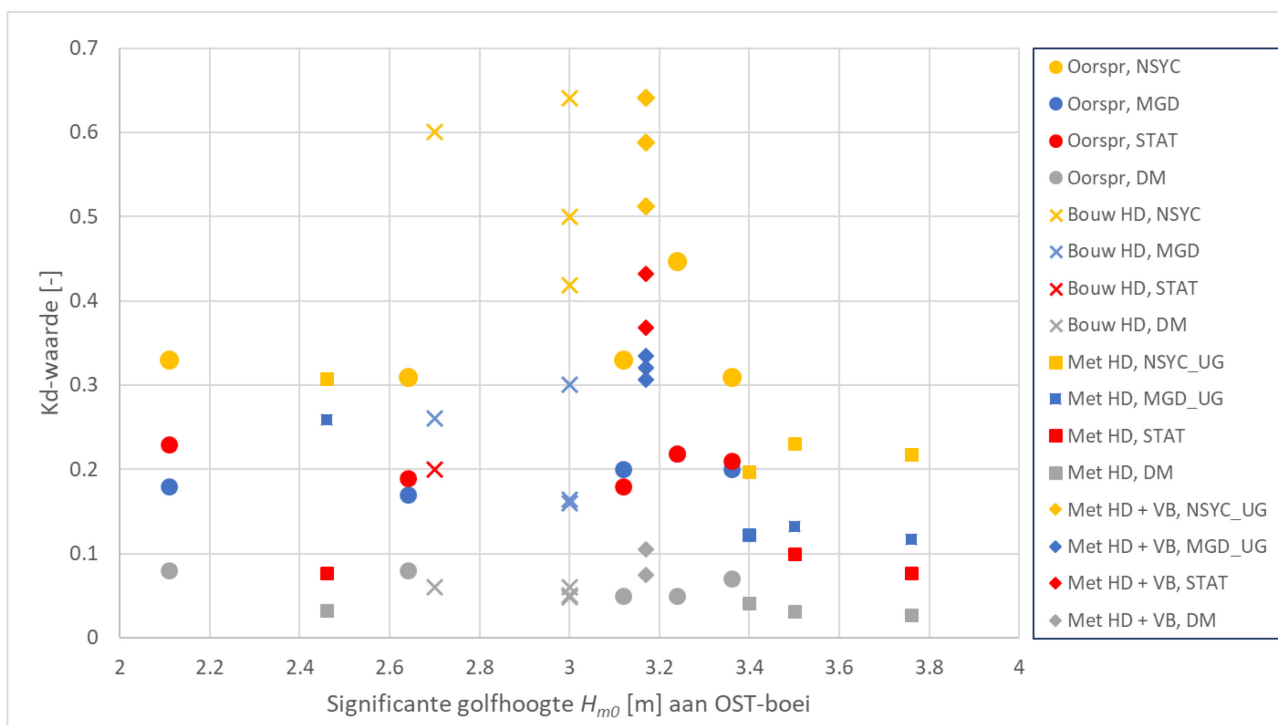
Door de bouw van de havendammen is de golfindringing in de haven sterk afgenomen; de Kd-waarde bedraagt zo’n 0.2 aan meetlocatie NSYC tijdens stormcondities. Ter hoogte van het kaaivlak aan de cruise terminal en in het Montgomerydok bedraagt de Kd-waarde ongeveer 0.1. Ter hoogte van de Demeysluis blijft de Kd-waarde quasi ongewijzigd door de werken en heel laag, i.e. minder dan 0.1.

Een verbreding van de vaargeul resulteert logischerwijze in een verhoogd golfklimaat. Ten opzichte van de oorspronkelijke situatie leidt de geoptimaliseerde nautische toegankelijkheid tot een Kd-toename van ongeveer 0.2 tot 0.3 ter hoogte van de meetlocaties Station en NSYC respectievelijk (tijdens jaarlijkse stormcondities). In het Montgomerydok blijft de Kd-toename beperkt tot 0.1 terwijl aan de Demeysluis de Kd-waarde nagenoeg gelijk blijft. Deze Kd-toenames zijn afhankelijk van de golfrichting (cf. Sectie .2.2).

Bemerk dat dit numerieke resultaten zijn, en dat dit model van de verbrede vaargeul nog niet gevalideerd is gebruik makende van in situ metingen. Dit is immers slechts mogelijk na uitvoering van de werken.

Bemerk bijkomend dat het OW-plan hierna nog niet voltooid is, het verhogen van de veiligheid tegen overstromingen uit zee bevindt zich voor enkele zones nog in de studiefase en dient deels nog uitgevoerd te worden.

Figuur 50 – Haven van Oostende: Kd-waarden voor stormcondities tijdens verschillende uitvoeringsfasen van het OW-plan



7 Lokale windgegenereerde golfgroei bij maatgevende stormen

Lokale windgegenereerde golfgroei wordt berekend gebruik makende van het spectrale golfmodel SWAN (versie 41.01A). De energie van een windsnelheid komende uit een zekere windrichting wordt zo getransfereerd over de beschikbare strijklengte lokaal in het havenbekken tot zich een volledig ontwikkeld golfveld instelt. Hierbij wordt de havenmond afgesloten; de reflectie van de verschillende structuren (kaaimuren en glooiingen) in de haven is overgenomen uit bijlage 3 in Gruwez *et al.*, 2011). Aan het nieuwe talud langs de Halve Maan is een waarde van 0.5 toegekend, overeenkomstig de reflectiecoëfficiënt voor dit type structuur in Thompson *et al.*, 1996.

Tabel 18 geeft een overzicht van de windsnelheden u_w per windrichting en maatgevende storm. De NNW- en NW-windsnelheden zijn afgeleid uit de extreme waardenverdelingen van windsnelheid voor een ontwerpduur van 2u (De Roo *et al.*, 2016a). Vervolgens is een reductie toegepast omdat aanlandige windsnelheden te Zeebrugge 28% lager blijken te zijn dan deze te MPO en MP7 (zie Figuur 2-13 in De Roo *et al.*, 2016b). Het verschil in windsnelheid tussen Oostende en Zeebrugge wordt verondersteld verwaarloosbaar te zijn (steunend op bijlage 3 ‘invloed wind’ in Gruwez *et al.*, 2011). Windsnelheden voor de tussenliggende richtingen zijn lineair geïnterpoleerd.

Tabel 18 – Windsnelheden u_w (op $z = 10\text{m}$ boven MSL) voor alle maatgevende stormen

T [jaar]	Windsnelheid u_w [m/s]			
	NW	323°	330°	NNW
1	12.7	12.4	12.1	11.8
10	14.9	14.8	14.7	14.6
100	16.8	16.9	17.0	17.1
1000	18.4	18.7	19.0	19.3

Figuur 51 illustreert de lokale windgegenereerde golfgroei bij maatgevende stormen met $T = 1$ tot 1000 jaar (subfiguren (a) tot (d)) uit windrichting 323° in de toekomstige havengeometrie. Resultaten voor de overige windsectoren bevinden zich in Bijlage 5. Bemerk dat de bovenzijde van de figuren overeenstemt met NNW (i.p.v. N) in realiteit.

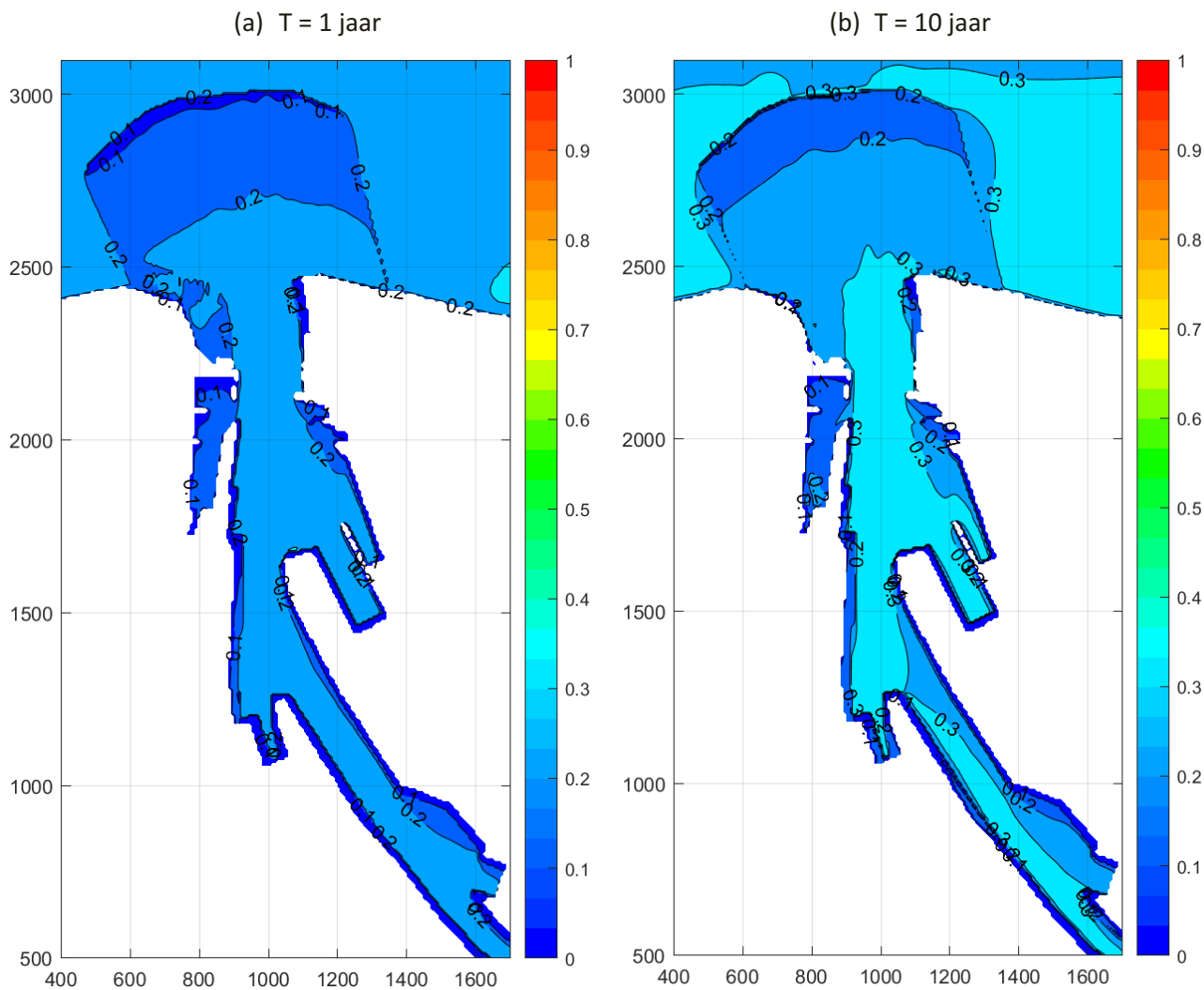
De verschillen tussen lokale windgegenereerde golfhoogtes uit de verschillende windrichtingen zijn klein; een stijging van een één- naar duizendjarige windsnelheid resulteert in een verdubbeling van de maximale significante golfhoogte H_{m0} , i.e. van 0.2m naar 0.4m, in de vaargeul (ter hoogte van de Halve Maan), het centrale deel van de haven en de voorhaven. De bijdrage door golfindringing tot de totale significante golfhoogte in de haven is significant groter, uitgezonderd helemaal achteraan ter hoogte van RYCO en bij een duizendjarige storm in de voorhaven. Daar worden beide bijdrages ongeveer even groot.

Algemeen is de lokale windgegenereerde golfhoogte eerder uniform in de vaargeul en over het centrale havenbekken en de voorhaven. De noordelijke zijde van de Halve Maan wordt wel het meest belast uit NW-richting. Hoe groter de windsnelheid, hoe meer de noordelijke zijde van de Rebo offshore wind terminal

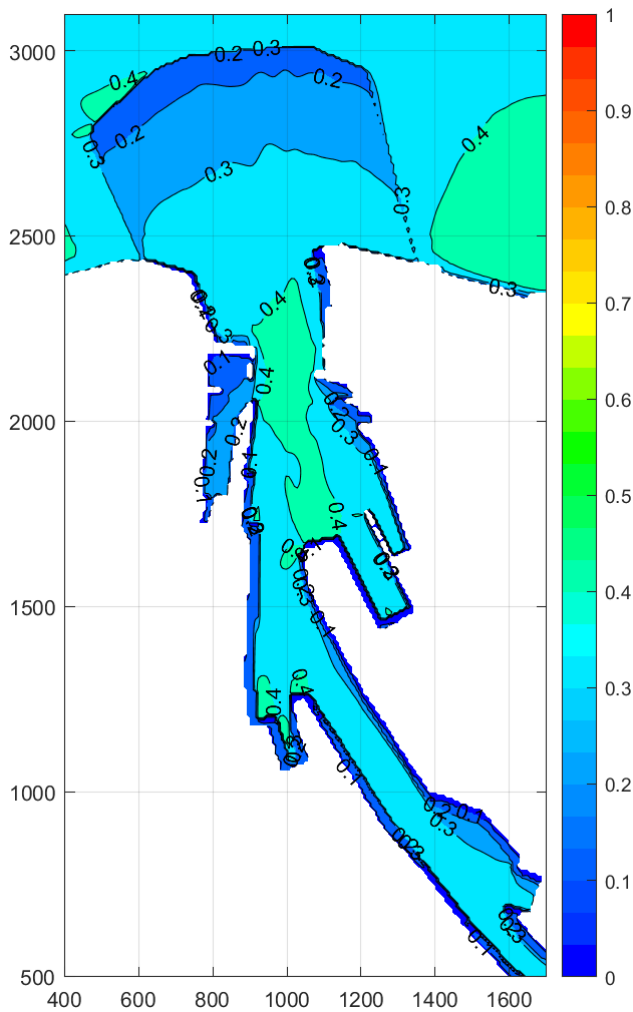
en de (omgeving van de) Demeysluis belast worden. Het Montgomerydok, de Wandelaarkaai (noordelijk gedeelte) en de westelijke kade ter hoogte van de offshore O&M site worden het minst belast.

De piekgolfperiode van deze lokale windgegenerateerde golven is slechts 1.8-2s, veel lager dan deze van golfindringing.

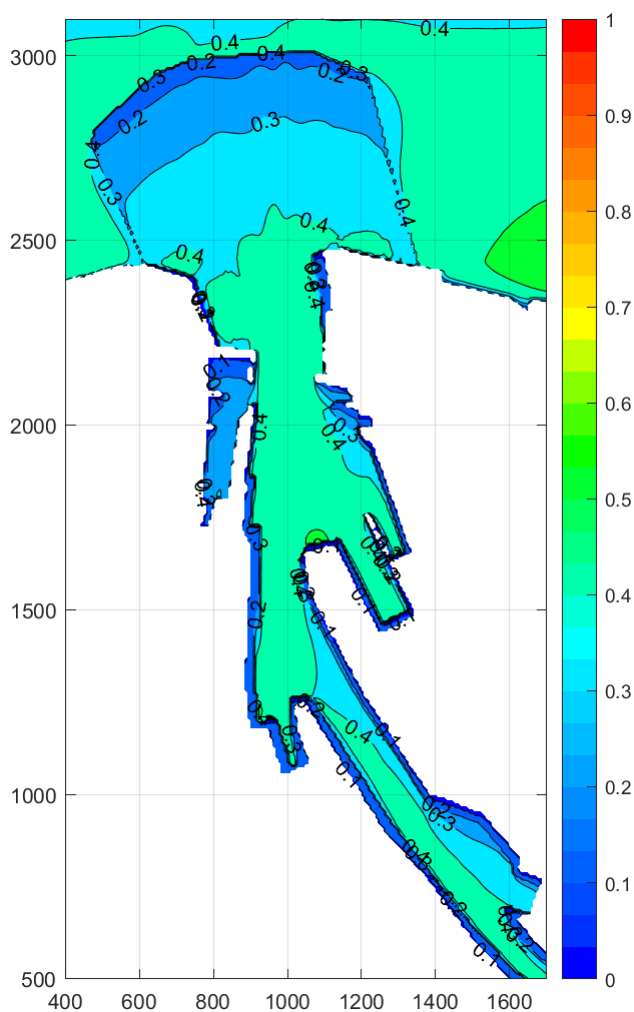
Figuur 51 – Lokale windgegenerateerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting 323°



(c) T = 100 jaar



(d) T = 1000 jaar



8 Besluit

De geplande lokale verbreding van de vaargeul ter hoogte van Halve Maan, i.e. de ‘situatie na verbreding Halve Maan’ in dit rapport, is het sluitstuk van de werken binnen het OW-plan om een verbeterde nautische toegankelijkheid van de haven te bekomen. In het voorbije decennium werd hiertoe ook de vaargeul verplaatst en 2 nieuwe havendammen (incl. nieuwe radartoren) gebouwd, i.e. de ‘huidige situatie’ (anno 2017) in dit rapport. Met de zeewaartse uitbouw van deze strekdammen verhoogde ook de veiligheid van (een deel van) Oostende, welke het tweede doel van het geïntegreerde OW-plan is. Deze laatste doelstelling is momenteel ook nog deels in uitvoering.

De invloed van de lokale verbreding van de vaargeul op kortkruinige golfindringing in de haven is begroot voor maatgevende stormen met verschillende terugkeerperiodes ($T = 1, 10, 100$ en 1000 jaar) komende uit de nadeligste richtingen: NW, 323° , 330° en NNW. Hiervoor is het numeriek model Mike 21 BW gebruikt, waarin zowel de ‘huidige situatie’ als de ‘situatie na verbreding Halve Maan’ gemodelleerd zijn. In de modelopbouw zijn enkele vereenvoudigingen doorgevoerd:

- (a) transmissie over de havendammen is niet beschouwd (maar wordt wel waargenomen bij grotere stormen);
- (b) het talud van de onderwaterberm ter hoogte van de combiwand Halve Maan is noodgedwongen verflauwd ingebouwd ($1/1.5$ naar $1/3$). Hierdoor is de breedte van het onderwaterplateau kleiner dan in werkelijkheid en is er geen plateau meer aanwezig ter hoogte van hoek naar Visserijsluis;
- (c) de omgeving rond de aanlegsteiger van de veerboot aan de Visserijsluis is vereenvoudigd ingebouwd als kaaimuur, wat mogelijks zorgt voor te veel reflectie;
- (d) de open verbinding naar de Noordede is ingebouwd als een verticale muur, waardoor de waarden in de nabijheid van deze ‘structuur’ te hoog zijn.

Validatie van de numerieke modellen ‘huidige situatie’ is gebeurd aan de hand van in situ data gemeten op verschillende locaties in de haven. Vier directionele stormen werden geselecteerd, die optraden nadat de bouw van de havendammen quasi voltooid was (na zomer 2013). De korte significante golfhoogtes van het numeriek model komen relatief goed overeen met deze verwerkt uit de in situ data. Uit vergelijking van de golfspectra blijkt wel dat de energie van kortere golven ($T < 4s$) steeds ontbreekt in het numeriek model, mogelijks door de noodzakelijke truncatie van het spectrum. De lange golfcomponent werd niet gevalideerd aangezien niet alle lange golfenergie door Mike 21 BW kan gemodelleerd worden.

Validatie van de numerieke modellen ‘situatie na verbreding Halve Maan’ dient uitgevoerd te worden eens er bijv. in situ data beschikbaar zijn. Intussen zijn de resultaten van het numeriek model voor een duizendjarige storm (uit richting 323°) wel vergeleken met deze van een fysisch model (WL-project 18_066). Algemeen zijn de significante golfhoogtes in het midden van de vaargeul (ter hoogte van de Halve Maan) en langs de Churchillkaai hoger in het fysisch model terwijl deze in het Montgomerydok voornamelijk lager zijn. Beide modellen tonen langsheen de transecten wel ongeveer dezelfde trends in golfhoogteverschillen.

