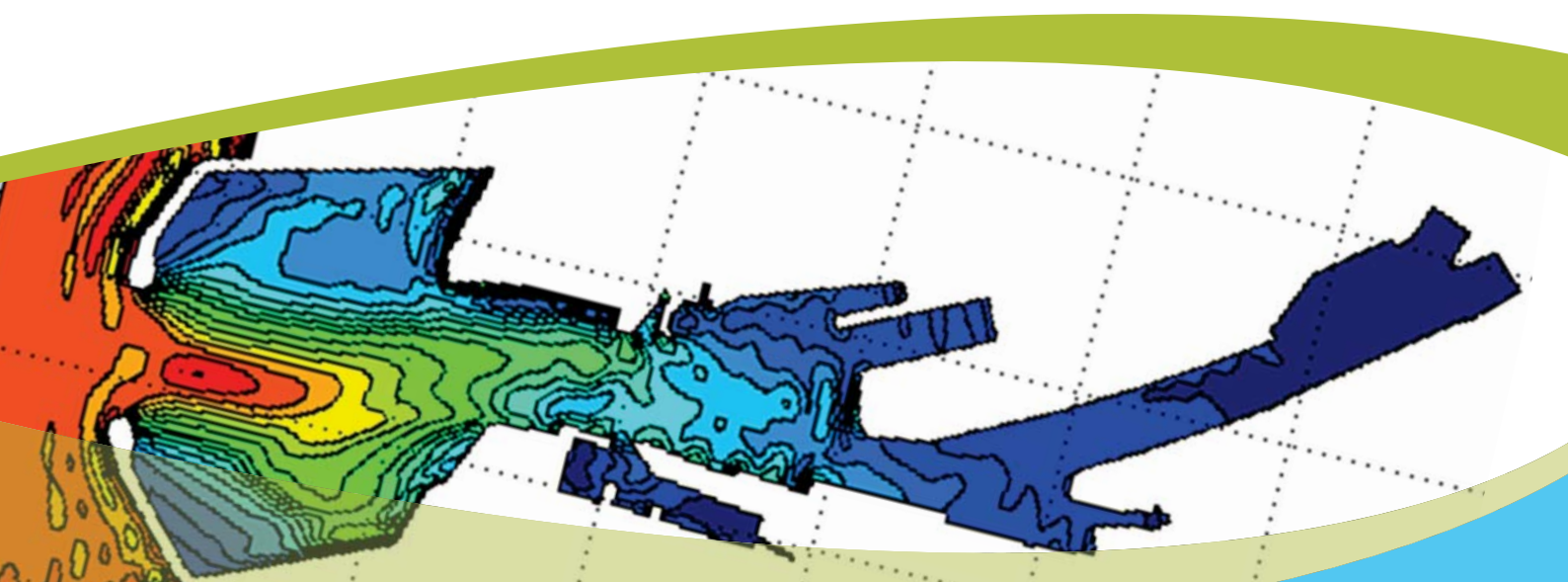




departement
Mobiliteit en
Openbare Werken

Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens

Deel 1 : HAVEN VAN OOSTENDE



769_03

WL Rapporten



Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens

Deel 1: Haven van Oostende

Gruwez, V.; Bolle, A.; Hassan, W.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

oktober 2011

WL2011R769_03rev2_0

Deze publicatie wordt geciteerd als volgt:

Gruwez, V.; Bolle, A.; Hassan, W.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2011). Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens: Deel 1: Haven van Oostende. Versie 2_0. WL Rapporten, 769_03. Waterbouwkundig Laboratorium & IMDC: Antwerpen, België

I/RA/11273/11.113/VGR. IMDC, Antwerpen, België



Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115
B-2140 Antwerp
Tel. +32 (0)3 224 60 35
Fax +32 (0)3 224 60 36
E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be
www.watlab.be



International Marine and Dredging Consultants

Coveliersstraat 15
B-2600 Antwerp
Tel. +32 (0)3 270 92 95
Tel. +32 (0)3 235 67 11
info@imdc.be
www.imdc.be

Nothing from this publication may be duplicated and/or published by means of print, photocopy, microfilm or otherwise, without the written consent of the publisher.

Document identification

Titel:	Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens: Deel 1: Haven van Oostende		
Klant:	Afdeling Kust	Ref.:	WL2011R769_03rev2_0
Trefwoorden (3-5):	Numerieke golfmodellering, Extreem golfklimaat, Haven van Oostende		
Tekst (p.):		Tabellen (p.):	
Appendices (p.):	4	Figuren (p.):	
Confidentieel:	<input type="checkbox"/> Ja	Uitzonderingen:	<input type="checkbox"/> Klant
	<input checked="" type="checkbox"/> Nee		<input type="checkbox"/> Intern
			<input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
		Vrijgegeven vanaf	
		<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Approval

Auteur Vincent Gruwez (IMDC)	Revisoren Annelies Bolle (IMDC); Wael Hassan	Projectleider Toon Verwaest	Afdelingshoofd Frank Mostaert
---------------------------------	----------------------------------------------------	--------------------------------	----------------------------------

Revisions

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur
1_0	05/10/2011	Concept versie	Vincent Gruwez
1_1	15/10/2011	Revisie	Bolle, A.; Hassan, W.; Verwaest, T.
2_0	26/10/2011	Definitieve versie	Vincent Gruwez

Samenvatting

Het ontwerp van structuren in een haven en overstromingsrisicoanalyses hebben hydrodynamische randvoorwaarden nodig langs alle structuren. Deze randvoorwaarden zijn gewenst tijdens een storm met terugkeerperiode 1000j en tijdens de superstormen die werden gedefinieerd voor de risicoanalyse. Het extreem golfklimaat wordt daarbij ontkoppeld naar golfindringing en lokale windgolven. Na een gedetailleerde vergelijking van de beschikbare golfindringingsmodellen zijn MILDwave (een lineair MSE-model) en Mike 21 BW (een niet-linear Boussinesq model) gekozen. Om de lokale golfgeneratie door de extreme wind te modelleren werd het spectraal model SWAN toegepast.

Uit een validatie met het fysisch model blijken beide golfindringingsmodellen goede resultaten te geven wat betreft de golfindringingscoëfficiënt K_d . Daarbij wordt een ééncellige sponslaag gebruikt om de partiële reflectie te modelleren. Het Mike 21 BW model heeft een aantal numerieke maatregelen nodig om numerieke stabiliteit te verzekeren i.t.t. het MILDwave model. Een aantal gevoeligheidsanalyses tonen aan dat de aannames die worden gemaakt bij het opstellen van de modellen aanvaardbaar zijn.

Na een analyse van de geschiktheid van SWAN om lokale windgolven te simuleren, zijn alle extreme windsnelheden en -richtingen gemodelleerd. Een superpositie van de resultaten van de golfindringingsmodellen en het SWAN model wordt uitgevoerd. Op die manier wordt het totale extreme golfklimaat in de haven bekomen. Ten slotte wordt de inzetbaarheid onderzocht van de modellen voor simulaties met een normaal golfklimaat en resonantiestudies. Daarop volgen ook algemene richtlijnen die nuttig zijn voor de modelleringen in de andere Belgische kusthavens gebaseerd op de ervaring die werd opgedaan voor Oostende.

Inhoudstafel

Inhoudstafel.....	I
Lijst van tabellen	III
Lijst van figuren	IV
1 Inleiding.....	1
1.1 De opdracht	1
1.2 Doel.....	1
1.3 Overzicht.....	1
1.4 Structuur van het rapport	1
2 Keuze numerieke golfmodellen.....	2
3 Golfindringing: faseoplossende golfmodellering	3
3.1 Opbouw van modellen	3
3.1.1 Bathymetrie en haven geometrie.....	3
3.1.2 Hydrodynamische randvoorwaarden.....	11
3.1.3 Rekenrooster, tijdstap en simulatieduur	12
3.1.4 Golfgeneratie en -absorptie	14
3.1.5 Fysische processen.....	16
3.1.6 Numerieke stabiliteit	17
3.1.7 Partiële reflectie.....	22
3.2 Resultaten en vergelijkende analyses	27
3.2.1 Inleiding	27
3.2.2 Contourplots K_d -waarden	28
3.2.3 K_d -waarden op locaties en validatie met fysisch model.....	28
3.2.4 K_d -waarden langs- en dwarssecties	35
3.2.5 Golfperiode	40
3.2.6 Golfrichting	40
3.3 Gevoeligheidsanalyses en invloeden.....	42
3.3.1 Inleiding	42
3.3.2 Breedte haveningang	42
3.3.3 Helling vaargeul.....	47
3.3.4 Absorptiecoëfficiënten	50
3.3.5 Transmissie	53

3.3.6	Golfperiode	57
3.3.7	Kort- en langkruinig	61
3.3.8	Helling "Halve Maan"	66
3.3.9	Conclusies	70
4	Lokale windgolven: fasegemiddelde golfmodellering	71
5	Superpositie golfindringing en lokale windgolven	72
5.1	Inleiding	72
5.2	Resultaten per zone	73
6	Andere toepassingsmogelijkheden van de golfmodellen	76
6.1	Simulatie van een normaal golfklimaat	76
6.2	Resonantie analyses en lange golfsimulaties	76
7	Algemene richtlijnen voor golfpenetratie modellering in havens	78
7.1	Inleiding	78
7.2	Bathymetrie en havengeometrie	78
7.3	Hydrodynamische randvoorwaarden	78
7.3.1	Significante golfhoogte	78
7.3.2	Golfperiode	78
7.3.3	Golfrichting	79
7.4	Fysische processen	79
7.4.1	Golfbreking	79
7.4.2	Golfoploop	79
7.4.3	Transmissie	79
7.4.4	Bodemwrijving	79
7.5	Numerieke stabiliteit	79
7.6	Partiële reflectie	80
8	Conclusies	81
9	Data bronnen	83
10	Referenties	84
	Bijlage 1: OVERZICHT EN KEUZE VAN GOLFMODELLEN	B1
	Bijlage 2: INVLOED VAN REFLECTIE	B26
	Bijlage 3: INVLOED WIND (NOTA 1)	B42
	Bijlage 4: INVLOED WIND (NOTA 2)	B82

Lijst van tabellen

Tabel 2-1: Overzicht van de gekozen golfmodellen en hun karakteristieken	2
Tabel 3-1: De hydrodynamische randvoorwaarden en aanduiding van gemodelleerde condities	11
Tabel 3-2: Grenzen voor de roostercelafmetingen	13
Tabel 3-3: Bovengrenzen voor de tijdstap Δt in Mike 21 BW op basis van voorwaarden gegeven door DHI (2009)	13
Tabel 3-4: Bovengrenzen voor de tijdstap Δt in MILDwave op basis van het Courant criterium	14
Tabel 3-5: Overzicht van toegepaste maatregelen om numerieke stabiliteit te verkrijgen voor elk van de Mike 21 BW modellen.	21
Tabel 3-6: Absorptiecoëfficiënten per type constructie en bijhorende reflectiecoëfficiënt. Voor Mike 21 BW correspondeert de waarde voor de absorptiecoëfficiënt met $1/\mu$ (met μ tussen haakjes) en voor MILDwave is μ opgegeven. Voor waterstanden +6.00m TAW t.e.m. +7.50m TAW.	24
Tabel 3-7: Absorptiecoëfficiënten per type constructie en bijhorende reflectiecoëfficiënt. Voor Mike 21 BW correspondeert de waarde voor de absorptiecoëfficiënt met $1/\mu$ (met μ tussen haakjes) en voor MILDwave is μ opgegeven. Voor waterstand +8.00m TAW	26
Tabel 3-7: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de 1D-spectra in de haven werden opgesteld	40
Tabel 3-8: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse “Breedte haveningang” werd uitgevoerd	43
Tabel 3-9: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse “Helling vaargeul” werd uitgevoerd	47
Tabel 3-10: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse “Absorptiecoëfficiënten” werd uitgevoerd	50
Tabel 3-11: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse “Transmissie” werd uitgevoerd	54
Tabel 3-12: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse “Golfperiode” werd uitgevoerd.	57
Tabel 3-13: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse “Kort- en langkruinig” werd uitgevoerd	62
Tabel 3-14: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse “Kort- en langkruinig” werd uitgevoerd	67
Tabel 5-1: Overzicht van de minimale en maximale significante golfhoogten langs elke zone in de haven. Per golfmodel en superpositie van Mike 21 BW en MILDwave. Voor SWL = +7.20m TAW.	74
Tabel 5-2: Overzicht van de minimale en maximale significante golfhoogten langs elke zone in de haven. Per golfmodel en superpositie van Mike 21 BW en MILDwave. Voor SWL = +8.00m TAW.	75

Lijst van figuren

Figuur 3-1: Overzicht van de volledige bathymetrie van de haven van Oostende voor de numerieke golfindringingsmodellen.	5
Figuur 3-2: Bathymetrie van buitenhaven (links) en binnenhaven (rechts).....	6
Figuur 3-3: Vergelijking van buitenhaven van nieuwe bathymetrie (links) en bestaande bathymetrie (rechts).....	8
Figuur 3-4: Vergelijking van binnenhaven van nieuwe bathymetrie (links) en bestaande bathymetrie (rechts).....	9
Figuur 3-5: Verschilkaarten (nieuwe bathymetrie – bestaande bathymetrie) van buitenhaven (links) en binnenhaven (rechts) in [m].....	10
Figuur 3-6: Herschaling van getrunceerd spectrum voor behoud van totale golfenergie (DHI, 2009)	12
Figuur 3-7: Positie golfgeneratielijn en sponslagen in het Mike 21 BW model.	15
Figuur 3-8: Positie golfgeneratielijn en sponslagen in het MILDwave model.	15
Figuur 3-9: Invloed van de tijd-extrapolatiefactor (= 0.8) op de significante golfhoogte. Langsdoorsnede van de golfagitatatiecoëfficiënt $K_d (=H_g/H_{s,inc})$. Verwachte waarde = 1.0 over volledige lengte waar zich geen sponslagen bevinden. Sponslagen over 100 cellen aan beide uiteinden absorberen alle inkomende golfenergie.	17
Figuur 3-10: Artificieel hoge bodemwrijving voor verhoogde numerieke stabiliteit (paars: Chézy getal $C=11$, rood: $C=300$ (verwaarloosbaar weinig bodemwrijving), blauw: land).	18
Figuur 3-11: Indicatie van gebied waar numerieke lowpass filter actief is (voor lagere waterstanden) (groen: numerieke filter). SWL = +6.00m TAW, NNW	19
Figuur 3-12: Indicatie van sponslaaggebied op het Klein Strand voor numerieke stabiliteit. SWL = +8.00m TAW, NNW.....	20
Figuur 3-13: Indicatie van sponslaaggebied op de Halve Maan voor numerieke stabiliteit. SWL = +8.00m TAW, NW.	20
Figuur 3-14: Typische reflectiecoëfficiënten intervallen voor elk type structuur in een haven (Thompson, 1996).	22
Figuur 3-15: Onderverdeling van de rand van de haven van Oostende per type constructie.	23
Figuur 3-16: Tijdok en Wandelaarkaai in het fysisch model. Waterstand +7.20m TAW: waterpeil zou zich boven de kaaimuren moeten bevinden en elke golf zou moeten kunnen overslaan, dit is echter niet het geval.	26
Figuur 3-17: Locaties van de golfhoogtemeters buitengaats en in de buitenhaven in het fysisch model tijdens de Montgomerydokproeven (Hassan et al., 2011b). Het fysisch model werd in spiegelbeeld opgebouwd.....	27
Figuur 3-18: Contourplot van de golfindringingscoëfficiënt K_d van het Mike 21 BW (links) en het MILDwave resultaat (rechts). Golfcondities voor waterstand +8.00m TAW en richting NNW.....	28
Figuur 3-19: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de algemene locaties in de binnenhaven. Golfrichting NNW. Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW.	30
Figuur 3-20: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op locaties in de binnenhaven (SWL = +7.20m TAW). Golfrichting NNW. Links: algemene locaties, rechts:	

locaties aan oostkant van de haven.....	31
Figuur 3-21: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de algemene locaties in de binnenhaven. Golfrichting -37° . Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW.	32
Figuur 3-22: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de algemene locaties in de binnenhaven. Golfrichting NW. Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW.	33
Figuur 3-23: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de meetlocaties tijdens de Montgomerydok proeven. Golfrichting NW. Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW. Opmerking: $G17_{mgd} = G13_{alg}$	34
Figuur 3-24: K_d -contourplots voor elke richting, met aanduiding van de langsdoorsneden AJK en AJL en de dwarsdoorsnede CD.	36
Figuur 3-25: K_d -waarden volgens de langs- en dwarsdoorsneden. Boven: langsdoorsnede AJK, Midden: langsdoorsnede AJL, Onder: dwarsdoorsnede CD. Mike 21 BW, MILDwave en fysisch model vergeleken. Hydrodynamische randvoorwaarden voor SWL=+8.00m TAW en golfrichting NNW.....	37
Figuur 3-26: K_d -waarden volgens de langs- en dwarsdoorsneden. Boven: langsdoorsnede AJK, Midden: langsdoorsnede AJL, Onder: dwarsdoorsnede CD. Mike 21 BW, MILDwave en fysisch model vergeleken. Hydrodynamische randvoorwaarden voor SWL=+8.00m TAW en golfrichting $-37^\circ N$	38
Figuur 3-27: K_d -waarden volgens de langs- en dwarsdoorsneden. Boven: langsdoorsnede AJK, Midden: langsdoorsnede AJL, Onder: dwarsdoorsnede CD. Mike 21 BW, MILDwave en fysisch model vergeleken. Hydrodynamische randvoorwaarden voor SWL=+8.00m TAW en golfrichting NW.	39
Figuur 3-28: 1D-spectra aan de haveningang ($G03_{alg}$) en in enkele punten in de binnenhaven, met aanduiding van piekperiode $T_p = 12.0s$. Resultaat van Mike 21 BW.....	40
Figuur 3-29: Directioneel spectrum opgesteld met DIWASP (2011) op basis van Mike 21 BW resultaat in $G13_{mgd}$	41
Figuur 3-30: Voorbeeld van verheffingsplot waarin de golfkruin van de eerste golf duidelijk zichtbaar is (Mike 21 BW resultaat). Met aanduiding van de loodrechte op de golfkruin (rode rechte) die de golfrichting aanduidt.	41
Figuur 3-31: Schematische voorstelling van keuze einde van havendamkop in de numerieke modellen waarbij de hellingen van de havendammen niet opgenomen zijn in de bathymetrie. boven: de mogelijkheden, onder: de uiteindelijke keuze in de finale modellen	43
Figuur 3-32: K_d -waarden voor de algemene locaties in het fysisch model. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model, het MILDwave model, het MILDwave model met versmalde haveningang (einde havendamkopen volgens mogelijkheid 2).	44
Figuur 3-33: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.	44
Figuur 3-34: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.	45
Figuur 3-35: Vergelijking van diffractiepatroon tussen finaal model (links) en model met kleinere haveningangsbreedte (rechts)	46
Figuur 3-36: Vergelijking van bathymetrie buitenhaven tussen finaal model met helling 1/10 tussen havengeul en oostelijk strand (links) en model met helling 1/100 tussen havengeul en oostelijk strand ontstaan door hypothetische erosie (rechts).	48
Figuur 3-37: K_d -waarden voor de algemene locaties in het fysisch model. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model, het MILDwave model met helling vaargeul 1/10, het MILDwave model met helling vaargeul 1/100.	49

Figuur 3-38: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.	49
Figuur 3-39: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.	50
Figuur 3-40: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 1.	51
Figuur 3-41: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 4.	51
Figuur 3-42: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 7b.	52
Figuur 3-43: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 7c.	52
Figuur 3-44: K_d -contourplot met indicatie van locaties G04, G05, G06 en G20.	53
Figuur 3-45: Havendammen vervangen door sponslagen (donkerrood in figuur) met MILDwave absorptiecoëfficiënt = 0.95	54
Figuur 3-46: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het MILDwave model en het MILDwave model met modellering van transmissie over de havendammen.	55
Figuur 3-47: K_d -waarden voor de Montgomerydok locaties. Vergelijking van de resultaten van het MILDwave model en het MILDwave model met modellering van transmissie over de havendammen. ...	56
Figuur 3-48: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.	56
Figuur 3-49: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.	57
Figuur 3-50: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model en Mike 21 BW met randvoorwaarde $T_p = 12.0s$ en $T_p = 10.0s$	58
Figuur 3-51: K_d -waarden voor de locaties langs de oostkant van de binnenhaven. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model en Mike 21 BW met randvoorwaarde $T_p = 12.0s$ en $T_p = 10.0s$	58
Figuur 3-52: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.	59
Figuur 3-53: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.	59
Figuur 3-54: K_d -contourplots met indicatie van locaties G04, G05, G06 en G20. Links: resultaat met piekperiode $T_p = 12.0s$, rechts: resultaat met piekperiode $T_p = 10.0s$. Resultaat Mike 21 BW.	60
Figuur 3-55: K_d -contourplots met indicatie van locaties G04, G05, G06 en G20. Links: resultaat met piekperiode $T_p = 12.0s$, rechts: resultaat met piekperiode $T_p = 10.0s$. Resultaat MILDwave.	60
Figuur 3-56: K_d -verloop van 1DH MILDwave model. Linkerrand: land ($x = 0 \rightarrow 615$) + 1 cel sponslaag (op $x = 616$ met $\mu = 0.93$), rechterrand: sponslagen (tot $x = 1500$)	61
Figuur 3-57: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model met lang- en kortkruinige golven.	62
Figuur 3-58: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.	63
Figuur 3-59: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.	63
Figuur 3-60: K_d -contourplot met focus op de buitenhaven. Resultaat van Mike 21 BW. Links:	

langkruinige golven, rechts: kortkruinige golven.	64
Figuur 3-61: K_d -contourplot met focus op de binnenhaven. Resultaat van Mike 21 BW. Links: langkruinige golven, rechts: kortkruinige golven.	65
Figuur 3-62: K_d -contourplot met uitvergroting naar meetpunt G14 voor onderzoek gevoeligheid van meetlocatie t.o.v. staande golfoscillaties.	66
Figuur 3-63: Schematische voorstelling van een dwarsdoorsnede van de helling van de Halve Maan. Boven: originele situatie met minimale waterdiepte 4.0m; Onder: nieuwe situatie met extensie van helling met minimale waterdiepte 0.5m.	66
Figuur 3-64: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model, het MILDwave model en het MILDwave model met hogere afsnijding van de helling aan de Halve Maan.	67
Figuur 3-65: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.	67
Figuur 3-66: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 900.	68
Figuur 3-67: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJL. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 900.	68
Figuur 3-68: K_d -contourplot met uitvergroting naar meetpunt G14 voor onderzoek invloed van hoger afsnijden van de Halve Maan helling. Boven: afsnijding met minimale waterdiepte 4.0m, Onder: afsnijding met minimale waterdiepte 0.5m. Resultaten bekomen met MILDwave.	69
Figuur 5-1: Opdeling van de kaaimuren in zones zoals gedefinieerd door UGent (2010) voor de binnenhaven.	72
Figuur 5-2: Opdeling van de kaaimuren in zones voor de achterhaven. (Achtergrond van Google Earth)	73
Figuur 6-1: 1D-spectrum te G07 _{mgd} na simulatie met "White Noise" spectrum. X-as: f [Hz]. Figuur louter ter illustratie.	76
Figuur 6-2: 1D-spectrum te G10 _{alg} na simulatie met "White Noise" spectrum. X-as: f [Hz]. Figuur louter ter illustratie.	77

1 Inleiding

1.1 De opdracht

Op 10 juli 2009 werd bijakte 1 van het bestek 16EB/04/18 "Golfmodellering Vlaamse en Nederlandse kust" vastgelegd. Deze bijakte omvat de studie van het extreem golfklimaat in de Belgische havens en wordt uitgevoerd door IMDC (International Marine & Dredging Consultants nv) in opdracht van en in samenwerking met het Waterbouwkundig Laboratorium.

1.2 Doel

Tijdens een superstorm bepalen de golven in een haven in belangrijke mate de belasting en golfoverslag op de zeeveringstructuren. Het doel van deze studie is om met behulp van numerieke golfmodellering het golfklimaat in de Belgische havens tijdens zo'n superstorm te bepalen. In het onderhavige rapport wordt de haven van Oostende beschouwd. Het doel van dit rapport kan ten slotte worden samengevat als:

- Identificatie en keuze van numerieke golfmodellen geschikt voor het modelleren van golfindringing;
- Een gedetailleerde beschrijving van het opstellen van de gekozen golfindringingsmodellen (methode), validatie met het fysisch model en het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses;
- Bespreking van het golfmodel voor de lokale generatie van golven door wind en de combinatie met de resultaten van de golfindringingsmodellen voor het bekomen van het totale golfklimaat in de haven;
- Opstellen van een overzicht van richtlijnen en lessen die geleerd zijn bij het opstellen van de numerieke golfindringingsmodellen.

1.3 Overzicht

- Deelopdracht 1: Inventarisatie Voorbereiding tijdreeksen met randvoorwaarden (Deelrapport 1 : I/RA/11273/05.106/CMA)
- Deelopdracht 2: Voortzetting validatie numeriek model (Deelrapport 2: I/RA/11273/06.057/SDO)
- Deelopdracht 3: Opstellen van de post processing tools (I/RA/11273/09.051/SDO)
- Deelopdracht 4: Technisch wetenschappelijke bijstand
 - Traject golfklimaat (Deelrapport 4: I/RA/11273/08.064/SDO)
 - Traject Onderzoek (Deelrapport 4: I/RA/11273/09.007/SDO)
 - Eindrapport (Deelrapport 4: I/RA/11273/09.030/SDO)
- Deelopdracht 5: Rapportage jaargemiddelde golfklimaat (Deelrapport 5: I/RA/11273/09.091/SDO)
- Bijakte: Numerieke modellering van het extreem golfklimaat in de Belgische havens
 - Haven van Oostende (het voorliggend rapport)

1.4 Structuur van het rapport

In eerste instantie wordt een overzicht gegeven in [Hoofdstuk 2](#) van alle bestaande golfmodellen die geschikt zijn om golfindringing te modelleren. Er wordt een gedetailleerde vergelijking van deze modellen uitgevoerd en een keuze voor toepassing in deze studie wordt gemaakt.

Het opstellen van de golfindringingsmodellen wordt vervolgens beschreven in [Hoofdstuk 3](#). Dit hoofdstuk bevat tevens een bespreking van de resultaten en gevoeligheidsanalyses en invloedstudies.

In [Hoofdstuk 4](#) wordt de golfmodellering besproken voor het bekomen van de lokaal door wind gegenereerde golven. Deze resultaten worden dan gecombineerd met de golfindringingsresultaten tot het totaal extreem golfklimaat in de haven in [Hoofdstuk 5](#).

In [Hoofdstuk 6](#) tenslotte worden twee andere toepassingen van deze modellen besproken: de simulatie van het gewoon golfklimaat en resonantiestudies. Er wordt ook een overzicht gegeven van lessen die geleerd zijn uit modelleringen met de nieuwe golfmodellen en belangrijke zaken waarmee rekening gehouden moet worden bij de modelleringen voor de andere havens in [Hoofdstuk 7](#). De algemene conclusies zijn ondergebracht in [Hoofdstuk 8](#).

2 Keuze numerieke golfmodellen

De keuze van de numerieke golfmodellen wordt volledig besproken in de nota opgenomen in Bijlage 1. Daarin:

- Worden de belangrijkste fysische golfprocessen in een haven geïdentificeerd aan de hand van een literatuurstudie;
- Worden per haven bepaald welke van deze fysische processen effectief kunnen optreden;
- Wordt een overzicht gegeven van de beschikbare golfmodellen die in staat zijn alle of ten minste enkele van deze fysische golfprocessen te modelleren;
- Worden ter conclusie enkele mogelijke keuzes van golfmodellen besproken.

Er is geen enkel golfmodel gevonden dat in staat is zowel golfindringing en lokale golfgeneratie door wind te modelleren. Daarom is besloten om de modellering van golfindringing en lokale golfgeneratie door extreme wind te ontkoppelen. Voor modellering van golfindringing is uiteindelijk gekozen om zowel MILDwave (Troch, 1998) en Mike 21 BW (DHI, 2009) toe te passen. Voor modellering van lokale golfgeneratie door extreme wind is het golfmodel SWAN (TUDelft, 2010) gekozen. Er wordt verwezen naar Bijlage 1 voor meer informatie over deze golfmodellen en de argumentatie voor deze keuze.

Een kort overzicht van de gekozen golfmodellen samen met hun karakteristieken en fysische golfprocessen wordt gegeven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Overzicht van de gekozen golfmodellen en hun karakteristieken

	MILDwave	Mike 21 BW	SWAN
Type	Lineair	Niet-lineair	Spectraal
Vergelijkingen	Mild-slope vergelijkingen Radder and Dingemans (1985)	Boussinesq vergelijkingen Madsen et al. (1991, 1992)	Action balance vergelijking Booij et al. (1999)
Domein	Tijd	Tijd	Frequentie
Fysische processen			
Refractie & shoaling	X	X	X
DiffRACTIE	X	X	X (behalve samen met reflectie)
(partiële) Reflectie	X Brorsen (1998, 2000)	X Brorsen (1998, 2000)	X (geen staande golven)
Golfbreking	X	X	X
Niet-lineaire golf-golf interacties	-	X	X (geen sub harmonics)
Golfgeneratie door wind	-	-	X

3 Golfindringing: faseoplossende golfmodellering

3.1 Opbouw van modellen

3.1.1 Bathymetrie en haven geometrie

Inleiding

Door afstemming tussen het WL en UGent (2009a) werd reeds eerder een bathymetrie opgesteld voor de haven van Oostende die voor zowel het numeriek model (SimWave, UGent, 2009a) als het fysisch model dienstig is. Toch is ervoor gekozen om de bathymetrie opnieuw op te stellen en wel om volgende redenen:

- De scope van dit project is om in meest nadelige toestand de golfindringing te kennen tijdens een superstorm. De meeste golfindringing kan optreden bij de laagst mogelijke bodempeilen in de haven. Dergelijke bodempeilen treden op vlak na baggerwerken in de haven. Daarom zijn de streefdieptes die gelden in de haven gebruikt als nieuwe bathymetrie voor de binnenhaven i.p.v. de huidige situatie in de haven zoals in de bathymetrie van UGent.
- De modelleur kan dan proactief met betrekking tot numerieke stabiliteit de bathymetrie opbouwen.
- De modelleur is op die manier zeer vertrouwd met de bathymetrie en kan eventuele onstabilititeiten ten gevolge van de bathymetrie makkelijker identificeren.
- De meest recente plannen kunnen dan gebruikt worden.
- Een onafhankelijke opbouw van de bathymetrie laat controle toe die nauwkeurigheid van beide bathymetrieën ten goed komt.

In de laatste paragraaf onder §3.1.1 wordt de nieuwe bathymetrie vergeleken met de bestaande bathymetrie van UGent en het fysisch model.

Nieuwe bathymetrie en afbakening rekendomein

De laagst mogelijke bodempeilen binnen de haven laten de meeste golfindringing toe. Dit zijn de streefdieptes die aangehouden moeten worden bij het baggeren van de havens en vaargeulen. De streefdieptes werden geleverd door de Afdeling Kust (2011) voor de jachthavens in Oostende en door de Afdeling Maritieme Toegang (2011) voor de economische gedeelten van de haven. Tussen elke voorgeschreven streefdieptezone is een helling aangenomen van 1/3.

Gebieden van de haven waarvoor geen streefdieptes zijn voorgeschreven zijn als volgt bepaald:

- Klein Strand: op basis van het nieuwste ontwerp van de strandsuppletie en na afslag t.g.v. een 10-jarige en daaropvolgend een 1000-jarige storm (IMDC, 2008). Dit is de meest nadelige toestand voor het golfklimaat.
- Strand ten noorden van de Halve Maan, binnen de nieuwe oostelijke havendam en naast de nieuwe zeilclub (OSRC): op basis van plan van Maritieme Toegang (2011). De overgang tussen dit gebied en de vaargeul heeft een helling van 1/10. In §3.3.3 wordt de invloed onderzocht van een flauwere helling (1/100) op het extreem golfklimaat in de haven.

Tenzij op het klein strand, wordt er verder geen rekening gehouden met erosie die opgelopen wordt tijdens de storm.

Naast de topografie van de (zee)bodem bevat de bathymetrie ook sommige constructies zoals:

- de oude westelijke havendam, gebaseerd op de originele plannen (1888) en meer recente plannen geleverd door Maritieme Toegang (2011),
- de nieuwe glooiing aan de verbrede halve maan, op basis van een plan geleverd door Maritieme Toegang (2011).

Het opnemen van deze constructies in de bathymetrie is toegelaten omdat de hellingen van deze constructies ongeveer 1/3 zijn (dit is een bovengrens voor de golfindringingsmodellen). De hellingen van de havendammen zijn niet opgenomen in de bathymetrie omdat:

- Ze te steil zijn¹ (helling van 1/1.5 en 1/2),
- Golfploop in de numerieke modellen ingeschakeld zou moeten worden en dit voor numerieke instabiliteiten zou zorgen.

Dit heeft echter een effect op de breedte van de haveningang. De numerieke havendammen reiken net tot aan de stilwaterlijn op de havendam voor elke waterstand. De invloed van de breedte van de haveningang wordt beschouwd in §3.3.2. De teenconstructie van de golfbrekers werd ook niet opgenomen in de bathymetrie omwille van de beperkte afmetingen.

De afbakening van het rekendomein zorgt ervoor dat het interessegebied omvat is volgens de havengeometrie en buiten de haven met voldoende ruimte voor ontwikkeling van de golven. Daarbij wordt het rekendomein zo klein mogelijk gehouden om de rekentijd zoveel mogelijk te beperken. Tussen de golfgeneratielijn en de haven dient een aanloopafstand van minimaal 2 golflengten aanwezig te zijn en zeewaarts van de golfgeneratielijn volstaat 1 à 2 golflengten voor de sponslagen die de uitgaande golfenergie absorberen (DHI, 2009).

De landgrens in de binnenhaven volgt de verticale kaaimuren in de haven, alsook de kaaivlakken op palen om partiële reflectie en interactie tussen de kaaivlakkengrenzen en golven voor de hoge stormwaterstanden toe te laten. Kaaivlakken op palen zijn te vinden:

- In het Montgomerydok: het zuidelijk uitspringend kaaivlak,
- Het kaaivlak naast het Station,
- De kaaivlakken ten oosten en westen van de Demeysluis

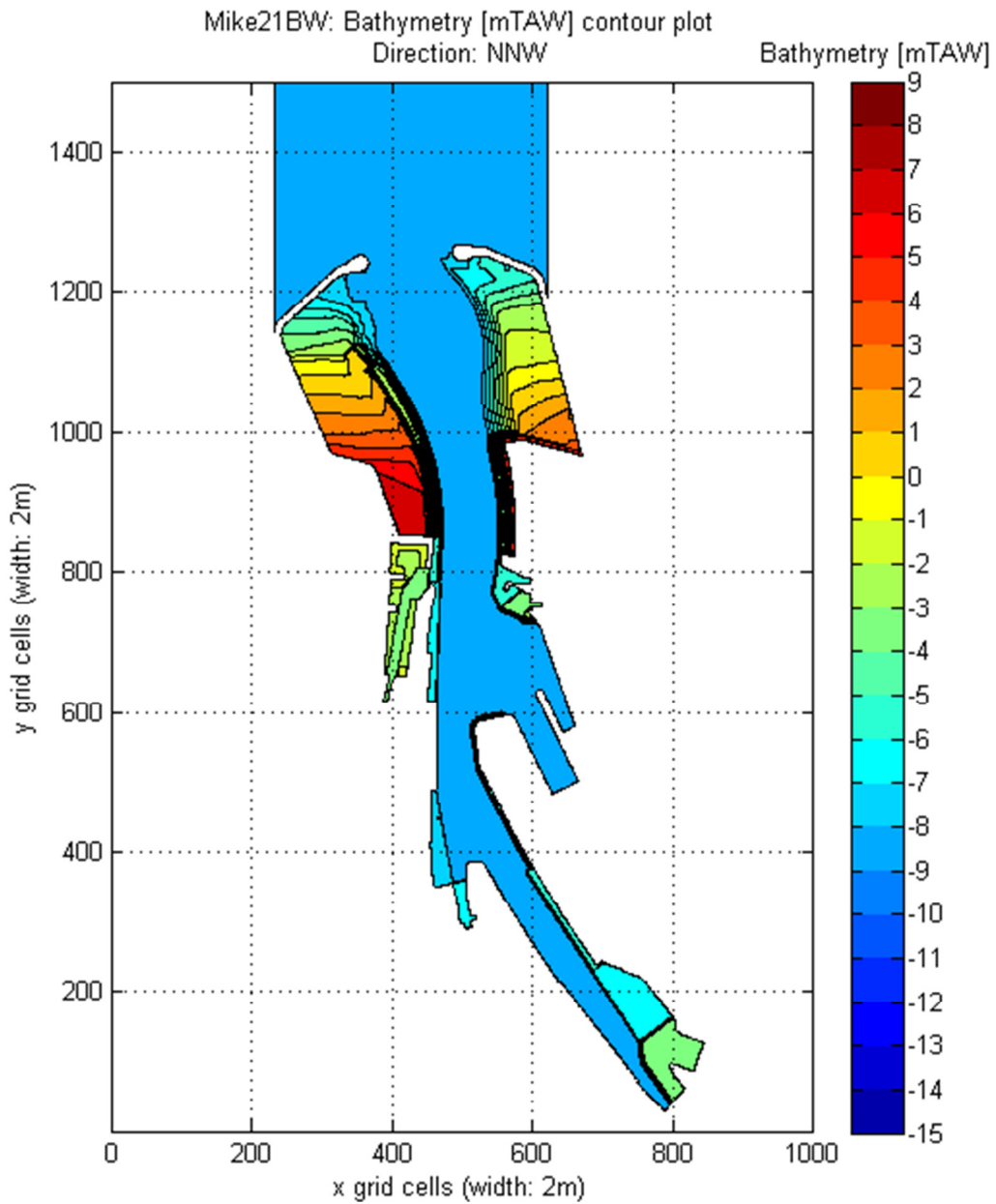
De glooiingen in de binnenhaven (e.g. einde Zeewezendok, glooiing bij RYCO,...) worden als verticale wand gemodelleerd, wegens te steile helling (maximaal 1/3 toegelaten). De partiële reflectie wordt dan op numerieke wijze behandeld (cf. §3.1.7).

De pontons in de haven (bv. einde Tijdok en Zeewezendok) worden verondersteld niet aanwezig of verloren te zijn tijdens de storm en worden bijgevolg niet in rekening gebracht.

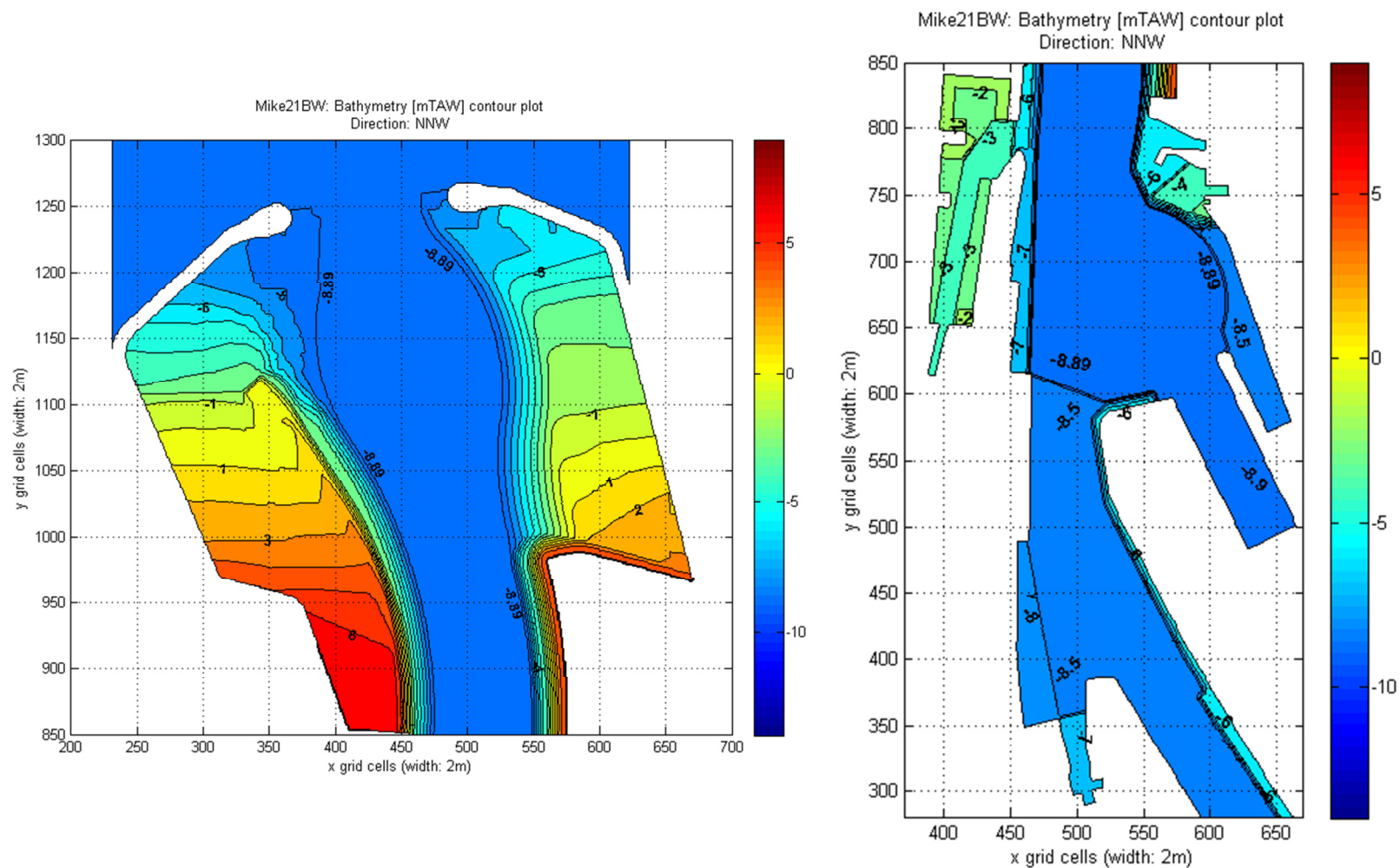
Het rekendomein bevat ook de arm naar de Spuikom tot aan de brug bij de RYCO jachtclub (cf. Figuur 3-1).

De nieuwe bathymetrie is weergegeven in Figuur 3-1 en Figuur 3-2. Alle peilen zijn gegeven in [m TAW]. Omdat het gebied buiten de haven klein is gehouden is het noodzakelijk het rekendomein te heroriënteren per golfrichting. De verticale van het rechthoekig rekendomein wordt daarbij steeds gericht volgens de beschouwde golfrichting.

¹ MILDwave zou dergelijk steile hellingen wel kunnen opnemen zonder numerieke instabiliteit, maar de numerieke resultaten zouden onbetrouwbaar zijn in deze gebieden (Mild-slope vergelijkingen zijn toepasbaar tot 1/3).



Figuur 3-1: Overzicht van de volledige bathymetrie van de haven van Oostende voor de numerieke golfindringingsmodellen.



Figuur 3-2: Bathymetrie van buitenhaven (links) en binnenhaven (rechts).

Vergelijking nieuwe bathymetrie met SimWave/fysisch model

In Figuur 3-3 en Figuur 3-4 wordt de nieuwe bathymetrie en de bathymetrie opgesteld door Afdeling Weg- en Waterbouw (AWW) van UGent i.s.m. het Waterbouwkundig Laboratorium (WL) vergeleken. Figuur 3-5 bevat de verschilkaarten van de buitenhaven en de binnenhaven. De verschilkaarten geven het verschil tussen de nieuwe en de bestaande bathymetrie.

De grootste verschillen voor de buitenhaven (cf. Figuur 3-3 en Figuur 3-5) zijn:

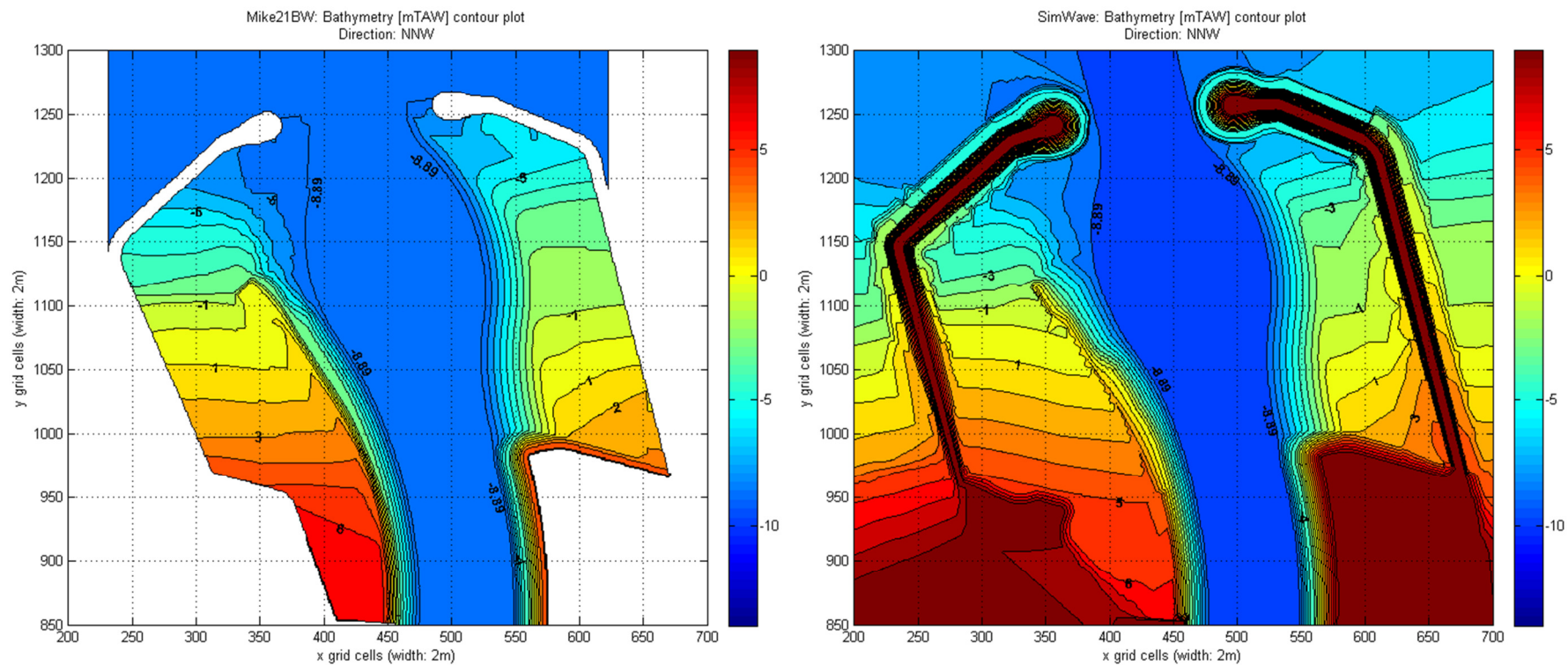
- De hellingen van de havendammen die zijn opgenomen in de bestaande bathymetrie en niet in de nieuwe bathymetrie,
- Ter hoogte van de oude westelijke havendam, wegens de steile helling en een weinig verschillende locatie van de havendam.

De overige delen van de buitenhaven komen vrij goed overeen alsook de Halve Maan.

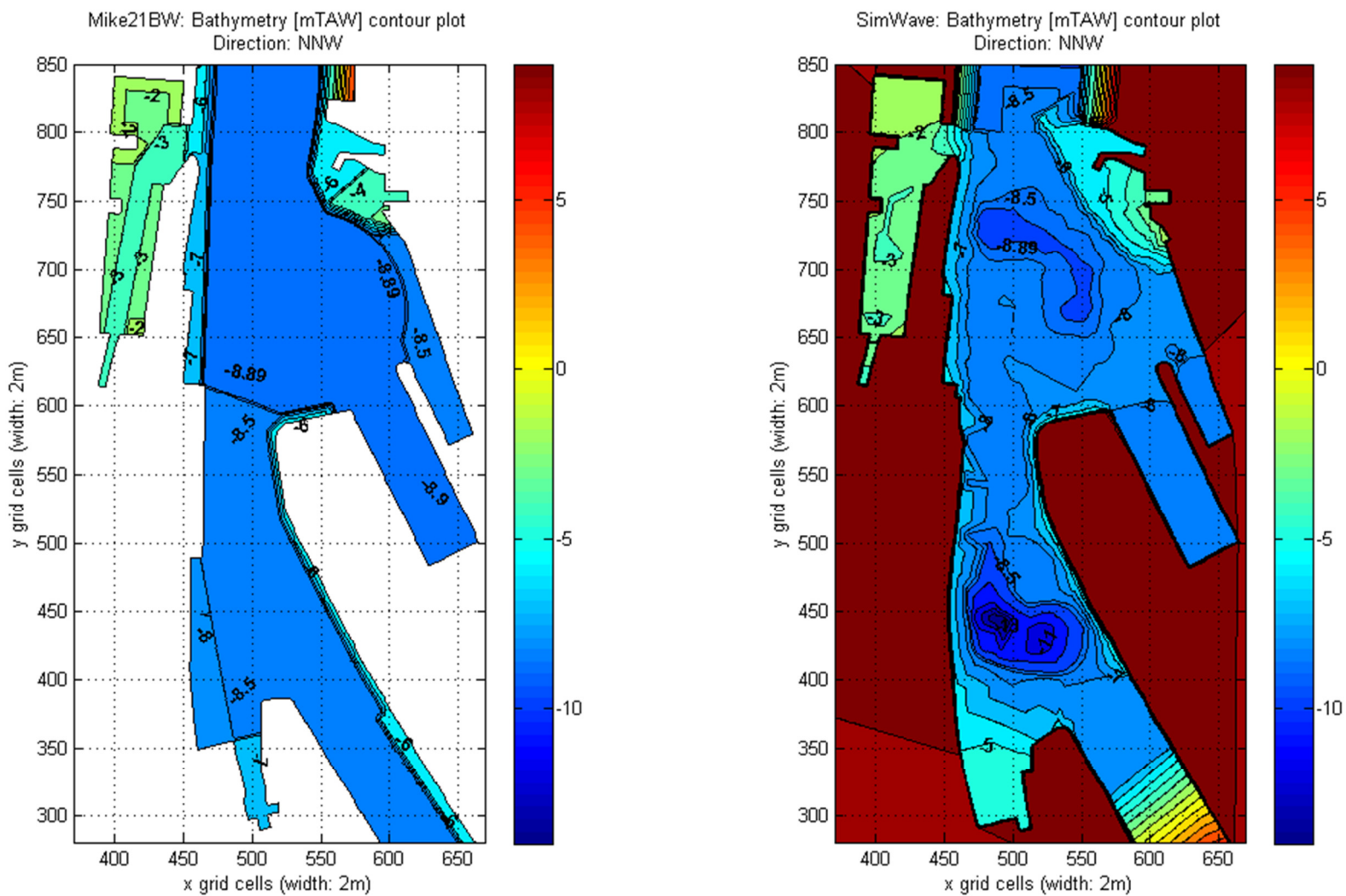
In de binnenhaven (cf. Figuur 3-4 en Figuur 3-5) heeft de nieuwe bathymetrie meestal een lager bodempeil met als opvallende uitzondering de erosieput naast het Station. Hier is het bodempeil lokaal 4.0m lager in de bestaande bathymetrie.

Tenslotte verschilt de havengeometrie van de nieuwe bathymetrie op volgende locaties met de bestaande bathymetrie:

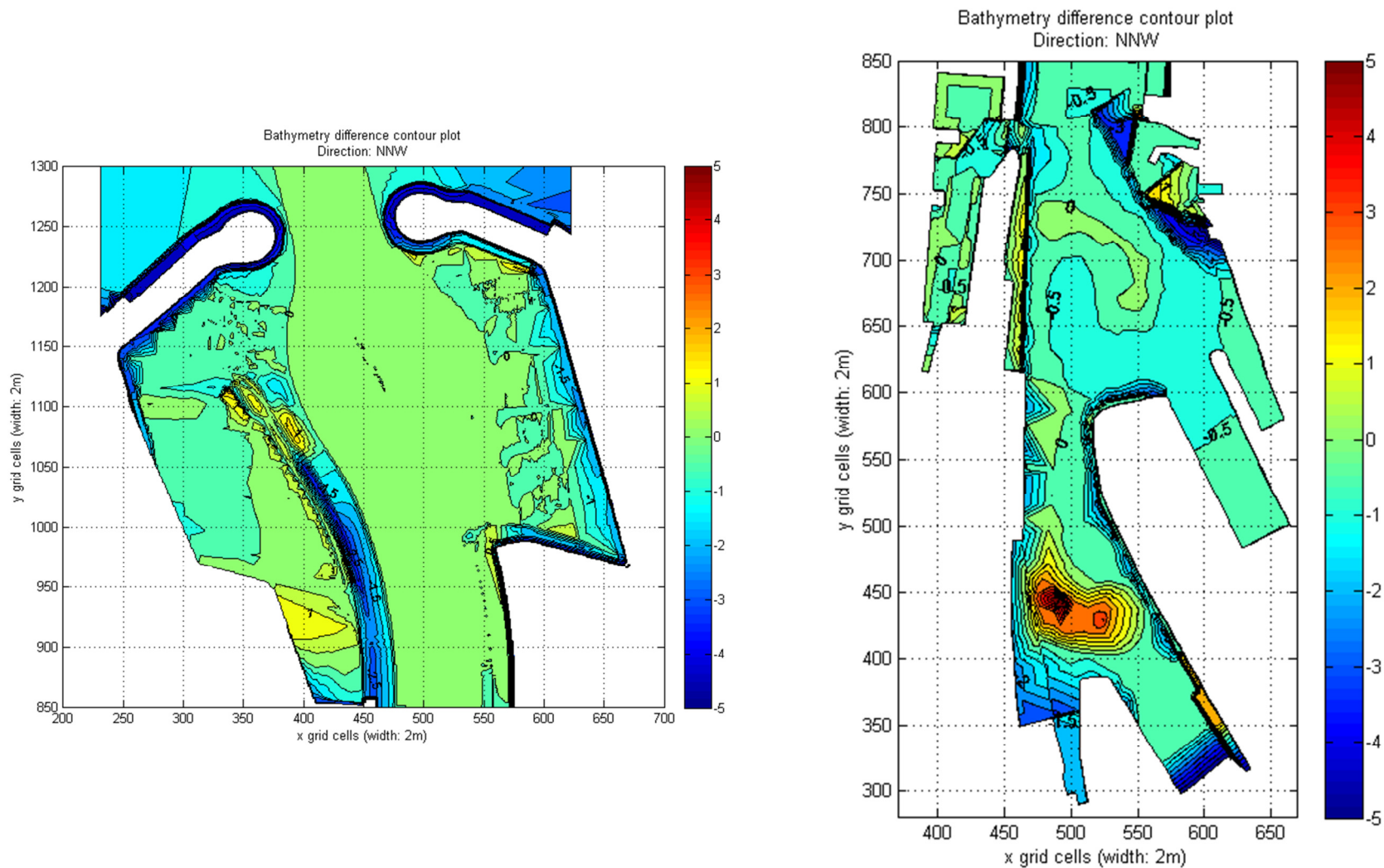
- In de buitenhaven is de contour van het nieuwe Zeeheldenplein gevolgd in de nieuwe bathymetrie,
- De kaai van C-Power aan de Halve Maan is opgenomen (ook in het fysisch model),
- De landsgrens volgt kaaivlakken op palen in de nieuwe bathymetrie.
- De arm die naar de Spuikom leidt, behoort nu ook tot het rekendomein.



Figuur 3-3: Vergelijking van buitenhaven van nieuwe bathymetrie (links) en bestaande bathymetrie (rechts)



Figuur 3-4: Vergelijking van binnenhaven van nieuwe bathymetrie (links) en bestaande bathymetrie (rechts)



Figuur 3-5: Verschilkaarten (nieuwe bathymetrie – bestaande bathymetrie) van buitenhaven (links) en binnenhaven (rechts) in [m]

3.1.2 Hydrodynamische randvoorwaarden

De hydrodynamische randvoorwaarden zijn gegeven in Tabel 3-1. Ze zijn gebaseerd op de 1000-jarige condities opgesteld door Technum et al. (2002) in het kader van de studies voor het OW-plan Oostende en de condities opgesteld door Verwaest et al. (2008) in het kader van de overstromings-risicoberekeningen. Deze condities zijn ook allen terug te vinden in de proevenmatrix van het fysisch model. De significante golfhoogte H_{m0} is beperkt gehouden tot 5.0m om instabiliteit in het niet-lineair golfmodel Mike 21 BW te vermijden. Voor waterstand +7.20m TAW is ook een simulatie met een lagere golfperiode uitgevoerd, de invloed van de golfperiode wordt besproken in §3.3.6.

Tabel 3-1: De hydrodynamische randvoorwaarden en aanduiding van gemodelleerde condities

SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	$H_{m0,model}$ [m]	T_p [s]	Richting [-]		
					NNW	-37°N	NW
+6.00	14.9	4.6	4.6	12.0	X	X	X
+6.50	15.4	4.9	4.9	12.0	X*		
+7.00	15.9	5.0	5.0	12.0	X*		
+7.20	16.1	5.0	5.0	12.0	X	X	X
+7.20	16.1	5.0	5.0	10.0	X		
+7.50	16.4	5.4	5.0	12.0	X		
+8.00	16.9	5.7	5.0	12.0	X	X	X

X*: Voor deze conditie is enkel een resultaat voor Mike 21 BW beschikbaar.

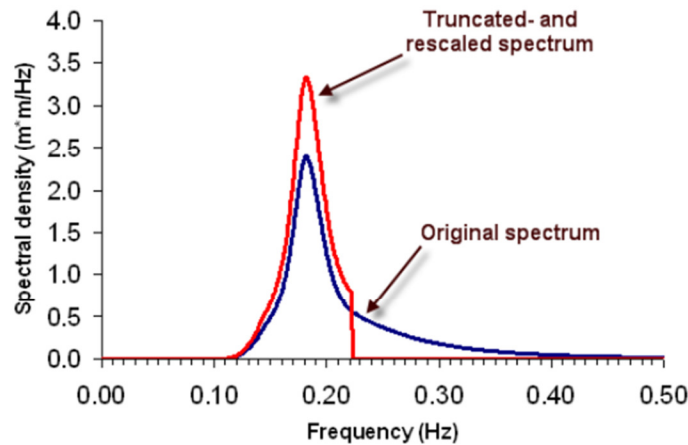
Voor elke golfconditie wordt een JONSWAP spectrum opgesteld. Deze dient als basis voor de opbouw van een tijdreeks die opgelegd wordt aan de golfgeneratielijn.

In Mike 21 BW moet een cutoff-frequentie gekozen worden om de numerieke stabiliteit te kunnen verzekeren (DHI, 2009). De verhouding van de maximale waterdiepte in het rekendomein en de diepwater golflengte van de kortste golf mag niet groter zijn dan 0.5 (bij gebruik van de Boussinesq vergelijkingen inclusief correctietermen voor dieper water). De minimale bovengrens van deze cutoff-frequentie wordt bepaald door de condities met de grootste waterdiepte, nl. voor SWL = +8.00mTAW. Voor een golf met periode 4.7s geldt bovenstaande voorwaarde:

$$\frac{d_{max}}{L_0} = \frac{16.9}{34.5} = 0.49 \leq 0.50$$

Voor +6.00mTAW heeft de kortste golf volgens deze voorwaarde een periode van 4.4s zodat een hogere cutoff-frequentie toegelaten zou zijn. Uit praktische overwegingen wordt dit verschil verwaarloosd en wordt voor alle golfcondities dezelfde cutoff-frequentie ($f_{cutoff} = 1/4.7s = 0.213Hz$) toegepast.

Het afsnijden van het spectrum zorgt echter voor een afname aan golfenergie en dus ook een daling van de significante golfhoogte. Mike 21 BW laat daarom toe om het spectrum te herscalen zodat het afgesneden spectrum dezelfde energie-inhoud heeft als het origineel spectrum (cf. Figuur 3-6).



Figuur 3-6: Herschaling van getrunceerd spectrum voor behoud van totale golfenergie (DHI, 2009)

Om instabiliteit in de golfgeneratie in MILDwave te vermijden, wordt het Jonswap spectrum in de code van MILDwave ook afgesneden volgens de grenzen (Caspeele, 2006):

$$0.75f_p \leq f \leq 2f_p$$

Een herschaling van het spectrum zoals in Mike 21 BW is niet mogelijk. Dit is echter van weinig belang want MILDwave is een lineair golfmodel zodat de grootte van de initiële golfhoogte geen invloed heeft op de golfindringingscoëfficiënt K_d .

Alle simulaties worden uitgevoerd met langkruinige golven. Deze zijn nadeliger dan kortkruinige golven. Dit komt bovendien overeen met het fysisch model. De invloed van kortkruinige golven wordt besproken in §3.3.7.

3.1.3 Rekenrooster, tijdstap en simulatieduur

Rekenrooster

Om een modellering te kunnen uitvoeren, dient een discretisatie naar een eindig aantal rekenpunten binnen het rekendomein uitgevoerd te worden. De discretisatie resulteert in een regelmatig rechthoekig rekenrooster. De roostercelafmetingen in Mike 21 BW worden gekozen zodat (DHI, 2009):

- De kortste golflengte in het rekendomein ($T_{\min} = 4.7s$ en $d_{\min} = 2.0m \Rightarrow L_{\min} = 52.6m$) een resolutie heeft van 7 à 10 gridpunten:

$$\frac{L_{\min}}{10} \approx 5.0m$$

- De meest energetische golven (dus met piekperiode T_p) een resolutie hebben van 20 à 40 gridpunten per golflengte in de brekingszone (met golfbreking ingeschakeld):

$$\frac{L_p}{20 \text{ à } 40} \approx 2.6m \text{ à } 1.3m$$

- De complexiteiten van de bathymetrie en havengeometrie voldoende te onderscheiden zijn.

Uit deze voorwaarden volgt een praktische keuze van de roostercelafmetingen:

$$\boxed{\Delta x = \Delta y = 2.0m}$$

Voor de roostercelafmetingen in MILDwave geldt (Caspeele, 2006):

- Volgende ervaringsregel:

$$\frac{L_g}{20} \leq \Delta x = \Delta y \leq \frac{L_g}{10}$$

- met L_g de golflengte van de kortste golf in het meest ondiepe punt ($d_{\min} = 2.0\text{m}$).
- Voor een goede ruimtelijke discretisatie van hellingen (Jensen, 2004):

$$\Delta x = \Delta y = \frac{L_g}{30} \text{ à } \frac{L_g}{50}$$

In Tabel 3-2 zijn deze regels berekend voor de kortste en langste golven en de golven met piekperiode. De resultaten van de kortste golven (voor f_{\max}) zijn bepalend.

Tabel 3-2: Grenzen voor de roostercelafmetingen

Frequentie	f [Hz]	T [s]	Lg [m]	Lg/10 [m]	Lg/20 [m]	Lg/30 [m]	Lg/50 [m]
f_{\min}	0.0625	16.0	71.0	7.1	3.6	2.4	1.4
f_p	0.0833	12.0	53.0	5.3	2.7	1.8	1.1
f_{\max}	0.1667	6.0	26.0	2.6	1.3	0.9	0.5

Opdat alle invoer voor het rekenrooster (bathymetrie en sponslagen) overdraagbaar zou zijn van Mike 21 BW naar MILDwave, wordt dezelfde roostercelgrootte $\Delta x = \Delta y = 2.0\text{m}$ aangenomen voor het MILDwave model. Deze aanname voldoet dan niet aan de tweede voorwaarde. Deze voorwaarde heeft echter vooral effect op reflectie van zwakkere hellingen (Jensen, 2004), in dit geval het Klein Strand, en heeft niet zozeer betrekking op numerieke stabiliteit. Het Klein Strand is sowieso niet het interessegebied en reflectie vanaf het Klein Strand komt ook niet terecht in het interessegebied (=binnenhaven) zodat dit geen probleem vormt. De helling aan de Halve Maan (=1/3) is een steilere helling zodat hier dergelijke strenge voorwaarde niet noodzakelijk is.

Tijdstap

In Mike 21 BW moet de tijdstap voldoen aan volgende voorwaarden (DHI, 2009):

- De kleinste golfperiode (=4.7s) moet 25-35 tijdstappen bevatten.
- De tijdstap moet voldoen aan het Courant-criterium:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{C}$$

- Indien golfbreking wordt ingeschakeld is de tijdstap typisch 0.05s-0.10s volgens een ervaringsregel van DHI (2009).

De bovengrenzen voor de tijdstap zijn samengevat in Tabel 3-3.

Tabel 3-3: Bovengrenzen voor de tijdstap Δt in Mike 21 BW op basis van voorwaarden gegeven door DHI (2009)

Frequentie	f [Hz]	T [s]	L0 [m]	Ld _{max} [m]	C [m/s]	Δt_{\max} [s]	T/25 [s]	T/35 [s]
f_p	0.0833	12.0	225.0	142.2	11.9	0.17	0.48	0.34
f_{\max}	0.1667	4.7	34.5	34.3	7.3	0.27	0.19	0.13

Op basis hiervan zou een tijdstap van 0.10s volstaan. Uit de numerieke stabiliteit is echter gebleken dat een lagere tijdstap nodig is. De tijdstap die toegepast is voor alle Mike 21 BW simulaties is dan gekozen op:

$$\Delta t = 0.05\text{s}$$

Voor MILDwave moet ook het Courant criterium gelden. De bovengrenzen zijn samengevat in Tabel 3-4.

Tabel 3-4: Bovengrenzen voor de tijdstap Δt in MILDwave op basis van het Courant criterium

Frequentie	f [Hz]	T [s]	L0 [m]	Ld _{max} [m]	C [m/s]	Δt_{\max} [s]
f _{min}	0.0625	16.0	400.0	196.8	12.3	0.16
f _p	0.0833	12.0	225.0	142.2	11.9	0.17
f _{max}	0.1667	6.0	56.0	54.0	9.0	0.22

De preprocessor van MILDwave stelt echter een bovengrens voor van 0.08s. Daarom wordt voor alle MILDwave simulaties ook $\Delta t = 0.05s$ gekozen.

Ten slotte wordt nog opgemerkt dat de absorptiecoëfficiënten van de sponslagen niet tijdstapafhankelijk zijn (mond. comm. Troch, 2011). Dit betekent dat voor een andere tijdstap een andere absorptiecoëfficiënt geldt om dezelfde absorptie in het model te bekomen. Dit is vooral van belang voor het modelleren van de partiële reflectie (cf. §3.1.7). Het is daarom belangrijk om voor alle simulaties dezelfde tijdstap te gebruiken zodat de absorptiecoëfficiënten ongewijzigd gelaten kunnen worden.

Simulatieduur

Voor de berekening van statistische parameters (zoals de significante golfhoogte H_{m0}) moet de simulatie in elk punt van het rekendomein een 15-20min duren. Daarom is een opstarttijd nodig om de kortste golf ($T = 4.7s$, $L = 34.5m \Rightarrow C = L/T = 7.3m/s$) voldoende tijd te geven het verste punt in het rekendomein te bereiken (DHI, 2009). De afstand van de golfgeneratielijn tot aan het verst gelegen punt in de haven is ongeveer 2600m. De opstarttijd moet dan ten minste bedragen:

$$\frac{2600}{7.3} = 356s \approx 6min$$

Een totale simulatieduur van 25min wordt gekozen voor de Mike 21 BW simulaties.

In MILDwave wordt echter aangeraden dat de traagste golf ($T = 6.0s$, $L = 53.0m \Rightarrow C = L/T = 8.8m/s$) heen én terug moet gepropageerd zijn over het volledige rekendomein. Voor MILDwave bedraagt de opstarttijd dus:

$$2 * \frac{2600}{8.8} = 591s \approx 10min$$

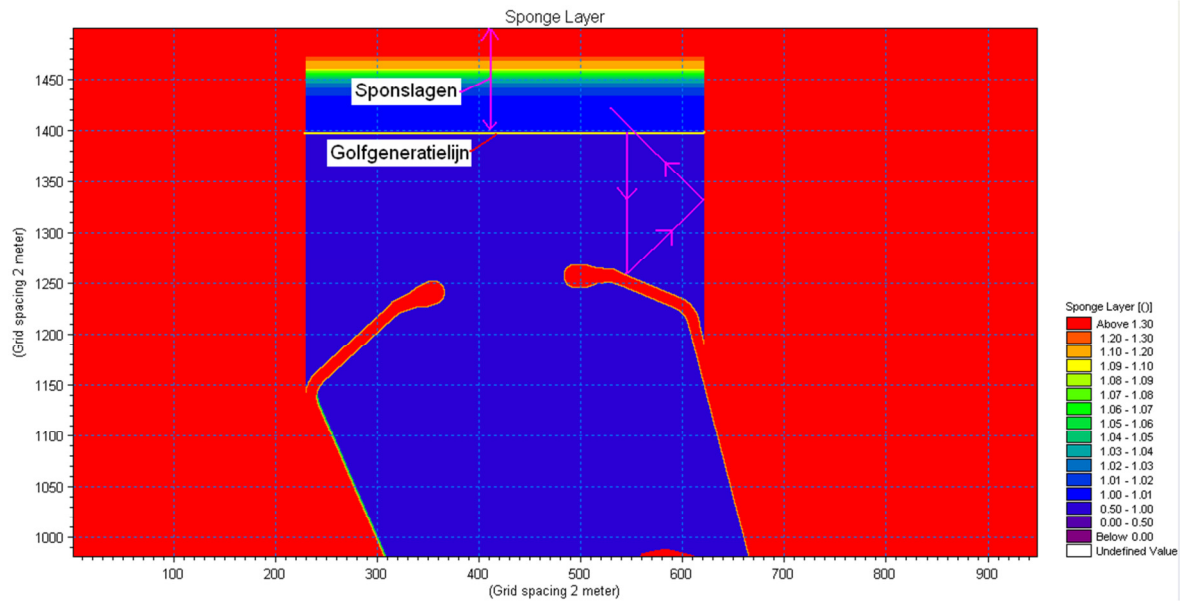
De totale simulatieduur wordt in MILDwave ook op 25min gekozen.

3.1.4 Golfgeneratie en -absorptie

Golven worden in het rekendomein gegenereerd door een interne golfgeneratielijn. Er wordt een tijdreeks van verheffingen opgebouwd op basis van het JONSWAP spectrum uit §3.1.2 die opgelegd wordt langs deze lijn. Golven propageren naar beide kanten van deze lijn met een golfrichting loodrecht op deze lijn. De golfgeneratielijn is geplaatst op een afstand van twee golflengten weg van de haven om het golfveld zich voldoende te laten ontwikkelen (DHI, 2009). Tussen de golfgeneratielijn en de bovenrand van het rekendomein zijn sponslagen aangebracht om de uitgaande golfenergie te absorberen:

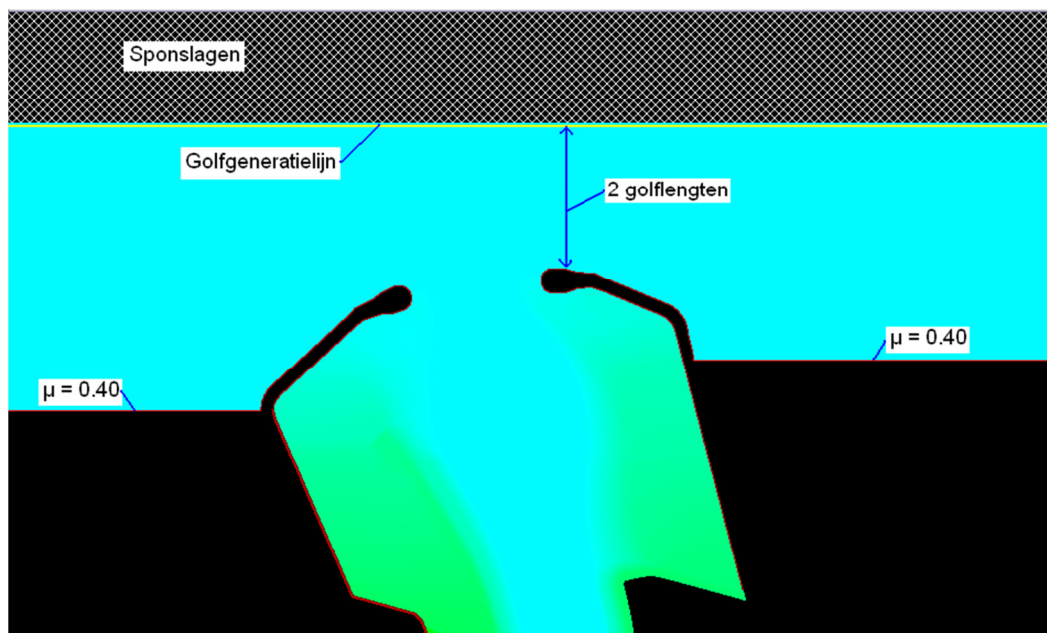
- rechtstreeks afkomstig van de golfgeneratielijn;
- afkomstig van reflecties tegen structuren in de haven.

Het valt op dat geen sponslagen aan de zijanten zijn aangebracht. Dit werd gedaan om het rekendomein zoveel als mogelijk te beperken (en dus de rekentijd). Golven die reflecteren tegen de havendammen kunnen dan op hun beurt reflecteren tegen de zijanten. De reflectiehoeken zijn echter zo gericht dat deze gereflecteerde golfenergie steeds in de bovenste sponslagen terecht komt en dus aldaar geabsorbeerd wordt (cf. Figuur 3-7).



Figuur 3-7: Positie golfgeneratielijn en sponslagen in het Mike 21 BW model.

In het MILDwave model is de locatie van de golfgeneratielijn en het aantal sponslagen behouden (cf. Figuur 3-8) zodat het rekendomein overdraagbaar is van Mike 21 BW naar MILDwave. In de huidige versie van MILDwave² is echter verplicht dat de golfgeneratielijn zich over de volledige breedte van het rekendomein uit kan strekken. Dit verklaart het groter rekengebied buiten de haven over de volledige breedte van het rekendomein. Om de reflecties toch enigszins te beperken is aan de gebieden waar loodrechte golfinval optreedt één sponslaag (=1 gridcel breed) opgelegd die zorgt voor een zo laag mogelijke reflectiecoëfficiënt (absorptiecoëfficiënt $\mu = 0.40$).



Figuur 3-8: Positie golfgeneratielijn en sponslagen in het MILDwave model.

² Zou echter relatief eenvoudig aan te passen zijn in de code van MILDwave (mond. comm. Troch, 2011)

3.1.5 Fysische processen

Golfbreking

Dieptegeïnduceerde golfbreking speelt een belangrijke energiedissiperende rol in de ondiepere gedeelten van de haven:

- het Klein Strand
- het oostelijk strand binnen de haven
- de oude westelijke havendam
- de Halve Maan

Golfbreking wordt daarom ingeschakeld in beide modellen. Daarbij worden de standaardinstellingen behouden.

Golfoploop

Mike 21 BW is in staat golfoploop te modelleren. Om de numerieke stabiliteit te verzekeren zijn echter te veel maatregelen nodig die een nadelige impact hebben op het praktisch gebruik van het model. Vooral de rekentijd en stabiliteit voor andere golfcondities zouden er erg onder lijden. Daarom wordt golfoploop niet gemodelleerd.

Dit heeft als gevolg dat een minimale waterdiepte overal moet gelden in het rekendomein:

- Op het Klein Strand zal voor elke waterstand een minimum waterdiepte van 2.0m gehanteerd worden,
- Wegens stabiliteitsredenen is een minimale waterdiepte van 4.0m noodzakelijk aan de Halve Maan.

MILDwave kan geen golfoploop modelleren. In MILDwave geldt dus ook een minimale waterdiepte. Dezelfde aannames als in het Mike 21 BW model zijn genomen. In §3.3.8 wordt de helling aan de Halve Maan hoger afgesneden (= een kleinere minimale waterdiepte), om de invloed hiervan te bestuderen op het golfklimaat in de haven. Dit is mogelijk in MILDwave dankzij de grotere stabiliteit van het model.

Golftransmissie

De kruin van de nieuwe havendammen bevindt zich ongeveer op peil +8.00mTAW (westelijke havendam, AMT, 2011). Voor de hogere waterstanden in Tabel 3-1 zal er dus zeker golftransmissie optreden. Dit werd ook waargenomen in het fysisch model (Hassan et al., 2011b).

Mike 21 BW is in staat transmissie te modelleren aan de hand van porositeitslagen (DHI, 2009). Deze zou echter overal een breedte moeten hebben van $L_p/4 = 134/4 = 33.5\text{m}$. Daarbij zou verlies van de vorm van de havendammen verloren gaan. Introductie van porositeitslagen zorgt bovendien voor bijkomende numerieke instabiliteit. Daarom is beslist om geen golftransmissie te modelleren in het Mike 21 BW model.

Omdat de golftransmissie over de havendammen vooral gericht is naar het Klein Strand en het oostelijk strand en minder naar de vaargeul die naar de binnenhaven leidt, wordt aangenomen dat golftransmissie geen belangrijk aandeel vormt van de totale golfenergie in de binnenhaven.

In §3.3.5 wordt de invloed van golftransmissie op het golfklimaat in de haven bestudeerd met MILDwave die wel in staat is golftransmissie op een numeriek stabiele wijze te modelleren en zonder vormverlies van de havendammen.

Bodemwrijving

Bodemwrijving kan enkel door Mike 21 BW gemodelleerd worden en niet door de huidige versie van MILDwave³. Dit fysisch proces speelt vooral een belangrijke rol bij het modelleren van lange golven ($T = 30\text{s}-300\text{s}$ en meer) omdat zij een grote invloed ondervinden van de bodem. Dissipatie door bodemwrijving is beperkt voor korte golven ($T < 20\text{s}$) over de relatief korte afstand van een haven. Bodemwrijving wordt daarom niet ingeschakeld voor de volledige haven, echter wel lokaal om stabiliteitsredenen (cf. §3.1.6).

³ Is relatief eenvoudig te implementeren in de code van MILDwave (mond. comm. Troch, 2010).

3.1.6 Numerieke stabiliteit

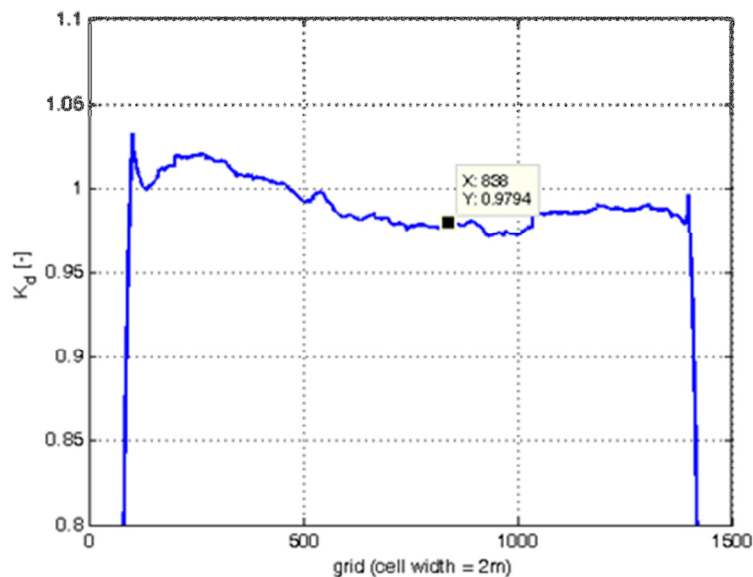
Inleiding

De ervaringen met Mike 21 BW leren dat het een golfmodel is met een zeer gevoelige numerieke stabiliteit. De numerieke instabiliteit uit zich als een zogenaamde “blow-up” ofwel negatieve waterdiepte ten gevolge van een abnormale en ongecontroleerde toename van een lokale golfverheffing. In het voorgaande (cf. §3.1.5) zijn reeds een aantal fysische processen uitgeschakeld om numerieke stabiliteit te kunnen verzekeren en een golfmodel te bekomen dat praktisch bruikbaar is (handelbare rekentijd, geschikt voor verschillende hydrodynamische randvoorwaarden,...). In dit hoofdstuk wordt besproken welke bijkomende maatregelen nodig zijn om numerieke stabiliteit te bekomen in het Mike 21 BW model.

Voor het MILDwave golfmodel is geen enkele bijkomende maatregel nodig om numerieke stabiliteit te verzekeren.

Tijdsextrapolatie factor

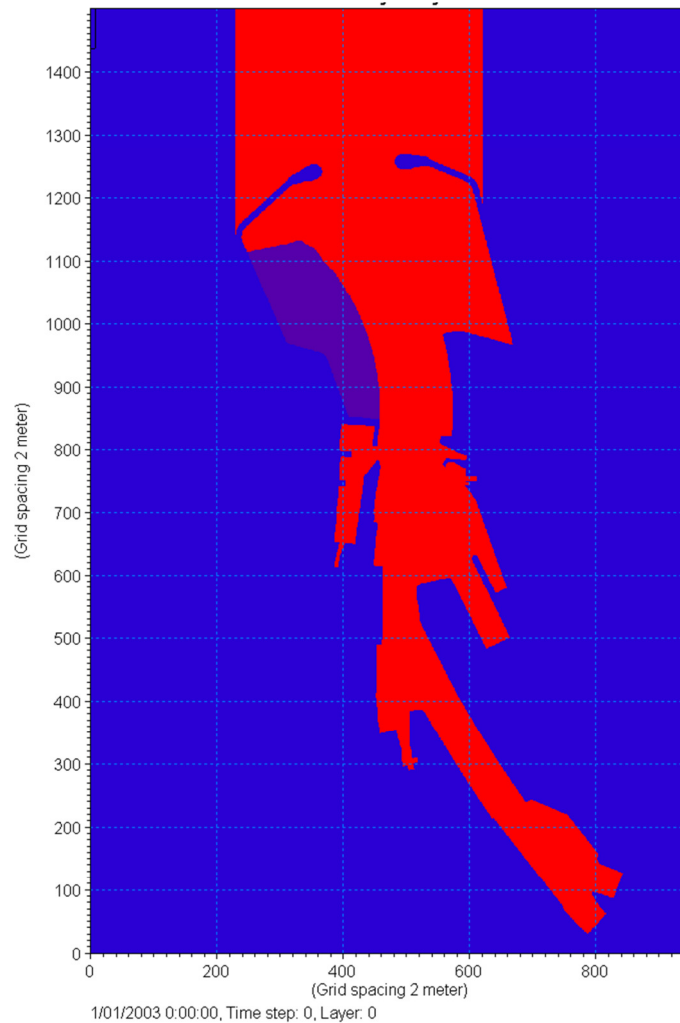
Voor waarde 1.0 heeft deze factor geen effect. Bij gebruik van golfbreking is een factor 0.8-0.9 aangeraden voor het volledig rekengebied (DHI, 2009). Voor een factor 0.8 wordt in deze studie een stabiel model bekomen. Gebruik van deze factor heeft als gevolg dat er een weinig numerieke dissipatie van de significante golfhoogte optreedt (DHI, 2009). Hoe groter het rekendomein ten opzichte van de golflengte hoe langer een golf doorheen het rekendomein propageert en hoe meer numerieke dissipatie optreedt. Om te controleren dat de numerieke dissipatie in het Oostende golfmodel binnen de perken blijft, is een 2DH golfmodel opgesteld met constante waterdiepte, geen structuren, dezelfde maximale propagatieafstand en dezelfde numerieke parameters als het volledig havenmodel. Uit Figuur 3-9 blijkt dat de tijd-extrapolatie factor van 0.8 inderdaad maar een weinig dissiperend effect heeft op de significante golfhoogte.



Figuur 3-9: Invloed van de tijd-extrapolatiefactor (= 0.8) op de significante golfhoogte. Langsdoorsnede van de golfagitatatiecoëfficiënt K_d ($=H_s/H_{s,inc}$). Verwachte waarde = 1.0 over volledige lengte waar zich geen sponslagen bevinden. Sponslagen over 100 cellen aan beide uiteinden absorberen alle inkomende golfenergie.

Bodemwrijving

Op de relatief steile hellingen van de oude westelijke havendam en de Halve Maan treden de meeste blow-ups op, vooral daar waar golfenergie samenkomt door convergentie. De golfbrekkingsmodule van Mike 21 BW is mogelijk niet in staat de golfenergie voldoende te dissiperen op deze locaties. Daarom is een artificieel hoge bodemwrijving ingevoerd (Chézy getal $C = 11$, ter vergelijking een meer normale waarde is $C = 60$) om extra dissipatie in deze gebieden in te voeren (cf. Figuur 3-10).

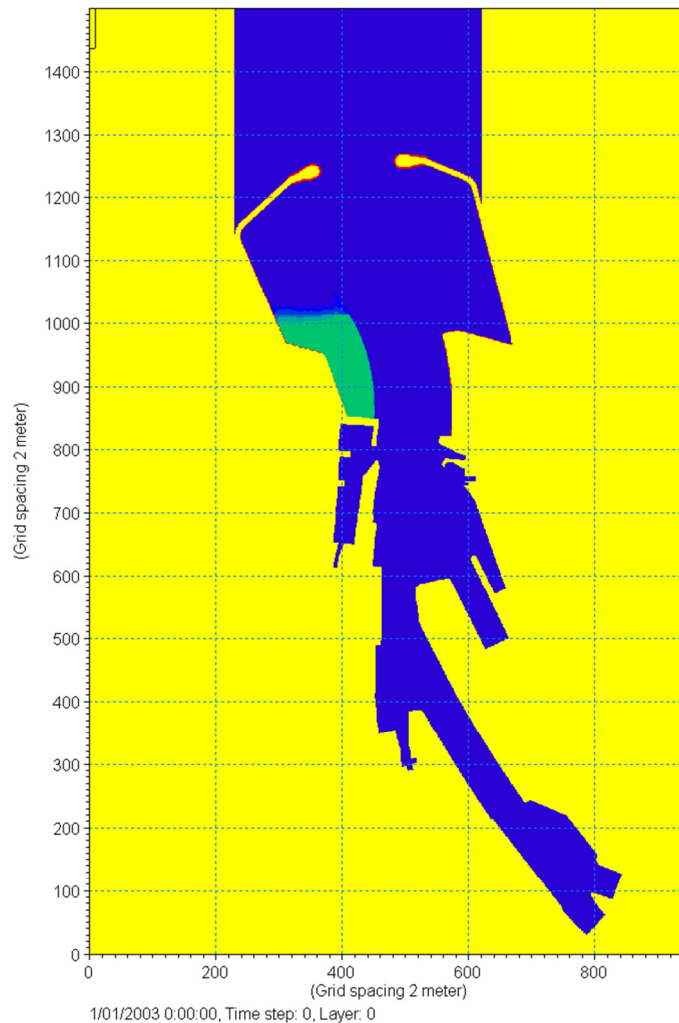


Figuur 3-10: Artificieel hoge bodemwrijving voor verhoogde numerieke stabiliteit (paars: Chézy getal $C=11$, rood: $C=300$ (verwaarloosbaar weinig bodemwrijving), blauw: land).

Deze artificieel hoge bodemwrijving heeft een zeer beperkt dissipatief vermogen, maar blijkt toch voldoende te zijn om de numerieke stabiliteit te verzekeren in dit geval. Het heeft bovendien geen effect op de resultaten in de binnenhaven (= het interessegebied).

Numerieke filter

Voor lagere waterstanden (SWL = +6.00mTAW, +6.50mTAW) blijkt bodemwrijving niet voldoende te zijn om blow-ups op het Klein Strand te voorkomen. Daarom is in deze gevallen in het zeer ondiepe gedeelte van het Klein Strand een numerieke lowpass filter ingevoerd. Deze methode dissipeert meer golfenergie dan bodemwrijving en heeft dus een groter effect op de golfhoogte op het Klein Strand, maar blijft beperkt tot dat gebied.

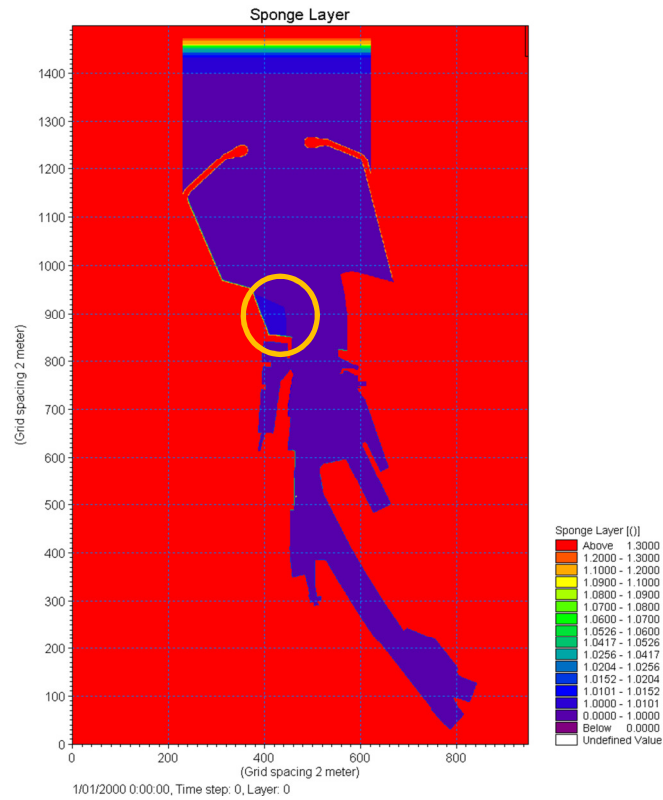


Figuur 3-11: Indicatie van gebied waar numerieke lowpass filter actief is (voor lagere waterstanden) (groen: numerieke filter). SWL = +6.00m TAW, NNW

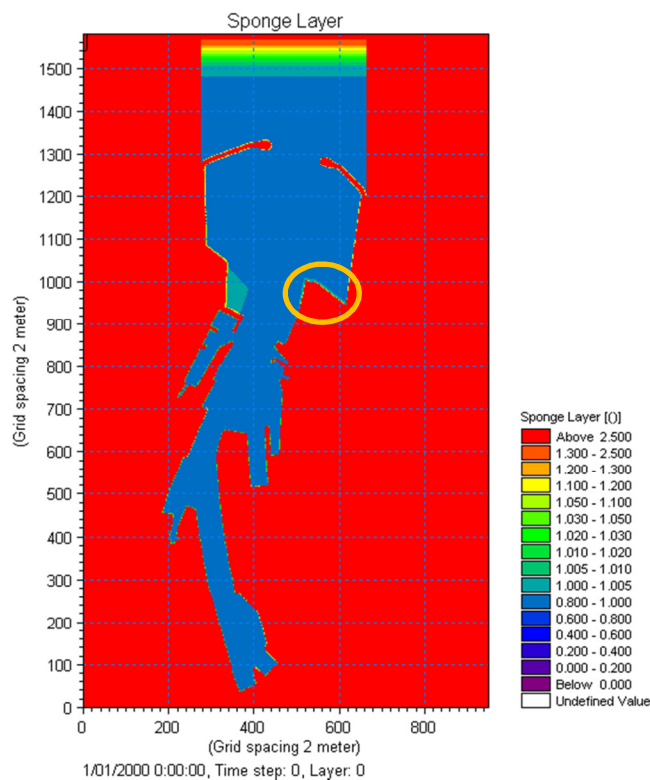
Sponslagen

Tenslotte zijn nog in de meest ondiepe gedeelten (Klein Strand: $d = 2.0\text{m}$) sponslagen ingevoerd die de golfenergie daar absorberen. Dit is een methode die door DHI (2009) aangeraden wordt om blow-ups op te lossen. In deze studie is deze methode gebruikt als laatste toevlucht omdat dit de meest dissipatieve methode is.

Voor golfrichtingen -37° en NW was het ook noodzakelijk om dergelijke sponslagen toe te voegen op het meest ondiepe gedeelte van de Halve Maan ($d = 4.0\text{m}$) (cf. Figuur 3-13). Deze werden echter zo geplaatst dat ze geen effect hebben op golven die via reflectie op de Halve Maan de binnenhaven binnendringen.



Figuur 3-12: Indicatie van sponslaaggebied op het Klein Strand voor numerieke stabiliteit. SWL = +8.00m TAW, NNW.



Figuur 3-13: Indicatie van sponslaaggebied op de Halve Maan voor numerieke stabiliteit. SWL = +8.00m TAW, NW.

Overzicht

Wanneer de waterstand en/of de golfrichting wordt gewijzigd in het model, veranderen ook de locaties waar numerieke instabiliteiten optreden of duiken nieuwe instabiliteiten op. Daarom is het mogelijk dat voor sommige combinaties waterstand-richting een ander set van maatregelen nodig is of maatregelen op andere locaties om de numerieke stabiliteit te verzekeren.

Daarom geeft Tabel 3-5 een overzicht van welke maatregelen zijn genomen voor elke gemodelleerde waterstand-richting combinatie. De locaties van elke maatregel komen overeen met deze die eerder besproken zijn in vorige paragrafen.

Tabel 3-5: Overzicht van toegepaste maatregelen om numerieke stabiliteit te verkrijgen voor elk van de Mike 21 BW modellen.

SWL [m TAW]	Richting [-]	Tijdsextrapolatie factor	Bodemwrijving	Numerieke filter	Extra sponslagen
+6.00	NNW	X	X	X	X
	-37°N	X	X	-	X
	NW	X	X	-	X
+6.50	NNW	X	X	X	X
	-37°N	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
	NW	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
+7.00	NNW	X	X	-	X
	-37°N	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
	NW	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
+7.20	NNW	X	X	-	X
	-37°N	X	X	-	X
	NW	X	X	-	X
+7.50	NNW	X	X	-	X
	-37°N	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
	NW	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.
+8.00	NNW	X	X	-	X
	-37°N	X	X	-	X
	NW	X	X	-	X

3.1.7 Partiële reflectie

Volgende constructies en situaties komen voor in de haven van Oostende die partiële reflectie veroorzaken:

- Voor hogere waterstanden: de waterstand benadert of overstijgt de kruin van de kaaimuur, de glooiing,...
- Gladde glooiingen (bv. aan RYCO) of glooiingen bekleed met stortsteen (aan het einde van het Zeewezendok)

Omdat deze interactie tussen golven en structuren te complex is voor zowel het Boussinesq als het mild-slope golfmodel moet partiële reflectie op een pragmatische wijze gemodelleerd worden. DHI (2009) schrijft voor om porositeitslagen te definiëren langsheen elke constructie die partiële reflectie veroorzaakt. Deze methode heeft voor deze haven als belangrijk nadeel dat de porositeitslagen $L_p/4 = 33.5\text{m}$ breed moeten zijn en dat daar onvoldoende plaats voor is binnen de grenzen van de binnenhaven. Het effect van partiële reflectie treedt immers pas op buiten de porositeitslagen. Invoeren van deze porositeitslagen gaat ook gepaard met toename aan kans voor numerieke instabiliteit. Daarom werd gezocht naar een alternatieve benadering voor de modellering van partiële reflectie.

Brorsen (1998) toont aan dat met een beperkt aantal sponslagen ook partiële reflectie gemodelleerd kan worden. Eén sponslaag (= 1 gridcel) langs de reflecterende structuur zou zelfs kunnen volstaan (Brorsen, 2000). Zowel in Mike 21 BW als in MILDwave kunnen sponslagen gedefinieerd worden met een bepaalde absorptiecoëfficiënt μ . Deze absorptiecoëfficiënt moet dan worden bepaald zodat deze overeenstemt met de reflectiecoëfficiënt C_r van de beschouwde structuur.

Volgende stappen worden gevolgd ter bepaling van de absorptiecoëfficiënten langs elke structuur:

1. Alle structuren in de haven worden zoveel als mogelijk ondergebracht onder een bepaald type structuur (kaaimuur, glooiing,...) waarvoor dezelfde reflectiecoëfficiënt zou gelden;
2. Voor elke structuur wordt een eerste inschatting gemaakt van de reflectiecoëfficiënt C_r op basis van Thompson (1996) (cf. Figuur 3-14);
3. De corresponderende absorptiecoëfficiënt μ wordt bepaald door een 1DH-model op te stellen gebaseerd op een doorsnede van de betreffende structuur en een reflectieanalyse uit te voeren voor verschillende μ -waarden. Als golftrandvoorwaarde voor deze 1DH-modellen wordt de golfconditie opgelegd die heerst aan de beschouwde structuur;
4. Een simulatie van het 2DH-model wordt uitgevoerd met deze μ -waarden;
5. Door calibratie met het fysisch model worden de "juiste" μ -waarden bekomen;
6. Via het 1DH-model kan dan de uiteindelijke reflectiecoëfficiënt van elke structuur worden bepaald.

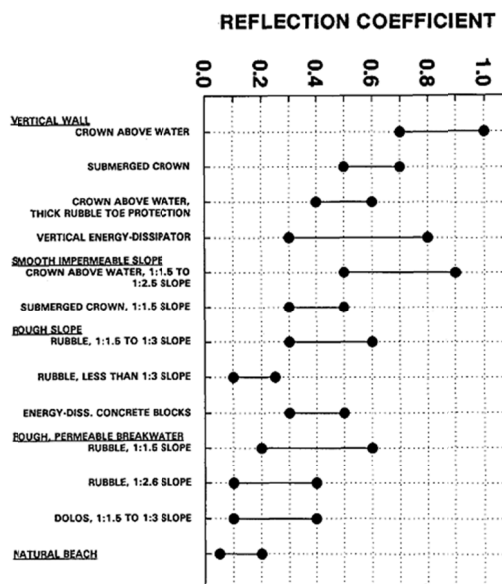


FIG. 2. Typical Reflection Coefficient Ranges for Short Waves

Figuur 3-14: Typische reflectiecoëfficiënten intervallen voor elk type structuur in een haven (Thompson, 1996).

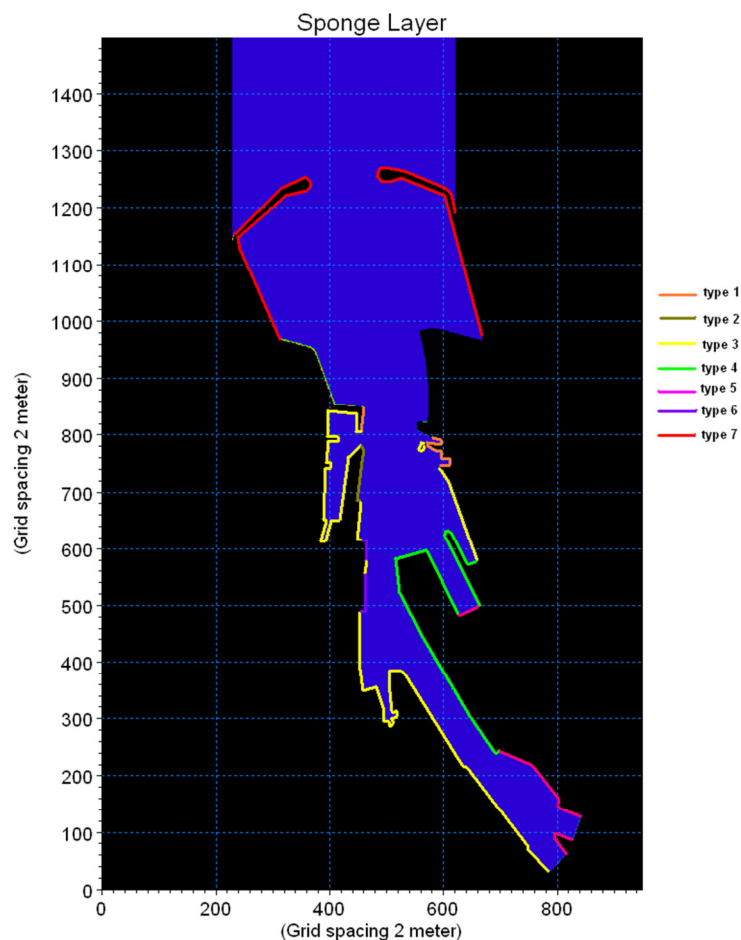
Omdat de te modelleren extreme waterpeilen zich dichtbij het kruinniveau van alle structuren in de haven (~ +6.90m TAW) bevinden, heeft een wijzigende waterstand een belangrijke invloed op de partiële reflectie van de structuren. Een overstroomde kaaimuur heeft immers een lagere reflectiecoëfficiënt dan een niet-overstroomde kaaimuur, want bij een overstroomde kaaimuur wordt meer transmissie toegelaten. Daarom is voor elke waterstand uit Tabel 3-1 een afzonderlijke set μ -waarden noodzakelijk.

De absorptiecoëfficiënt heeft een ander gedrag in MILDwave dan in Mike 21 BW zodat de waarden bekomen met Mike 21 BW niet overdraagbaar zijn naar MILDwave. De uiteindelijke C_r -waarden bekomen met Mike 21 BW werden daarom eerst omgezet naar μ -waarden geschikt voor het MILDwave model. Dit werd opnieuw gedaan door middel van een 1DH-model per structuur en reflectieanalyses voor verschillende μ -waarden.

In de haven werden 7 typen constructies geïdentificeerd waarvoor dezelfde reflectiecoëfficiënt werd aangenomen:

1. Onovertopbare kaaimuur (kaaimuur met onovertopbare stormmuur net aan de rand van de kaaimuur of dus bermbreedte = 0m);
2. Kaaimuur op peil ~6.90mTAW en met stormmuur op korte afstand van de rand (<15m);
3. Kaaimuur op peil ~6.90mTAW en met stormmuur op enige afstand van de rand (~15m);
4. Kaaimuur op peil ~6.90mTAW en zonder stormmuur;
5. Glooiing met helling ~1/2 op peil ~6.90mTAW en zonder stormmuur;
6. Kaaimuur met open palenrij op peil ~6.90mTAW en met stormmuur op enige afstand van de rand (~15m);
7. Stortsteen golfbreker met helling ~1/1.5.

Ze zijn aangeduid in Figuur 3-15.



Figuur 3-15: Onderverdeling van de rand van de haven van Oostende per type constructie.

De rand van het Zeeheldenplein heeft steeds een sponslaag overeenkomstig met reflectiecoëfficiënt 0.60. Het Klein Strand is echter geen interessegebied in deze studie en bovendien werden hier dikwijls maatregelen genomen voor numerieke stabiliteit, zodat de absorptiecoëfficiënt hier niet in detail werd onderzocht en niet werd opgenomen in het algemeen overzicht.

Langs de Halve Maan werd geen sponslaag gedefinieerd tenzij dit noodzakelijk was voor de numerieke stabiliteit. De helling van de Halve Maan werd zo hoog mogelijk opgenomen in de bathymetrie zodat de fysische processen golfbreking, refractie en partiële reflectie zoveel als mogelijk intrinsiek gemodelleerd konden worden zonder te moeten teruggripen naar een numerieke manipulatie.

De partiële reflectie aan de C-Power kaai is steeds hoog gehouden (peil op +7.70m TAW), maar heeft uiteindelijk weinig belang door de parallelle richting met de golfrichting en de korte lengte van de kaaimuur en is daarom niet als afzonderlijk type beschouwd.

Aan de Spuikom (y-coord = 120, cf. Figuur 3-15) en aan de doorgang naar Noord Ede (y-coord = 40, cf. Figuur 3-15) is het type niet opgegeven, maar heel weinig golfenergie bereikt dit gebied nog zodat dit van weinig belang is. Verder worden dus de absorptiecoëfficiënten hiervan niet gegeven.

De absorptiecoëfficiënten van elk type constructie in de haven zoals gedefinieerd in Figuur 3-15, zijn gegeven in Tabel 3-6 voor elke waterstand en beide modellen. In Mike 21 BW is de absorptiecoëfficiënt $1/\mu$ terwijl dit μ is in MILDwave, vandaar dat in Mike 21 BW de absorptiecoëfficiënt groter is dan één en in MILDwave kleiner dan 1. Voor Mike 21 BW is ook steeds het omgekeerde weergegeven in de tabel, zodat vergelijking met MILDwave mogelijk is. Voor waterstanden +6.50m TAW en +7.00m TAW zijn geen μ -waarden bepaald voor MILDwave omdat voor deze waterstanden geen MILDwave modellen zijn opgesteld.

Tabel 3-6: Absorptiecoëfficiënten per type constructie en bijhorende reflectiecoëfficiënt. Voor Mike 21 BW correspondeert de waarde voor de absorptiecoëfficiënt met $1/\mu$ (met μ tussen haakjes) en voor MILDwave is μ opgegeven. Voor waterstanden +6.00m TAW t.e.m. +7.50m TAW.

SWL [m TAW]	Type [-]	Absorptiecoëfficiënt Mike 21 BW [-]	Absorptiecoëfficiënt MILDwave [-]	Reflectiecoëfficiënt C_r [-]
+6.00	1	1.00000 (1.000)	1.000	1.000
	2	1.00000 (1.000)	1.000	1.000
	3	1.00000 (1.000)	1.000	1.000
	4	1.00000 (1.000)	1.000	1.000
	5	1.05263 (0.950)	0.920	0.610
	6	1.05263 (0.950)	0.920	0.610
	7	1.11111 (0.900)	0.910	0.440
+6.50	1	1.00000 (1.000)	-	1.000
	2	1.00100 (0.999)	-	0.980
	3	1.00150 (0.9985)	-	0.975
	4	1.00251 (0.9975)	-	0.970
	5	1.06383 (0.940)	-	0.580
	6	1.05263 (0.950)	-	0.615
	7	1.11111 (0.900)	-	0.440

SWL [m TAW]	Type [-]	Absorptiecoëfficiënt Mike 21 BW [-]	Absorptiecoëfficiënt MILDwave [-]	Reflectiecoëfficiënt C _r [-]
+7.00	1	1.00000 (1.000)	-	1.000
	2	1.00251 (0.9975)	-	0.970
	3	1.00503 (0.995)	-	0.950
	4	1.00756 (0.992)	-	0.925
	5	1.07527 (0.930)	-	0.540
	6	1.06383 (0.940)	-	0.580
	7	1.11111 (0.900)	-	0.440
+7.20	1	1.00000 (1.000)	1.000	1.000
	2	1.01010 (0.990)	0.969	0.890
	3	1.01010 (0.990)	0.969	0.890
	4	1.01010 (0.990)	0.969	0.890
	5	1.07527 (0.930)	Type 4 ⁴	0.540
	6	1.06383 (0.940)	0.920	0.580
	7	1.11111 (0.900)	0.910	0.440
+7.50	1	1.00000 (1.000)	1.000	1.000
	2	1.01010 (0.990)	0.969	0.890
	3	1.01523 (0.985)	0.960	0.850
	4	1.02041 (0.980)	0.955	0.810
	5	1.08696 (0.920)	Type 4	0.505
	6	1.04712 (0.955)	0.930	0.655
	7	1.11111 (0.900)	0.910	0.440

⁴ In het MILDwave model is hier nog dezelfde absorptiecoëfficiënt als type 4 aangenomen. Het heeft echter weinig invloed op het uiteindelijke resultaat.

Tabel 3-7: Absorptiecoëfficiënten per type constructie en bijhorende reflectiecoëfficiënt. Voor Mike 21 BW correspondeert de waarde voor de absorptiecoëfficiënt met $1/\mu$ (met μ tussen haakjes) en voor MILDwave is μ opgegeven. Voor waterstand +8.00m TAW.

SWL [m TAW]	Type [-]	Absorptiecoëfficiënt Mike 21 BW [-]	Absorptiecoëfficiënt MILDwave [-]	Reflectiecoëfficiënt C_r [-]
+8.00	1	1.00000 (1.000)	1.000	1.000
	2	1.01523 (0.985)	0.960	0.850
	3	1.02041 (0.980)	0.955	0.810
	4	1.02564 (0.975)	0.950	0.785
	5	1.09890 (0.910)	Type 4	0.470
	6	1.05263 (0.950)	0.920	0.615
	7	1.11111 (0.900)	0.910	0.440

Voor +7.20m TAW kan de reflectiecoëfficiënt vergeleken worden met proefresultaten van UGent (2011)⁵. Uit die proefresultaten volgt voor een kaaimuur op +7.00m TAW en stormmuur op 15m van de rand, een reflectiecoëfficiënt van ongeveer 0.75. Uit het numeriek model blijkt echter dat in het fysisch model van Hassan et al. (2011) de reflectiecoëfficiënt eerder ongeveer 0.89 is. In het fysisch model is het peil van de kaaimuren niet overal nauwkeurig nagebouwd zoals blijkt uit Figuur 3-16. De kaaimuur zou onder het waterpeil moeten liggen voor deze waterstand en elke golf zou dus op deze kaaimuur moeten kunnen overslaan. Uit Figuur 3-16 blijkt dit niet het geval te zijn zodat de hogere reflectiecoëfficiënt grotendeels is verklaard. Nauwkeurig nabouwen van de kaaimuurpeilen was waarschijnlijk moeilijk want bv. een verschil van 0.20m (prototype) is een verschil van 0.002m in het fysisch model (schaal 1/100).

De schuine golfinval kan mogelijk ook (deels) een oorzaak zijn van het verschil in reflectiecoëfficiënt.

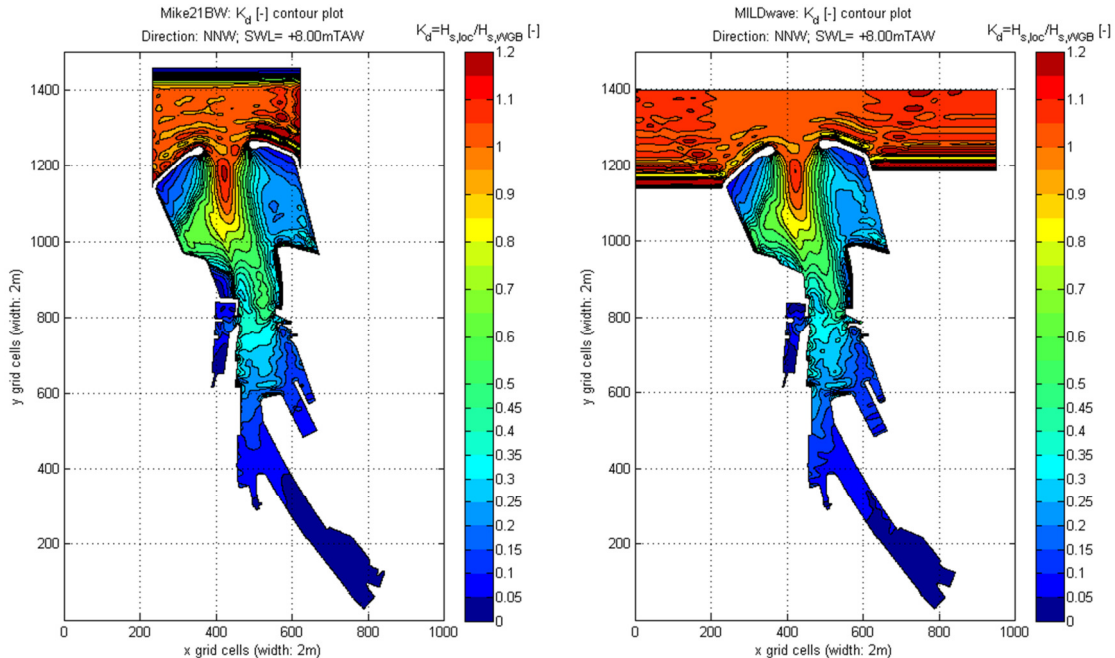


Figuur 3-16: Tijdok en Wandelaarkaai in het fysisch model. Waterstand +7.20m TAW: waterpeil zou zich boven de kaaimuren moeten bevinden en elke golf zou moeten kunnen overslaan, dit is echter niet het geval.

⁵ De C_r -waarden zijn niet opgenomen in het rapport van UGent (2011), maar werden bepaald door Koen Van Doorslaer van UGent en werden geleverd via mail (cf. mail 26/07/2011).

3.2.2 Contourplots K_d -waarden

Een contourplot van de golfindringingscoëfficiënt K_d is in staat de golfindringing in een haven mooi weer te geven. Voor elke simulatie werd dergelijke figuur gemaakt. Ze zijn allemaal digitaal beschikbaar op de bijgevoegde CD. Figuur 3-18 toont een voorbeeld van dergelijke contourplot van beide numerieke golfmodellen. Er is een contour getekend tussen 1.2 en 0.5 met een stap van 0.1 en tussen 0.5 en 0.0 met een stap van 0.05.



Figuur 3-18: Contourplot van de golfindringingscoëfficiënt K_d van het Mike 21 BW (links) en het MILDwave resultaat (rechts). Golfcondities voor waterstand +8.00m TAW en richting NNW.

Door diffractie, refractie en golfbreking neemt de significante golfhoogte af naarmate golven dieper in de haven propageren. Op sommige locaties neemt de K_d -waarde weer toe. Meestal is in dergelijke gebieden duidelijk een oscillatie in het K_d -verloop te onderscheiden. Die is te verklaren door het effect van reflectie en de toename door de oscillaties is te verklaren door staande golfvorming nabij reflecterende structuren zoals besproken door Klopman en van der Meer (1999). Een uitgebreide bespreking van dit fysisch proces is opgenomen in Bijlage 2.

Bij vergelijken van beide modelresultaten in Figuur 3-18 valt meteen op dat beide modellen een heel gelijkaardig resultaat opleveren. Dit geeft alvast enig vertrouwen in het resultaat van de numerieke modellen. Dit vertrouwen kan verder ondersteund worden door validatie met de fysisch model resultaten in §3.2.3.

3.2.3 K_d -waarden op locaties en validatie met fysisch model

Inleiding

De gedetailleerde onderlinge vergelijking van beide golfindringingsmodellen en de validatie met het fysisch model wordt uitgevoerd op de locaties waar in het fysisch model de metingen werden uitgevoerd. De numerieke resultaten werden afgelezen op de exacte locaties van de golfhoogtemeters in het fysisch model, zonder uit te middelen met omliggende roosterzellen. Met de 20 beschikbare golfhoogtemeters werden de proeven herhaald voor 3 verschillende situeringen van de golfhoogtemeters (Hassan et al., 2011a en 2011b):

1. Op de algemene locaties ("alg") verspreid over de volledige haven (cf. Figuur 3-19);
2. Dicht tegen de kaaimuur aan de oostelijke kant ("okh") van de binnenhaven (cf. links in Figuur 3-20);
3. Verspreid over het Montgomerydok ("mgd") en enkele golfhoogtemeters in de buitenhaven om de golftransmissie en golfindringing op te meten (cf. Figuur 3-23).

Enkel de eerste opstelling heeft alle condities uit Tabel 3-1 opgemeten. De tweede opstelling werd enkel beproefd voor waterstand +7.20m TAW en golfrichting NNW. De derde opstelling werd beperkt tot golfrichting NW in het fysisch model.

In de tekst wordt verder verwezen naar deze meetlocaties aan de hand van hun nummer met in de index een acroniem die naar de situering verwijst: bv. "G04_{alg}" verwijst naar de locatie van golfhoogtemeter G04 in de eerste opstelling (algemene locaties).

Validatie

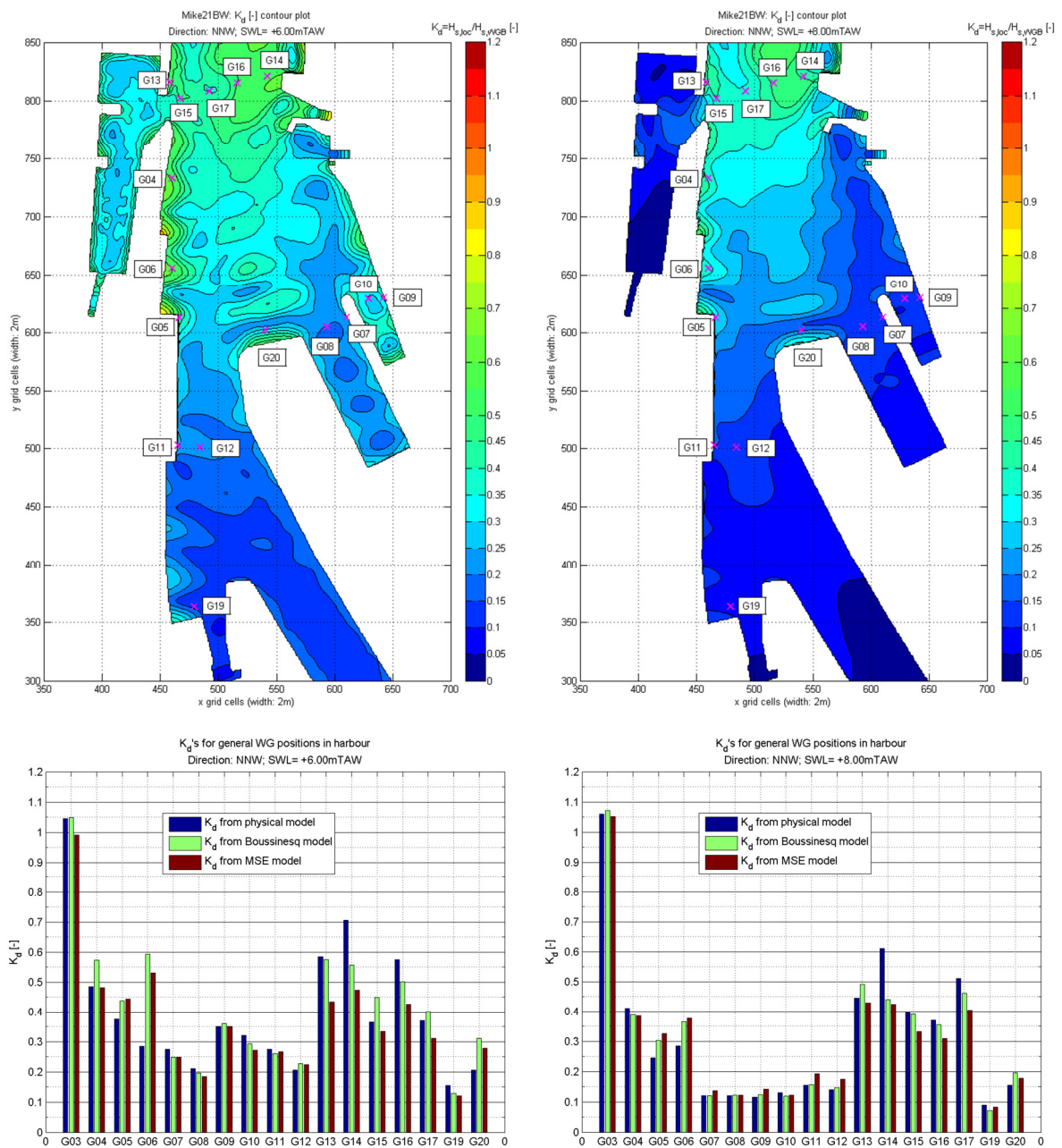
De validatie van de numerieke modellen gebeurt aan de hand van een vergelijking van de K_d -waarden op alle meetlocaties die zijn toegepast in het fysisch model. Dit hoofdstuk beperkt zich ertoe om de validatie te tonen voor de laagste (+6.00m TAW) en hoogste waterstand (+8.00m TAW). Dit geeft een beeld van in welke mate de numerieke modellen het fysisch model benaderen, respectievelijk:

- In het geval dat bijna overal 100% reflectie optreedt in de binnenhaven (door de kaaimuren die niet overstroomd zijn);
- In het geval dat de maximale absorptie aan de kaaimuren is toegepast voor partiële reflectie (want waterstand staat hoger dan de kaaimuurkruinen).

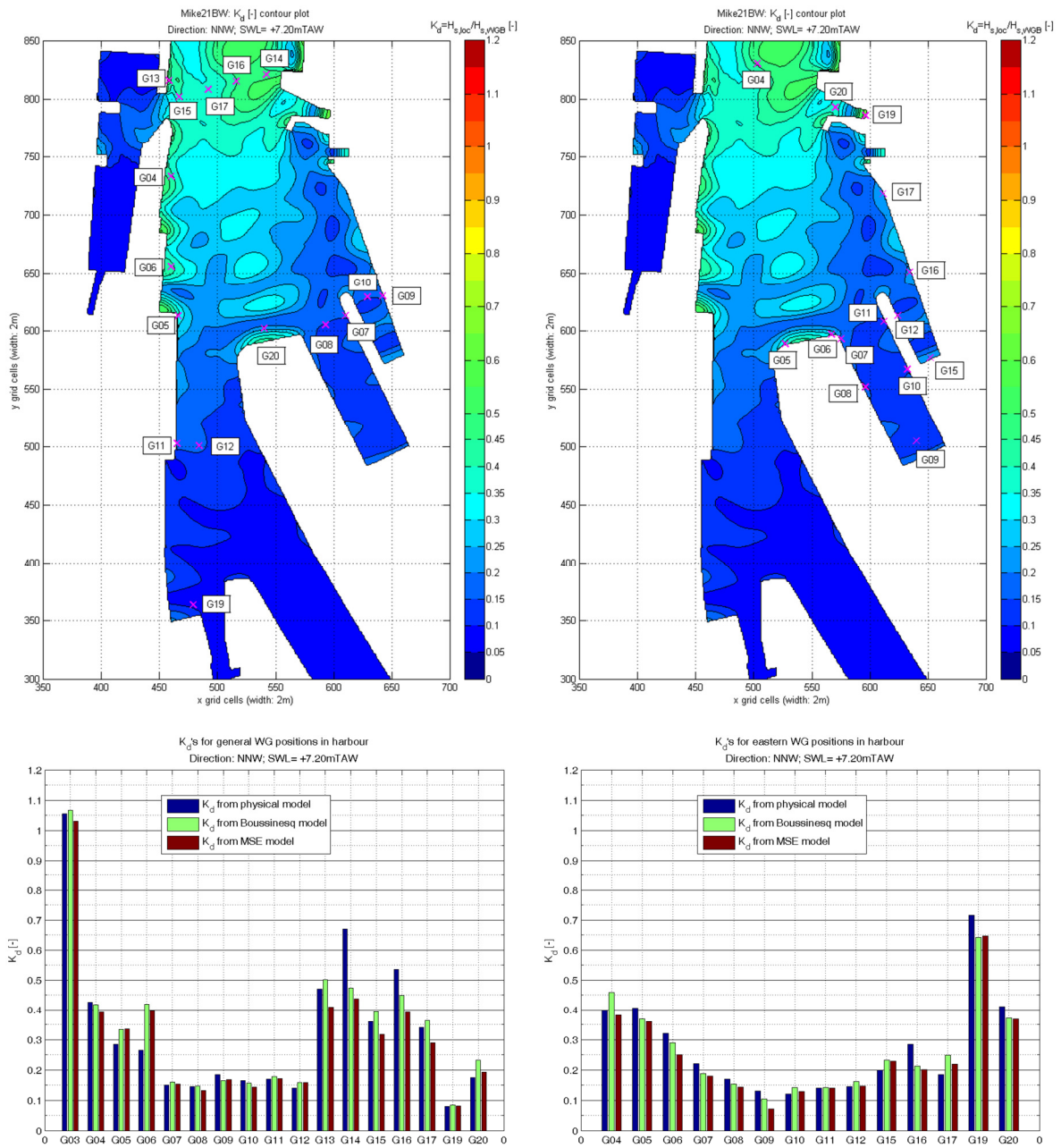
Deze vergelijking is opgenomen in Figuur 3-19, Figuur 3-21 en Figuur 3-22 voor respectievelijk richtingen NNW, -37° en NW.

Omdat de metingen aan de oostkant van de binnenhaven enkel zijn uitgevoerd voor waterstand +7.20m TAW, is de validatie op deze locaties afzonderlijk weergegeven in Figuur 3-20.

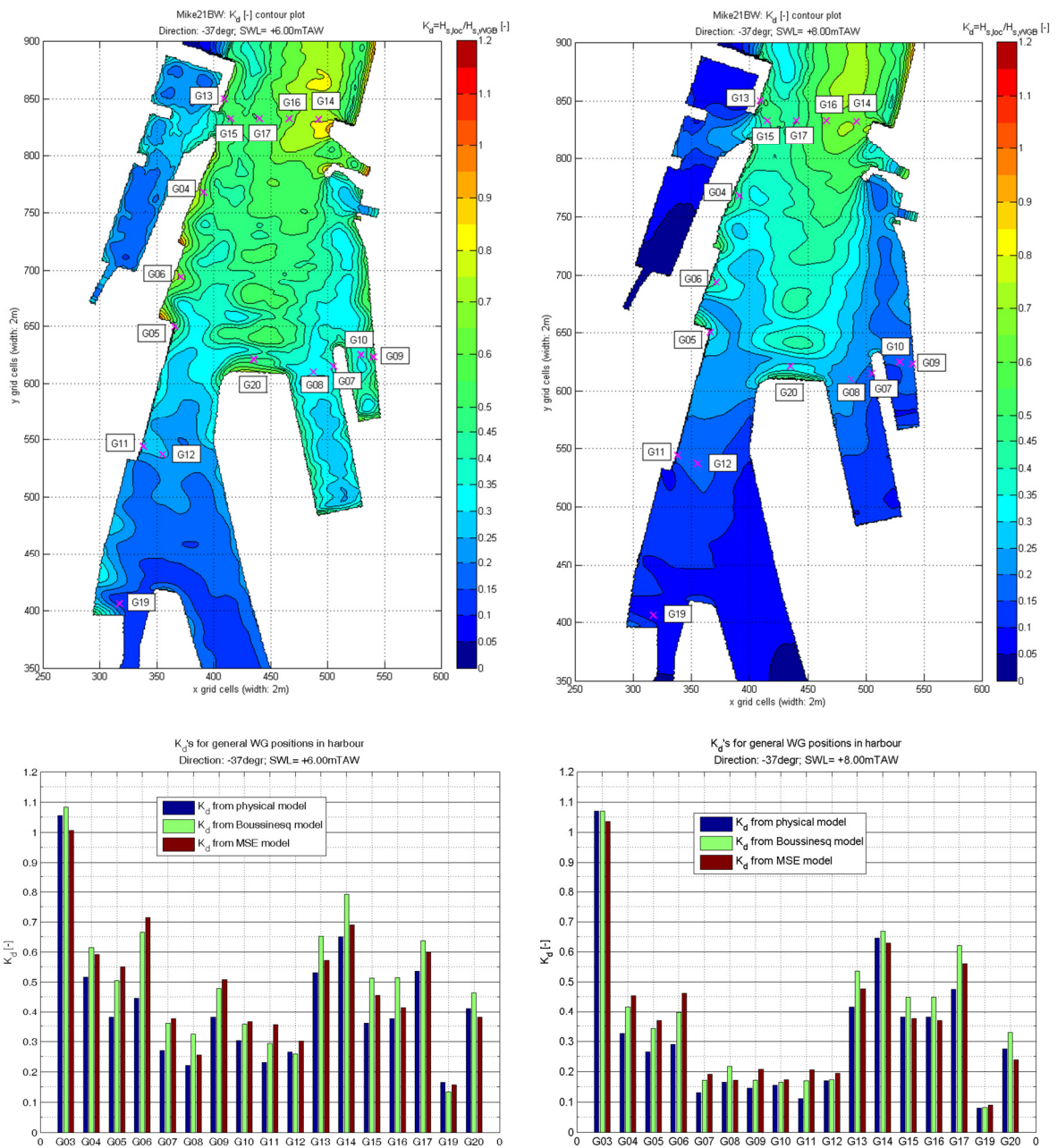
Ten slotte is in Figuur 3-23 de validatie weergegeven voor de meetpunten in het Montgomerydok.



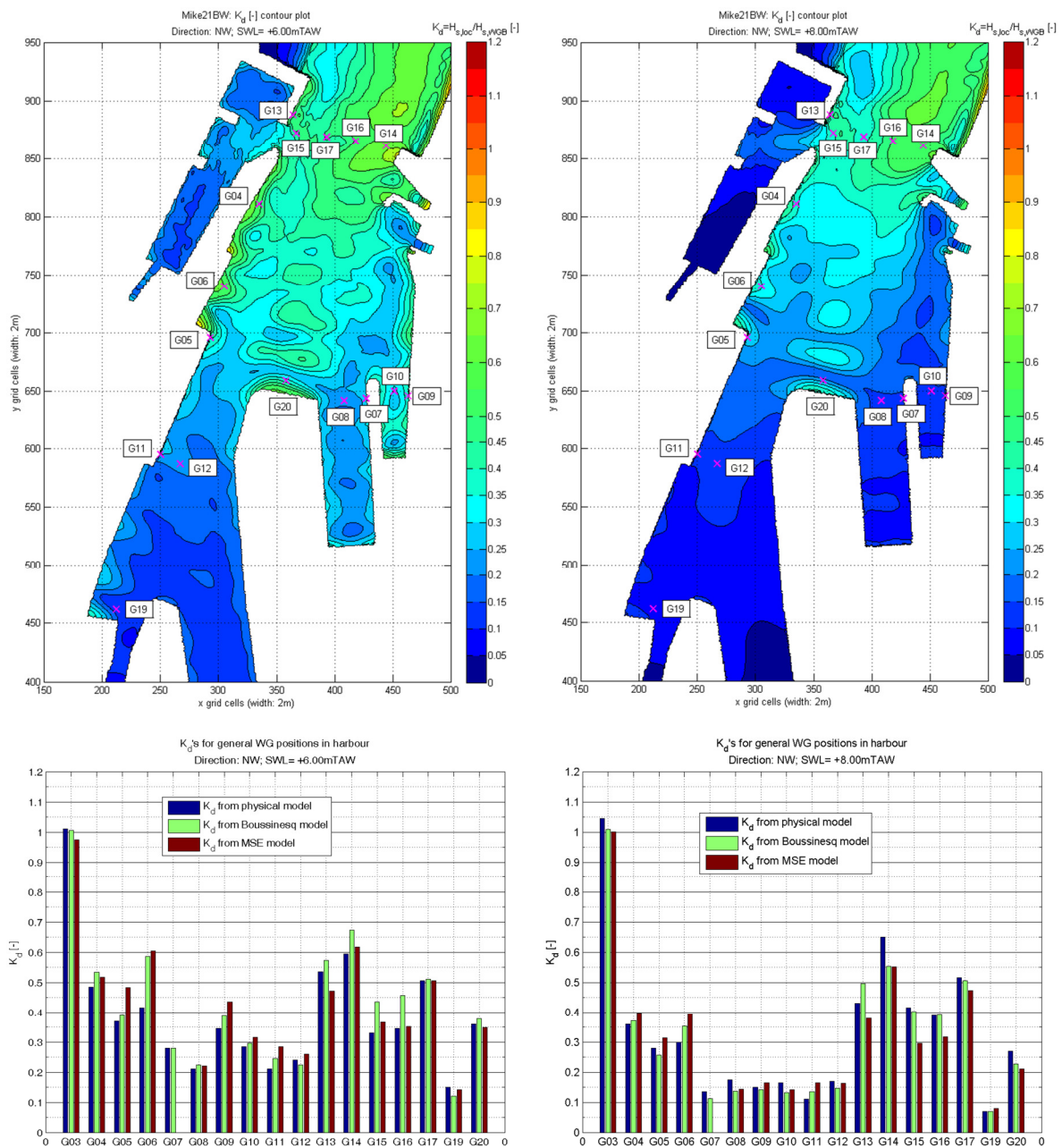
Figuur 3-19: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de algemene locaties in de binnenhaven. Golfrichting NNW.
Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW.



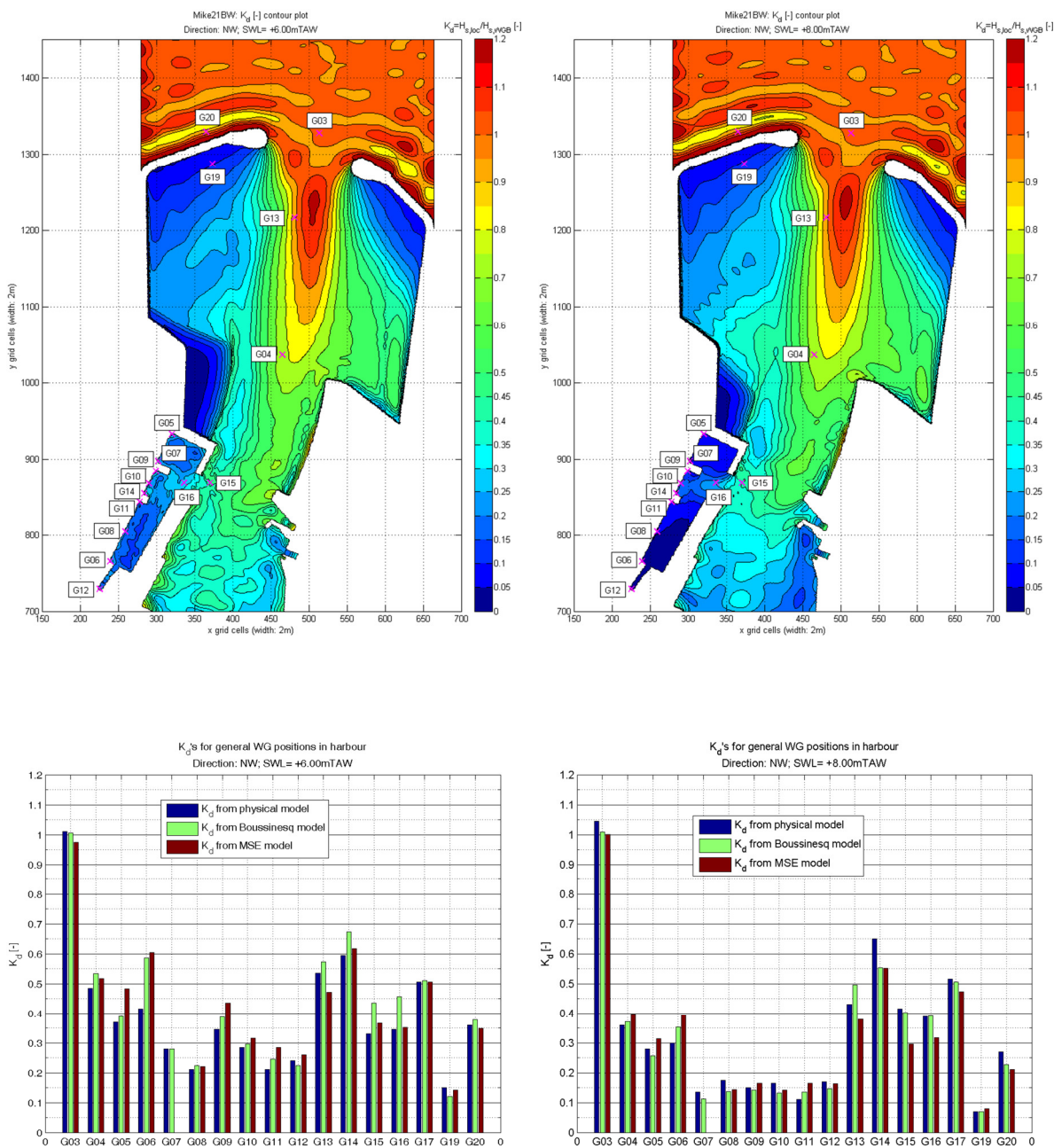
Figuur 3-20: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op locaties in de binnenhaven (SWL = +7.20m TAW). Golfrichting NNW.
 Links: algemene locaties, rechts: locaties aan oostkant van de haven.



Figuur 3-21: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de algemene locaties in de binnenhaven. Golfrichting -37° . Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW.



Figuur 3-22: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de algemene locaties in de binnenhaven. Golfrichting NW.
Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW.



Figuur 3-23: Vergelijking van de K_d -waarden van het fysisch model en de numerieke modellen op de meetlocaties tijdens de Montgomerydok proeven. Golfrichting NW.
 Links: SWL = +6.00m TAW, rechts: SWL = +8.00m TAW. Opmerking: $G17_{\text{mgd}} = G13_{\text{alg}}$.

Voor elk van de drie gemodelleerde richtingen worden goede overeenkomsten met het fysisch model waargenomen (cf. Figuur 3-19, Figuur 3-22), met uitzondering van richting -37°N (cf. Figuur 3-20). Voor deze richting blijken de numerieke modellen de golfindringing te overschatten in vergelijking met het fysisch model voor sommige waterstanden (e.g. +6.00m TAW). Het is onduidelijk welk model (numeriek of fysisch) de beste inschatting geeft.

Ook voor de meetpunten aan de oostkant van de binnenhaven (cf. Figuur 3-20) en zelfs in het Montgomerydok (cf. Figuur 3-23) worden goede overeenkomsten waargenomen.

De verschillen tussen de numerieke modellen en het fysisch model zijn mogelijk ten gevolge van:

- Te complexe reflectie (e.g. kaaimuur op palen aan het station, heeft effect op $G05_{alg}$ en $G06_{alg}$);
- Gevoelige locatie van de staande golfoscillaties (e.g. mogelijk invloed op $G04_{alg}$ en $G06_{alg}$);
- Mogelijke verschillen veroorzaakt door de aannames die zijn gemaakt in §3.1 bij het opstellen van de numerieke modellen. Dit wordt onderzocht aan de hand van gevoeligheidsanalyses in §3.3 (e.g. $G14_{alg}$ in Figuur 3-19 en Figuur 3-20).

Er kan geen numeriek model aangeduid worden die systematisch beter het fysisch model benadert dan de andere. Beide numerieke modellen geven steeds een gelijkaardig resultaat, Wanneer ze wel verschillen, is het nu eens Mike 21 BW, dan eens MILDwave die beter is.

De verschillen tussen de numerieke modellen zelf zijn mogelijk te wijten aan:

- Niet-lineaire effecten;
- Verschillend gedrag van de absorptiecoëfficiënten. Uit §3.1.7 bleek al dat een verschillende absorptiecoëfficiënt bepaald diende te worden om dezelfde reflectiecoëfficiënt te verkrijgen. Omdat de bepaling van de reflectiecoëfficiënt via een 1DH-model niet perfect representatief is voor het 2DH-model, kan hier ook een klein verschil tussen beide modellen zijn ontstaan.

De partiële reflectie werd gemodelleerd door een dunne sponslaag en daarbij werd de absorptiecoëfficiënt bepaald door calibratie met het fysisch model. De waargenomen mooie overeenkomst met het fysisch model is dus deels daardoor te verklaren, maar dit betekent niet dat met deze coëfficiënten buitensporig werd gesleuteld op fysisch onrealistische wijze om dit resultaat te bekomen. Dit wordt aangetoond door:

- De reflectiecoëfficiënten die corresponderen met de toegepaste absorptiecoëfficiënten zijn realistisch (cf. §3.1.7)
- Voor waterstand +6.00m TAW is de waterstand voldoende lager dan het peil van alle kaaimuren zodat volledige reflectie aan de kaaimuren optreedt. In dat geval zijn dus geen sponslagen nodig om partiële reflectie te modelleren. Deze opstelling toont aan dat de numerieke modellen ook een zeer goede overeenkomst hebben met het fysisch model zonder dat daarvoor enige calibratie nodig was. Vergelijking met +8.00m TAW toont bovendien ook aan dat de sponslagen noodzakelijk zijn.

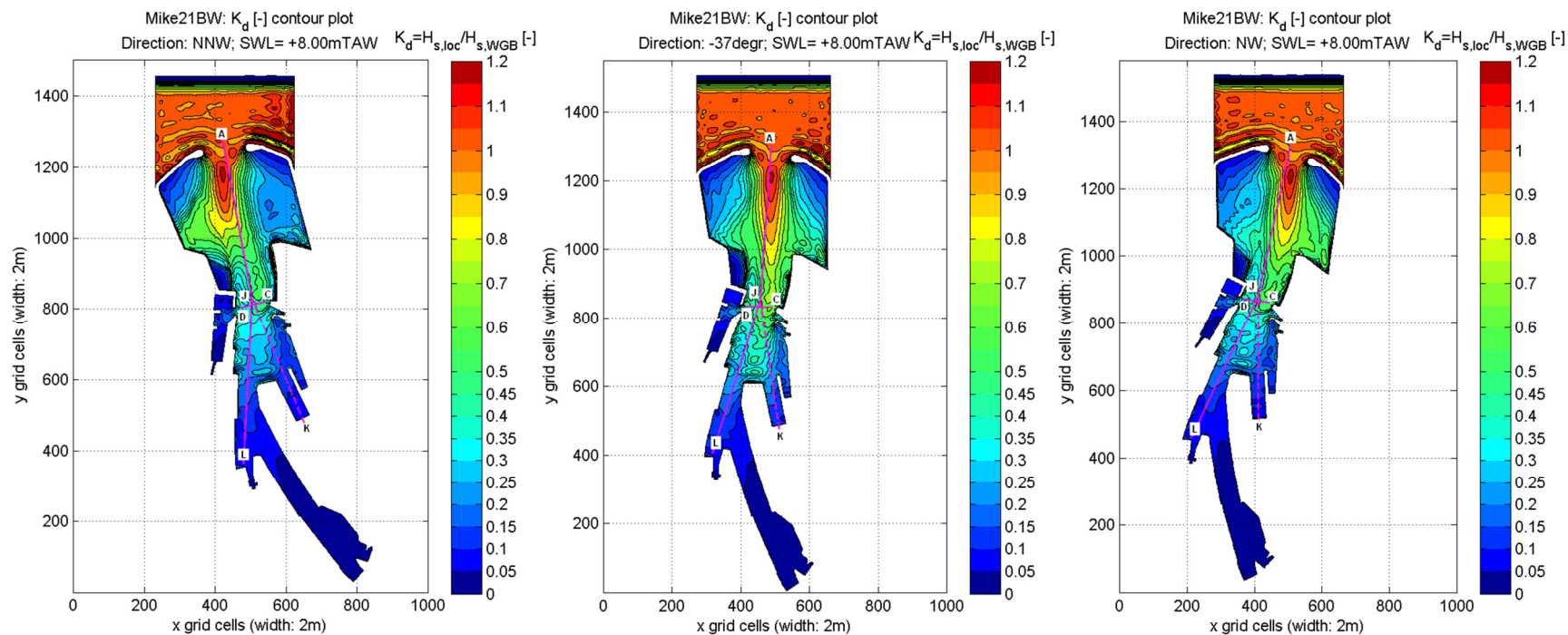
3.2.4 K_d -waarden langs- en dwarssecties

Naast het vergelijken van meetpunten is het ook interessant om enkele langs- en dwarsdoorsneden te vergelijken. Dit kan uiteraard enkel voor de numerieke modellen. Toch worden meetpunten in het fysisch model die op of nabij deze secties liggen ook opgenomen in de vergelijkingen.

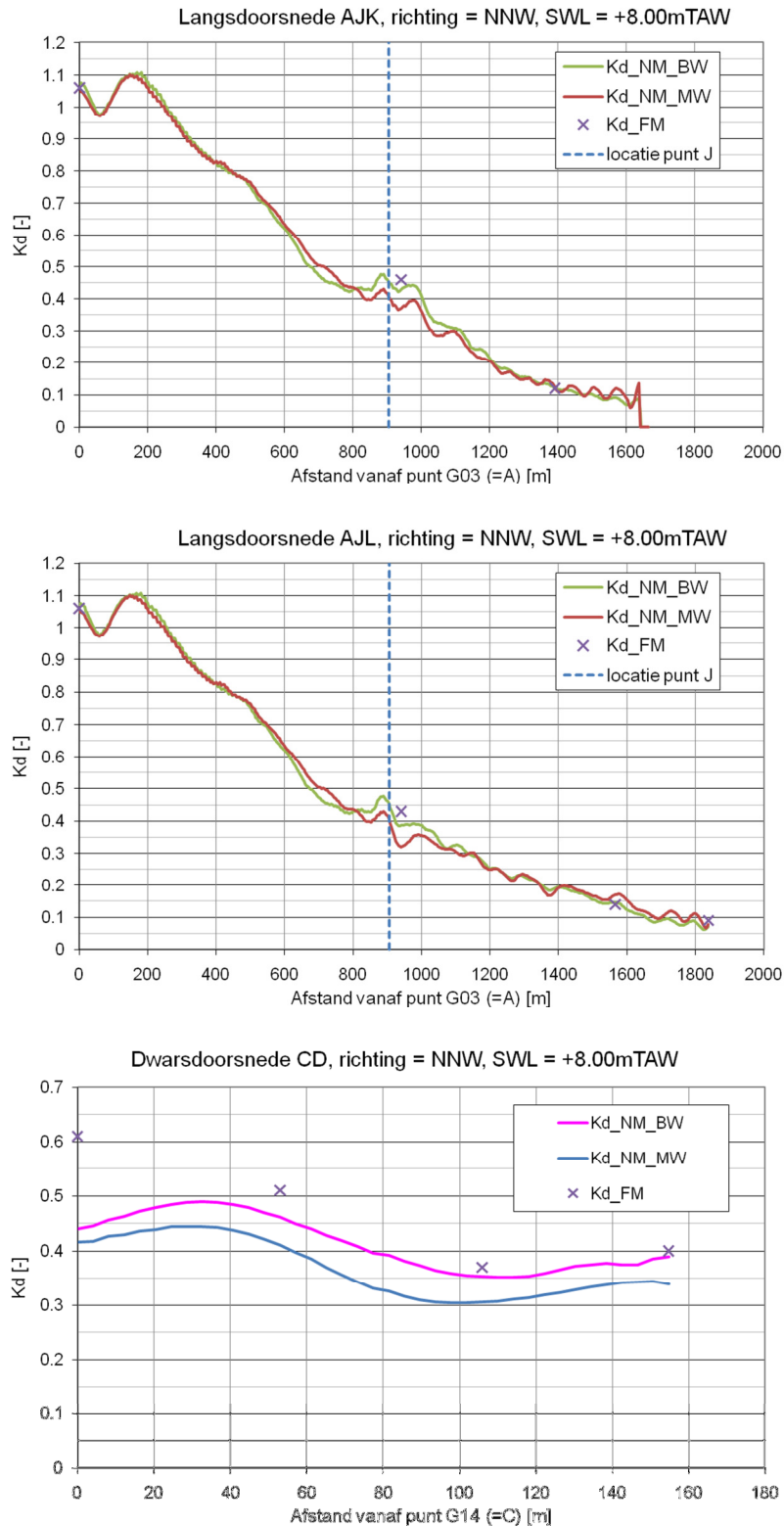
In deze paragraaf worden enkel de resultaten voor waterstand +8.00m TAW beschouwd. De langs- en dwarsdoorsneden zijn weergegeven in Figuur 3-24 op de K_d -contourplots van elke golfrichting. Ze zijn gebaseerd op de keuze die UGent (2009a) heeft gemaakt voor hun doorsneden. Het K_d -verloop volgens deze doorsneden is gegeven in Figuur 3-25, Figuur 3-26 en Figuur 3-27 voor respectievelijk richtingen NNW, -37°N en NW.

De figuren tonen opnieuw aan dat beide numerieke modellen gelijkaardige resultaten geven, behalve ter hoogte van punt J en dwarsdoorsnede CD. In dit gebied voorspelt MILDwave steeds lagere K_d -waarden dan Mike 21 BW. Het fysisch model meet nog iets hogere waarden op. Voor richtingen NNW en NW benadert Mike 21 BW hier het fysisch model best, voor richting -37°N is dit MILDwave. Het verschil tussen de numerieke modellen zou waarschijnlijk verklaard kunnen worden door een niet-lineair proces, maar het is niet meteen duidelijk hoe. Het belangrijkste is echter dat alle modellen in de binnenhaven (dus voorbij het gebied rond J) wel goed overeen komen.

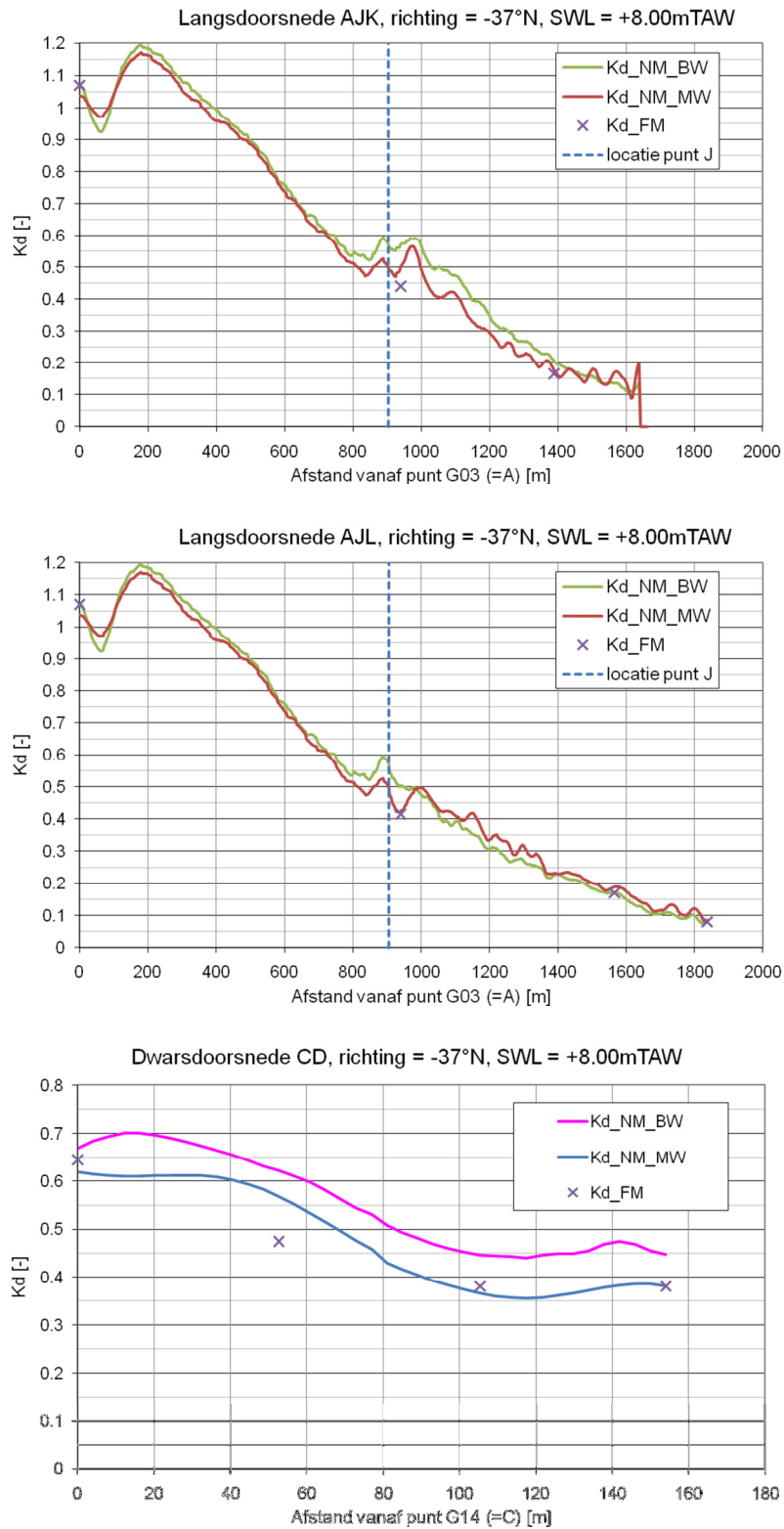
In dwarsdoorsnede CD neemt de K_d -waarde steeds toe nabij punt C in het fysisch model, terwijl deze in de numerieke modellen afneemt voor golfrichtingen NNW en NW. Dit komt overeen met de waarneming in §3.2.3 dat punt $G14_{alg}$ (= punt C) onderschat wordt door de numerieke modellen voor deze richtingen. Dit wordt verder onderzocht in §3.3.8.



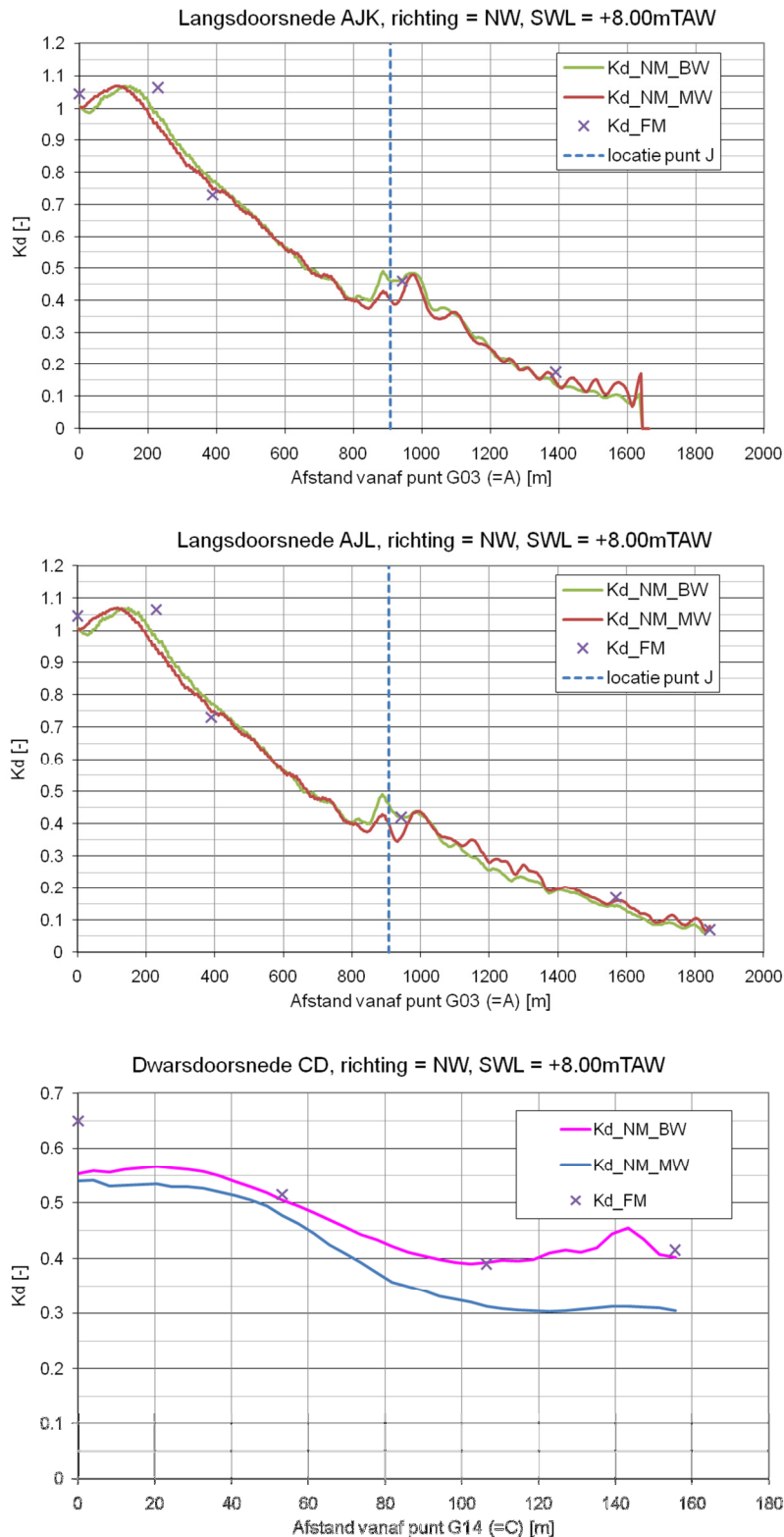
Figuur 3-24: K_d -contourplots voor elke richting, met aanduiding van de langsdoorsneden AJK en AJL en de dwarsdoorsnede CD.



Figuur 3-25: K_d -waarden volgens de langs- en dwarsdoorsneden. Boven: langsdoorsnede AJK, Midden: langsdoorsnede AJL, Onder: dwarsdoorsnede CD. Mike 21 BW, MILDwave en fysisch model vergeleken. Hydrodynamische randvoorwaarden voor SWL=+8.00m TAW en golfrichting NNW.



Figuur 3-26: K_d -waarden volgens de langs- en dwarsdoorsneden.
 Boven: langsdoorsnede AJK, Midden: langsdoorsnede AJL, Onder: dwarsdoorsnede CD.
 Mike 21 BW, MILDwave en fysisch model vergeleken. Hydrodynamische randvoorwaarden voor SWL= $+8.00\text{m TAW}$ en golfrichting -37°N .