Vergelijking van het golfklimaat door storm geïnduceerde golfindringing in de ‘huidige situatie’ en ‘situatie na verbreding Halve Maan’ toont aan dat in de huidige situatie, dankzij de bouw van de havendammen, golfenergie grotendeels gedissipeerd wordt in de buitenhaven (reflectie richting buitengaats en schaduwzijde van de havendammen). Na verbreding van de vaargeul dringt logischerwijze meer golfenergie de binnenhaven in. De golfindringingscoëfficiënt, i.e. de K_d -waarde, neemt maximaal toe van 0.2 tot 0.7 in de vaargeul centraal in de as kaaivlak NSYC – einde combiwand Halve Maan bij een éénjarige storm (uit alle golfrichtingen). Dit resulteert in een stijging van de significante golfhoogte H_{m0} van 0.5-0.6 tot 1.75-2m. Bij hogere terugkeerperiodes daalt echter het verschil in K_d -waarde tussen de ‘huidige situatie’ en ‘situatie na verbreding Halve Maan’ naar 0.45-0.4 tot 0.35 resp. bij een tien- en duizendjarige storm (golfrichtingen 330° - 323°). De significante golfhoogte H_{m0} wordt dus niet veel groter in de as.

Lokaal in het centrale deel van de haven (Churchillkaai, noordelijke kaaimuur Rebo offshore wind terminal, Wandelaarkaai) en in het Montgomerydok (noordelijke zone) neemt de Kd-waarde wel licht toe van een één- naar tienjarige storm door hogere reflectie. Dit effect vertaalt zich evenwel niet door richting voorhaven, waar de grootste Kd-waarden optreden voor een éénjarige storm. Voor zwaardere stormen (T = 100 en 1000 jaar) treedt golfoverslag en -overloop over de kaaivlakken op in de binnenhaven, waardoor de reflectie van golven daalt en bijgevolg ook de Kd-waarde.

Na verbreding van de vaargeul neemt de diffractie naar de Visserijsluis toe; de Kd-waarde stijgt met 0.3, wat resulteert in 1m hogere (totale) significante golfhoogtes in het begin van de fuik voor een éénjarige storm (belangrijkste golfrichtingen 323° en NW). Voor de Demeysluis is dit niet zo. De Kd-waarde ter hoogte van de fuik neemt slechts weinig toe (alle richtingen), wat resulteert in 0.25m hogere (totale) significante golfhoogtes.

Naast golfindringing is de lokale windgegenereerde golfgroei begroot voor dezelfde maatgevende stormen in de 'situatie na verbreding Halve Maan' met het spectrale golfmodel SWAN. De verschillen tussen lokale windgegenereerde golfhoogtes uit de verschillende windrichtingen zijn klein; een stijging van een één- naar duizendjarige windsnelheid resulteert in een verdubbeling van de maximale significante golfhoogte van 0.2m naar 0.4m in de vaargeul (ter hoogte van de Halve Maan), het centrale deel van de haven en de voorhaven. De bijdrage door golfindringing tot de totale significante golfhoogte in de haven is bijgevolg significant groter, uitgezonderd helemaal achteraan ter hoogte van RYCO en bij een duizendjarige storm in de voorhaven. Daar zijn beide bijdrages ongeveer even groot.

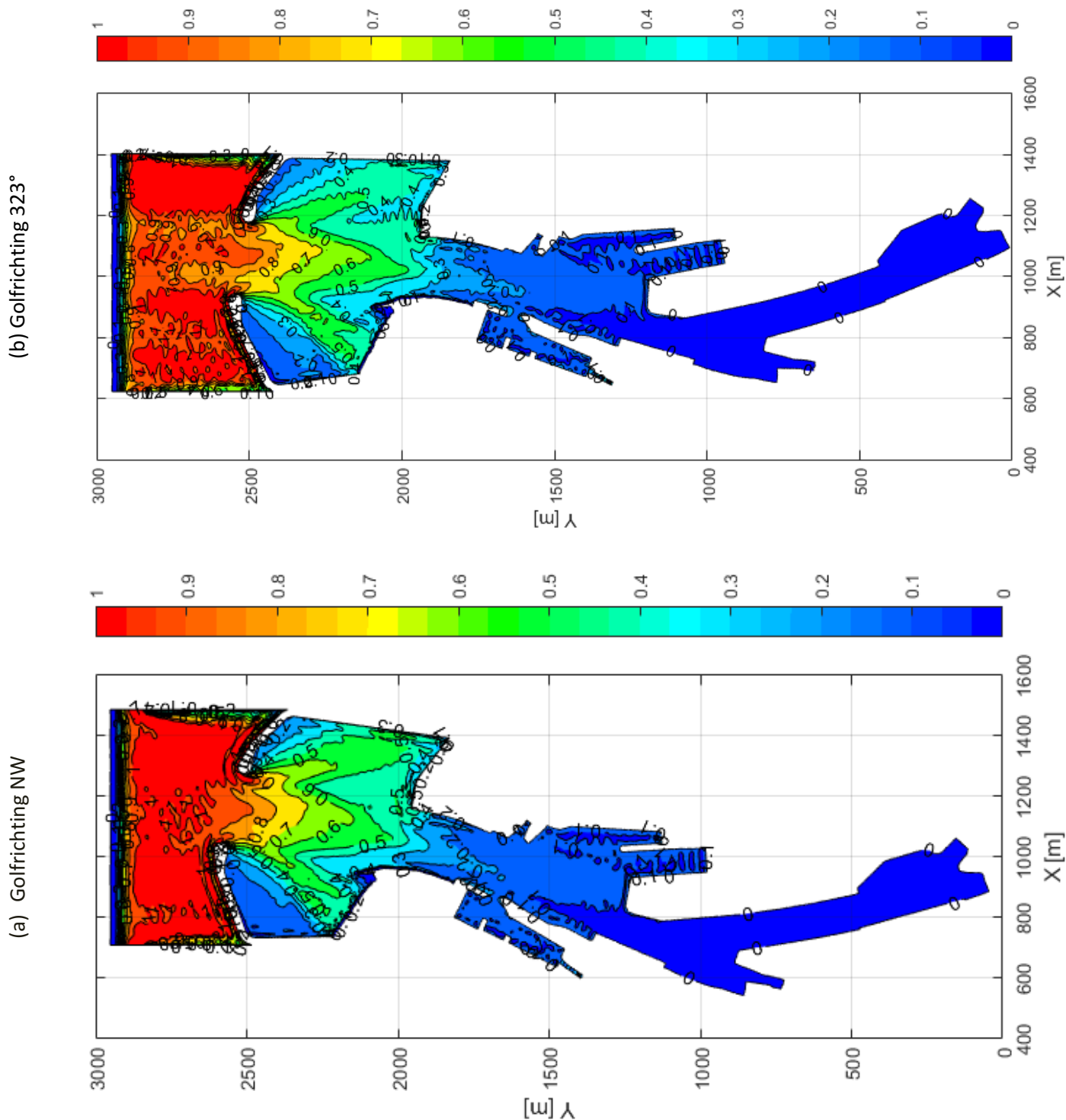
9 Referenties

- Afdeling Maritieme Toegang.** (2019). Projecten 'Havendammen en Radartoren Oostende' en 'Verbreding havengeul ter hoogte van Halve Maan'. Available at: <http://www.maritiemetoegang.be/projecten/ow-plan-oostende>
- Brorsen, M.; Helm-Petersen, J.** (1998). On the Reflection of Short-Crested Waves in Numerical Models. *Int. Conf. Coast. Eng.*: 394–407. Available at: <http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/viewFile/5617/5289>
- De Roo, S.; Nguyen, D.** (2019). Bepaling golf randvoorwaarden fysisch model gebruik makende van numerieke modellering met MIKE21 BW en SWAN. *WL Memo's*, 18_066_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen
- De Roo, S.; Suzuki, T.; Vanneste, D.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017a). 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.; Suzuki, T.; Vanneste, D.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017b). Kortkruinig golfklimaat ter hoogte van de Halve Maan (haven Oostende): golfindringing voor een storm met T = 100 jaar en T = 1000 jaar. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 16_096_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. VII, 14 pp.
- De Roo, S.; Trouw, K.; Ruiz Parrado, I.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016a). Het Hydraulisch randvoorwaardenboek (2014). *WL Rapporten*, 14_014. Waterbouwkundig Laboratorium/Fides Engineering: Antwerpen
- De Roo, S.; Trouw, K.; Ruiz Parrado, I.; Willems, P.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2016b). Het hydraulisch randvoorwaardenboek 2014: achtergrondrapport. Versie 4.0. *WL Rapporten*, 14_014_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. XXIII, 104 + 96 p. appendices pp.
- De Roo, S.; Vanneste, D.; Suzuki, T.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017c). Hydraulische randvoorwaarden ter hoogte van de haveningang (haven Oostende). Normaal golfklimaat (T = 1 en 10 jaar) en extremer golfklimaat bij laag water (T = 100 jaar). *WL Rapporten*, 17_009_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. VII, 13 + 5 pp.
- DHI.** (2017a). Mike 21 - Boussinesq wave module: Scientific documentation. 21 pp.
- DHI.** (2017b). Mike 21 - Boussinesq wave module: User manual. 196 pp.
- Goda, Y.** (2010). Random Seas and Design of Maritime Structures. 3rd ed.. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 33 (P. L.-F. Liu, Ed.). World Scientific. ISBN 978-981-4282-39-0. doi:10.1142/7425
- Gruwez, V.; Bolle, A.; Hassan, W.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2011). Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens: deel 1. Haven van Oostende. *WL Rapporten*, 769_03. Waterbouwkundig Laboratorium/IMDC: Antwerpen
- Gruwez, V.; Bolle, A.; Suzuki, T.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2012). Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens: deel 2. Haven van Zeebrugge, 769_03
- Hassan, W.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F.** (2011). Extreme wave characteristics inside the harbour of Oostende: physical modeling with different storm directions (T2). *WL Rapporten*, 627_05. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerp
- IMDC.** (2014a). Golfmetingen in de kusthavens - Maandrapport 12: november 2013. IMDC: Antwerpen. 107 pp.
- IMDC.** (2014b). Golfmetingen in de kusthavens - Stormrapport 1: 10 oktober 2013. IMDC: Antwerpen. 159 pp.

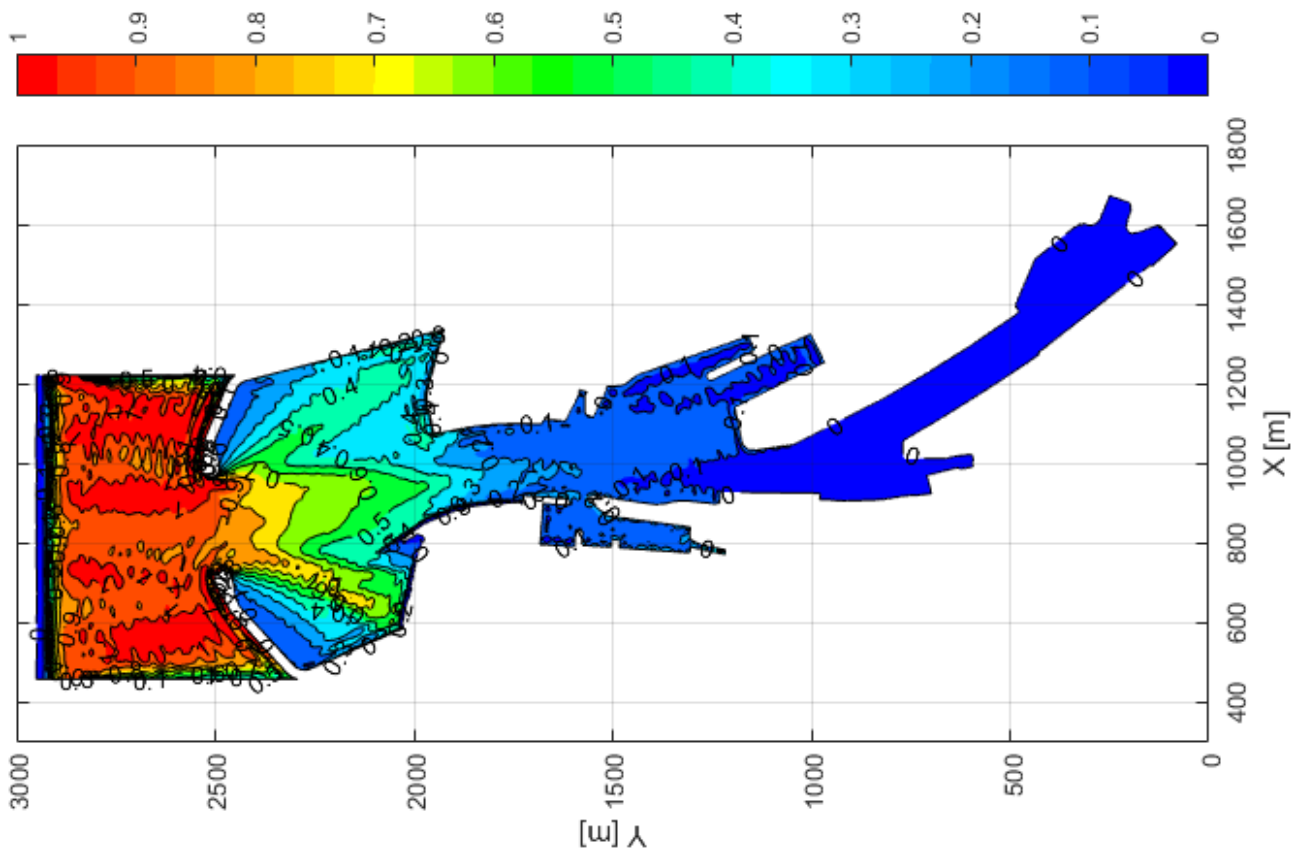
- IMDC.** (2015). Golfmetingen in de kusthavens - Stormrapport 3: 22 oktober 2014. IMDC: Antwerpen. 159 pp.
- Madsen, P.A.; Sørensen, O.R.** (1992). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry. *Coast. Eng.* 18(3-4): 183-204. doi:10.1016/0378-3839(92)90019-Q
- Monteban, D.** (2016). Numerical modelling of wave agitation in ports and access channels. A comparison study between SWASH and MIKE 21 BW. TU Delft, The Netherlands. 118 pp.
- PoO.** (2019). Port of Oostende - Map of the port (version May 2019). Available at: <https://www.portofoostende.be/about>
- Sorensen, O.R.; Schäffer, H.A.; Sorensen, L.S.** (2004). Boussinesq-type modelling using an unstructured finite element technique. *Coast. Eng.* 50: 181-198
- Technum; IMDC; Alkyon.** (2002). Structureel herstel van de kustverdediging te Oostende en verbetering van de haventoeegang naar de haven van Oostende: Hydrodynamische randvoorwaarden voor het ontwerp. Waterstanden en golfklimaat. Technum: Oostende. 264 pp.
- Thompson, E.F.; Chen, H.S.; Hadley, L.L.** (1996). Validation of numerical model for wind waves and swell in harbors. *J. Waterw. Port, Coast Ocean Eng.* 122(5): 245-257
- Tractebel.** (2017a). Grondplan - Halve Maan Oostende: verbreding havengeul (P.009723-DR0008-IFA-10 (grondplan taluds).pdf)
- Tractebel.** (2017b). Overzichtsplan profielen zijde vaargeul - Halve Maan Oostende: verbreding vaargeul (P.009723-DR0002-IFA-07 (snedes vaargeul).pdf)
- Vanneste, D.; Willems, M.; Peeters, P.; Mostaert, F.** (2017). Golfmetingen haven Oostende tijdens storm 'Dieter'. versie 3.0. *WL Rapporten, 17_008_1*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen. Available at: <http://documentatiecentrum.watlab.be/owa/imis.php?module=ref&refid=285858>
- Verhaeghe, H.; Versluys, T.** (2005). Golfmetingen binnenhaven Oostende: Stormrapport I winter 2004-2005. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen. Vakgroep Civiele Techniek: Gent
- Verhaeghe, H.; Versluys, T.** (2008). Golfmetingen binnenhaven Oostende: Stormrapport V, GBO172/094. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen. Vakgroep Civiele Techniek: Gent
- Versluys, T.** (2008a). Golfmetingen binnenhaven Oostende: Stormrapport II 8-9 november 2007. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen. Vakgroep Civiele Techniek: Gent. 54 pp.
- Versluys, T.** (2008b). Golfmetingen binnenhaven Oostende: Stormrapport III 29 februari - 1 maart 2008. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen. 36 pp.
- Versluys, T.** (2008c). Golfmetingen binnenhaven Oostende: Stormrapport IV 21 maart 2008. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen. Vakgroep Civiele Techniek: Gent. 36 pp.
- Versluys, T.** (2008d). Golfmetingen binnenhaven Oostende: Stormrapport VI 21-23 november 2008. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen. Vakgroep Civiele Techniek: Gent. 27 pp.
- Versluys, T.** (2009). Golfmetingen binnenhaven Oostende: Stormrapport VII 10 februari 2009. Universiteit Gent. Faculteit Ingenieurswetenschappen. Vakgroep Civiele Techniek: Gent. 25 pp.
- Verwaest, T.; Vanpoucke, P.; Vanderkimpfen, P.; Van der Biest, K.; Reyns, J.; Peeters, P.; Kellens, W.; Vanneville, 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
- Willems, M.; Suzuki, T.; Vanneste, D.; Mostaert, F.** (2020). Oostende schaalmodel golfovertopping bij zeer schuine golven: Deelrapport 1 - Montgomerydok. *WL Rapporten*. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Bijlage 1 Figuren met resultaten golfindringing (volledige haven): Kd-waarden – huidige havengeometrie – alle maatgevende stormen

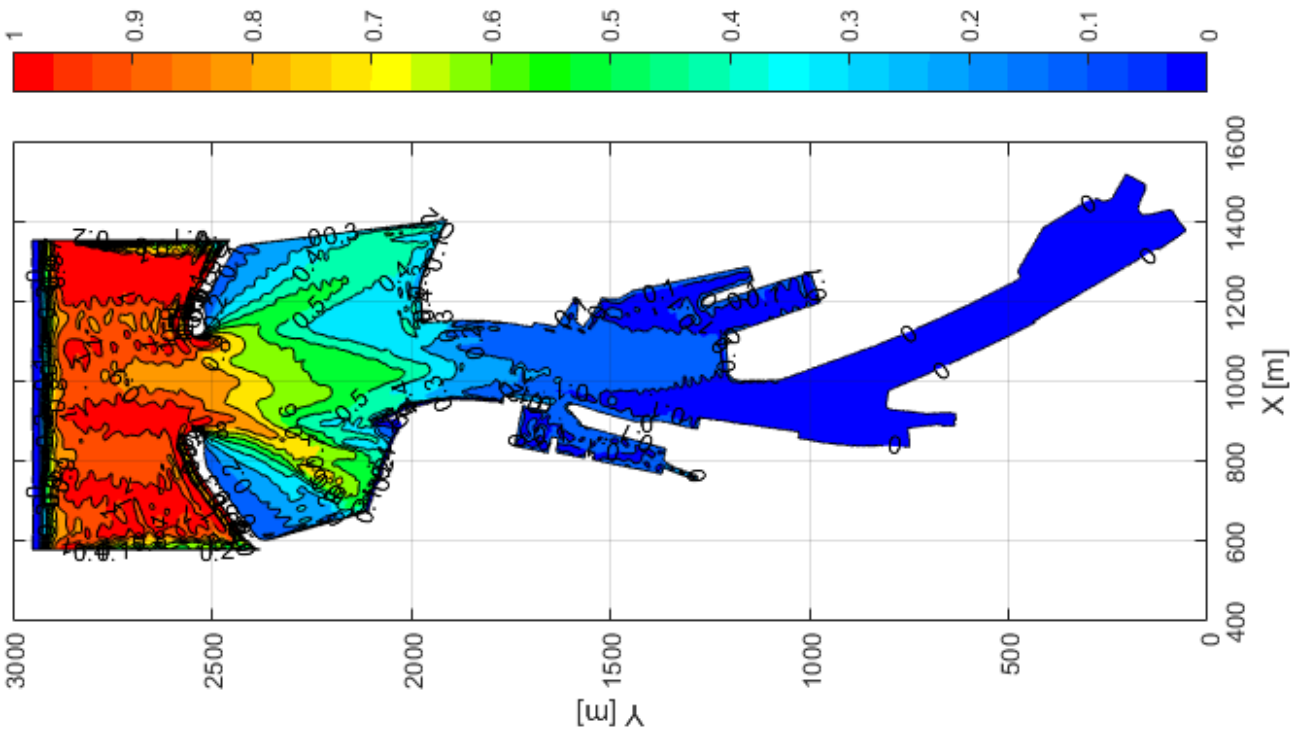
Figuur 52 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar



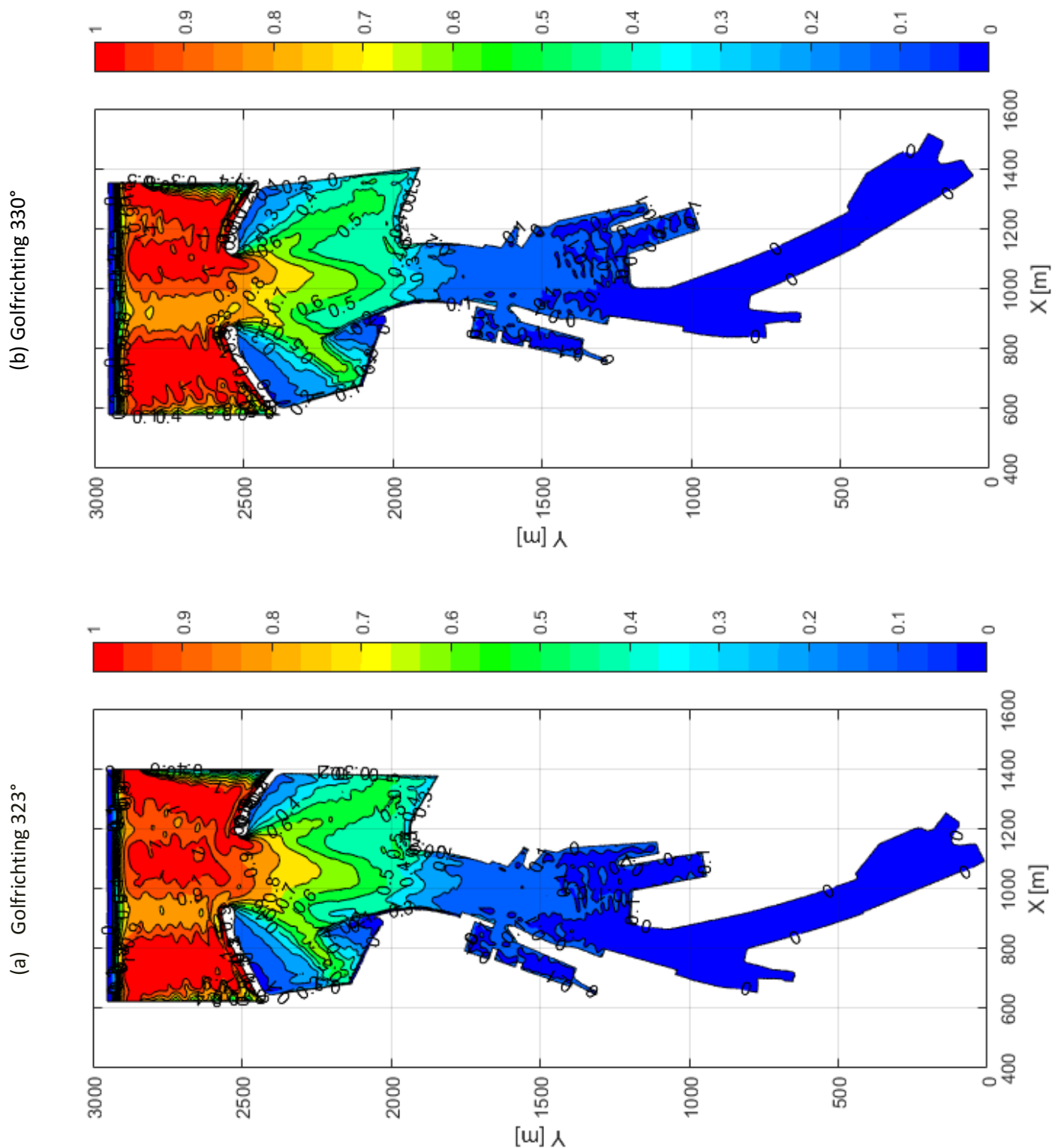
(d) golfrichting NNW



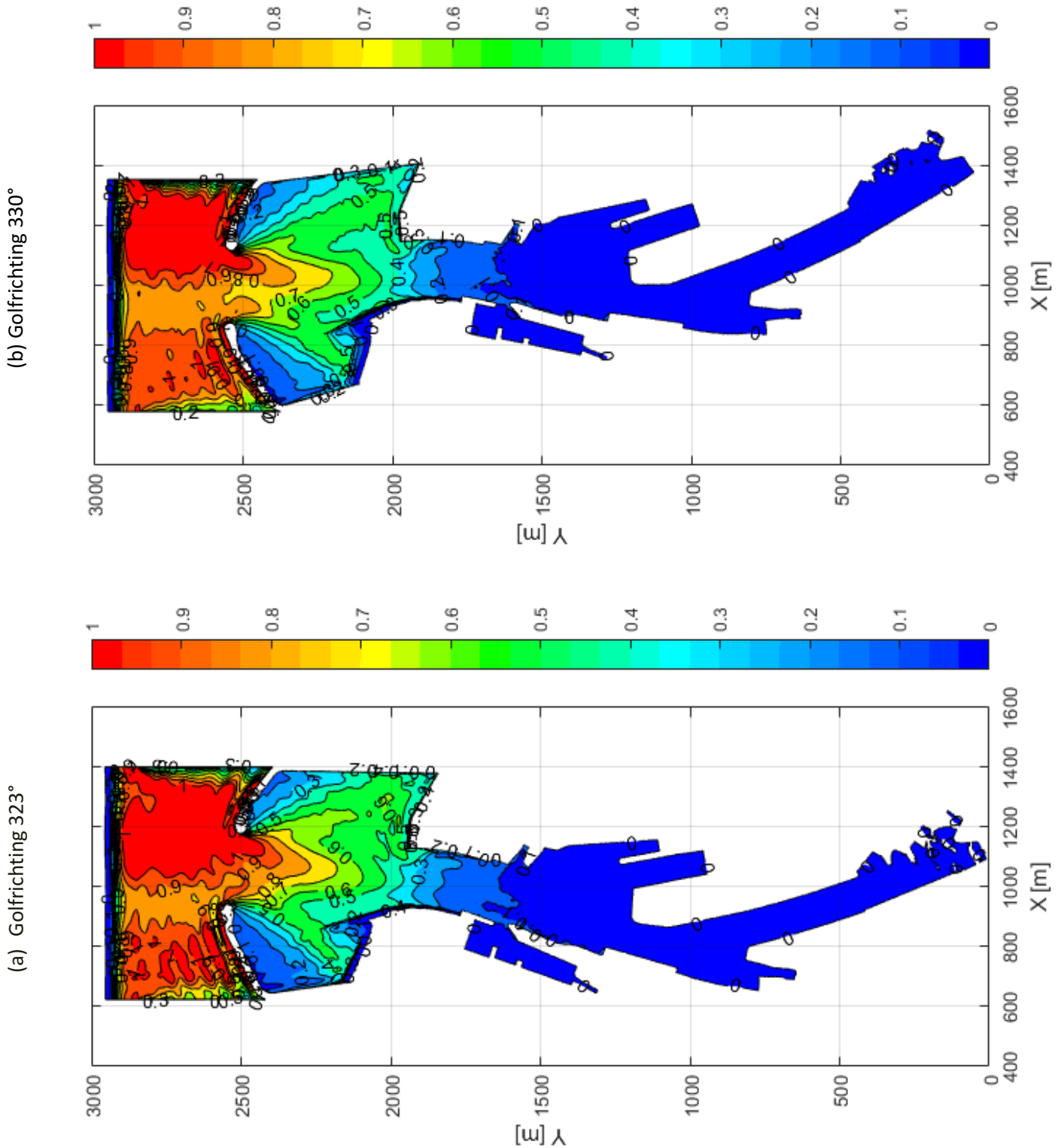
(c) Golfrichting 330°



Figuur 53 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar

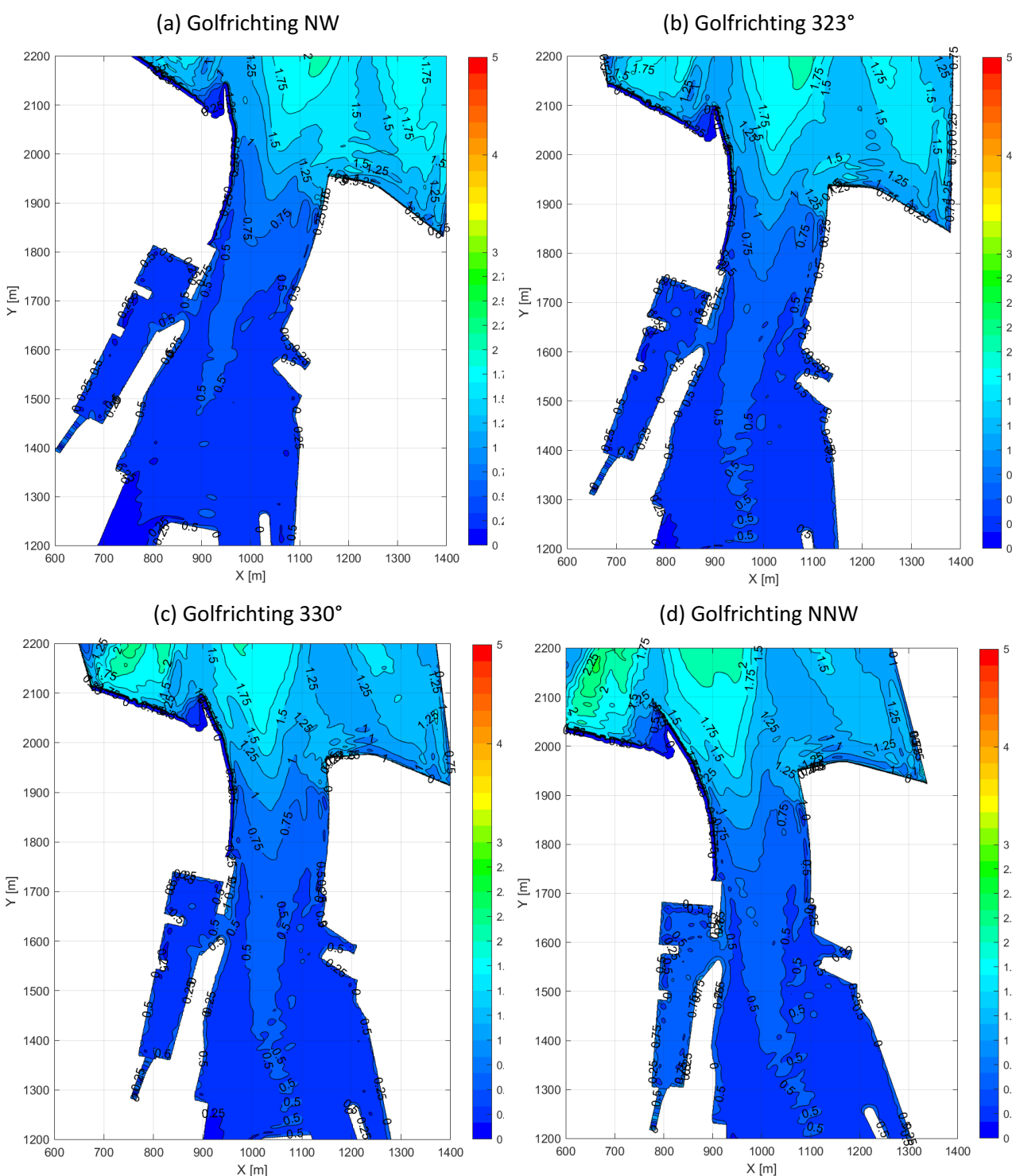


Figuur 54 – Kd-waarde voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar

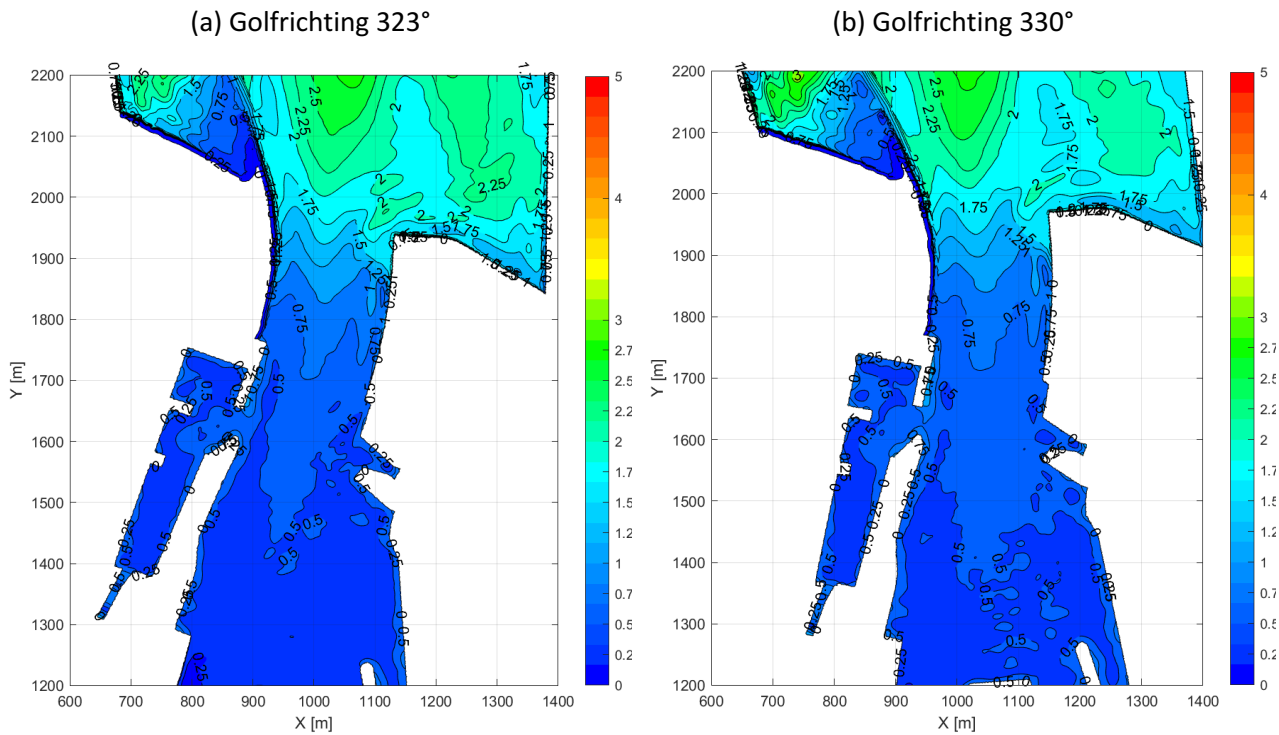


Bijlage 2 Figuren met resultaten golfindringing (HM – centrale deel haven – MGD): significante golfhoogtes – huidige havengeometrie – alle maatgevende stormen

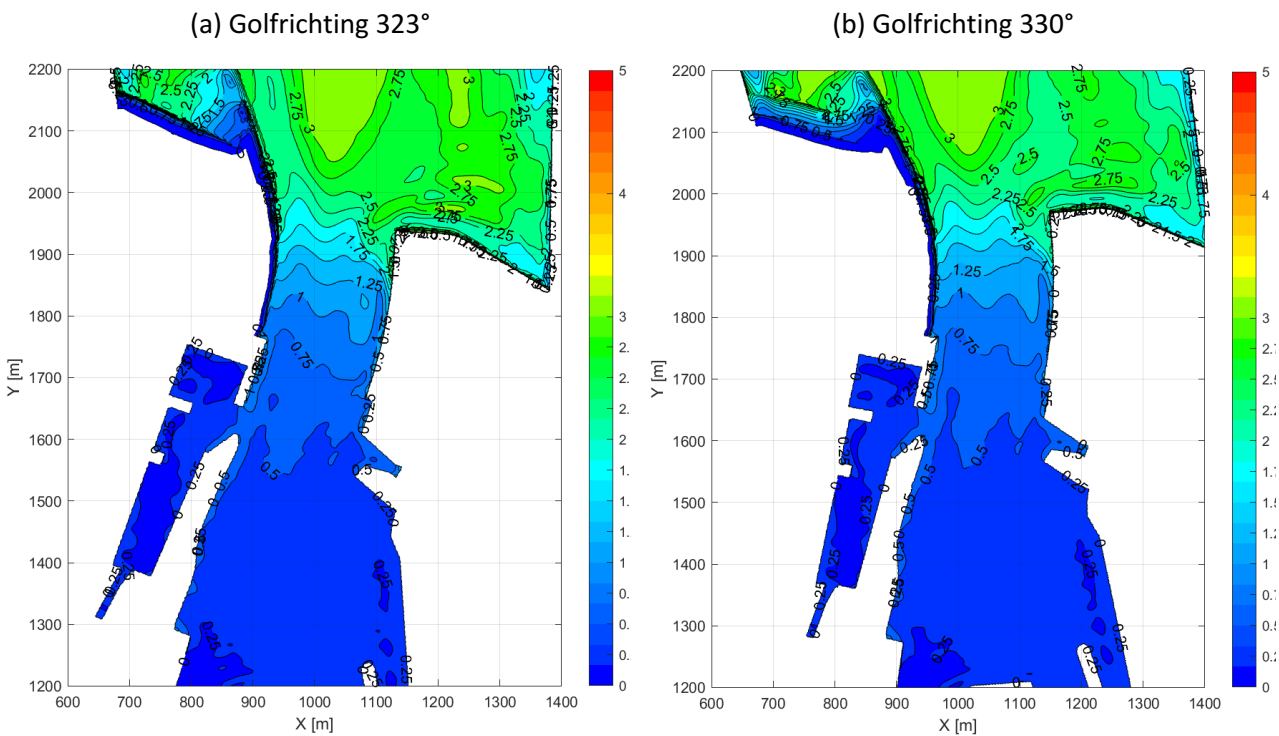
Figuur 55 – Significante golfhoogte H_{mo} [m] voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1 jaar