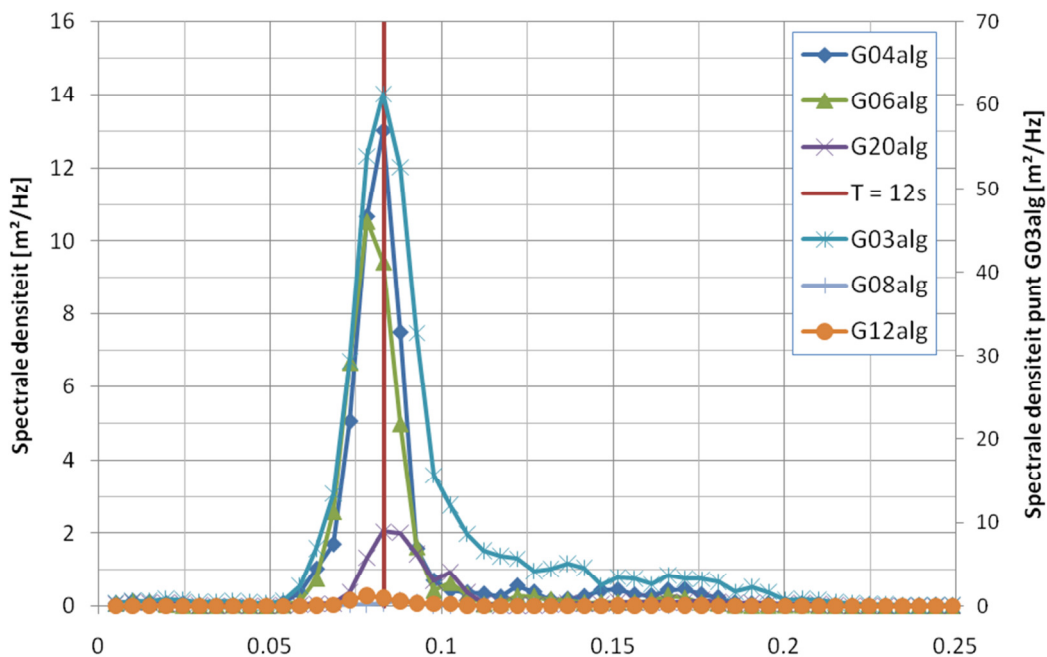
Figuur 3-27: K_d -waarden volgens de langs- en dwarsdoorsneden.
 Boven: langsdoorsnede AJK, Midden: langsdoorsnede AJL, Onder: dwarsdoorsnede CD.
 Mike 21 BW, MILDwave en fysisch model vergeleken. Hydrodynamische randvoorwaarden voor SWL=+8.00m TAW en golfrichting NW.

3.2.5 Golfperiode

Om een idee te krijgen van de evolutie van de golfperiode in de haven, is de piekperiode onderzocht voor de condities gegeven in Tabel 3-8 door het opstellen van 1D spectra in een aantal punten in de haven (cf. Figuur 3-28).

Tabel 3-8: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de 1D-spectra in de haven werden opgesteld

SWL [mTAW]	d_{\max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
8.00	16.9	5.0	12.0	X				X



Figuur 3-28: 1D-spectra aan de haveningang ($G03_{alg}$) en in enkele punten in de binnenhaven, met aanduiding van piekperiode $T_p = 12.0s$. Resultaat van Mike 21 BW.

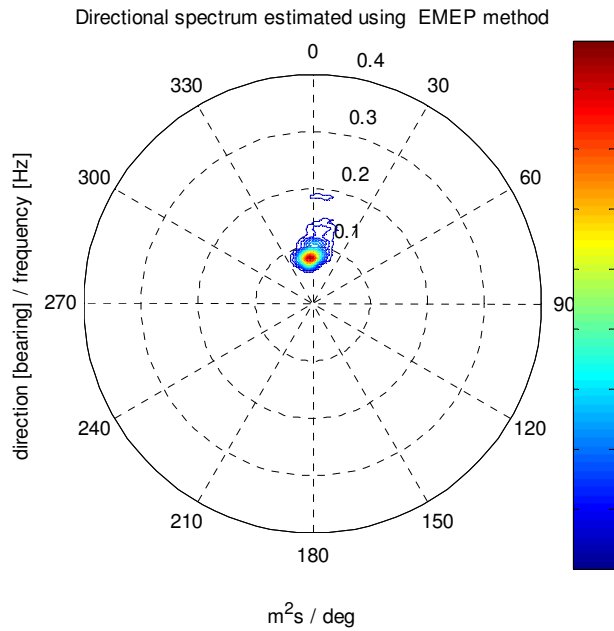
De piekperiode in de haven blijft rond de piekperiode liggen die werd opgelegd aan de golfgeneratielijn (12.0s in dit geval).

3.2.6 Golfrichting

De golfrichting van de indringende golven kan in principe op drie manieren worden bepaald:

1. Op basis van een directioneel spectrum opgesteld volgens de maximum entropie methode van Nwogu et al. (1987). Dit is enkel toepasbaar op de resultaten van Mike 21 BW, omdat het Boussinesq model naast de verheffing ook de dieptegemiddelde horizontale flux geeft (maat voor horizontale orbitaalsnelheid) in de tijd;
2. Door een directionele analyse uit te voeren op basis van verheffingstijdreeksen in een aantal meetpunten geplaatst volgens een bepaald patroon met tussenafstanden afhankelijk van de golflengte (mond. comm. Troch, 2011);
3. Op basis van verheffingsplots, waarbij gekeken wordt naar de richting van de loodrechte op de kruin van de eerste golf die de haven binnendringt (mond. comm. Troch, 2011).

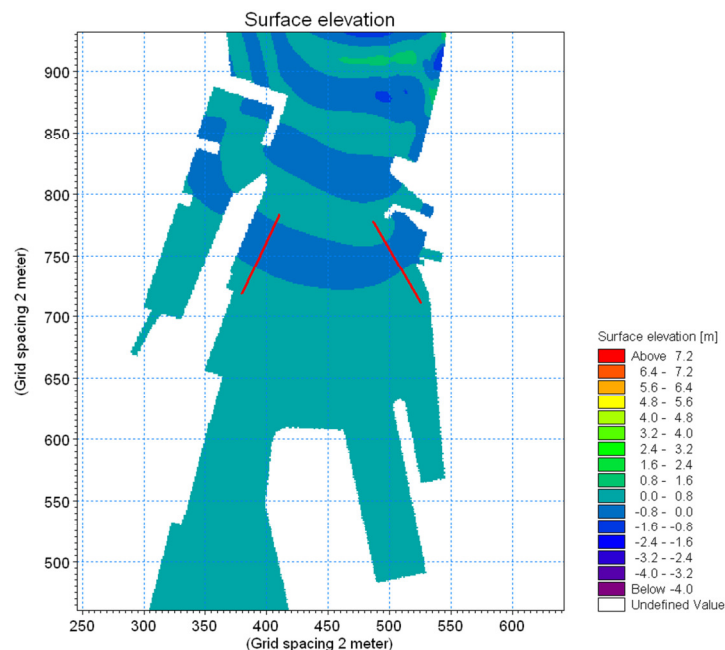
De eerste methode heeft als belangrijke beperking dat dergelijke analyse onnauwkeurige resultaten geeft wanneer het meetpunt zich in de buurt van een reflecterende constructie bevindt (Nwogu et al., 1987). Een voorbeeld is gegeven in Figuur 3-29 voor meetpunt $G13_{mgd}$.



Figuur 3-29: Directioneel spectrum opgesteld met DIWASP (2011) op basis van Mike 21 BW resultaat in G13_{mgd}.

De tweede methode is in principe toepasbaar met beide numerieke modellen. Het is echter niet toepasbaar in deze haven: door de kleine geometrische afmetingen van de haven met betrekking tot de golflengte van de meest energetische golven kunnen de vereiste tussenafstanden niet gerespecteerd kan worden.

Bij de derde methode wordt gekeken naar de richting van de loodrechte op de golfkruin van de eerste golf die de haven binnendringt (cf. Figuur 3-30). Er wordt gekeken naar de eerste golf omdat anders het golfveld reeds verstoord is door reflecties in de haven en daarom geen duidelijke golfkruin van de inkomende golf meer te onderscheiden valt. Deze methode houdt geen rekening met de golfrichting van andere inkomende golven die gereflecteerd werden tegen andere structuren dan de beschouwde.



Figuur 3-30: Voorbeeld van verheffingsplot waarin de golfkruin van de eerste golf duidelijk zichtbaar is (Mike 21 BW resultaat). Met aanduiding van de loodrechte op de golfkruin (rode rechte) die de golfrichting aanduidt.

3.3 Gevoeligheidsanalyses en invloeden

3.3.1 Inleiding

Tijdens de stuurgroepvergadering van 13/07/2011 (IMDC, 2011a) werden een aantal gevoeligheidsanalyses voorgesteld. De gevoeligheidsanalyses zijn bedoeld als test of bepaalde aannames gemaakt tijdens het modelleringproces (cf. §3.1) geen onderschatting (of te grote overschatting) van de golfindringing in de binnenhaven hebben veroorzaakt in de finale resultaten. Er was onvoldoende tijd over om nog rekening te houden met resultaten van deze gevoeligheidsanalyses in de finale modellen. Vandaar dat dit hoofdstuk volgt pas na de resultaten. Uit dit hoofdstuk zal wel blijken of nog rekening gehouden moet worden met bepaalde invloeden bij interpretatie van de golfindringingresultaten (cf. §1.1).

De invloed van een bepaalde wijziging in het golfmodel zal steeds onderzocht worden aan de hand van:

- de K_d -waarden op de locaties in het fysisch model (cf. §3.2.3), dit geeft een idee van de gevoeligheid op de K_d -waarden langs de belangrijkste kaaimuurzones in de haven, waarlangs de uiteindelijke resultaten zijn bepaald.
- de langsdoorsnede AJK (cf. §3.2.4), dit geeft een idee van de gevoeligheid op de K_d -waarden langs een langsdoorsnede die loopt volgens de meest energetische weg en waar dus dikwijls de grootste invloeden te onderscheiden zijn;
- de dwarsdoorsnede CD (cf. §3.2.4), dit geeft een idee van de gevoeligheid op de K_d -waarden langs een dwarsdoorsnede ter hoogte van de overgang van buitenhaven naar binnenhaven;

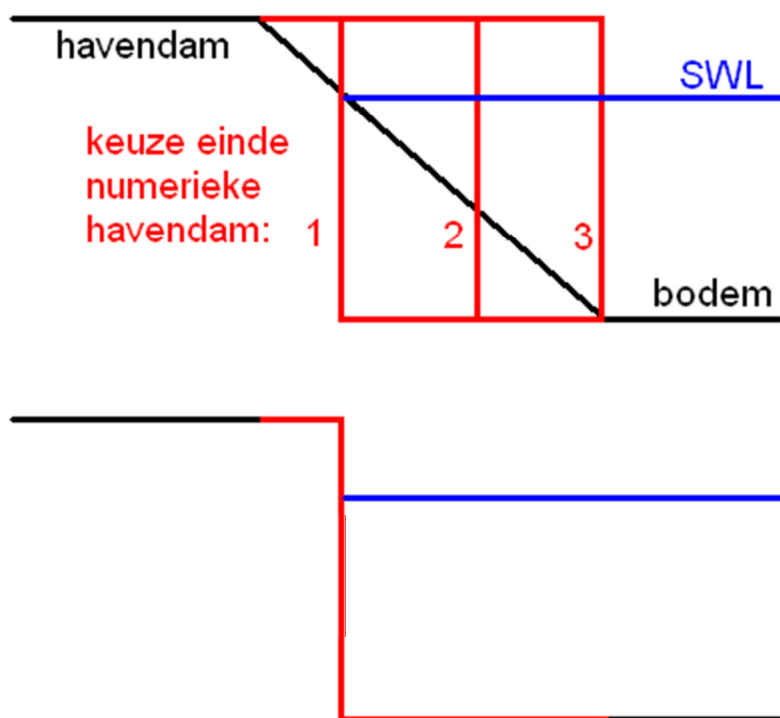
Indien dit niet volstaat, zullen bijkomende resultaten (bvb. contourplots,...) geraadpleegd worden om tot een juiste conclusie te kunnen komen.

Indien mogelijk werd het onderzoek uitgevoerd met MILDwave, gezien de veel kortere rekentijd en vergelijkbare resultaten met Mike 21 BW wat de K_d -waarde in de haven betreft (cf. §1.1).

3.3.2 Breedte haveningang

De hellingen van de havendammen werden niet opgenomen in de bathymetrie (cf. §3.1.1). Daarom was er een keuze nodig uit 3 verschillende mogelijke eindpunten van de numerieke havendam die een landgrens voorstelt en dus in principe een verticale wand (cf. Figuur 3-31). Door het weglaten van de helling is refractie op deze hellingen niet gemodelleerd. De dissipatie en partiële reflectie op de golfbrekerhellingen werd gemodelleerd door een sponslaag (cf. §3.1.7). Deze keuze heeft ook invloed op de breedte van de haveningang en dus op de golfindringing in de haven. De numerieke havendam kan stoppen:

1. Aan het snijpunt tussen helling golfbreker en het stil water peil;
2. Ergens tussenin;
3. Aan het snijpunt tussen helling golfbreker en zeebodem (zonder rekening te houden met de teenconstructie).



Figuur 3-31: Schematische voorstelling van keuze einde van havendamkop in de numerieke modellen waarbij de hellingen van de havendammen niet opgenomen zijn in de bathymetrie. boven: de mogelijkheden, onder: de uiteindelijke keuze in de finale modellen

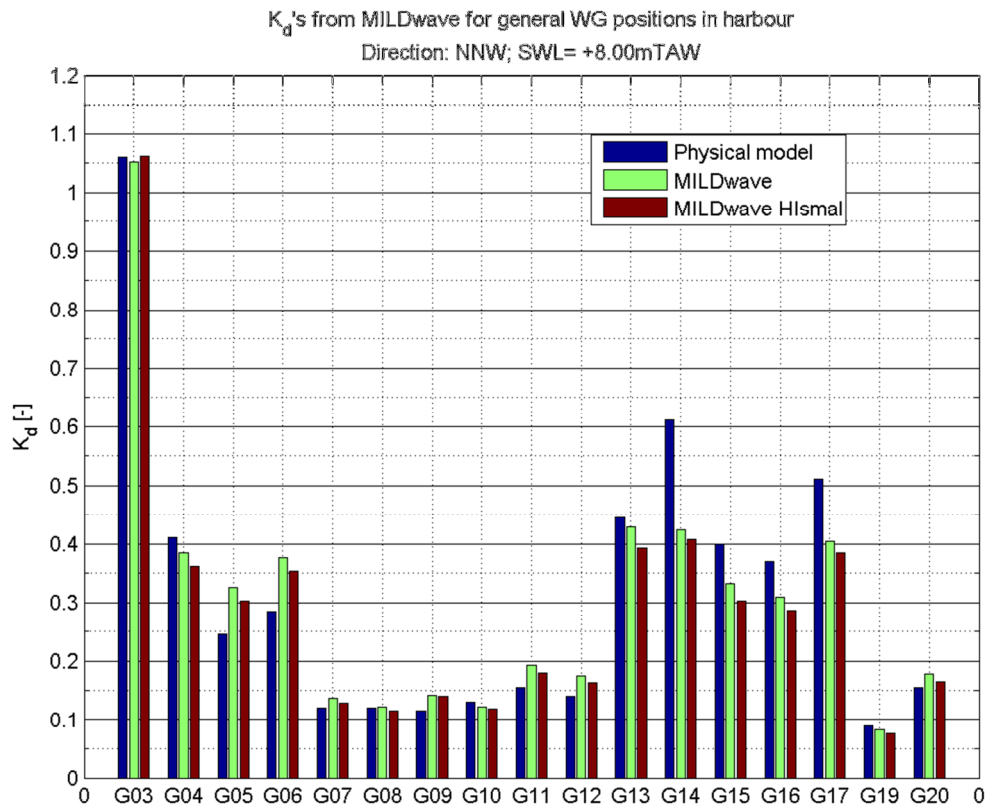
Mogelijkheid 1 werd gekozen in de finale modellen (cf. §3.1.1) waarbij de haveningangsbreedte telkens werd aangepast volgens een andere waterstand. Deze keuze resulteert in de breedste haveningang en laat daarom de meeste golfenergie binnen. De golfindringing wordt overschat door afwezigheid van de hellingen (en teenconstructies) van de havendamkoppen in de numerieke modellen.

In dit hoofdstuk wordt onderzocht hoe groot het effect is van een smallere haveningang (200m breed i.p.v. 235m breed) op de golfindringing in de haven. Daarbij is mogelijkheid 2 gekozen: de havendamkoppen eindigen tussenin in het midden van mogelijkheden 1 en 3. Mogelijkheid 3 werd niet beschouwd omdat dit sowieso een onderschatting van de golfindringing zou betekenen.

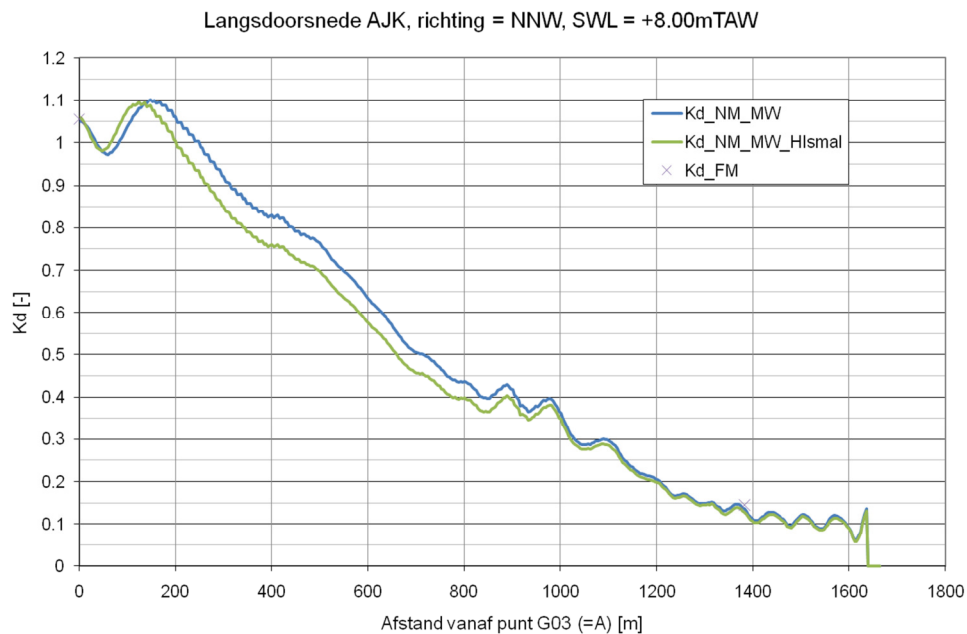
Het onderzoek werd uitgevoerd voor de hydrodynamische randvoorwaarden met +8.00m TAW en met golfmodel MILDwave (cf. Tabel 3-9).

Tabel 3-9: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse "Breedte haveningang" werd uitgevoerd

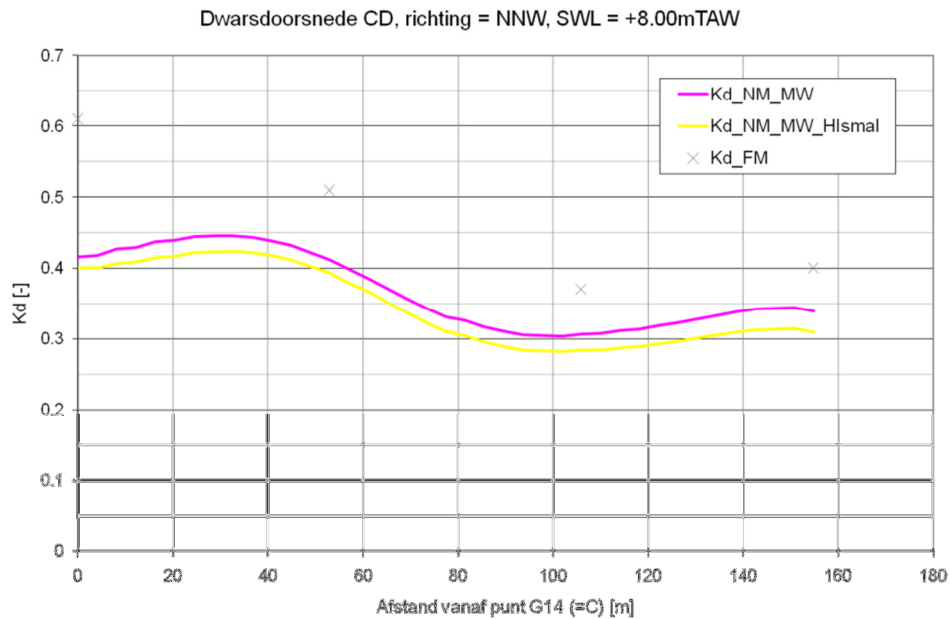
SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
8.00	16.9	5.0	12.0	X			X	



Figuur 3-32: K_d -waarden voor de algemene locaties in het fysisch model. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model, het MILDwave model, het MILDwave model met versmalde haveningang (einde havendamkopen volgens mogelijkheid 2).



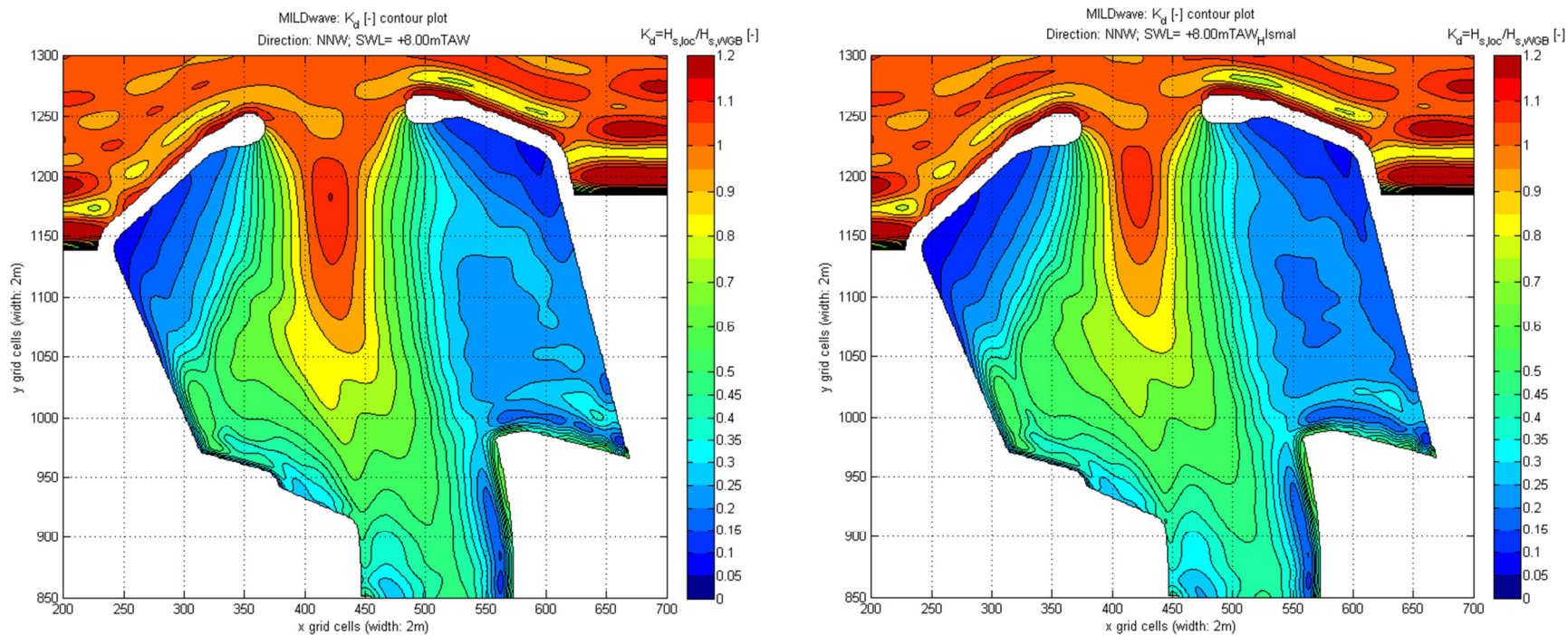
Figuur 3-33: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.



Figuur 3-34: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.

Uit Figuur 3-32, Figuur 3-33 en Figuur 3-34 blijkt dat de K_d -waarde op elke locatie in de haven daalt. Dit correspondeert met de verwachting dat de golfindringing daalt voor een smallere haveningang. De daling is meest uitgesproken in de buitenhaven (cf. x : 0m \rightarrow 830m in Figuur 3-33) en eerder verwaarloosbaar in de binnenhaven (cf. vanaf $x = 830$ m in Figuur 3-33). Omdat de binnenhaven het interessegebied is, mag de invloed van een smallere haveningang worden verwaarloosd. Het zorgt sowieso voor een daling van de K_d -waarde zodat de resultaten uit §1.1 zeker geen onderschatting zijn.

Het feit dat het verschil in de buitenhaven zoveel groter is (cf. Figuur 3-33 en Figuur 3-35), ligt waarschijnlijk aan het verschillend diffractiepatroon dat gepaard gaat met een andere haveningangafmeting voor eenzelfde golflengte. Dit is bijvoorbeeld ook waarneembaar in de resultaten van Pos en Kilner (1987) die fysische diffractie proeven hebben uitgevoerd voor $B/L = 1.64, 1.41, 1.20, 1.00, 0.75$ en 0.50 (met B de breedte van de haveningang en L de golflengte, ter vergelijking: hier is $B/L = 235/142.2 = 1.65$).



Figuur 3-35: Vergelijking van diffractiepatroon tussen finaal model (links) en model met kleinere haveningangbreedte (rechts)

3.3.3 Helling vaargeul

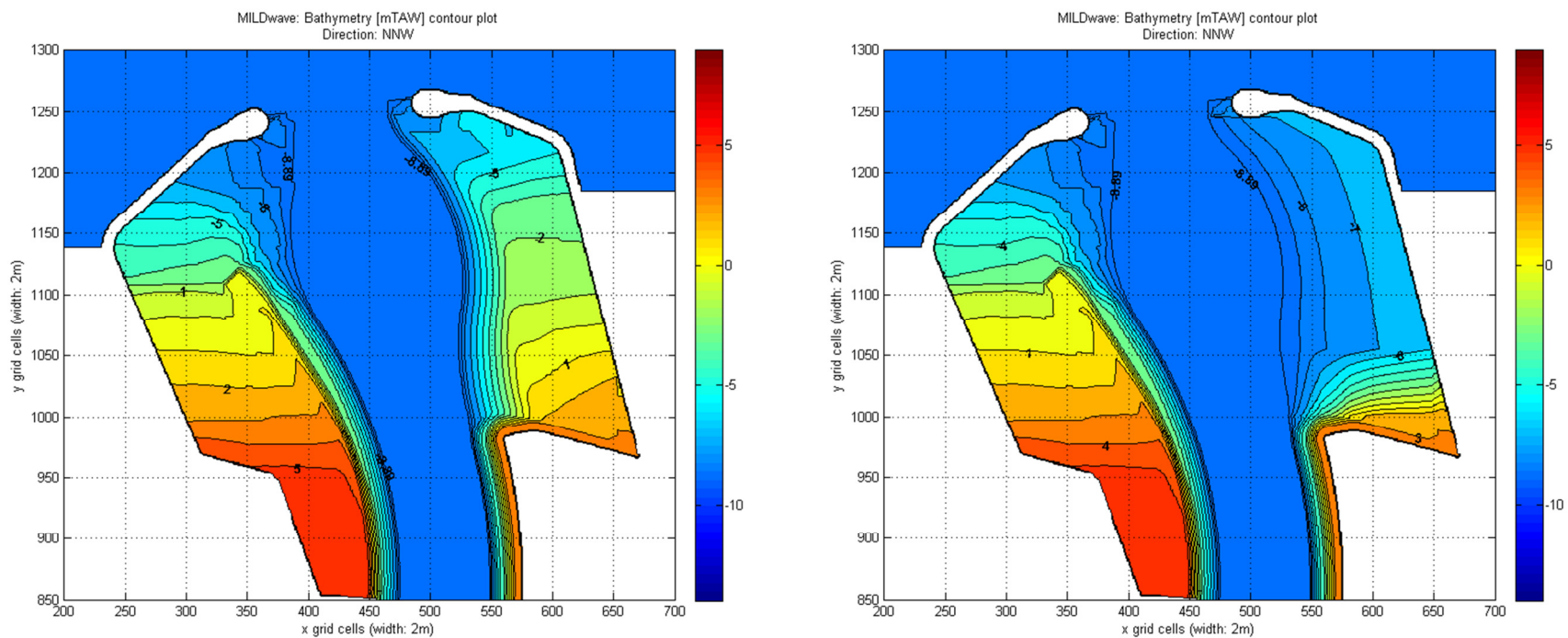
De helling tussen de havengeul en het oostelijk ondieper gedeelte in de buitenhaven (cf. Figuur 3-36) zorgt voor refractie van inkomende golfenergie naar het oosten in de buitenhaven weg van de binnenhaven. Er werd gevreesd (IMDC, 2011a) dat eens deze helling geërodeerd zal zijn naar een zwakkere helling, dit fenomeen minder uitgesproken zal optreden zodat meer golfenergie naar de binnenhaven toegelaten wordt.

Het is reeds aangetoond dat hellingen van een vaargeul kunnen evolueren naar een evenwichtshelling van ongeveer 1/200 (WL, 2005). Dit werd gevonden voor vaargeulen buiten de havens. Of dergelijke erosie ook effectief kan optreden binnen een haven waar de vaargeul redelijk beschermd is, wordt hier niet onderzocht. Enkel de invloed van een zwakkere helling op het extreem golfklimaat in de binnenhaven wordt bekeken.

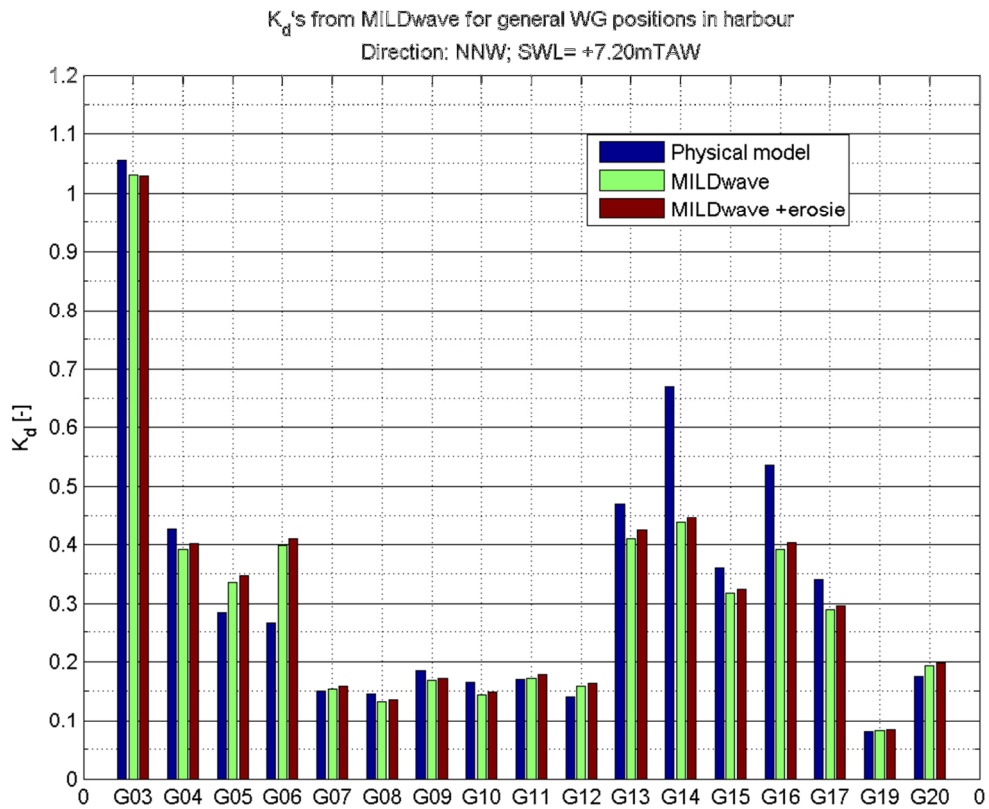
Het onderzoek werd uitgevoerd voor de hydrodynamische randvoorwaarden met +7.20m TAW en richting NNW. Een lagere waterstand en een golfrichting die het meest weggericht is van de helling zorgen voor meer refractie van de golven op deze helling, zodat het effect voor deze condities meest zichtbaar zou moeten zijn. MILDwave werd opnieuw toegepast (cf. Tabel 3-10).

Tabel 3-10: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse "Helling vaargeul" werd uitgevoerd

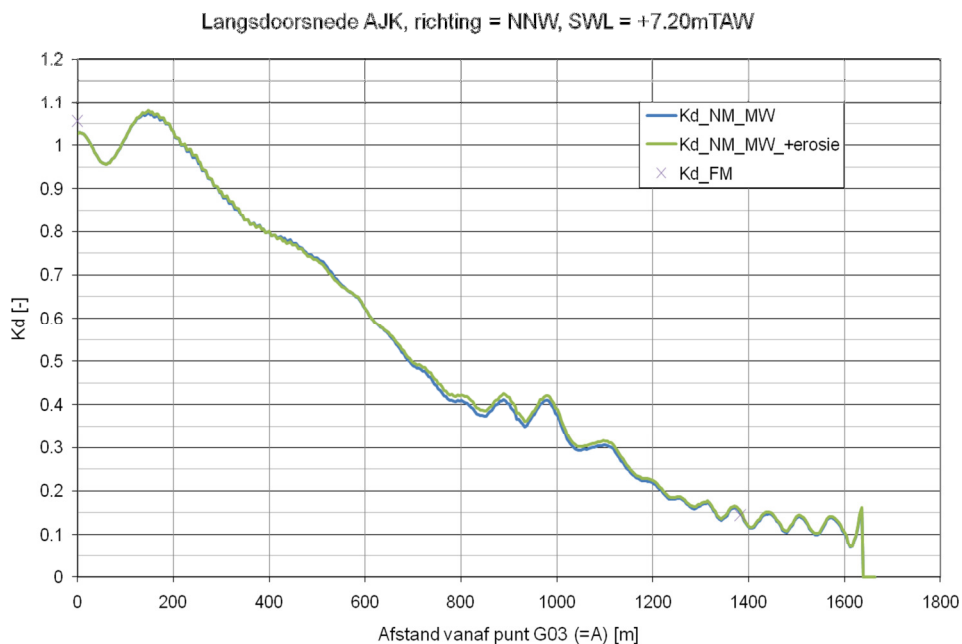
SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
7.20	16.1	5.0	12.0	X			X	



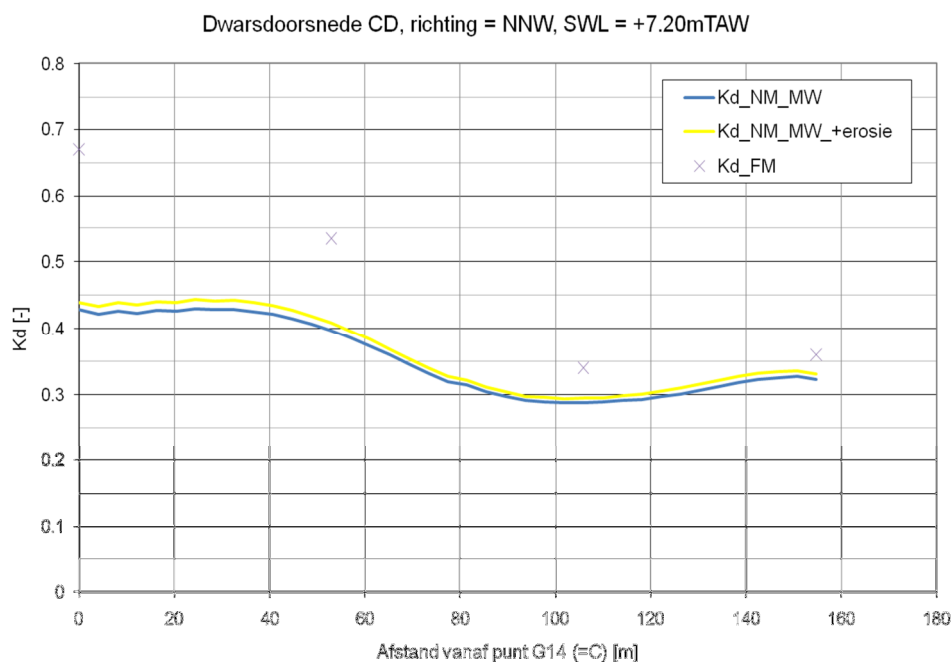
Figuur 3-36: Vergelijking van bathymetrie buitenhaven tussen finaal model met helling 1/10 tussen havengeul en oostelijk strand (links) en model met helling 1/100 tussen havengeul en oostelijk strand ontstaan door hypothetische erosie (rechts).



Figuur 3-37: K_d -waarden voor de algemene locaties in het fysisch model. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model, het MILDwave model met helling vaargeul 1/10, het MILDwave model met helling vaargeul 1/100.



Figuur 3-38: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.



Figuur 3-39: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.

Uit Figuur 3-37, Figuur 3-38 en Figuur 3-39 blijkt dat de K_d -waarden in de haven inderdaad overal een beetje stijgen. Het is echter van dergelijke grootteorde ($K_d \sim 0.01$) dat het effect verwaarloosd kan worden.

3.3.4 Absorptiecoëfficiënten

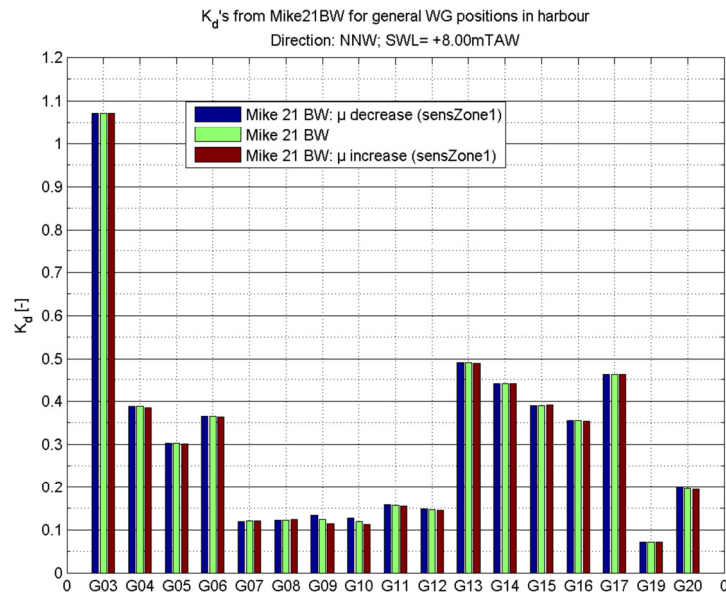
De gevoeligheid van de absorptiecoëfficiënten in de 2DH modellen dient onderzocht te worden om het vertrouwen te versterken in de methode die werd toegepast voor het modelleren van partiële reflectie (cf. §3.1.7). Voor enkele belangrijke kaaimuurzones (zone 1, 4, 7b en 7c, cf. Figuur 5-1) is de absorptiecoëfficiënt van de sponslaag eens verlaagd en verhoogd zodat de reflectiecoëfficiënt corresponderend 5% wijzigt in vergelijking met de originele waarde.

Het onderzoek werd uitgevoerd voor de hydrodynamische randvoorwaarden met +8.00m TAW en richting NNW (cf. Tabel 3-11). De hoogste waterstand werd beschouwd omdat voor deze waterstand de meeste absorptie is toegepast (laagste reflectiecoëfficiënten in de haven wegens overstroomde kaaimuren).

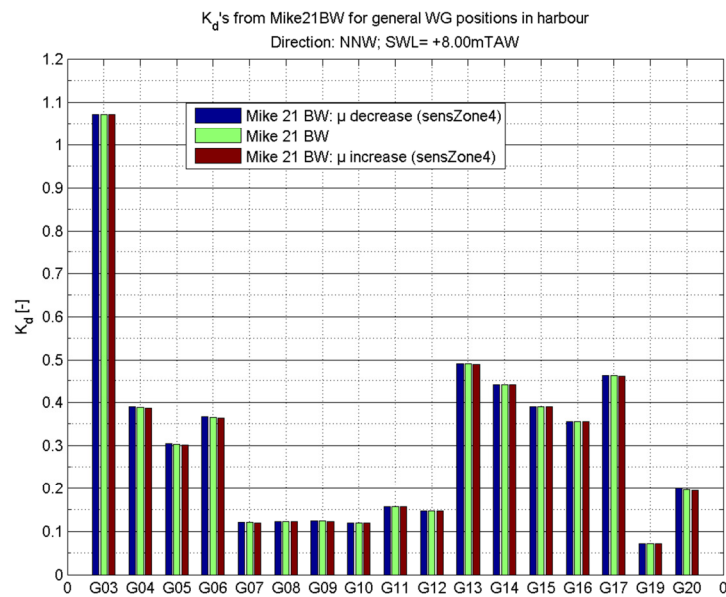
Tabel 3-11: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse "Absorptiecoëfficiënten" werd uitgevoerd

SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
8.00	16.9	5.0	12.0	X				X

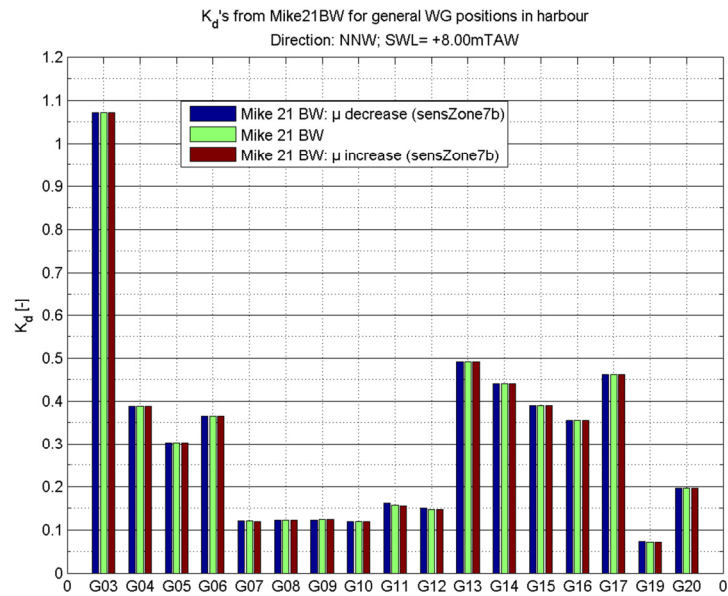
Deze analyse werd enkel uitgevoerd met Mike 21 BW.



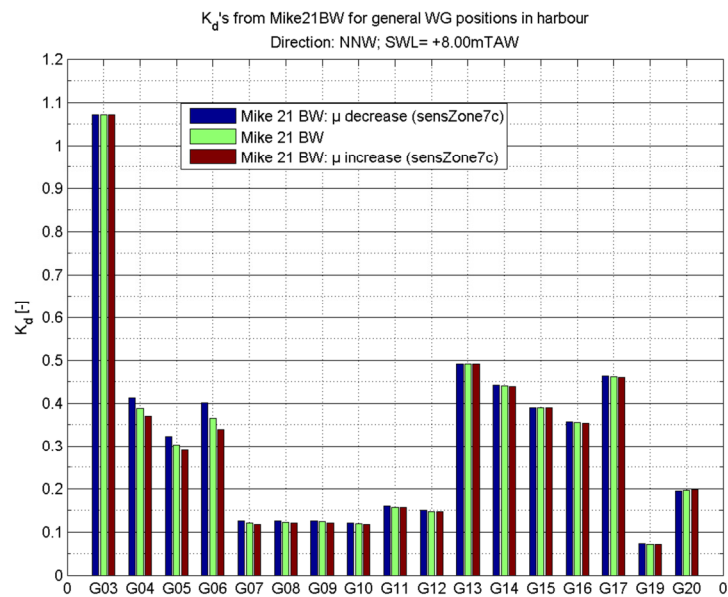
Figuur 3-40: K_d-waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 1.



Figuur 3-41: K_d-waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 4.



Figuur 3-42: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 7b.



Figuur 3-43: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model en het Mike 21 BW model met een hogere en lagere absorptiecoëfficiënt langs kaaimuurzone 7c.

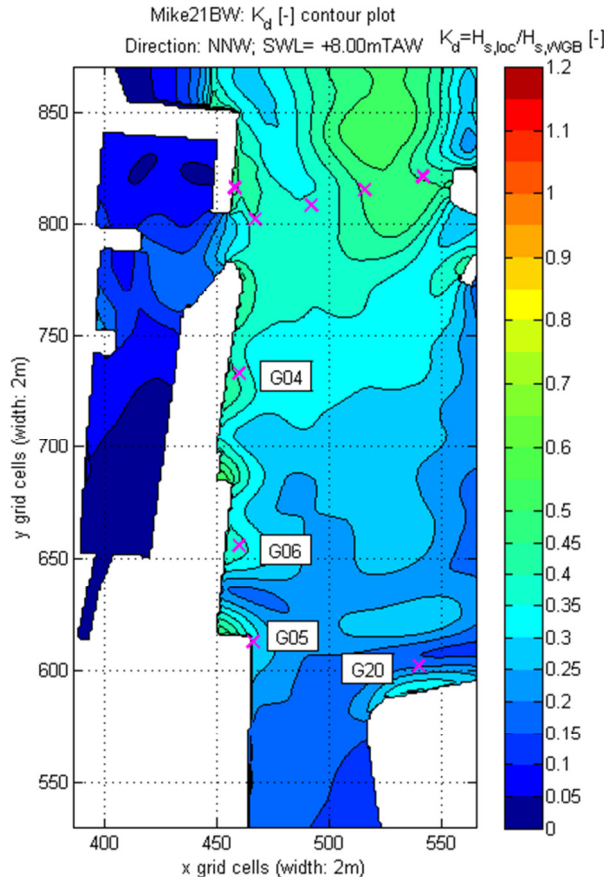
De resultaten in Figuur 3-40, Figuur 3-41, Figuur 3-42 en Figuur 3-43 tonen enkel een merkbaar verschil op de locaties die zich dicht tegen kaaimuurzone bevinden waarvoor de absorptiecoëfficiënt werd gewijzigd:

- Kaaimuurzone 1: locaties G09 en G10 (cf. Figuur 3-40);
- Kaaimuurzone 4: locatie G20 (cf. Figuur 3-41);
- Kaaimuurzone 7b: locaties G11 en G12 (cf. Figuur 3-42);
- Kaaimuurzone 7c: locaties G04, G05 en G06 (cf. Figuur 3-43);

Voor kaaimuurzones 4 en 7b is zelfs voor de dichtstbijzijnde locaties het verschil bijna niet merkbaar. Voor zone 7b kan dit verklaard worden door het quasi parallelle verloop van de golven langs deze zone.

Dicht tegen zone 4 is het verschil meer waar te nemen, locatie G20 ligt echter juist tussenin een piek en dal van de staande golfoscillaties (cf. Figuur 3-44), wat het klein effect hier verklaart.

Voor kaaimuurzone 7c wordt het grootste verschil opgetekend. Dit kan verklaard worden door de quasi loodrechte golfreflectie tegen de uitstekende gedeelten van de kaaimuur in deze zone. De meetpunten liggen net of bijna op een piek van de resulterende staande golfoscillaties (cf. Figuur 3-44), zodat in deze punten inderdaad de grootste invloed van wijzigen van de reflectiecoëfficiënt te verwachten is.



Figuur 3-44: K_d -contourplot met indicatie van locaties G04, G05, G06 en G20.

Deze resultaten geven een versterkt vertrouwen in de toegepaste methode om partiële reflectie in de haven te modelleren. Wijzigen van de absorptiecoëfficiënt, wijzigt de reflectiecoëfficiënt en het effect is vooral voelbaar daar waar het te verwachten is, zonder invloed te hebben op de inkomende golfhoogte.

3.3.5 Transmissie

In het fysisch model is transmissie over de havendammen waargenomen, vooral voor – logischerwijs – de hogere waterstanden (Hassan et al., 2011b). Bij het opstellen van de golfindringingsmodellen is gekozen om transmissie over de havendammen niet te modelleren (cf. §3.1.5). Toch is het belangrijk om te controleren of de golftransmissie effectief weinig invloed heeft op het extreem golfklimaat in de binnenhaven.

Het onderzoek werd uitgevoerd voor de hoogste waterstand (SWL = +8.00m TAW) waarvoor de meeste golftransmissie optreedt en voor golfrichting NW, de richting van de drie gemodelleerde richtingen waarvoor de golftransmissie over de westelijke havendam het meest gericht is naar de vaargeul die naar de binnenhaven leidt. Het golfmodel MILDwave werd hiervoor toegepast.

Tabel 3-12: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse "Transmissie" werd uitgevoerd

SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
8.00	16.9	5.0	12.0			X	X	

Om golftransmissie te modelleren zijn de havendammen, die tot nu toe steeds als onovertopbaar land werden gemodelleerd, volledig vervangen in de breedte door sponslagen (cf. Figuur 3-45). Zo kunnen de golven passeren doorheen de havendammen waarbij dissipatie optreedt in de sponslagen afhankelijk van de gekozen absorptiecoëfficiënt. Naar de koppen van de havendammen toe verbreden de sponslagen zodat hier meer dissipatie en dus minder golftransmissie optreedt. Dit komt overeen met de lagere golftransmissie die hier verwacht wordt als gevolg van de hogere kruin en bredere dwarsdoorsnede van de havendamkoppen.

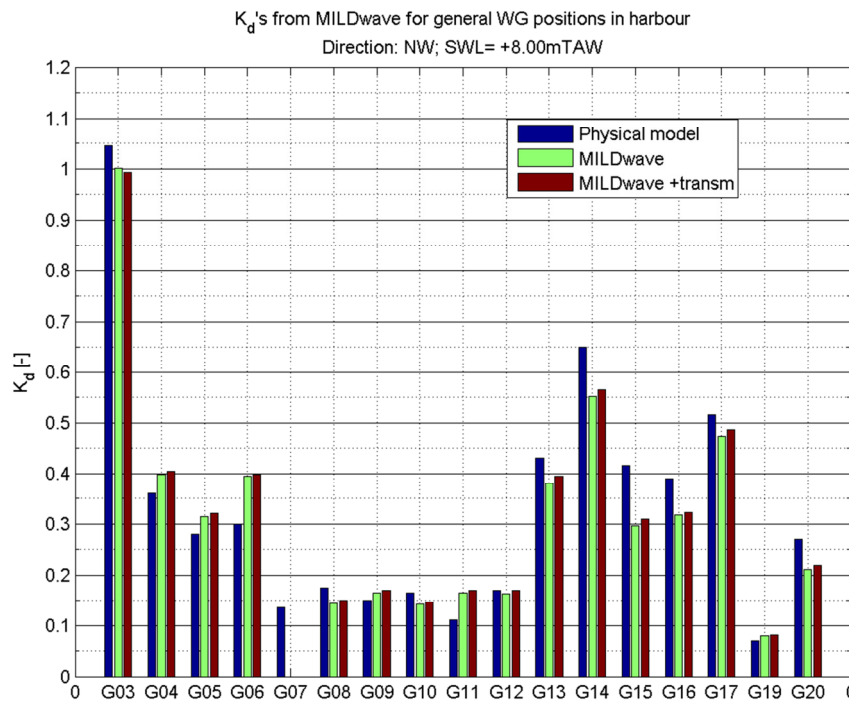


Figuur 3-45: Havendammen vervangen door sponslagen (donkerrood in figuur) met MILDwave absorptiecoëfficiënt = 0.95

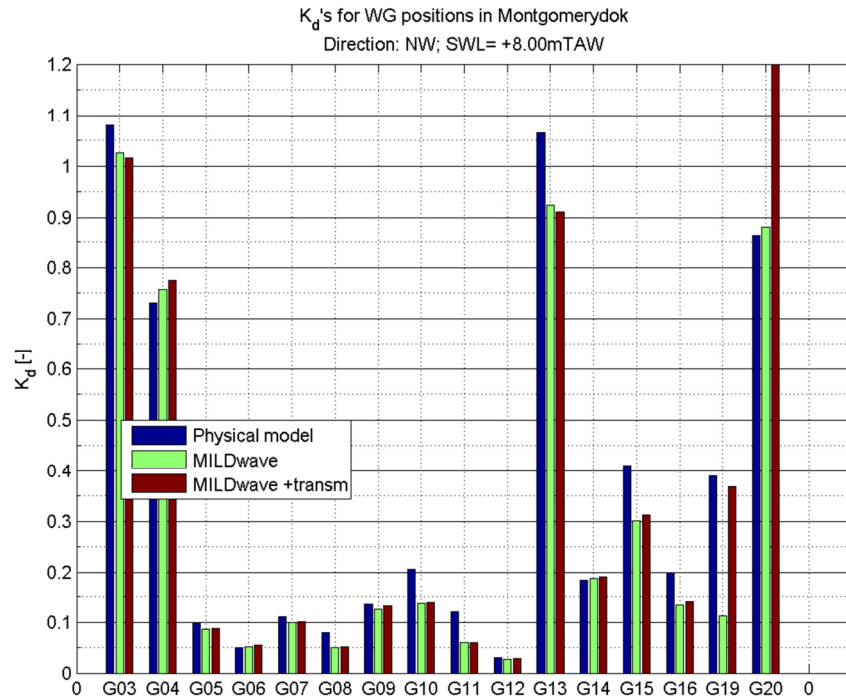
In het fysisch model is tijdens de Montgomerydok proeven een meetpunt voorzien dat zich net aan de lijszijde van de westelijke havendam bevond (cf. G19_{mgd} in Figuur 3-23). Dit meetpunt was specifiek bedoeld om het effect van golftransmissie op te meten. Op de positie van dit meetpunt treedt immers vooral golftransmissie op en komt heel weinig golfenergie toe t.g.v. diffractie.

Om de juiste absorptiecoëfficiënt van de sponslagen te bekomen zijn volgende stappen gevolgd:

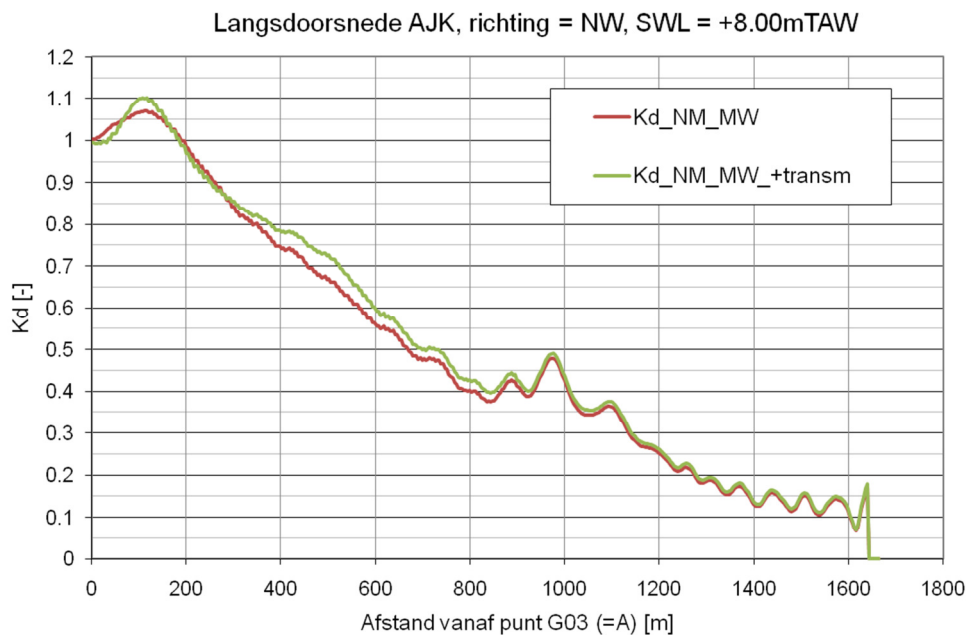
- Een eerste inschatting van de transmissiecoëfficiënt C_t werd gemaakt op basis van het verschil tussen de K_d -waarde op locatie G19_{mgd} van het fysisch model en numeriek model zonder transmissie ($C_t = 0.39 - 0.11 = 0.28$, cf. Figuur 3-47).
- Een 1DH model werd opgesteld met constante waterdiepte en in het midden 14 sponslagen overeenkomstig met respectievelijk de waterdiepte en de breedte van de sponslaag in het 2DH model. De absorptiecoëfficiënt μ werd op iteratieve wijze bepaald zodat een C_t -waarde van 0.28 werd bekomen. Dit leverde een μ -waarde op van 0.94.
- Deze absorptiecoëfficiënt bleek echter iets te veel absorptie en dus te weinig golftransmissie te veroorzaken in het 2DH model.
- De absorptiecoëfficiënt werd daarna aangepast tot een goede overeenkomst in het punt G19_{mgd} met het fysisch model werd gevonden. Dit is voor $\mu = 0.95$.
- Uit het 1DH model volgt voor deze μ -waarde een transmissiecoëfficiënt C_t van 0.33 terwijl dit in het 2DH model 0.26 zou zijn op basis van meetpunt G19_{mgd}. Een mogelijke oorzaak is dat de breedte van de sponslaag in het 2DH model niet overal 14 cellen breed is zoals in het 1DH-model, maar soms ook 13 of 15 cellen. Hier heeft het echter weinig belang omdat een calibratie met het fysisch model mogelijk was. De golftransmissie werd zo op een – in deze context – geslaagde manier gemodelleerd zodat een onderzoek van het effect mogelijk is.



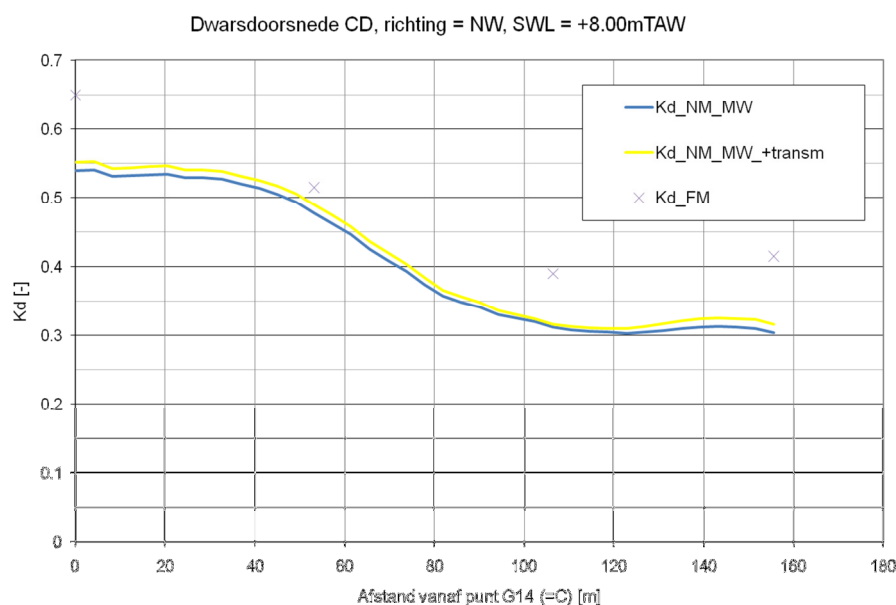
Figuur 3-46: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het MILDwave model en het MILDwave model met modellering van transmissie over de havendammen.



Figuur 3-47: K_d-waarden voor de Montgomerydok locaties. Vergelijking van de resultaten van het MILDwave model en het MILDwave model met modellering van transmissie over de havendammen.



Figuur 3-48: Evolutie van K_d-waarde volgens langsdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.



Figuur 3-49: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.

Op basis van Figuur 3-46, Figuur 3-47, Figuur 3-48 en Figuur 3-49 blijkt het effect van de golftransmissie heel beperkt en zelfs verwaarloosbaar (K_d -verschil ~ 0.01) te zijn voor het extreem golfklimaat in de binnenhaven.

Het effect is echter wel merkbaar in de buitenhaven zoals niet alleen Figuur 3-48 toont, maar ook Figuur 3-47 voor locatie G19_{mgd}, waar inderdaad het grootste effect werd verwacht in de haven. Voor punt G20_{mgd} wordt ook een zeer groot verschil opgetekend, maar dit punt ligt buiten de haven aan de loefzijde van de westelijke havendam in een gebied dat locatiegevoelig is als gevolg van de staande golfoscillaties. Een andere mogelijke oorzaak is dat de sponslagen geen goede reflectiecoëfficiënt veroorzaken, maar dit werd hier verder niet onderzocht omdat het gebied buiten de haven niet behoort tot het interessegebied.

De conclusie is dus dat golftransmissie ondergeschikt is aan de golfenergie die via de haveningang de binnenhaven binnendringt (=golfpenetratie).

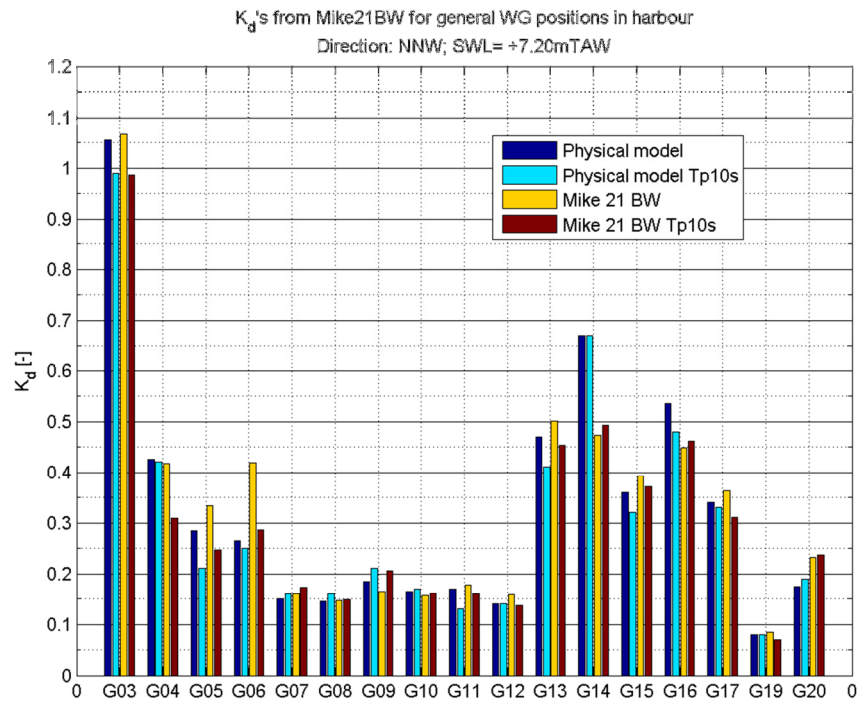
3.3.6 Golfperiode

In het fysisch model is reeds de invloed van de golfperiode onderzocht (Hassan et al., 2011a en b). Dit onderzoek kon zich echter enkel beperken tot de meetpunten. In het numeriek model is het mogelijk om de K_d -evolutie over de volledige haven te vergelijken.

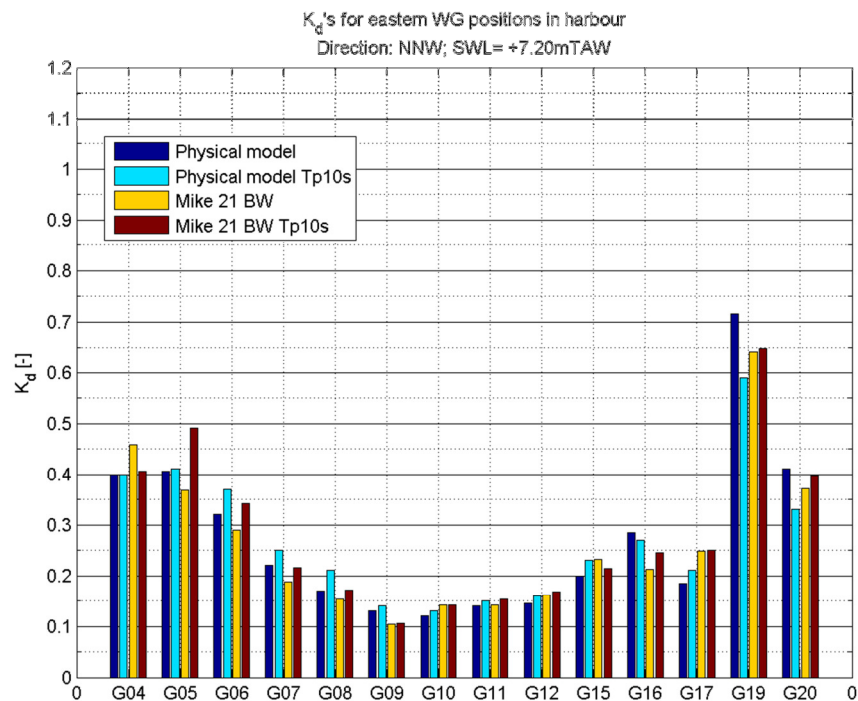
Het onderzoek werd uitgevoerd voor de hydrodynamische randvoorwaarden met waterstand +7.20m TAW en golfrichting NNW (cf. Tabel 3-13) omdat de simulatie met lagere T_p voor deze waterstand en golfrichting reeds opgenomen was in de simulatiematrix (cf. Tabel 3-1). Dit betekent dat de simulatie met lagere golfperiode met beide modellen is uitgevoerd.

Tabel 3-13: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse "Golfperiode" werd uitgevoerd.

SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
7.20	16.1	5.0	12.0	X			X	X
7.20	16.1	5.0	10.0	X			X	X

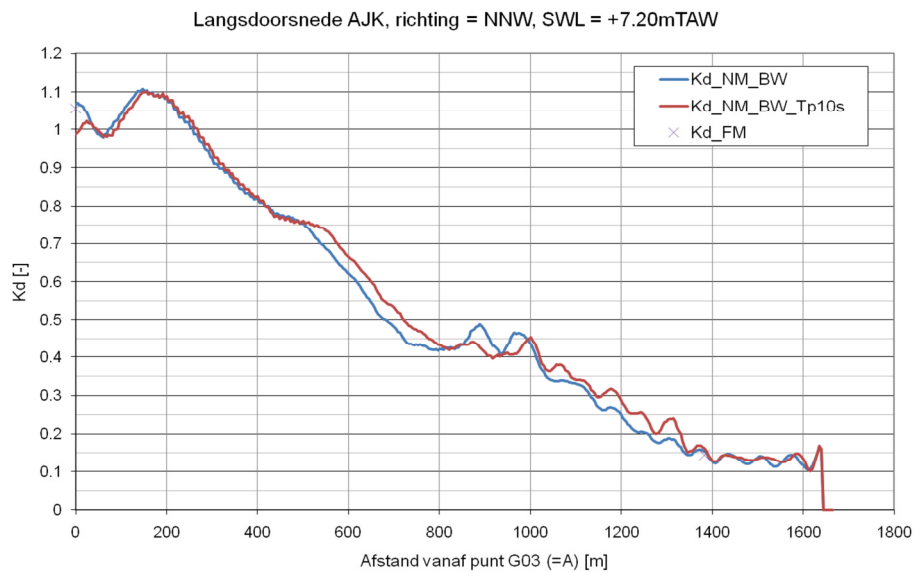


Figuur 3-50: K_d-waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model en Mike 21 BW met randvoorwaarde T_p = 12.0s en T_p = 10.0s.

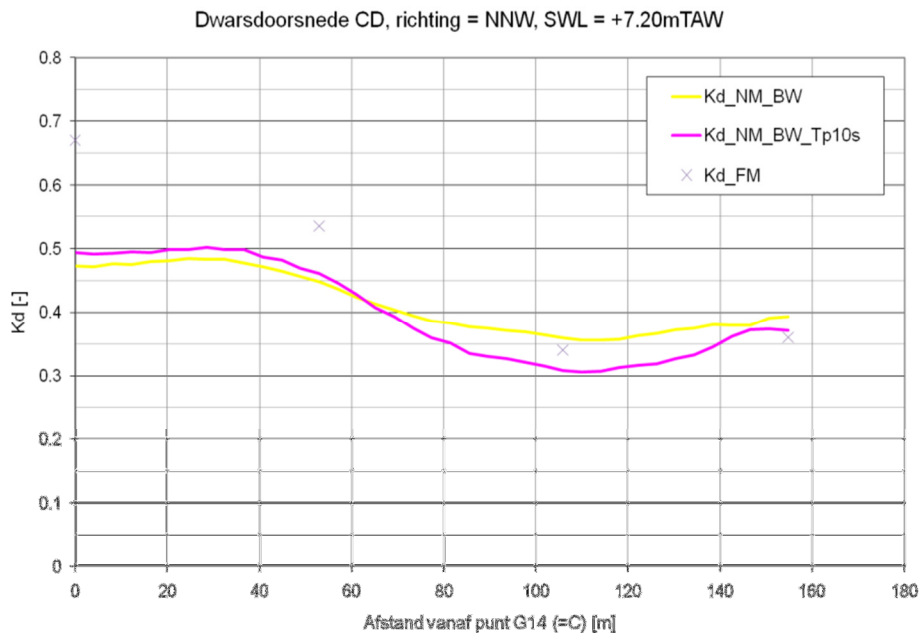


Figuur 3-51: K_d-waarden voor de locaties langs de oostkant van de binnenhaven. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model en Mike 21 BW met randvoorwaarde T_p = 12.0s en T_p = 10.0s.

In Figuur 3-50 en Figuur 3-51 zijn de K_d -waarden vergeleken op de meetlocaties in het fysisch model. Het resultaat van het fysisch model is ook opgenomen in deze figuren. Voor de meeste punten toont het numeriek model hetzelfde gedrag (daling of stijging van K_d -waarde) als het fysisch model voor het verschil tussen de resultaten met $T_p = 12.0s$ en $T_p = 10.0s$.



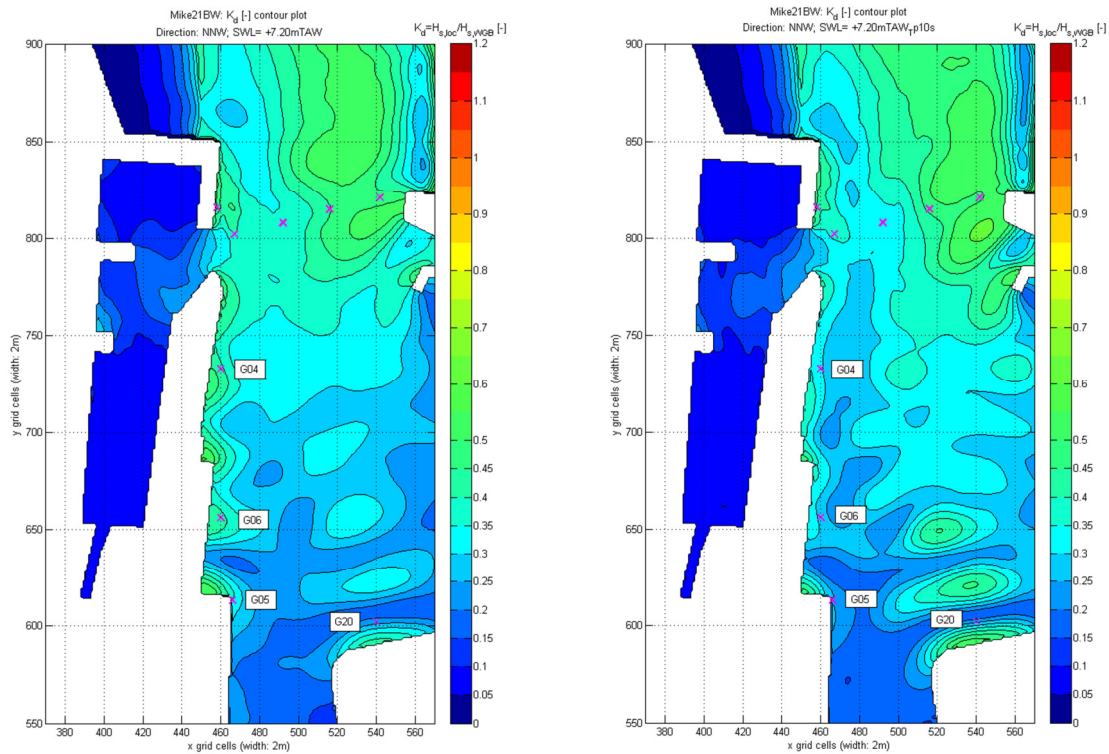
Figuur 3-52: Evolutie van K_d -waarde volgens langsdorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.



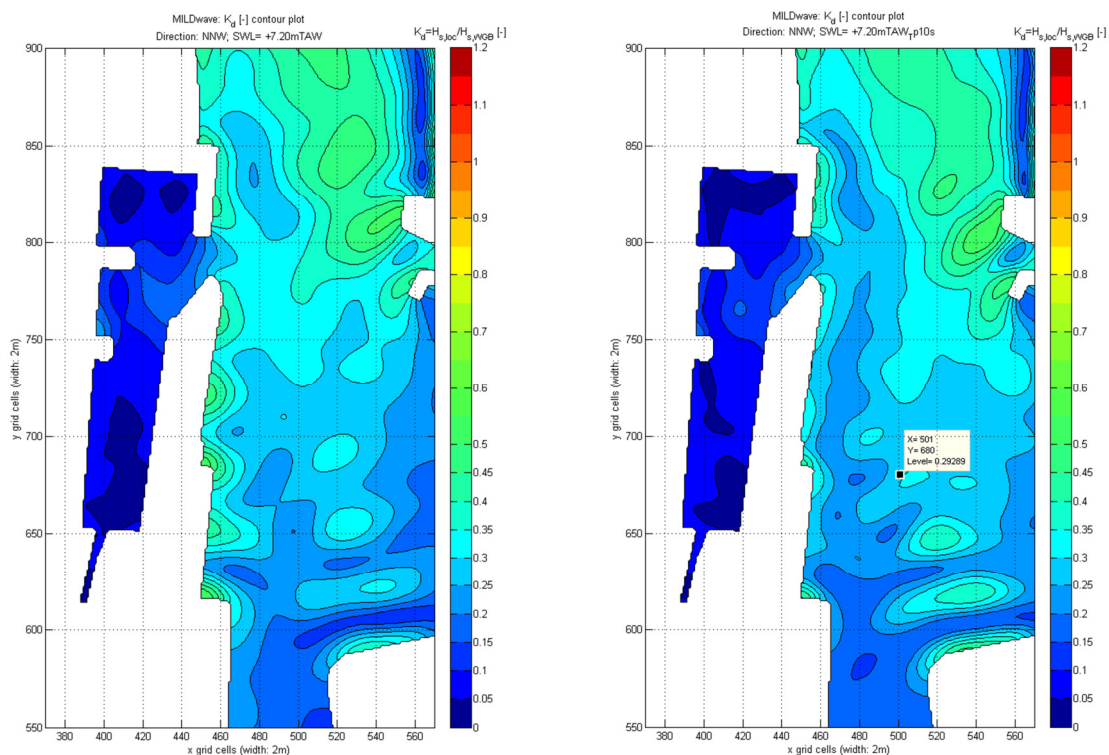
Figuur 3-53: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.

In Figuur 3-52 lijkt tussen $x = 500m$ en $1350m$ de K_d -curve verschoven te zijn naar rechts. De hoofdoorzaak daarvan is waarschijnlijk de invloed die de golfperiode heeft op alle staande golfoscillaties in de haven. Een kleinere golfperiode zorgt voor een kleinere golflengte zodat de pieken en dalen in de staande golfoscillaties dichter bij elkaar komen te liggen.

Verlagen van de golfperiode heeft ook effect in dwarsdoorsnede CD (cf. Figuur 3-53), vooral in de tweede helft naar punt D toe.



Figuur 3-54: K_d -contourplots met indicatie van locaties G04, G05, G06 en G20. Links: resultaat met piekperiode $T_p = 12.0s$, rechts: resultaat met piekperiode $T_p = 10.0s$. Resultaat Mike 21 BW.



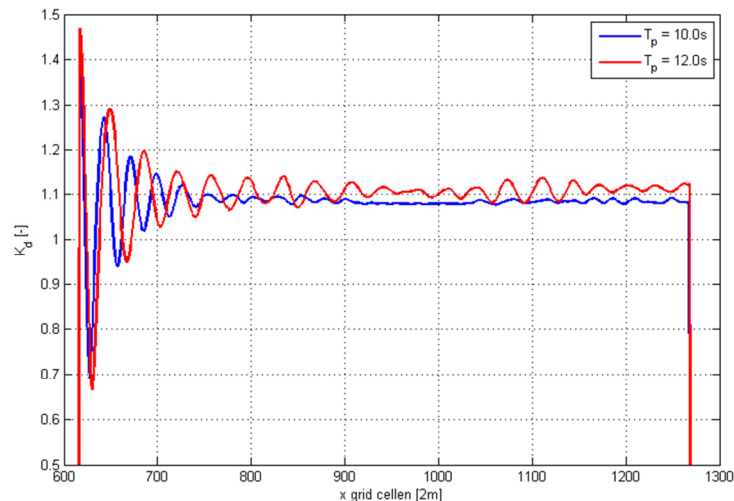
Figuur 3-55: K_d -contourplots met indicatie van locaties G04, G05, G06 en G20. Links: resultaat met piekperiode $T_p = 12.0s$, rechts: resultaat met piekperiode $T_p = 10.0s$. Resultaat MILDwave.

Uit Figuur 3-50 blijkt dat wijzigen van de golfperiode het grootste effect heeft op locaties $G04_{alg}$, $G05_{alg}$ en $G06_{alg}$. Dit wordt verklaard aan de hand van Figuur 3-54. Zoals eerder werd opgemerkt, liggen deze punten in een staande golfoscillatie gebied van golven die quasi loodrecht reflecteren tegen de uitstekende kaaimuurgedeelten van kaaimuurzone 7c. Door de kleinere golfperiode is de golflengte korter en komen de pieken en dalen van dergelijke oscillaties dicht bij elkaar te liggen. De meetpunten blijven op dezelfde locatie liggen zodat mogelijk het meetpunt nu eerder in een dal ligt dan op een piek (bv. $G04_{alg}$).

De invloed van de golfperiode op de tussenafstand van de pieken en dalen in een staande golf oscillatieveld is duidelijkst te zien in het reflectieveld voor kaaimuurzone 4 (waar meetlocatie $G20_{alg}$ ligt, cf. Figuur 3-54). Voor piekperiode 12.0s is de tussenafstand tussen de eerste en derde piek ongeveer 134.7m wat ongeveer overeenkomt met de verwachte waarde van $L_p(12.0s, 16.1m) = 140.0m$ (Klopman en van der Meer, 1999). Voor piekperiode 10.0s is deze afstand in het resultaat 122.1m wat opnieuw ongeveer overeenkomt met de verwachte waarde van $L_p(10.0s, 16.1m) = 112.0m$.

In zone 7c is het staande golf oscillatieveld meer uitgesproken (grotere piekwaarden) voor piekperiode 12.0s en voor het veld bij zone 4 is dit meer uitgesproken voor piekperiode 10.0s. Dit verschil is op te merken in beide modellen (cf. Figuur 3-54 en Figuur 3-55). De juiste oorzaak hiervan is onduidelijk. Een mogelijkheid is dat de absorptiecoëfficiënt afhankelijk zou zijn van de golfsteilheid (en dus vooral de golfperiode in dit geval) om dezelfde reflectiecoëfficiënt te behouden (Brorsen, 2000).

Dit werd getest met het 1DH-model van MILDwave dat werd gebruikt voor de calibratie van de absorptiecoëfficiënten (cf. §3.1.7). De opstelling en randvoorwaarden werden behouden, behalve de piekperiode die werd gewijzigd van 12.0s naar 10.0s. Het resultaat staat in Figuur 3-56. De absorptiecoëfficiënt lijkt inderdaad afhankelijk te zijn van de golfperiode. Hier werd geen rekening gehouden bij het opstellen van het 2DH-model voor piekperiode 10.0s, zodat dit op zijn minst een bijdrage is aan de oorzaak van bovengenoemde waarneming.



Figuur 3-56: K_d -verloop van 1DH MILDwave model. Linkerrand: land ($x = 0 \rightarrow 615$) + 1 cel sponslaag (op $x = 616$ met $\mu = 0.93$), rechterrand: sponslagen (tot $x = 1500$)

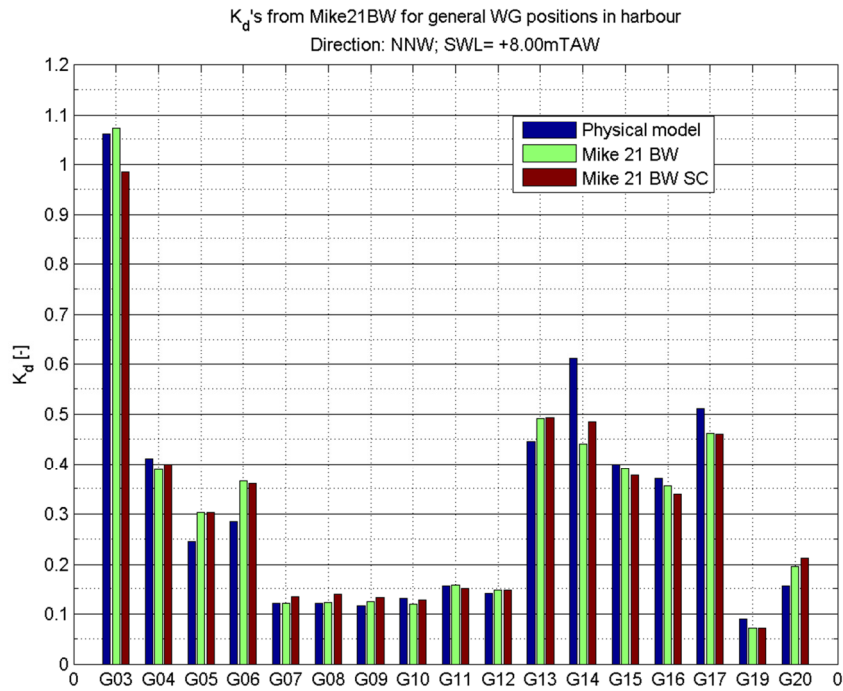
3.3.7 Kort- en langkruinig

Alle simulaties zijn met langkruinige golven uitgevoerd (cf. §3.1.2). Dit hoofdstuk onderzoekt de invloed van kortkruinige golven op de resultaten in de binnenhaven. Daarbij is het spectrum directioneel gemaakt met een directionele distributie volgens een \cos^8 functie met maximale afwijking van 30° van de hoofdrichting. De hydrodynamische randvoorwaarden staan in Tabel 3-14. Dit onderzoek was enkel mogelijk met Mike 21 BW omdat de huidige versie van MILDwave geen kortkruinige golven kan genereren⁶.

⁶ Er bestaat wel een onderzoeksversie van MILDwave die deze functie heeft (mond. comm. Troch,

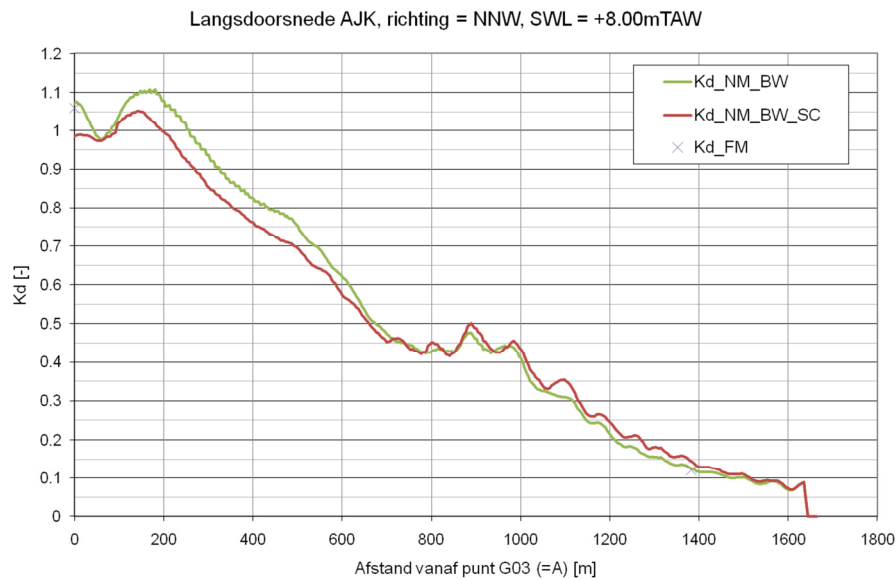
Tabel 3-14: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse "Kort- en langkruinig" werd uitgevoerd

SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
8.00	16.9	5.0	12.0	X				X

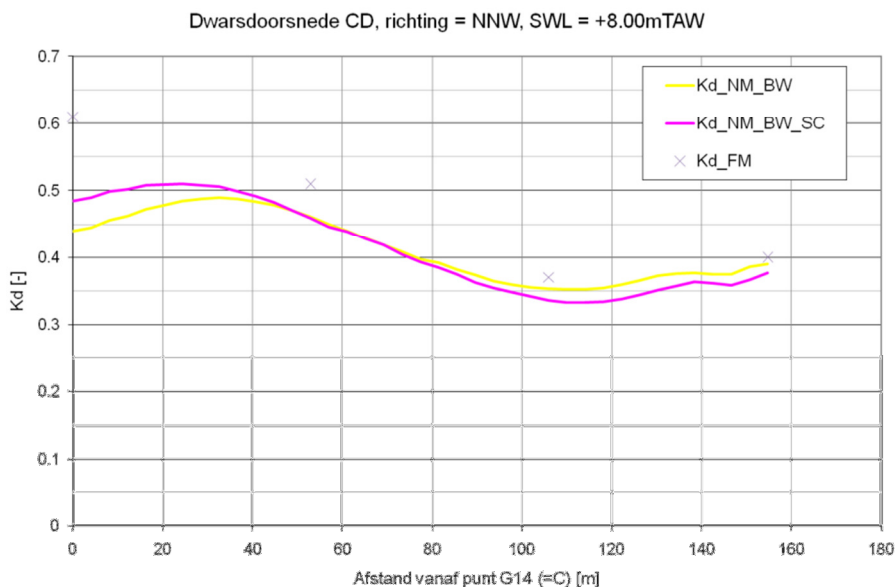


Figuur 3-57: K_d -waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het Mike 21 BW model met lang- en kortkruinige golven.

2010) (Caspeele, 2006).



Figuur 3-58: Evolutie van K_d -waarde volgens langdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 830.



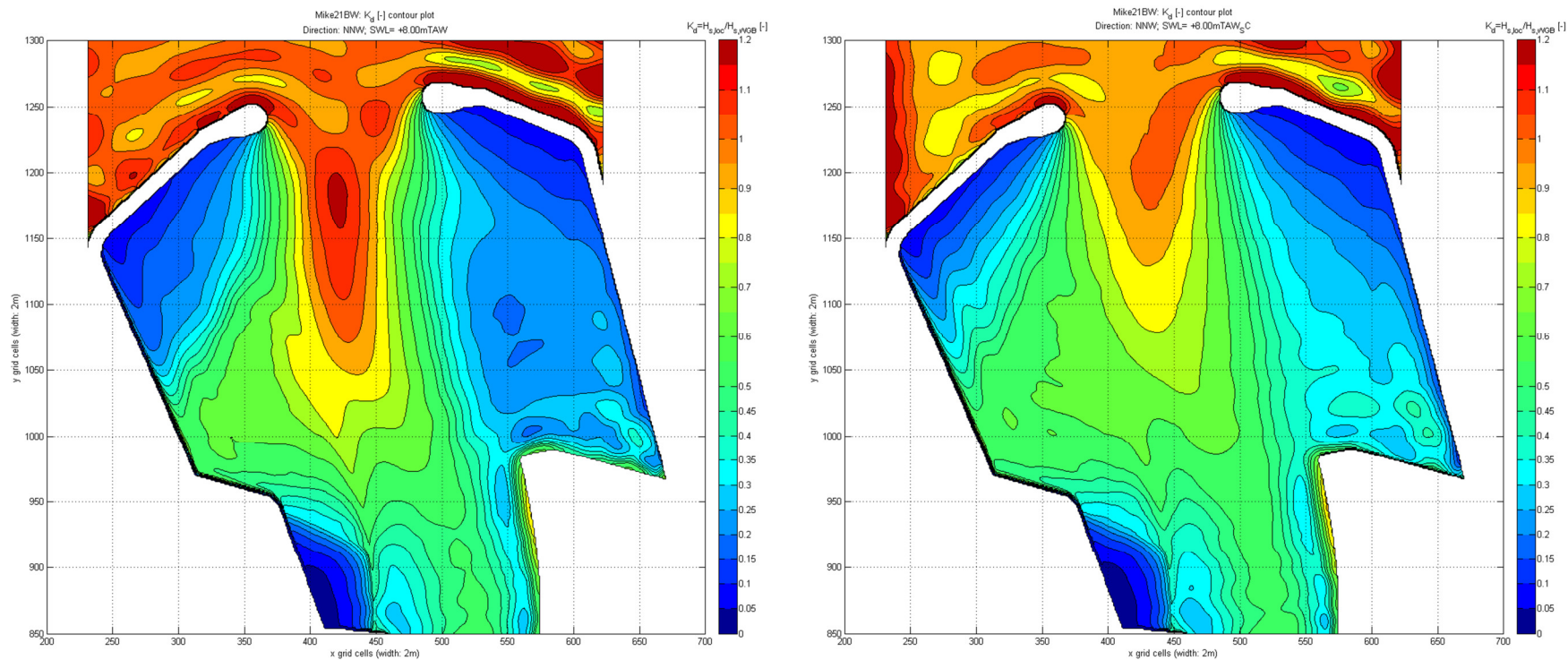
Figuur 3-59: Evolutie van K_d -waarde volgens dwarsdoorsnede CD.

De directionele spreiding zorgt ervoor dat de golfenergie meer verspreid wordt over de haven. Dit verklaart waarom de K_d -waarde in schaduwzones hoger is en in zones langs de hoofdgolfrichting lager is. Dit is zeer duidelijk te zien in de buitenhaven (cf. Figuur 3-60) en kan de meeste verschillen in de resultaten verklaren:

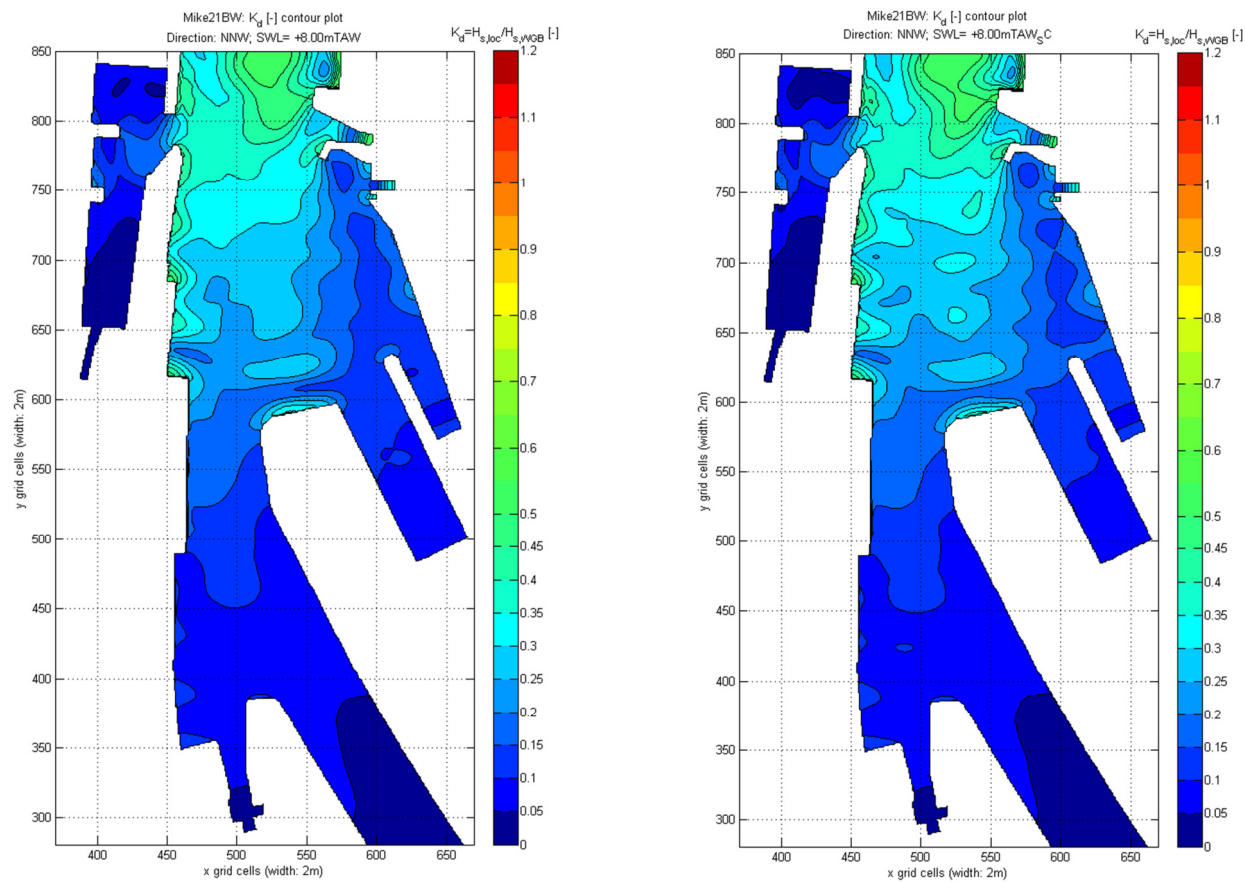
- De langdoorsnede in de buitenhaven loopt ongeveer volgens de hoofdgolfrichting wat de grotere waarde voor langkruinige golven daar verklaart (cf. Figuur 3-58);
- De langdoorsnede vanaf $x = 1100\text{m}$ (cf. Figuur 3-58) ligt in de binnenhaven eerder in een schaduwzone van het diffractiepunt aan de Visserijsluis zodat hier de K_d -waarden van de kortkruinige golven hoger is;

Maar al bij al is het verschil aan de kaaimuren voldoende klein (K_d verschil ~ 0.01 , cf. Figuur 3-57) om de invloed van directionele spreiding te kunnen verwaarlozen.

Dergelijk onderzoek werd ook uitgevoerd met het Boussinesq model SimWave door UGent (2009) en leidde tot dezelfde conclusies wat betreft de invloed van kortkruinige golven in de buitenhaven.



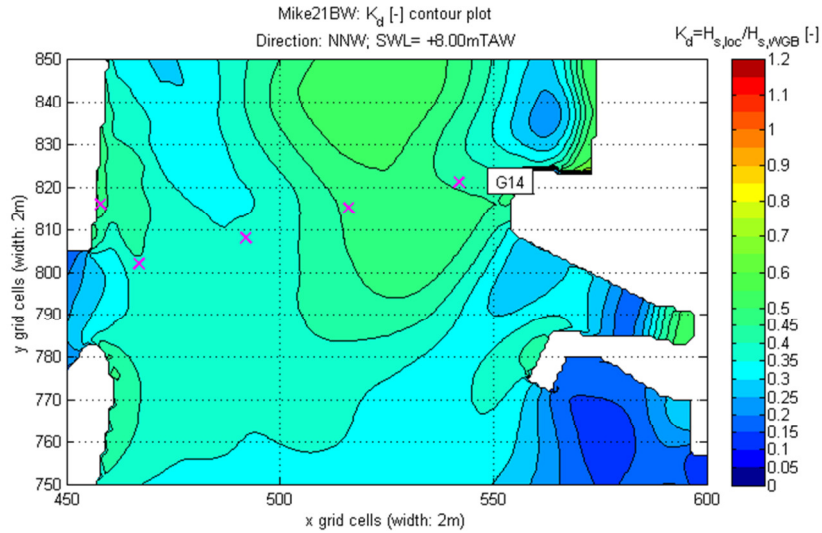
Figuur 3-60: K_d -contourplot met focus op de buitenhaven. Resultaat van Mike 21 BW. Links: langkruinige golven, rechts: kortkruinige golven.



Figuur 3-61: K_d -contourplot met focus op de binnenhaven. Resultaat van Mike 21 BW. Links: langkruinige golven, rechts: kortkruinige golven.

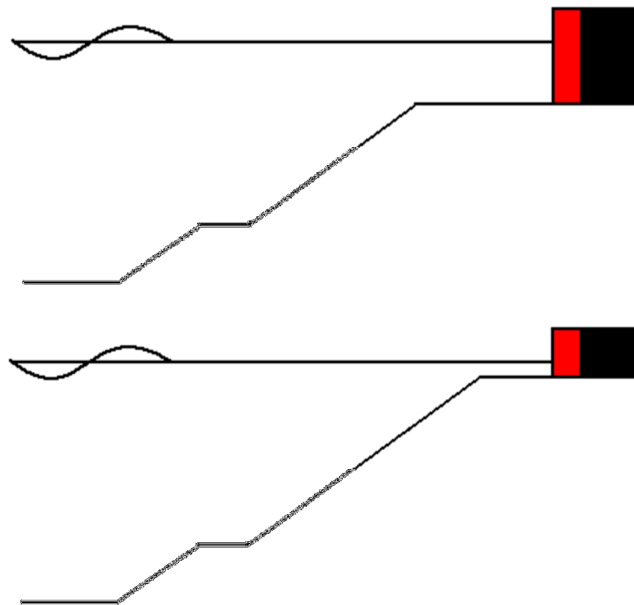
3.3.8 Helling “Halve Maan”

Uit de resultaten bleek dat de numerieke modellen de K_d -waarde voor meetpunt G14_{alg} van het fysisch model steeds opvallend veel onderschatten voor golfrichting NNW, grootteorde 0.15 (cf. Figuur 3-19). In eerste instantie werd de oorzaak gezocht bij een gevoeligheid van de meetlocatie ten gevolge van staande golfoscillaties. Uit Figuur 3-62 blijkt dat dit het grote verschil van 0.15 niet volledig kan verklaren: in een straal van 10m rond G14_{alg} verandert de K_d -waarde maar weinig.



Figuur 3-62: K_d -contourplot met uitvergroting naar meetpunt G14 voor onderzoek gevoeligheid van meetlocatie t.o.v. staande golfoscillaties.

Er werd onderzocht of het te laag afsnijden van de Halve Maan hier meer invloed op zou hebben. De hypothese is namelijk dat dit onvoldoende refractie op de Halve Maan veroorzaakt, waardoor de reflectiehoek vanaf de Halve Maan te veel afwijkt van deze in het fysisch model.



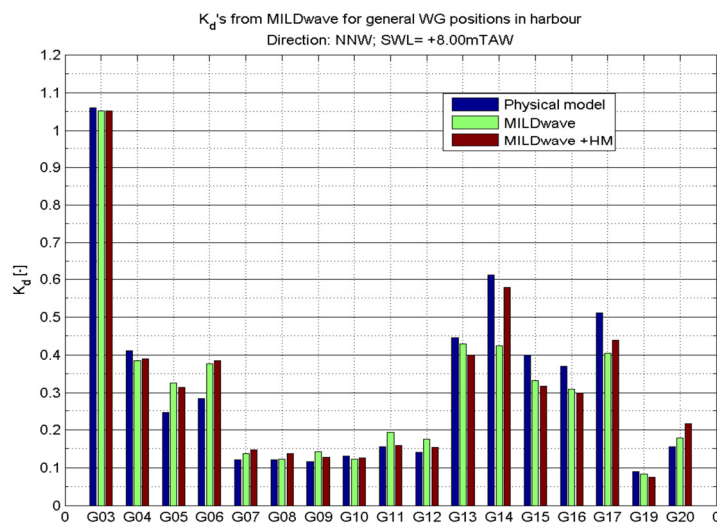
Figuur 3-63: Schematische voorstelling van een dwarsdoorsnede van de helling van de Halve Maan.
 Boven: originele situatie met minimale waterdiepte 4.0m;
 Onder: nieuwe situatie met extensie van helling met minimale waterdiepte 0.5m.

De helling van de Halve Maan werd namelijk afgesneden zodat een minimale waterdiepte van 4.0m werd aangehouden. Dit was noodzakelijk om numerieke stabiliteit te verzekeren in Mike 21 BW. MILDwave heeft deze beperking echter niet, zodat met dit model ook eens een kleinere minimale waterdiepte (0.5m i.p.v. 4.0m) werd aangenomen zoals geschematiseerd is in Figuur 3-63. De hydrodynamische randvoorwaarden uit Tabel 3-15 zijn daarbij toegepast.

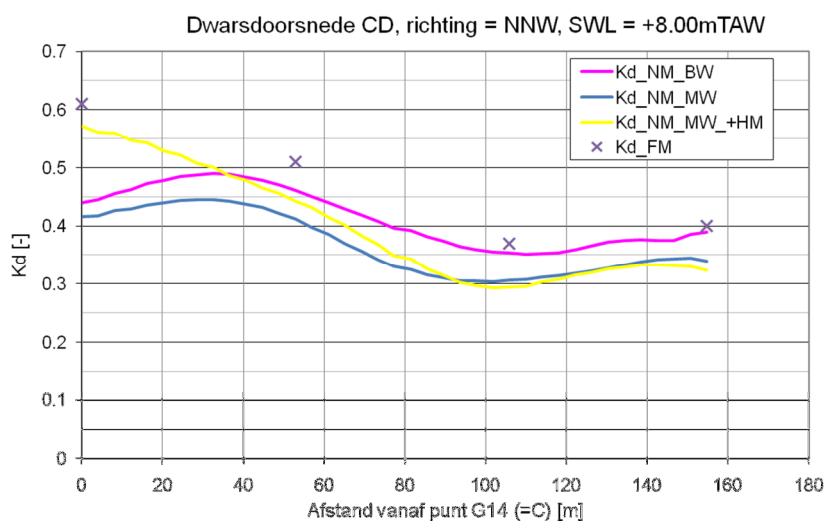
Tabel 3-15: Hydrodynamische randvoorwaarden en golfindringingsmodel waarvoor de gevoeligheidsanalyse "Kort- en langkruinig" werd uitgevoerd

SWL [mTAW]	d_{max} [m]	H_{m0} [m]	T_p [s]	Richting NNW	Richting -37°N	Richting NW	MILDwave	Mike 21 BW
8.00	16.9	5.0	12.0	X			X	

Uit Figuur 3-64 en Figuur 3-65 blijkt dat deze maatregel inderdaad een zeer positief effect heeft op het numeriek resultaat tegenover het fysisch model respectievelijk te $G14_{alg}$ en in de dwarsdoorsnede CD. Het verschil tussen numeriek en fysisch model te $G14_{alg}$ heeft nu dezelfde grootteorde als de andere meetlocaties.

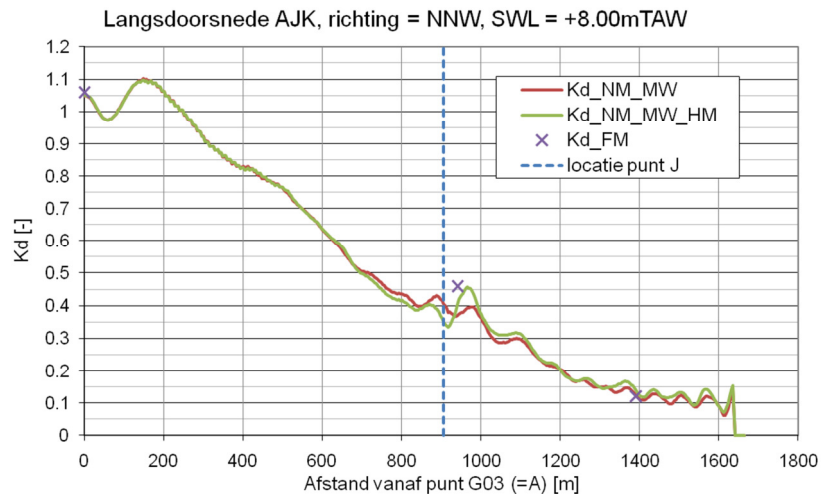


Figuur 3-64: K_d-waarden voor de algemene locaties. Vergelijking van de resultaten van het fysisch model, het MILDwave model en het MILDwave model met hogere afsnijding van de helling aan de Halve Maan.

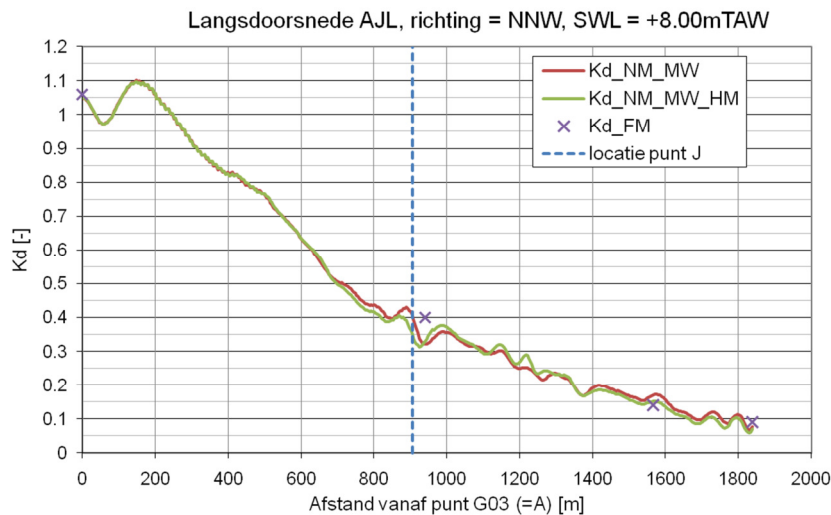


Figuur 3-65: Evolutie van K_d-waarde volgens dwarsdoorsnede CD.

De verbetering is ook waar te nemen in de langsgdoorsneden AJK (cf. Figuur 3-66) en AJL (cf. Figuur 3-67). De waarde van het meetpunt van het fysisch model dat aangeduid staat dichtbij punt J in deze grafieken, is een schatting gebaseerd op de locatie – t.o.v. $G16_{alg}$ en $G17_{alg}$ – van het snijpunt van de beschouwde langsgdoorsnede en dwarsdoorsnede CD. De langsgdoorsnede AJK benadert dit punt nu veel beter dan voordien. In de langsgdoorsnede AJL is ook een verbetering te zien, al is die wel kleiner.



Figuur 3-66: Evolutie van K_d -waarde volgens langsgdoorsnede AJK. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 900.



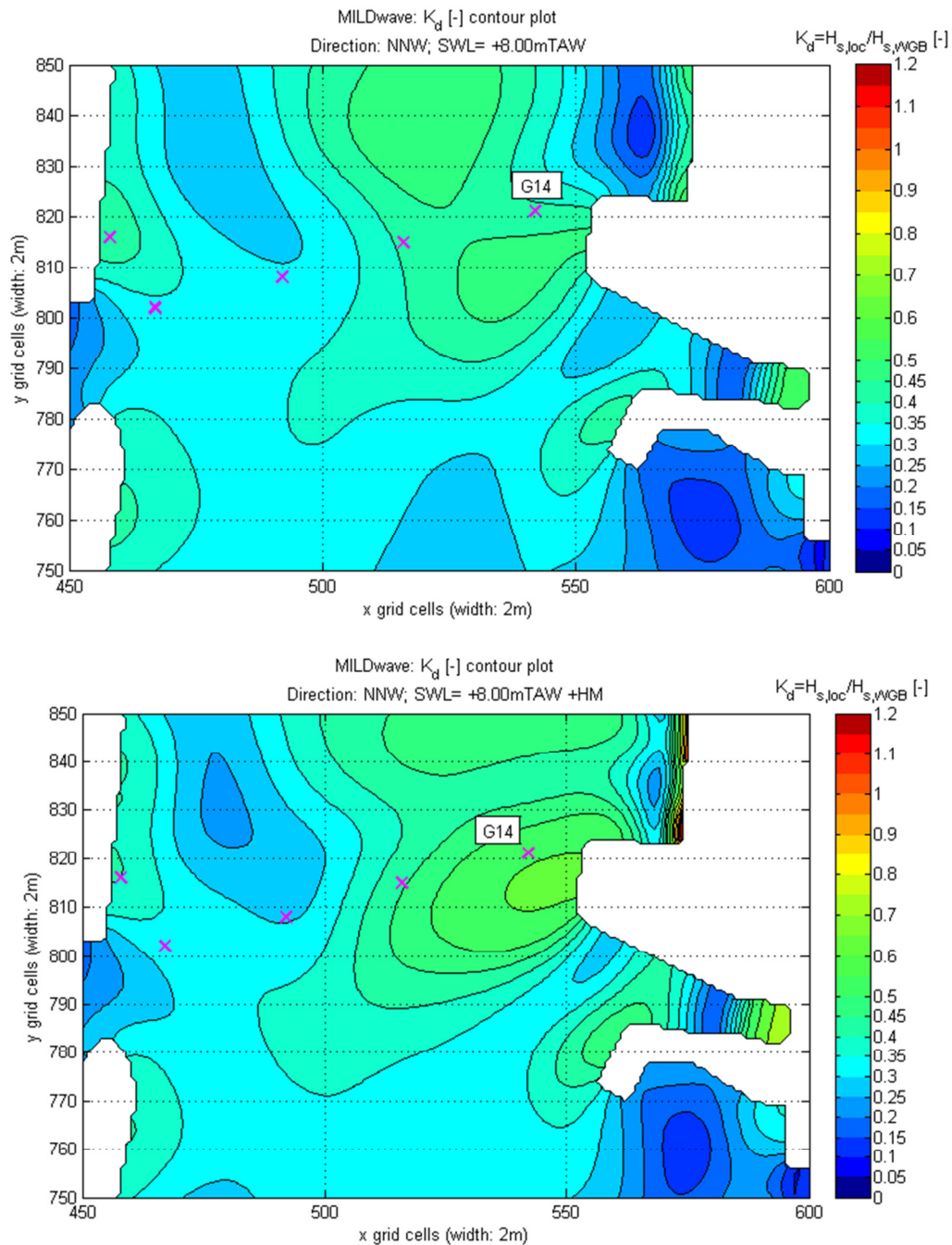
Figuur 3-67: Evolutie van K_d -waarde volgens langsgdoorsnede AJL. Binnenhaven start aan x-coördinaat van ongeveer 900.

Een minimale diepte van 0.5m hanteren geeft echter onrealistisch hoge K_d -waarden op de Halve Maan zelf. Deze onrealistisch hoge waarden treden op bij het naderen van het zeer ondiepe gedeelte met waterdiepte 0.5m op de Halve Maan (cf. Figuur 3-68). Dit wordt verklaard door de anomalie die het huidige golfbrekingsmodel van de commerciële versie van MILDwave bevat voor zeer ondiep water op steile hellingen (Gruwez, 2008). Mogelijke oplossingen zijn:

- De golfbrekingsmodule van MILDwave gebruiken waarin deze anomalie is weggewerkt⁷. De commerciële versie is echter beperkt tot de huidige golfbrekingsmodule;
- De golfbreking in het model uitschakelen en een minimale waterdiepte aanhouden van 2.0m (IMDC, 2011b). Alhoewel dit weer een minder goede overeenkomst bij G14 kan betekenen, omdat dan opnieuw te weinig refractie kan optreden.

⁷ Gruwez (2008) geeft een overzicht van alle geïmplementeerde golfbrekingsmodellen.

Deze onrealistische toename is zeer waarschijnlijk beperkt tot deze zeer ondiepe gedeelten en heeft klaarblijkelijk geen (nadelig) effect op de resultaten in het interessegebied.



Figuur 3-68: K_d -contourplot met uitvergroting naar meetpunt G14 voor onderzoek invloed van hoger afsnijden van de Halve Maan helling. Boven: afsnijding met minimale waterdiepte 4.0m, Onder: afsnijding met minimale waterdiepte 0.5m. Resultaten bekomen met MILDwave.

Ten slotte blijkt uit Figuur 3-68 dat het effect niet alleen belangrijk is bij $G14_{alg}$, maar ook de K_d -waarde aan de Visserijsluis is belangrijk toegenomen (ook grootteorde 0.15). Daarmee is waarschijnlijk ook het verschil tussen numeriek en fysisch model bij meetpunten $G19_{okh}$ en $G20_{okh}$ verklaard (cf. Figuur 3-20).

3.3.9 Conclusies

Volgende gevoeligheidsanalyses werden uitgevoerd in dit hoofdstuk:

1. Variatie van de breedte van de haveningang;
2. Zwakkere helling van de havengeul;
3. Gevoeligheid absorptiecoëfficiënten;
4. Transmissie over de havendammen;
5. Gevoeligheid golfperiode;
6. Effect van kortkruinige golven;
7. Effect van kleinere minimale diepte aan de Halve Maan.

Uit elk van deze gevoeligheidsanalyses (5 en 7 buiten beschouwing gelaten) is gebleken dat de aannames gemaakt bij het opstellen van de modellen (§3.1) weinig invloed hebben op de resultaten in de binnenhaven (interessegebied) en dus aanvaardbaar waren.

De golfperiode heeft wel een belangrijke invloed op sommige locaties in de haven: vooral langs de Churchillkaai (cf. $G04_{alg}$, $G05_{alg}$, $G06_{alg}$) en voor het kaavlak naast het Zeewezendok (cf. waar $G20_{alg}$ ligt). Met andere woorden daar waar bijna loodrechte golfval optreedt en de staande golfoscillaties duidelijk te onderscheiden zijn. Dit is een verwacht resultaat want de tussenafstand van de oscillaties hangt af van de golflengte en dus ook de golfperiode. De grootte van de oscillaties wijzigt ook voor een andere golfperiode. De sponslaag is niet periodeonafhankelijk, zodat voor een andere periode eigenlijk ook de absorptiecoëfficiënt gewijzigd zou moeten worden om dezelfde reflectiecoëfficiënt te behouden zoals ook bleek uit het 1DH-model.

Hoger afsnijden van de helling van de Halve Maan of met andere woorden de minimale waterdiepte verkleinen, zorgt voor het verdwijnen van het grote verschil tussen numeriek en fysisch model in de dwarsdoorsnede CD aan de C-Power kaai. Golfprocessen, waaronder vermoedelijk hoofdzakelijk de refractie, op de helling van de Halve Maan hebben dus een belangrijke invloed op de significante golfhoogte in dit gebied. Er is ook een belangrijke invloed aan de Visserijsluis waargenomen.

4 Lokale windgolven: fasegemiddelde golfmodellering

Voor de modellering van lokale golfgeneratie door wind is het fasegemiddelde golfmodel SWAN ingezet. In de nota in Bijlage 3 wordt aangetoond dat SWAN hiervoor geschikt is. In de nota in Bijlage 4 wordt het SWAN model uitgebreid met de achterhaven en worden de eindresultaten per kaaimuurzone gegeven.

5 Superpositie golfindringing en lokale windgolven

5.1 Inleiding

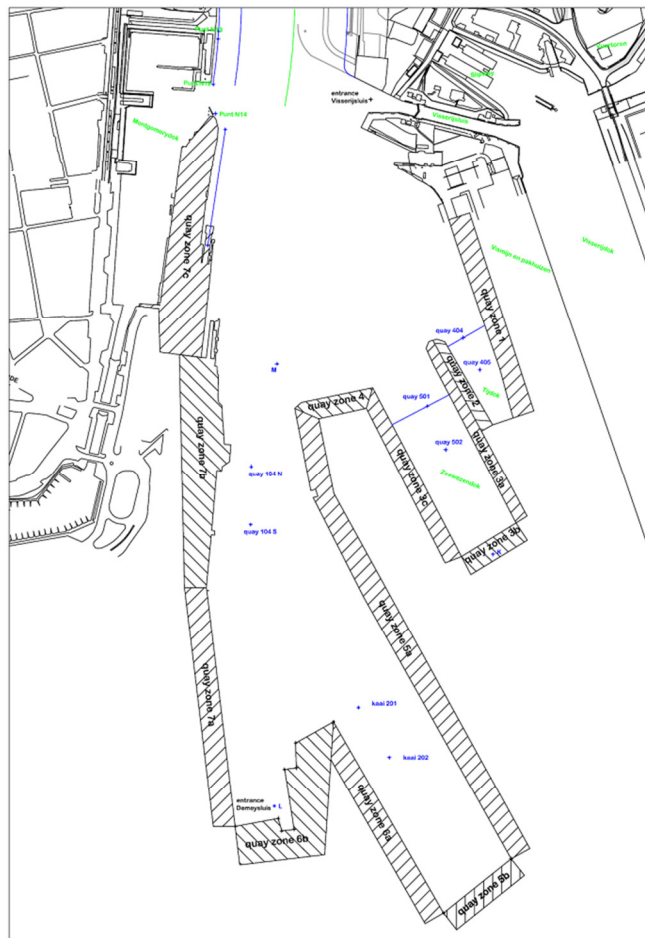
De modellering van de golfindringing en lokaal gegenereerde windgolven werd ontkoppeld omdat momenteel geen van de gekozen golfmodellen in staat is beide fenomenen tegelijkertijd te modelleren voor een haven. De resultaten van de twee groepen numerieke modellen worden in dit hoofdstuk samengebracht om het volledig extreem golfklimaat in de haven te bekomen.

Terug samenbrengen van de golfindringing en lokaal gegenereerde windgolven wordt uitgevoerd zoals voorgesteld door van der Meer et al. (2002), met name door een superpositie uit te voeren van de significante golfhoogtes op volgende wijze:

$$H_{m0} = \sqrt{H_{m0,1}^2 + H_{m0,2}^2}$$

Waarin H_{m0} de significante golfhoogte inclusief golfindringing en lokale windgolven
 $H_{m0,1}$ de significante golfhoogte van de golfindringingsmodellen MILDwave of Mike 21 BW
 $H_{m0,2}$ de lokaal gegenereerde significante golfhoogte door de extreme windsnelheid (SWAN)

Om een samenvatting en overzicht van alle resultaten te kunnen geven is de havenomtrek opgedeeld in kaaimuurzones naar analogie van de eerste opdeling van UGent (2010). Voor de binnenhaven is deze dezelfde gebleven (cf. Figuur 5-1). In de achterhaven zijn de zones gedefinieerd in Figuur 5-2. Voor het Montgomerydok is steeds de grootste waarde in het dok gegeven.



Figuur 5-1: Opdeling van de kaaimuren in zones zoals gedefinieerd door UGent (2010) voor de binnenhaven.



Figuur 5-2: Opdeling van de kaaimuren in zones voor de achterhaven. (Achtergrond van Google Earth)

5.2 Resultaten per zone

Om een idee te geven van het bereik van de significante golfhoogte in de haven, wordt per kaaimuurzone (cf. Figuur 5-1 en Figuur 5-2) de minimum en maximum significante golfhoogte bepaald (naar analogie van UGent (2010)). De significante golfhoogten worden gegeven van elk numeriek model afzonderlijk en daarnaast ook als superpositie van golfindringingsmodellen Mike 21 BW en MILDwave met de SWAN resultaten. Op die manier kan voor elke kaaimuurzone het aandeel van de golfindringing en lokale windgolven tot de totale golfhoogte geraadpleegd worden. Hierbij is steeds de superpositie gemaakt van de maxima en minima per kaaimuurzone. Dit geeft een conservatieve waarde voor het maximum, maar niet noodzakelijk voor het minimum, omdat de locaties van de maxima en minima langs elke kaaimuurzone voor golfindringing en lokale windgolven niet steeds samenvallen (mond. comm. Monbaliu, 2011).

De overzichtstabellen worden beperkt tot de resultaten voor waterstanden +7.20m TAW (cf. Tabel 5-1) en +8.00m TAW (cf. Tabel 5-2). De maximale waarde uit alle gemodelleerde golf- en windrichtingen per waterstand werd steeds weerhouden. De resultaten van de overige waterstanden kunnen afgeleid worden uit de contourplots op de bijgesloten CD voor de golfindringing en uit de tabellen in Bijlage 4 voor de lokale windgolven.

Voor de golfindringingsmodellen zijn de resultaten in hoofdstuk 3 steeds relatief beschouwd aan de hand van de golfindringingscoëfficiënt K_d . Deze wordt vermenigvuldigd met de waarde $H_{m0,inc}$ in Tabel 5-1 en Tabel 5-2 zodat de significante golfhoogten in de haven bekomen worden.

Tabel 5-1: Overzicht van de minimale en maximale significante golfhoogten langs elke zone in de haven. Per golfmodel en superpositie van Mike 21 BW en MILDwave. Voor SWL = +7.20m TAW.

T1000	SWAN		Mike		Mike & SWAN		MILDwave		MILDwave & SWAN	
richting			alle richtingen				alle richtingen			
terugkeerperiode [jaar]	1000		1000				1000			
waterstand [m TAW]	7.2 & 7.05		7.2 & 7.05				7.2 & 7.05			
Hm0,inc [m]	0.00		5.00				5.00			
Tp [s]	-		12.0				12.0			
	min	max								
gegenereerde T _{m-1,0} [s]	1.00	2.40								
Kaaimuur zone	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	0.50	0.75	0.75	1.50	0.90	1.68	0.50	1.75	0.71	1.90
2	0.70	0.73	0.75	1.25	1.03	1.45	0.50	1.25	0.86	1.45
3a	0.70	0.80	0.75	1.00	1.03	1.28	0.50	1.25	0.86	1.48
3b	0.73	0.75	0.75	1.00	1.05	1.25	0.50	1.00	0.88	1.25
3c	0.70	0.80	0.75	1.00	1.03	1.28	0.50	1.25	0.86	1.48
4	0.80	0.84	1.25	2.50	1.48	2.64	1.00	2.50	1.28	2.64
5a	0.50	0.70	0.25	1.25	0.56	1.43	0.25	1.50	0.56	1.66
5b	0.60	0.60	0.25	0.25	0.65	0.65	0.25	0.50	0.65	0.78
6a	0.60	0.65	0.25	0.50	0.65	0.82	0.25	0.75	0.65	0.99
6b	0.70	0.80	0.25	1.00	0.74	1.28	0.25	1.50	0.74	1.70
7a	0.60	0.78	0.50	1.00	0.78	1.27	0.50	1.50	0.78	1.69
7b	0.61	0.73	0.50	1.50	0.79	1.67	0.75	2.00	0.97	2.13
7c	0.45	0.73	1.75	2.75	1.81	2.85	1.25	3.25	1.33	3.33
U1	0.60	0.65	0.25	0.50	0.65	0.82	0.25	0.50	0.65	0.82
U2	0.70	0.80	0.25	0.50	0.74	0.94	0.25	0.50	0.74	0.94
U3	0.60	0.78	0.00	0.00	0.60	0.78	0.00	0.00	0.60	0.78
U4	0.61	0.73	0.00	0.00	0.61	0.73	0.00	0.00	0.61	0.73
U5	0.45	0.73	0.25	0.50	0.51	0.88	0.25	0.50	0.51	0.88
Visserijsluis	0.65	0.68	1.25	3.50	1.41	3.57	1.00	4.25	1.19	4.30
Demeysluis	0.72	0.72	0.25	0.50	0.76	0.88	0.25	0.75	0.76	1.04
Spuikom	0.50	0.63	0.25	0.50	0.56	0.80	0.25	0.50	0.56	0.80
Sas Slijkens	0.70	0.75	0.00	0.00	0.70	0.75	0.00	0.00	0.70	0.75
St.-M. stuw	0.63	0.63	0.00	0.00	0.63	0.63	0.00	0.00	0.63	0.63
NSYC	0.63	0.70	2.00	2.50	2.10	2.60	1.50	2.25	1.63	2.36
Halve Maan	0.67	0.70	1.75	2.75	1.87	2.84	1.25	3.00	1.42	3.08
Montgomerydok	0.30	0.53	0.25	1.50	0.39	1.59	0.10	1.25	0.32	1.36

Tabel 5-2: Overzicht van de minimale en maximale significante golfhoogten langs elke zone in de haven. Per golfmodel en superpositie van Mike 21 BW en MILDwave. Voor SWL = +8.00m TAW.

+8m TAW	SWAN		Mike		Mike & SWAN		MILDwave		MILDwave & SWAN	
richting			alle richtingen				alle richtingen			
terugkeerperiode [jaar]	-		-				-			
waterstand [m TAW]	8.00		8.00				8.00			
Hm0,inc [m]	0.00		5.70				5.70			
Tp [s]	-		12.0				12.0			
	min	max								
gegenereerde T _{m-1,0} [s]	1.50	2.80								
Kaaimuur zone	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	0.80	1.07	0.57	1.43	0.98	1.78	0.57	1.71	0.98	2.02
2	0.95	1.12	0.57	1.43	1.11	1.81	0.57	1.43	1.11	1.81
3a	0.90	1.20	0.57	1.43	1.07	1.86	0.57	1.43	1.07	1.86
3b	0.90	1.10	0.29	0.86	0.94	1.39	0.57	1.14	1.07	1.58
3c	0.95	1.10	0.57	1.43	1.11	1.80	0.57	1.43	1.11	1.80
4	1.10	1.25	1.14	2.85	1.58	3.11	0.86	2.57	1.39	2.85
5a	0.70	1.10	0.29	1.43	0.76	1.80	0.29	1.43	0.76	1.80
5b	0.80	0.80	0.29	0.29	0.85	0.85	0.29	0.29	0.85	0.85
6a	0.85	0.90	0.29	0.57	0.90	1.07	0.29	0.57	0.90	1.07
6b	1.05	1.15	0.29	0.86	1.09	1.43	0.29	1.43	1.09	1.83
7a	0.60	1.12	0.29	0.86	0.66	1.41	0.57	1.43	0.83	1.81
7b	0.90	1.04	0.57	1.71	1.07	2.00	0.86	2.00	1.24	2.25
7c	0.60	1.05	1.14	3.14	1.29	3.31	1.43	3.42	1.55	3.58
U1	0.45	0.87	0.29	0.29	0.53	0.92	0.29	0.29	0.53	0.92
U2	0.90	1.10	0.29	0.29	0.94	1.14	0.29	0.29	0.94	1.14
U3	0.75	1.06	0.00	0.00	0.75	1.06	0.00	0.00	0.75	1.06
U4	0.40	0.67	0.00	0.00	0.40	0.67	0.00	0.00	0.40	0.67
U5	0.95	1.07	0.29	0.29	0.99	1.11	0.29	0.29	0.99	1.11
Visserijsluis	0.77	0.85	1.14	3.71	1.38	3.80	1.14	4.56	1.38	4.64
Demeyssluis	1.00	1.05	0.29	0.29	1.04	1.09	0.29	0.57	1.04	1.19
Spuikom	0.70	0.90	0.29	0.29	0.76	0.94	0.29	0.29	0.76	0.94
Sas Slijkens	0.90	1.08	0.00	0.00	0.90	1.08	0.00	0.00	0.90	1.08
St.-M. stuw	0.68	0.68	0.00	0.00	0.68	0.68	0.00	0.00	0.68	0.68
NSYC	1.00	1.00	2.28	2.85	2.49	3.02	2.00	2.57	2.23	2.75
Halve Maan	1.00	1.00	1.71	3.42	1.98	3.56	1.43	3.42	1.74	3.56
Montgomerydok	0.38	0.77	0.29	1.43	0.48	1.62	0.29	1.43	0.48	1.62

Het wordt echter afgeraden de waarden uit Tabel 5-1 en Tabel 5-2 rechtstreeks toe te passen als randvoorwaarden voor ontwerp. Die waarden stellen immers steeds de totale significante golfhoogte voor of dus inclusief inkomende én gereflecteerde golfhoogte. Omdat ontwerpformules meestal gebaseerd zijn op de inkomende significante golfhoogte, kan dit in sommige gevallen een te grote overschatting betekenen. Vooral daar waar staande golfoscillaties optreden kan de overschatting zeer hoog zijn (e.g. voor 100% reflecterende muur en loodrechte inval zelfs factor 2 overschatting, cf Bijlage 2).

Daarom is het aangeraden om de randvoorwaarden rechtstreeks uit de K_d-contourplots op de bijgevoegde CD te halen aan de hand van een expert judgement om rekening te houden met reflectie en staande golfoscillaties (cf. Bijlage 2). Een reflectieanalyse uitvoeren om de inkomende golfhoogte te bepalen is op zijn minst zeer complex zo niet onmogelijk. De redenen zijn dezelfde als deze in §3.2.6 waarom methoden 1 en 2 niet toepasbaar zijn in de haven van Oostende voor het opstellen van directionele spectra.

6 Andere toepassingsmogelijkheden van de golfmodellen

6.1 Simulatie van een normaal golfklimaat

Onder normaal golfklimaat wordt verstaan golfcondities die regelmatig voorkomen of bijvoorbeeld een kleine storm met terugkeerperiode 1 jaar. Dit kan bijvoorbeeld interessant zijn voor de navigeerbaarheid van schepen die de haven binnenkomen of voor de bewegingen van een aangemeerd schip in de haven.

Een normaal golfklimaat houdt in dat de waterstand, de golfhoogte en de piekperiode (veel) lager zijn dan de condities in Tabel 3-1 tijdens een superstorm. Daardoor zullen de modellen ook aan deze situatie moeten aangepast worden. Aanpassingen zijn mogelijks noodzakelijk aan de rooster celgrootte, de tijdstap, de breedte van de haveningang, de bathymetrie, partiële reflectie, etc.

Ook kan het mogelijk interessant zijn het energiedissiperend effect van pontons die zich op een aantal plaatsen bevinden in de haven (bv. aan elk uiteinde van het Tijdok en Zeewezendok) te modelleren door introductie van extra sponslagen of door toepassing van een lagere reflectiecoëfficiënt.

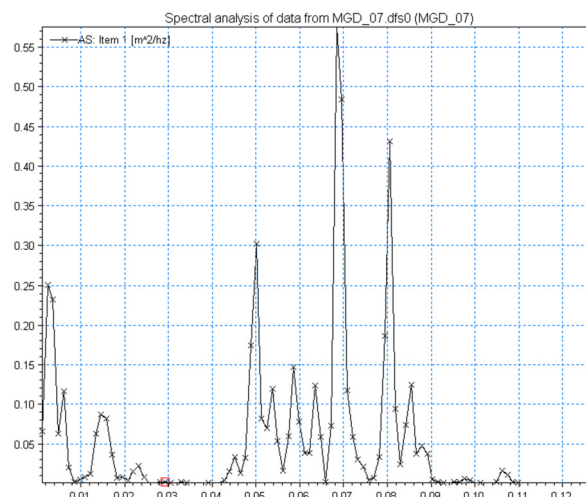
Lokaal gegenereerde golven in de haven zijn mogelijk verwaarloosbaar wegens de beperkte windsnelheid en strijklengten. Dit is eenvoudig te kwantificeren door in het SWAN model een windsnelheid op te leggen die voorkomt tijdens het “gewoon” golfklimaat.

6.2 Resonantie analyses en lange golfsimulaties

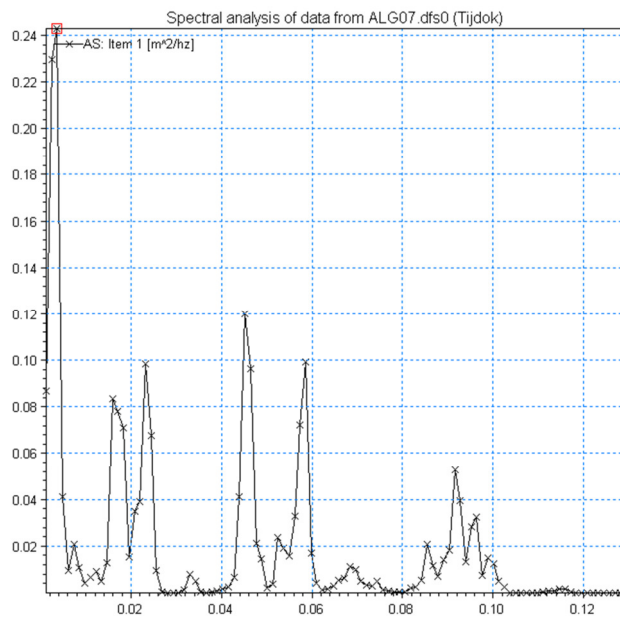
Wanneer de eigenfrequentie van de haven geëxciteerd wordt, treedt resonantie op. De eigenfrequentie is afhankelijk van de geometrie van de haven. Resonantiefrequenties kunnen ook geïdentificeerd worden door een simulatie uit te voeren met een zogenaamd “White Noise” spectrum (DHI, 2009), dat gekarakteriseerd wordt door gelijke energie op alle frequenties (Gierlevsen et al., 2001).

Door het opstellen van 1D spectra in de uitvoerpunten in de haven, kunnen de resonantiefrequenties in deze punten eenvoudig geïdentificeerd worden voor elke mogelijke geometrie. Een voorbeeld hiervan wordt geïllustreerd in Figuur 6-1 (Montgomerydok) en Figuur 6-2 (Tijdok).

Dergelijke resonantiefrequentieanalyse kan momenteel enkel op praktische wijze met Mike 21 BW uitgevoerd worden. Het zou echter ook mogelijk zijn met MILDwave, mits aanpassing van de huidige code zodat een eigen gedefinieerd spectrum opgelegd kan worden (mond. comm. Troch, 2011).



Figuur 6-1: 1D-spectrum te G07_{mgd} na simulatie met “White Noise” spectrum. X-as: f [Hz].
Figuur louter ter illustratie.



Figuur 6-2: 1D-spectrum te G10_{alg} na simulatie met “White Noise” spectrum. X-as: f [Hz].
Figuur louter ter illustratie.

Het “White Noise” spectrum is geen natuurlijk spectrum en dergelijke simulatie zegt dus enkel iets over de resonantiefrequenties van de haven. Het zegt niet of resonantie werkelijk zal optreden. Vooral wanneer resonantiefrequenties overeenkomen met lange golven ($T > 20s$ à $30s$) is dit moeilijk omdat lange golven pas optreden bij niet-lineaire golf-golfinteracties. Dit fysisch proces kan enkel door het niet-lineair model Mike 21 BW gemodelleerd worden. Er zou een model opgesteld moeten worden van een gebied buiten de haven dat ver genoeg zeewaarts reikt inclusief alle ondiepe gebieden, waar dergelijke interacties kunnen optreden. Enkel dan kan een goede inschatting bekomen worden van de lange golven die tijdens een superstorm buiten de haven gegenereerd kunnen worden.

Buiten de haven van Oostende zijn echter talrijke zandbanken aanwezig die voor veel ondiepte zorgen tijdens superstormen en waar dus telkens lange golven gegenereerd kunnen worden. Meer dan 10km zeewaarts van de haven treden dergelijke zandbanken op. Deze afstand zou voor een te groot rekengrid zorgen zodat dit praktisch niet haalbaar is met Mike 21 BW. Een Boussinesq golfmodel dat een hoge graad van parallelisatie toelaat (bv. pCOULWAVE, cf. Bijlage 1) zou hier beter geschikt voor zijn.

7 Algemene richtlijnen voor golfpenetratie modellering in havens

7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk dient als wegwijzer voor de golfindringingsmodelleringen die nog uitgevoerd moeten worden voor de andere havens aan de Belgische kust. Het is opgesteld op basis van de ervaringen die zijn opgedaan en lessen die geleerd zijn uit de modelleringen voor de haven van Oostende.

7.2 Bathymetrie en havengeometrie

Voor superstorm simulaties wordt de bathymetrie van de haven best opgesteld op basis van streefdiepteplannen, omdat voor dergelijke bathymetrie de meeste golfenergie in de haven wordt toegelaten.

Structuren met flauwe helling tot $1/3$ worden best opgenomen in de bathymetrie, zeker wanneer deze een belangrijke invloed uitoefenen op de golftransformaties in de haven (bv. refractie en reflectie op de Halve Maan in Oostende). Steilere hellingen (e.g. $1/2$, $1/1.5$, ...) zijn in principe niet toegelaten omdat de golfmodellen maar toepasbaar zijn tot helling $1/3$. Dit is echter wel mogelijk in MILDwave zonder numerieke instabiliteit. Het is eventueel te overwegen om de hellingen aan de havendamkoppen op te nemen in de bathymetrie zodat voor elke waterstand de juiste haveningangbreedte bekomen wordt zonder dit manueel te moeten aanpassen. In Mike 21 BW is dergelijke manuele aanpassing zeker nodig omdat steile hellingen niet opgenomen kunnen worden wegens numerieke instabiliteit.

Indien de havendammen een grote teenconstructie bevatten zodat deze niet meer verwaarloosd kunnen worden, dient deze opgenomen te worden in de bathymetrie.

Havendammen die zich grotendeels onder het stilwaterpeil bevinden, worden ook best geïntegreerd in de bathymetrie. Dit laat toe dat alle golftransformaties (e.g. refractie, shoaling, golfbreking, niet-lineaire golf-golfinteracties (enkel Mike 21 BW),...) die optreden bij propagatie over de havendammen gemodelleerd kunnen worden. Indien de doorsnede van dergelijke havendammen steilere hellingen bevat dan $1/3$, bestaat de kans voor numerieke instabiliteit en dient overwogen te worden om de een maximale helling van $1/3$ aan te houden.

Indien geen golfploop gemodelleerd wordt, dient steeds een minimale waterdiepte aangehouden te worden in de bathymetrie. De waarde van deze minimale waterdiepte is een afweging tussen numerieke stabiliteit en mate waarin bepaalde golftransformaties worden gemodelleerd. De minimale waterdiepte kan relatief klein gekozen worden in het MILDwave model, indien het resultaat in dergelijk gebied niet van belang is.

7.3 Hydrodynamische randvoorwaarden

7.3.1 Significante golfhoogte

De juiste significante golfhoogte gebruiken is vooral bepalend wanneer niet-lineaire processen belangrijk zijn. Een te grote significante golfhoogte kan echter soms tot numerieke instabiliteit zorgen in het Mike 21 BW model, vooral in ondiepere zones en waar convergentie van golfenergie optreedt. In dat geval dient overwogen te worden een lagere golfhoogte toe te passen.

7.3.2 Golfperiode

Het is belangrijk om een goede inschatting te maken van de golfperiode die buiten de haven kan optreden tijdens een superstorm. De golfperiode heeft namelijk een grote invloed op het diffractie- en reflectiepatroon in een haven.

7.3.3 Golfrichting

Onder de te modelleren golfrichtingen moet ook de golfrichting opgenomen worden waarvoor de meeste golfenergie de haven kan binnendringen. Voor sommige havens met een duidelijke vaargeul die leidt naar een binnenhaven (zoals Oostende en Blankenberge) kan dit hoogstwaarschijnlijk beperkt worden tot één richting. Voor grotere havens kan het zijn dat andere golfrichtingen nadeliger zijn voor verschillende gedeelten van de haven (bv. mogelijk Zeebrugge).

7.4 Fysische processen

7.4.1 Golfbreking

Inschakelen van golfbreking in Mike 21 BW vereist een kleinere roostercelgrootte en tijdstap, zodat de rekentijd substantieel toeneemt. Zolang golfbreking in de haven geen belangrijk effect kan hebben op de golfhoogte in het interessegebied, is het dus aangeraden deze module uitgeschakeld te laten. Ter hoogte van ondiepe gedeelten in de haven kunnen dan sponslagen ingevoerd worden om de energiedissipatie te modelleren.

7.4.2 Golfoploop

Golfoploop kan enkel door Mike 21 BW worden gemodelleerd. Deze wordt echter in de praktijk enkel ingeschakeld wanneer de golfoploop zelf van interesse is. Het is aangeraden deze module niet in te schakelen voor golfindringingsmodelleringen, omdat het gepaard gaat met extra numerieke instabiliteiten.

7.4.3 Transmissie

In eerste instantie dient geëvalueerd te worden of transmissie over een havendam werkelijk kan optreden voor de gegeven waterstand en golfcondities (e.g. op basis van fysisch model, formules uit literatuur, vergelijking van stilwaterpeil en kruin havendam,...).

Indien dit het geval is, stelt zich de vraag of de golftransmissie een belangrijke invloed heeft op het golfklimaat in de haven in vergelijking met de rechtstreekse golfpenetratie. Dit kan eenvoudig en snel geëvalueerd worden met MILDwave, door de structuur waarover transmissie kan optreden te vervangen door sponslagen met eenzelfde absorptiecoëfficiënt. De calibratie van de absorptiecoëfficiënt om tot een bepaalde transmissiecoëfficiënt te komen, kan gebeuren aan de hand van een 1DH-model met dezelfde sponslaagbreedte.

7.4.4 Bodemwrijving

Bodemwrijving is geen belangrijk energiedissiperend proces voor korte golven en korte propagatieafstanden in een haven. Indien het een zeer grote haven betreft met geen al te diep water en zeker wanneer lange golven worden gemodelleerd in de haven wordt bodemwrijving een belangrijk proces en dient het ingeschakeld te worden.

De invloed van bodemwrijving kan worden geëvalueerd met Mike 21 BW.

7.5 Numerieke stabiliteit

Mike 21 BW heeft een zeer gevoelige numerieke stabiliteit. Instabiliteit uit zich dikwijls als een blow-up (of negatieve waterdiepte) die de simulatie onderbreekt en stopzet. Een blow-up kan vermeden worden door:

- Het invoeren van een tijdsextrapolatie factor;
- Extra dissipatie toevoegen door een artificieel hoge bodemwrijving in te voeren in het gebied van de instabiliteit. Dit is meestal doeltreffend in een gebied waar de blow-up ontstaat door golfconvergentie;
- Een numerieke filter in te voeren in het gebied van de blow-up;
- Een sponslaag in te voeren in het gebied van de blow-up.

In MILDwave treden geen instabiliteiten op en de simulatie zal dus steeds vervolledigen (indien het

model juist is opgesteld natuurlijk). Wel dient gecontroleerd te worden of de resultaten realistisch zijn.

7.6 Partiële reflectie

De partiële reflectie wordt gemodelleerd door een ééncellige sponslaag. De absorptiecoëfficiënt overeenkomstig met een bepaalde reflectiecoëfficiënt dient te worden bepaald aan de hand van een 1DH-model en een reflectieanalyse. De absorptiecoëfficiënt μ is afhankelijk van:

- De tijdstap Δt ;
- De golfperiode T_p .

Voor een andere tijdstap en/of golfperiode moet de μ -waarde dus opnieuw bepaald worden met het 1DH-model om de reflectiecoëfficiënt te behouden in het 2DH-model.

8 Conclusies

Voor het ontwerp van structuren en het uitvoeren van overstromingsrisicoberekeningen zijn de hydrodynamische randvoorwaarden nodig langs alle structuren in de haven. Deze deelopdracht had als doel om deze randvoorwaarden te bekomen in de haven van Oostende tijdens een storm met terugkeerperiode 1000 jaar en tijdens de superstormen die werden gedefinieerd voor de risicoanalyse.

In eerste instantie werd gezocht naar een geschikt golfmodel dat de mogelijkheden heeft om de belangrijkste golfprocessen in een haven te modelleren. Uit deze zoektocht is gebleken dat geen (voldoende gevalideerd) golfmodel bestaat dat in staat is om zowel golfindringing als lokale generatie door wind voldoende nauwkeurig te modelleren. Daarom is besloten om deze twee oorsprongen van golfenergie van elkaar te ontkoppelen. Voor het modelleren van de golfindringing zijn de faseoplossende golfmodellen MILDwave (lineair MSE-model) en Mike 21 BW (niet-lineair Boussinesq golfmodel) gekozen. Voor de lokale golfgeneratie door wind werd het fasegemiddelde golfmodel SWAN gekozen.

Zowel het MILDwave als het Mike 21 BW model werd opgesteld volgens de regels van de kunst. Hierbij viel op dat verschillende numerieke dissipatie maatregelen ingevoerd moesten worden in het Mike 21 BW model om numerieke stabiliteit te bekomen tegenover geen enkele in MILDwave. Partiële reflectie werd in beide modellen gemodelleerd door een ééncellige sponslaag waarvan de absorptiecoëfficiënt werd gecalibreerd in een 1DH-model voor een bepaalde reflectiecoëfficiënt. De reflectiecoëfficiënten werden bekomen door calibratie met het fysisch model. Een goede overeenkomst van de golfindringingscoëfficiënt K_d werd waargenomen tussen beide numerieke modellen onderling en met het fysisch model in het interessegebied in de binnenhaven (inclusief in het Montgomerydok).

Volgende gevoeligheidsanalyses werden uitgevoerd ter controle van de resultaten:

1. Variatie van de breedte van de haveningang;
2. Zwakkere helling van de havengeul;
3. Gevoeligheid absorptiecoëfficiënten;
4. Transmissie over de havendammen;
5. Gevoeligheid golfperiode;
6. Effect van kortkruinige golven;
7. Effect van kleinere minimale diepte aan de Halve Maan.

De golfperiode heeft een belangrijke invloed op het K_d -verloop in de haven. De tussenafstand van de staande golfoscillaties hangt af van de golflengte en dus ook de golfperiode. Daarnaast is de sponslaag ook niet periodeonafhankelijk, zodat voor een andere periode eigenlijk ook de absorptiecoëfficiënt gewijzigd zou moeten worden om dezelfde reflectiecoëfficiënt te behouden.

Hoger afsnijden van de helling van de Halve Maan of met andere woorden de minimale waterdiepte verkleinen, zorgt voor het verdwijnen van het grote verschil tussen numeriek en fysisch model in de dwarsdoorsnede CD aan de C-Power kaai. Golfprocessen, waaronder vermoedelijk hoofdzakelijk de refractie, op de helling van de Halve Maan hebben dus een belangrijke invloed op de significante golfhoogte in dit gebied. Er is ook een belangrijke invloed aan de Visserijsluis waargenomen.

Uit elk van de andere gevoeligheidsanalyses is gebleken dat de overige aannames gemaakt bij het opstellen van de modellen weinig invloed hebben op de resultaten in de binnenhaven (interessegebied) zodat ze dus aanvaardbaar waren.

Het werd aangetoond dat SWAN geschikt is om lokale golfgeneratie door wind te modelleren voor korte afstanden in een haven en extreme windsnelheden. Voor de modelleringen van de lokale windgolven werd ook de achterhaven in het model opgenomen omdat in dit deel van de haven dergelijke golven bepalend zijn, want:

- Weinig golfenergie van de golfpenetratie komt daar nog toe;
- De grootste strijklengtes zijn daar aanwezig.

Het eindresultaat werd gegeven aan de hand van minimale en maximale significante golfhoogten per kaaimuurzone. Dit zowel van de golfindringing en lokale windgolven afzonderlijk als gesuperponeerd met elkaar. Deze resultaten stellen de totale golfhoogte voor (inclusief inkomende en gereflecteerde golf) en dienen enkel als indicatie. Om de significante golfhoogte te bekomen als input voor bijvoorbeeld overslagberekeningen, is het aangeraden deze te bepalen aan de hand van een expert judgement van

de resultaten, meer bepaald uit de golfindringingsmodellen. Dit is noodzakelijk om rekening te houden met de grote invloed die reflectie kan hebben op de totale golfhoogte in een haven.

Ten slotte werd de inzetbaarheid van deze golfindringingsmodellen besproken voor twee andere toepassingen: de bepaling van het normaal golfklimaat en het uitvoeren van een resonantiefrequentieanalyse. Daarnaast werden ook algemene richtlijnen gegeven die nuttig kunnen zijn bij het opstellen van de golfindringingsmodellen voor de overige Belgische kusthavens op basis van de ervaring opgedaan voor Oostende.

9 Data bronnen

Afdeling Kust (2011). Plan met streefdieptes voor de jachthavens in de haven van Oostende. *oostende in wgs84 utm31.dwg*

IMDC (2008). Plan van contourlijnen Klein Strand na afslag (10-jarige + 1000-jarige storm).

Afdeling Maritieme Toegang (2011). Plan met streefdieptes voor de economische gedeelten van de haven van Oostende. *1M2B6MA00005200_final_for_distribution_v2000.dwg*

Afdeling Maritieme Toegang (2011). Plannen met geometrie en bathymetrie van buitenhaven van Oostende, inclusief dwarsdoorsneden nieuwe havendammen, Halve Maan en oude westelijke havendam. *planOHo20100212HavenVanOostende_OWplan_Ontwerpfase_Grondplan_Alternatief3.dwg & planOHo20100212HavenVanOostende_OWplan_Ontwerpfase_Sneden_Alternatief3.dwg*

Ministère de l'Agriculture, de l'Industrie et des Travaux Publics, Ponts et Chaussées (1888). Originele plannen van het westerstaketsel en oude westelijke havendam.

10 Referenties

- Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. (1999). "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation." J. Geoph. Research, Vol. 104, pp.7649-7666
- Brorsen M., Helm-Petersen J. (1998). "On the reflection of short-crested waves in numerical models"
- Brorsen M., (2000). "Reflection of short-crested waves from thin sponge layers in numerical models"
- Caspeele, R. (2006). "Generatie van onregelmatige lang- en kortkruinige golven in een numeriek model voor golfvoortplanting: implementatie, validatie en toepassing". Master thesis. Universiteit Gent.
- DHI (2009). "Mike 21 BW: Boussinesq Waves Module User Guide."
- DIWASP (2011), *a directional wave spectra toolbox for MATLAB®: User Manual*. Research Report WP-1601-DJ (V1.1), Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Gierlevsen, T.; Hebsgaard, M.; Kirkegaard, J. (2001). "Wave disturbance modelling in the port of Sines, Portugal – with special emphasis on long period oscillations". Paper for International Conference on Port and Maritime R&D and Technology, Singapore, 29-31 October 2001.
- Hassan, W.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2011a). "Extreme wave characteristics inside the harbour of Oostende: physical modelling with different storm directions (T2)." Versie 2_0. WL Rapporten, 627_05. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- Hassan, W.; Willems, M.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2011b). "Extreme wave characteristics inside the harbour of Oostende: different scenarios at the entrance of Montgomerydock." Versie 1_1. WL Rapporten, 627_05. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.
- IMDC (2011a). "11273 – golfklimaat havens: stuurgroepvergadering 3". Vergaderingverslag, I/VV/11273/11.233/ABO/, 13/07/2011.
- IMDC (2011b). "11273 – golfklimaat havens: stuurgroepvergadering 4". Vergaderingverslag, I/VV/11273/11.259/ABO/, 01/09/2011.
- Jensen M.S. (2004). "Breaking of waves over a Steep Bottom Slope". Doctoraatsthesis. Aalborg University.
- Klopman G. en van der Meer J. W (1999). "Random Wave Measurement in Front of Reflective Structures." Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.
- Madsen, P.A.; Murray R.; Sørensen, O.R. (1991). "A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristics." Coastal Engineering, Vol. 15, pp. 371-388.
- Madsen, P.A.; Sørensen, O.R. (1992). "A new form of the Boussinesq equations with improved dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry." Coastal Engineering, Vol. 18, pp. 183-204.
- Pos, J.D.; Kilner F.A. (1987). "Breakwater Gap Wave Diffraction: an Experimental and Numerical Study." J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng. 113, 1.
- Radder, A.C. and Dingemans, M.W. (1985). "Canonical equations for almost periodic, weakly nonlinear gravity waves." Wave Motion, Vol. 7, pp. 473-485.
- Technum, IMDC en Alkyon (2002). "Structureel herstel van de kusteverdediging te Oostende en verbetering van de haventoeegang naar de haven van Oostende: Hydrodynamische randvoorwaarden voor het ontwerp. Waterstanden en golfklimaat". 26-30070-200/SR002

Troch, P. (1998). "MILDwave – A numerical model for propagation and transformation of linear water waves." Intern rapport, AWW-UGent.

Thompson E.F., Chen H.S., Hadley L.L. (1996). "Validation of numerical model for wind waves and swell in harbors". JoWPCaOE

TU Delft (2010). "SWAN (Simulating WAVes Nearshore); a third generation wave model" Copyright © 1993-2011, Delft University of Technology.

UGent (2009a). "Design of Oostende Harbour: Numerical Simulation of Wave Propagation. Wave conditions in the inner port, final situation T2, 'Rechte dam met basisconcept SWB'" Rapport DBO107/90 (Concept), AWW-UGent.

UGent (2009b). "Design of Oostende Harbour: Numerical Simulation of Wave Propagation. Wave conditions at Zeeheldenplein – revision of DBO107/86 with annex <variante 2A'B>" Rapport DBO107/92 (Concept), AWW-UGent.

UGent (2010). "Design of Oostende Harbour: Numerical Simulation of Wave Propagation. Determination of disturbance coefficients k_d near quay walls using partitioning." Rapport DBO107/96, Annex to DBO107/90.

UGent (2011). "Overtopping Binnenhaven Oostende. Proeven Wandelaarkaai: Deel Overtopping. Schaal 1/20." Rapport OBO277/006 DRAFT.

van der Meer, J.W.; Langenberg, J.W.; Breteler, M.K.; Hurdle, D.P.; den Heijer, F. (2002). "Wave boundary conditions and overtopping in complex areas." Coastal Engineering, 2002, pp. 2092-2104

Verwaest, T.; Van Poucke, Ph.; Vanderkimpen, P.; Van der Biest, K.; Reyns, J.; Peeters, P.; Kellens W.; Vanneuville, W.; Mostaert, F. (2008). "Overstromingsrisico's aan de Vlaamse kust: Evaluatie van de zeewering. Deel 1: Methodologie." WL Rapporten, 718/2A. Waterbouwkundig Laboratorium & Universiteit Gent & Soresma-Haecon: Borgerhout, België.

Waterbouwkundig Laboratorium (2005). "Haven van Oostende – Verbeterde haventoeegang – Impact op de baggerwerken." WL Rapporten, 627/6. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout, België.

Bijlage 1: OVERZICHT EN KEUZE VAN GOLFMODELLEN



Nota

Datum: 06/12/10
Aan: Stuurgroep
Auteur: Vincent Gruwez
Document ref: I/NO/11273/10.301/VGR/ v4.0

Betreft: Overzicht golfmodellen + keuze

Inhoudstabel

1. INLEIDING.....	2
2. BELANGRIJKE FYSISCHE (GOLF)PROCESSEN IN ONZE KUSTHAVENS.....	3
2.1. INLEIDING	3
2.2. OOSTENDE.....	3
2.2.1. T0-situatie	3
2.2.2. T2-situatie	4
2.3. ZEEBRUGGE	4
2.4. NIEUWPOORT	4
2.5. BLANKENBERGE	4
2.6. OVERZICHT CRITERIA	5
3. OVERZICHT GOLFMODELLEN.....	6
3.1. INLEIDING	6
3.2. MSE GOLFMODELLEN	6
3.3. BOUSSINESQ GOLFMODELLEN	6
4. VERGELIJKING VAN DE SHORT LIST GOLFMODELLEN	8
4.1. INLEIDING	8
4.2. FYSISCHE PROCESSEN	8
4.3. REKENGEBIED EN RANDEN	10
4.4. PRE-/POSTPROCESSING	15
5. KEUZE GOLFMODEL(LEN).....	17
6. REFERENTIES.....	21

1. INLEIDING

Deze nota geeft een overzicht van de belangrijkste golfmodellen die er bestaan en maakt een onderlinge vergelijking op basis van de fysische processen, toepassingsmogelijkheden en pre-/postprocessing mogelijkheden. Deze vergelijking kadert vooral in het onderzoek naar golfindringing in een haven. De nadruk wordt gelegd op de fysische processen belangrijk in dergelijke complexe omgeving. Uiteindelijk wordt op basis van een eliminatieanalyse een keuze gemaakt van het golfmodel dat zal worden ingezet voor het bepalen van het extreme golfklimaat in de Belgische havens. Verder worden ook enkele artikels besproken die enkele van deze modellen toepassen op havens.

Twee grote families van golfmodellen kunnen worden onderscheiden: phase-resolving en phase-averaged modellen (Battjes, 1994). De eerste soort is meest geschikt voor snel veranderende golven over een afstand van een golflengte of minder. De fase-informatie wordt bijgehouden bij de propagatie van de golven en kan van belang zijn voor processen zoals diffractie en vorming van staande golven door reflectie. De tweede soort is meest geschikt voor traag variërende golven waarbij de fase gemiddelde lokale eigenschappen zeer traag veranderen over een golflengte.