Figuur 56 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 10 jaar

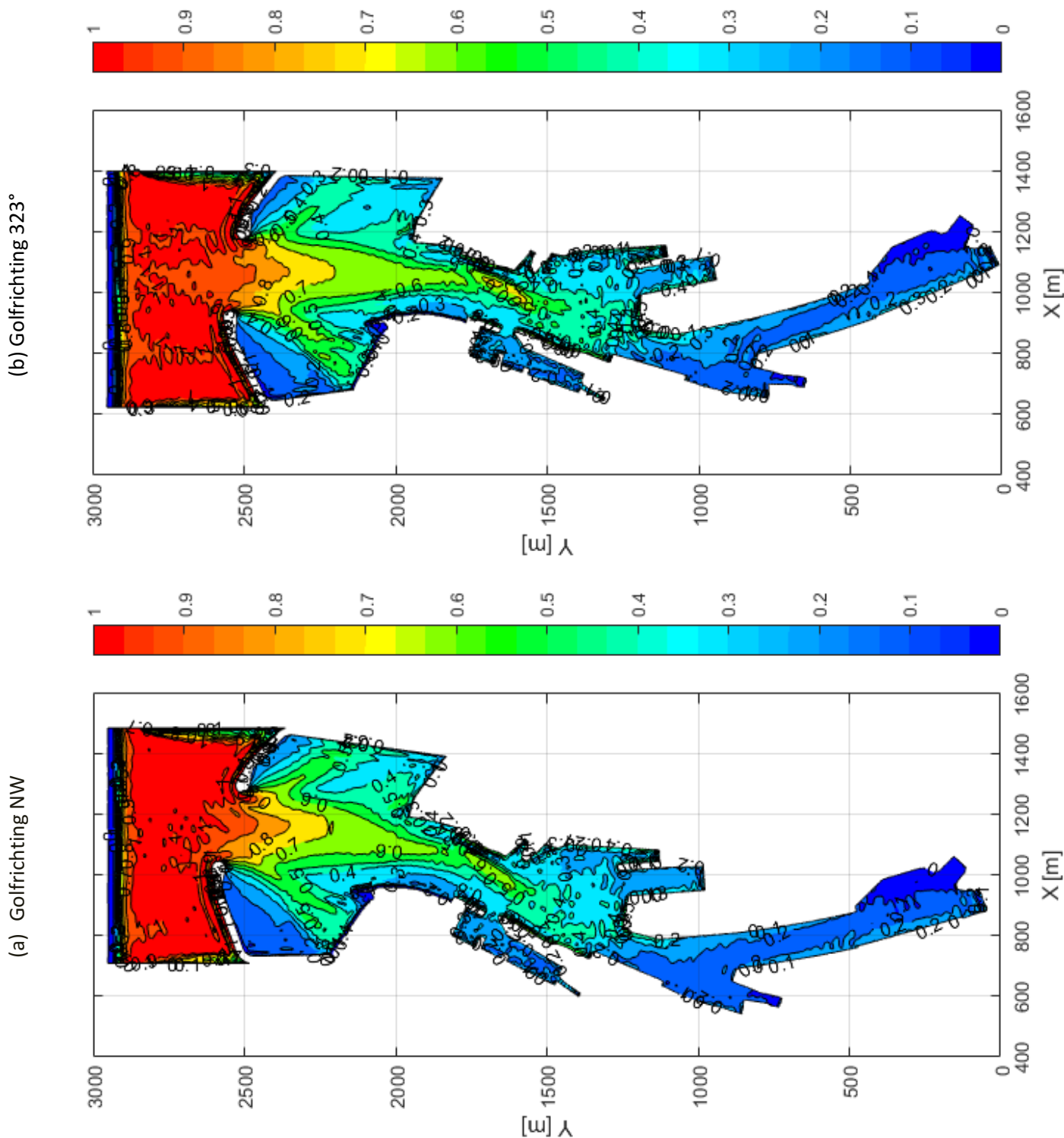


Figuur 57 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – huidige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar

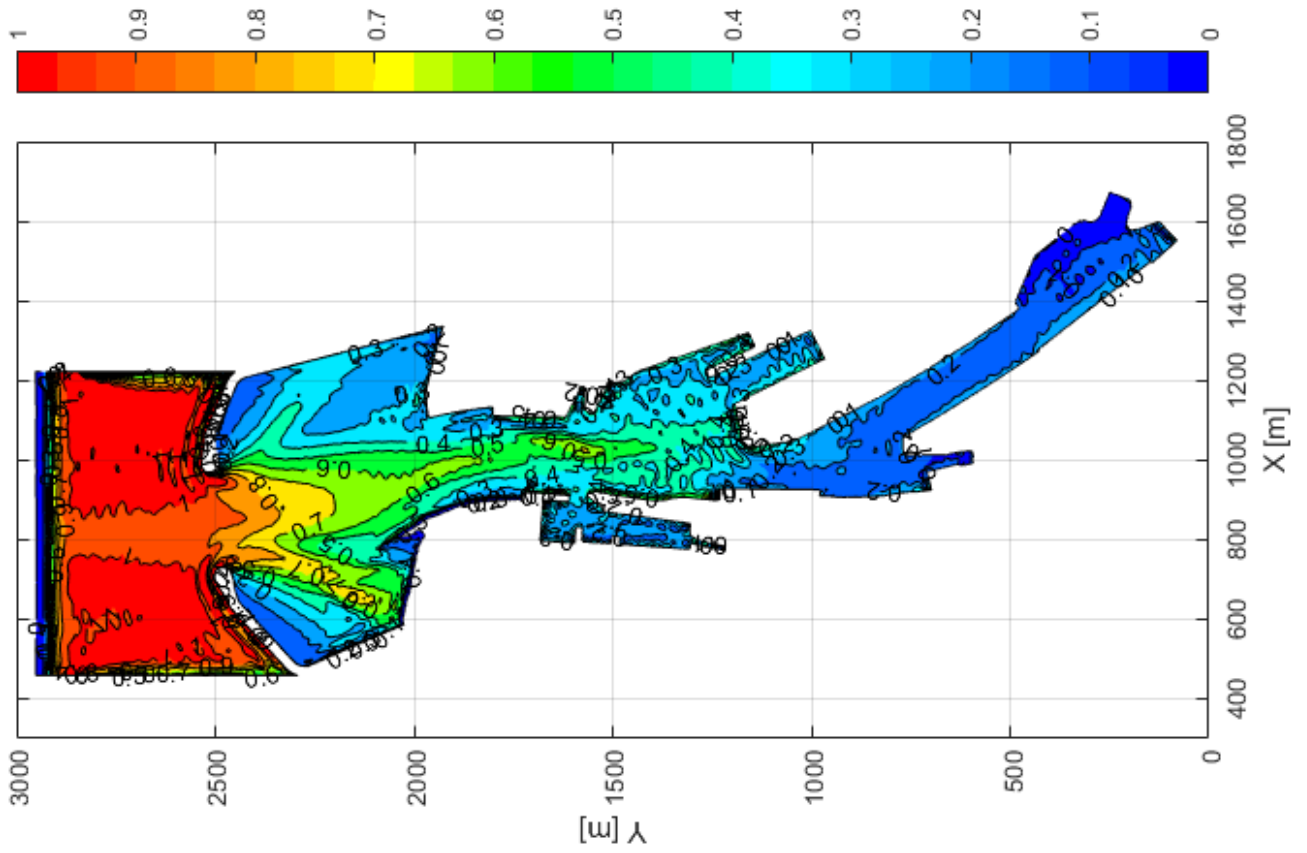


Bijlage 3 Figuren met resultaten golfindringing (volledige haven): Kd-waarden – toekomstige haven geometrie – alle maatgevende stormen

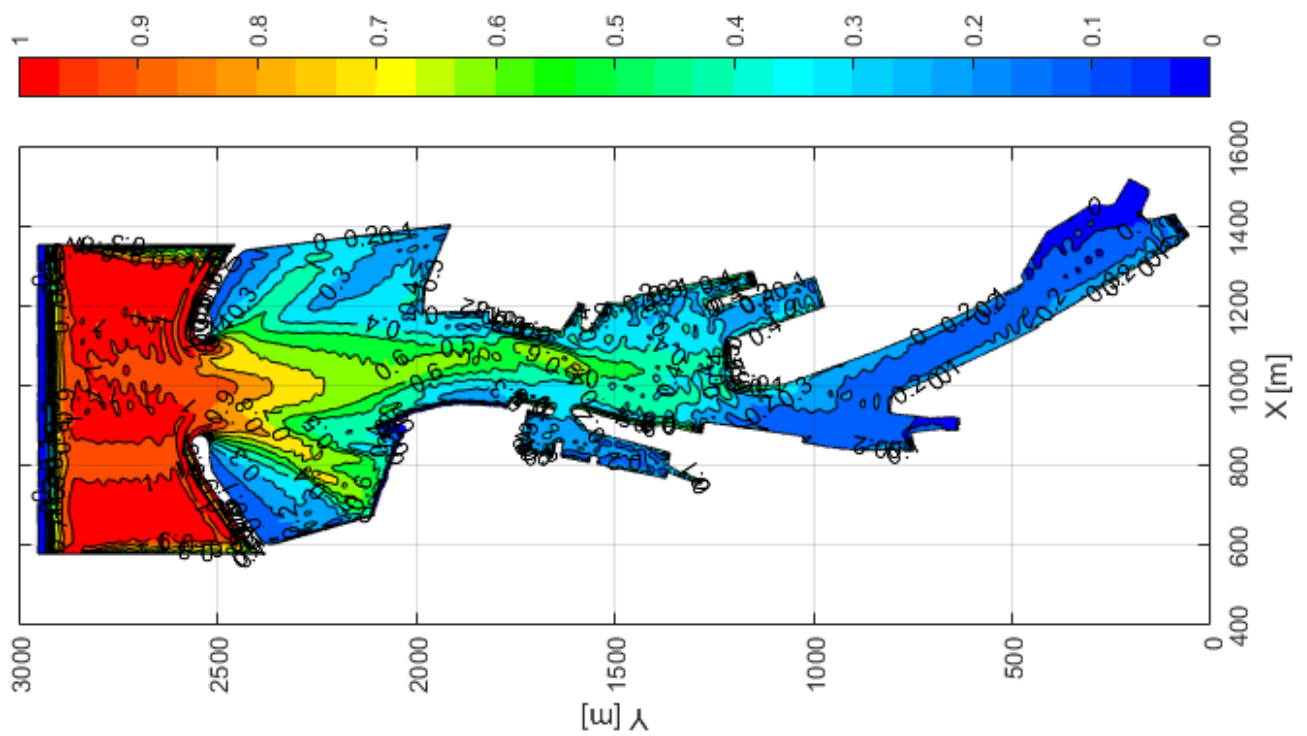
Figuur 58 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige haven geometrie – storm met T = 1 jaar



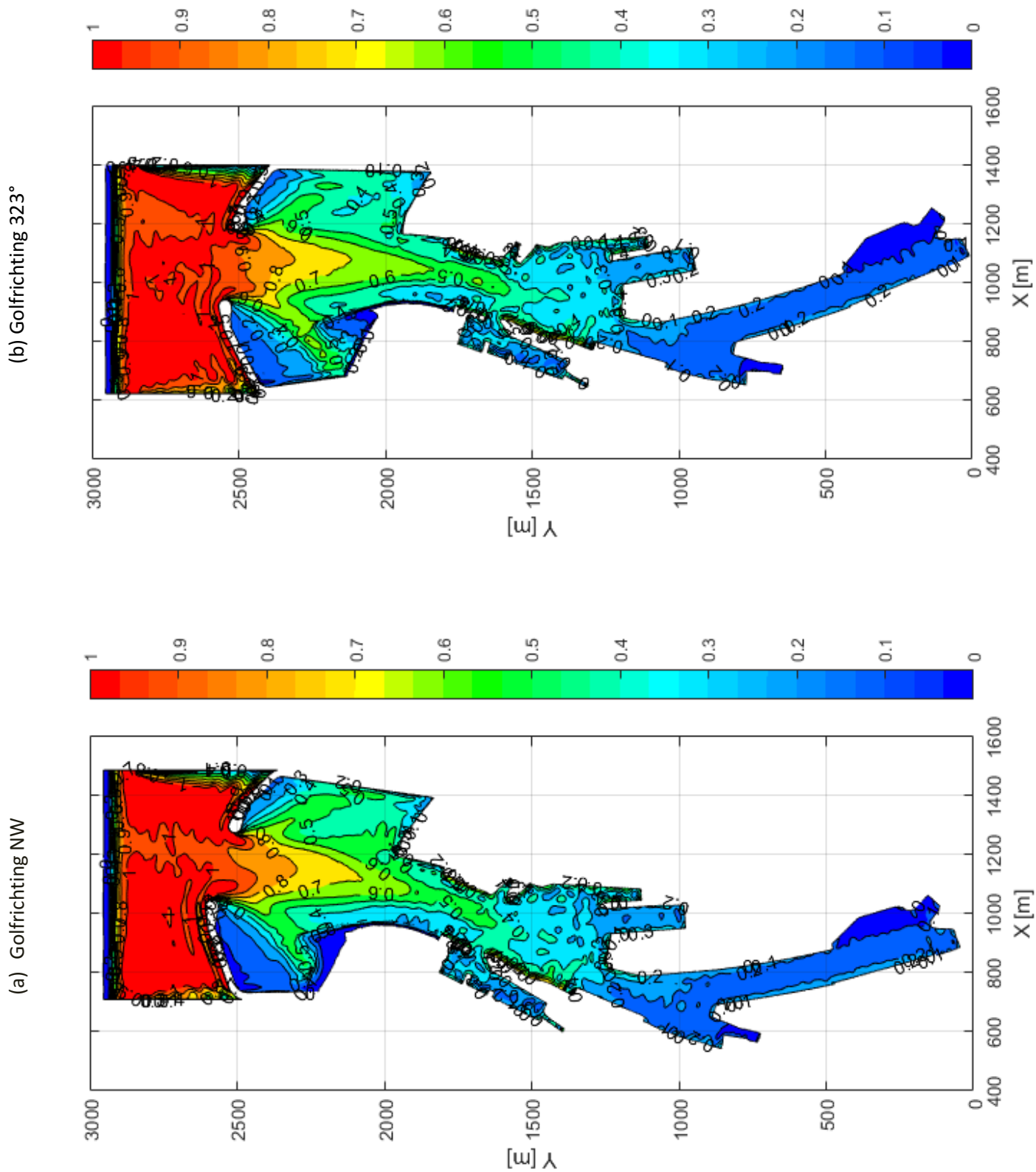
(d) Golfrichting NNW



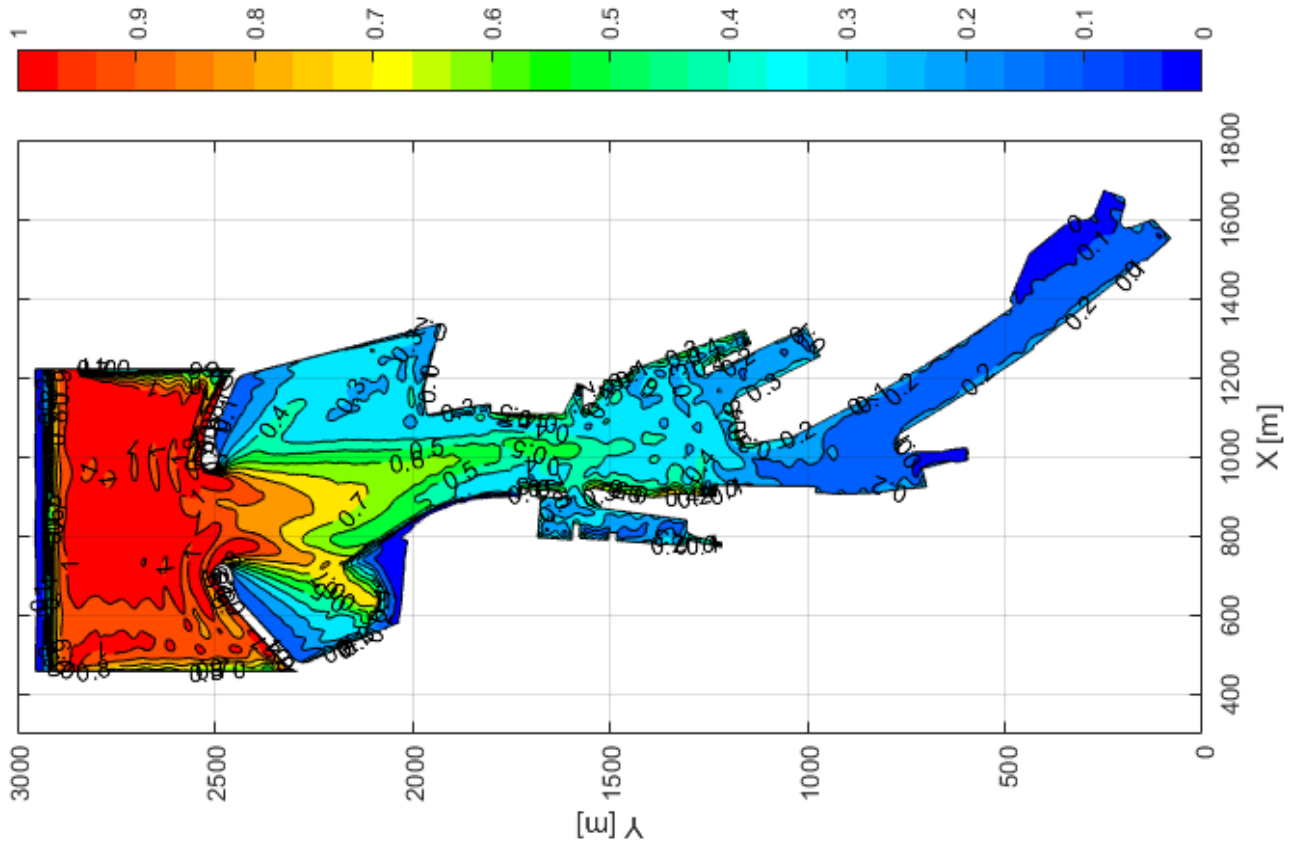
(c) Golfrichting 330°



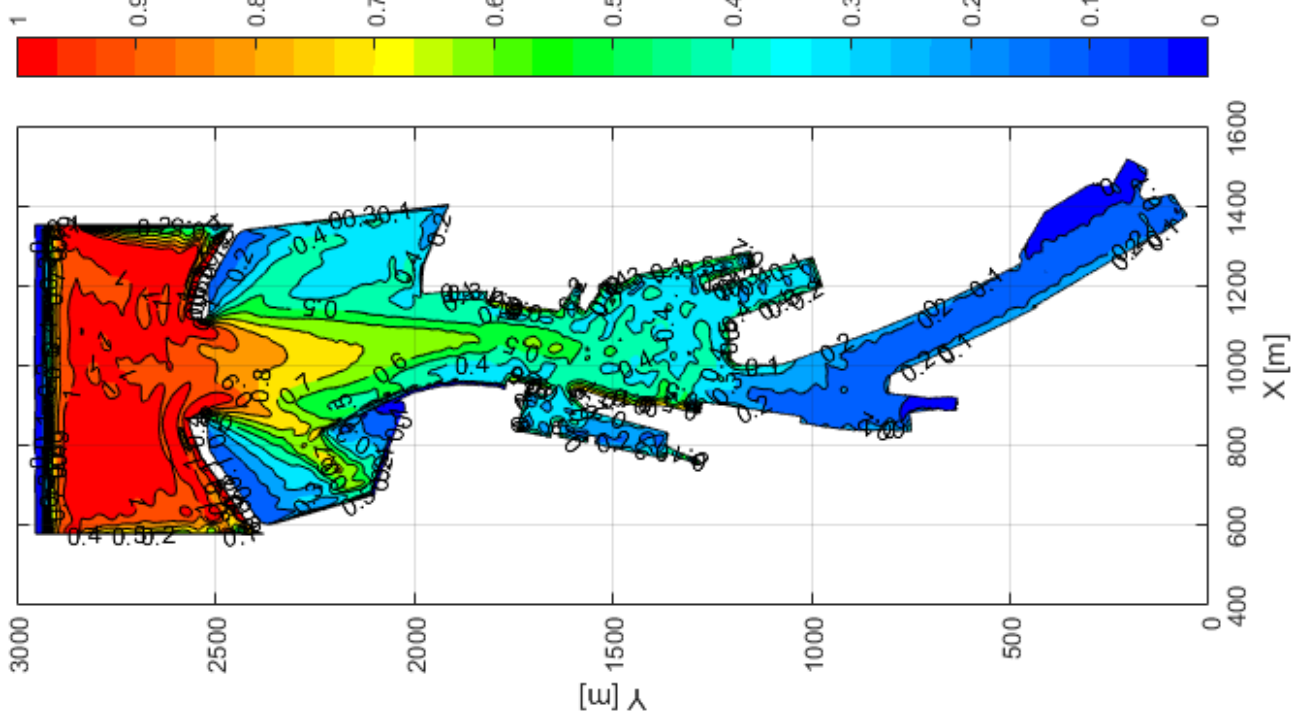
Figuur 59 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 10 jaar