De aandacht in deze nota gaat vooral naar de eerste groep golfmodellen, nl. de phase-resolving modellen. Deze worden geacht beter te zijn voor havens, zeker in geval diffractie een belangrijke rol speelt, maar sowieso door de aanwezigheid van staande golven door reflectie en de complexe inrichting. Van de tweede familie golfmodellen wordt SWAN (Simulating WAVes Nearshore (The SWAN team, 2008)) als referentie weerhouden en wordt meegenomen in het overzicht.

Het eerste hoofdstuk legt de criteria vast voor de keuze van het golfmodel. De belangrijkste fysische processen die het golfklimaat in de havens bepalen worden opgesomd. Het tweede hoofdstuk geeft het algemeen overzicht van de golfmodellen waarna direct een eerste eliminatie volgt op basis van het ontbreken van cruciale fysische processen voor modellering in havens. Het volgende hoofdstuk maakt een gedetailleerdere vergelijking van de overgebleven modellen. Er wordt dieper ingegaan op de (numerieke) mogelijkheden en beperkingen, pre-/postprocessing mogelijkheden,... . In het laatste hoofdstuk wordt een afweging gemaakt van alle voor- en nadelen en er volgt uiteindelijk een keuze van het golfmodel (of golfmodellen) dat verder gebruikt zal worden voor de bepaling van het extreme golfklimaat in de havens.

2. BELANGRIJKE FYSISCHE (GOLF)PROCESSEN IN ONZE KUSTHAVENS

2.1. Inleiding

Haven per haven worden de belangrijkste te verwachten fysische (golf)processen in kaart gebracht die een belangrijke invloed (kunnen) uitoefenen op de golven die de haven binnendringen. Na identificatie van de belangrijkste processen per haven wordt een overzicht gegeven van alle criteria waar het uiteindelijk gekozen model (zoveel mogelijk) moet aan voldoen. Deze inschatting gebeurt voornamelijk op een kwalitatieve wijze.

Om de gedachten te vestigen zijn in Figuur 2-1 de dominerende fysische (golf)processen per toepassinggebied gegeven volgens (Battjes, 1994). Het blijkt dat voor havens diffractie het belangrijkste proces is, gevolgd door diepte refractie/shoaling en triads.

Process	Oceans	Shelf seas	Nearshore	Harbours
diffraction			minor importance	dominant
depth refr./shoaling		significant	dominant	significant
current refraction		minor importance	significant	
quadruplets	dominant	dominant	minor importance	
triads			significant	minor importance
wind input	dominant	dominant	minor importance	
whitecapping	dominant	dominant	minor importance	
depth breaking		minor importance	dominant	
bottom friction		dominant	significant	



Figuur 2-1: kwalitatieve indicatie van belang van fysische processen per toepassinggebied (Battjes, 1994)

2.2. Oostende

2.2.1. T0-situatie

Dit is de configuratie met de originele havendammen. Tijdens een storm kan de combinatie van getijde en stormopzet ervoor zorgen dat de havendammen grotendeels of zelfs volledig onder water komen te zitten. In dat geval kunnen de havendammen opgenomen worden in de bathymetrie en benadert de dwarsdoorsnede daarvan een berm waarover de golven refracteren, shoalen, breken en propageren voorbij de berm (havendam). **Golfbreking** is in dit geval een dominant proces en ook niet-lineaire golf-golfinteracties. De **transmissie** over de havendam is dan grotendeels afhankelijk van de brekingsmodule die dan vrij robuust zal moeten zijn. Een alternatief is om de havendammen te vervangen door constructies (of spons-/porositeitslaag) met een bepaalde reflectie-, transmissie- en absorptiecoëfficiënt. De effecten van niet-lineaire golf-golfinteracties voorbij de havendam gaan in dat geval verloren.

Aangezien golven in ondiep water propageren en dus invloed ondervinden van de bodem, zijn **refractie** en **shoaling** basisprocessen die dienen gemodelleerd te worden.

Diffractie kan belangrijk zijn, bv. bij schuine golfaanval t.o.v. de havendammen, maar ook in de binnenhaven zijn een aantal diffractiepunten (bv. aan de Visserijsluis (mond. comm. Willems, 2010)).

De palen van de staketsels kunnen eventueel voor een dissipatie zorgen. Ook **energieverliezen door wrijving/poreuze constructies** langs een ingangskanaal van de haven kunnen een invloed hebben (Panchang, et al., 2008). Dit zou eventueel a.d.h.v. een absorptie module (bv. sponslaag) gesimuleerd kunnen worden.

De vele verschillende constructies langs de waterrand in de haven (dijken, kaaimuren, kaaimuren met palen,...) vereist een mogelijkheid om **(partiële) reflectie** te kunnen

simuleren. Ook staande golven t.g.v. reflectie zijn een belangrijk verschijnsel, vooral wanneer de in situ metingen en metingen in het fysisch model aan de kaaimuren vergeleken willen worden met de numerieke resultaten.

Lokale **windgroei** kan voor extreme windsnelheden een belangrijk aandeel van de totale golfenergie innemen in de binnenhaven (Gruwez, et al., 2010b).

Wanneer golven propageren van dieper naar ondieper water zorgen **niet-lineaire golf-golfinteracties** voor energietransfer naar lagere en hogere frequenties. De lagere frequenties zorgen voor infra-graviteit golven (lange golven $T = 30s$ à $600s$). Indien deze langere frequenties de resonantiefrequentie van de haven benaderen, ontstaan ongewenste oscillaties. Deze oscillaties van het wateroppervlak dienen gekend te zijn om mee in rekening te kunnen nemen voor de overslagberekeningen.

2.2.2. T2-situatie

Dezelfde processen gelden als voor de T0-configuratie behalve i.v.m. de havendammen. Deze zijn immers gedeeltelijk afgebroken en vervangen door stortsteengolfbrekers. De opening tussen de golfbrekers bedraagt ongeveer één golflengte; net voorbij deze ingang zal **diffRACTIE** een grote rol spelen. **Transmissie** over de golfbrekers kan ook een belangrijk deel uitmaken van de golfenergie voorbij de golfbrekers in geval van een 1000-jarige storm (Bolle, 2008).

2.3. Zeebrugge

DiffRACTIE zal ook in deze haven een grote rol spelen t.g.v. de bescherming door de golfbrekers. Transmissie over de golfbrekers kan ook bijdragen tot het extreme golfklimaat in de haven. De aanwezigheid van een (verdiepte) vaargeul aan de ingang van de haven maakt dat diepterefractie/-shoaling en niet-lineaire golf-golfinteracties ook hier een belangrijke rol kunnen spelen. De sterke dwarsstroming aan de haveningang kan een belangrijk effect hebben op de golven daar (**golf-stromingsinteracties**). Dit is de grootste kusthaven van de vier en daarom ook de haven waar lokale golfgroei door (extreme) wind het meest tot uiting zal komen.

2.4. Nieuwpoort

Dit is een haven met een lange havengeul geflankeerd door dijken en twee havendammen met staketsels. De havendammen liggen grotendeels onderwater (zeker bij hoogtij). Dezelfde processen i.v.m. de havendammen zoals besproken bij Oostende (cf. paragraaf 2.2) gelden ook in dit geval.

Door de lengte van deze haven kan windgroei ook hier een rol spelen in het extreme golfklimaat, vooral dieper in de haven.

De haven van Nieuwpoort is tevens de monding van de IJzer. Zeewaartse of inkomende (bv. door getij) stromingen kunnen een invloed hebben op de golven bij het binnendringen van de haven door **golf-strominginteracties**.

Breking op de stranden naast de havendammen kan in extreme omstandigheden belangrijk zijn. Vooral indien deze golven over de havendammen de havengeul kunnen bereiken.

Partiële reflectie aan de dijken langs de havengeul is ook belangrijk.

2.5. Blankenberge

Hier zijn dezelfde processen als bij Nieuwpoort belangrijk, golf-stromingsinteracties buiten beschouwing gelaten (getijstromingen grootteorde maximum $0.1m/s$ in havengeul (mond. comm. Verheyen, 2010)).

2.6. Overzicht criteria

De beoordeling in Figuur 2-1 betreft een algemene evaluatie maar bevestigt toch een deel van de geïdentificeerde fysische processen per haven (cf. voorgaande paragrafen).

Hieronder volgt de volledige lijst van belangrijke fysische processen. De dominante processen zijn:

- (Partiële) Reflectie/Transmissie en staande golven;
- Diffractie;

Processen met significante invloed zijn:

- Diepte refractie;
- Diepte shoaling;
- Windgroei;
- Golfbreking door dieptebeperking (indien bv. havendammen in bathymetrie opgenomen worden);

Voor bepaalde fysische processen is het moeilijker om op voorhand de invloed op de golven in de havens in te schatten:

- Dissipatie-effecten aan de randen van een haventoeegangskanaal;
- Golf-golfinteracties (triads);
- Dissipatie door bodemwrijving;
- Golf-stromingsinteracties (stromingsrefractie/-shoaling);

Indien het model volgende module(s) bevat zou dit een bijkomend argument kunnen betekenen voor de uiteindelijke keuze:

- Module voor resonantie door lange golven: frequentiescanner.

De dissipatie-effecten aan de randen van een haventoeegang treden vooral op bij randen met een stortsteenbekleding waarbij stroming langsheen het poreuze oppervlak voor de energiedissipatie zorgt (Panchang, 2008). Geen enkel van de beschouwde havens heeft stortsteen beklede randen, maar eerder vlakke dijken. Toch kan er enige dissipatie worden verwacht als gevolg van refractie en breking op de dijken. De mogelijkheid om een absorptie-coëfficiënt in te stellen voor dergelijke soort randen kan een oplossing bieden hiervoor.

De triads veroorzaken in ondiep water energietransfer in het golfspectrum naar hogere- (hoge frequenties) en lagere harmonieken (lage frequenties). SWAN bijvoorbeeld bevat enkel de energietransfer door triads naar hogere harmonieken en niet die naar de lagere frequenties (The SWAN team, 2008). Dit laatste proces is nochtans van belang om de lange golven aan de ingang van de haven in te kunnen schatten voor een bepaald offshore spectrum en belangrijk om onderzoek naar mogelijke resonantie uit te kunnen voeren.

Het belang van dissipatie door bodemwrijving hangt nauw samen met de wens om een nauwkeurige voorspelling te maken van de resonantieamplitude in de haven voor een bepaalde lange golf (Kostense, et al., 1988) (Demirbilek, et al., 1998). De invloed op korte golven zou verwaarloosbaar zijn.

Voor de golf-stromingsinteracties zou informatie moeten worden verzameld van de optredende stromingen aan of in elke haventoeegang. Zowel grootte als richting zijn van belang: indien de component van de stroming die evenwijdig is met de golfrichting een grote waarde heeft, zal dit een voelbaar effect hebben op de golven. Golf-stromingsinteracties zijn echter niet zo belangrijk voor extreme stormen.

Deze lijst van fysische processen bepaalt mede de criteria waar het golfmodel zal moeten aan voldoen. Het volgende hoofdstuk geeft een overzicht van alle beschikbare fase-resolving golfmodellen en hun mogelijkheden.

3. OVERZICHT GOLFMODELLEN

3.1. Inleiding

Dit hoofdstuk bevat het overzicht van alle beschikbare phase-resolving golfmodellen en een eerste eliminatie op basis van de criteria in paragraaf 2.6. Het golfmodel SWAN wordt opgenomen in deze vergelijking als representatie van de phase-averaged golfmodellen.

De familie van phase-resolving golfmodellen kan onderverdeeld worden in de Mild Slope Equation (MSE) golfmodellen en de Boussinesq golfmodellen (Battjes, 1994). De mild slope vergelijking in zijn volledige vorm is elliptisch, maar er bestaan ook parabolische en hyperbolische benaderingen van de MSE.

3.2. MSE golfmodellen

Mike 21 PMS (DHI) en REF/DIF (Kirby, 1986) zijn voorbeelden van parabolische MSE golfmodellen. De parabolische benadering verwaarloost de amplitudevariaties langs de golfstralen in vergelijking met die langs de golfkammen. Het voordeel van deze modellen is de snellere rekentijd. Deze modellen kunnen enkel toegepast worden indien back scatter t.g.v. van reflectie of belangrijke diffractie uitgesloten kan worden. Deze modellen worden dus a priori geschrappt voor toepassingen in havens.

De elliptische MSE golfmodellen worden het meest toegepast in de praktijk. Mike 21 EMS (DHI), CGWAVE (Aquaveo), PHAROS (Deltares) en Artemis (EDF-LNH) zijn allen commercieel beschikbare golfmodellen van dit type. Shoaling, refractie en diffractie (inclusief reflectie) van periodieke graviteitgolven zonder stromingen, zijn fysische processen die karakteristiek uit de elliptische lineaire mild slope vergelijking volgen. Deze fysische processen zijn dus inherent aan alle golfmodellen van deze soort. Ze onderscheiden zich van elkaar door al dan niet implementatie van talrijke andere belangrijke processen. Het verschil tussen deze modellen is verduidelijkt in het overzicht (cf. Appendix A.2).

Mike 21 EMS wordt geëlimineerd omdat het enkel in staat is monochromatische golven te genereren. Dit model kan dus alleen gebruikt worden voor kwalitatieve studies en resonantieanalyses. DHI zelf raadt echter aan hun Boussinesq model Mike 21 BW te gebruiken voor havenmodellering (comm. DHI, 2010).

MILDwave (UGent) is een hyperbolisch MSE golfmodel. Dergelijke benadering is qua modellering van fysische processen vergelijkbaar met de elliptische MSE (cf. Appendix A.2), maar is fundamenteel verschillend op vlak van de berekeningen in het rekengebied. Golven propageren in MILDwave in het tijdsdomein doorheen het rekengebied op vergelijkbare manier als in Boussinesq golfmodellen. Het verschil tussen deze aanpak en die van de elliptische MSE golfmodellen wordt verduidelijkt in Hoofdstuk 4.

CGWAVE, PHAROS, Artemis en MILDwave zijn de MSE golfmodellen die overblijven voor verdere analyse en vergelijking.

3.3. Boussinesq golfmodellen

Deze groep golfmodellen is vooral geschikt bij het optreden van niet-lineaire golfprocessen (golf-golfinteracties in ondiep water of triads, niet-lineair golfprofiel, niet-lineaire frequentie- of amplitude dispersie,...) en golf-stromingsinteracties. Ze vergen dan ook algemeen een grotere rekentijd dan de MSE modellen en hebben soms last van instabiliteiten zodat in dat geval geen convergentie naar een oplossing wordt bekomen (mondeling comm. Mercelis, 2010).

Drie commerciële programma's zijn Mike 21 BW (DHI), BOUSS-2D (Aquaveo) en TRITON (Deltares). De laatste is echter nog in ontwikkeling en wordt nog niet vrijgegeven door Deltares (comm. Deltares, 2010). Verder zijn er ook nog freeware Boussinesq golfmodellen zoals COULWAVE ontwikkeld door (Lynett, et al., 2008), FUNWAVE ontwikkeld door (Wei, et

1.1.

* Artemis is recent open source geworden en als freeware beschikbaar.

al., 1996). SimWave (CMS Consulting, Inc., 1999) is een commercieel afgeleide van FUNWAVE. COULWAVE en FUNWAVE hebben, net zoals BOUSS-2D, de mogelijkheid om naast de zwak niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen ook volledig niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen in te zetten. MIKE 21 BW heeft de basisvorm van de Boussinesq vergelijkingen en een uitgebreide (zwak niet-lineaire) vorm met diepwater termen (Madsen, et al., 1991)(Madsen, et al., 1992), maar geen volledig niet-lineaire vorm.

Mike 21 en BOUSS-2D zijn beide uitvoerig gevalideerd geweest, waaronder ook voor vele haventoeepassingen (DHI, 2009) (Nwogu, et al., 2001).

COULWAVE en FUNWAVE zijn als freeware beschikbaar, maar beide zijn nog in ontwikkeling-/onderzoeksfase (Lynett, et al., 2008) (Kirby, et al., 1998). Alhoewel ze reeds uitvoerig gevalideerd zijn voor open zee en open kust problemen, zijn ze nog niet voldoende getest voor golfvoortplanting en oscillaties in half omsloten gebieden (e.g. havens, baaien,...) (Lynett, 2010). Er zijn geen voorbeelden terug te vinden in de literatuur waarbij deze modellen ingezet zijn geweest voor golfindringing in een haven (uitzondering: analyse van resonantie in een Hawaïaanse haven met COULWAVE (Douyère, 2003)).

Een concrete beperking van COULWAVE en FUNWAVE is dat per rand van het model (N, O, Z of W rand) al dan niet een sponslaag opgelegd moet worden die dan geldt voor de volledige betreffende rand. Op die manier is geen individuele toewijzing van reflectie-/transmissiecoëfficiënten per constructie in de haven mogelijk, de betreffende rand is ofwel volledig reflecterend ofwel absorberend langs zijn volledige lengte. Voor een resonantieanalyse zoals in (Douyère, 2003) stelt dit echter geen probleem omdat voor zeer lange golven ($T > 30$ s) elke soort onovertopbare constructie (e.g. kaaimuur, dijk,... met voldoende vrijboord) volledig reflecterend ondersteld mag worden. Daarnaast is er ook onduidelijkheid of partiële reflectie mogelijk is in deze modellen. Er bestaat wel de mogelijkheid om sponslagen te definiëren, dus in theorie is partiële reflectie mogelijk door manipulatie van de absorptiecoëfficiënt, maar in de handleidingen van deze modellen worden echter geen (gevalideerde) aanwijzingen daartoe gegeven (Lynett, et al., 2008) (Kirby, et al., 1998).

In FUNWAVE ontbreekt bovendien de mogelijkheid om directionele spreiding van het spectrum te simuleren (cf. Appendix A.2) (Kirby, et al., 1998). Het bevat daarnaast geen pre-processing tool om een bathymetrie op basis van metingen op te stellen, de gebruiksvriendelijkheid is algemeen ook laag (mondelijke comm. Mercelis, 2010). FUNWAVE wordt daarom verder niet meer beschouwd. COULWAVE daarentegen wordt toch verder beschouwd in de vergelijking als enig overblijvend freeware Boussinesq model. Alhoewel de beperking met betrekking tot de reflectie aan de randen duidelijk is, kan dit model toch interessant zijn voor de studie van de offshore generatie van lange golven door triads en resonantiestudies.

SimWave is het commerciële equivalent van FUNWAVE. Dit model is echter niet meer commercieel beschikbaar, maar wordt wel nog gebruikt door AWW-UGent (mondelijke comm. Troch, 2010) met ruim 10 jaar ervaring. SimWave is reeds uitvoerig ingezet geweest voor de haven van Oostende (Vanneste, et al., 2009). SimWave bevat enkele verbeteringen t.o.v. FUNWAVE: directionele spreiding is mogelijk in SimWave en SimWave bevat een gebruiksvriendelijke interface. De resultaten van dit model worden meegenomen in toekomstige vergelijkingen, maar het model zelf wordt hier verder niet meer overwogen omdat maar één sponslaag per volledige rand opgelegd kan worden. Het is namelijk wenselijk dat de rand van de beschouwde haven zo goed als mogelijk gemodelleerd wordt naar al zijn eigenschappen i.v.m. reflectie, transmissie en absorptie. Deze eigenschappen kunnen grondig wijzigen in een haven door de vele verschillende aanwezige constructies (golfbrekers, dijken, kades,...). Daarnaast vertoonde het SimWave model voor Oostende stabiliteitsproblemen wanneer een significante golfhoogte groter dan 1 m opgelegd werd. Het was dus niet mogelijk om de werkelijke golfhoogte op te leggen. Bovendien konden de resultaten dicht tegen de kaaimuren in de haven van Oostende niet worden weerhouden wegens onbetrouwbaar.

De short list wordt dan aangevuld met de Boussinesq modellen Mike 21 BW, BOUSS-2D en COULWAVE.

4. VERGELIJKING VAN DE SHORT LIST GOLFMODELLEN

4.1. Inleiding

De overgebleven golfmodellen (cf. Tabel 4-1) worden verder in detail onderzocht a.d.h.v. de belangrijkste fysische processen (cf. paragraaf 2.6), het rekengebied en de randen, vergelijkende studies in de literatuur, rekensnelheid, pre-/postprocessing mogelijkheden,...

Tabel 4-1: Short list keuze golfmodellen

Type model	Golfmodel
Elliptische MSE	CGWAVE
	PHAROS
	Artemis
Hyperbolische MSE	MILDwave
Boussinesq	Mike 21 BW
	BOUSS-2D
	COULWAVE

De elliptische MSE golfmodellen convergeren naar een steady state toestand in alle punten van hun rekengebied. In het hyperbolische MSE model MILDwave worden golven beschouwd in het tijdsdomein zodat in elk punt van het rekengebied een tijdreeks van verheffingen kan worden bekomen. Dit is een gelijkaardige aanpak zoals in de Boussinesq golfmodellen, vandaar dat in wat volgt het MSE model MILDwave op dat vlak meer aansluiting zal vinden met de Boussinesq modellen (Schäffer, et al., 2006).

4.2. Fysische processen

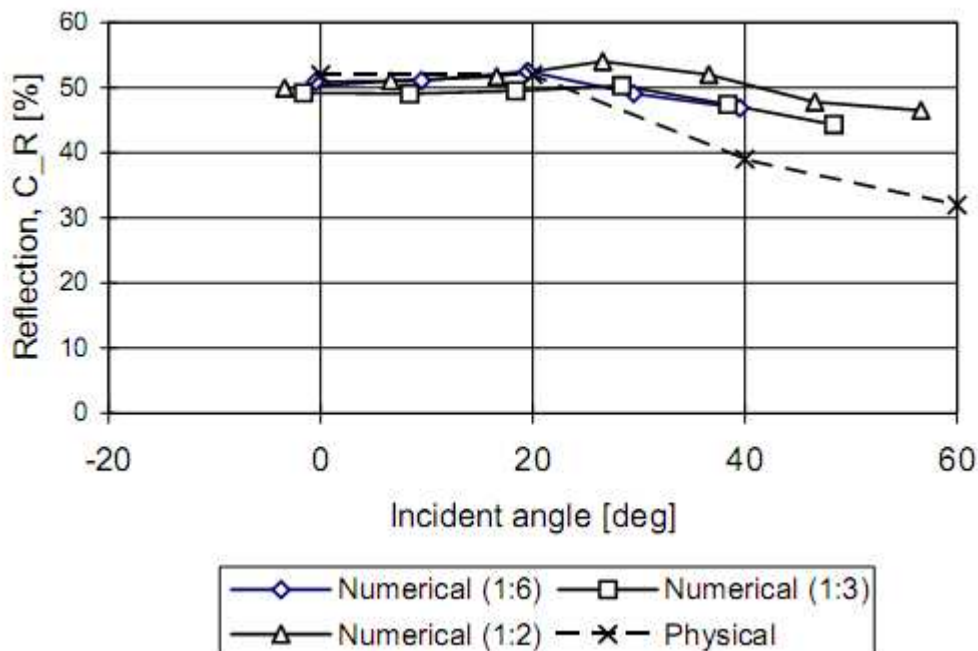
In Appendix A.2 is de tabel gegeven met aanduiding van elk fysisch proces dat een bepaald golfmodel in staat is te modelleren. Wanneer deze tabel gefilterd wordt volgens de criteria uit paragraaf 2.6 wordt Tabel 4-2 bekomen. Per fysisch proces is ook beoordeeld in welke mate het golfmodel presteert relatief ten opzichte van elkaar. Dit is zo goed als mogelijk ingeschat op basis van handleidingen en artikels van elk model bij gebrek aan relevante vergelijkingen tussen modellen in de literatuur.

Tabel 4-2: Short listed golfmodellen getoetst aan de criteria uit paragraaf 2.6

	MSE				Boussinesq			Spectraal SWAN
	CGWAVE	PHAROS	Artemis	MILDwave	Mike 21 BW	BOUSS-2D	COULWAVE	
Proces								
Reflectie	+	+	+	++	++	++	+/-	-
Transmissie	--	+	--	+	+	+	+/-	+
Diffractie	++	++	++	++	++	++	++	+/-
Diepte refr./shoaling	++	++	++	++	++	++	++	++
Triads	--	--	--	--	+	++	++	++/--
Windgroei	--	--	--	+	--	--	--	++
Golf-stromingsinteracties	--	+	--	--	+/-	++/-	++/--	+
Diepte golfbreking	++	++	++	++	++	++	++	++
Bodemwrijving	++	++	++	--	++	++	++	++
Randen								
gesloten	+/-	+	+	++	++	++	+/-	+
open	++	+/-	+/-	+	+	+	+	+
Module								
Resonantie scanner	manueel	X	X	manueel	X	manueel	manueel	N/A
		dominant proces voor haventoeepassingen						
		significant/matig proces voor haventoeepassingen						
	++	zeer goed						
	+	goed						
	+(+)/(-)	(zeer) goed in bepaalde gevallen/slecht (onmogelijk) in andere						
	-	beperkt						
	--	niet geïmplementeerd						

Reflectie van golven tegen structuren (kaaimuur, dijk, golfbreker,...) is één van de belangrijkste processen die in een haven optreden. Staande golven zijn een belangrijk gevolg daarvan die het golfmodel moet kunnen simuleren. Enkel de phase resolving modellen zijn hiertoe in staat. Een aantal golfengtes weg van de constructie houdt SWAN (een phase averaged model) wel nauwkeurig rekening met reflectie in geval van onregelmatige golven, maar niet dicht tegen de constructie waar staande golven voor oscillaties in het significante golfhoogte verloop zorgen (Klopman, et al., 1999). Zowel de MSE als de Boussinesq golfmodellen kunnen deze oscillaties dus wel modelleren dankzij de fase informatie. De mindere beoordeling voor de elliptische MSE modellen (cf. + in Tabel 4-2) t.o.v. de Boussinesq modellen en MILDwave is een gevolg van de manier waarop reflecterende constructies worden behandeld. De elliptische MSE modellen hebben moeite om in geval van schuin invallende golven de gereflecteerde hoek op een correcte manier te voorspellen (wordt dieper op ingegaan in paragraaf 4.3) i.t.t. de Boussinesq modellen en MILDwave.

Partiële reflectie is in alle modellen – op zijn minst theoretisch – mogelijk. De Boussinesq modellen en het hyperbolische MSE model MILDwave hebben daarbij een porositeits- (Mike 21 BW) of sponslaag (BOUSS-2D, COULWAVE, MILDwave) nodig die daarbij wel het rekengebied – en dus rekentijd – vergroten. Er bestaan verbanden tussen de te hanteren porositeit- of absorptiecoëfficiënt en de gewenste reflectiecoëfficiënt voor de Boussinesq modellen Mike 21 BW (DHI, 2009) en BOUSS-2D (Nwogu, et al., 2001), maar niet voor COULWAVE. Voor het MSE model MILDwave bestaan deze verbanden ook (Beels, et al., 2010). COULWAVE heeft als grote nadeel dat sponslagen enkel per volledige rand van het rekengebied gedefinieerd kunnen worden en niet voor een gedeelte van een rand. Dit laatste is zeker noodzakelijk in geval van zeeingang/deining golfindringing in een haven met complexe inrichting waarbij verschillende reflectiecoëfficiënten gelden. Brorsen et al. (1998) hebben aangetoond dat – ook ondanks de discretisatie van de constructies die nodig is ten gevolge van het regelmatig rechthoekige rekengrid – voor schuin invallende golven (met directionele spreiding) deze techniek van sponslagen goed de wet van Snell (invallende hoek = gereflecteerde hoek) benadert. De evolutie van de reflectiecoëfficiënt voor een variërende invalshoek komt daarbij vrij goed overeen met fysisch model metingen of wordt overschat voor een stijgende inclinatiehoek (cf. Figuur 4-1).



Figuur 4-1: Reflectiecoëfficiënt voor verschillende hoeken tussen de invallende golf en de normale van een (gediscretiseerde) rand (Brorsen, et al., 1998).

Zowel in CGWAVE als Artemis kan geen transmissie van golfenergie voorbij een constructie gemodelleerd worden, maar wel in PHAROS. Een mogelijke benadering is dat het golfmodel met en zonder constructies waarover transmissie optreedt wordt gedraaid. Het verschil tussen deze resultaten wordt dan vermenigvuldigd met de transmissiecoëfficiënt en opnieuw

gecombineerd met het resultaat met constructies. Dit is echter enkel toepasbaar voor eenvoudige gevallen. Voor transmissie over kaaimuren is verlagen van de reflectiecoëff. een mogelijk alternatief (Bolle, 2008). De Boussinesq modellen Mike 21 BW en BOUSS-2D simuleren transmissie a.d.h.v. een porositeitslaag, MILDwave a.d.h.v. een sponslaag (comm. Troch, 2010).

Alle modellen zijn in staat diffractie, diepte refractie en -shoaling voldoende nauwkeurig te simuleren. Ook de belangrijkste dissipatieprocessen (diepte golfbreking en bodemwrijving) worden vrij goed benaderd. MILDwave heeft (nog) niet de mogelijkheid om rekening te houden met dissipatie door bodemwrijving (comm. Troch, 2010). Dit fysisch proces is belangrijk in geval van resonantiestudies (golfindringing van lange golven). De resonantieamplitude is zeer gevoelig voor bodemwrijvingseffecten (Kostense, et al., 1988). De extra dissipatieterm om rekening te houden met bodemwrijving kan echter zeer snel ingebouwd worden in MILDwave (comm. Troch, 2010).

Niet-lineaire golf-golfinteracties (triads) zijn enkel met de Boussinesq modellen te simuleren. Een niet-lineaire uitbreiding van het lineaire model CGWAVE is in ontwikkeling om triads mogelijk te maken. Deze uitbreiding zou echter rekenintensiever zijn dan het Boussinesq equivalent (Battjes, 1994). SWAN is enkel in staat ontstaan van hogere harmonieën te voorspellen, maar niet de lange golven met lagere frequenties die belangrijk zijn voor de resonantiestudies (The SWAN Team, 2010) (comm. Monbaliu, 2010).

Windgroei in de haven is in de meeste gevallen zeer beperkt onder normale omstandigheden door de beperkte strijklengte. Voor extreme windsnelheden echter, kan de windgroei wel een belangrijke component zijn in de haven (Gruwez, et al., 2010b). MILDwave is de enige van de short list phase resolving golfmodellen die rekening kan houden met windgroei (Baelus, et al., 2010) en dit volgens de methode van (Vogel, et al., 1988). De module bevindt zich nog in onderzoeksfase en wordt nog verder gevalideerd en uitgebreid (comm. Troch/Stratigaki, 2010). Het gebrek van windgroei in de andere phase resolving golfmodellen kan opgevangen worden door superpositie van de modelresultaten met SWAN-resultaten waarbij enkel wind wordt opgelegd. Deze methode is een waardig alternatief en SWAN is bovendien zeer geschikt om de windgroei in de haven te berekenen (Gruwez, et al., 2010b).

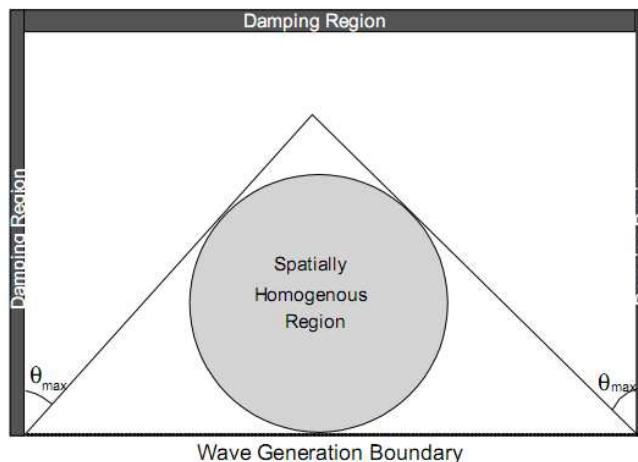
Onder de MSE modellen kan enkel PHAROS de golf-stromingsinteracties modelleren. De Boussinesq modellen kunnen dit ook, echter elk Boussinesq model in verschillende mate. Mike 21 BW is geschikt voor golf-stromingsinteracties op voorwaarde dat het Froude getal van de stroming ($Fr = u^c / \sqrt{gh}$ met u^c de stromingssnelheid, g de zwaartekrachtversnelling en h de waterdiepte) voldoende klein is (Chen, et al., 1998) (comm. DHI, 2010). Enkel BOUSS-2D en COULWAVE hebben de volledig niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen ter beschikking. Het zijn dan ook de enige modellen die golf-stromingsinteracties kunnen modelleren voor grotere Froude getallen. Voor COULWAVE bestaan echter nog geen instructies om een stromingsveld op te leggen. In BOUSS-2D is dit wel al functioneel maar nog niet voldoende gevalideerd in combinatie met de golfbrekingsmodule. Voorlopig overschat BOUSS-2D de golfhoogte voor een tegengestelde stroming, er zou te weinig golfbreking optreden in dit geval (Nwogu, et al., 2001).

4.3. Rekengebied en randen

Er bestaat een fundamenteel verschil tussen elliptische MSE en Boussinesq golfmodellen in de wijze hoe de numerieke simulatie in het rekengebied wordt uitgevoerd. In het geval van de Boussinesq modellen en hyperbolisch model MILDwave wordt golfenergie toegevoegd langs een golfgeneratielijns zodat golven propageren vanaf deze lijn van gridpunt tot gridpunt in het rekengebied. In elk gridpunt kan een tijdreeks van de verheffingen worden bekomen. Het rekengrid bestaat steeds uit rechthoekige cellen. De elliptische MSE modellen daarentegen convergeren naar een steady state toestand in alle punten van het rekengrid dat uit driehoekige elementen bestaat. De grootte van een elliptisch MSE rekendomein is beperkt wegens de matrixinversie die moet gebeuren om het stelsel vergelijkingen op te lossen (de matrixdimensies zijn evenredig met het aantal cellen).

Een gevolg is dat het voor de Boussinesq modellen en MILDwave volstaat het rekengrid voldoende groot te nemen en zo te positioneren dat in het interessegebied geen randeffecten merkbaar zijn (bv. in geval van multidirectionele golven, cf. Figuur 4-2). De uitgaande golfenergie moet daarbij wel geabsorbeerd worden door sponslagen.

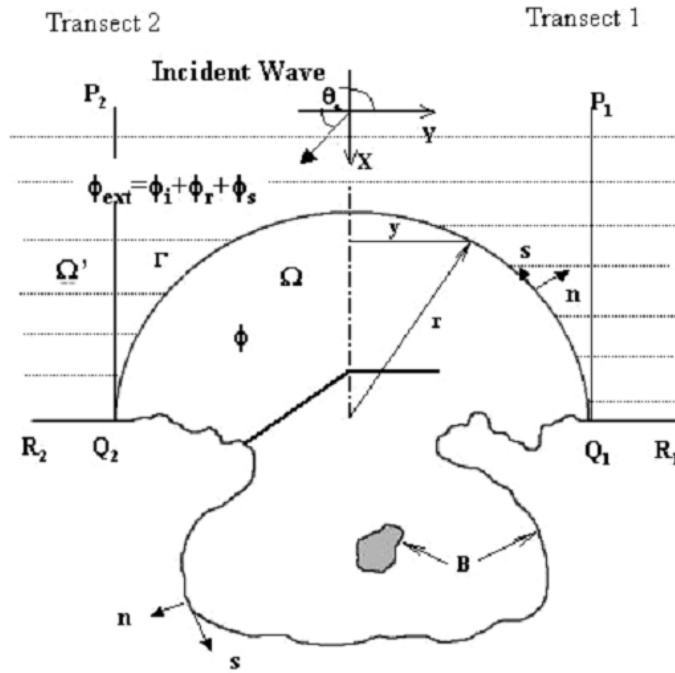
Onregelmatige golven en directionele spreiding gebeurt door superpositie van individuele regelmatige golfsimulaties in de elliptische MSE modellen. De Boussinesq modellen en MILDwave kunnen rechtstreeks een directioneel spectrum opleggen.



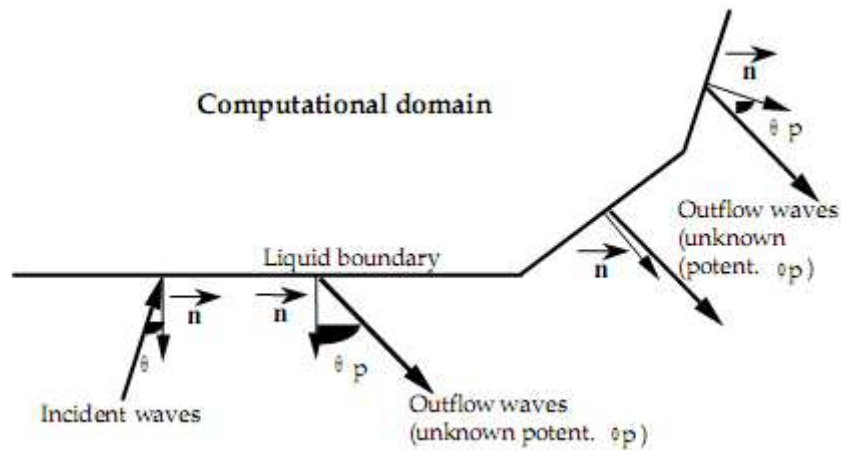
Figuur 4-2: Schema die de homogene regio toont in geval van multidirectionele golven

In het geval van de elliptische MSE modellen is het moeilijker om randeffecten uit het interessegebied te houden. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen open en gesloten randen:

- **Open randen:** deze laten golfenergie binnen en buiten. Voor de uitgaande golfenergie moet de hoek t.o.v. de rand gekend zijn om randeffecten te vermijden. Vooral voor simulatie van lange golven kunnen randeffecten van een open rand zich verspreiden in het interessegebied. Aan de open randen is het bij Artemis moeilijker om randeffecten te vermijden in vergelijking met CGWAVE. De gereflecteerde uitgaande energie is in een zeker interval rond de radiaal aan de half cirkel open rand toegelaten de open rand van CGWAVE te verlaten. De totale inkomende golfenergie wordt ook beter ingeschat door rekening te houden met de externe bathymetrie a.d.h.v. 1D doorsneden P1 en P2 en interpolatie langs de halve cirkel Γ (cf. Figuur 4-3) (Panchang, et al., 2000). In Artemis moet per open rand de hoek van uitgaande energie zo goed als mogelijk a priori ingeschat worden (cf. Figuur 4-4). Meestal zijn een aantal iteraties nodig (EDF-R&D, 2010).

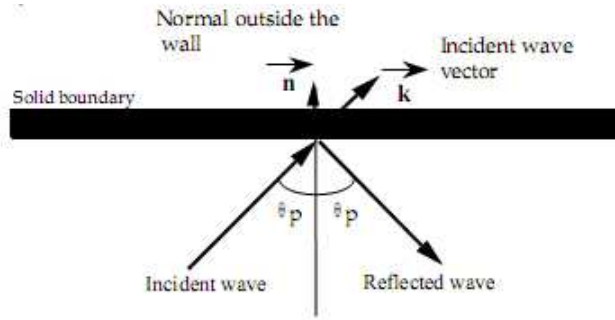


Figuur 4-3: Behandeling van de randen in CGWAVE (Briggs, et al., 2004)

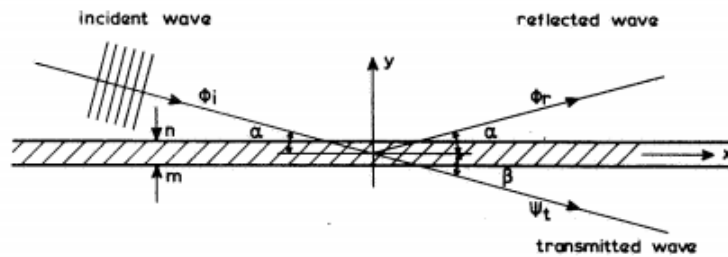


Figuur 4-4: Behandeling van de open randen in Artemis (EDF-R&D, 2010)

- Gesloten randen: deze laten geen golfenergie door maar absorberen of reflecteren met een bepaalde reflectiecoëfficiënt. In CGWAVE wordt per gesloten rand enkel een reflectiecoëfficiënt opgegeven en worden schuin invallende golven steeds loodrecht weg van de constructie gereflecteerd (Demirbilek, et al., 1998) (Panchang, et al., 2001). In Artemis kan wel de verwachte hoek tussen de normale (op de rand) en de inkomende golf opgegeven worden (cf. Figuur 4-5) zodat de gereflecteerde hoek in bepaalde gevallen beter wordt gesimuleerd. In PHAROS is ook transmissie over een rand mogelijk (cf. Figuur 4-6).

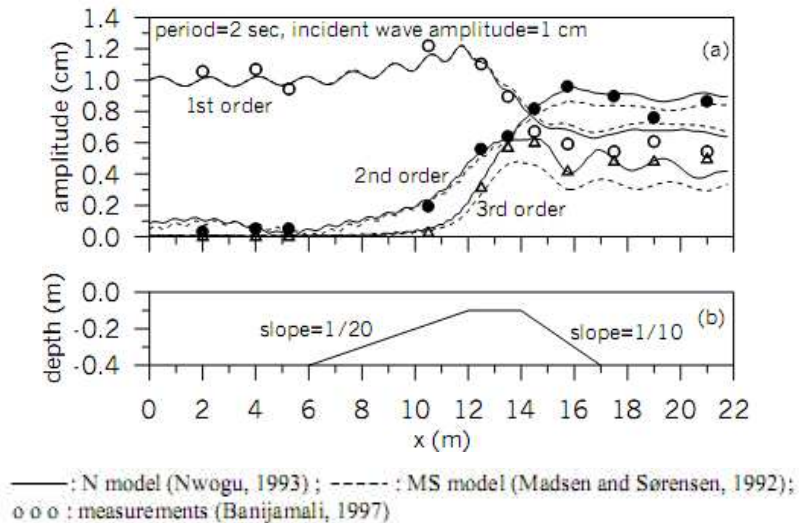


Figuur 4-5: Behandeling van de gesloten randen in Artemis (EDF-R&D, 2010)



Figuur 4-6: Behandeling van de gesloten randen in PHAROS (Kostense, et al., 1988)

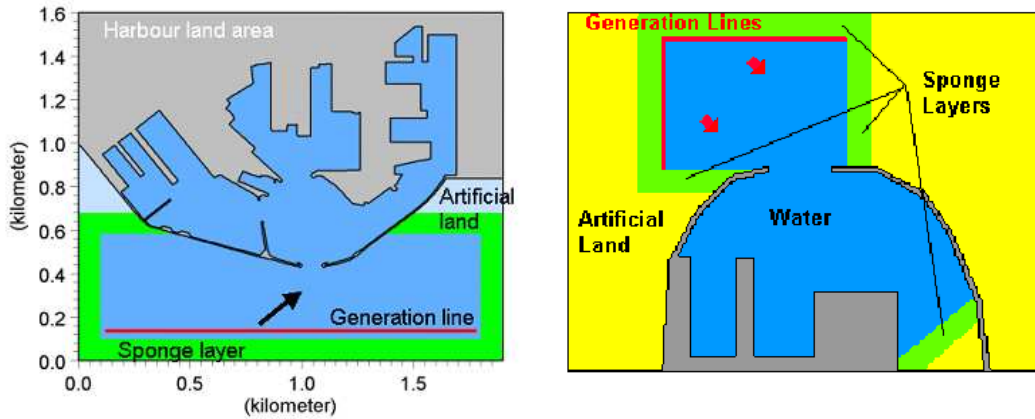
De Boussinesq golfmodellen Mike 21 BW en BOUSS-2D zijn elk gebaseerd op verschillende benaderingen van de Boussinesq vergelijkingen (resp. (Madsen, et al., 1992) en (Nwogu, 1993)). Mike 21 BW heeft zowel een basis als een uitgebreide versie van de Boussinesq vergelijkingen. De basis versie is beperkt tot $h/L_0 < 0.22$, de uitgebreide versie tot $h/L_0 < 0.5$ (=diep water limiet). BOUSS-2D en COULWAVE hebben zowel een zwak niet-lineaire vorm ($h/L_0 < 0.5$, bij voorkeur < 0.3), die vergelijkbaar is met de uitgebreide vorm van Mike 21 BW, en de volledig niet-lineaire vorm (toepasbaar tot $h/L_0 < 1.2$). De volledig niet-lineaire vorm is nauwkeuriger voor de asymmetrische vorm van golven, wave setup, golf gegenereerde stromingen en golf-stromingsinteracties en is aan te raden voor grote golfhoogtes in ondiep water met flauwe bodemhelling ($< 1/20$) (Lynett, et al., 2008). De generatie van harmonieken in de hogere frequenties wordt iets nauwkeuriger gesimuleerd door de zwak niet-lineaire vergelijkingen van BOUSS-2D dan die van Mike 21 BW, cf. Figuur 4-7 (Hsu, 2002).



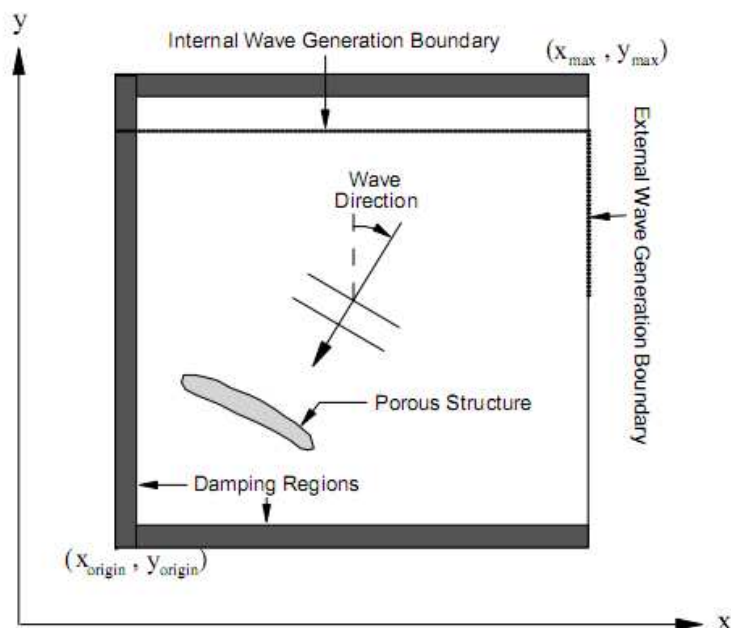
Figuur 4-7: Vergelijking van de harmonische amplitudes (Hsu, 2002)

Figuur 4-8 en Figuur 4-9 tonen hoe het rekengebied is opgedeeld voor respectievelijk Mike 21 BW en BOUSS-2D. Beide genereren golven aan een golfgeneratielijn die zowel intern (Mike 21 BW en BOUSS-2D) als extern (BOUSS-2D) kan zijn. Bij een interne generatielijn is het mogelijk om gereflecteerde golfenergie aan de hand van sponslagen (= dempinggebieden) op te vangen achter deze lijn om te voorkomen dat de golfenergie blijft toenemen in het rekendomein. Bij een externe generatielijn is dit niet mogelijk en kan dus enkel ingezet worden indien weinig of geen gereflecteerde golfenergie verwacht wordt.

In MILDwave geldt een gelijkaardige opstelling.

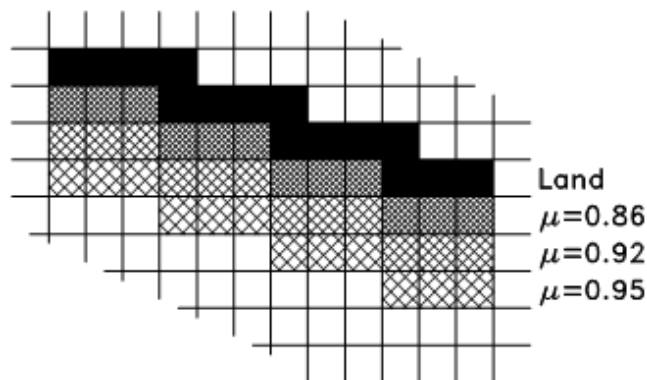


Figuur 4-8: Behandeling van de randen in Mike 21 BW (DHI, 2009)



Figuur 4-9: Behandeling van de randen in BOUSS-2D (Nwogu, et al., 2001)

Partiële reflectie wordt gesimuleerd door plaatsen van spons- of porositeitslagen voor de structuur. Een nadeel van rechthoekige cellen is dat een structuur die schuin georiënteerd is t.o.v. het rekengrid, gediscretiseerd moet worden (cf. Figuur 4-10). Dit is dus het geval voor beide Boussinesq modellen en MILDwave. Brorsen et al. (1998) toonde echter aan dat de gereflecteerde hoek toch voldoende nauwkeurig wordt gemodelleerd.



Figuur 4-10: Modellering van partiële reflectie aan een gesloten rand die schuin georiënteerd is t.o.v. het rekengrid (Brorsen, et al., 1998).

4.4. Pre-/postprocessing

De MSE modellen verschillen in hun post-processing mogelijkheden vooral in gebruiksvriendelijkheid dan in mogelijkheden. In Artemis zou alles iets omslachtiger zijn, maar geen mogelijkheden ontbreken. PHAROS zal binnen dit en een jaar een postprocessing tool ter beschikking krijgen om in een bepaald punt de inkomende en gereflecteerde golfcomponenten op te splitsen, zelfs in een complexe havenomgeving (cf. Tabel 4-3).

De Boussinesq modellen Mike 21 BW en BOUSS-2D bevatten postprocessing tools om tijdreeksen van de virtuele golfhoogtemeters te kunnen analyseren (cf. Tabel 4-3). Mike 21 Zero kan een directionele analyse doen, voor SMS is deze nog in ontwikkeling samen met een reflectieanalyse tool. Mike 21 heeft ook een handige pre-processing tool om de porositeitcoëfficiënt te berekenen op basis van een reflectiecoëfficiënt. In BOUSS-2D gebeurt dit handmatig op basis van een grafiek die enkel geldig is voor loodrechte golfval (Nwogu, et al., 2001). COULWAVE heeft geen noemenswaardige post-processing tools voor de analyse van tijdreeksen.

De rekentijd van MSE modellen (minuten) ligt vele malen lager dan die van de Boussinesq modellen (uren). Parallel processing is mogelijk met Artemis onder bepaalde voorwaarden (voorlopig enkel mogelijk indien commercieel Intel Fortran Compiler wordt gebruikt i.p.v. freeware gfortran compiler of freeware indien via Linux). Mike 21 BW zou een kleinere rekentijd kunnen hebben dan BOUSS-2D dankzij de parallel processing. Wanneer de volledig niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen gebruikt worden in COULWAVE zou de rekentijd stijgen met 25% tegenover de zwak niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen (Lynett, et al., 2008). In BOUSS-2D zou de stijging in rekentijd groter kunnen zijn omdat in dit model geen parallel processing mogelijk is in de commercieel beschikbare versie.

Tabel 4-3: Pre-postprocessing pakketten, tools en rekentijd per golfmodel.

	MSE				Boussinesq			Spectraal SWAN
	CGWAVE	PHAROS	Artemis	MILDwave	Mike 21 BW	BOUSS-2D	COULWAVE	
pre-/post pakket	SMS	Quickplot	Fudaa-Prepro + Matisse	in huis routines	Mike 21 Zero	SMS	Matlab routines	in huis Matlab routines
pre-processing tools								
mesh generator	X	X	X	X	X	X	X	X
randvoorwaarden	X	X	N/A*	X	X	X	X	X
ber. van porositeitscoëff. voor geg. refl./trans. coëff.	N/A	N/A	N/A	N/A*	X	N/A*	N/A*	N/A
post-processing tools								
figuurplotter resultaten	X	X	X	X	X	X	X	X
basis statistiek (max., min., gem., st. dev.)	N/A	N/A	N/A	X	N/A	X	N/A	N/A
zero-crossing analyse	N/A	N/A	N/A	X	X	X	N/A	N/A
spectrale analyse	N/A	N/A	N/A	X	X	X	N/A	N/A
directionele analyse	N/A	N/A	N/A	N/A	X**	N/A***	N/A	N/A
2D reflectie analyse	N/A	N/A***	N/A	N/A	N/A	N/A***	N/A	N/A
rekentijd								
grootteorde	minuten	minuten	minuten	minuten	uren	(veel) uren	(veel) uren	minuten
parallel processing	N/A	N/A***	X (ifc nodig)	N/A	X	N/A	X	X
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> (*) handmatig (**) enkel op plaatsen met weinig reflectie (***) in ontwikkeling </div>								

5. KEUZE GOLFMODEL(LEN)

Er wordt voorgesteld zowel een MSE als een Boussinesq golfmodel te gebruiken. Dit omwille van de volgende redenen:

- De rekentijd van een Boussinesq golfmodel (uren) is doorgaans groter in vergelijking met een MSE model (minuten), al is dit ook afhankelijk van de aard en het aantal processen die in rekening gebracht worden. Het Boussinesq model zal het meest nauwkeurige finale kwantitatieve resultaat opleveren (aangezien meer processen in rekening gebracht worden en dankzij de niet-lineariteit), maar het MSE model kan ingezet worden om in tussentijd (en veel sneller) resultaten te verkrijgen voor een eerste kwalitatieve analyse.
- Inzetten van beide soorten modellen voor deze studie heeft als bijkomend voordeel dat de resultaten zowel met de metingen (in alle havens) als met het fysisch model (voor Oostende) kunnen vergeleken worden, waardoor het toepassingsgebied per model kan afgebakend worden. Het zal de meerwaarde van een Boussinesq model al dan niet bevestigen per beschouwd probleem.

Boussinesq modellen bieden een meerwaarde voor specifieke problemen:

- Het zoeken naar de resonantiefrequenties is mogelijk met beide soorten golfmodellen. Indien echter de generatie van lange golven door triads voor een bepaald extreem spectrum opgelegd in diep(er) water mee beschouwd moet worden, is een Boussinesq model vereist. Dit is onder meer nodig om de amplitude van mogelijke resonantie in de haven zo correct mogelijk te simuleren.
- Een Boussinesq model heeft trouwens ook geen problemen met reflectiehoeken aan gesloten randen zoals dat bij de elliptische MSE modellen wel het geval kan zijn. Aangezien reflectie een belangrijk proces is in havens, is dit een belangrijk voordeel.

Uit de onderlinge vergelijking van de MSE modellen bleek dat:

- Over PHAROS is a priori (voor aankoop) de minste informatie beschikbaar. Dit model heeft ook de hoogste aankoopprijs (cf. Appendix A.1).
- De prijs van CGWAVE ligt een stuk lager terwijl de kenmerken en mogelijkheden vergelijkbaar zijn. Transmissie en golf-stromingsinteracties zijn de belangrijkste troeven die PHAROS over CGWAVE heeft. Deze processen kunnen echter even goed of zelfs beter gemodelleerd worden door een Boussinesq model.
- Artemis is recent als freeware vrijgegeven (cf. Appendix A.1). Dit model is qua fysische processen zeker vergelijkbaar met CGWAVE. Het verschil ligt vooral bij de pre-/postprocessing en de behandeling van de open en gesloten randen van het rekengebied. CGWAVE heeft de beste aanpak voor de open rand, eerder Artemis voor de gesloten randen. Artemis heeft mogelijk het potentieel om een even goed resultaat voor de open rand te verkrijgen als CGWAVE, maar dit zal zeker meer tijd in beslag nemen en waarschijnlijk ook een groter rekengebied. CGWAVE daarentegen zal aan de gesloten randen steeds van Artemis verschillen indien in Artemis een gereflecteerde hoek verschillend van de normale is opgegeven.
- MILDwave heeft het voordeel van de MSE modellen dat ze een snelle rekentijd hebben (zonder de beperking van het rekendomein van elliptische MSE modellen) en het voordeel van de Boussinesq modellen i.v.m. reflectie aan gesloten randen. Het is bovendien het enige phase resolving golfmodel dat ook met windgroei rekening kan houden (echter nog in ontwikkelingsfase). Dit is wel het enige model waarin (nog) geen dissipatie door bodemwrijving zit, maar is echter snel te implementeren. Dit proces is belangrijk bij modellering van lange golven. Voor de overige fysische (golf)processen is MILDwave evenwaardig aan de elliptische MSE modellen.

→ *Indien uitsluitend een MSE model zou ingezet worden biedt PHAROS de meeste mogelijkheden. Indien een MSE model gecombineerd wordt met een Boussinesq model komen ze alle vier in aanmerking.*

De vergelijking van de Boussinesq modellen toonde aan dat:

- Het verschil tussen Mike 21 BW en BOUSS-2D zeer beperkt is op vlak van de fysische processen (wanneer enkel de zwak niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen worden beschouwd). Beide modellen bieden de mogelijkheid alle relevante processen in rekening te brengen behalve windgroei.
- De zwak niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen waarop deze modellen steunen zijn verschillend. BOUSS-2D zou volgens de literatuur iets beter niet-lineaire golf-golfinteracties voorspellen. BOUSS-2D heeft bovendien de mogelijkheid om de volledig niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen in te zetten zodat het toepassingsgebied zich uitbreidt naar dieper water (e.g. betere triad simulaties), golven met grote amplitudes in ondiep water en golf-stromingsinteracties voor stromingen met een groter Froude getal (echter nog niet helemaal op punt).
- BOUSS-2D heeft als groot nadeel dat parallel processing niet mogelijk is wat zorgt voor zeer grote rekestijden, zeker in het geval dat volledig niet-lineair gerekend wordt.
- COULWAVE is freeware en heeft het voordeel dat de volledig niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen beschikbaar zijn. Door de beperkte mogelijkheden m.b.t. reflectie aan gesloten randen is dit model echter niet toepasbaar voor golfindringing in havens, met uitzondering van lange golven. Dit model zou wel interessant kunnen zijn voor de bepaling van de lange golven die ontstaan door triad interacties bij propagatie van dieper naar ondiep water. Indien bijvoorbeeld zou blijken dat de zwak niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen van Mike 21 BW hiervoor niet zouden volstaan, zou COULWAVE dit kunnen invullen.

→ *Zowel Mike 21 BW (evt. in combinatie met COULWAVE) als BOUSS-2D komen in aanmerking.*

Te overwogen combinaties van golfmodellen zijn:

1. PHAROS of Mike 21 BW (& COULWAVE) of BOUSS-2D

Indien één golfmodel gekozen zou worden, komt enkel PHAROS in aanmerking uit de MSE modellen dankzij de meeste mogelijkheden. Voor de prijs van dit model kan daarentegen evengoed een Boussinesq model worden aangekocht, zelfs in combinatie met een ander MSE model. Het ontbreken van niet-lineaire golf-golf interacties is een belangrijk gemis. De Boussinesq modellen op zich hebben het nadeel van de grote rekestijd.

2. CGWAVE & BOUSS-2D

Deze combinatie heeft als voordeel dat deze golfmodellen tot hetzelfde pakket behoren (nl. SMS) en dus gemeenschappelijke procedures kennen bij de pre-/postprocessing die tijdsbesparend kunnen zijn. Daarmee is ook de koppeling tussen BOUSS-2D en CGWAVE beschikbaar voor de lange golven.

3. Artemis & BOUSS-2D

Artemis is een waardig alternatief voor CGWAVE, bovendien freeware, schijnbaar wel iets minder gebruiksvriendelijk. Dit model is zelfs te verkiezen boven CGWAVE omwille van de mogelijkheid om een gereflecteerde hoek op te geven. De lagere gebruiksvriendelijkheid van Artemis en de handmatige aanpak van de open randen kost werkuren, maar met CGWAVE bestaat een karakteristieke beperking van de gesloten randen.

4. Artemis & Mike 21 BW (& COULWAVE)

Indien Artemis wordt gekozen als MSE model, is de keuze niet meer gebonden aan het SMS pakket. Daarom kan ook voor Mike 21 BW gekozen worden in combinatie met Artemis. Het voordeel van dit model in vergelijking met BOUSS-2D is de snellere rekestijd dankzij parallel processing. Mike 21 BW bevat ook enkele interessante pre-

en postprocessing tools die BOUSS-2D niet heeft. Bovendien bestaat er reeds ervaring binnen IMDC met dit model. Indien voor de bepaling van de lange golven door niet-lineaire golf-golfinteracties zou blijken dat Mike 21 BW ontoereikend is, kan altijd COULWAVE ingezet worden. COULWAVE heeft parallel processing i.t.t. BOUSS-2D.

5. MILDwave & Mike 21 BW (& COULWAVE)

Het hyperbolisch MSE model MILDwave biedt dezelfde fysische (golf)processen als de elliptische MSE modellen (na implementatie van dissipatie door bodemwrijving) en heeft daarenboven niet het nadeel van de ongekende reflectiehoek aan gesloten randen.

Conclusie

In het licht van voorgaande beschouwingen wordt aangeraden om de combinatie van het MSE model MILDwave (of Artemis) & het Boussinesq model Mike 21 BW te kiezen:

- De combinatie van een MSE en een Boussinesq model bieden een duidelijke meerwaarde voor deze studie.
- Het hyperbolisch MSE model MILDwave biedt dezelfde fysische (golf)processen als de elliptische MSE modellen (na implementatie van dissipatie door bodemwrijving) en heeft daarenboven niet het nadeel van de ongekende reflectiehoek aan gesloten randen en beperkte grootte van het rekendomein.
- Een elliptisch MSE model blijft echter een waardig alternatief. Het biedt een andere kijk dankzij een verschillende rekenmethodiek (convergentie naar steady-state i.p.v. golfpropagatie in het tijdsdomein). Er zijn geen sponslagen nodig en de gesloten rand kan de contour van de haven goed volgen zonder “trapvorming” dankzij de driehoekige cellen. Onder de elliptische MSE modellen wordt Artemis aanbevolen omdat het quasi dezelfde opties als CGWAVE biedt en bovendien freeware is.
- Mike 21 BW biedt naast alle opties van BOUSS-2D (behalve de volledig niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen) de mogelijkheid tot parallel processing en enkele interessante tools.
- Er is bij IMDC al enige ervaring met Mike 21 BW. Ook in het Waterbouwkundig Laboratorium is ervaring aanwezig met de algemene pre- en postprocessing modules van Mike.
- Er is ruim 10 jaar ervaring bij AWW-UGent met MILDwave (ontwikkeling en gebruik).
- Indien voor de bepaling van de lange golven door niet-lineaire golf-golfinteracties zou blijken dat Mike 21 BW ontoereikend is, kan altijd COULWAVE ingezet worden. COULWAVE heeft parallel processing, i.t.t. BOUSS-2D, wat bijna een vereiste is voor de hoge rekentijd gepaard met de volledig niet-lineaire Boussinesq vergelijkingen.
- MIKE 21 BW heeft een hoge aankoopprijs, maar DHI is bereid deze te laten zakken naar de grootteorde van BOUSS-2D indien kan worden aangetoond dat ze evenwaardig zijn (comm. DHI, 2010). Dit blijkt nagenoeg zo te zijn uit deze vergelijking. Het is bovendien toegelaten om tijdens een proefperiode van 6 maand Mike 21 BW uit te testen met een commerciële licentie[†] van IMDC (comm. DHI, 2010).

1.1.

[†] Enkel toegelaten op een IMDC-pc/server

Tabel 5-1: Overzicht + evaluatie golfmodellen

	MSE					Boussinesq			Spectraal SWAN
	CGWAVE	PHAROS	Artemis	MILDwave		Mike 21 BW	BOUSS-2D	COULWAVE	
Proces									
Reflectie	+	+	+	++		++	++	+/-	-
Transmissie	--	+	--	+		+	+	+/-	+
Diffactie	++	++	++	++		++	++	++	+/-
Diepte refr./shoaling	++	++	++	++		++	++	++	++
Triads	--	--	--	--		+	++	++	++/-
Windgroei	--	--	--	+		--	--	--	++
Golf-stromingsinteracties	--	+	--	--		+/-	++/-	++/-	+
Diepte golfbreking	++	++	++	++		++	++	++	++
Bodemwrijving	++	++	++	--		++	++	++	++
Randen									
gesloten	+/-	+	+	++		++	++	+/-	+
open	++	+/-	+/-	+		+	+	+	+
Module									
Resonantie scanner	manueel	X	X	manueel		X	manueel	manueel	N/A
		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <div style="background-color: #ff0000; color: white; padding: 2px;">dominant proces voor haventoeepassingen</div> <div style="background-color: #ff9900; color: white; padding: 2px;">significant/matig proces voor haventoeepassingen</div> <div style="padding: 2px;">++ zeer goed</div> <div style="padding: 2px;">+ goed</div> <div style="padding: 2px;">+(+)/- (zeer) goed in bepaalde gevallen/slecht (onmogelijk) in andere</div> <div style="padding: 2px;">- beperkt</div> <div style="padding: 2px;">-- niet geïmplementeerd</div> </div>							
pre-/post pakket	SMS	Quickplot	Fudaa-Prepro + Matisse	in huis routines		Mike 21 Zero	SMS	Matlab routines	in huis Matlab routines
pre-processing tools									
mesh generator	X	X	X	X		X	X	X	X
randvoorwaarden	X	X	N/A*	X		X	X	X	X
ber. van porositeitscoëff. voor geg. refl./trans. coëff.	N/A	N/A	N/A	N/A*		X	N/A*	N/A*	N/A
post-processing tools									
figuurplotter resultaten	X	X	X	X		X	X	X	X
basis statistiek (max., min., gem., st. dev.)	N/A	N/A	N/A	X		N/A	X	N/A	N/A
zero-crossing analyse	N/A	N/A	N/A	X		X	X	N/A	N/A
spectrale analyse	N/A	N/A	N/A	X		X	X	N/A	N/A
directionele analyse	N/A	N/A	N/A	N/A		X**	N/A***	N/A	N/A
2D reflectie analyse	N/A	N/A***	N/A	N/A		N/A	N/A***	N/A	N/A
rekentijd									
grootteorde	minuten	minuten	minuten	minuten		uren	(veel) uren	(veel) uren	minuten
parallel processing	N/A	N/A***	X (ifc nodig)	N/A		X	N/A	X	X
	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> (*) handmatig (**) enkel op plaatsen met weinig reflectie (***) in ontwikkeling </div>								

6. REFERENTIES

- Baelus L. en Keppens Y.** Numerical modelling of wave regeneration by wind in the lee of a farm of wave energy converters using MILDwave for multiple wakes [Rapport]: Master dissertation / UGent. - 2010.
- Battjes J. A.** Shallow water wave modelling [Journal]. - [s.l.] : IAHR, 1994.
- Beels C. [et al.]** Numerical implementation end sensitivity analysis of a wave energy converter in a time-dependent mild-slope equation model [Tijdschrift]. - [sl] : Coastal Engineering, 2010.
- Bolle A.** Havendammen Oostende: transmissie en reflectie [Rapport]. - 2008.
- Briggs M. J., Donnell B. P. and Demirbilek Z.** How to Use CGWAVE with SMS: An Example for Tedious Creek Small Craft Harbour [Report]. - [s.l.] : USACE, 2004.
- Brorsen M. en Helm-Petersen J.** On the Reflection of Short-Crested Waves in Numerical Models [Tijdschrift]. - 1998.
- Chen Q. [et al.]** Wave-current interaction based on an enhanced Boussinesq approach [Journal]. - [s.l.] : Coastal Engineering, 1998. - 33.
- CMS Consulting, Inc.** SimWave: A Boussinesq Model Wave Simulator [Report]. - 1999.
- Demirbilek Z. and Panchang V.** CGWAVE: A coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation [Report]. - [s.l.] : U.S. Army Corps of Engineers, 1998. - CHL-98-26.
- DHI Mike 21 BW:** Boussinesq Waves Module User Guide [Report]. - 2009.
- Douyère Y. M.J.** Analysis of harbor oscillation with a Boussinesq model [Report]: Master dissertation / University of Hawaii. - 2003.
- EDF-R&D** Artemis Software Version 6: Theoretical Note and User Manual [Report]. - 2010.
- Gruwez V. en Trouw K.** Startnota extreem golfklimaat in Belgische havens [Rapport]. - 2010a.
- Gruwez V., Doorme S. en Trouw K.** Invloed wind op golfklimaat haven Oostende [Rapport]. - 2010b.
- Holthuijsen L. H., Herman A. and Booij N.** Phase-decoupled Refraction-diffraction for Spectral Wave Models [Journal]. - [s.l.] : Coastal Engineering, 2003. - Vol. 49.
- Hsu T.-W.** A Boussinesq Model Of Nonlinear Wave Transformations [Tijdschrift]. - 2002.
- Kirby J. T. [et al.]** FUNWAVE 1.0: Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual [Rapport]. - 1998.
- Kirby J. T.** Higher-order Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves [Journal]. - [s.l.] : Journal of Geophysical Research, 1986. - Vol. 91.
- Klopman G. en Dingemans M. W.** Wave Interactions in the Coastal Zone [Tijdschrift]. - 2001.
- Klopman G. en van der Meer J. W.** Random Wave Measurement in Front of Reflective Structures [Tijdschrift]. - [sl] : Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1999.
- Kostense J. K. [et al.]** Wave Energy Dissipation in Arbitrarily Shaped Harbours of Variable Depth [Journal]. - [s.l.] : delft hydraulics, 1988. - 387.
- Lynett P. J.** Tsunami impacts in harbors [Conference] // 26th International Conference for Seaports & Maritime Transport. - 2010.
- Lynett Patrick J. [et al.]** Modeling Wave Generation, Evolution, and Interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave Equations. COULWAVE Code Manual. Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package v. 2.0. [Report]. - 2008.
- Madsen P. A. en Sorensen O. R.** A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry [Tijdschrift]. - [sl] : Coastal Engineering, 1992. - Vol. 18.

- Madsen P. A. en Sorensen O. R.** A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry. [Tijdschrift]. - [sl] : Coastal Engineering, 1992. - 18.
- Madsen P. A., Murray R. en Sorensen O. R.** A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics [Tijdschrift]. - [sl] : Coastal Engineering, 1991. - 15.
- Mase H. [et al.]** Stem Waves Along Vertical Wall Due to Random Wave Incidence [Tijdschrift]. - [sl] : Coastal Engineering, 2002. - Vol. 44.
- McComb P. J., Johnson D. L. en Beamsley B. J.** Numerical Study of Options to Reduce Swell and Long Wave Penetration at Port Geraldton [Tijdschrift]. - 2008.
- Nwogu G. and Demirbilek Z.** BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors [Report]. - [s.l.] : USACE, 2001.
- Nwogu O.** Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation [Tijdschrift]. - [sl] : Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1993.
- Oh S-H [et al.]** Performance Comparison of Spectral Wave Models Based on Different Governing Equations Including Wave Breaking [Tijdschrift]. - [sl] : Journal of Civil Engineering, 2009. - 2 : Vol. 13.
- Panchang V. [et al.]** Exterior Bathymetric Effects in Elliptic Harbor Wave Models [Journal]. - [s.l.] : Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2000.
- Panchang V. and Demirbilek Z.** Simulation of Waves in Harbors Using Two-dimensional Elliptic Equation Models [Journal]. - [s.l.] : Advances in Coastal and Ocean Engineering, 2001. - Vol. 7.
- Panchang V., Zhang J. and Demirbilek Z.** incorporating Rubble Mound Jetties in Elliptic Harbor Wave Models [Journal]. - [s.l.] : Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2008.
- Santos J. A. [et al.]** Coupling Numerical Models for Wave Propagation in the MOIA Package [Journal]. - [s.l.] : Journal of Coastal Research, 2009. - Vol. 56.
- Schäffer H. A. and Sorensen O. R.** On the internal wave generation in Boussinesq and mild-slope equations [Journal]. - [s.l.] : Coastal Engineering, 2006. - Vol. 53.
- The SWAN team** SWAN Technical Documentation [Rapport]. - Delft : [sn], 2008.
- The SWAN Team** SWAN: Scientific and Technical Documentation [Report]. - 2010.
- Thompson E. F., Chen H. S. and Hadley L. L.** Validation of Numerical Model for Wind Waves and Swell in Harbors [Journal]. - [s.l.] : Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1996.
- van der Meer J. W. [et al.]** Wave Boundary Conditions and Overtopping in Complex Areas [Journal]. - 2002.
- Vanneste D. and Troch P.** Design of Oostende Harbour: Numerical Simulation of Wave Propagation [Report] / UGent. - 2009. - DBO107/90.
- Vogel J. A., Radder A. C. and de Reus J. H.** Verification of Numerical Wave Propagation Models in Tidel Inlets [Journal]. - 1988.
- Wei G. and Kirby J. T.** A Coastal Processes Model Based on Time-Domain Boussinesq Equations [Report]. - [s.l.] : Center for Applied Coastal Research, 1996.
- Zhao L. [et al.]** Simulation of Wave Breaking Effects in Two-dimensional Elliptic Harbor Wave Models [Journal]. - [s.l.] : Coastal Engineering, 2001. - Vol. 42.

Bijlage A Overzichtstabellen

A.1 Overzicht golfmodellen

Ontwikkelaar	pakket	module	type model	prijs excl. VAT		opm
				individueel	combinatie	
DHI	Mike 21	PMS	Mild-slope (parabolisch)	11800 EURO		incl. Pre-/Postprocessing
		EMS	Mild-slope (elliptisch)	11800 EURO	36400 EURO	incl. Pre-/Postprocessing
		BW	Boussinesq	24600 EURO		incl. Pre-/Postprocessing prijs kan zakken tot grootteorde BOUSS-2D
Deltares	Delft-WAVES	PHAROS	Mild-slope (elliptisch)	25000 EURO		excl. Quickplot is prijs: 22500 EURO
		TRITON	Boussinesq	-		nog niet commercieel beschikbaar
Aquaveo	SMS	CGWAVE	Mild-slope (elliptisch)	8550 USD	14300 USD	incl. Pre-/Postprocessing
		BOUSS-2D	Boussinesq	8050 USD		incl. Pre-/Postprocessing
James T. Kirby		REF/DIF	Mild-slope (parabolisch)	freeware		
		FUNWAVE	Boussinesq	freeware		
UGent		MILDwave	Mild-slope (hyperbolisch)	in-house		onderzoekstool, gebruiksovereenkomst voor WL in aanmaak
CMS Consulting, Inc.		SimWave	Boussinesq	discontinued		
EDF-LNH	TELEMAC	Artemis	Mild-slope (elliptisch)	freeware		incl. Pre-/Postprocessing

A.2 Overzicht fysische processen en mogelijkheden van de golfmodellen

Model type	Model	Linear	Non-linear	Partially/Weakly	Regular	Irregular	Superposition	Spectral	Wind sea/Swell	Generation of waves by wind	Long waves (resonance, seiching...)	Refraction		Diffraction	Shoaling	Reflection	Transmission	Overtopping	Wave runup (Moving shoreline)	Non-linear wave-wave interactions	Non-linear dispersion	Wave breaking	Bottom friction	Harbour entrance losses	Floating docks	Wave radiation stresses	Documented applications to harbours	Parallel computing	Pre-/postprocessing			
												Bottom	Current																	Full	Partial	1D
Parabolic MSE	Mike 21 PMS	X	N/A	N/A	X	X	X	N/A	X	N/A	N/A	X	N/A	Partial	X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X	X	N/A	N/A	X	N/A	N/A	++			
	REF/DIF	X	N/A	X	X	X	X	N/A	X	N/A	N/A	X	X	Partial	X	X	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	X	N/A	N/A	X	N/A	N/A	--			
Elliptic MSE	Mike 21 EMS	X	N/A	N/A	X	N/A	N/A	N/A	X	N/A	X	X	N/A	X	X	X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X	X	N/A	N/A	X	N/A	++				
	CGWAVE	X	N/A	X	X	X	X	N/A	X	N/A	X	N/A***	X	X	X	X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A***	X	X	X	X	N/A?	X	N/A	++			
	PHAROS	X	N/A	N/A	X	X	X	N/A	X	N/A	X	X	X	X	X	X	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X	X	X	N/A	X	N/A***	++				
	Artemis	X	N/A	N/A	X	X	X	N/A	X	N/A	X	X	N/A	X	X	X*	X*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	X	X	N/A	X	N/A	X	+			
Hyperbolic MSE	MILDwave	X	N/A	N/A	X	N/A	N/A	X	X	X(****)	N/A	X	N/A	X	X	X	X	N/A	N/A	N/A	N/A	X	N/A***	X***	X	N/A	X	N/A	+			
Boussinesq	Mike21 BW	N/A	N/A	X	X	N/A	N/A	X	X	N/A	X	X	X****	X	X	X	X	N/A	N/A	X	X	X	X	X***	N/A	X	X	X	++			
	BOUSS-2D	N/A	X	X	X	N/A	N/A	X	X	N/A	X**	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X***	N/A	X?	X	N/A	++			
	COULWAVE	X	X	X	X	N/A	N/A	X	X	N/A	X*	X	N/A***	X	X	N/A	X	N/A	N/A	X	X	X	X	N/A	N/A	X?	N/A	X	+/-			
	FUNWAVE	X	X	X	X	N/A	N/A	X	X	N/A	N/A	X	N/A	X	X	X	N/A	N/A	N/A	X	X	X	X	N/A	N/A	X?	N/A	N/A	-			
	SimWave	X	X?	X	X	N/A	N/A	X	X	N/A	N/A?	X	X	X	X	X	N/A	N/A	N/A	X	X	X?	X	X	N/A	X?	X	N/A	+			
TRITON	N/A	?	X	X	N/A	N/A	X	X	X	N/A	X*	X	?	X	X	X	?	N/A	N/A	?	X	?	N/A	N/A?	N/A	?	?	?				
Spectral (action balance equation)	SWAN	X	N/A	X	N/A	N/A	N/A	X	X	X	N/A	X	X	Approximate & not convergent in combination with reflection	X	X	X no standing waves	X	X	N/A	N/A	N/A	X	N/A	X	X	N/A	N/A	X?	X	X	+

(*) incident wave angle to be determined for each closed (and open) boundary
 (**) No toolbox available (yet)
 (***) In development
 (****) Possible with porosity layer
 (*****) beschikbaar in onderzoeksfase. Wordt momenteel verder gevalideerd en uitgebreid
 (*****) on condition: low Froude number of current

Bijlage 2: INVLOED VAN REFLECTIE



Nota

Datum: 05/10/11
Aan: Stuurgroep
Auteur: Vincent Gruwez
Documentref: I/NO/11273/10.318/VGR v4.1

Betreft : Invloed reflectie op golfmetingen in haven van Oostende

Inhoudstafel

1. INLEIDING	2
2. LITERATUURSTUDIE: STAANDE GOLVEN AAN KAAIMUREN.....	3
2.1. LOODRECHTE EN SCHUINE INVAL (0° & <30°)	3
2.2. ZEER SCHUINE INVAL (>60° & <80°).....	5
3. EFFECT OP METINGEN	8
3.1. FYSISCH MODEL.....	8
4. INSCHATTING BELANG VAN EFFECT REFLECTIE IN DE HAVEN VAN OOSTENDE .	10
4.1. LOODRECHTE GOLFINVAL.....	13
4.2. SCHUINE GOLFINVAL.....	14
5. CONCLUSIE	14
6. REFERENTIES	15

1. INLEIDING

Deze nota is een verzameling van alles wat betrekking heeft op de invloed van reflectie op de golfmetingen in havens, zowel in de natuurmetingen als in het fysisch model van Oostende

De natuurmetingen in Oostende worden uitgevoerd aan de hand van druksensoren geplaatst tegen de kaaimuur. Deze metingen geven de totale golfhoogte, dus inclusief de gereflecteerde golf en eventuele staande golven.

Een literatuurstudie heeft uitgewezen dat vorming van staande golven aan kaaimuren mogelijk zijn, niet alleen bij loodrechte golfinval maar ook – onder bepaalde voorwaarden – bij schuine tot zeer schuine inval t.o.v. de kaaimuur.

Hetzelfde geldt voor de metingen in het fysisch model. In dit geval kunnen echter ook metingen weg van de kaaimuren uitgevoerd worden.

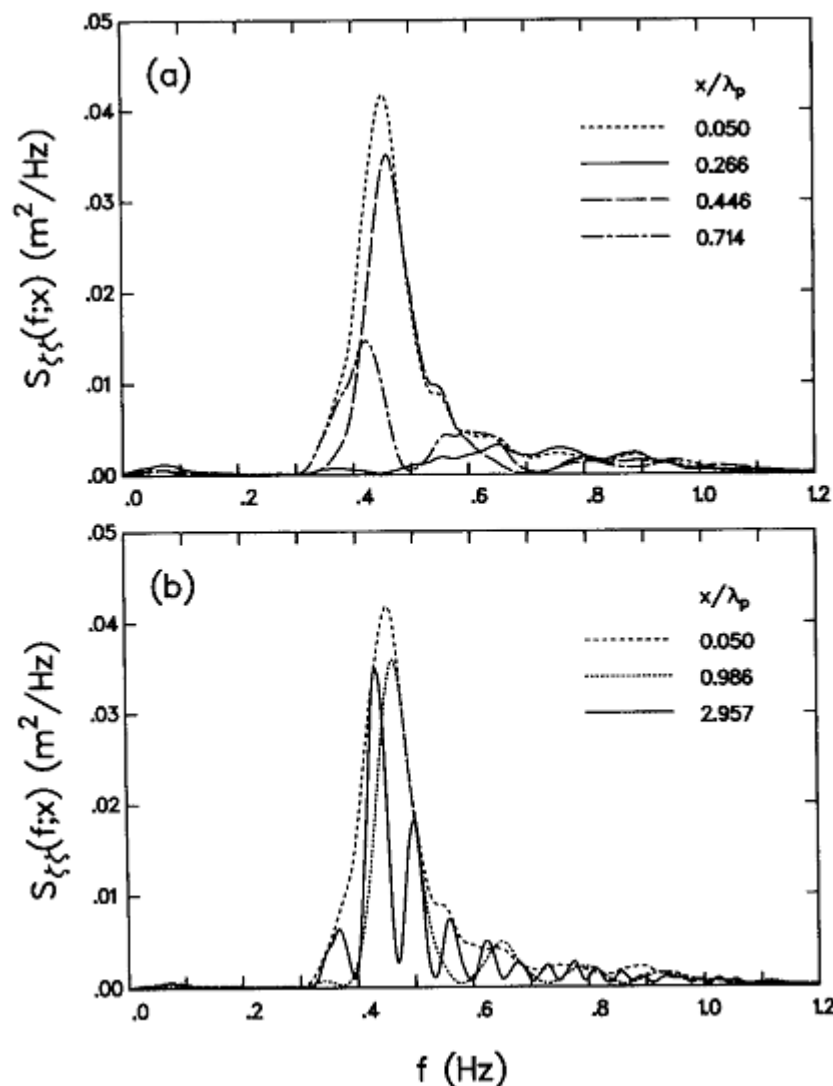
Er wordt onderzocht of de totale golfhoogte volgend uit de natuurmetingen en het fysisch model al of niet invloed ondervindt van staande golven.

2. LITERATUURSTUDIE: STAANDE GOLVEN AAN KAAIMUREN

2.1. Loodrechte en schuine inval (0° & $<30^\circ$)

De invloed van reflectie op de metingen aan de kaaimuren in de haven kan significant blijken afgaande op het artikel van (Klopman en van der Meer 1999). De toename aan aantal pieken in het spectrum (cf. Figuur 2-1) kan hiervoor een eerste aanwijzing zijn.

Deze pieken kunnen een patroon van nodale en anti-nodale frequenties (knopen en buiken) voorstellen, typerend voor een golfveld waarin ook gereflecteerde golven zitten (Klopman en van der Meer 1999), cf. Figuur 2-1. Hierbij geldt de regel: hoe verder van de gereflecteerde structuur, hoe kleiner de afstand tussen de nodale frequenties en dus hoe meer zichtbare pieken in het spectrum.



Figuur 2-1: Nodale en anti-nodale frequenties (knopen en buiken) in een opgemeten spectrum (Klopman & van der Meer, 1999)

Reflectie zorgt voor staande golven aan de kaaimuren. Staande golven hebben niet enkel invloed op de vorm van het spectrum maar ook op de golfhoogte. De significante golfhoogte neemt daarbij theoretisch met factor 2 toe (perfecte reflectie: $C_r = 1$) aan de kaaimuur t.o.v. de inkomende significante golfhoogte. De invloed van staande golven "sterft uit" verder van de kaaimuur verwijderd. Dit is afhankelijk van (zie ook grafieken in Figuur 2-2):

- De invalshoek van de inkomende golf heeft geen invloed op de toename aan significante golfhoogte aan de kaaimuur, maar wel op de demping van de staande golf weg van de kaaimuur. De invloedzone van staande golven is steeds groter voor een stijgende invalshoek (t.o.v. loodrechte op de kaai).

- Een grotere directionele spreiding zorgt voor een snellere demping van de staande golf oscillaties weg van de kaaimuur.
- De vorm van het spectrum speelt ook een grote rol: hoe spitsvormiger het spectrum (hoe groter gamma), hoe verder de oscillaties in het Hs verloop weg van de kaaimuur voorkomen. Dus hoe vlakker het spectrum of hoe meer de golfenergie verspreid is over verschillende frequenties, hoe meer deze oscillaties zich beperken dichter tegen de kaaimuur. Een halve golflengte weg van de kaaimuur kan de meeste staande golf invloed al uitgewerkt zijn voor bv een PM spectrum (gamma=1).

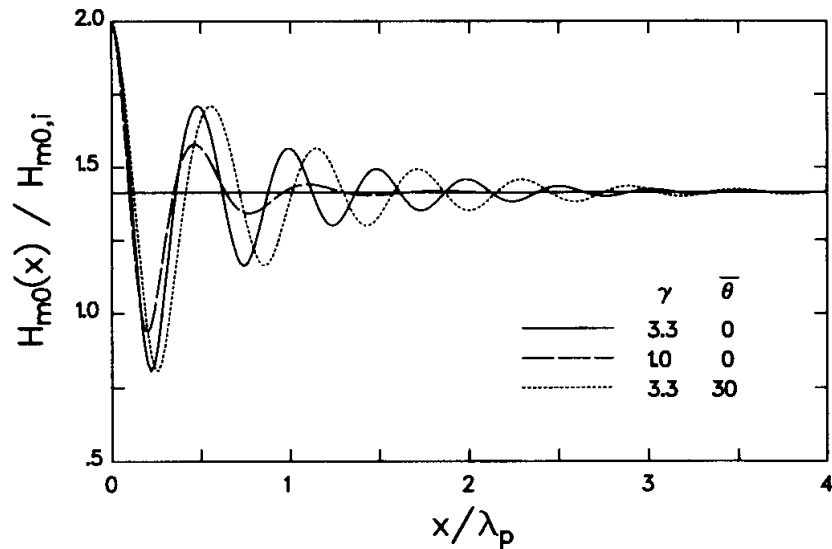


FIG. 3. Influence of Spectrum Width and Angle of Incidence on $H_{m_0}(x)/H_{m_0,i}$ as Function of x/λ_p . $\gamma = 3.3$: JONSWAP Incident Wave Spectrum; $\gamma = 1.0$: Pierson-Moskowitz Incident Wave Spectrum; and Long-Crested Waves ($\sigma = 0^\circ$), Angles in Degrees

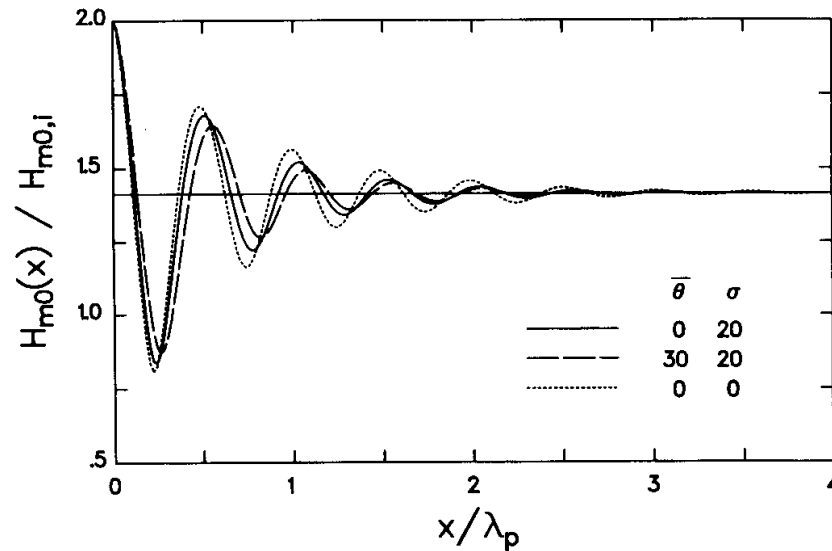


FIG. 4. Influence of Directional Spread on $H_{m_0}(x)/H_{m_0,i}$ as Function of x/λ_p . Angles in Degrees

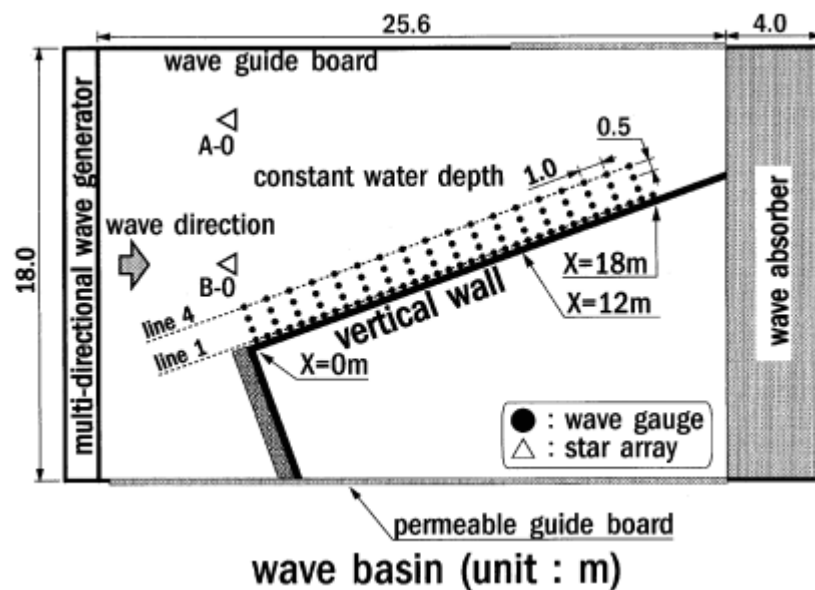
Figuur 2-2: Invloed van verscheidene golfeigenschappen op de grootte van de invloedszone van staande golven (Klopman en van der Meer 1999)

Om geen staande golf invloed in de metingen te hebben, wordt aangeraden minstens 2 golflengtes weg van de kaaimuur te meten. Wat met de beperkte afmetingen van de haven allicht onmogelijk is ($L_p \approx 80m$). Het kan worden overwogen om de metingen te reduceren met factor $\sqrt{(1^2+0.9^2)/(1+0.9)}$ naar de golfhoogte waarin wel nog de gereflecteerde golf inzit ($C_r = 0.9$), maar geen staande golf (convergentiewaarde in Figuur 2-2). Dit om een correctere waarde te bekomen voor de overslagformules en om beter te kunnen vergelijken met de

numerieke resultaten (SWAN kan bv. geen rekening houden met staande golven). Om deze reductie nauwkeuriger te kunnen doen, zou een betere inschatting nodig zijn van de reflectiecoëfficiënten.

2.2. Zeer schuine inval (>60° & <80°)

Voor zeer schuine invalshoeken (30° tot 10° t.o.v. de kaaimuur of dus 60° tot 80° t.o.v. de loodrechte) spreekt men over Mach reflectie en vorming van Stem waves (een gevolg van de staande golven uit het artikel van (Klopman en van der Meer 1999)). Het blijkt dat de significante golfhoogte ook voor deze invalshoeken kan toenemen tot (2*Hm0,inc) aan de kaaimuur, dit wordt echter pas geleidelijk na enkele golflengtes propagatie langs de kaaimuur bereikt (Mase, et al. 2002). Hoe kleiner de invalshoek is met de kaaimuur, hoe verder de golf moet propageren om (2*Hm0,inc) aan de kaaimuur te bereiken (cf. Figuur 2-4 met opstelling van Figuur 2-3).



Figuur 2-3: Opstelling golfbakproeven voor het opwekken van “stem waves” (Mase, et al. 2002)

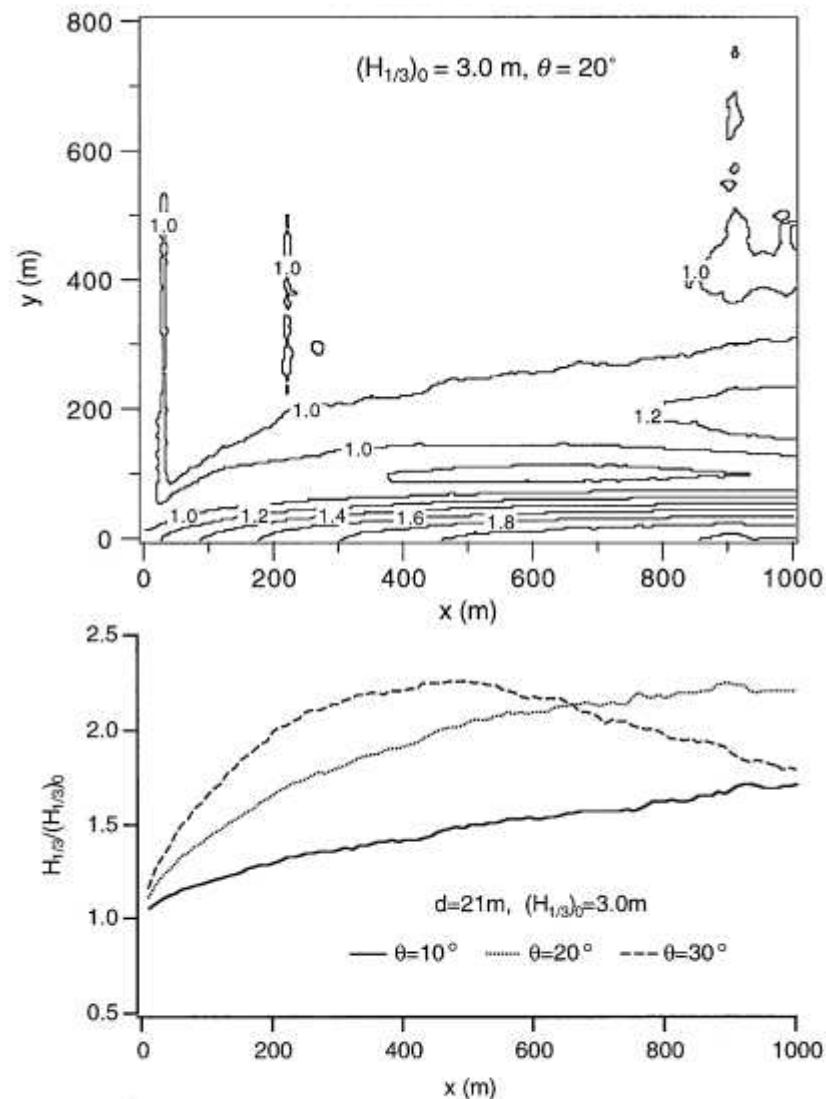


Fig. 13. Wave height pattern in front of wall and change of stem wave heights for the case of $(H_{1/3})_0 = 3 \text{ m}$ in constant water depth.

Figuur 2-4: boven: contourplot genormaliseerde significante golfhoogte; onder: genormaliseerde significante golfhoogte langs de kaaimuur (met $T_{1/3} = 10\text{s}$) (Mase, et al. 2002)

Indien de golfrichting $\leq 80^\circ$ is t.o.v. de loodrechte op de kaaimuur over lange afstand, bestaat dus het gevaar van vorming van 'stem waves', zeker in combinatie met de directionele spreiding (in het geval van de natuurmetingen).

In tegenstelling tot de loodrechte en zwak schuine inval is de convergentiewaarden weg van de kaaimuur voor zeer schuine inval gelijk aan de inkomende significante golfhoogte zonder gereflecteerde golf. Dit omdat door de zeer schuine inval de gereflecteerde golven pas na vele golflengtes langs de kaaimuur ver weg van de kaaimuur te observeren zijn (cf. Figuur 2-4 en Figuur 2-5).

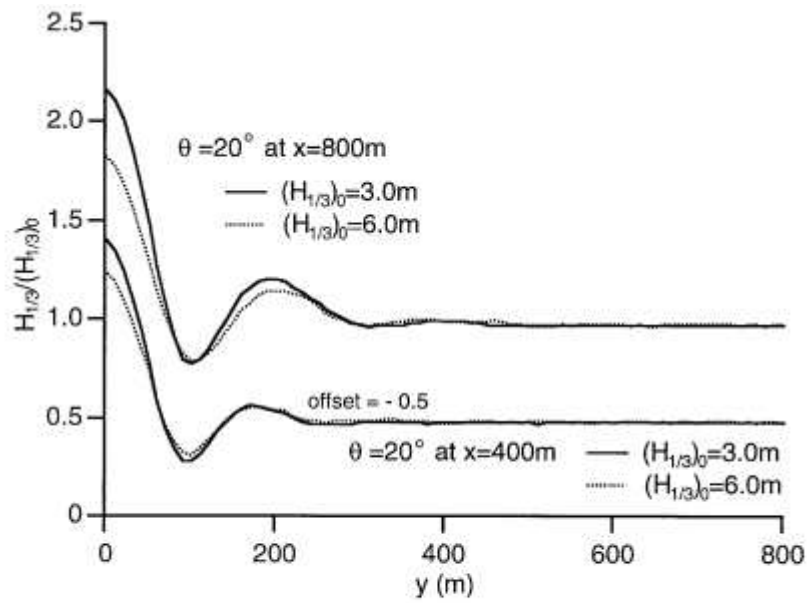


Fig. 16. Wave height distribution of stem waves normal to wall for two different incident wave heights.

Figuur 2-5: verloop genormaliseerde H_s weg van de kaaimuur (Mase, et al. 2002)

3. EFFECT OP METINGEN

De bevindingen van de literatuurstudie zijn belangrijk voor alle metingen vlak aan de kaaimuur zij het in de natuur, in het fysisch model (FM) of zelfs numeriek (NM). In SimWave (UGent) bijvoorbeeld worden echter resultaten aan de kaaimuur sowieso als onbetrouwbaar beschouwd.

Wanneer echter de randvoorwaarden bepaald worden, gaat de interesse naar de H_s zonder staande golf maar wel met reflectie indien van toepassing (=convergentiewaarde weg van kaaimuur). Dit omdat de formules voor overslagdebieten op deze H_s zijn gebaseerd.

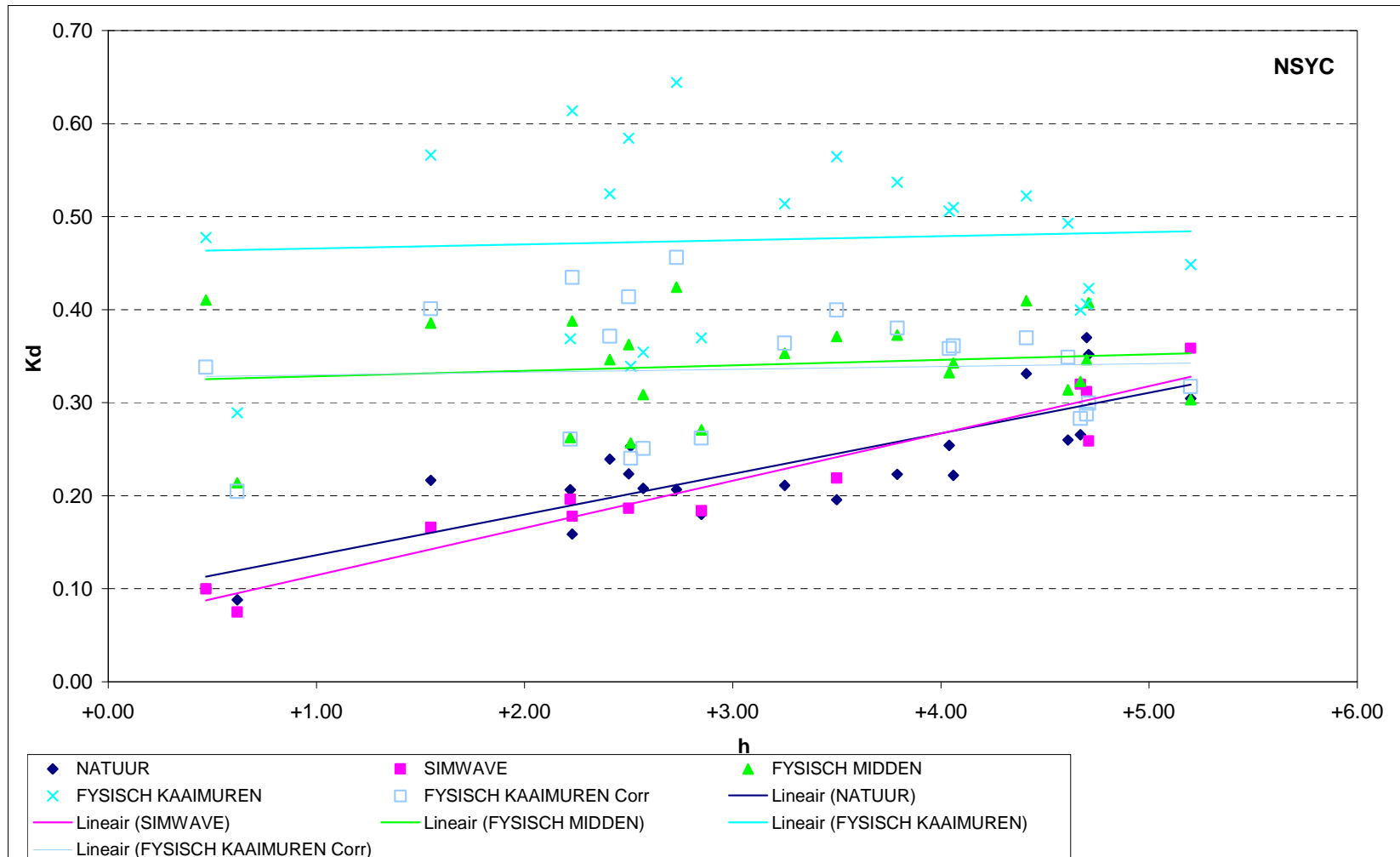
Hierna wordt voor de gevalstudie Oostende het effect van reflectie op de metingen verder bekeken.

3.1. Fysisch model

In het fysisch model voor de haven van Oostende zijn zowel metingen aan de kaaimuur zelf als weg van de kaaimuur (midden van vaargeul) uitgevoerd. Het blijkt dat voor elke proef de meting aan de kaaimuur altijd groter is dan deze in het midden (cf. Figuur 3-1). Dit suggereert invloed van staande golven aan de kaaimuur die de significante golfhoogte doen stijgen.

Wanneer de metingen aan de kaaimuur gereduceerd worden met factor $\sqrt{1.81}/1.9$ (reflectiecoëfficiënt ($C_r = 0.9$) naar de golfhoogte waarin wel nog de gereflecteerde golf inzit maar geen staande golf, dan wordt zeer goede overeenkomst bekomen met de meting in het midden (cf. "FYSISCH KAAIMUREN Corr" in Figuur 3-1).

Dit resultaat kan een zekere graad van toeval bevatten, maar het wijst zeker op een mogelijke invloed van staande golven in de metingen. Een bijkomend argument is dat uit de vergelijkingen tussen FM, NM en natuur (IMDC 2010) bleek dat de FM metingen aan kaaimuur en midden naar elkaar toe convergeren voor een stijgende waterstand (configuratie T2, mogelijk ook voor T0 → onderzoek volgt). Een stijgende waterstand brengt meer transmissie over de kaaimuren teweeg en bijgevolg een grote daling van de reflectiecoëfficiënt zodat staande golven veel minder uitgesproken worden.



Figuur 3-1: K_d -waarden [-] in functie van het waterpeil [m TAW]

4. INSCHATTING BELANG VAN EFFECT REFLECTIE IN DE HAVEN VAN OOSTENDE

De mogelijkheid van het optreden van staande golf invloeden wordt ingeschat voor de haven van Oostende. De inschatting gebeurt voor 1000-jarige golfcondities en voor de T2-configuratie.

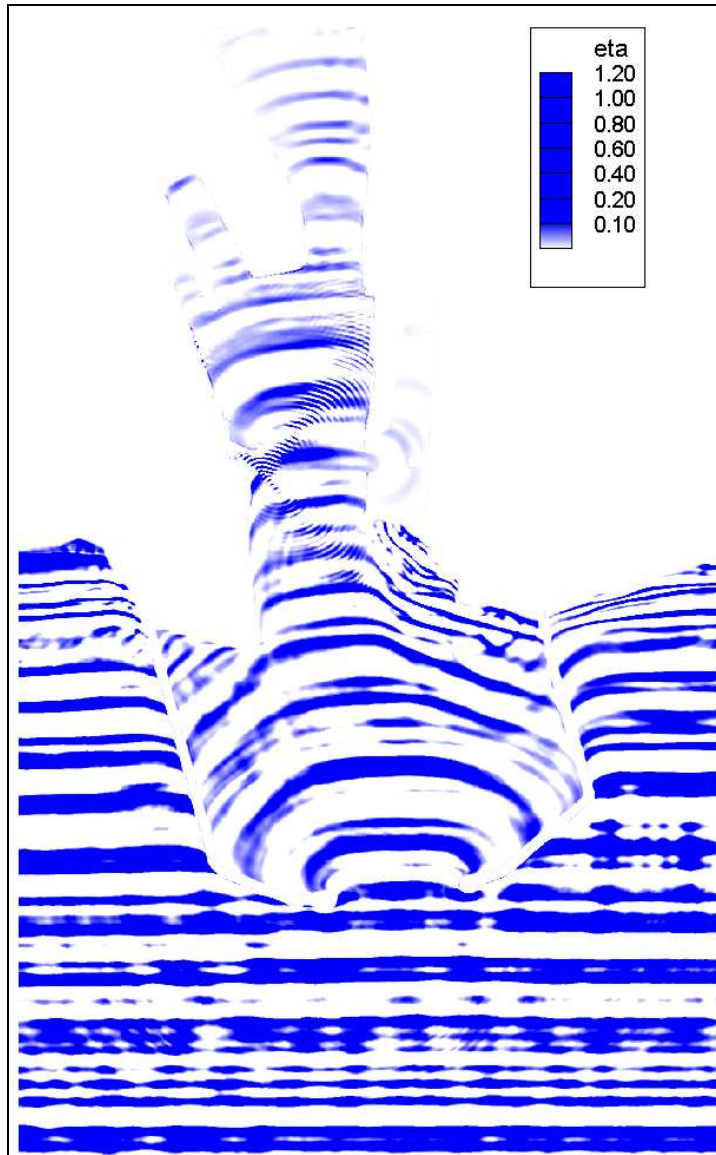
Om het effect van de reflectie te kunnen begroten is het belangrijk volgende informatie te weten:

- Golfrichting t.o.v. structuur;
- Golflengte;

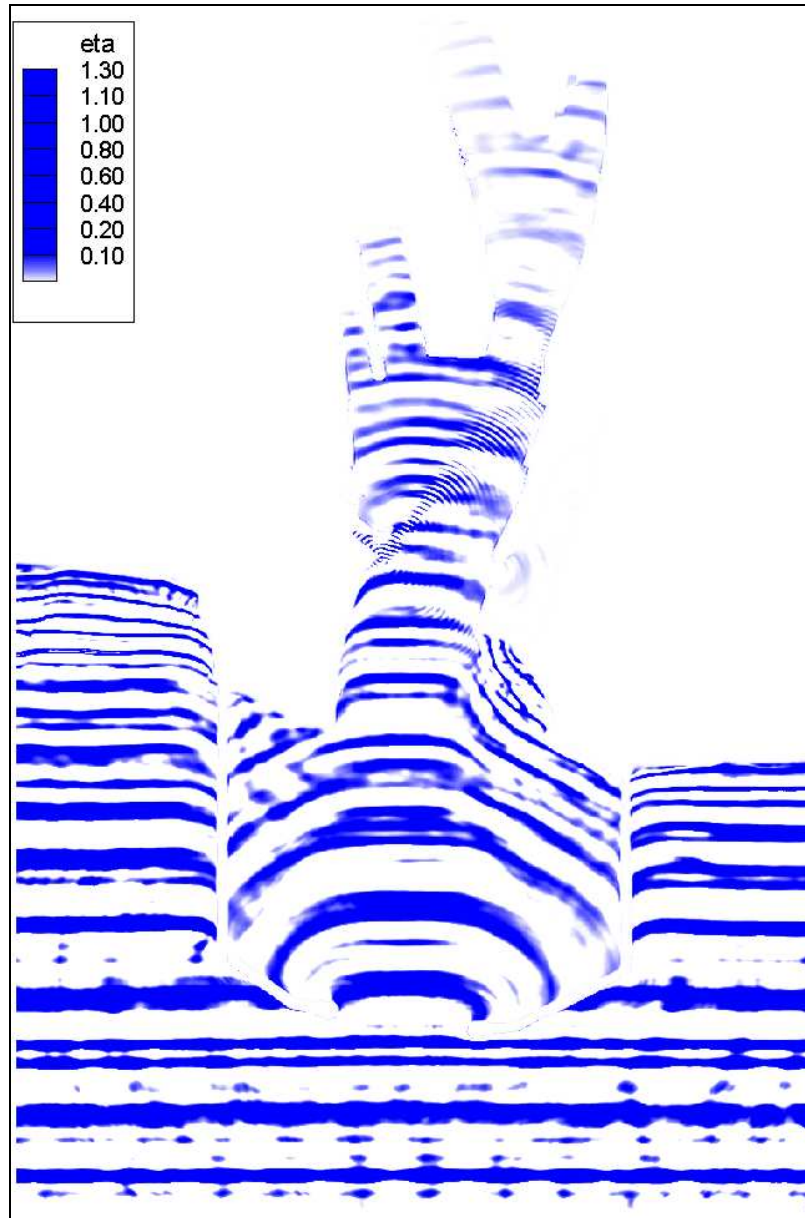
En in mindere mate ook:

- Piekvormigheid van spectrum;
- Directionele spreiding.

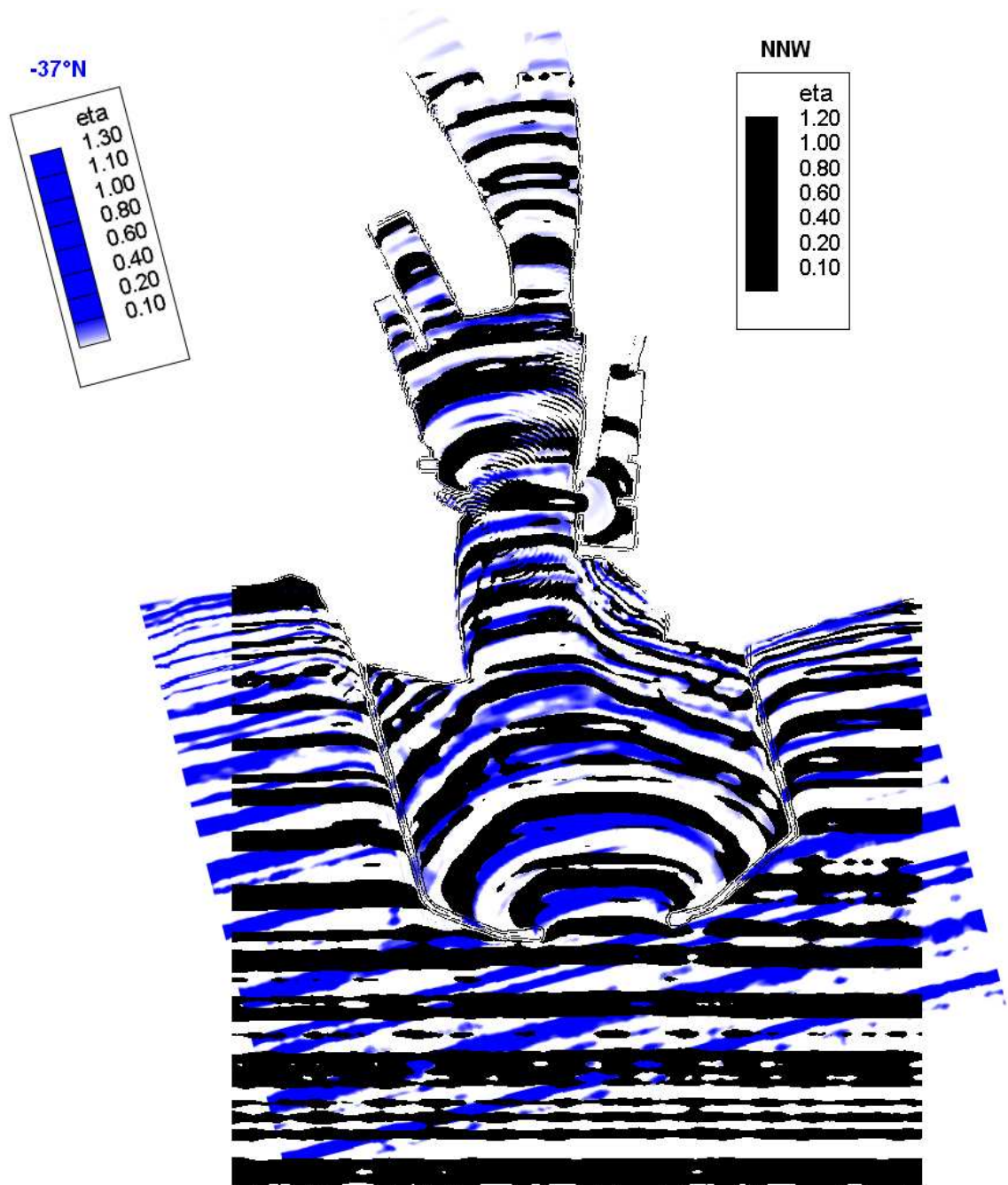
Voorlopig is enkel de hoofdrichting te bepalen door analyse van de verheffingsplots van het numerieke model voor de twee belangrijkste richtingen in T2-situatie (cf. Figuur 4-1 en Figuur 4-2) (UGent, 2009). Dit is mogelijk dankzij de unidirectionele golven aan de rand. Eventueel gereflecteerde golven zijn echter moeilijk te onderscheiden in dergelijke plot zodat voor sommige locatie mogelijk de inkomende golfhoogte verkeerd ingeschat kan worden enkel op basis van zo'n plot.



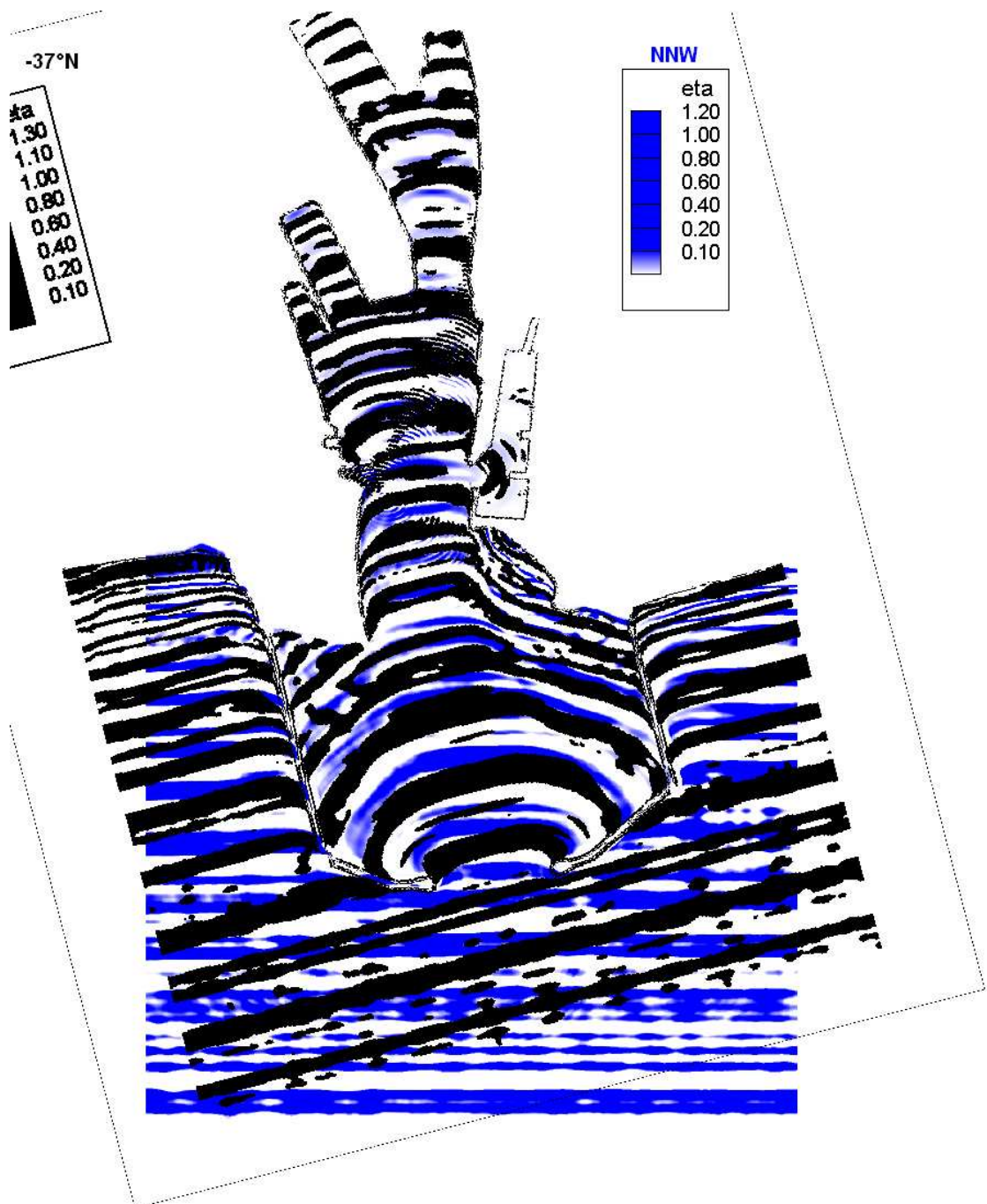
Figuur 4-1: Verheffingsplot numeriek model Oostende, T2-situatie, richting NNW (UGent, 2009)



Figuur 4-2: Verheffingsplot numeriek model Oostende, T2-situatie, richting -37°N (UGent, 2009)



Figuur 4-3: Vergelijking van golfkruinen voor golfrichtingen -37°N (achtergrond) en NNW (voorgond)



Figuur 4-4: Vergelijking van golfkruinen voor golfrichtingen NNW (achtergrond) en -37°N (voorgond)

4.1. Loodrechte golfinval

Loodrechte (of quasi loodrechte) inval van golven t.o.v. een structuur komt voor:

1. aan het uiteinde van het Tijdok;
2. in de binnenhaven aan de westkant tussen de ingang naar het Montgomerydok en het station komen enkele uitstulpingen van de kade (van +/- 20m) voor;
3. in het Montgomerydok zelf;
4. aan de Demeysluis.

Bovenstaande lijst bevat enkel de relevante plaatsen, met andere woorden waar er randvoorwaarden gewenst zijn om maatregelen uit te werken.

De golflengte bedraagt (voor RP=1000jaar) voor elk gebied ongeveer:

1. $L_p=135\text{m}$ ($T_p=12\text{s}$, $h=15\text{m}$);
2. $L_p=135\text{m}$ ($T_p=12\text{s}$, $h=15\text{m}$);

3. $L_p=115\text{m}$ ($T_p=12\text{s}$, $h=10\text{m}$);
4. $L_p=125\text{m}$ ($T_p=12\text{s}$, $h=12\text{m}$);

Het meetpunt van het Tijdok aan de Wandelaarskaai bevindt zich ongeveer 1 golflengte van het uiteinde van het Tijdok. Tussen dit meetpunt en het uiteinde treedt dus zeker staande golfinvloed op (conclusie op basis van Figuur 2-2), zeker de oscillaties in het H_m0 verloop maar weliswaar mogelijk niet met de volledige intensiteit omdat er transmissie optreedt (en dus geen 100% reflectie) bij een 1000-jarige waterstand. Dit wordt bevestigd door visuele waarneming in het FM (statisch op en neer bewegen van het wateroppervlak in het tijdok, cf. filmpjes 16/06/2010, let op wel voor waterstand +4mTAW dus hier wel 100% reflectie). Op de meetlocatie zelf (belangrijkste locatie want op deze locatie zou ongeveer de grootste H_m0 ,i optreden die bepalend is voor het ontwerp) zou de staande golfinvloed reeds grotendeels uitgewerkt kunnen zijn. Echter de gereflecteerde golf (tegen het uiteinde) zelf zit wel nog zeker in de totale golfhoogte, terwijl die helemaal niet van belang is (want richting is weg van de veiligheidsmuurtjes => geen bijdrage aan overslag).

De uitspringende kades aan het station zorgen voor korte stukken kaaimuren die loodrecht ten opzichte van de golfrichting zijn. Ook hier treden lokaal staande golfoscillaties op die ook visueel waarneembaar zijn in het FM (cf. filmpjes 16/06/2010).

De golfindringing in het Montgommerydok is vrij complex. Modellering ervan is nog niet op absolute wijze succesvol uitgevoerd. Het dok is echter omringd door verticale kaaimuren zodat loodrechte inval van golven wel ergens zal optreden. Door de beperkte afmetingen van dit dok t.o.v. de golflengte zullen bijgevolg zeker een staande golfoscillaties optreden.

De golven vallen loodrecht in aan de Demeysluis zodat ook hier staande golven optreden.

4.2. Schuine golfinval

Dat er enige invloed van staande golven kan optreden voor schuin invallende golven kan enkel begroot worden met juiste informatie over de invalshoek. Uit bovenstaande verheffingsfiguren blijkt ogenschijnlijk dat de golven redelijk evenwijdig propageren aan de meeste belangrijke structuren, zoals de kade van NSYC, de kaaimuren rond het station en tussen het station en de Demeysluis.

De resultaten van het FM echter wijzen toch op een mogelijk optreden van staande golfinvloed in een aantal belangrijke punten, omdat:

- Kaaimuur-waarden steeds groter zijn dan Midden-waarden;
- Omgekeerde evolutie tussen resultaten kaaimuur en midden voor wijzigende diepwater golfrichting (zie bv. G11 en G12 in WL2010T627_05-2010-08-25 reeks93.doc)

Dit kan betekenen dat het NM onvoldoende de gereflecteerde golven weergeeft (of visueel gewoon moeilijker te onderscheiden) die meer loodrecht invallen voor bepaalde structuren.

Door het diffractie punt aan de Visserijsluis propageren de inkomende golven niet evenwijdig aan de Wandelaarskaai over een afstand van +/- 1.5 golflengte. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar in de verheffingsplots. Wanneer ondersteld wordt dat de invallende hoek t.o.v. de structuur 30° bedraagt, wordt de factor 2 aan de kaaimuur (te n gevolge van staande golven) bijna gehaald over deze afstand (Mase, 2002 fig. 4).

Aan de NSYC zijn staande golfoscillaties visueel zichtbaar (cf. regelmatige golf run onder de filmpjes 16/06/2010).

5. CONCLUSIE

Het artikel van Klopman (1999) gaf een aanzet om de invloed van staande golven op metingen tegen reflecterende constructies nader te bekijken.

Het blijkt dat staande golven voor oscillaties in het verloop van de significante golfhoogte zorgen, die in geval van onregelmatige golven echter uitdeinen loodrecht weg van de constructie. Aan de constructie is de significante golfhoogte twee maal de inkomende significante golfhoogte voor een perfect reflecterende constructie ten gevolge van deze staande golfinvloed. Daarom wordt aangeraden enkele golflengtes weg van de constructie

metingen uit te voeren, iets wat onmogelijk is in havens met beperkte afmetingen in vergelijking met de golflengte.

Zelfs voor schuin invallende golven komt dit fenomeen voor, geklasseerd onder de term "Mach reflectie" met als gevolg de vorming van "Stem waves" aan de constructie (Mase et al., 2002). Langs een perfect reflecterende constructie zal de twee maal grotere significante golfhoogte pas na propagatie over een afstand van enkele golflengtes langsheen de constructie worden bereikt. Hoe schuiner de golfinval, hoe meer propagatie langs de constructie is vereist vooraleer die 2 maal grotere H_s wordt bereikt.

In overslagformules is meestal de inkomende significante golfhoogte van toepassing. Het is dus belangrijk om met de staande golfinvloed rekening te houden bij de analyse van de resultaten (tegen de kaaimuren) van het fysisch en numeriek model.

Onderzoek van de metingen in het fysisch model voor de haven van Oostende vlakbij en verder weg van de kaaimuur wijst uit dat:

- de golfhoogtes inderdaad hoger zijn tegen de kaaimuren;
- het verschil tussen de golfhoogte vlakbij de kaaimuur en in het midden daalt bij een stijgend waterpeil (omwille van meer transmissie & minder reflectie => minder staande golfinvloed).

Deze bevindingen suggereren op zijn minst een invloed van staande golven op de metingen in het fysisch model.

6. REFERENTIES

IMDC, 2010. „*Golfindringing haven Oostende: vergelijken van de natuurmetingen, fysisch en numeriek model (T0 en T2 configuraties)*.” Nota NO10235.

Klopman, G., en J. W. van der Meer, 1999. *Random Wave Measurement in Front of Reflective Structures*.” Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering.

Mase, H., T. Memita, Y. Masatoshi, en T. Kitano, 2002. *Stem Waves Along Vertical Wall Due to Random Wave Incidence*. Coastal Engineering 44.

UGent, 2009. *Design of Oostende Harbour: Numerical Simulation of Wave Propagation, Wave conditions in the inner port, final situation T2, 'Rechte dam met basisconcept SWB'*. Rapport DBO107/90.

Bijlage 3: INVLOED WIND (NOTA 1)



Nota

Datum: 05/10/11
Aan: Stuurgroep
Auteur: Vincent Gruwez, Sarah Doorme
Documentref: I/NO/11273/10.317/VGR v4.1

Betreft : Invloed van de wind op het golfklimaat in haven van Oostende

Inhoudstafel

1. INLEIDING	2
2. ANALYSE WINDSNELHEDEN	2
3. INVLOED WIND	3
3.1. STRIJKLENGTES	3
3.2. GOLFPARAMETERS	4
3.2.1. Eenvoudige methode + Wilson	6
3.2.2. Methode voor complexe geometrie (evt. + Wilson)	7
3.3. SWAN	7
3.4. LOKALE GOLFGROEI IN HAVEN DOOR EXTREME WIND (1000-JARIGE STORM) MET SWAN	12
4. CONCLUSIE	15
5. REFERENTIES	16
6. BIJLAGEN	17
6.1. CORRELATIES WINDRICHTINGEN	17
6.2. CORRELATIES WINDSNELHEDEN	18
6.2.1. Oosterstaketsel – Zeebrugge	18
6.2.2. Westerstaketsel – Zeebrugge	23
6.3. SIGNIFICANTE GOLFHOOGTE H _S : ENKEL DOOR WIND (1000-JARIGE WIND SNELHEID)	28
6.4. SWAN INPUT FILE: SIMULATIES MET ENKEL WIND	36

1. INLEIDING

Deze nota is een verzameling van alles wat betrekking heeft op de invloed van wind op het golfklimaat in havens:

- Onderzoek van de windsnelheden zelf;
- Studie van lokale generatie van golven door wind voor een complexe geometrie.

Een aantal methodes worden geïllustreerd aan de hand van de gevalstudie voor de haven van Oostende, waarvoor momenteel de meeste data beschikbaar zijn.

2. ANALYSE WINDSNELHEDEN

Voor de windsnelheden van het meetstation te Zeebrugge is gebleken dat deze 20% kleiner zijn dan deze op open zee (mond. comm. Trouw, 2010). Er wordt onderzocht of dit ook geldt voor de windsnelheden te Oostende.

Windmetingen aan de kust zijn beschikbaar in Zeebrugge van op de daminstrumentarium en in Oostende van op de ooster- en westerstaketsels (Afdeling Kust). Het betreft een dataset van (maar) 11 dagen lang met 10min gemiddelde windsnelheden en windrichtingen. Deze metingen zijn vergeleken met deze van Zeebrugge aan de hand van correlaties tussen de windrichtingen en -snelheden, in het laatste geval per richtingssector van 22.5°. De resultaten staan respectievelijk in Bijlage 6.1 en Bijlage 6.2.

De windsnelheden van elk station zijn – indien nodig – herleid naar de windsnelheden op 10m hoogte boven MSL (=2.30m TAW) door aanname van een logaritmisch windprofiel. De hoogte van de windsnelheidsmetingen per meetstation staan in Tabel 2-1. Herleiden van de gemeten windsnelheden op het Westerstaketsel naar de windsnelheden op 10m hoogte (boven MSL = 2.30 m TAW) vereist toepassen van een factor 0.94 op de datareeks (zelfde factor die toegepast wordt te Westhinder want ongeveer zelfde meethoogte = 20 m TAW). De hoogte van de windmetingen op het Oosterstaketsel is onbekend.

Tabel 2-1: Meethoogte windmeetstations (Afdeling Kust, 2011)

Meetstation	Hoogte meting t.o.v. MSL[m]
Zeebrugge Daminstrumentatie	10.0 ¹
Oostende kop Oosterstaketsel	? ²
Oostende Westerstaketsel	$7.5 + 13.0 - 2.3 = 18.2$ (= 20.5 m TAW)

Het westerstaketsel toont nagenoeg een 1 op 1 relatie met Zeebrugge wat de windrichtingen betreft. Het oosterstaketsel wijkt gemiddeld ongeveer 20° af.

De windsnelheden te Oostende vergeleken met deze van Zeebrugge tonen ook een vrij goede correlatie per richtingssector. Er kan worden besloten dat ook in de haven van Oostende 20% lagere windsnelheden gelden t.o.v. windsnelheden op open zee³.

1.1.

¹ Zie <http://www.meetnetvlaamsebanken.be/> en vergelijk windspeed en windspeed at 10m => nagenoeg zelfde waarden.

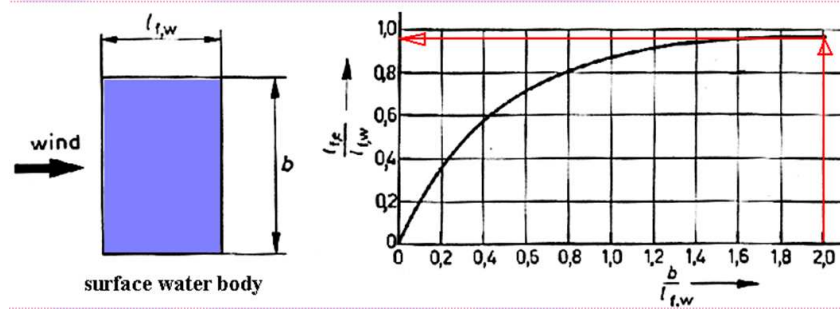
² De hoogte opgegeven voor de oostkant is die van het toestel aan de signalisatie en niet van het toestel op het (nu afgebroken) Oosterstaketsel.

³ Bij nader onderzoek blijkt dat voor windrichting NW eerder een factor 0.90 geldt i.p.v. 0.80. Hiermee werd in deze nota geen rekening gehouden, echter wel in nota NO11167 dat een vervolg op deze nota is met o.a. de finale resultaten voor de lokaal windgegenerateerde golven in de haven.

3. INVLOED WIND

3.1. Strijklengtes

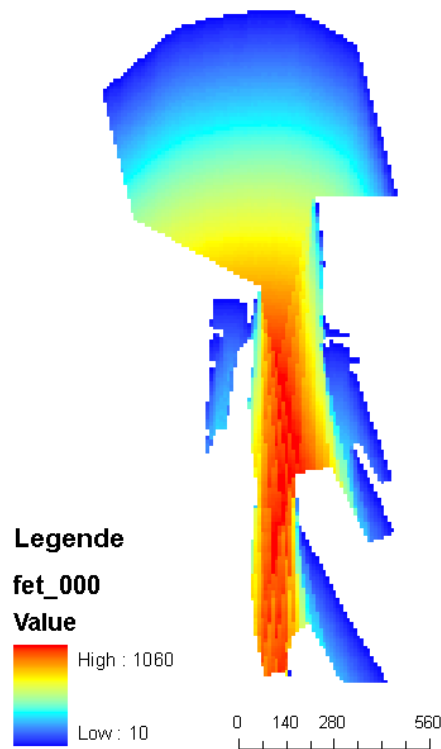
De lokale invloed van de wind op de golfhoogte in de haven wordt in eerste instantie begroot aan de hand van een paar eenvoudige methodes voor de berekening van de strijklengte, afkomstig uit de Shore Protection Manual (1984). Er wordt rekening gehouden met de beperkte breedte van het aangeblazen wateroppervlak, dit resulteert in een effectieve strijklengte. Volgens de eenvoudigste methode wordt deze bepaald zoals aangegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1: Eenvoudigste methode berekening effectieve strijklengte (voor aanblaasvlak met beperkte breedte).

Bijvoorbeeld toegepast voor Oostende: afstand halve maan – Demey sluis = 1400m; gemiddeld is $b = 160\text{m}$: effectieve strijklengte is $0.3 \times$ echte strijklengte. Aan de Demey sluis betekent dit een effectieve strijklengte van $1400\text{m} \times 0.3 = 420\text{m}$.

Voor een meer complexe geometrie, zoals deze van Oostende, is de eenvoudige methode moeilijk toepasbaar. Een betere methode voor de bepaling van de effectieve strijklengte bestaat erin per punt 9 radialen te beschouwen in een cirkelboog van 24° , met 12° langs elke kant van de windrichting en 3° tussen elke radiaal. De radialen starten in het beschouwde punt en eindigen aan de landgrens. De effectieve strijklengte is dan een gewogen gemiddelde van de lengtes van de radialen, waarbij de weging gebeurt met de cosinus van de hoek tussen de radiaal en de windrichting. Bv. voor de windrichting NNW is de effectieve strijklengte aan de Demey sluis 1060 m (cf. Figuur 3-2), twee keer zo groot als deze berekend volgens de eerste, meest eenvoudige methode.



Figuur 3-2: Effectieve strijklengtes [m] voor windrichting NNW berekend volgens de SPM methode (SPM 1984)

3.2. Golfparameters

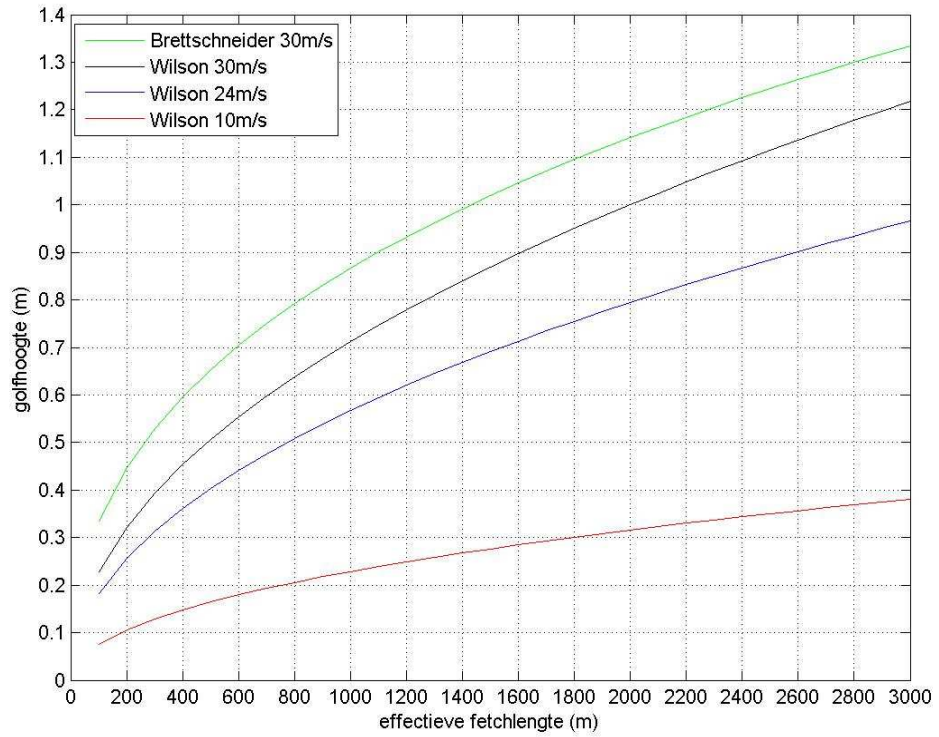
Om de golfparameters met deze strijklengtes te bepalen wordt Wilson aanbevolen voor korte strijklengtes (van der Meer, et al. 2002). De formules van Wilson zijn gegeven door:

$$\begin{array}{ccc}
 \underbrace{10^{-1} < \frac{gX}{U_{10}^2}} & & \underbrace{\frac{gX}{U_{10}^2} \rightarrow 0} \\
 \frac{H_s g}{U_{10}^2} = & 0.26 \tanh \left(0.01 \left(\frac{gX}{U_{10}^2} \right)^{0.5} \right) & 2.6 \times 10^{-3} \left(\frac{gX}{U_{10}^2} \right)^{0.5} \\
 \frac{T_s g}{U_{10}} = & 1.4 \, 2\pi \tanh \left(0.0436 \left(\frac{gX}{U_{10}^2} \right)^{0.33} \right) & 6.02 \times 10^{-2} \, 2\pi \left(\frac{gX}{U_{10}^2} \right)^{0.33}
 \end{array}$$

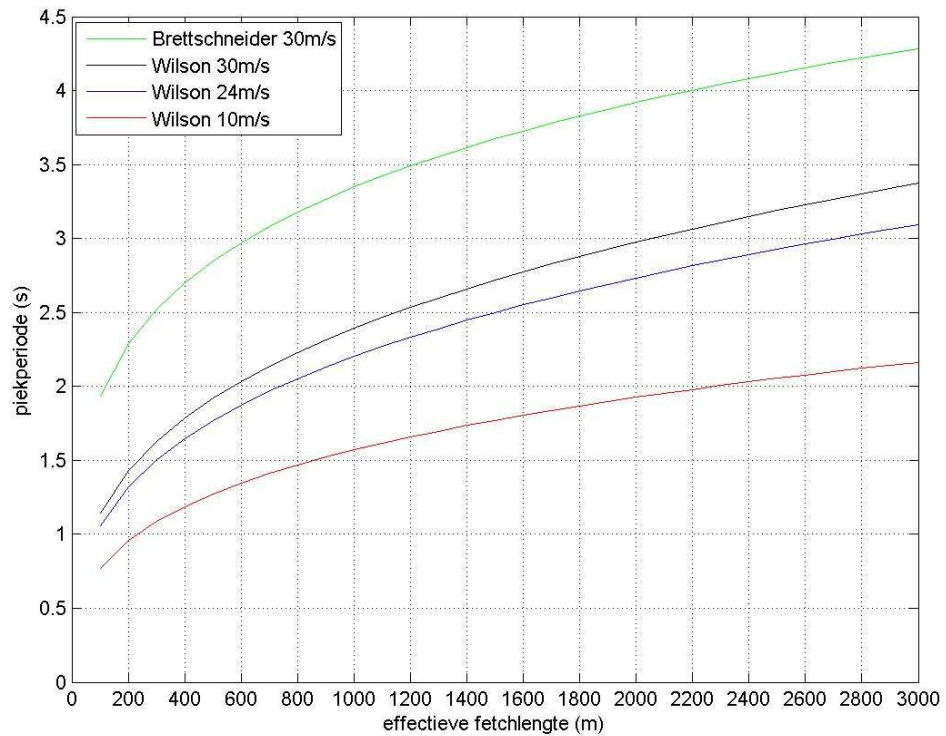
Daarin is H_s de significante golfhoogte, g de zwaartekrachtversnelling, U_{10} de windsnelheid op 10 m hoogte boven het maaiveld, T_s de significante golfperiode, X de strijklengte.

Figuur 3-3 en Figuur 3-4 tonen respectievelijk de golfhoogte en golfperiode i.f.v. de effectieve strijklengte berekend volgens Wilson (en Brettschneider ter vergelijking). Ter info:

- 30m/s: 1000 jarige windsnelheid vanuit NNW;
- 24m/s: reductie van 20% op die windsnelheid omdat windsnelheid aan land 20% kleiner is (cf. paragraaf 2);
- 10m/s: orde van grootte van frequente stormen.



Figuur 3-3: Significante golffoogte $H_{1/3}$ in functie van de effectieve strijklengte, bepaald volgens Wilson en Brettschneider.



Figuur 3-4: Piekperiode T_p in functie van de effectieve strijklengte, bepaald volgens Wilson en Brettschneider.

3.2.1. Eenvoudige methode + Wilson

Passen we bovenstaande resultaten toe op de haven van Oostende, uitgaande van geen golven aan de ingang, dan worden met de effectieve strijklengtes uit Tabel 3-1 resultaten bekomen met Wilson voor windrichting NNW in Tabel 3-2 en Tabel 3-3.

Tabel 3-1: Effectieve strijklengtes van locatie tot toegang

Locatie	y-coörd [m]	Afstand toegang [m]	tot	Eff. Strijklengte [m]
Toegang	1950	0		0
NSYC	1080	870		261
Station	710	1240		372
Demey sluis	120	1830		549

Tabel 3-2: **Golfhoogte $H_{1/3}$** door golfgroei van de haventoeegang tot locatie, bij afwezigheid golven aan de toegang.

H1/3 [m]	u10 = 10m/s	u10 = 24m/s	u10 = 30m/s
Toegang	0	0	0
NSYC	0.12	0.29	0.37
Station	0.14	0.35	0.44
Demey sluis	0.17	0.42	0.53

Tabel 3-3: **Golfperiode $T_{1/3}$** door golfgroei van de haventoeegang tot locatie, bij afwezigheid golven aan de toegang.

T1/3 [s]	u10 = 10m/s	u10 = 24m/s	u10 = 30m/s
Toegang	0	0	0
NSYC	0.97	1.33	1.44
Station	1.08	1.49	1.62
Demey sluis	1.21	1.69	1.83

Indien er wordt verondersteld dat er aan de toegang al 1m hoge golven zijn (representatief voor gemiddelde golf in de haven) dan blijkt de toename in golfhoogte veel kleiner te zijn, zie Tabel 3-5.)

Met Wilson golven van 1m op de rand opleggen wordt bekomen door de strijklengte te verlengen (strijklengte voor de toegang), zie Tabel 3-4.

Tabel 3-4: Vermeerdering van de effectieve strijklengte om aan de haventoeegang een golfhoogte van 1m te bekomen.

Windsnelheid [m/s]	Vermeerdering Strijklengte [m]
10	30532
24	3226
30	1999,5

Tabel 3-5: Golfgroei van de haventoeegang tot locatie, bij 1m hoge golven aan de toegang: **golfhoogte**.

H1/3 [m]	u10 = 10m/s	u10 = 24m/s	u10 = 30m/s
----------	-------------	-------------	-------------

Toegang	1.0000	1.0000	1.0000
NSYC	1.0032	1.0379	1.0614
Station	1.0045	1.0535	1.0864
Demey sluis	1.0066	1.0780	1.1250

Tabel 3-6: Golfgroei van de haventoeegang tot locatie, bij 1m hoge golven aan de toegang: **golfperiode**.

T1/3 [s]	u10 = 10m/s	u10 = 24m/s	u10 = 30m/s
Toegang	3.6912	2.9304	2.7545
NSYC	3.6986	3.0005	2.8617
Station	3.7018	3.0292	2.9047
Demey sluis	3.7068	3.0736	2.9703

3.2.2. Methode voor complexe geometrie (evt. + Wilson)

De strijklengtes per windrichting zijn bepaald zoals in Figuur 3-2 (Rohweder, et al. 2008) (SPM 1984). De golfparameters worden in hetzelfde model bepaald volgens de formules uit (CEM 2008). Deze formules wijken af van Wilson, maar de algemene trends in de haven kunnen berekend worden en kwalitatief vergeleken worden met de SWAN simulaties uit paragraaf 3.3. Wilson geeft hogere waarden dan de CEM, maar zou toch beter geschikt zijn voor korte strijklengtes (van der Meer, et al. 2002).

De significante golfhoogtes H_{m0} , berekend volgens CEM in elk punt van de haven vertrekkende van de strijklengtes voor een complexe geometrie per windrichting, staan in Bijlage 6.3.

Vertrekkend van de strijklengtes uit Figuur 3-2 en Wilson toepassen op de maximale strijklengte toont aan dat grotere golfhoogtes bekomen worden met deze methode (dankzij de grotere effectieve strijklengtes). Verderop zal blijken dat deze methode zeer goede overeenkomsten vertoont met resultaten uit SWAN.

Opmerking: deze methode is nog steeds een vereenvoudigde methode in die zin dat ze geen rekening houdt met refractie, shoaling, breking, diffractie en reflectie.

3.3. SWAN

Met Swan werden simulaties gedaan voor:

- Simulatie 1: enkel 1000 jarige windsnelheid (24m/s)
- Simulatie 2: enkel 1000 jarige golfhoogte op de rand van het model (5m) (representatief voor Simwave en het fysisch model)
- Simulatie 3: wind en golven gecombineerd.

De bedoeling is om enerzijds Wilson en Swan te vergelijken en anderzijds te kijken of met simulatie 1 en 2 samen te nemen, hetzelfde resultaat verkregen wordt als voor simulatie 3.

Wanneer het golvenspectrum in SWAN wordt geparametriseerd door een Jonswap spectrum, kan men er voor opteren om de golfperiode te karakteriseren door de gemiddelde golfperiode, deze stemt overeen met T_{m01} . Het feit dat SWAN niet geschikt is voor de dieper liggende stukken van de haven van Oostende is hier niet belangrijk, omdat het er om gaat of beide al of niet samengeteld kunnen worden. Wat betreft de windgroei is het minder erg dat diffractie in SWAN niet wordt meegenomen, aangezien de groei pas echt in de haven, dus voorbij de koppen begint.

Vooran in de haven wordt het golfveld gedomineerd door laagfrequente golven die de haven binnendringen door de haventoeegang. Achteraan in de haven wordt het golfveld gedomineerd door hoogfrequente golven die door het lokale windveld in de haven worden opgewekt. Naarmate men zich verplaatst van vooran in de haven tot achteraan in de haven stijgt het

belang van de hoogfrequente component in het totale golfspectrum (cf. Figuur 3-5, Figuur 3-10 en Figuur 3-11).

De samenstelling van de SWAN run met enkel golfrandvoorwaarden en de run met enkel wind, komt min of meer overeen met de run waarin zowel golfrandvoorwaarden als wind worden opgelegd (cf. Figuur 3-8). De afwijking op de golfhoogte is in de orde van enkele centimeters (onderschatting, cf. Figuur 3-9 en Tabel 3-7), de afwijking op de gemiddelde golfperiode T_{m01} is iets groter en loopt op tot 1s onderschatting ter hoogte van NSYC (cf. Tabel 3-8).

Opgelegde randvoorwaarden: Jonswap spectrum met $H_{m0} = 5\text{m}$ en $T_p = 12\text{s}$.

Opgelegde windkarakteristieken: windsnelheid op 10m hoogte is 24m/s uit het NNW

Tabel 3-7: H_{m0} [m] per SWAN model met en zonder golven/wind + combinatie vergeleken

H_{m0} [m]	u10= 24m/s H = 5m	u10= 0m/s H = 5m	u10= 24m/s H = 0m	Kwadr. Som
Toegang	4.97	4.93	0.21	4.93
NSYC	1.63	1.48	0.62	1.60
Station	0.92	0.71	0.57	0.91
Demey sluis	0.67	0.29	0.62	0.68

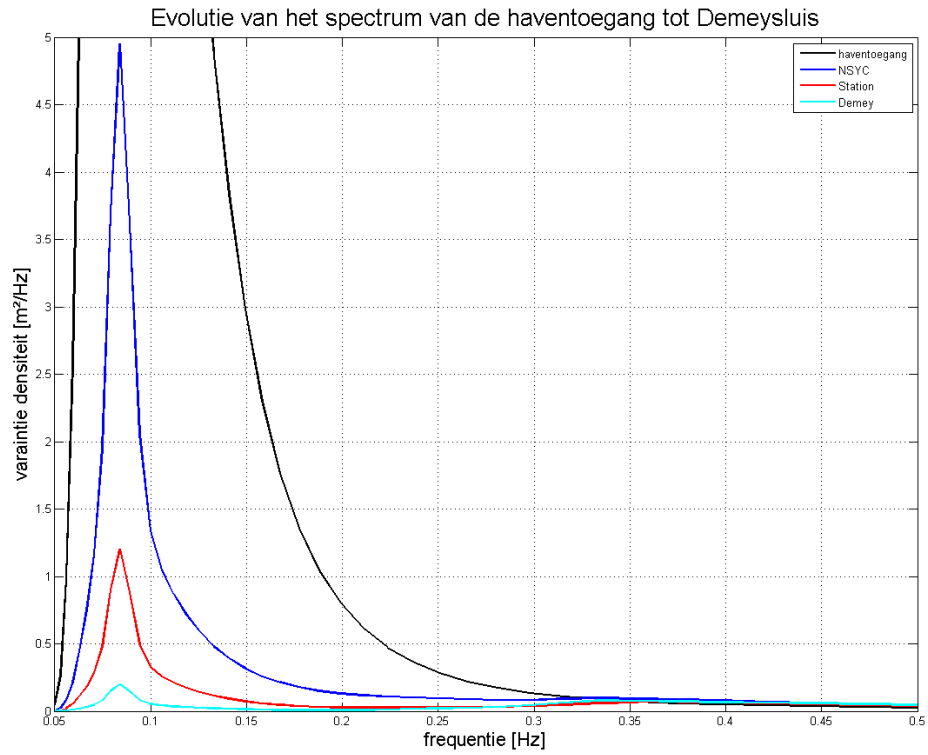
Tabel 3-8: T_{m01} [s] per SWAN model met en zonder golven/wind + combinatie vergeleken

T_{m01} [s]	u10= 24m/s H = 5m	u10= 0m/s H = 5m	u10= 24m/s H = 0m	Samengevoegd
Toegang	9.77	9.98	1.83	9.90
NSYC	6.41	9.43	1.85	5.85
Station	4.01	9.74	1.85	3.62
Demey sluis	2.36	9.10	1.87	2.18

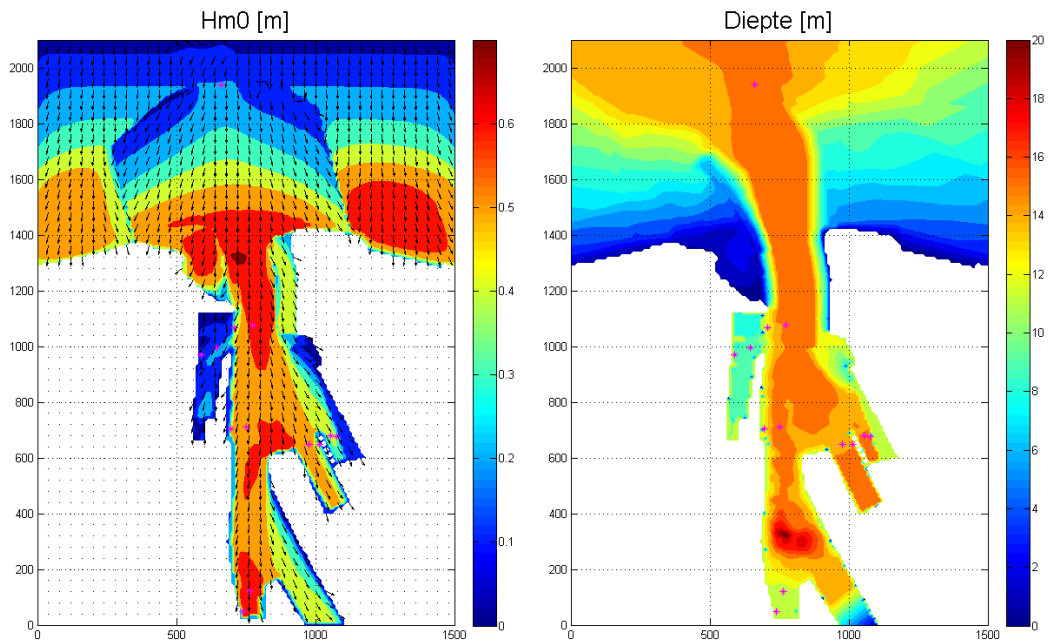
In vergelijking met de Wilson formule, in combinatie met de effectieve strijklengtes volgens de eenvoudige methode, zijn de golfhoogtes berekend met SWAN hoger waarbij geen golfrandvoorwaarden worden opgelegd. Ook de gemiddelde golfperiodes worden overschat. In de SWAN berekeningen is T_{m01} redelijk constant, terwijl bij Wilson een toename in functie van de strijklengte optreedt.

De Wilson formule toegepast op de effectieve strijklengtes volgens de SPM methode, echter, toont zeer goede overeenkomsten met de SWAN resultaten. Bijvoorbeeld: voor de Demey sluis locatie geldt een effectieve strijklengte van 1060m (windrichting NNW). Toepassen van Wilson levert een H_{m0} op van 0.57m (voor een 1000-jarige windsnelheid aangepast naar land). In SWAN levert dit een golfhoogte op van 0.55m aan de Demey sluis voor dezelfde condities (cf. paragraaf 3.4).

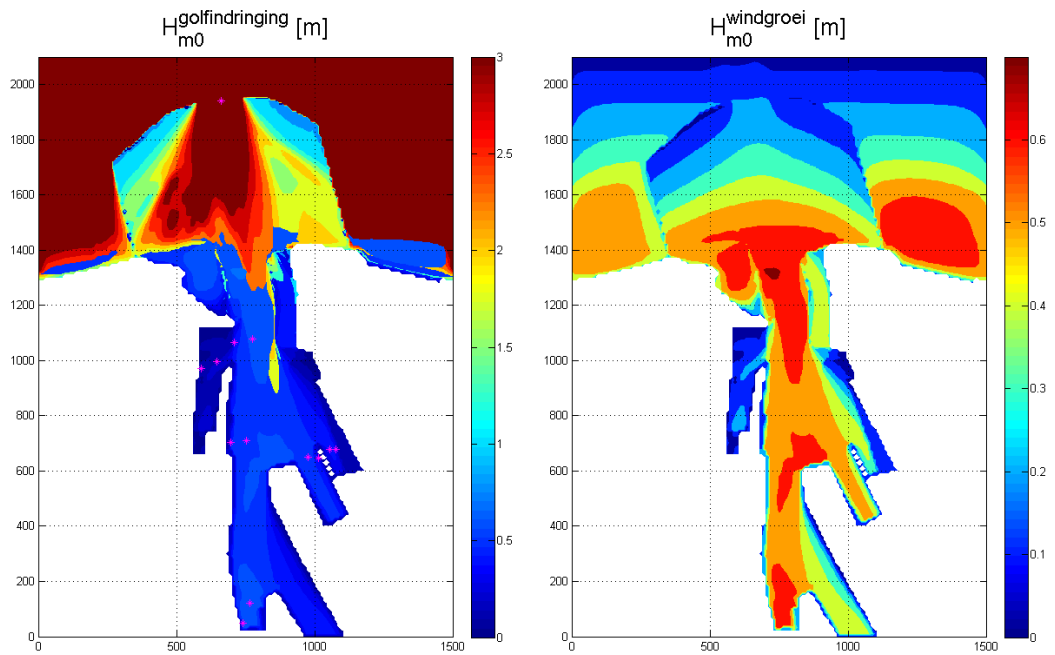
SWAN, met instellingen gegeven in Bijlage 6.4, lijkt dus de beste tool te zijn om golven lokaal gegenereerd door wind in de haven te voorspellen, aangezien ook met andere fysische processen rekening gehouden wordt, zoals refractie, shoaling en breking.