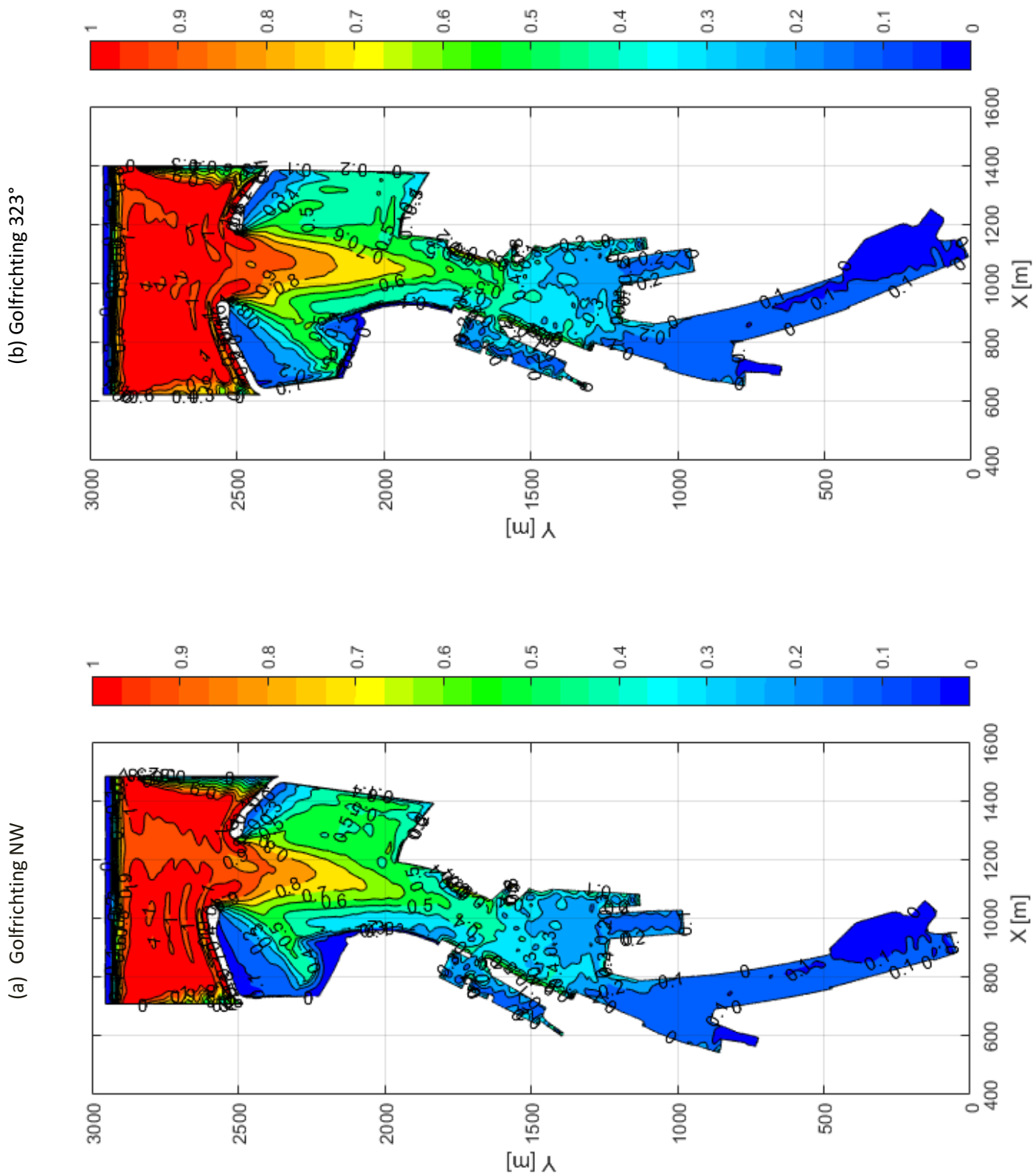
(d) Golfrichting NNW



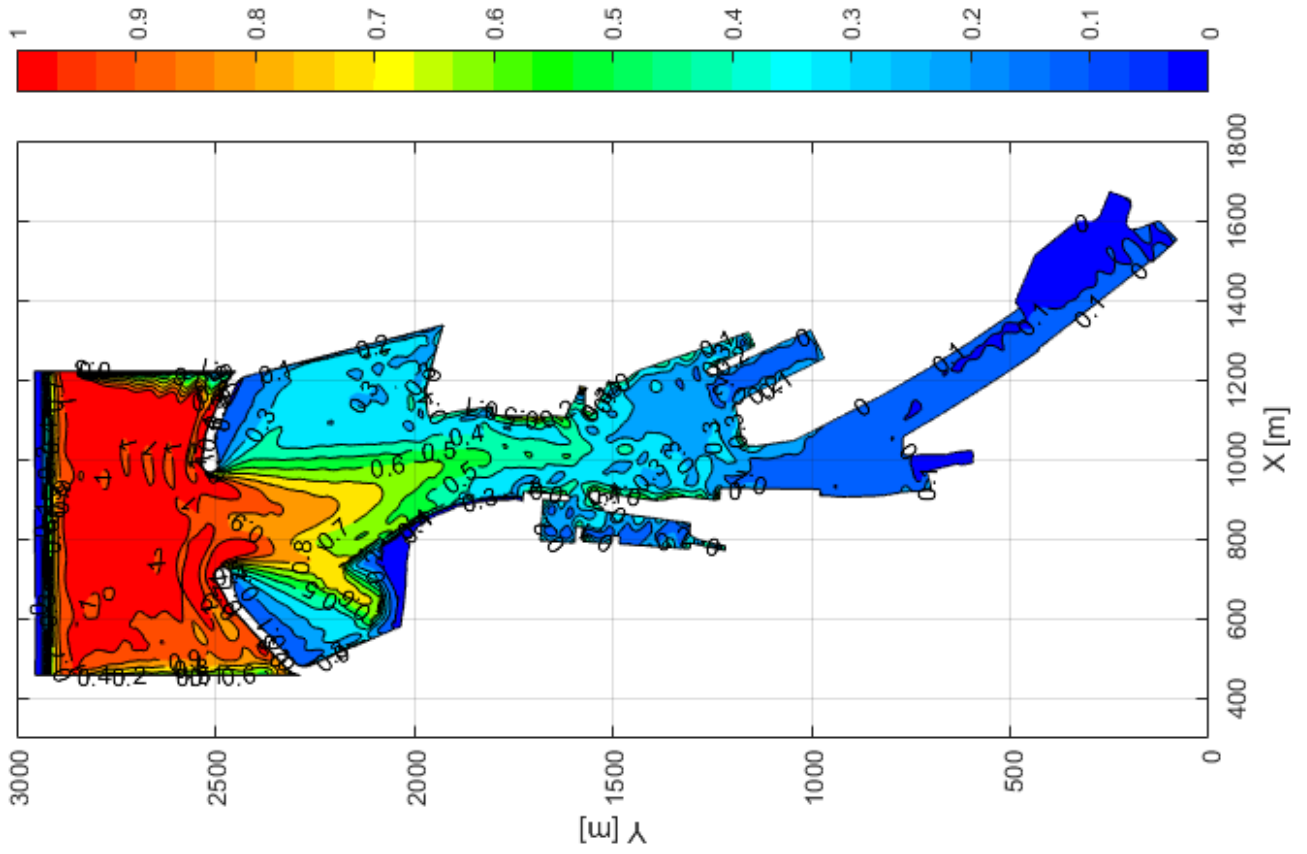
(c) Golfrichting 330°



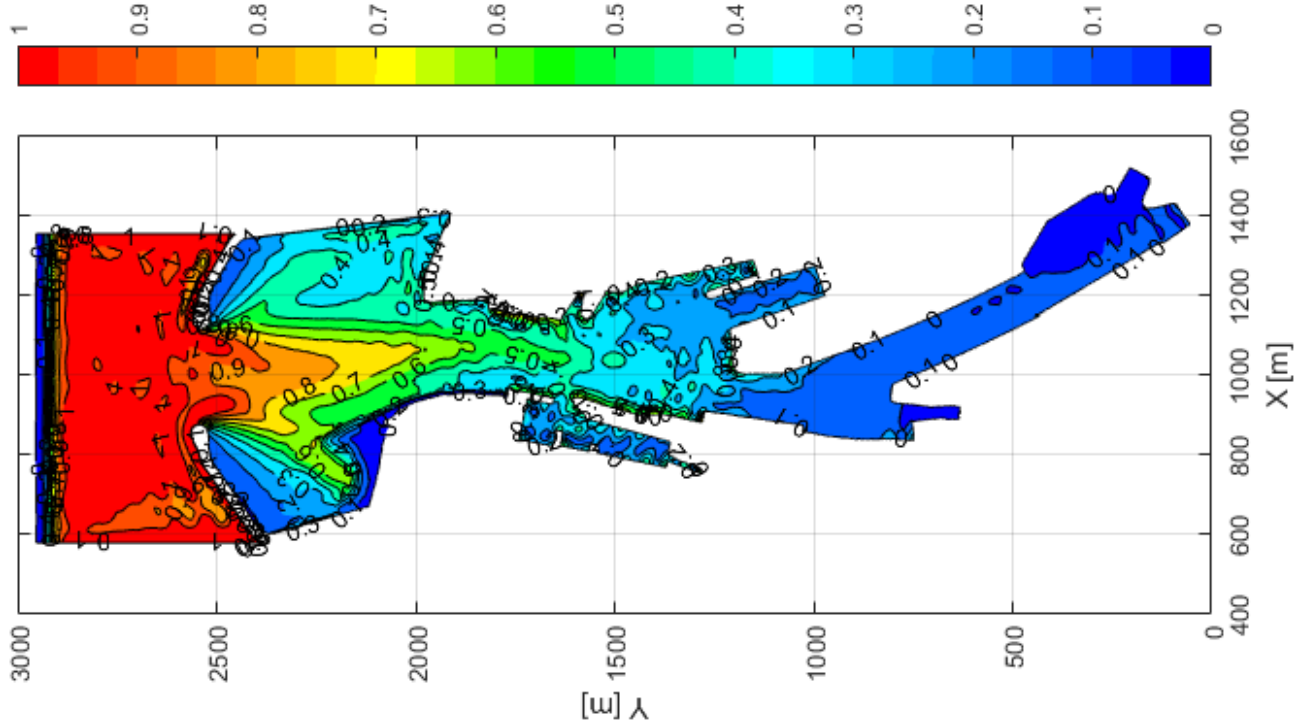
Figuur 60 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 100 jaar



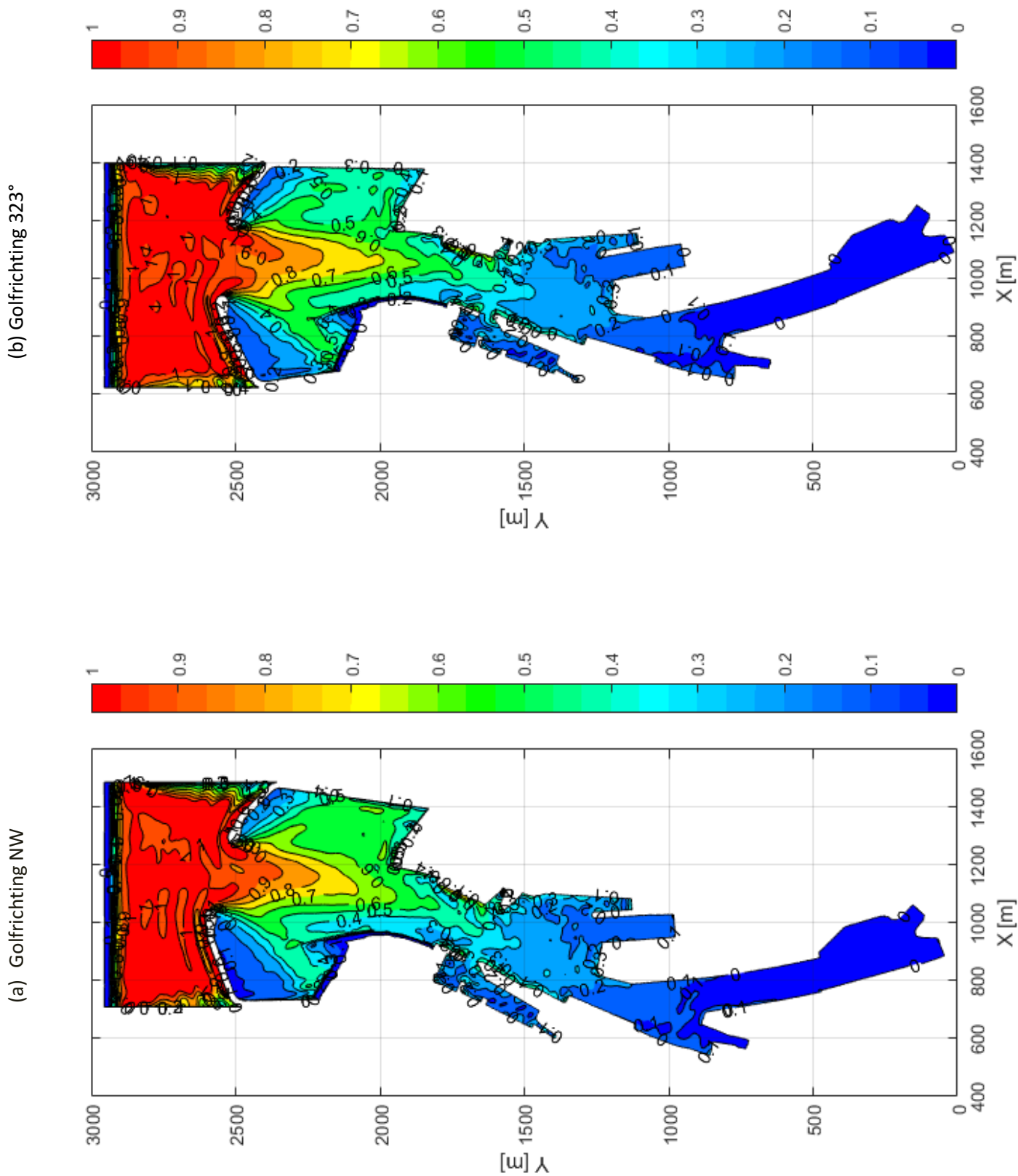
(d) Golfrichting NNW



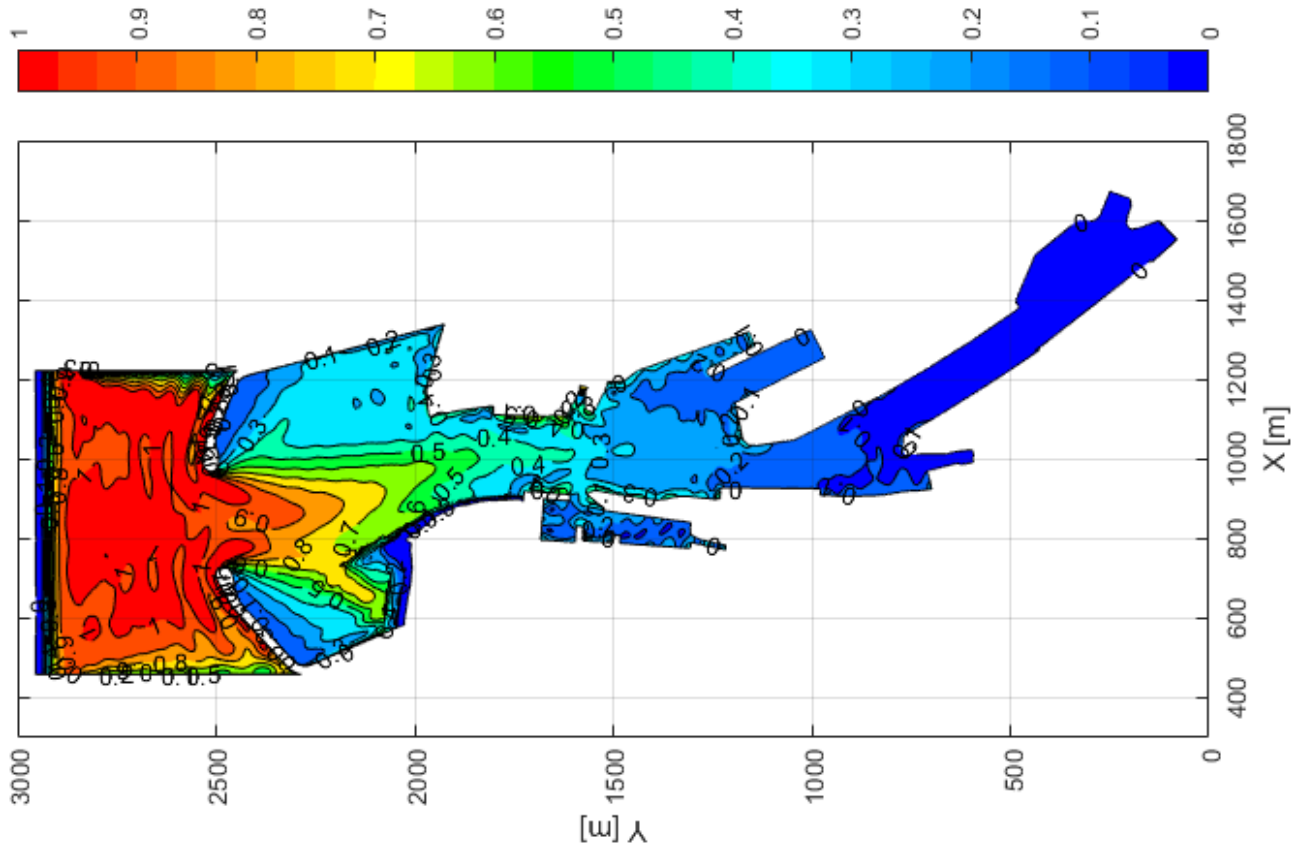
(c) Golfrichting 330°



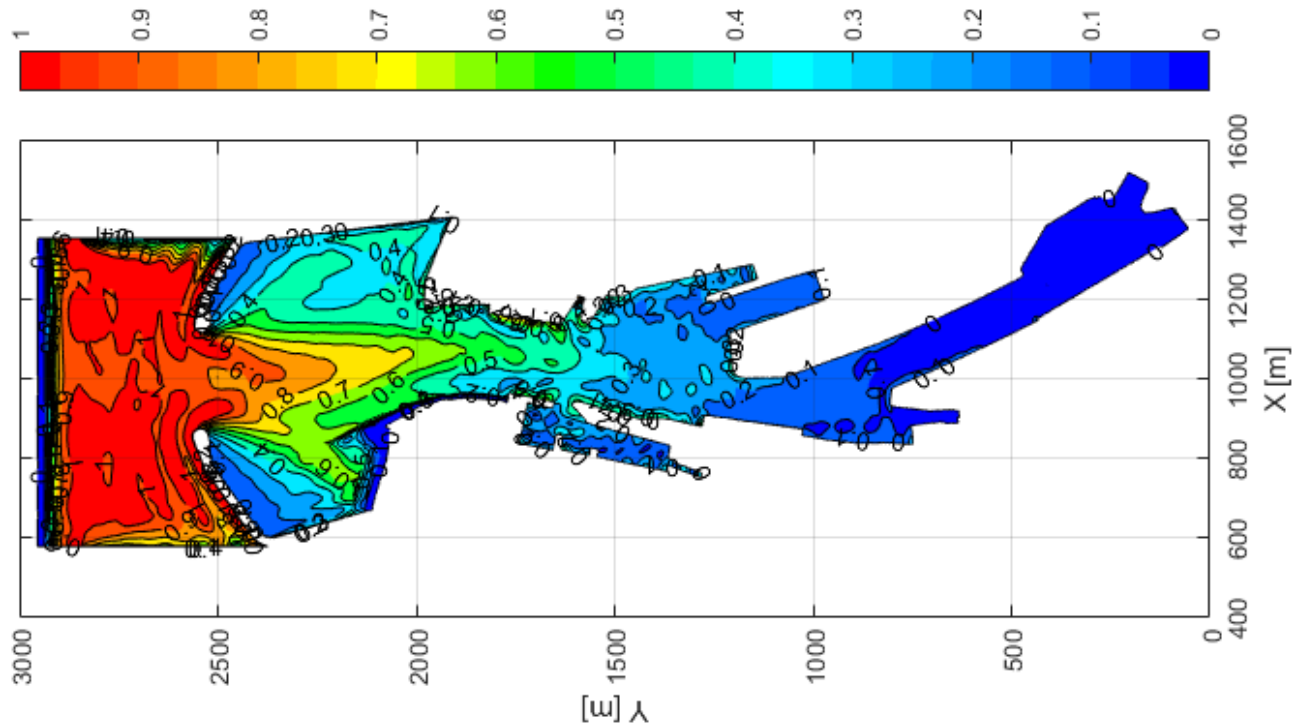
Figuur 61 – Kd-waarde voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar



(d) Golfrichting NNW

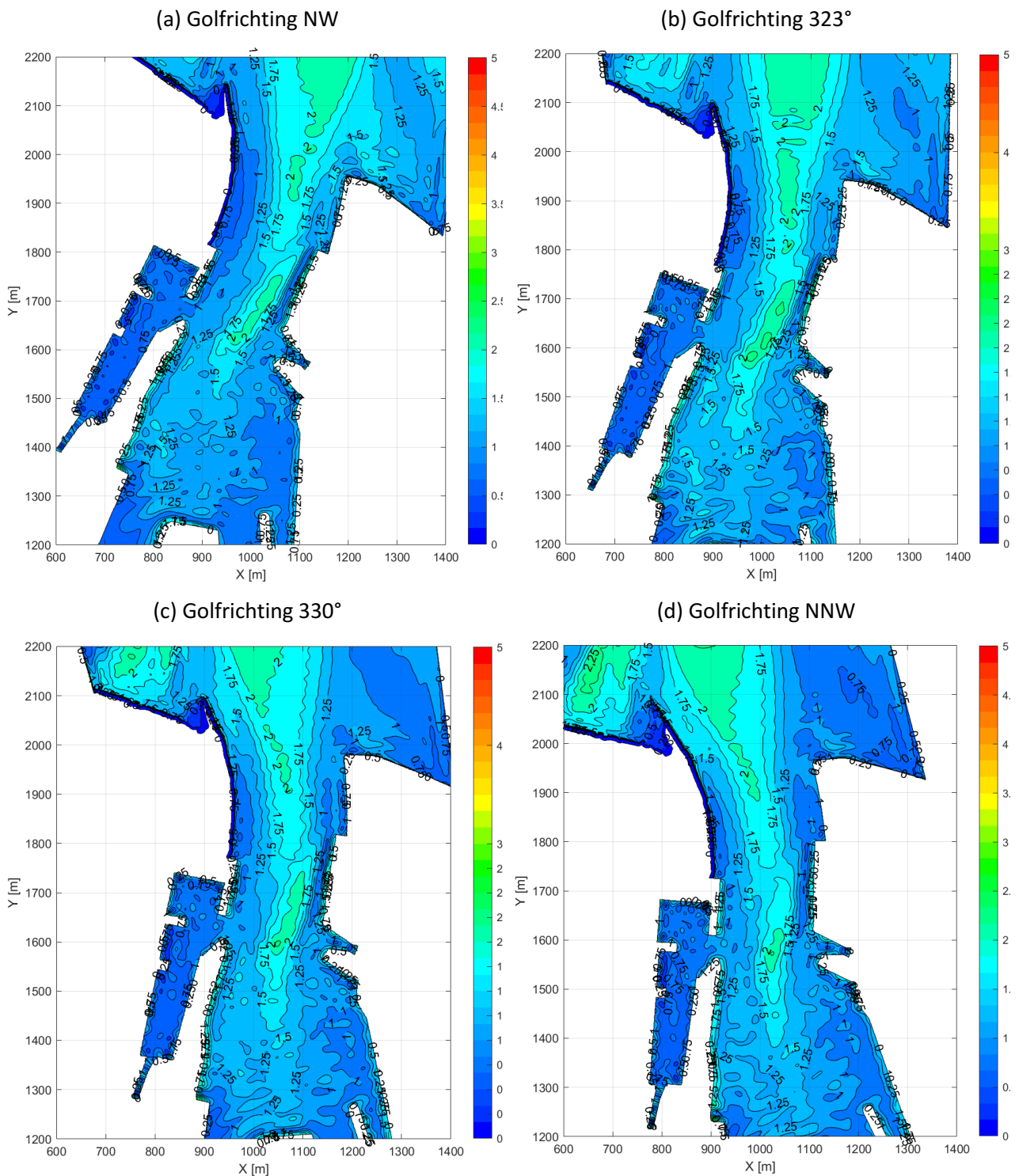


(c) Golfrichting 330°

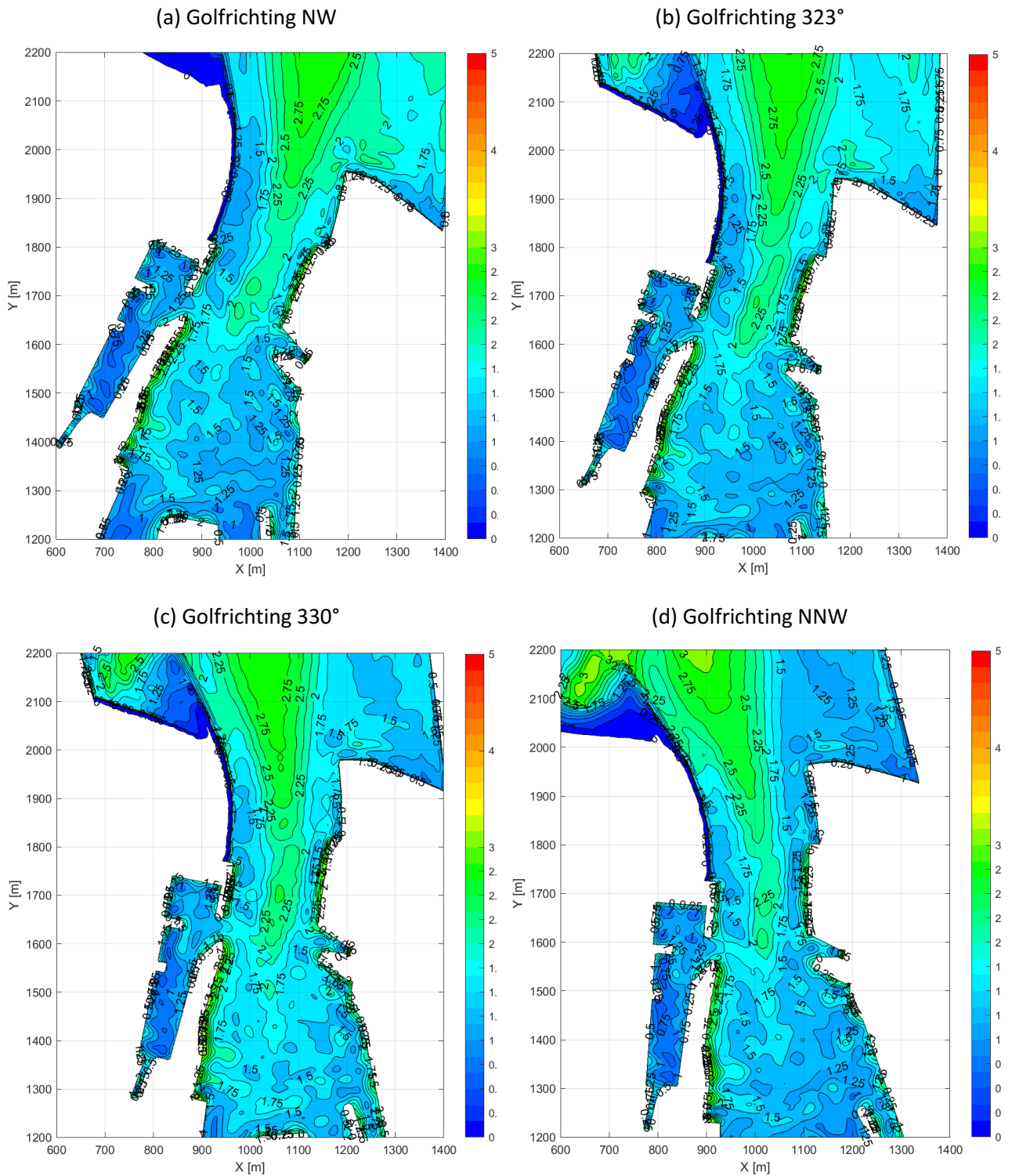


Bijlage 4 Figuren met resultaten golfindringing (HM – centrale deel haven – MGD): significante golfhoogtes – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen

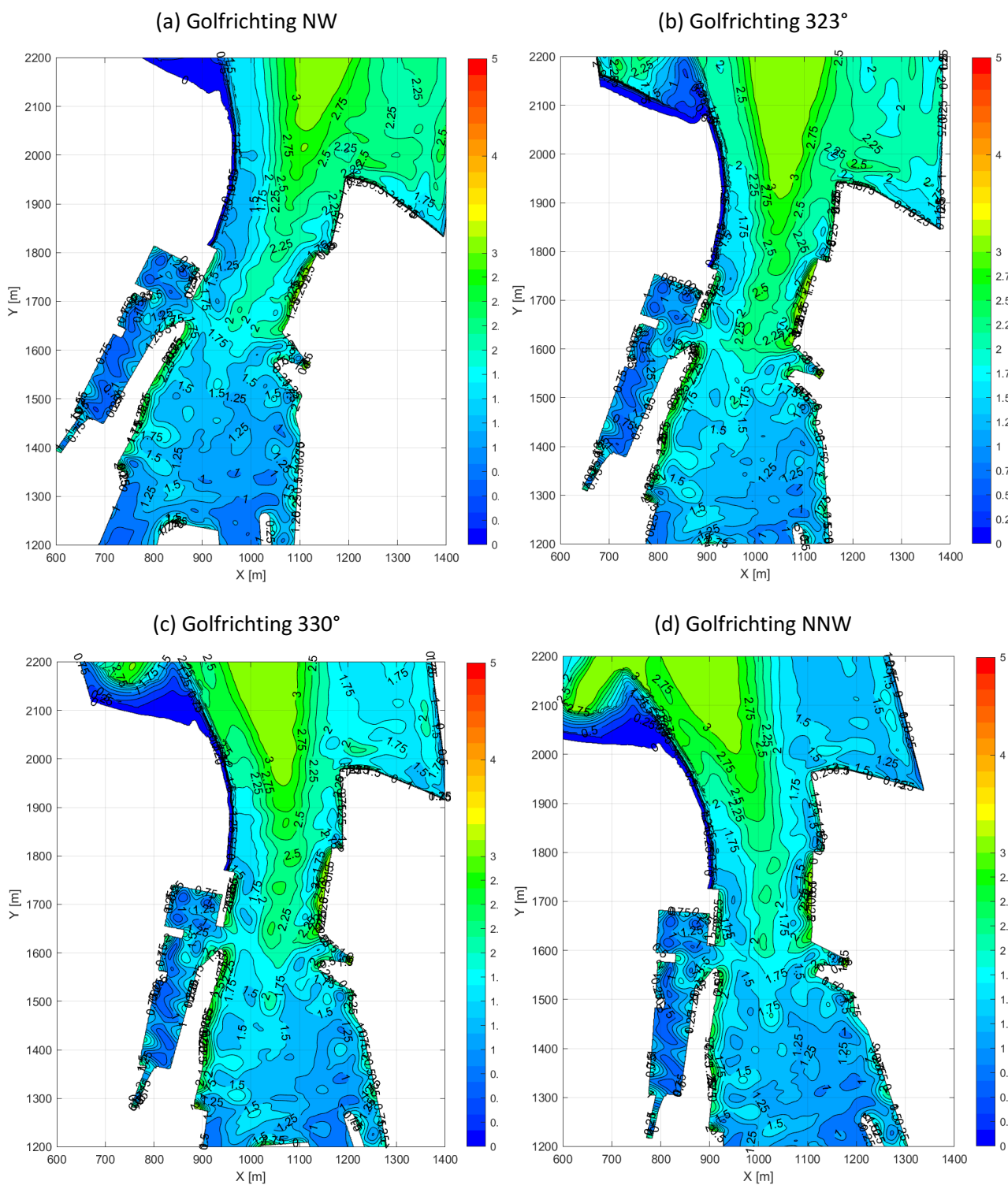
Figuur 62 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 1 jaar



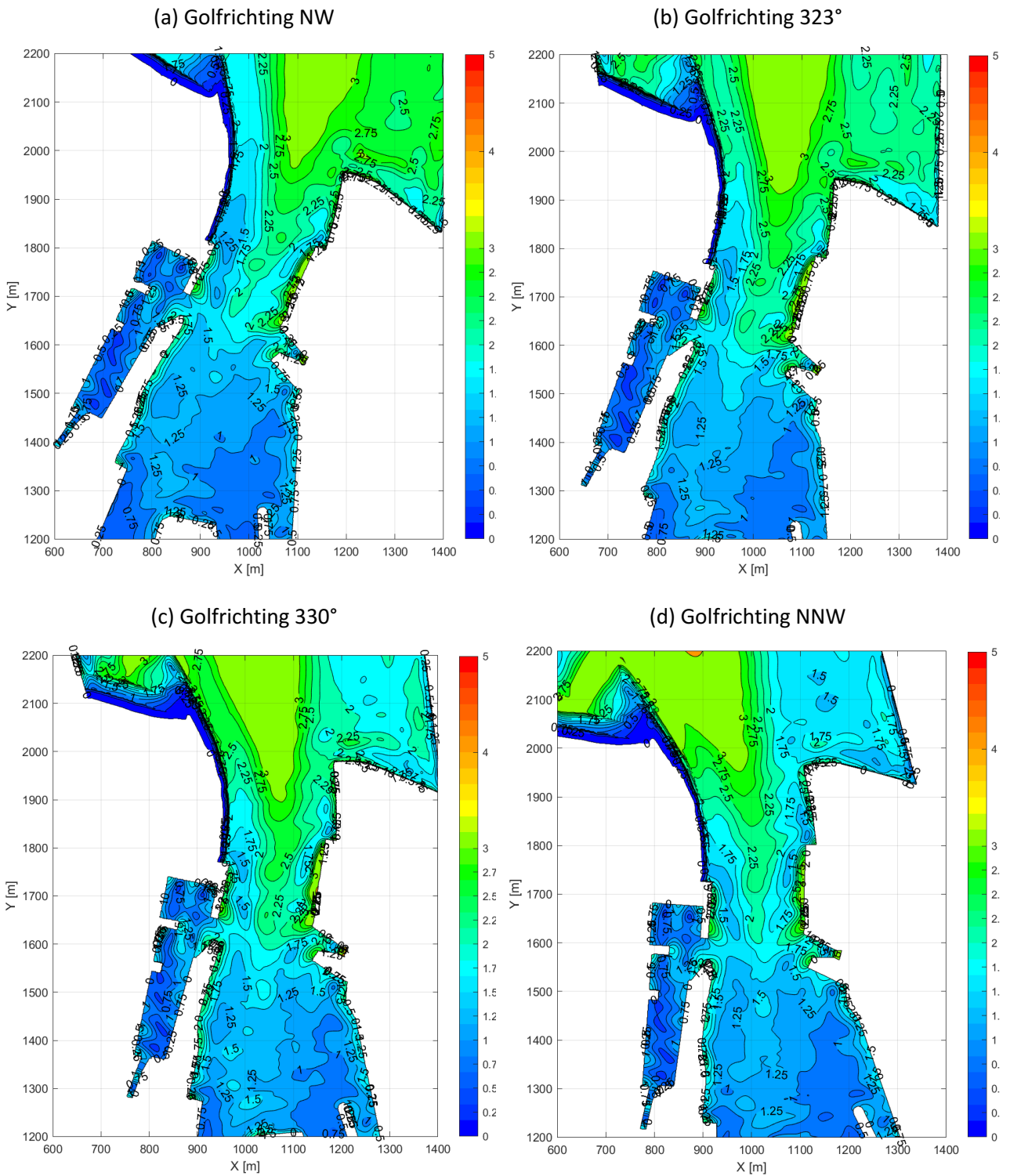
Figuur 63 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 10 jaar



Figuur 64 – Significante golfhoogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 100 jaar