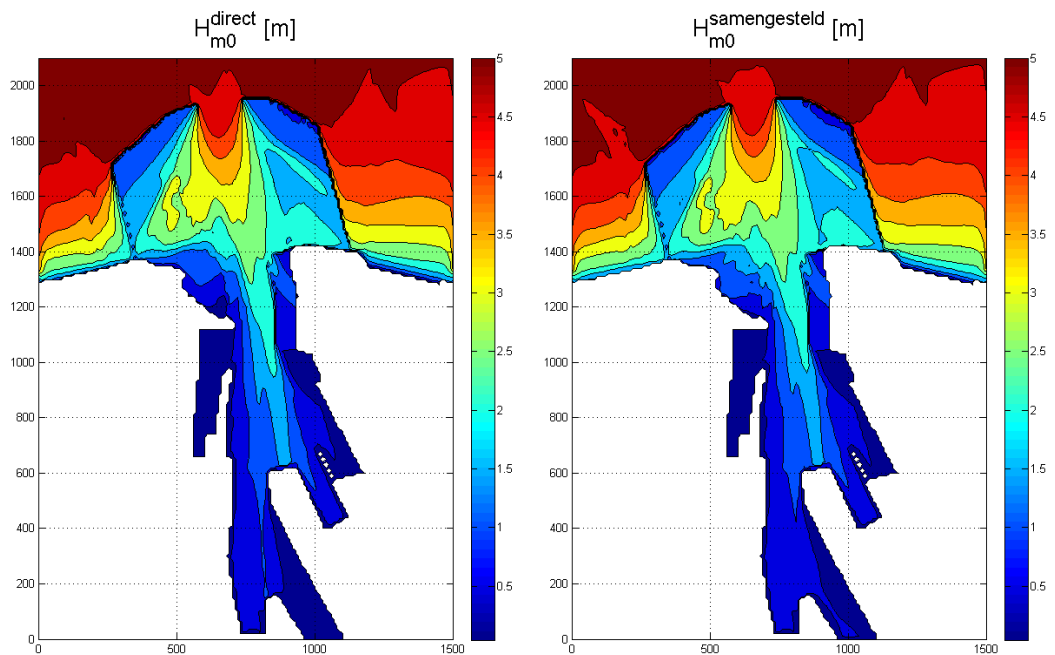
Figuur 3-5: $u_{10} = 24\text{m/s}$, $H_{m0} = 5\text{m}$ op de rand van het domein



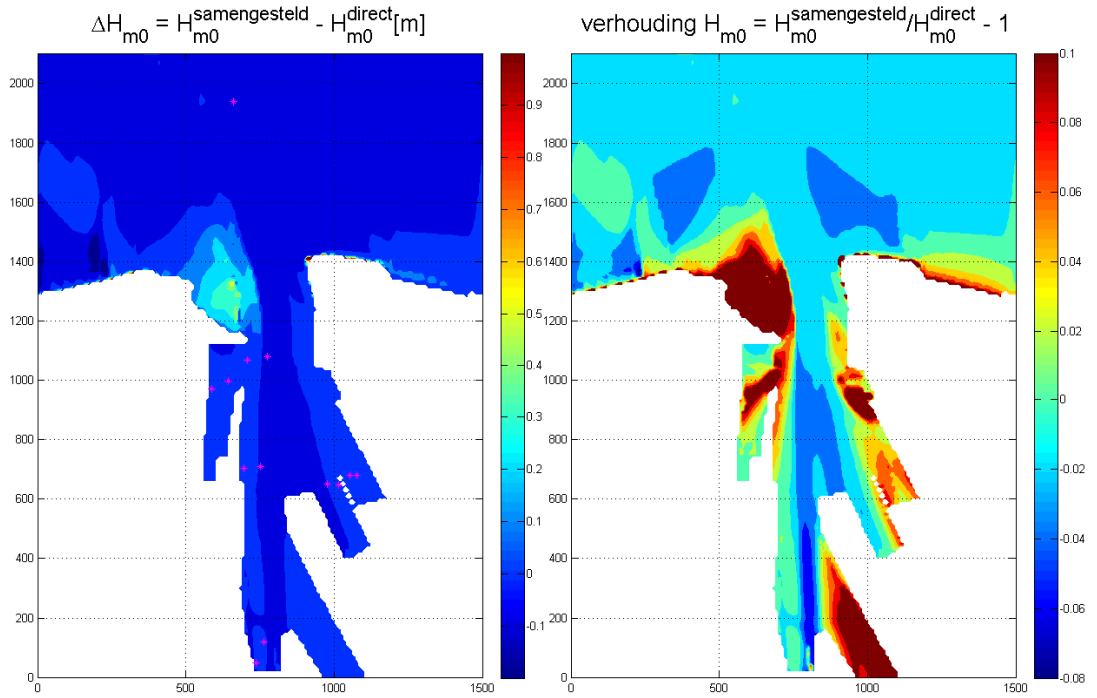
Figuur 3-6: Opgelegde golfrandvoorwaarden: géén; opgelegde windkarakteristieken; 24m/s



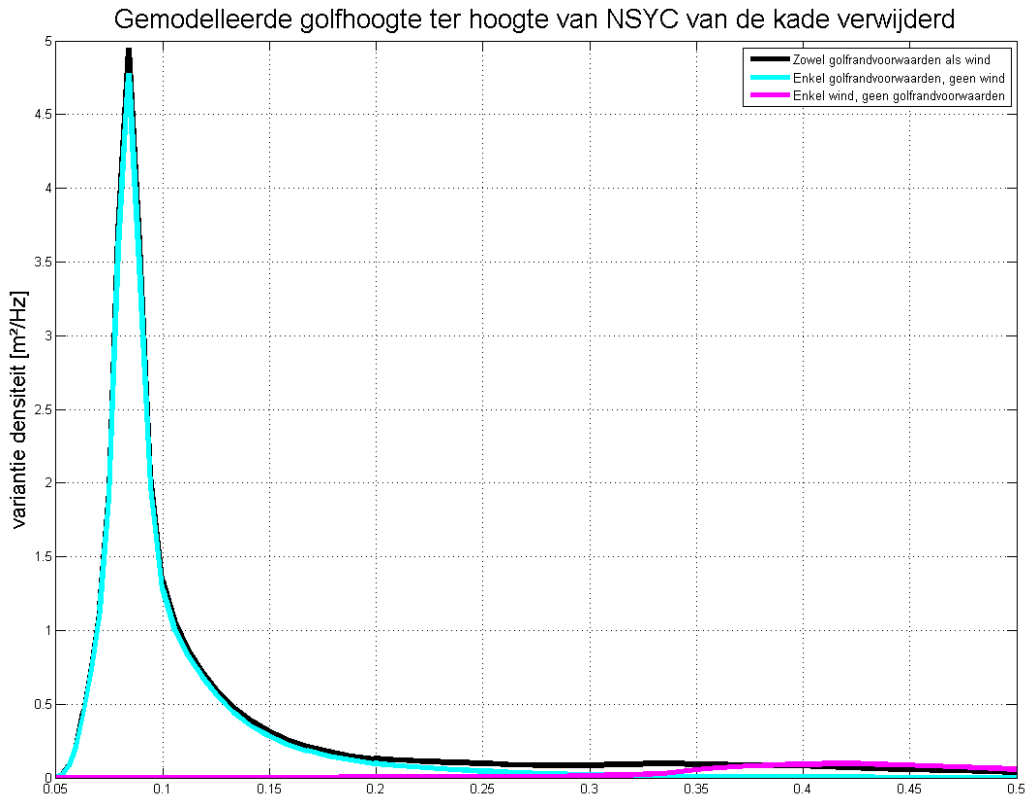
Figuur 3-7: Golfhoogte in de haven bij indringing van een 5m hoge golf opgelegd aan de rand van het domein zonder wind (links). Golfhoogte in haven bij windgroei van de golven zonder dat er golven worden opgelegd aan de rand van het domein.



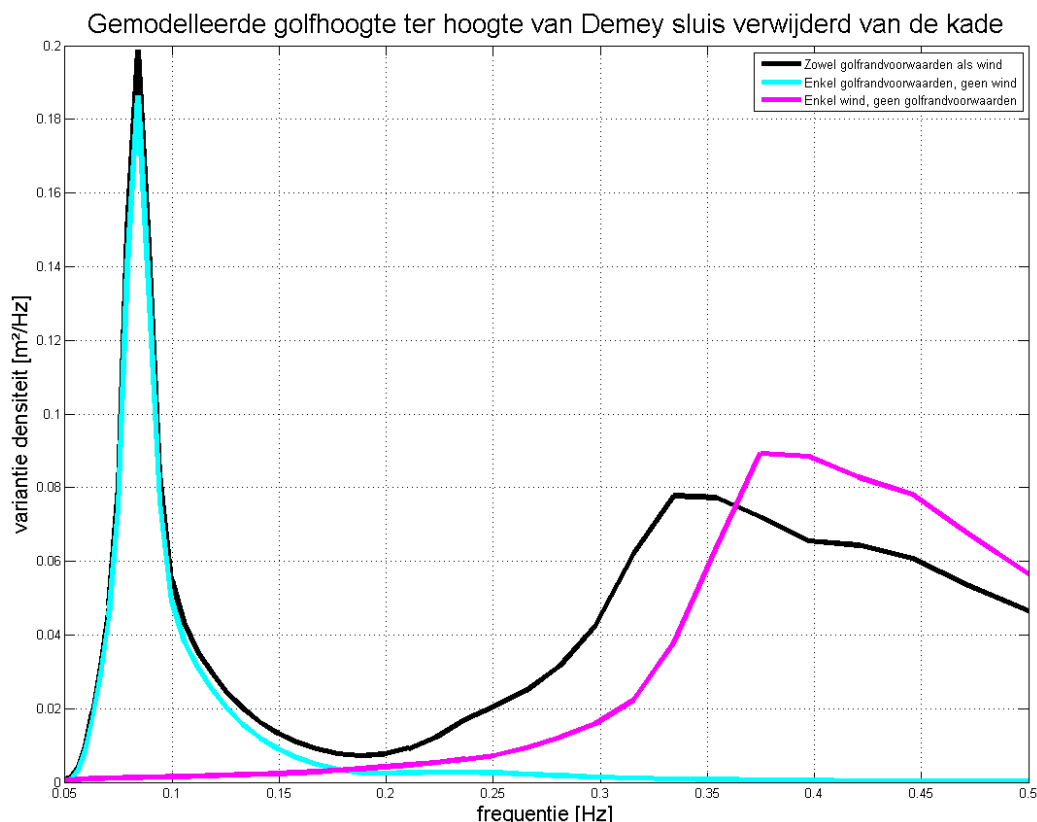
Figuur 3-8: Golfhoogte in de haven bij indringing van een 5m hoge golf opgelegd aan de rand van het domein onderhevig aan de wind (links). Golfhoogte in haven bij samenstelling van de run met golfrandvoorwaarden zonder wind en de run zonder golfrandvoorwaarden met wind.



Figuur 3-9: Verschil (links) in en verhouding (rechts) van golfhoogte wanneer de golfrandvoorwaarden en wind gezamenlijk worden opgelegd en wanneer golfrandvoorwaarden en wind afzonderlijk worden opgelegd en daarna samengesteld.



Figuur 3-10: Golfspectrum aan NSYC uit SWAN.



Figuur 3-11: Golfspectrum aan Demey sluis uit SWAN.

3.4. Lokale golfgroei in haven door extreme wind (1000-jarige storm) met SWAN

De hydrodynamische randvoorwaarden langsheen de kaaimuren van een haven dienen gekend te zijn voor het ontwerp van maatregelen om de veiligheid tegen extreme stormen (met 1000 jaar retour periode) te kunnen verzekeren.

Voor de gevalstudie Oostende werden deze randvoorwaarden bepaald met behulp van numerieke (Mild Slope en Boussinesq) en fysische modellering. De resultaten van deze beide modellen houden echter geen rekening met eventuele golfgroei door wind.

In het voorgaande is bewezen dat SWAN vrij goed overeenkomt met Wilson wat betreft het voorspellen van golfgroei t.g.v. wind. Er werd ook aangetoond dat opsplitsen van modellering van laagfrequente golven en windgolven aanvaardbare resultaten geeft na ze kwadratisch op te tellen en er de wortel van te nemen. Daarom is beslist de golfgroei in de haven van Oostende onder extreme windsnelheden te bepalen met SWAN.

SWAN is niet in staat diffractie goed te simuleren. In dit geval worden echter enkel windgolven beschouwd die per definitie een grote directionele spreiding hebben (grootteorde 30°) en lokaal in de haven zelf worden gegenereerd zodat diffractie een minder grote rol speelt.

Om dit te testen werd voor de gevalstudie Oostende een SWAN simulatie uitgevoerd voor elke relevante windrichting met bijhorende waterstand en windsnelheid. Op de rand wordt geen golfhoogte opgelegd, zodat alle golven die voorkomen in het model enkel ten gevolge van wind zijn. Voor de windsnelheden wordt uitgegaan van de statistiek die is opgesteld voor de 2-uurwaarden op diep water (IMDC, 2006). Daarop zijn echter opeenvolgend 2 reductiefactoren toegepast: 0.90 en 0.80. De eerste is een factor die de windsnelheid reduceert naar 10m hoogte boven het wateroppervlak (logaritmisch profiel) zodat deze rechtstreeks als invoer voor SWAN kan worden gebruikt. De andere is een reductiefactor die rekening houdt met landeffecten.

De randvoorwaarden zijn in Tabel 3-9 samengevat.

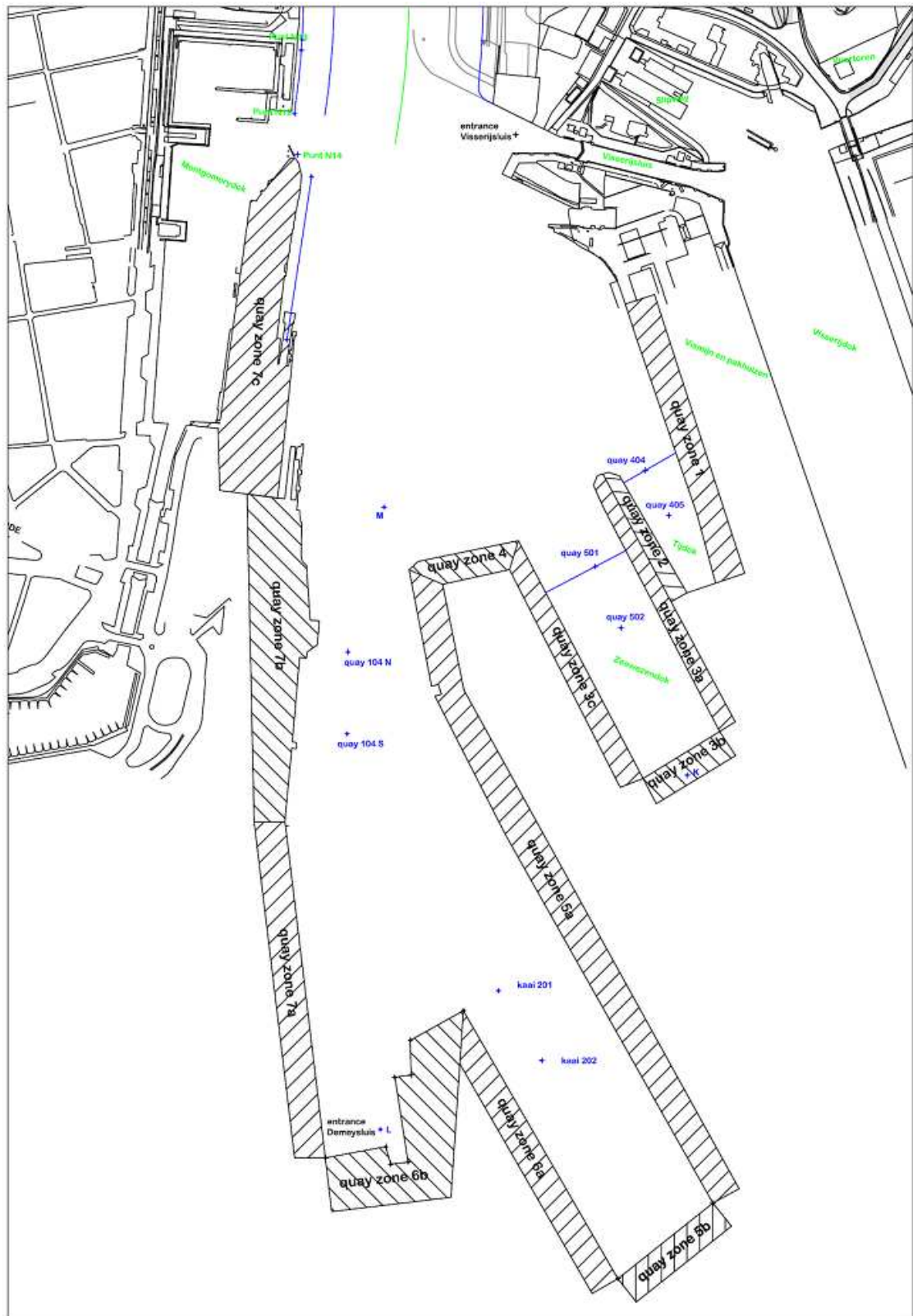
Tabel 3-9: randvoorwaarden van de SWAN simulaties met enkel wind (RP = 1000 jaar)

				waterstand
windrichting	wvs	wvs(10m)	wvs(land)	incl. zsr
[-]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m TAW]
NO	28.33	25.5	20.4	6.00
NNO	30.46	27.4	21.9	6.40
N	30.57	27.5	22.0	7.00
NNW	30.77	27.7	22.2	7.00
-37°	29.98	27.0	21.6	7.05
NW	29.98	27.0	21.6	7.05
WNW	33.43	30.1	24.1	6.90
W	35.53	32.0	25.6	6.70

Opmerking: bovenstaande richtingen horen bij diep water golfrichtingen. Wind wordt verondersteld dezelfde richting te behouden van offshore naar nearshore, terwijl golven veranderen van richting in ondiep water door refractie. Wanneer gecombineerd wordt met de numerieke of fysische model resultaten moet hiermee rekening gehouden worden.

Het bestaande SWAN model voor configuratie T2 voor de haven van Oostende is gebruikt. Golfgeneratie aan de rand van het model is uitgeschakeld zodat enkel golven door wind worden gegenereerd. De transmissiecoëfficiënt van de nieuwe oostelijke en westelijke havendammen zijn op 0 gezet om de beschikbare strijklengte realistisch te houden (een transmissiecoëfficiënt verschillend van 0 zou betekenen dat ook een gedeelte van de strijklengte zeewaarts van de havendammen zou worden meegerekend, m.a.w. er wordt verondersteld dat windgolven geen transmissie over de havendammen ondergaan). Het frequentiegebied van de spectra in het model is ook uitgebreid zodat hoogfrequente golven in het model mogelijk worden.

De SWAN simulatieresultaten worden gegeven volgens de zones gedefinieerd in kader van de SimWave simulaties (UGent 2010).



Figuur 3-12: Opdeling van de kaaimuren in zones, gedefinieerd door (UGent 2010).

De H_s -contour plots zijn weergegeven in Bijlage 6.3. Zoals eerder vermeld, zijn in de bijlage ook de significante golfhoogtes, gebaseerd op effectieve strijklengtes volgens de SPM (1984) methode, weergegeven per windrichting ter validatie van SWAN. Goede overeenkomsten worden waargenomen. De absolute waarden van de significante golfhoogte echter zijn lager. Gebruik van Wilson voor de maximale strijklengtes bekomen volgens de SPM (1984) methode per windrichting (bv. voor NNW: $l_{eff} = 1060$ m aan kaaizone 4 $\rightarrow H_{m0} = 0.57$ m en T_p

= 2.2 s) echter toont zeer goede overeenkomsten met het resultaat van SWAN (NNW: $H_{m0} = 0.58$ m en $T_p = 2.2$ s).

Opmerking: De resultaten van het SWAN model uit deze nota worden weerhouden omdat deze vernieuwd werden met het uitgebreid SWAN model door IMDC (2011). Voor de definitieve resultaten wordt dan ook naar die nota verwezen.

4. CONCLUSIE

Een vergelijking van de gemeten windsnelheden tussen 2 havens aan land (Oostende en Zeebrugge) samen met de conclusie van een eerdere vergelijking tussen Zeebrugge en offshore windgegevens, heeft aangetoond dat landeffecten zorgen voor een verlaging van de windsnelheid in havens in vergelijking met de offshore windsnelheid. Een factor van 0.80 kan worden toegepast op de offshore extreme windsnelheden.

Aangezien zowel de numerieke als fysische modellen die ingezet worden voor de bepaling van het golfklimaat in de havens, geen rekening houden met golfgroei door extreme wind, is onderzocht of superpositie van puur lokaal door wind gegenereerde golven met de golven zoals bepaald met de numerieke en fysische modellen, ter bepaling van het totale extreme golfklimaat een verantwoorde methode is. SWAN is daarvoor ingezet.

De resultaten wijzen uit dat het verschil tussen de superpositie en de gelijktijdige simulatie van opgelegde golven en windgegenereerde golven in SWAN slechts enkele centimeters verschil geeft voor de significante golfhoogte (onderschatting). Voor de piekperiode kan deze onderschatting oplopen tot 1 seconde, maar de grootteorde blijft dezelfde. Superpositie van golfmodel resultaten zonder wind en windgegenereerde resultaten uit een ander model is dus een verantwoorde methode die voldoende nauwkeurige resultaten oplevert.

Ten slotte is ook onderzocht welk model meest geschikt is om de windgegenereerde golven in havens te bepalen. Van der Meer (2002) raadt aan de formules van Wilson toe te passen voor korte strijklengtes ter bepaling van de golfkarakteristieken op basis van een effectieve strijklengte. De Shore Protection Manual (1984) beschrijft een methode die het mogelijk maakt om in elk punt van een complexe geometrie (zoals een haven) de effectieve strijklengte te bepalen. Toepassen van deze methode in combinatie met Wilson voor de bepaling van de golfparameters geeft zeer gelijkaardige resultaten als deze van een SWAN simulatie waarbij enkel wind wordt opgelegd (voor extreme windsnelheden).

Aangezien SWAN ook nog met vele andere fysische processen rekening houdt, is dit het aanbevolen model om de windgegenereerde golven te simuleren in de havens voor extreme windsnelheden. De resultaten van dergelijke SWAN simulaties kunnen dan gebruikt worden voor de superpositie met de extreme golfresultaten uit het fysisch of numeriek model zodat het totale extreme golfklimaat in de haven wordt bekomen.

5. REFERENTIES

Afdeling Kust. *Mail Stefaan Geysens 09/06/2011*. 2011

CEM. *Coastal Engineering Manual*. USACE, 2008.

IMDC (2011). *Invloed van de wind op het golfklimaat in de haven van Oostende: uitbreiding*. I/NO/11213/11.167/VGR/, Versie 3.0

Rohweder, J., et al. „Application of Wind Fetch and Wave Models for Habitat Rehabilitation and Enhancement Projects.” *USGS*, 2008.

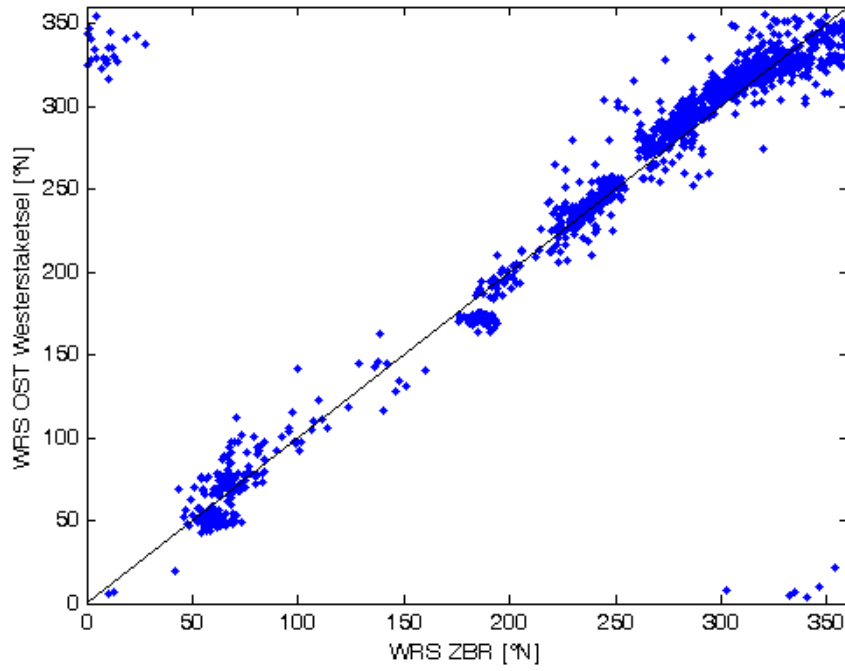
SPM. *Shore Protection Manual*. USACE, 1984.

UGent. „Determination of disturbance coefficients kd near quay walls using partitioning.” 2010. DBO107/96, Annex to DBO107/90.

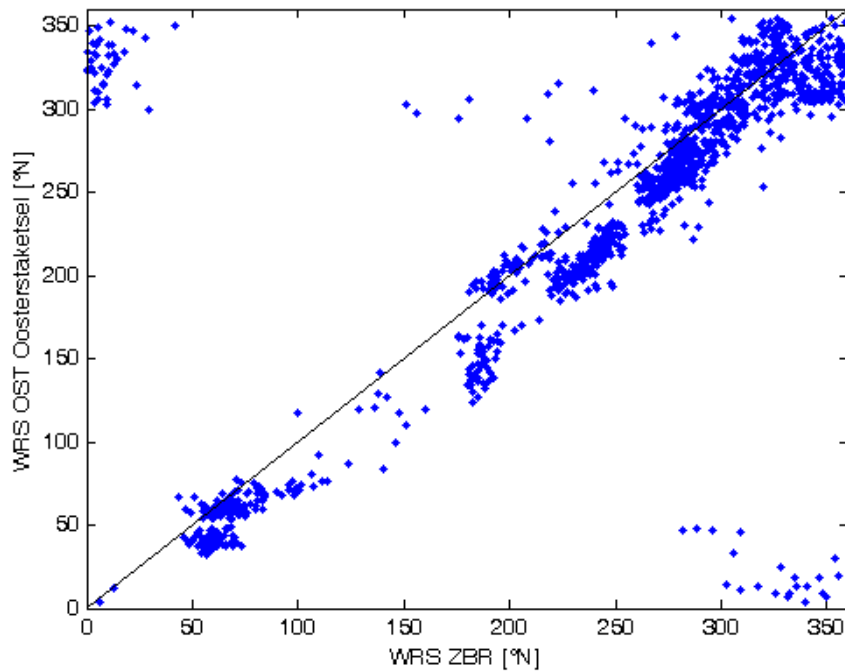
van der Meer, J. W., J. W. Langenberg, M. Klein Breteler, D. P. Hurdle, and F. den Heijer. “Wave Boundary Conditions and Overtopping in Complex Areas.” 2002.

6. BIJLAGEN

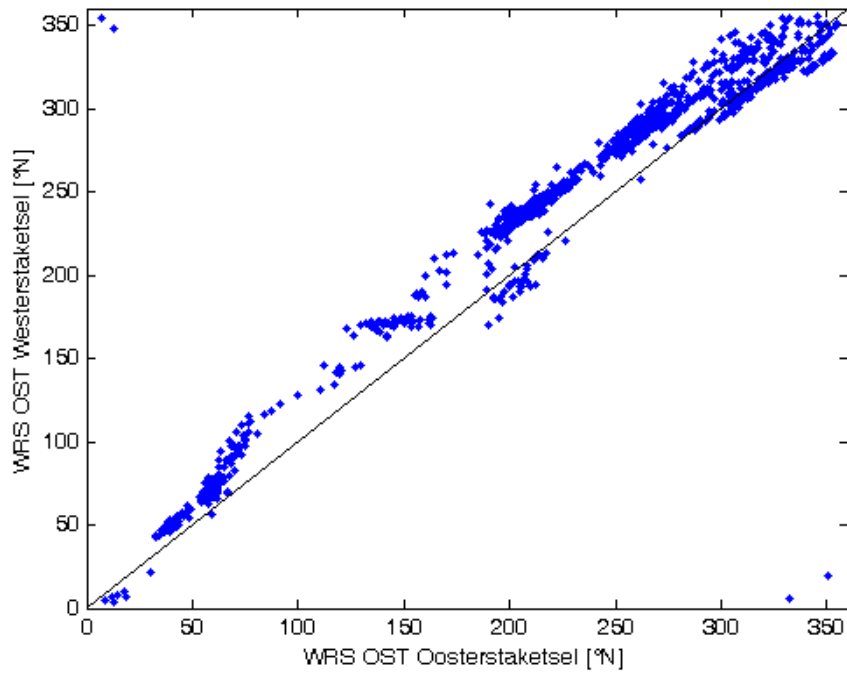
6.1. Correlaties windrichtingen



Figuur 6-1: correlatie windrichting westerstaketsel vs. ZBR.



Figuur 6-2: correlatie windrichting oosterstaketsel vs. ZBR.

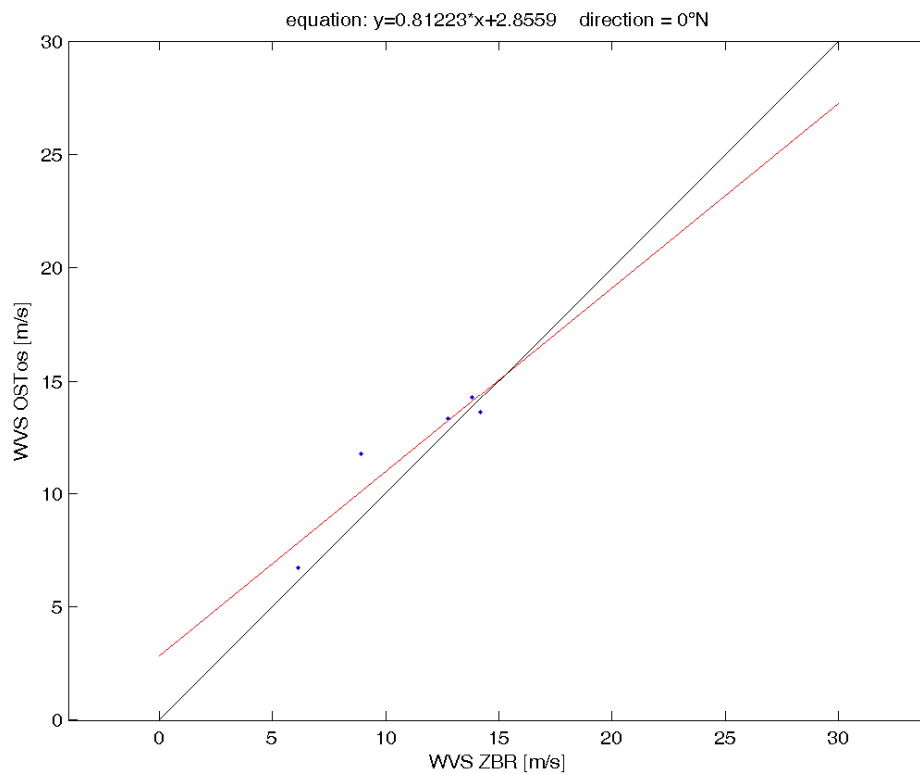


Figuur 6-3: correlatie windrichting westerstaketsel vs. oosterstaketsel.

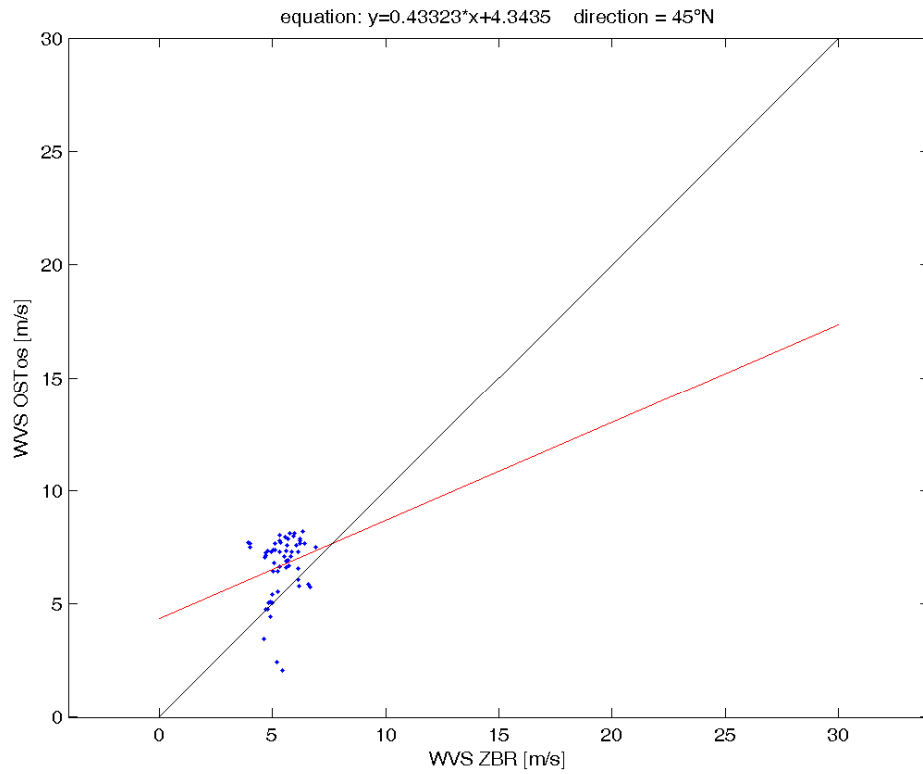
6.2. Correlaties windsnelheden

6.2.1. Oosterstaketsel – Zeebrugge

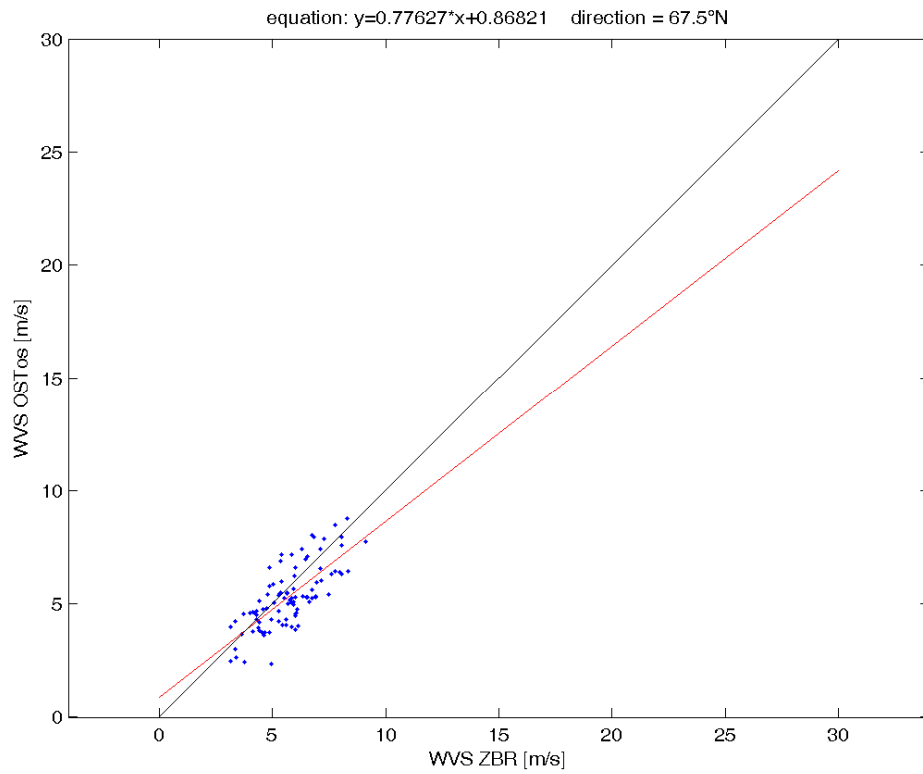
Enkel de relevante richtingssectoren (=aanlandige) worden getoond. Sectoren zonder data (=lege grafiek) worden weggelaten (e.g. sector rond 22.5°N).



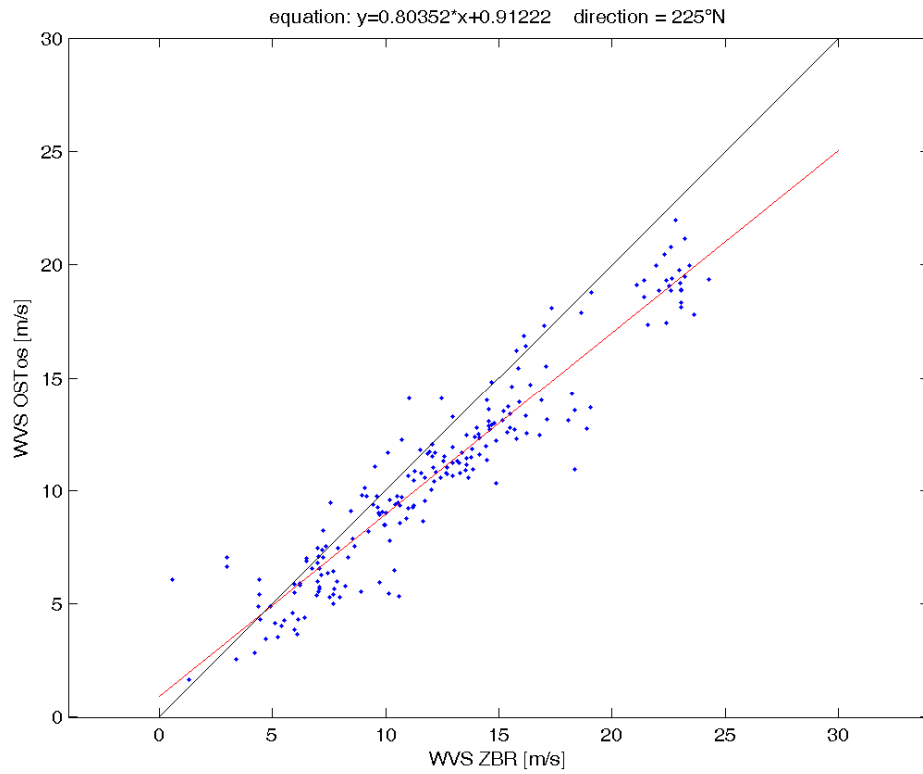
Figuur 6-4: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 0°



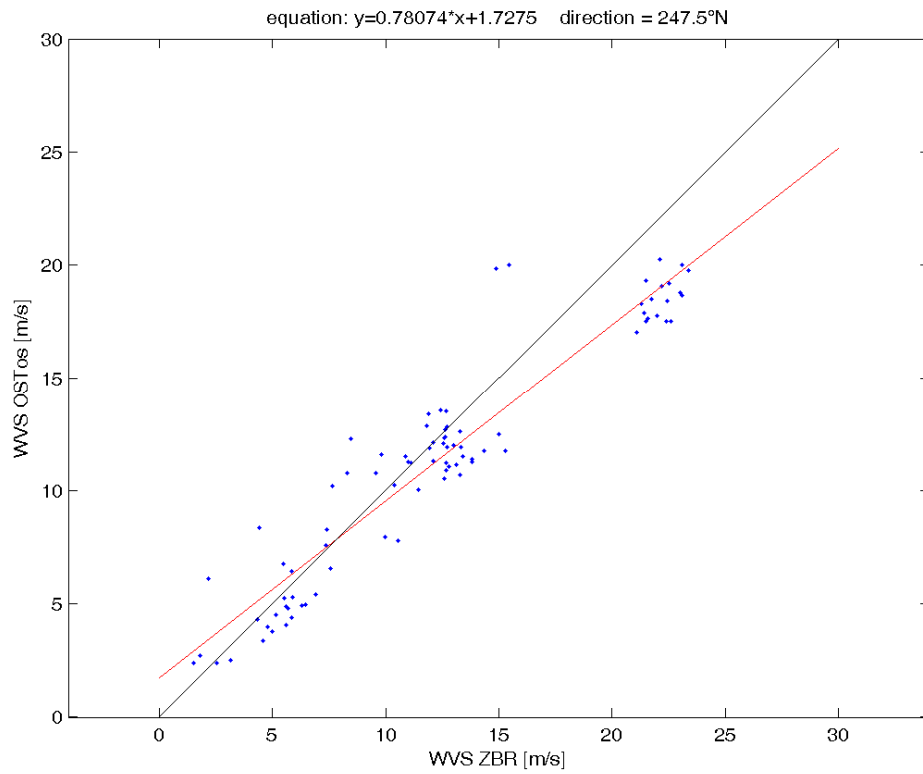
Figuur 6-5: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 45°



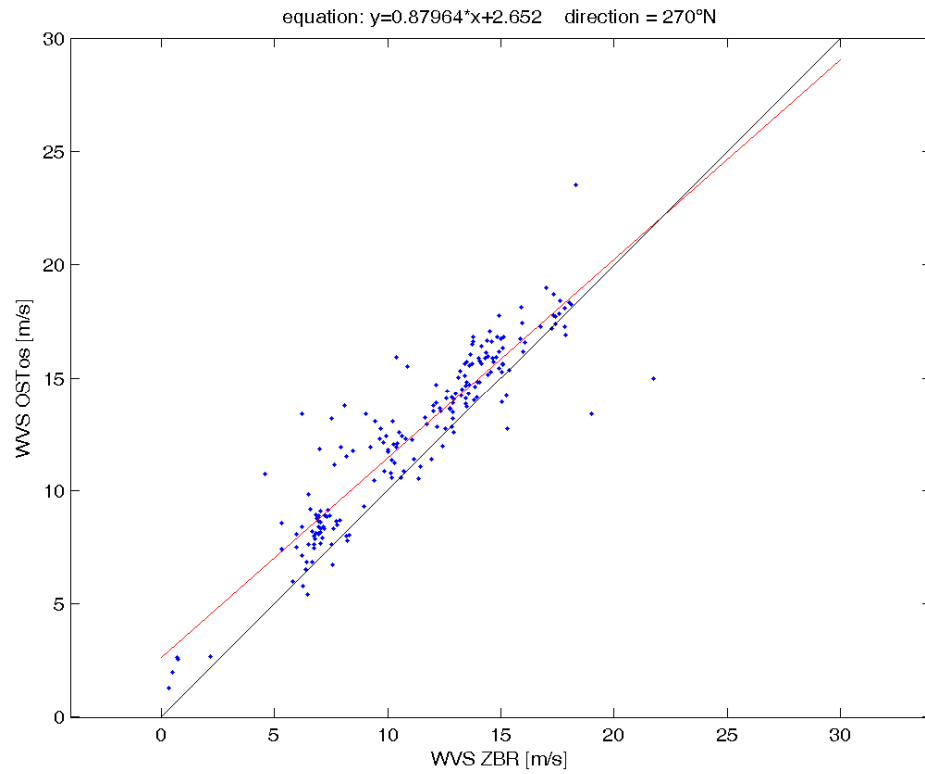
Figuur 6-6: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 67.5°



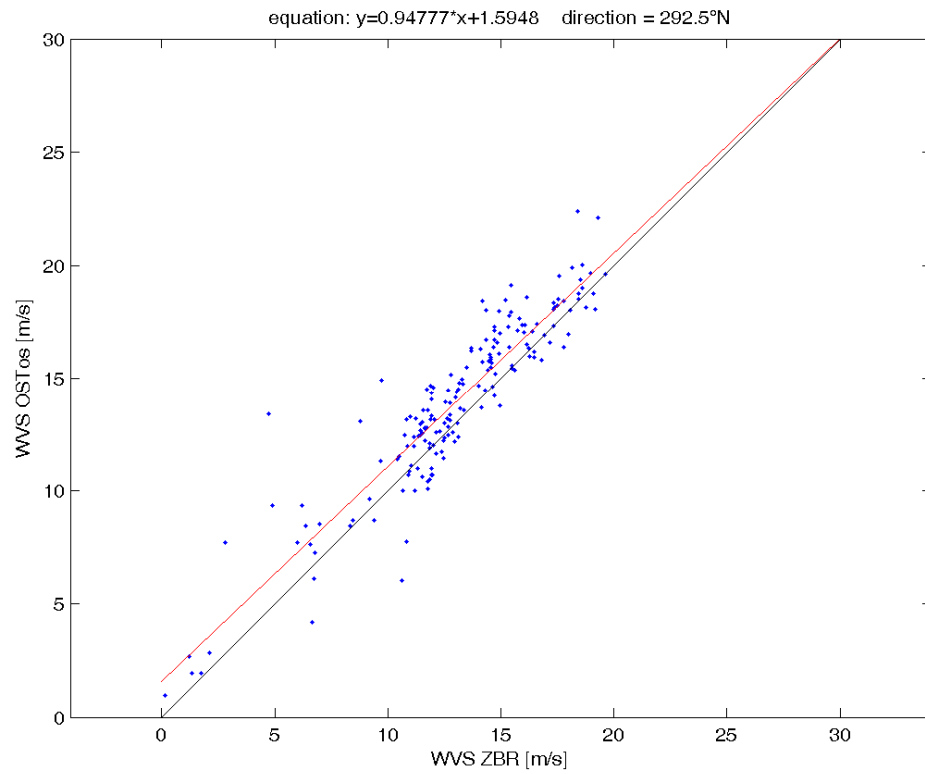
Figuur 6-7: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 225°



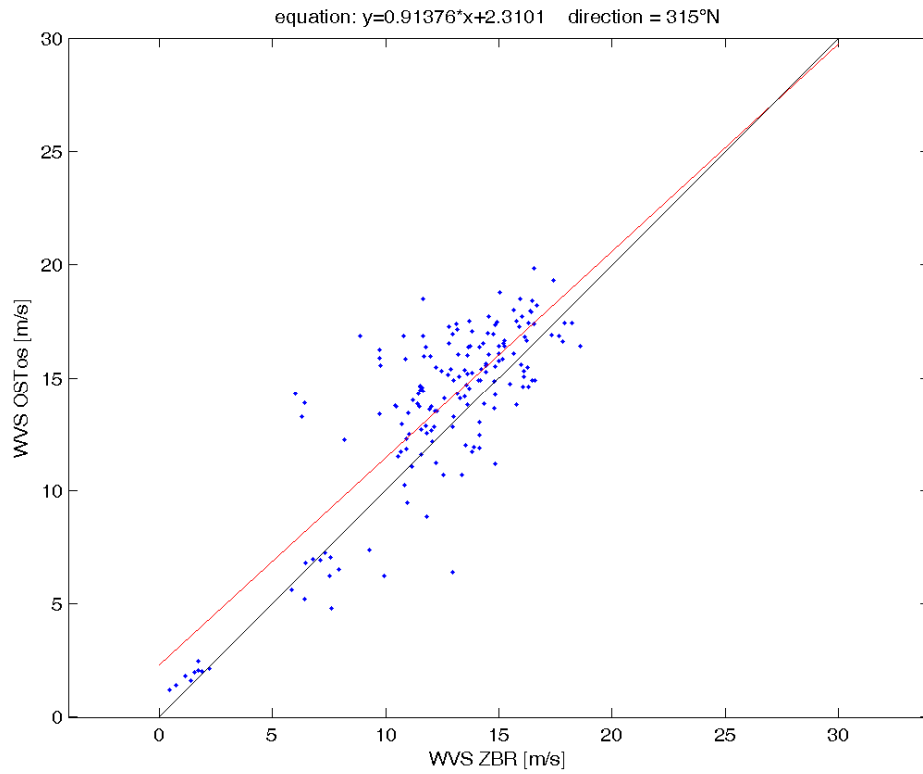
Figuur 6-8: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 247.5°



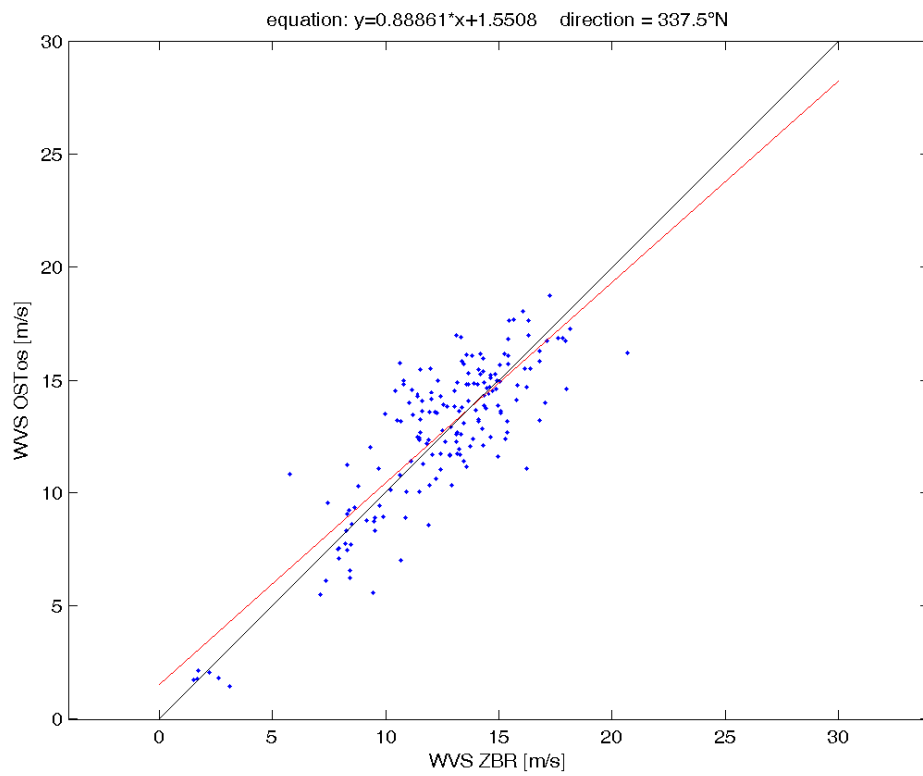
Figuur 6-9: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 270°



Figuur 6-10: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 292.5°



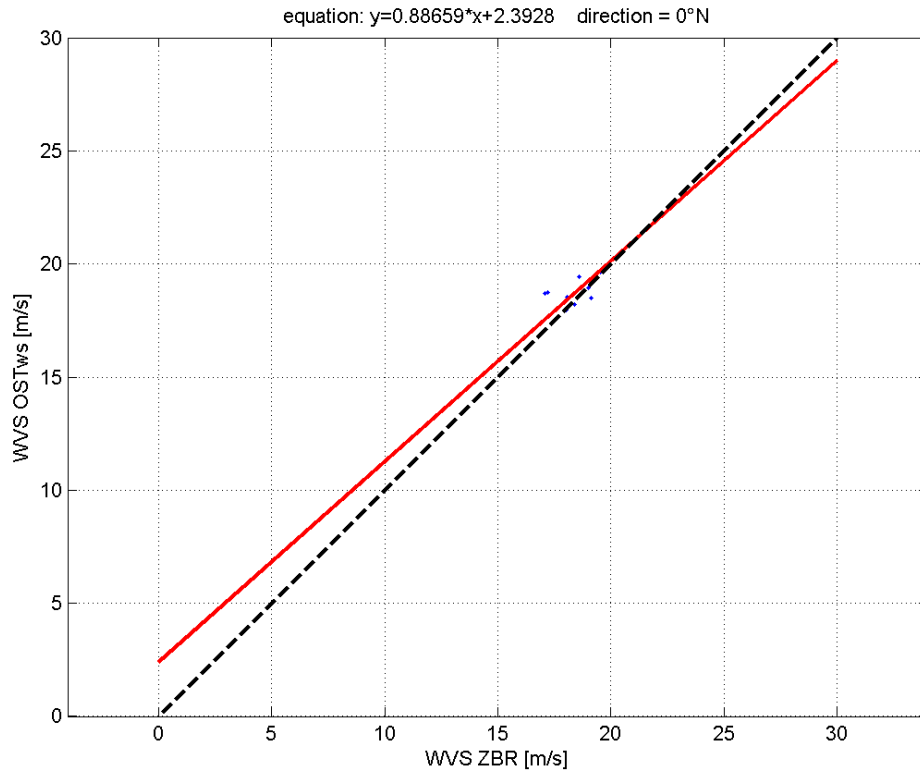
Figuur 6-11: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 315°



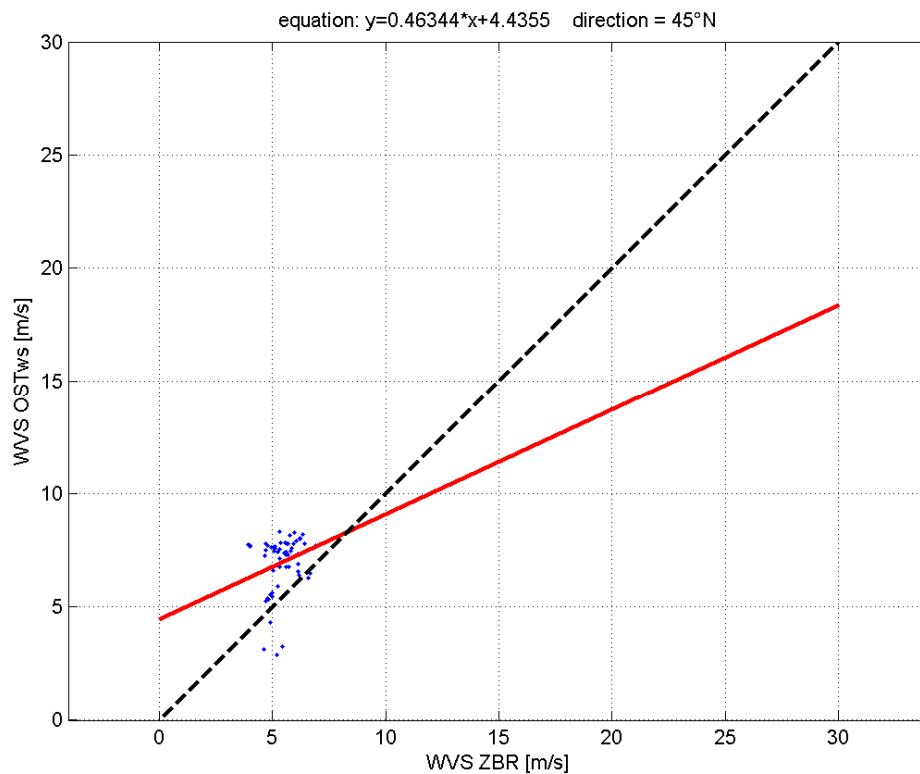
Figuur 6-12: correlatie windsnelheid OST os vs ZBR voor richting 337.5°

6.2.2. Westerstaketsel – Zeebrugge

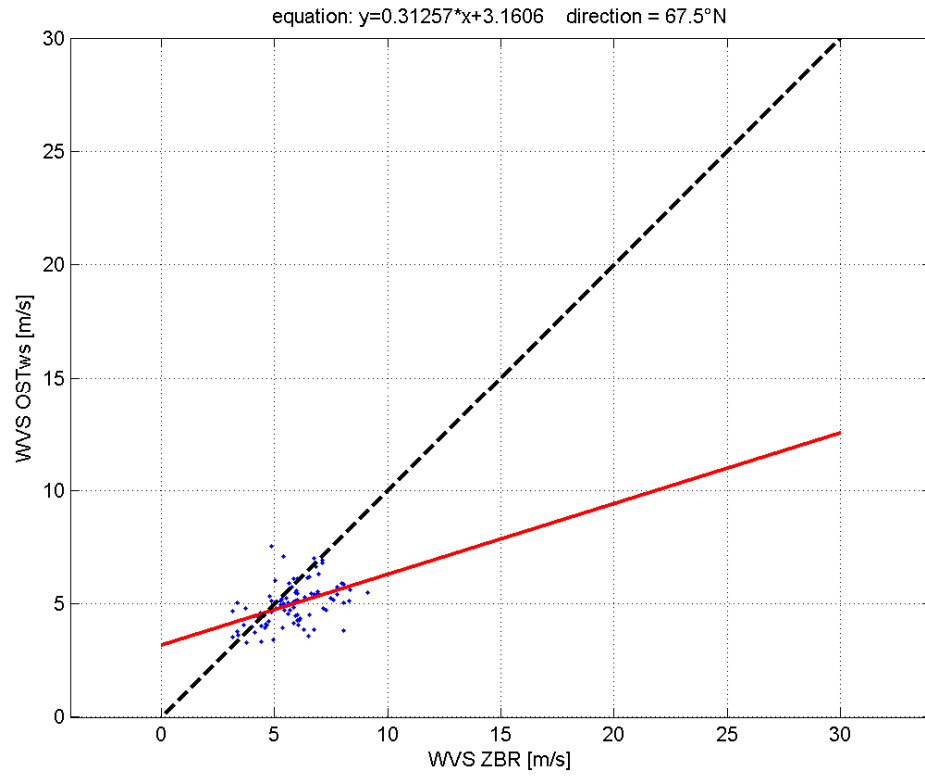
Enkel de relevante richtingssectoren (=aanlandige) worden getoond. Sectoren zonder data (=lege grafiek) worden weggelaten (e.g. sector rond 22.5°N).



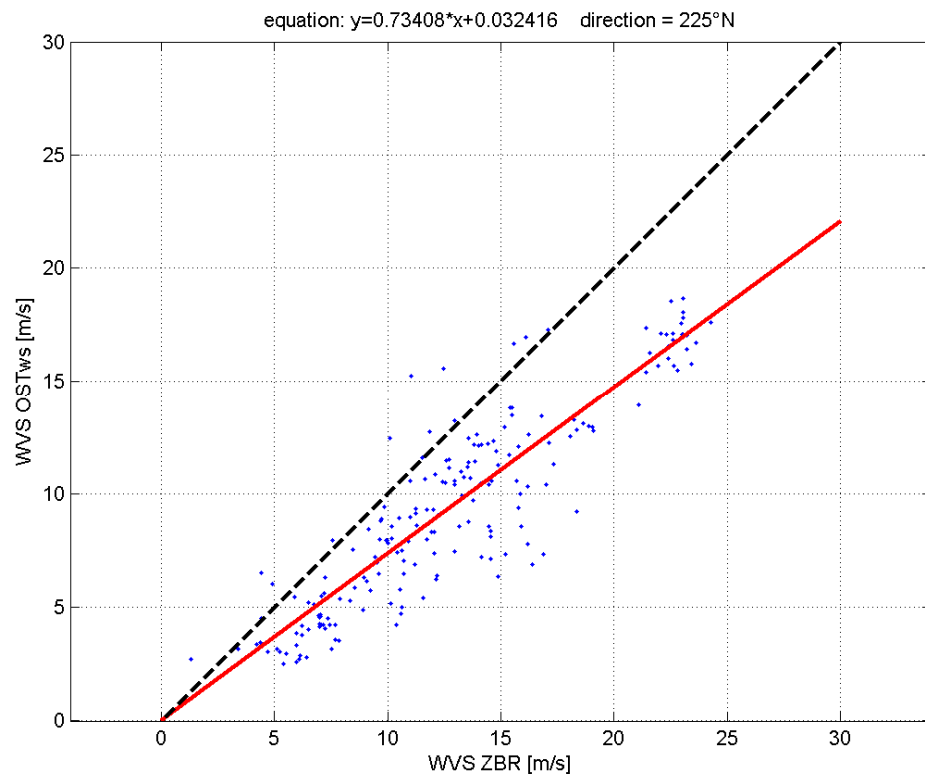
Figuur 6-13: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 0°



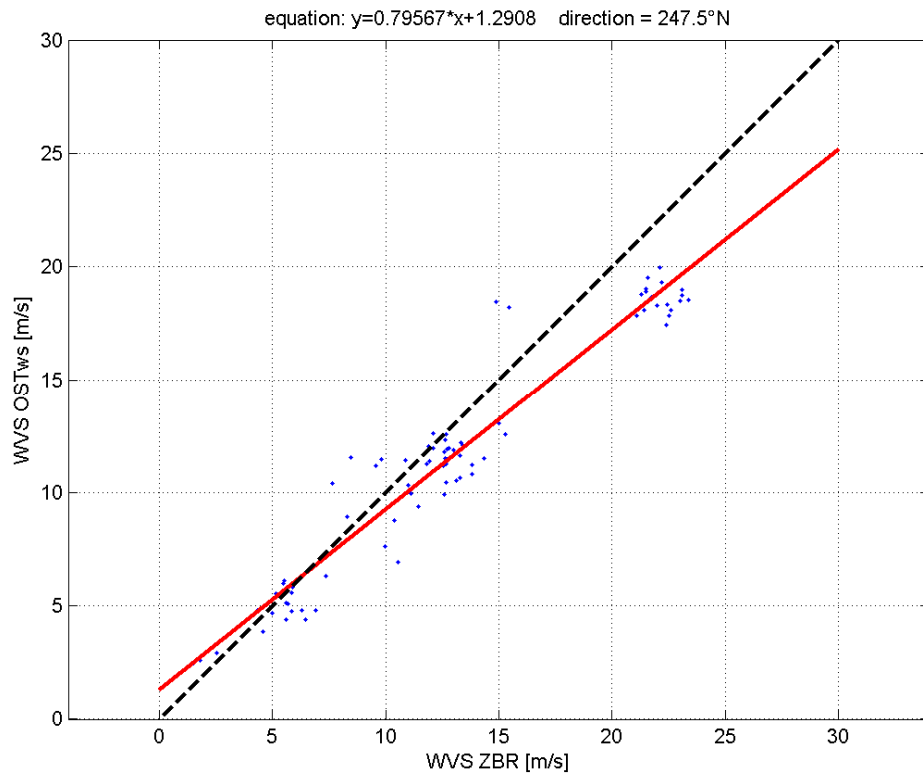
Figuur 6-14: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 45°



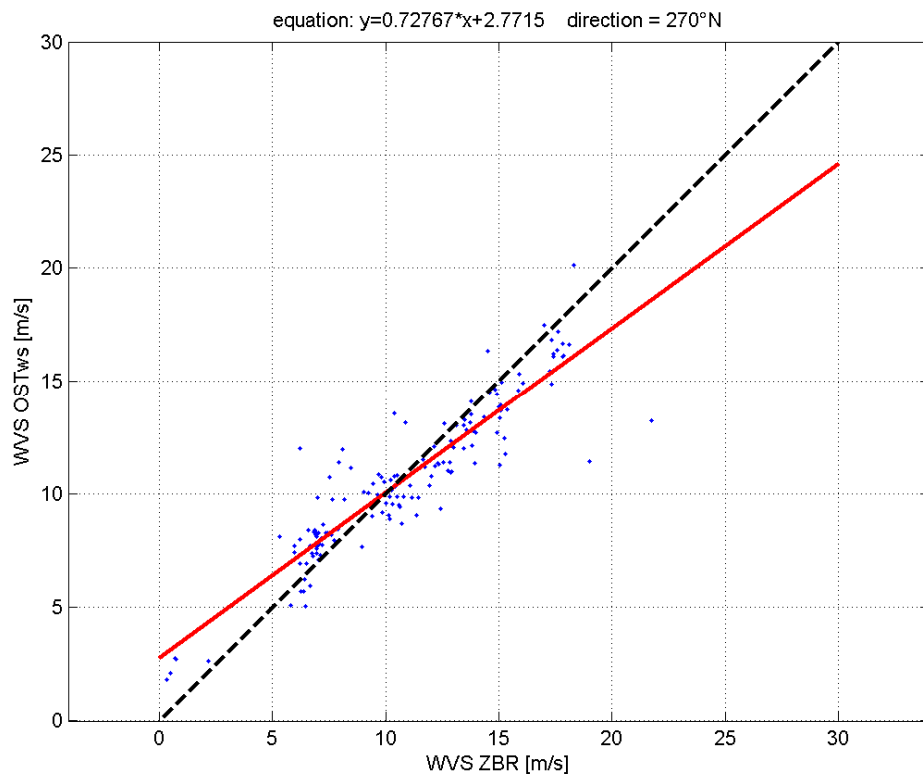
Figuur 6-15: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 67.5°



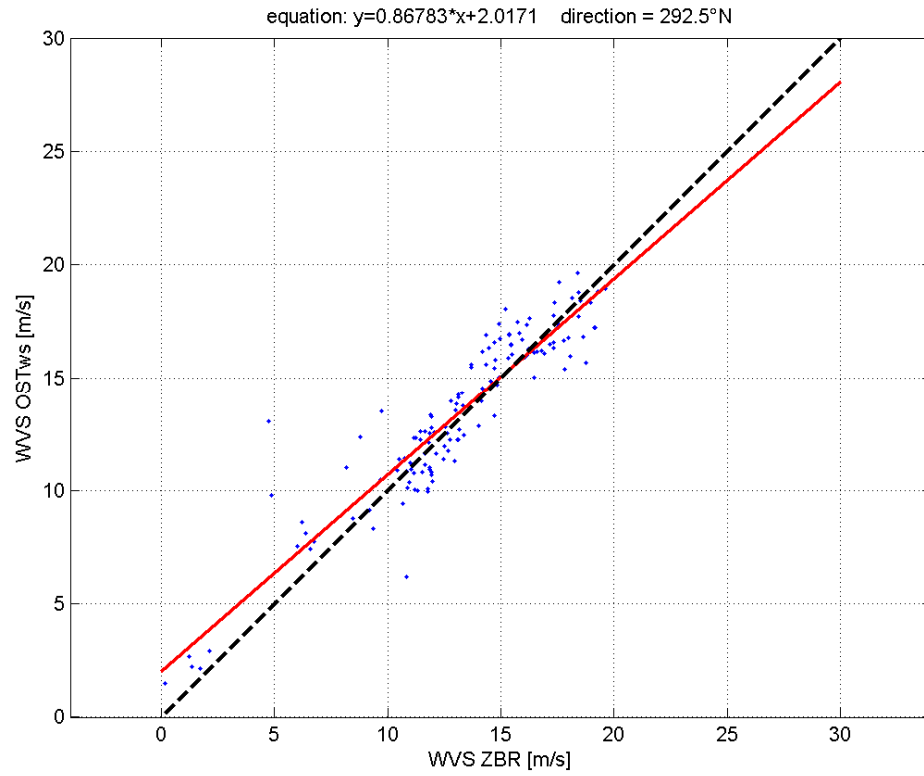
Figuur 6-16: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 225°



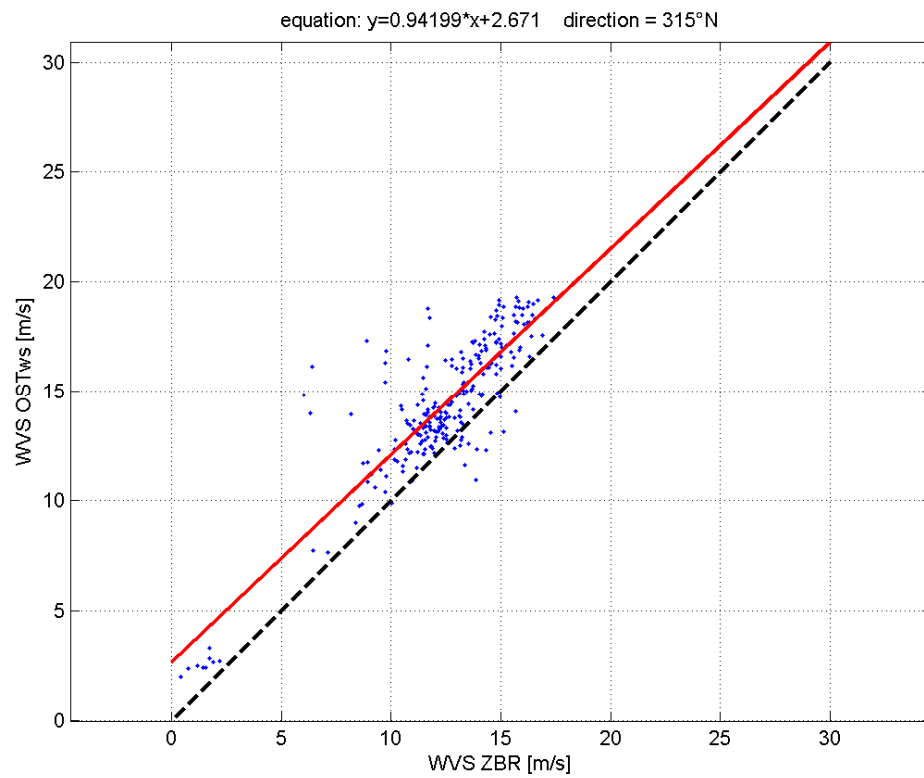
Figuur 6-17: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 247.5°



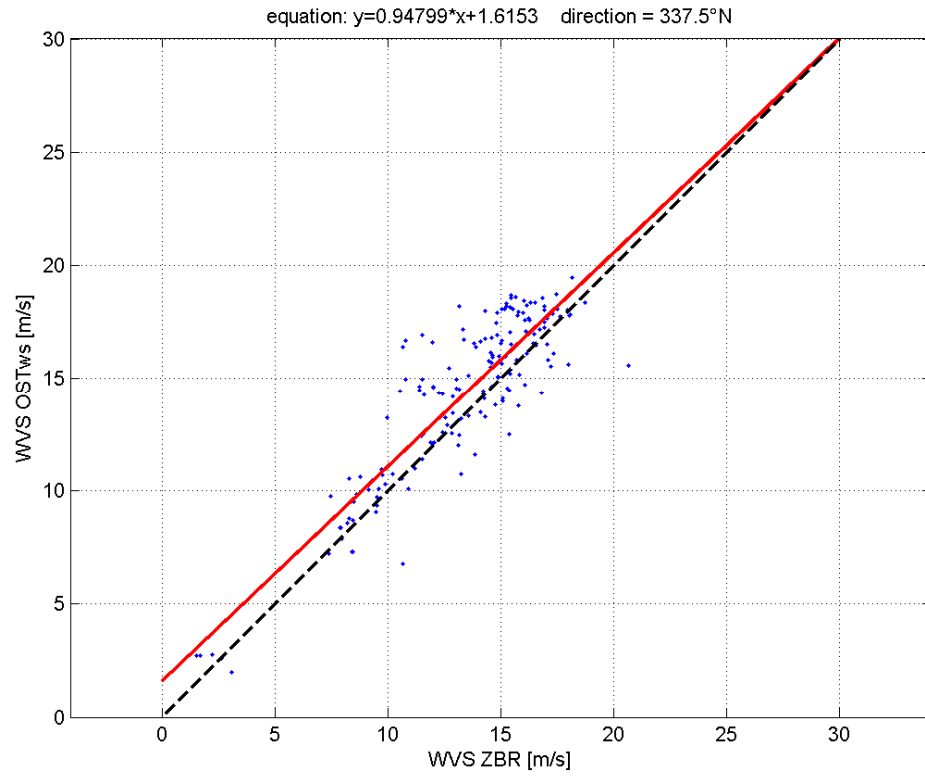
Figuur 6-18: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 270°



Figuur 6-19: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 292.5°

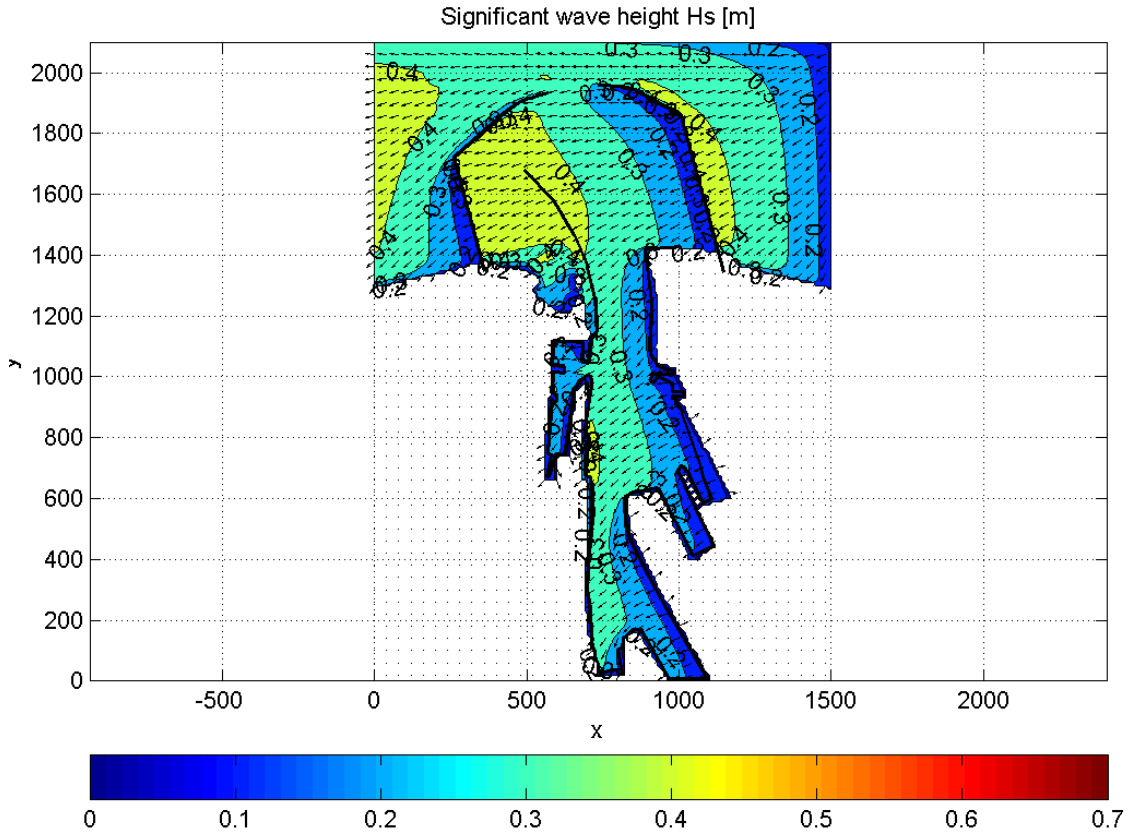


Figuur 6-20: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 315°

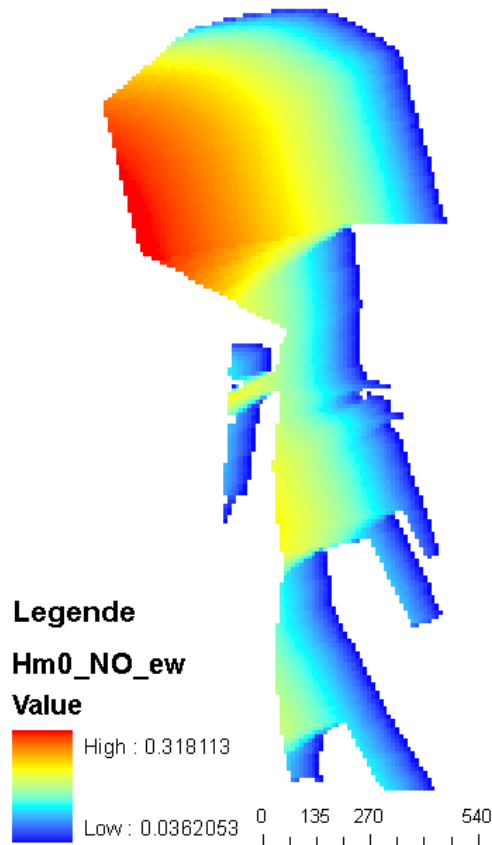


Figuur 6-21: correlatie windsnelheid OST ws vs ZBR voor richting 337.5°

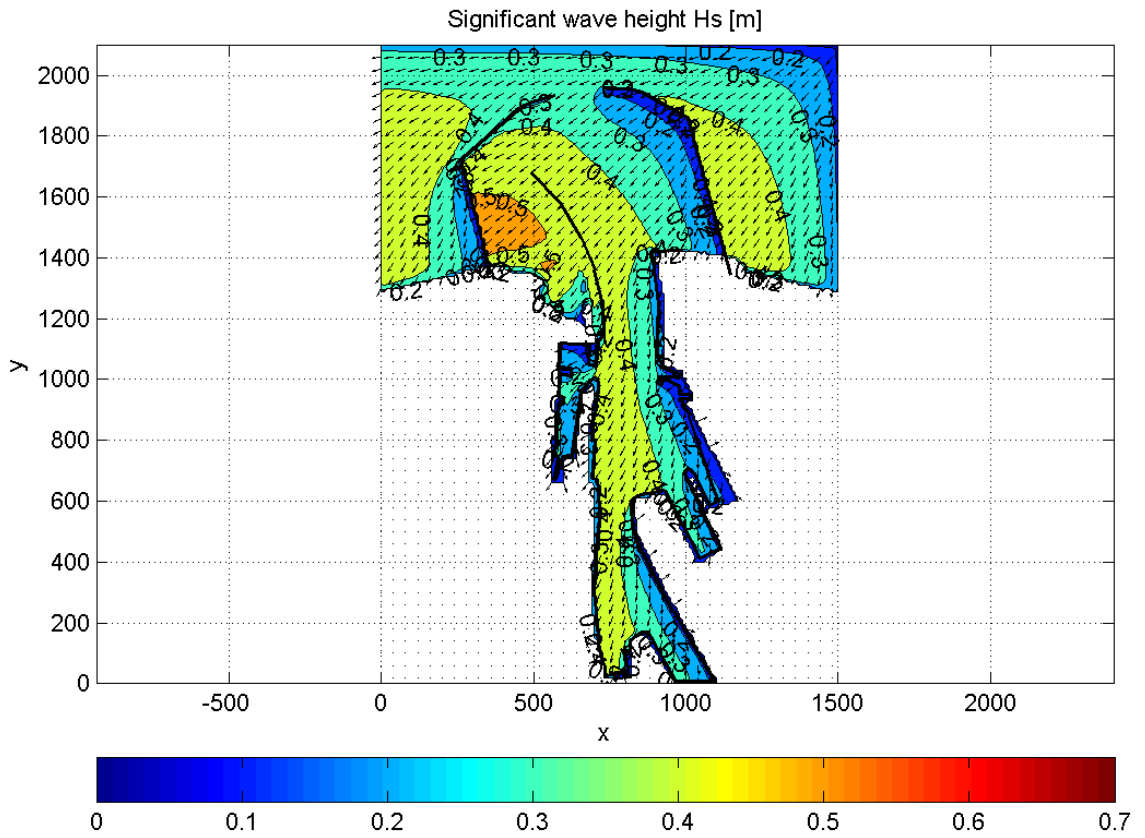
6.3. Significante golfhoogte H_s : enkel door wind (1000-jarige wind snelheid)