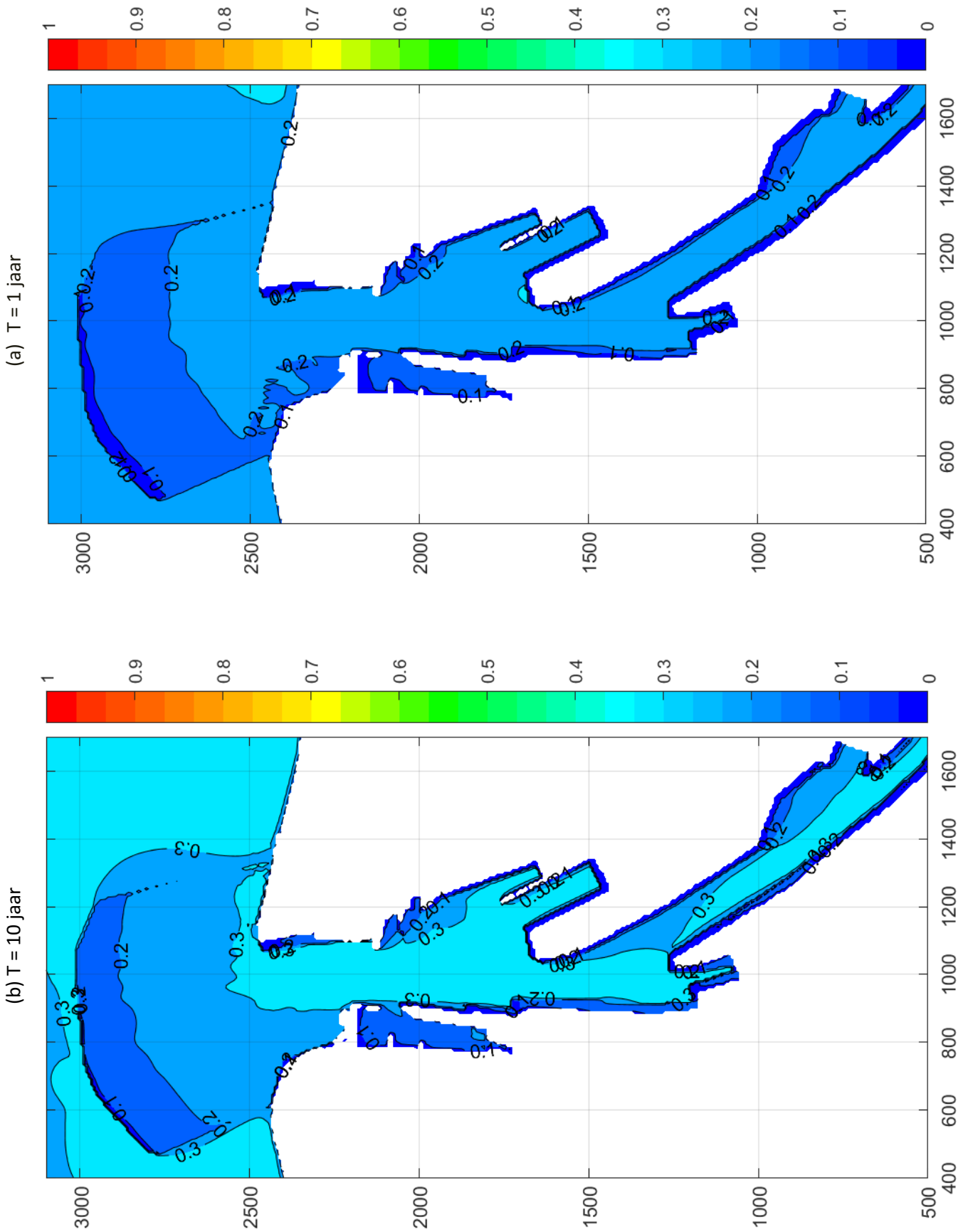


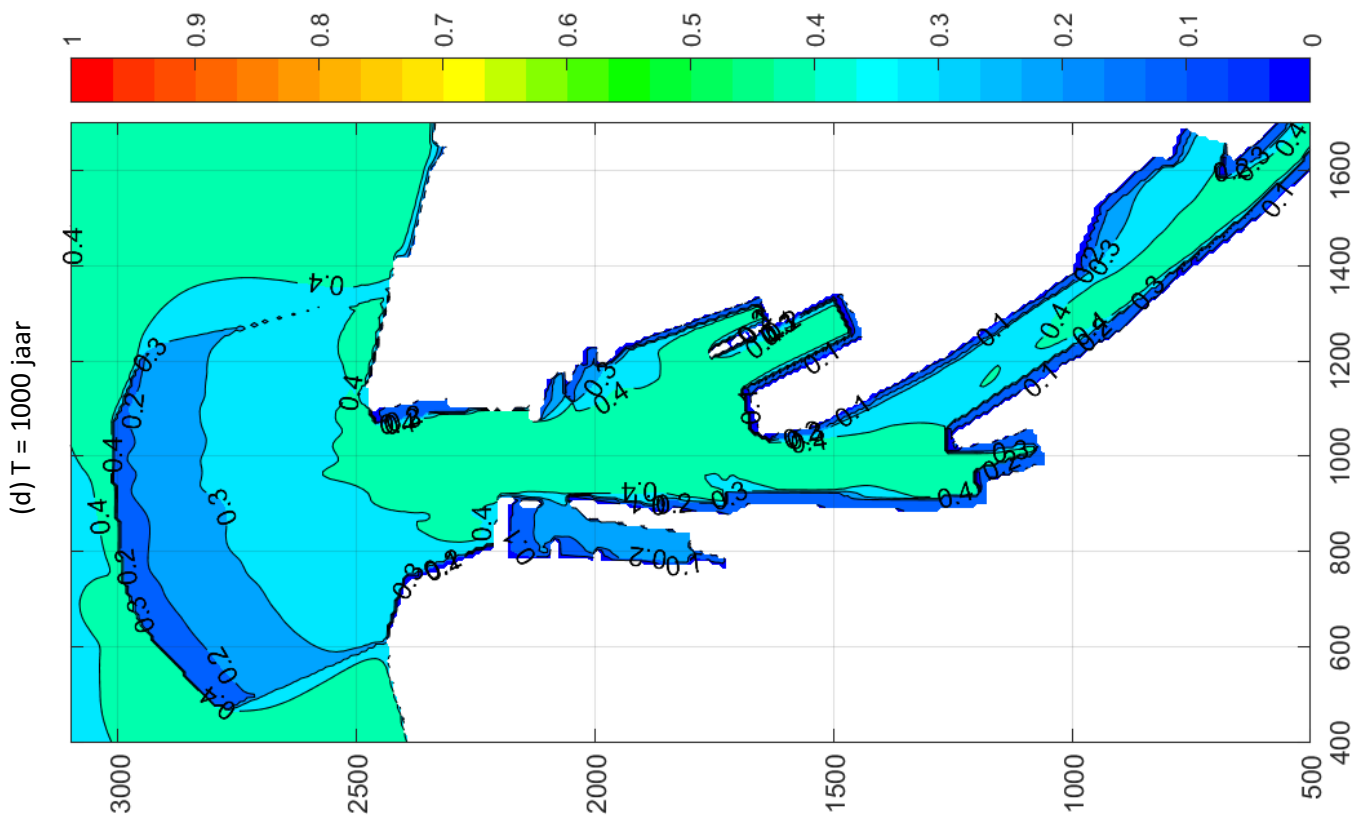
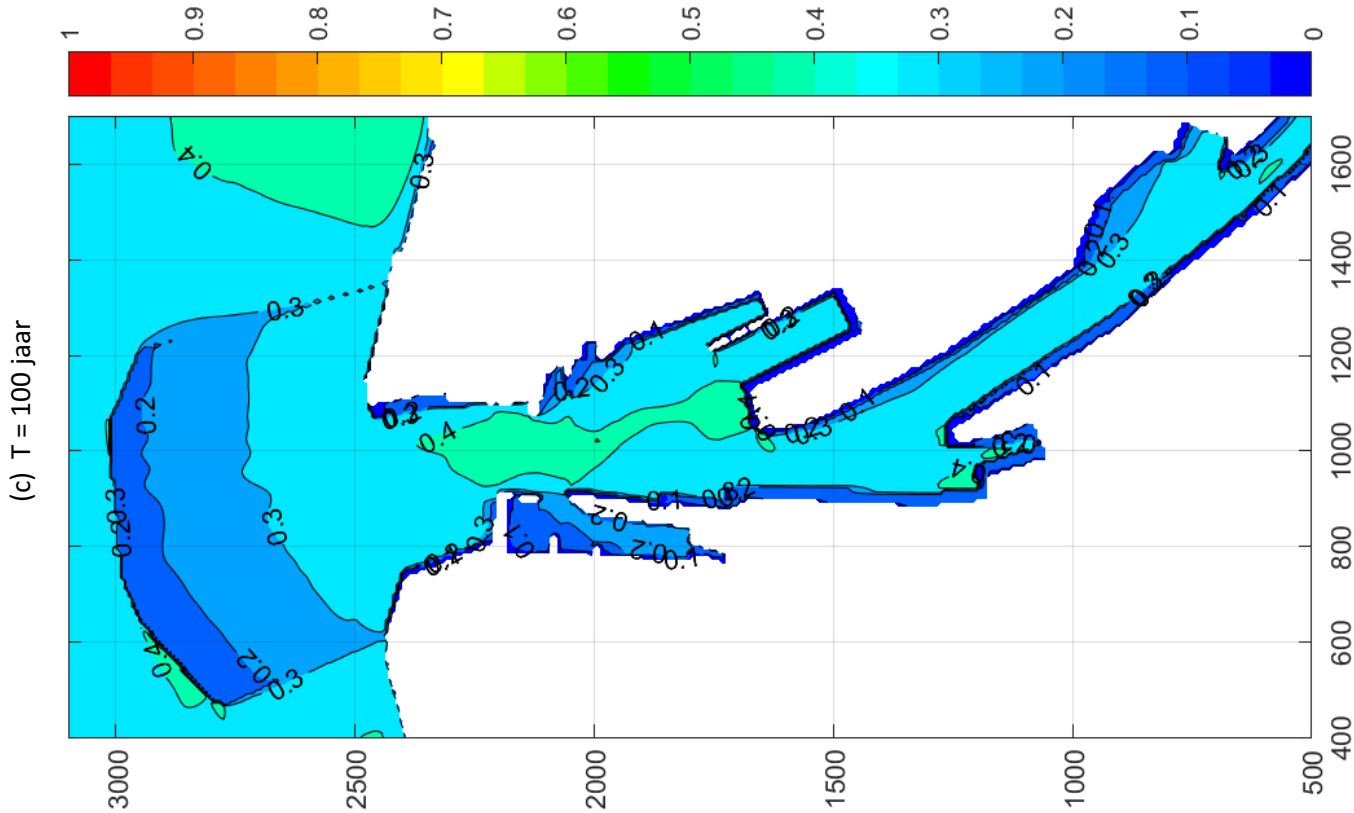
Figuur 65 – Significante golfhogte H_{m0} [m] voor golfindringing – toekomstige havengeometrie – storm met T = 1000 jaar



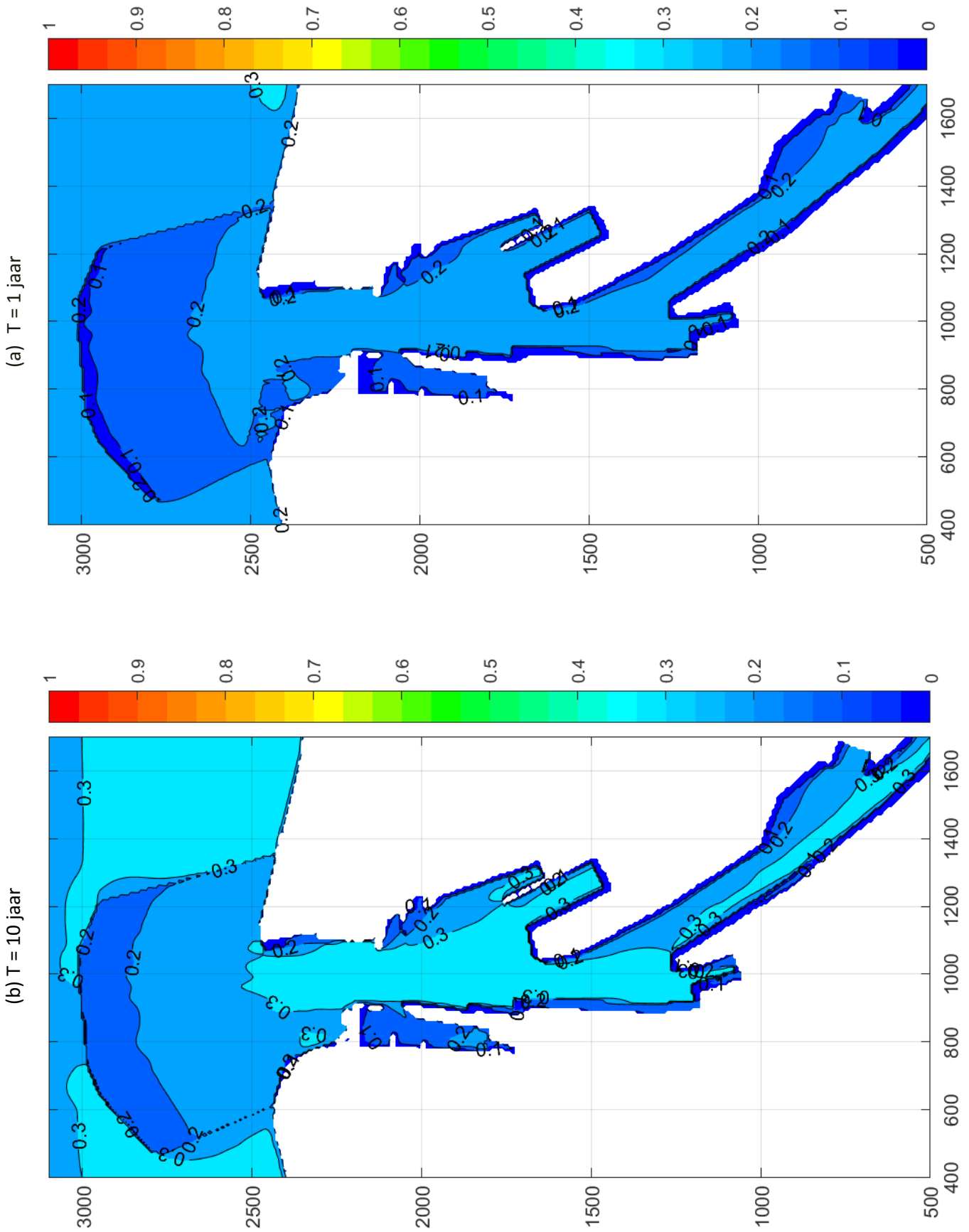
Bijlage 5 Figuren met resultaten lokale windgegenereerde golven (SWAN): significante golfhoogtes – toekomstige havengeometrie – alle maatgevende stormen

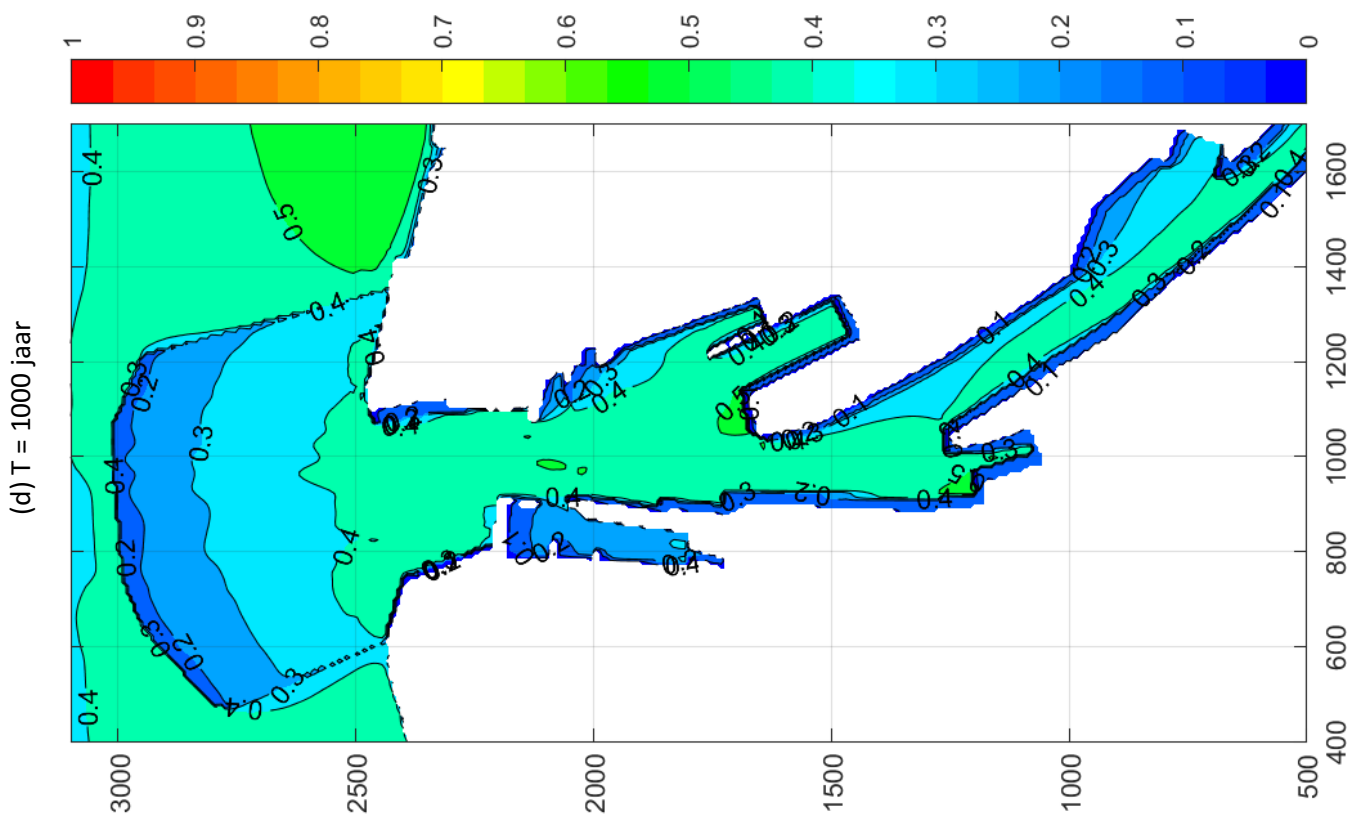
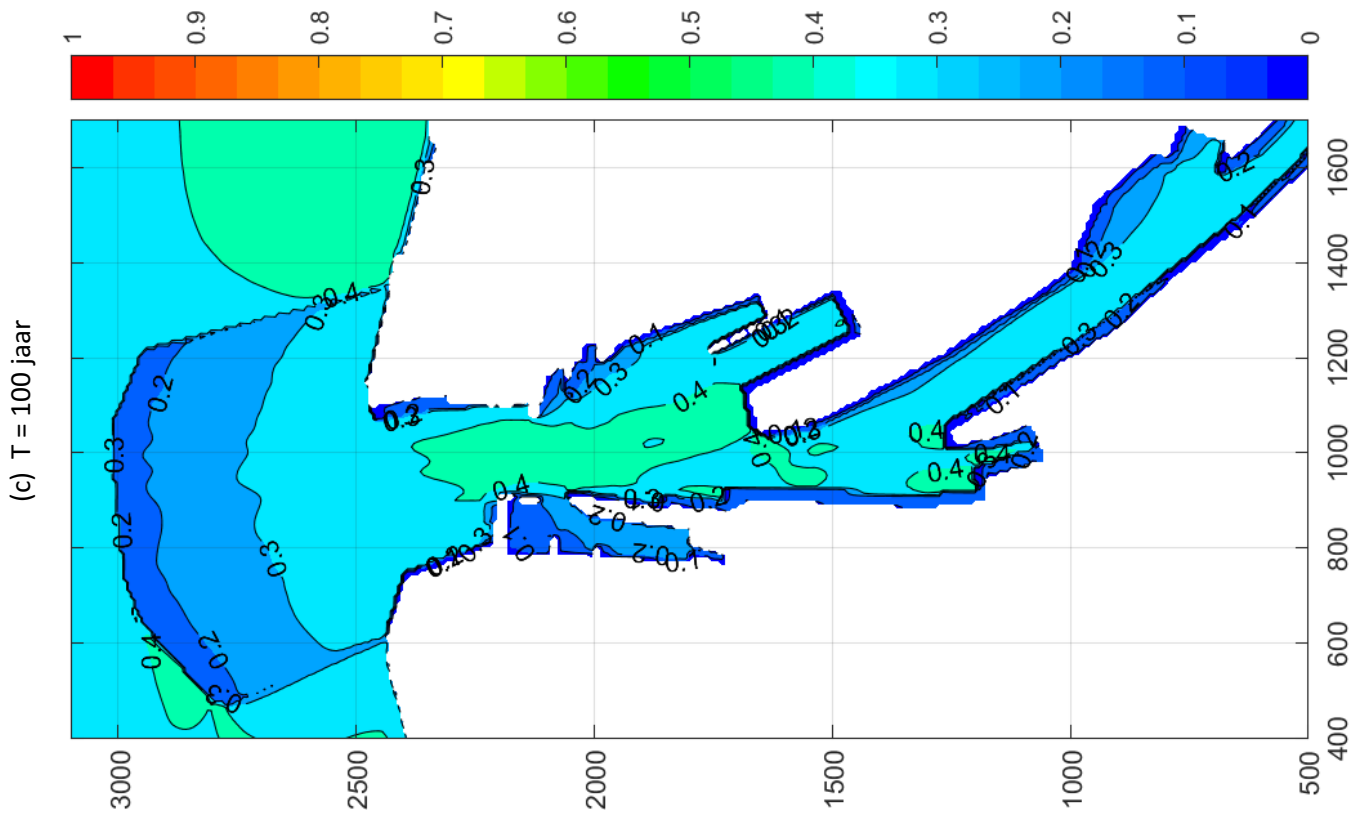
Figuur 66 – Lokale windgegenereerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting NW



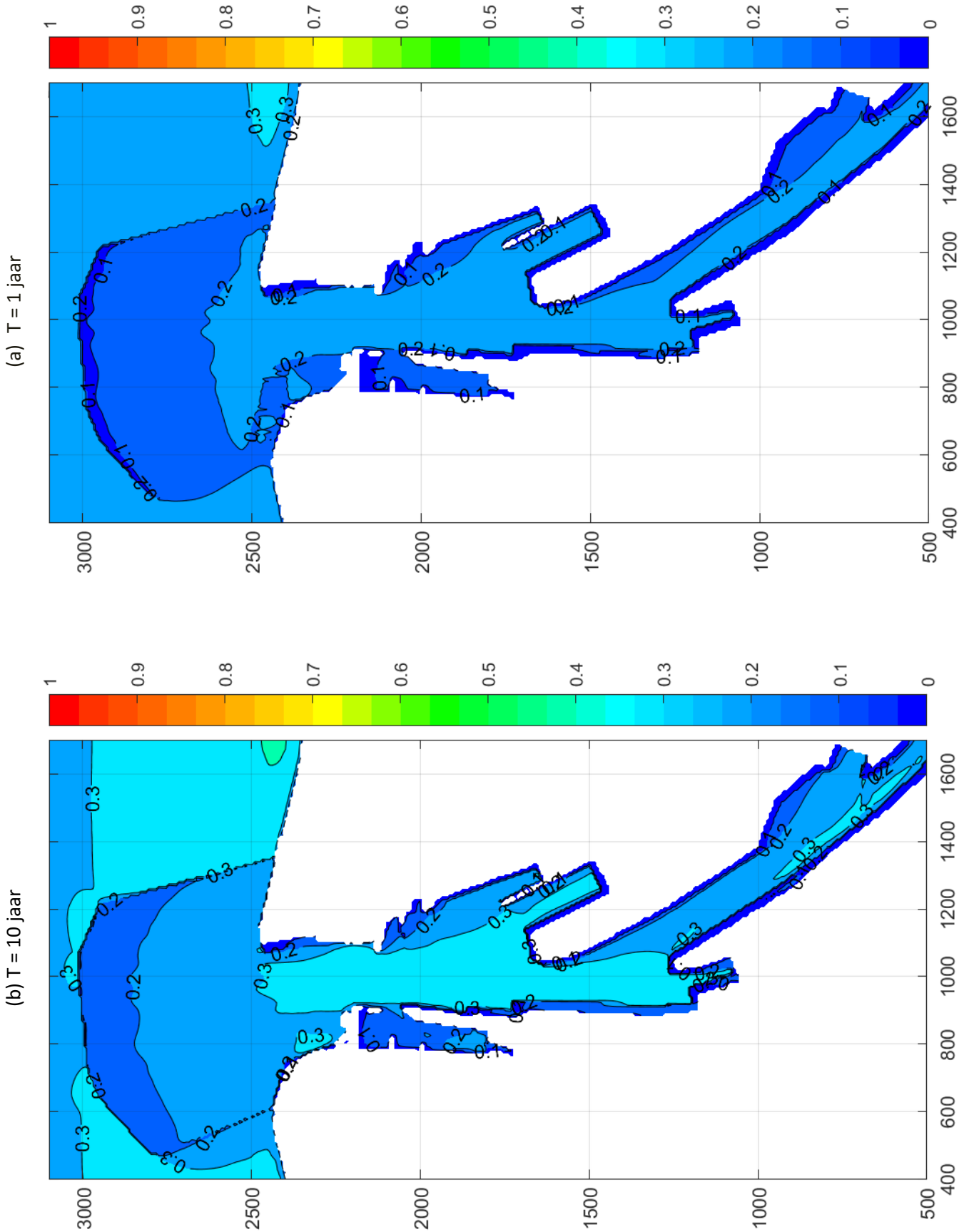


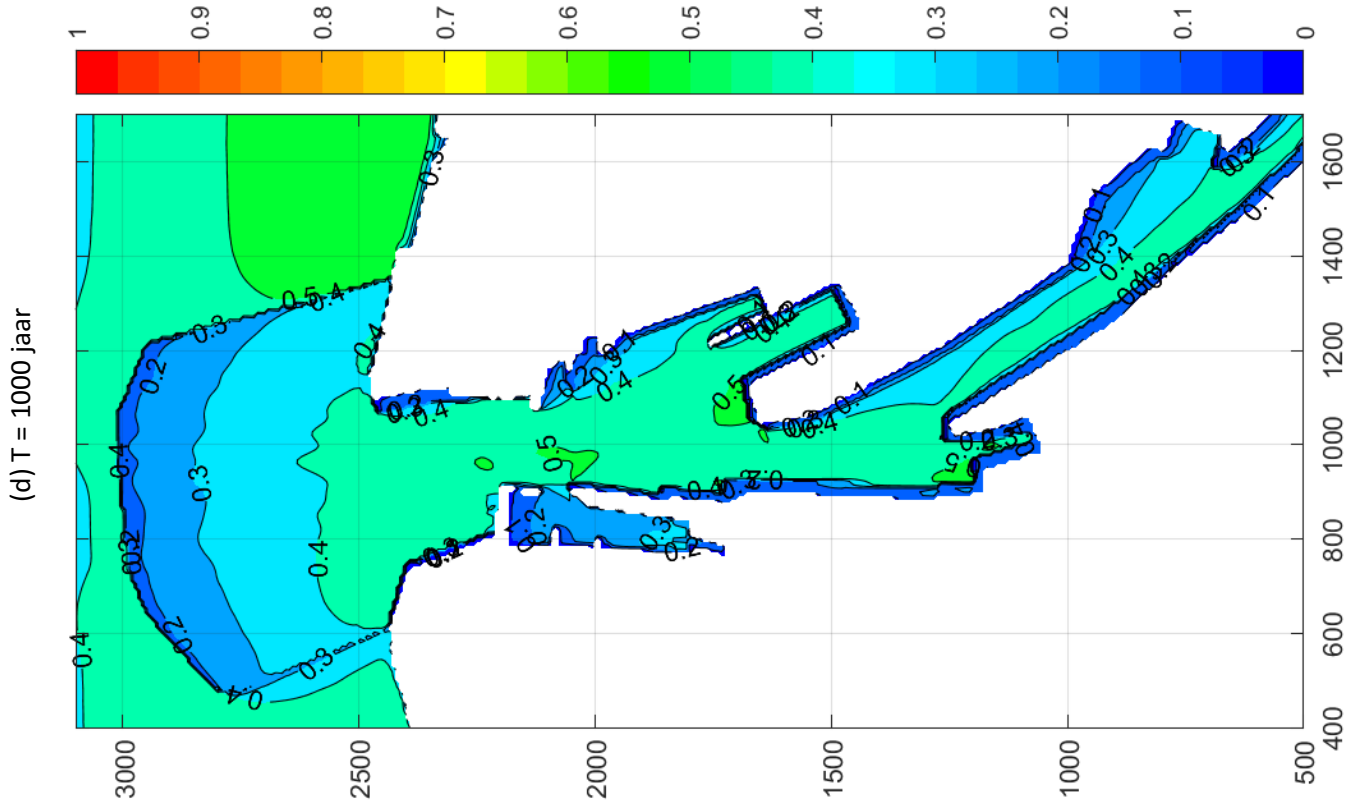
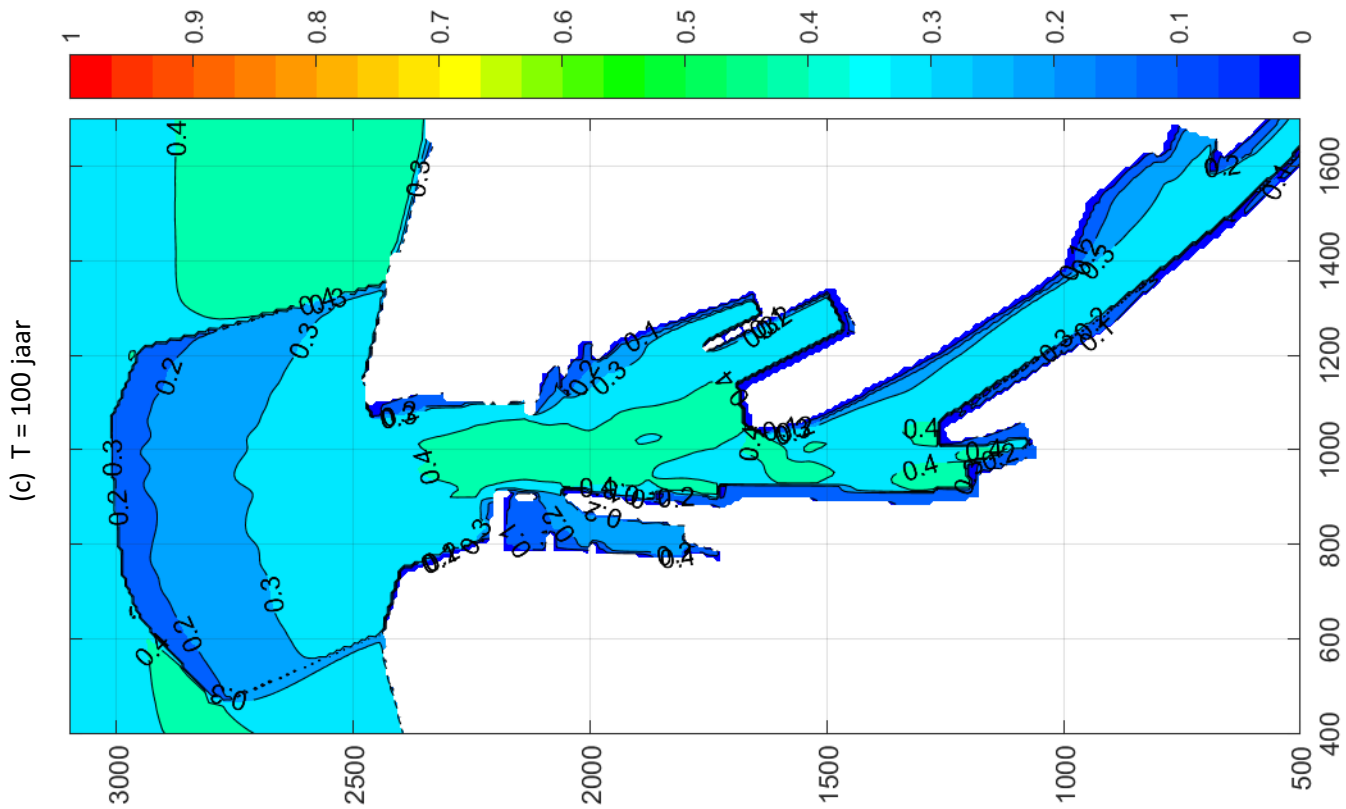
Figuur 67 – Lokale windgegenerateerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting 330°





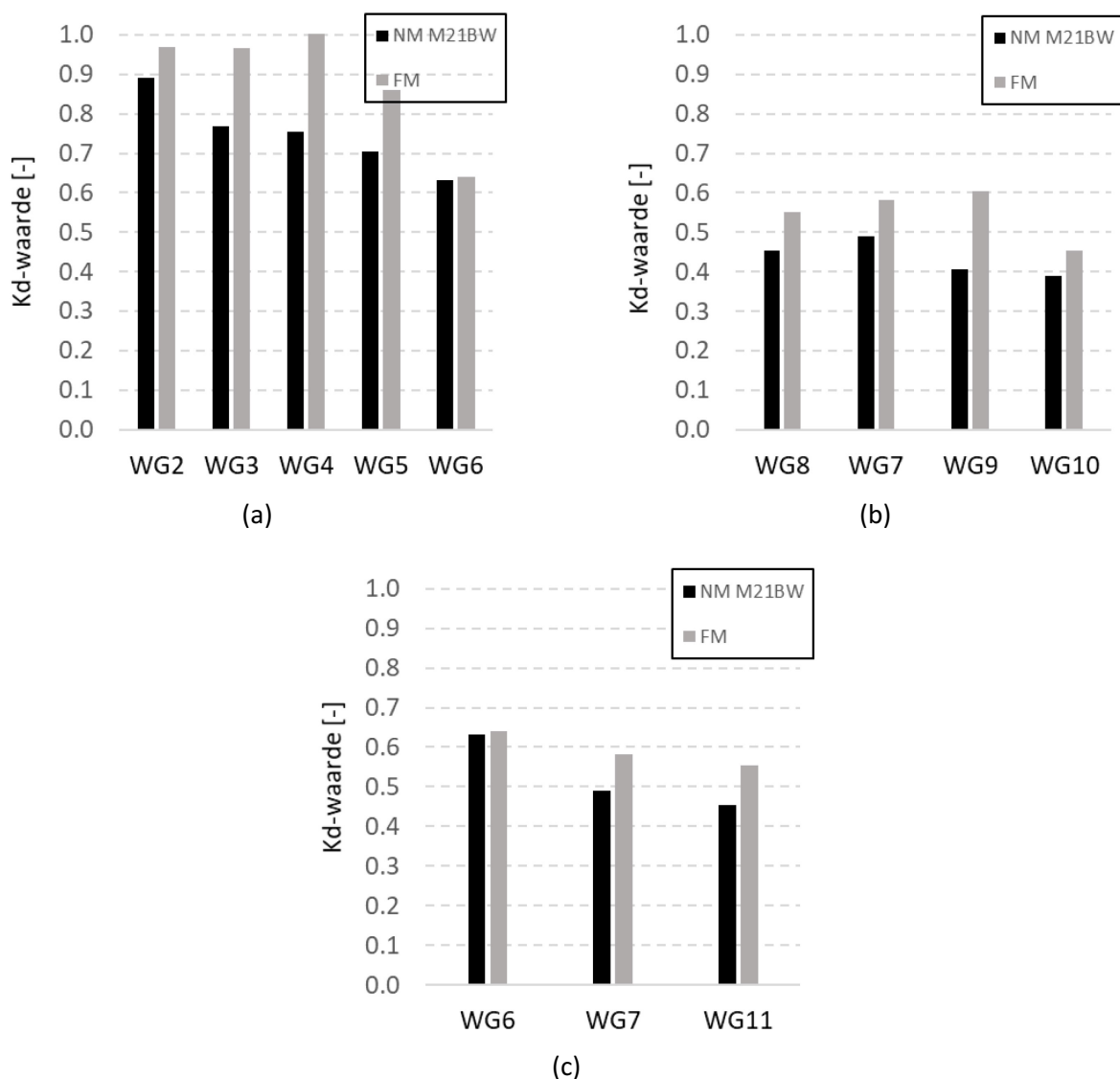
Figuur 68 – Lokale windgegenereerde significante golfhoogte H_{m0} [m] voor verschillende maatgevende stormen uit windrichting NNW



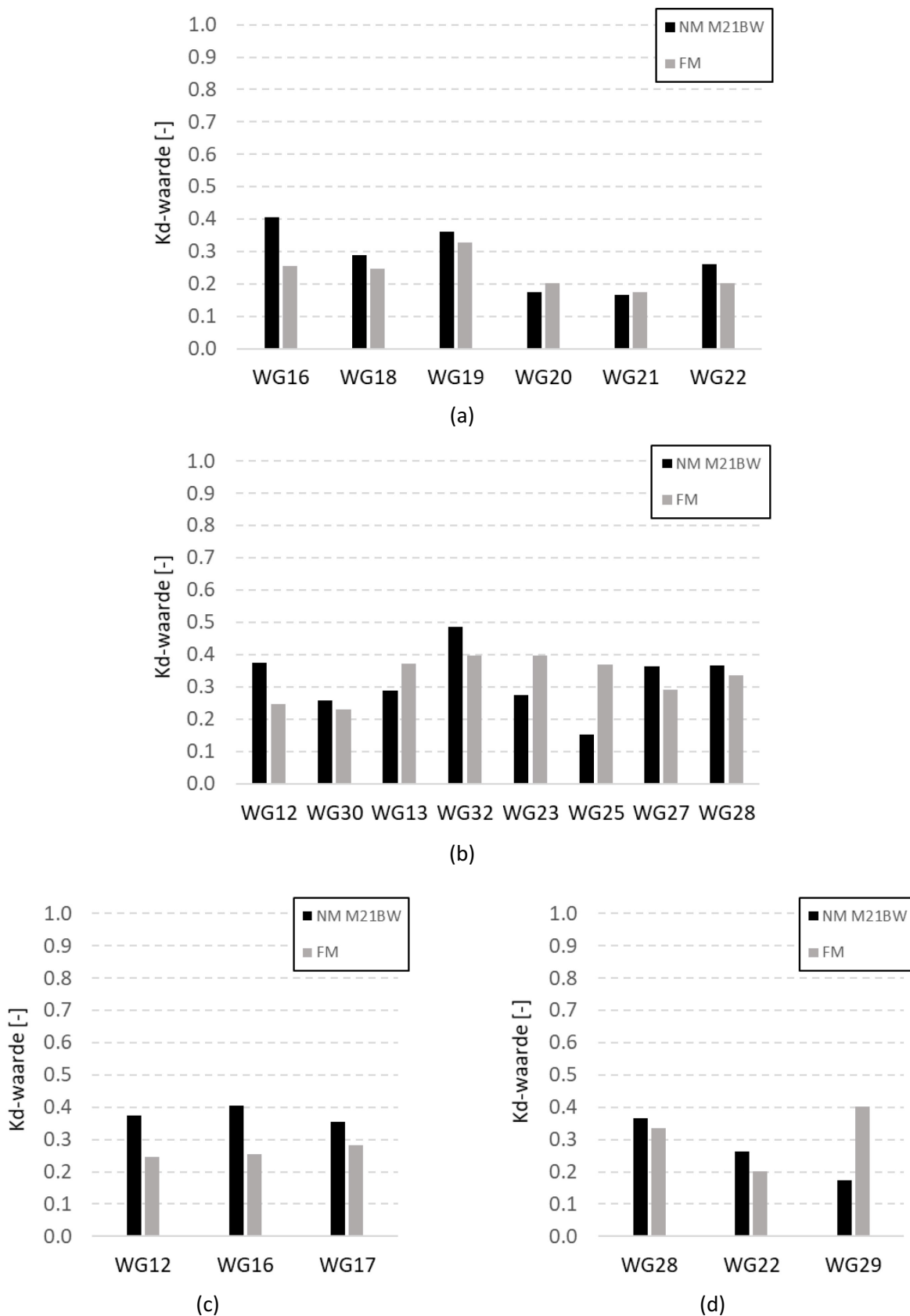


Bijlage 6 Figuren met resultaten golfindringing (vergelijking FM-NM): Kd-waarden – toekomstige havengeometrie – duizendjarige storm uit richting 323°

Figuur 69 – Kd-waarde in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) de vaargeul; (b) langs de Churchillkaai en (c) ingang Montgomerydok



Figuur 70 – Kd-waarde in het fysisch en numeriek model langs transecten in (a) Montgomerydok; (b) middellijn parallel aan kaaivlakken Visserskaai; (c) parallel aan Montgomerykaai en (d) parallel aan kaaivlakken Mercatorsluis



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