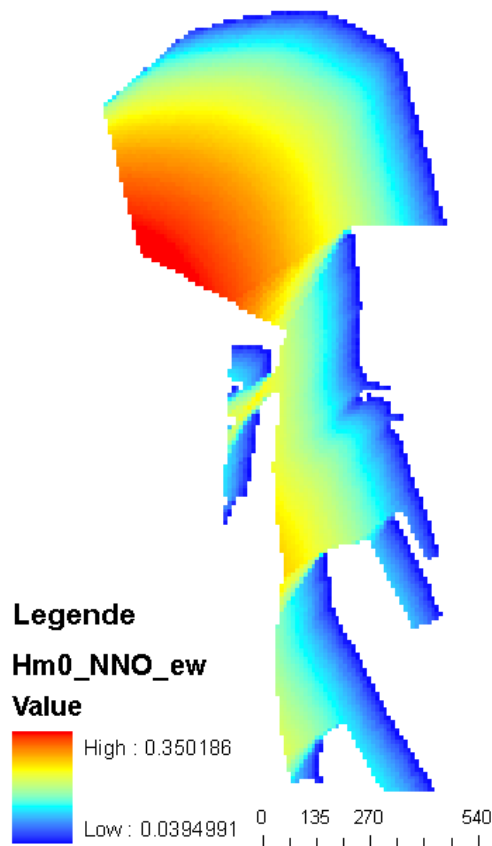
Figuur 6-22: windrichting NO (SWAN)



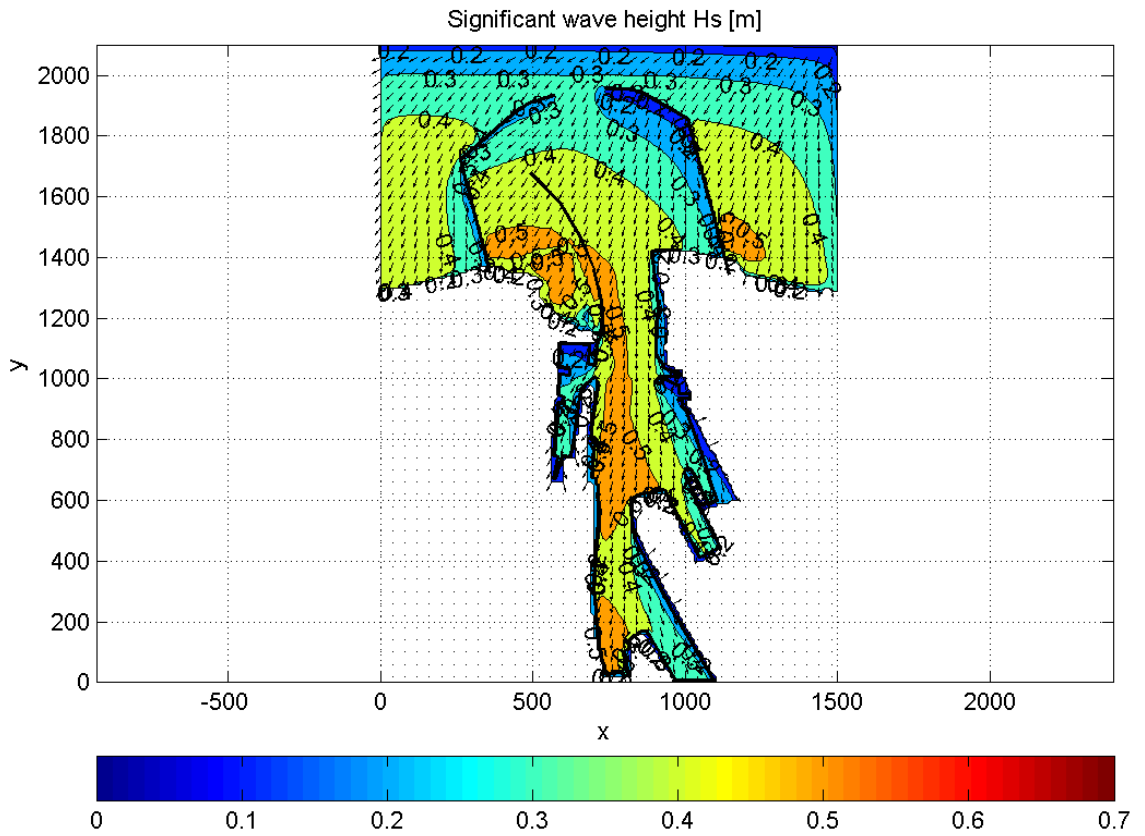
Figuur 6-23: Significante golfhoogte H_{m0} [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting NO)



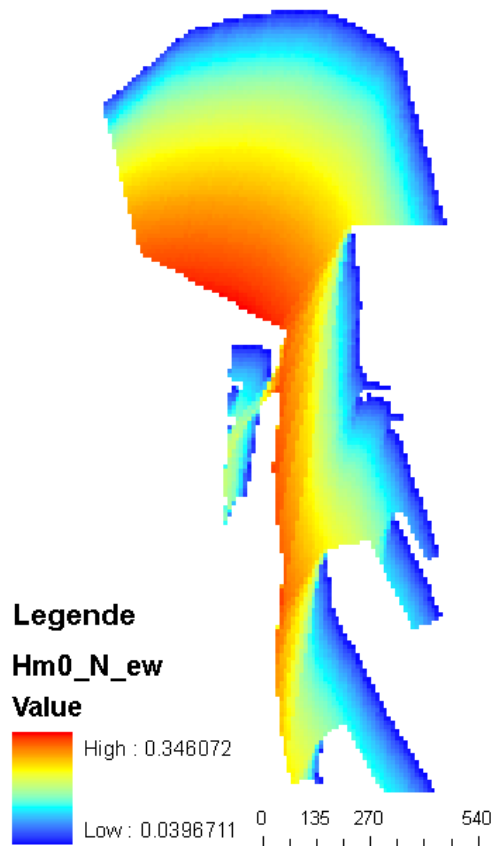
Figuur 6-24: windrichting NNO (SWAN)



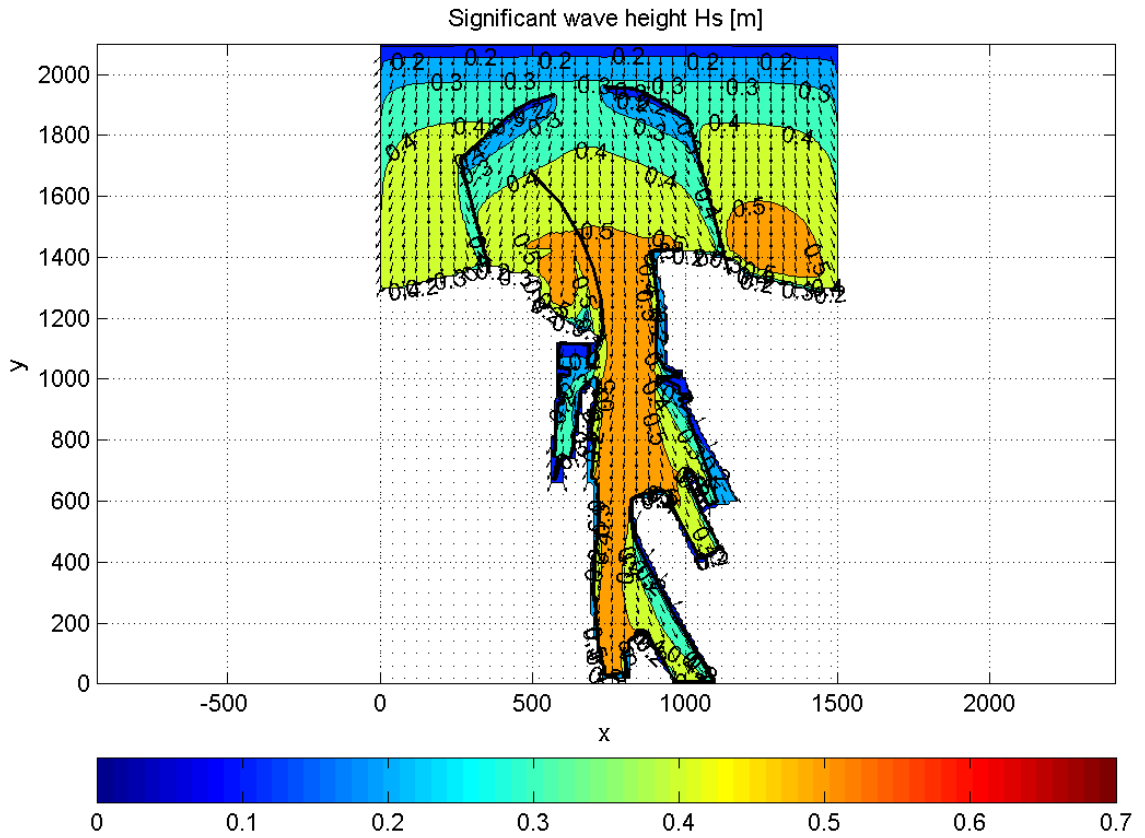
Figuur 6-25: Significante golfhoogte H_{m0} [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting NNO)



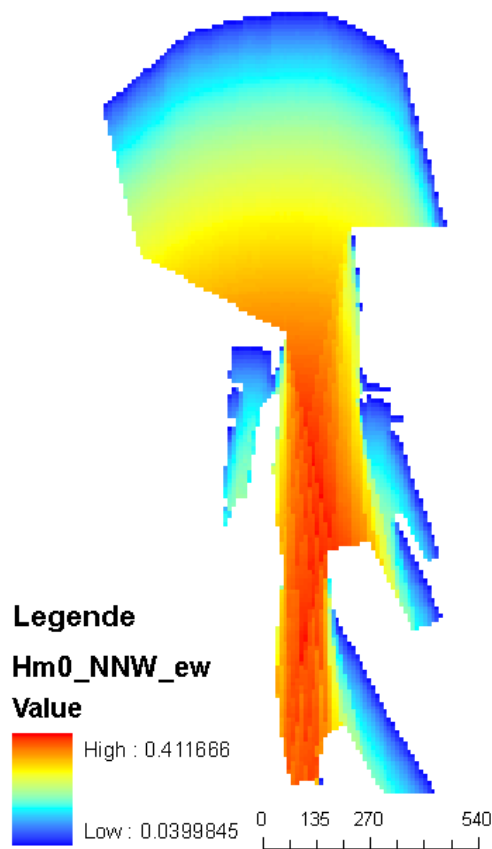
Figuur 6-26: windrichting N (SWAN)



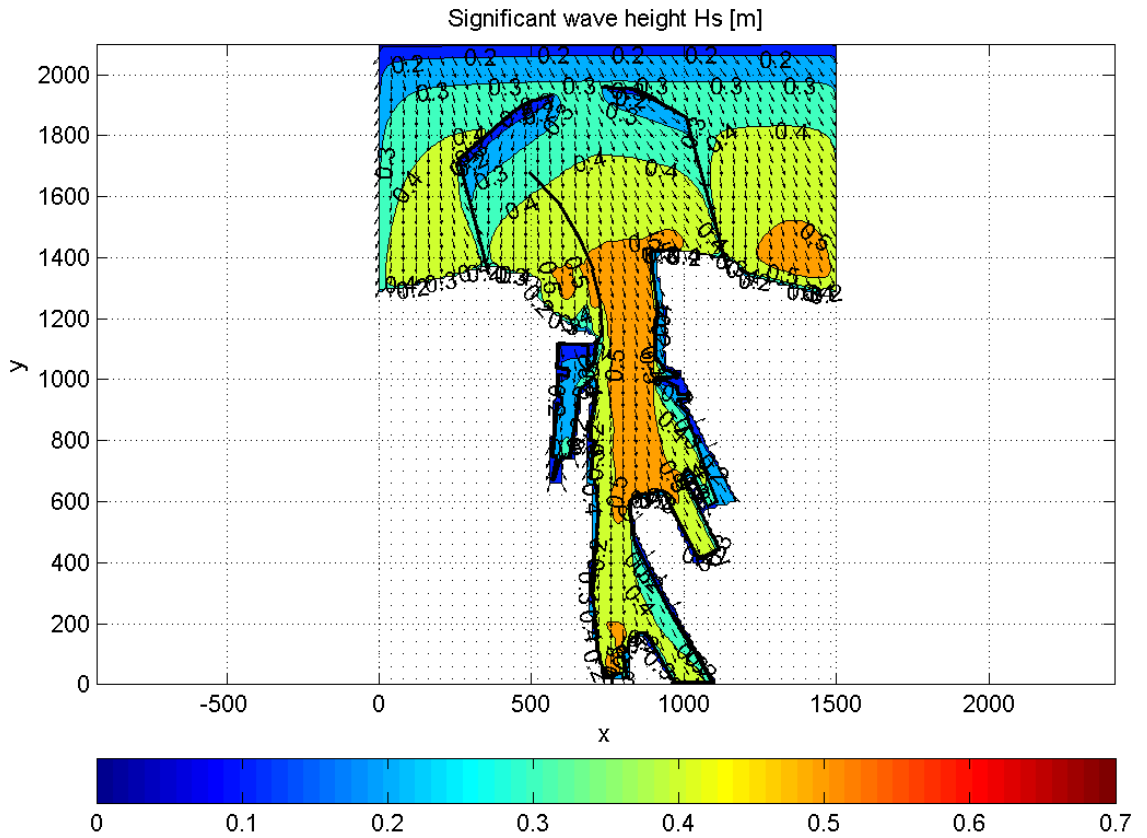
Figuur 6-27: Significante golfhoogte H_{m0} [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting N)



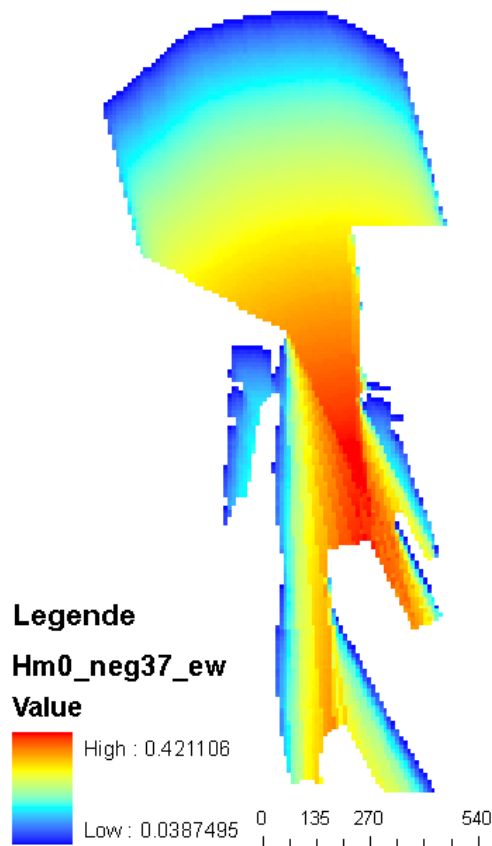
Figuur 6-28: windrichting NNW (SWAN)



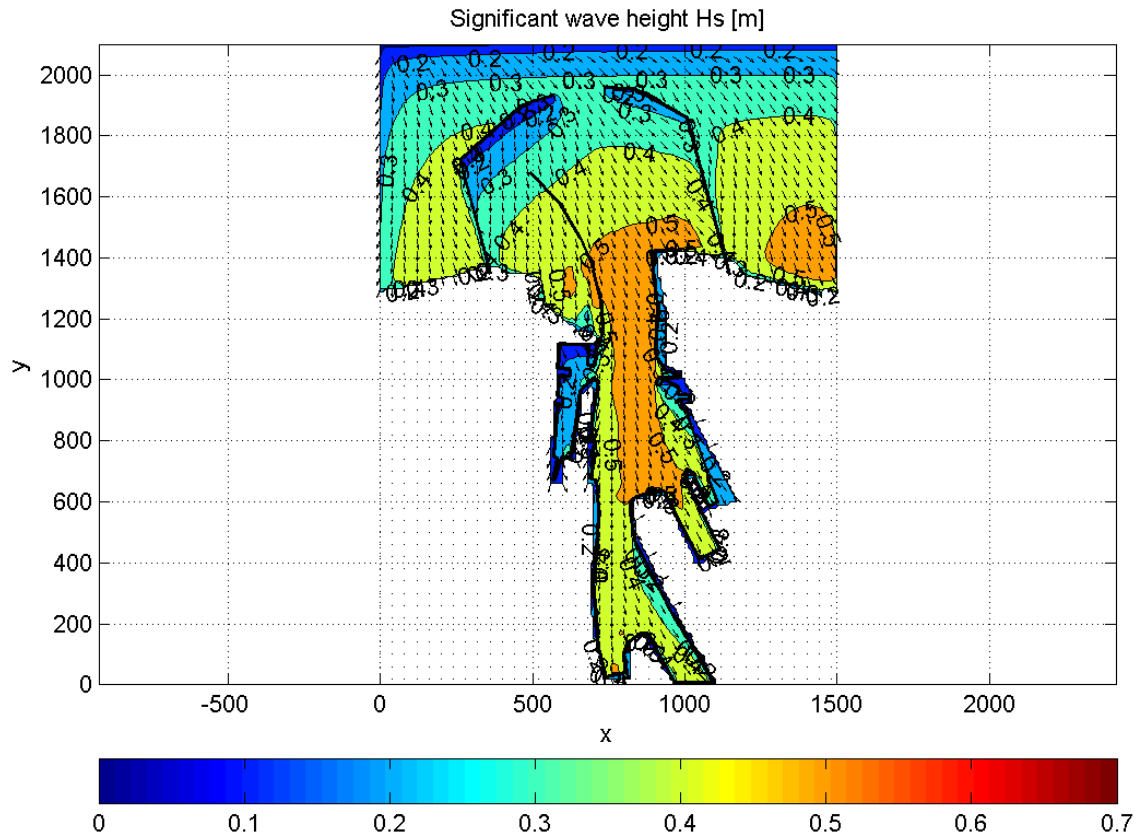
Figuur 6-29: Significante golfhoogte H_{m0} [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting NNW)



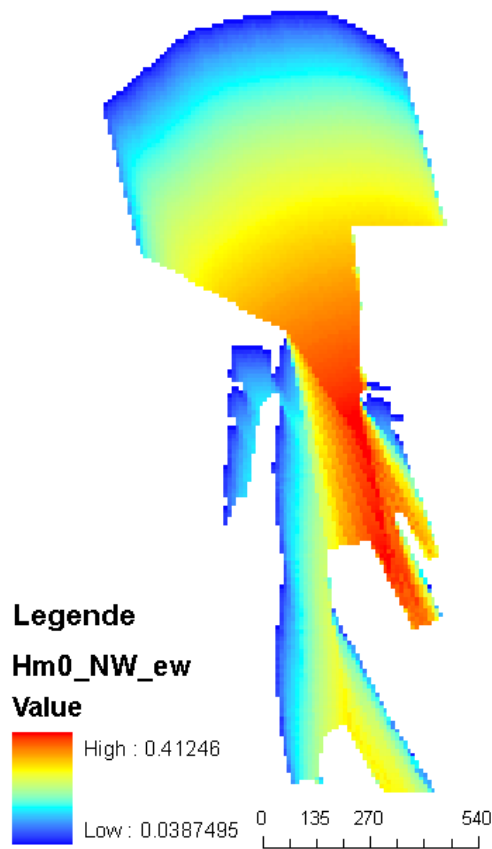
Figuur 6-30: windrichting -37° (SWAN)



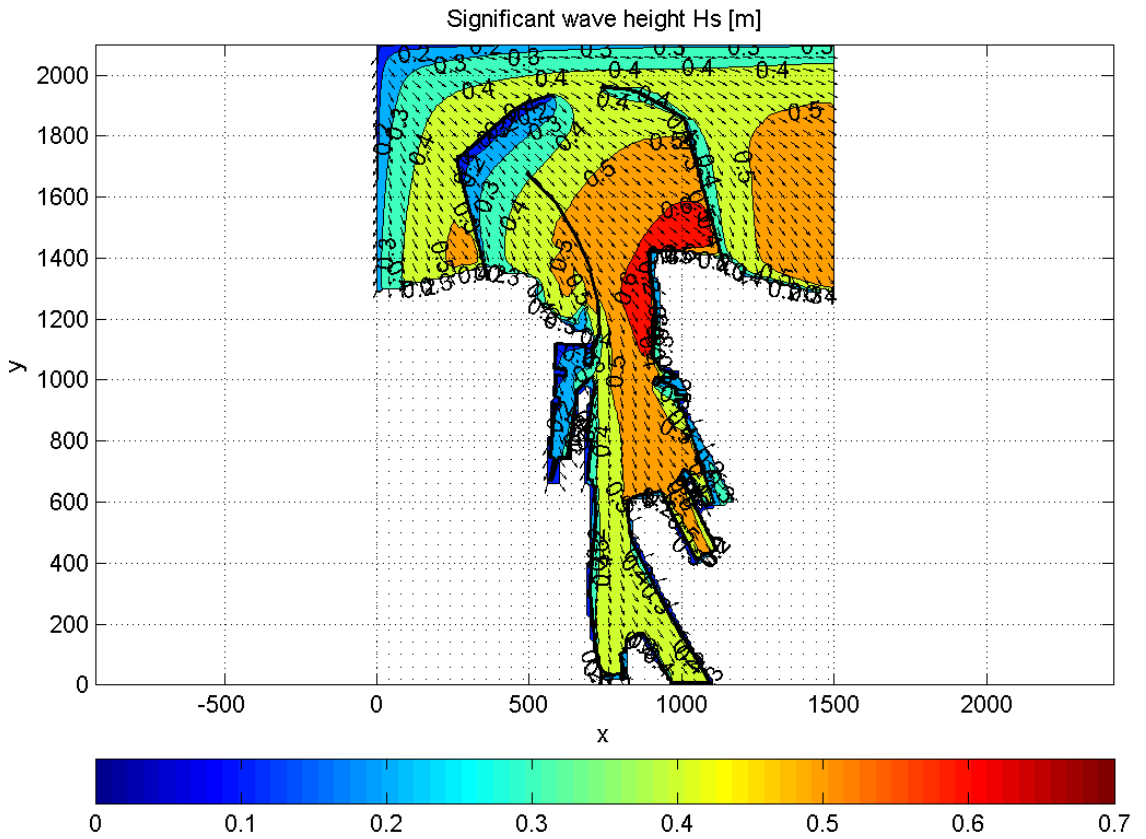
Figuur 6-31: Significante golfhoogte H_{m0} [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting -37°)



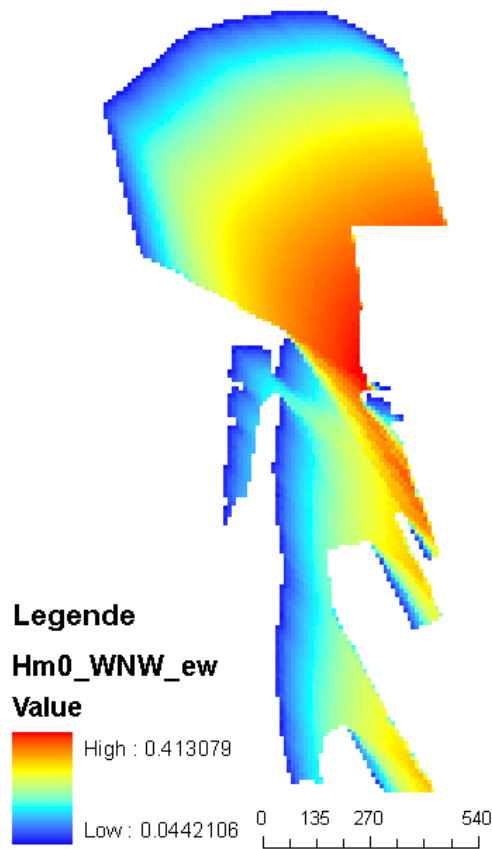
Figuur 6-32: windrichting NW (SWAN)



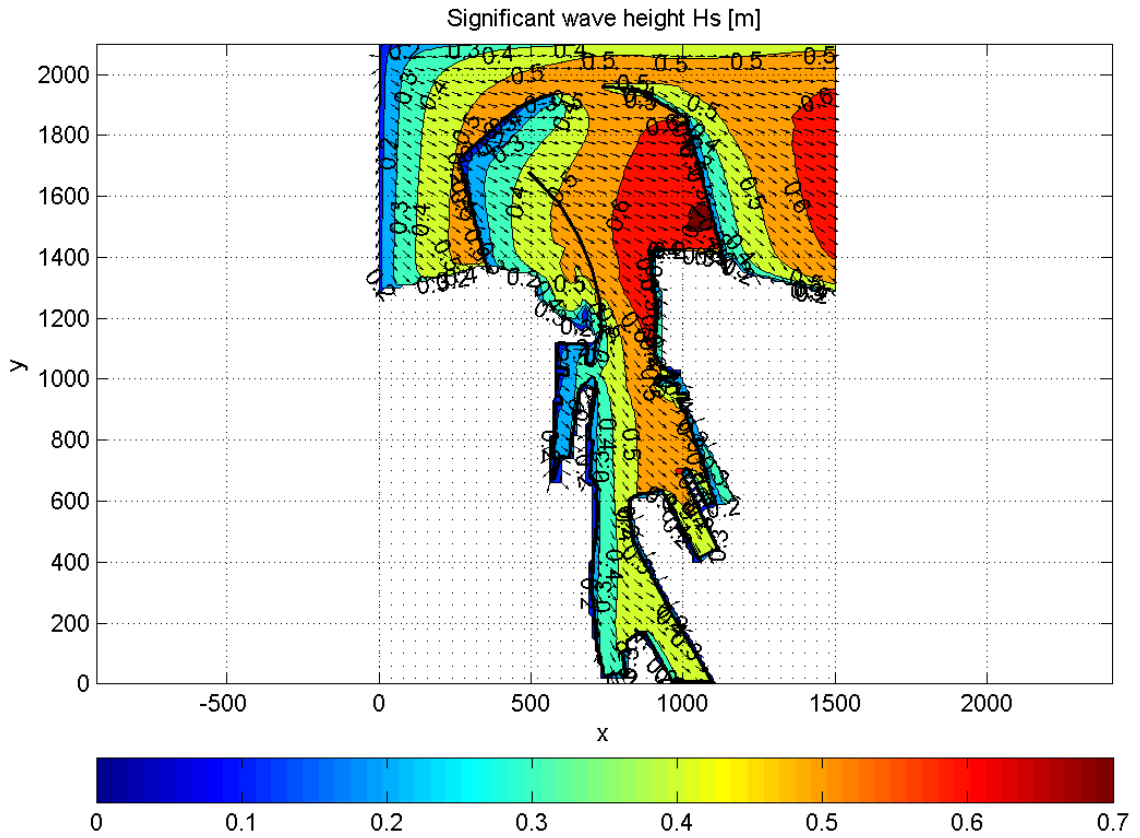
Figuur 6-33: Significante golfhoogte Hm0 [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting NW)



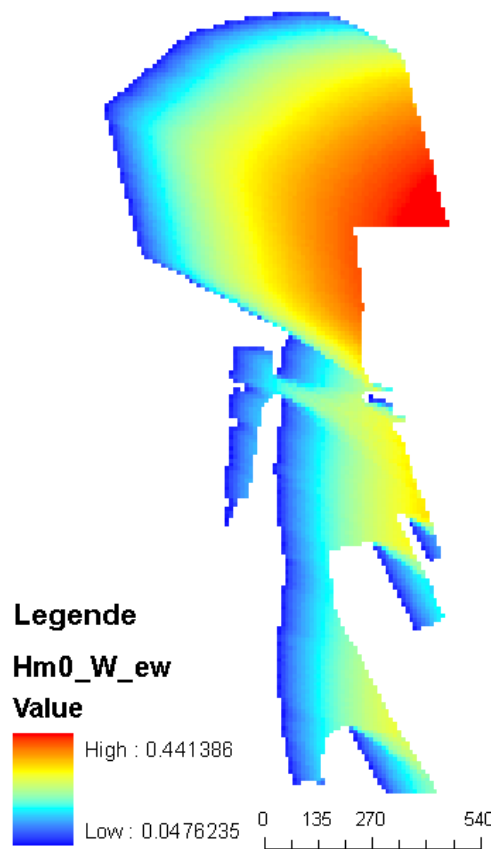
Figuur 6-34: windrichting WNW (SWAN)



Figuur 6-35: Significante golfoogte H_{m0} [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting WNW)



Figuur 6-36: windrichting W (SWAN)



Figuur 6-37: Significante golfhoogte H_{m0} [m] volgens SPM84 en CEM (windrichting W)

6.4. SWAN input file: simulaties met enkel wind

```

$*****HEADING*****
*****
$
PROJ 'oostende' 'T2'
$proto bestand voor de 1000-jarige stormen met enkel wind
$
$*****MODEL
INPUT*****
$
SET LEVEL {wst}
SET NAUT
MODE STATIONARY
MODE TWOD
$
$CGRID 0 0 0 1500 1200 150 120 CIRCLE 64 0.05 0.50 40
$CGRID 0 0 0 1500 2100 150 210 CIRCLE 64 0.05 0.60 40
CGRID 0 0 0 1500 2100 150 210 CIRCLE 64 0.05 2.49 41
$
INPGRID BOTTOM 0 0 00 750 1050 2 2 EXC -9
READ BOTTOM -1 '..\..\..\Bathymetry\oostendeTlbreed.txt' 1 6 FREE

$
$BOU SHAPE JON 3.3 PEAK DSPR POWER

$BOU SIDE N      CCW CON PAR {Hm0}          {TPE}          {dir}
{dd}
$BOU SIDE W      CCW CON PAR {Hm0}          {TPE}          {dir}
{dd}
$BOU SIDE E      CCW CON PAR {Hm0}          {TPE}          {dir}
{dd}
$
GEN3 KOMEN AGROW
BREAK CON 1.00 0.73
FRIC JON 0.0670
$
NUM ACCUR 0.020 0.020 0.020 95.000 20

$obstakels binnen de haven, inclusief het westerstaketsel
OBST  TRANSM      1      REFL  0      LINE  492  1678  588  1580
OBST  TRANSM      1      REFL  0      LINE  588  1580  656  1466
OBST  TRANSM      1      REFL  0      LINE  656  1466  700  1360
OBST  TRANSM      1      REFL  0      LINE  700  1360  724  1260
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  724  1260  730  1152
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  730  1152  710  1120
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  710  1120  704  1048
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  704  1048  682  1050
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  682  1050  686  1114
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  686  1114  588  1120
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  588  1120  582  1038
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  582  1038  622  1034
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  622  1034  622  1014
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  622  1014  586  1016
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  586  1016  582  946
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  582  946  600  942
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  600  942  600  920
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  600  920  582  922
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  582  922  568  748
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  568  748  582  744
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  582  744  566  672
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  566  672  574  672
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  574  672  596  744
OBST  TRANSM      0.4    REFL  0.4    LINE  596  744  626  742
    
```

OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	626	742	644	862
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	644	862	658	964
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	658	964	700	1006
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	700	1006	708	1002
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	708	1002	712	990
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	712	990	712	974
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	712	974	690	832
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	690	832	692	822
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	692	822	690	802
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	690	802	702	800
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	702	800	692	674
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	692	674	708	670
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	708	670	708	652
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	708	652	714	650
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	714	650	712	606
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	712	606	718	590
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	718	590	718	572
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	718	572	712	494
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	712	494	704	420
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	704	420	698	306
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	698	306	706	238
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	706	238	712	152
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	712	152	714	132
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	714	132	740	26
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	740	26	794	38
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	794	38	800	20
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	800	20	814	24
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	814	24	800	104
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	800	104	816	108
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	816	108	816	142
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	816	142	856	170
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	856	170	872	170
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	872	170	966	6
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	966	6	1096	8
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1096	8	960	236
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	960	236	888	372
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	888	372	836	476
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	836	476	822	564
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	822	564	824	604
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	824	604	838	616
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	838	616	930	634
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	930	634	1046	410
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1046	410	1116	444
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1116	444	1054	570
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1054	570	998	690
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	998	690	1004	704
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1004	704	1018	702
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1018	702	1026	690
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1026	690	1034	672
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1034	672	1076	584
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1076	584	1108	598
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1108	598	1080	672
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1080	672	1070	710
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1070	710	1010	882
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1010	882	1016	886
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1016	886	990	912
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	990	912	990	930
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	990	930	980	930
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	980	930	980	938
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	980	938	1016	938
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1016	938	1016	952
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	1016	952	980	952
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	980	952	980	978

OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	980	978	936	998
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	936	998	926	998
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	926	998	916	982
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	916	982	906	988
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	906	988	916	1010
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	916	1010	960	1010
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	960	1010	980	1006
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	980	1006	982	1018
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	982	1018	962	1024
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	962	1024	928	1040
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	928	1040	926	1050
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	926	1050	908	1074
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	908	1074	906	1094
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	906	1094	912	1246
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	912	1246	890	1420
OBST	TRANSM	0.4	REFL	0.4	LINE	890	1420	988	1424

\$ 988 1424

\$transmissie = 0 voor de havendammen, want enkel golven door \$windgeneratie beschouwd

\$oostelijke dam

OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	1008	1858	1146	1345
OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	1146	1345	1008	1858
OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	1008	1858	860	1944
OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	860	1944	810	1957
OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	810	1957	734	1960

\$

\$westelijke dam: groen

OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	360	1348	263	1721
OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	263	1721	438	1875
OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	438	1875	487	1909
OBST	TRANSM	0	REFL	0.2	LINE	487	1909	570	1935

\$

\$

\$*****MODEL

OUTPUT*****

\$

OUTPUT OPTIONS TABLE 16 BLOCK 9 6

\$

BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_xp.blk'	LAY-OUT	1	XP
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_yp.blk'	LAY-OUT	1	YP
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_dep.blk'	LAY-OUT	1	DEP
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_hs.blk'	LAY-OUT	1	HS
\$BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_tm01.blk'	LAY-OUT	1	TM01
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_tmm10.blk'	LAY-OUT	1	TMM10
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_per.blk'	LAY-OUT	1	PER
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_rtp.blk'	LAY-OUT	1	RTP
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_tps.blk'	LAY-OUT	1	TPS
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_dspr.blk'	LAY-OUT	1	DSPR
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_dir.blk'	LAY-OUT	1	DIR
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_ubot.blk'	LAY-OUT	1	UBOT
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_urms.blk'	LAY-OUT	1	URMS
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_dhsign.blk'	LAY-OUT	1	DHSIGN
BLOCK	'COMPGRID'	NOHEAD	'{ident}_drtm01.blk'	LAY-OUT	1	DRTM01

\$

\$

\$

CURVE	'Crv_1'	78	1802	10	770	2056
CURVE	'Crv_2'	520	1808	10	758	1364
CURVE	'Crv_3'	758	1364	10	810	898
CURVE	'Crv_4'	810	898	10	764	84
CURVE	'Crv_5'	810	898	10	1070	450


```

CURVE 'NSYC' 708 1064 20 864 1062
CURVE 'MONT' 586 954 10 652 954
CURVE 'STAK' 708 798 10 700 676
CURVE 'STAM' 698 696 20 1038 774
CURVE 'ZEEW' 1004 662 10 944 622
CURVE 'TIJD' 1070 710 10 1030 692
CURVE 'DEMS' 806 26 10 750 286
CURVE 'rand' 100 2000 14 1400 2000
CURVE 'Crv_6' 620 2020 20 800 1230
CURVE 'Crv_7' 200 2000 20 1400 2000
$
TABLE 'Crv_1' HEAD 'Crv_1.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'Crv_2' HEAD 'Crv_2.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'Crv_3' HEAD 'Crv_3.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'Crv_4' HEAD 'Crv_4.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'Crv_5' HEAD 'Crv_5.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'NSYC' HEAD 'NSYC.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'MONT' HEAD 'MONT.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'STAK' HEAD 'STAK.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'STAM' HEAD 'STAM.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'ZEEW' HEAD 'ZEEW.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'TIJD' HEAD 'TIJD.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'DEMS' HEAD 'DEMS.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'rand' HEAD 'rand.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'Crv_6' HEAD 'Crv_6.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
TABLE 'Crv_7' HEAD 'Crv_7.tab' XP YP DIST DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
$
$POINTS 'punten' 708 1066 588 970 696 704 1014 648 1076 678 738 50
774 1078 644 996 750 710 976 650 1054 680 764 120
$TABLE 'punten' HEAD 'punten.tab' XP YP DEP HS RTP TPS DIR
TM01 TM02 TMM10 WIND
$
POINTS 'uitptn' FILE '..\..\..\Coordn\uitvoerptn.txt'
TABLE 'uitptn' NOHEADER '{ident}_uitvoerptn_tbl.swn' XP YP DEP HS RTP
TPS DIR TM01 TM02 TMM10 WIND
$
WIND {wvs} {wrs}
COMPUTE
STOP
$

```

Bijlage 4: INVLOED WIND (NOTA 2)



Nota

Datum: 5/10/11
Aan: Stuurgroep
Auteur: Vincent Gruwez
Documentref: I/NO/11273/11.324/VGR/ v3.0

**Betreft : Invloed van de wind op het golfklimaat in de haven van Oostende:
uitbreiding**

Inhoudstafel

0. INLEIDING	2
1. ACTUALISATIE EN UITBREIDING SWAN-MODEL	3
1.1 BATHYMETRIE.....	3
1.2 RANDVOORWAARDEN.....	4
1.2.1 <i>Hydrodynamische randvoorwaarden</i>	4
1.2.2 <i>Structuren</i>	5
1.3 NUMERIEKE INSTELLINGEN	10
1.4 RESULTATEN	10
2. CONCLUSIES	19
3. REFERENTIES	20

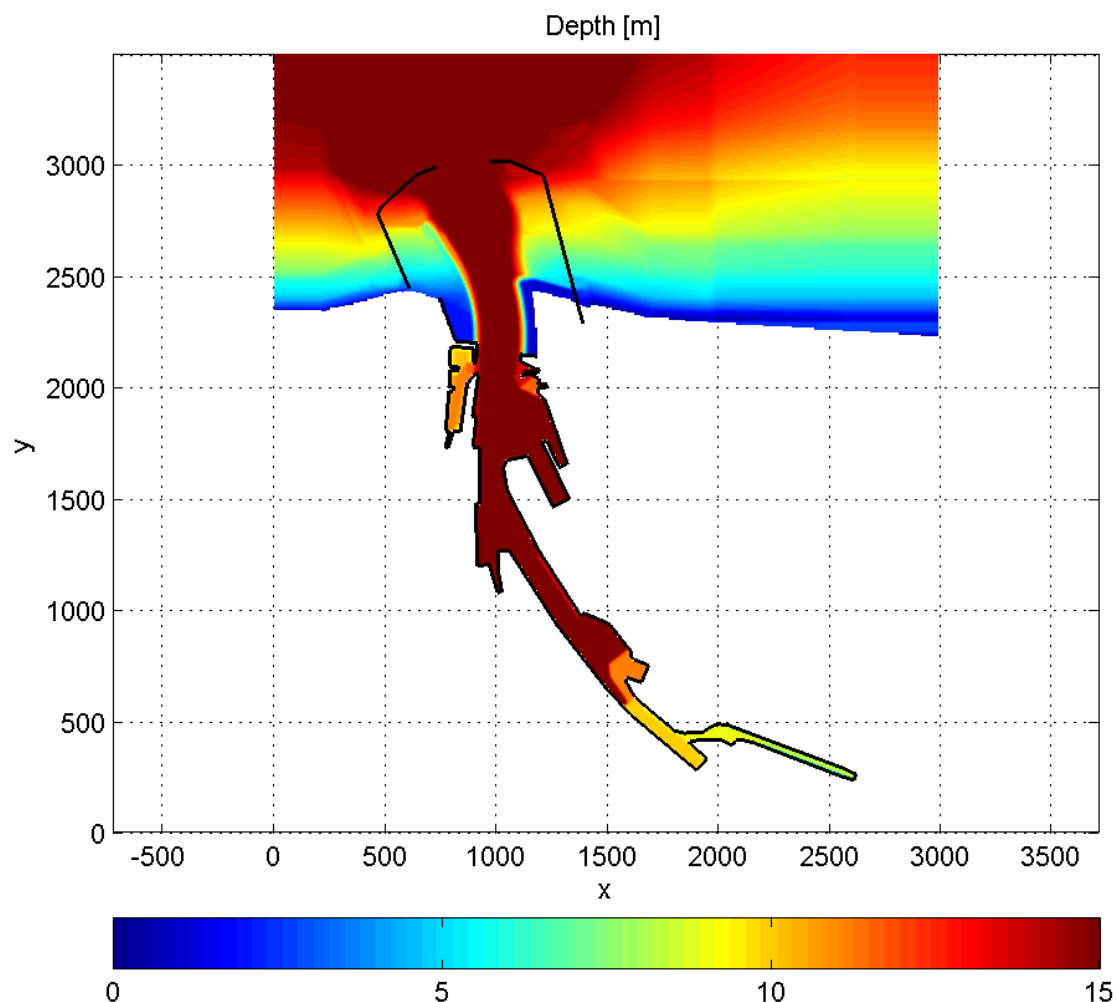
0. INLEIDING

Deze nota is een vervolg op de nota van IMDC (2010) waarin de invloed van lokaal windgegenereerde golven op het golfklimaat in de haven van Oostende werd bepaald. In deze nota wordt het SWAN-model van Oostende geactualiseerd en uitgebreid naar RYCO en voorbij de brug tot aan Sas-Slijkens en de St-Maarten stuw. In deze meest landwaartse gebieden van de haven dienen ook randvoorwaarden voor veiligheidsmaatregelen tegen superstormen te worden bepaald.

1. ACTUALISATIE EN UITBREIDING SWAN-MODEL

1.1 BATHYMETRIE

Voor de golfmodelleringen voor het project “Extreem golfklimaat in de Belgische havens” werd een nieuwe bathymetrie opgesteld op basis van de meest recente streefdieptes voor de jachthavens en het economisch gedeelte van de haven van Oostende. Deze bathymetrie werd uitgebreid naar de meest achterliggende gedeeltes van de haven die (mogelijk) nog open blijven aan de zee. Er zijn geen metingen beschikbaar van het bodempeil voorbij de brug aan RYCO. Het bodempeil dat werd aangenomen in de overstromingsmodelleringen (cf. IMDC, 2011) werd ook hier aangenomen voor dit gebied. De nieuwe bathymetrie is weergegeven in Figuur 1-1.



Figuur 1-1: Geactualiseerde en uitgebreide bathymetrie, waterdieptes voor SWL = +8.00mTAW (figuur is verticaal georiënteerd volgens NNW).

1.2 RANDVOORWAARDEN

1.2.1 Hydrodynamische randvoorwaarden

Op de rand wordt geen golfhoogte opgelegd, zodat alle golven die voorkomen in het model enkel ten gevolge van wind zijn. Bovendien werd de haveningang gesloten met een fictieve golfbreker zodat enkel met strijklengtes in de haven zelf rekening gehouden kan worden.

Voor de windsnelheden wordt uitgegaan van de statistiek die is opgesteld voor de 2-uurwaarden op diep water (IMDC, 2006). Daarop zijn echter opeenvolgend 2 reductiefactoren toegepast: 0.90 en 0.80. De eerste is een factor die de windsnelheid reduceert naar 10m hoogte boven het wateroppervlak (logaritmisch profiel) zodat deze rechtstreeks als invoer voor SWAN kan worden gebruikt. De andere is een reductiefactor die rekening houdt met landeffecten (IMDC, 2010).

*Tabel 1-1: Randvoorwaarden van de SWAN simulaties met enkel wind (RP = 1000 jaar)
(IMDC, 2010)*

windrichting	waterstand (incl. zsr)	wvs	wvs (10m)	wvs (land)
[-]	[m TAW]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
NO	6.00	28.33	25.5	20.4
NNO	6.40	30.46	27.4	21.9
N	7.00	30.57	27.5	22.0
NNW	7.00	30.77	27.7	22.2
-37°	7.05	29.98	27.0	21.6
NW	7.05	29.98	27.0	24.3
WNW	6.90	33.43	30.1	24.1
W	6.70	35.53	32.0	25.6

Ook de windsnelheden gegeven door Verwaest et al. (2008), behorende bij een aantal waterstanden, worden gemodelleerd (cf. Tabel 1-2). Deze waarden zijn reeds snelheden op 10m hoogte maar moeten wel nog gereduceerd worden naar landsnelheden (dus reductie met factor 0.80 of 0.9 voor richting NW, cf. IMDC, 2010). Deze windsnelheden horen volgens Verwaest et al. (2008) bij richting -33.75° (gemiddelde van NW en NNW). Toch werden voor elke waterstand en bijhorende windsnelheid alle windrichtingen¹ zoals in Tabel 1-1 gemodelleerd om de meest nadelige windrichting te kunnen bepalen.

¹ Opmerking: omdat de windsnelheden volgens Verwaest et al. (2008) richtingsafhankelijk zijn (voor richting -33.75°), is het mogelijk dat ze een onder- of overschatting zijn voor andere richtingen. Windsnelheden voor W zijn bvb. groter voor dezelfde terugkeerperiode.

Tabel 1-2: randvoorwaarden van de SWAN simulaties met enkel wind voor waterstanden en windsnelheden volgens Verwaest et al. (2008)

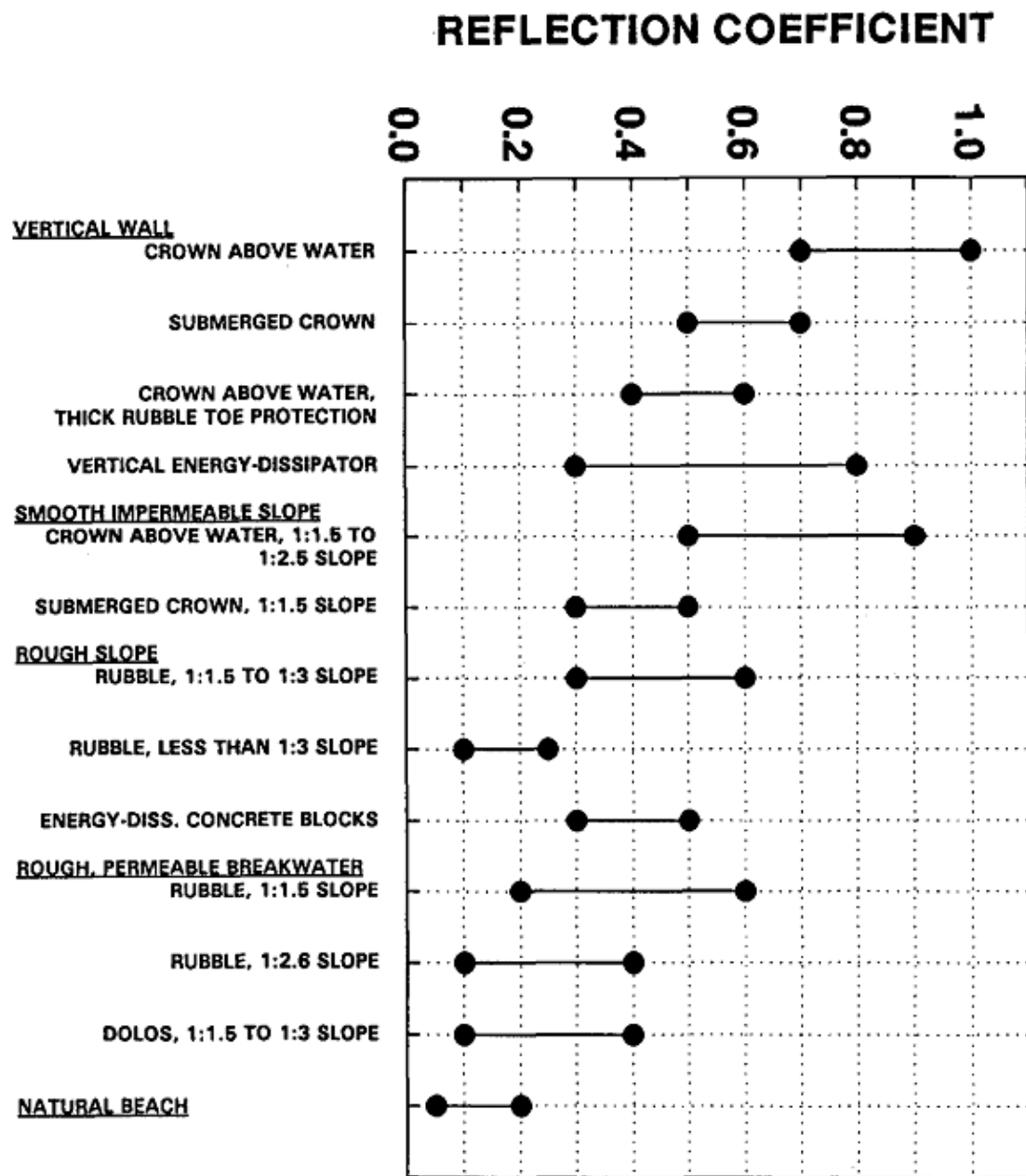
waterstand	wvs (10m)	wvs (land) NO, NNO, N, NNW, -37°; WNW, W	wvs (land) NW
[m TAW]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
6.50	25.6	20.5	23.1
7.00	29.1	23.3	26.2
7.50	32.6	26.1	29.4
8.00	36.1	28.9	32.5

1.2.2 Structuren

Structuren zoals golfbrekers, kaaimuren en glooiingen worden in SWAN gemodelleerd als obstakels met een bepaalde transmissie- en reflectiecoëfficiënt.

Een transmissiecoëfficiënt dient enkel opgegeven te worden indien voorbij de structuur ook betrouwbare resultaten gewenst zijn. Omdat de meeste obstakels kaaimuren e.d. zijn en gevolgd worden door land, is voor alle structuren een transmissiecoëfficiënt van 0.0 opgegeven. Bij een waterstand van +8.00m TAW kan eventueel transmissie optreden voorbij de havendammen. Dit wordt beschouwd in het onderzoek van de golfindringing zonder wind (IMDC&WL, 2011).

De reflectiecoëfficiënt van elk type structuur in de haven (e.g. kaaimuur, glooiing,...) werd bepaald op basis van de waarden gegeven door Thompson (1996), cf. Figuur 1-2. Steeds de grootste waarde van het bereik werd gekozen, met als maximum 0.90 wegens stabiliteitsredenen van het model. Voor een stijgende waterstand daalt de reflectiecoëfficiënt omdat dan meestal meer transmissie wordt toegelaten. Omdat op de meeste structuren in de haven ook stormmuurtjes worden voorzien wordt de reflectiecoëfficiënt, van bv. een overstromde kaaimuur, verhoogd om hiermee rekening te houden. De uiteindelijk gekozen reflectiecoëfficiënten per structuur in de haven en per waterstand zijn gegeven in Tabel 1-3.



Figuur 1-2: Typische waarden voor de reflectiecoëfficiënten van structuren in havens (Thompson, 1996)

Tabel 1-3: Gekozen reflectiecoëfficiënten per structuur in de haven

plannr	naam	tan(alpha)	kruin kaai	bekleding	Cr			
					+6.50 mTAW	+7.00 mTAW	+7.50 mTAW	+8.00 mTAW
[-]	[-]	[-]	[m TAW]	[-]				
					[-]	[-]	[-]	[-]
	Havendam west kop	1/2	9.00	betonblokken	0.60	0.60	0.60	0.60
	Havendam west knik	2/3	8.00	betonblokken	0.60	0.60	0.60	0.60
	Havendam west aanl.	2/3	7.00	betonblokken	0.50	0.50	0.50	0.50
	Zeeheldenplein	1/3	8.10	vlak	0.60	0.60	0.60	0.60
56	Kaaimuur NSYC	∞	10.00	palenrij zonder gaten	0.90	0.90	0.90	0.90
314	Kaaimuur Montgom.	20/1 (~∞)	6.90		0.90	0.87	0.83	0.80
rap. overstr. risico's	Mercatorsluis	∞	7.00		0.90	0.90	0.90	0.90
1001	Kaaimuur Montgom.	10/1 (~∞)	6.90		0.90	0.87	0.83	0.80
303	Kaaimuur Montgom.	∞	6.90		0.90	0.87	0.83	0.80
50	Station	10/1 (~∞)	6.70	palenrij zonder gaten	0.85	0.82	0.78	0.75
OHW.0002	Station	∞	7.00	palenrij met gaten	0.60	0.60	0.60	0.60
1090	Station	∞	6.70		0.85	0.82	0.78	0.75
rap. overstr. risico's	Demeysluis	∞	8.00		0.90	0.90	0.90	0.90
1025	Demeysluis	∞	6.70		0.80	0.77	0.73	0.70

plannr	naam	tan(alpha)	kruin kaai	bekleding	Cr			
ODS0004	Demeysluis	∞	6.60		0.80	0.77	0.73	0.70
OHW.0001	Cockerillkaai	∞	6.80		0.85	0.82	0.78	0.75
378.00	Cockerillkaai	25/1 ($\sim\infty$)	6.90		0.85	0.82	0.78	0.75
1071.00	Cockerillkaai	∞	6.90		0.85	0.82	0.78	0.75
1022	Noord Ede	1/1.25	7.40		0.90	0.87	0.83	0.80
rap. overstr. risico's	Sas-Slijkens	∞	6.58		0.90	0.90	0.90	0.90
1038	Noord Ede	1/1	7.60		0.90	0.87	0.83	0.80
80	Noord Ede	1/1	7.20		0.90	0.87	0.83	0.80
rap. overstr. risico's	Sint-Maartenstuw	1/1	7.00		0.90	0.90	0.90	0.90
rap. overstr. risico's	Noord Ede (16)	1/1	7.00		0.80	0.74	0.67	0.60
rap. overstr. risico's	Spuisluis	∞	6.90		0.90	0.90	0.90	0.90
1041	Zandwinning	1/1	6.70		0.70	0.67	0.63	0.60
OHL.0001		1/1.75	6.70		0.60	0.57	0.53	0.50
73		10/1 ($\sim\infty$)	6.70		0.80	0.77	0.73	0.70
52		10/1 ($\sim\infty$)	6.70		0.80	0.77	0.73	0.70
57		10/1 ($\sim\infty$)	6.70		0.80	0.77	0.73	0.70
ORZ.001		∞	6.70		0.80	0.77	0.73	0.70

plannr	naam	tan(alpha)	kruin kaai	bekleding	Cr			
OHZ.0001		∞	6.70		0.80	0.77	0.73	0.70
ORZ.004	Zeewezendok	1/2	6.70		0.60	0.57	0.53	0.50
ORZ.003	Zeewezendok	∞	6.70		0.80	0.77	0.73	0.70
OHT.0001	Wandelaarkaai	∞	6.95	cilinders met damwanden	0.90	0.87	0.83	0.80
19 (+OHT.0001)	Wandelaarkaai	∞	6.95	cilinders met damwanden	0.90	0.87	0.83	0.80
rap. overstr. risico's	Visserijsluis	∞	6.91		0.90	0.90	0.90	0.90
OSS.0002	C-POWER-kaai	∞	7.70		0.90	0.90	0.90	0.90
	Havendam oost aanl	2/3	7.00	betonblokken	0.50	0.50	0.50	0.50
	Havendam oost knik	2/3	8.00	betonblokken	0.60	0.60	0.60	0.60
	Havendam oost kop	1/2	9.00	betonblokken	0.60	0.60	0.60	0.60

In het onderzoek van IMDC (2010) werd echter voor alle structuren een reflectiecoëfficiënt van 0.40 toegepast volgens het SWAN model uit IMDC (2008). Deze nota bevat dan ook nieuwe randvoorwaarden voor de andere delen van de haven (naast de uitbreiding).

1.3 NUMERIEKE INSTELLINGEN

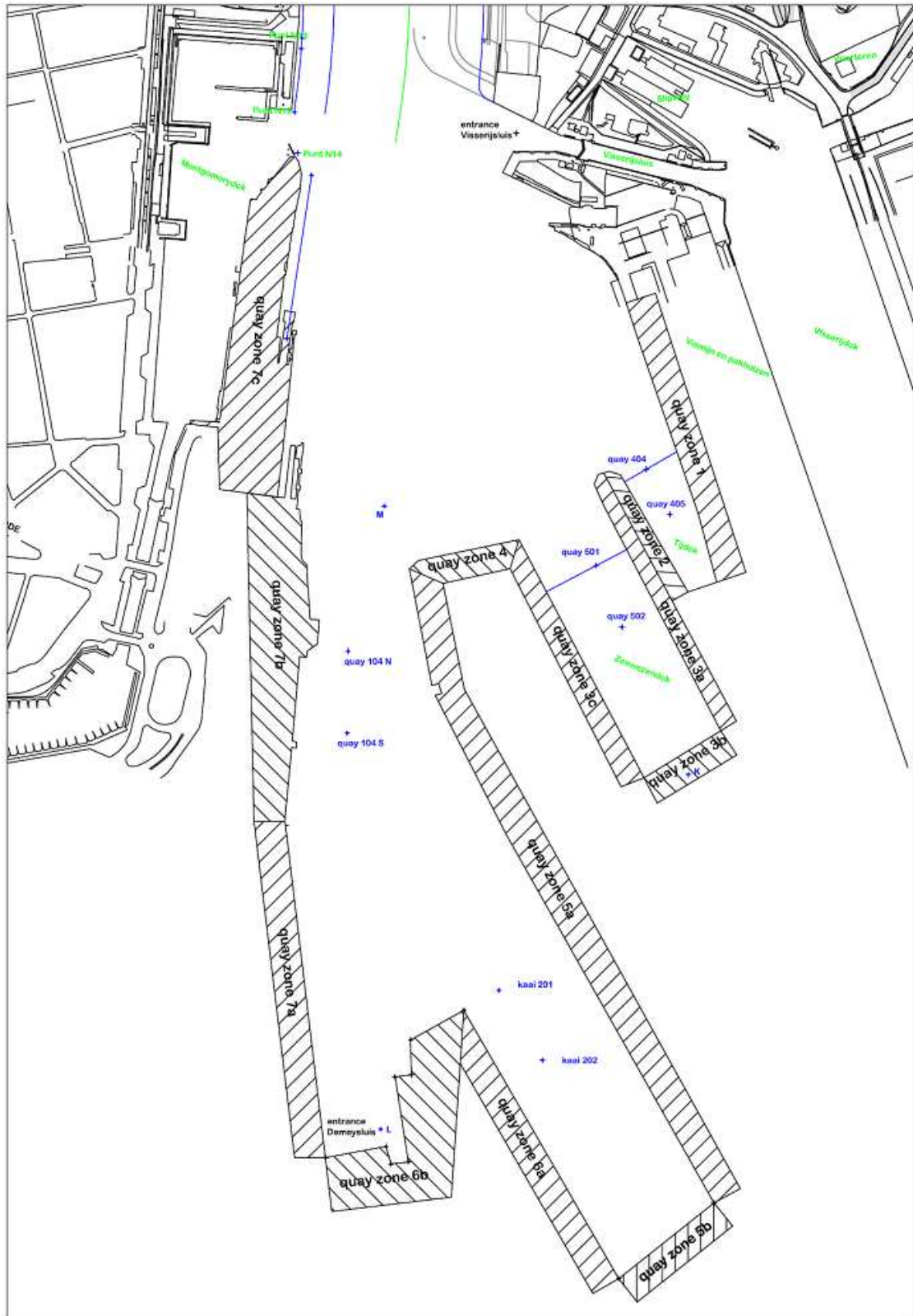
Het basis invoerbestand met alle numerieke instellingen is gegeven in Bijlage A. Een rechthoekig grid werd toegepast met gridcel afmetingen 7.5m x 7.5m. Om de zeer korte windgolven (1.0s à 3.0s) te kunnen modelleren moet het frequentiebereik voldoende hoog gekozen worden, i.e.: 0.05Hz – 2.49Hz.

1.4 RESULTATEN

SWAN simulaties werden uitgevoerd met alle randvoorwaarden uit §1.2.1 (in totaal 40 simulaties).

Dezelfde methodologie als in IMDC (2010) wordt gevolgd om de resultaten te rapporteren. Het gebied van de uitbreiding is onderverdeeld in zones (cf. Figuur 1-3 en Figuur 1-4). Langs elke zone werd gezocht naar de minimale en maximale significante golfhoogte voor elke windrichting en voor een bepaalde waterstand. Dit werd gedaan op basis van contour plots van de significante golfhoogte (cf. bvb. Figuur 1-5 en Figuur 1-6). Niet enkel vlak aan de structuren zelf werd gezocht naar de maximale golfhoogte, maar ook op enige afstand daarvan². Vervolgens werd voor waterstand +8mTAW de meest nadelige windrichting per zone bepaald. Er wordt aangenomen dat voor de andere waterstanden dezelfde windrichtingen meest nadelig zijn. Dit is toegestaan omdat enkel de windsnelheid verandert en de strijklengtes dezelfde blijven.

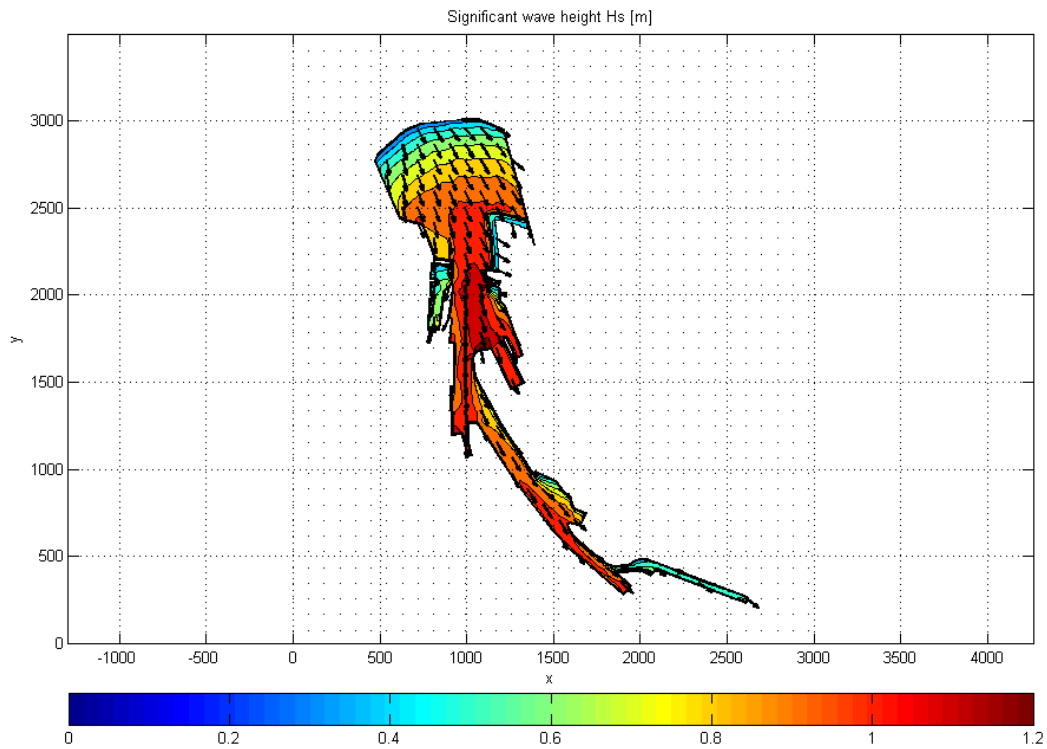
² Bv. voor zones U3 en U4 werd de maximale golfhoogte gevonden meer naar het midden van deze doorgangen toe, vandaar dat de overstaande kaaimuren tot dezelfde zone zijn gerekend. Dezelfde maximale golfhoogte wordt immers gevonden voor deze overstaande kaaimuren volgens deze methode.



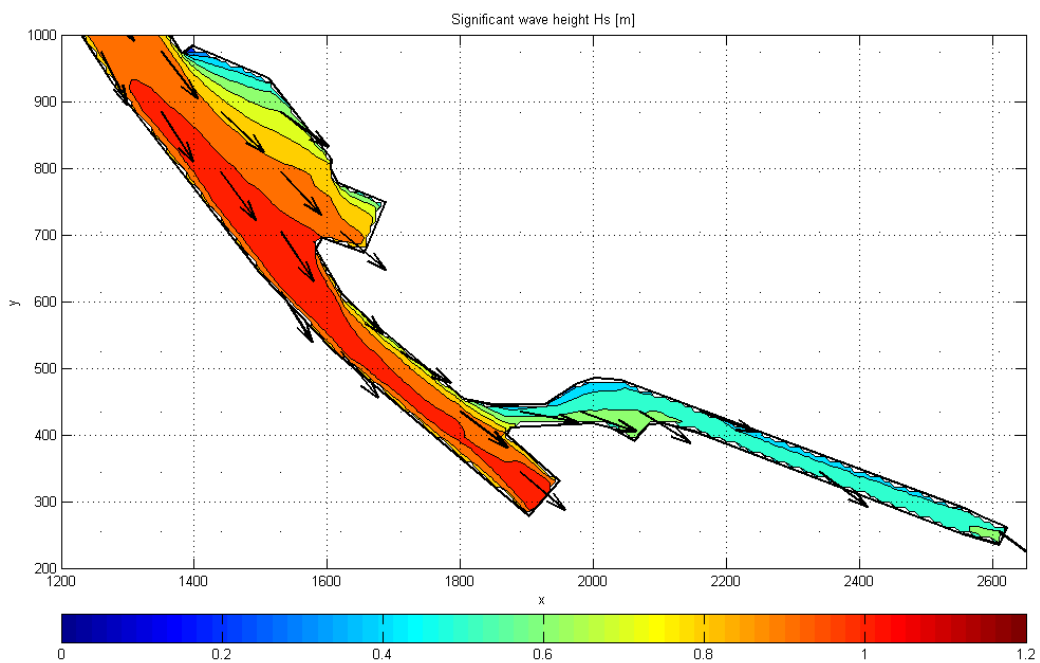
Figuur 1-3: Opdeling van de kaaimuren in zones, gedefinieerd door (UGent 2010).



Figuur 1-4: Opdeling van havenrand in zones, vervolg op opdeling volgens (UGent, 2010)



Figuur 1-5: Contourplot van de significante golfhoogte H_s [m] met pijlen volgens de gemiddelde golfrichting. Contourlijn per 0.10m. SWL=+8.00mTAW, windricht.=NW, windsnelh.=32.5m/s



Figuur 1-6: Contourplot van de significante golfhoogte H_s [m] met pijlen volgens de gemiddelde golfrichting. Contourlijn per 0.10m. SWL=+8.00mTAW, windricht.=NW, windsnelh.=32.5m/s. Zoom naar uitgebreid gedeelte van het SWAN model.

De resultaten van de simulaties met de 1000-jarige condities staan in Tabel 1-4 en de resultaten van de simulaties met condities volgens Verwaest et al. (2008) staan in Tabel 1-5.

De tabellen bevatten per zone de minimale en maximale significante golfhoogte langs deze zone voor de meest nadelige windrichting. De meest nadelige richting komt dan overeen met de richting waarvoor de wind de grootste effectieve strijklengte ter beschikking heeft voor die bepaalde zone. Per zone werd ook een golfrichting bepaald. Deze wordt gegeven in graden t.o.v. de loodrechte op de beschouwde structuur. Golfrichtingen cursief gedrukt zijn meer nadelige richtingen (meer loodrecht) die tot een andere windrichting behoren en dus met lagere golfhoogten (hier niet meegegeven).

Tabel 1-4: minimale en maximale significante golfhoogte H_s door wind per zone en voor de meest nadelige windrichting (met randvoorwaarden voor $RP = 1000$ jaar).

Zone	bepalende windrichting	RP = 1000j		Golfrichting
		min. H_s	max. H_s	
[-]	[-]	[m]	[m]	[°loodrecht]
1	NW	0.50	0.75	45 - 65
2	NW	0.70	0.73	45 - 0
3a	NW	0.70	0.80	75 - 5
3b	NW	0.73	0.75	0 - 0
3c	NW	0.70	0.80	10 - 40
4	NW	0.80	0.84	0 - 0
5a	NW	0.50	0.70	60 - 60
6a	NW	0.60	0.65	45 - 30
6b	NW	0.70	0.80	0 - 0
7a	NW	0.60	0.78	45 - 55
7b	N	0.61	0.73	90 - 0
7c	NW	0.45	0.73	90 - 45
MONT	NW	0.30	0.53	-
U1	NW	0.35	0.61	70 - 0
Spuikom	NW	0.50	0.63	5 - 5
U2	NW	0.62	0.79	90 - 0
U3	NW	0.55	0.75	80 - 80
Sas Sl.	NW	0.70	0.75	0 - 0
U4	W	0.40	0.62	90 - 5
St.-M. stuw	W	0.63	0.63	0 - 0
U5	NW/-37°	0.65	0.75	80 - 85

Tabel 1-5: minimale en maximale significante golfhoogte H_s door wind per zone en voor de meest nadelige windrichting (waterstanden en windsnelheden volgens Verwaest et al. (2008))

Zone	bepalende windrichting	SWL = +6.50mTAW			SWL = +7.00mTAW		
		min. H_s	max. H_s	Golfrichting	min. H_s	max. H_s	Golfrichting
[-]	[-]	[m]	[m]	[loodrecht]	[m]	[m]	[loodrecht]
1	NW	0.45	0.72	45 - 65	0.55	0.82	45 - 65
2	NW	0.65	0.71	45 - 0	0.78	0.82	45 - 0
3a	NW	0.68	0.75	75 - 5	0.75	0.87	75 - 5
3b	NW	0.65	0.72	0 - 0	0.75	0.85	0 - 0
3c	NW	0.65	0.70	10 - 40	0.75	0.80	10 - 40
4	NW	0.70	0.79	0 - 0	0.90	0.94	0 - 0
5a	NW	0.50	0.70	60 - 60	0.55	0.80	60 - 60
6a	NW	0.55	0.6	45 - 30	0.67	0.70	45 - 30
6b	NW	0.70	0.75	0 - 0	0.80	0.89	0 - 0
7a	NW	0.60	0.75	45 - 55	0.60	0.88	45 - 55
7b	N	0.56	0.68	90 - 0	0.66	0.80	90 - 0
7c	NW	0.43	0.68	90 - 45	0.40	0.80	90 - 45
MONT	NW	0.30	0.50	-	0.30	0.60	-
U1	NW	0.30	0.60	70 - 0	0.43	0.68	70 - 0
Spuikom	NW	0.50	0.60	5 - 5	0.60	0.70	5 - 5
U2	NW	0.60	0.75	90 - 0	0.70	0.87	90 - 0
U3	NW	0.53	0.71	80 - 80	0.60	0.82	80 - 80
Sas Sl.	NW	0.65	0.72	0 - 0	0.75	0.84	0 - 0
U4	NW	0.35	0.45	90 - 5	0.38	0.53	90 - 5
St.-M. stuw	W	0.45	0.47	0 - 0	0.50	0.53	0 - 0
U5	NW	0.60	0.70	80 - 85	0.75	0.82	80 - 85

Zone	bepalende windrichting	SWL = +7.50mTAW			SWL = +8.00mTAW		
		min. H _s	max. H _s	Golfrichting	min. H _s	max. H _s	Golfrichting
[-]	[-]	[m]	[m]	[°loodrecht]	[m]	[m]	[°loodrecht]
1	NW	0.65	0.95	45 - 65	0.80	1.07	45 - 65
2	NW	0.90	0.95	45 - 0	0.95	1.12	45 - 0
3a	NW	0.90	1.04	75 - 5	0.90	1.20	75 - 5
3b	NW	0.85	0.97	0 - 0	0.90	1.10	0 - 0
3c	NW	0.90	0.95	10 - 40	0.95	1.10	10 - 40
4	NW	1.00	1.10	0 - 0	1.10	1.25	0 - 0
5a	NW	0.65	0.90	60 - 60	0.70	1.10	60 - 60
6a	NW	0.78	0.83	45 - 30	0.85	0.90	45 - 30
6b	NW	0.93	1.03	0 - 0	1.05	1.15	0 - 0
7a	NW	0.70	1.00	45 - 55	0.60	1.12	45 - 55
7b	N	0.78	0.92	90 - 0	0.90	1.04	90 - 0
7c	NW	0.52	0.90	90 - 45	0.60	1.05	90 - 45
MONT	NW	0.30	0.69	-	0.38	0.77	-
U1	NW	0.45	0.78	70 - 0	0.45	0.87	70 - 0
Spuikom	NW	0.70	0.82	5 - 5	0.70	0.90	5 - 5
U2	NW	0.80	1.00	90 - 0	0.90	1.10	90 - 0
U3	NW	0.75	0.95	80 - 80	0.75	1.06	80 - 80
Sas Sl.	NW	0.85	0.96	0 - 0	0.90	1.08	0 - 0
U4	NW	0.40	0.60	90 - 5	0.40	0.67	90 - 5
St.-M. stuw	W	0.60	0.60	0 - 0	0.68	0.68	0 - 0
U5	NW	0.85	0.94	80 - 85	0.95	1.07	80 - 85

Het valt op dat vrij grote golfhoogten worden bekomen. Alle gerapporteerde significante golfhoogtes bevatten immers ook de gereflecteerde golfenergie omdat nog geen betrouwbare en consistente methode werd ontwikkeld om de inkomende golfenergie van de gereflecteerde energie te scheiden. Dit in combinatie met een hoge inschatting van de reflectiecoëfficiënt maakt dat deze waarden als conservatief en dus veilig mogen worden beschouwd³.

De gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ van deze windgolven varieert tussen minimaal 1.30s en maximaal 2.80s voor de volledige haven behalve in de Noord Ede arm (zone U4 en St.-Maarten stuw) waar de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ minimaal 1.00s en maximaal 2.30s is en in het Montgomerydok waar de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ minimaal 1.50s en maximaal 2.30s is.

³ Behalve mogelijks niet indien de windsnelheden volgens Verwaest et al. (2008) voor andere richtingen dan NW en NNW onderschat zijn.

2. CONCLUSIES

Het bestaande SWAN-model uit IMDC (2010) werd uitgebreid naar de diepst in land gelegen tijonderhevige gebieden van de haven. Dit gebied start vanaf de Diepwaterkaai gaande voorbij de brug aan RYCO tot aan Sas-Slijkens en de St.-Maarten stuw.

Naar analogie met de methode uit IMDC (2010) werden de kaaimuren en glooiingen onderverdeeld in representatieve zones. Langs elke zone werd de minimale en maximale significante golfhoogte gezocht voor de meest nadelige windrichting voor die zone.

De gerapporteerde maximale significante golfhoogten per zone variëren tussen 0.30m en 1.20m. Dit lijken relatief hoge waarden te zijn. De significante golfhoogte bevat immers ook de gereflecteerde golfenergie omdat nog geen betrouwbare en consistente methode werd ontwikkeld om de inkomende golfenergie van de gereflecteerde energie te scheiden. Dit in combinatie met een hoge inschatting van de reflectiecoëfficiënten maakt dat de gerapporteerde significante golfhoogtes als conservatief en dus veilig mogen worden beschouwd⁴.

Uit de golfmodelleringen ter bepaling van de golfindringing (UGent, 2009 & IMDC, 2011) blijkt dat de golfenergie van buiten de haven die het uitbreidingsgebied bereikt zeer laag is en op zijn minst ondergeschikt aan de lokaal windgegenereerde golfenergie. Na superpositie van de lokaal windgegenereerde golfhoogte met de indringingsgolfhoogte zal de totale golfhoogte dus een weinig hoger zijn dan de golfhoogte alhier gerapporteerd.

De gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ van deze windgolven varieert tussen minimaal 1.30s en maximaal 2.80s voor de volledige haven behalve in de Noord Ede arm (zone U4 en St.-Maarten stuw) waar de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ minimaal 1.00s en maximaal 2.30s is en in het Montgomerydok waar de gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ minimaal 1.50s en maximaal 2.30s is.

De hydrodynamische randvoorwaarden voor de volledige haven zijn opnieuw gegeven in deze nota omdat andere reflectiecoëfficiënten zijn gekozen dan in vorige modellering (IMDC, 2010).

⁴ Behalve mogelijks niet indien de windsnelheden volgens Verwaest et al. (2008) voor andere richtingen dan NW en NNW onderschat zijn.

3. REFERENTIES

IMDC, 2008. "Havenuitbreiding Oostende: golfmodellering". I/NO/11213/08.003/ABO.

IMDC, 2010. "Invloed van de wind op het golfklimaat in de haven van Oostende". I/NO/11213/10.370/VGR, Versie 4.1.

IMDC, WL, 2011. "Extreem golfklimaat in de Belgische havens: golfmodelleringen."

Thompson, E. F., Chen, H. S., & Hadley, L. L. (1996). "Validation of Numerical Model for Wind Waves and Swell in Harbors"

UGent, 2009. *Design of Oostende Harbour: Numerical Simulation of Wave Propagation, Wave conditions in the inner port, final situation T2, 'Rechte dam met basisconcept SWB'*. Rapport DBO107/90.

UGent, 2010. „Determination of disturbance coefficients kd near quay walls using partitioning." DBO107/96, Annex to DBO107/90.

Verwaest, T.; Van Poucke, Ph.; Vanderkimpen, P.; Van der Biest, K.; Reyns, J.; Peeters, P.; Kellens W.; Vanneuville, W.; Mostaert, F.; 2008. "Overstromingsrisico's aan de Vlaamse kust. Evaluatie van de zeewering. Deel 1: Methodologie." WL Rapporten, 718/2A. Waterbouwkundig Laboratorium & Universiteit Gent & Soresma-Haecon: Borgerhout, België.

Bijlage A SWAN input

A.1 SWAN input file

```

$*****HEADING*****
$
PROJ 'oostende' 'T2'
$proto bestand voor de superstormen voor haven oostende met enkel wind
$
$*****MODEL INPUT*****
$
SET LEVEL {wst}
SET NAUT
MODE STATIONARY
MODE TWOD
$
CGRID 0 0 0 2992.5 3495 399 466 CIRCLE 64 0.05 2.49 41
$
INPGRID BOTTOM 0 0 0 1499 1749 2 2 EXC -9
READ BOTTOM -1 '..\..\..\Bathymetry\Bathy_alles_3_3_SWAN_20nr9.txt' 1
15 FREE
$
GEN3 KOMEN AGROW
BREAK CON 1.00 0.73
FRIC JON 0.0670
$
NUM STOPC STAT 50
$
$obstakels (golfbrekers, glooiingen, kaaimuren,...)
OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 732.255 2986.515 642.847 2950.720
OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 642.847 2950.720 483.006 2806.361
OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 483.006 2806.361 469.290 2773.248
OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 469.290 2773.248 612.303 2439.334
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 612.303 2439.334 747.030 2401.791
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 747.030 2401.791 819.513 2204.905
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 918.231 2196.565 910.895 2107.598
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 910.895 2107.598 895.707 2108.672
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 895.707 2108.672 901.322 2173.190
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 901.322 2173.190 796.704 2180.953
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 796.704 2180.953 790.518 2093.402
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 790.518 2093.402 831.557 2090.896
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 831.557 2090.896 830.231 2073.371
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 830.231 2073.371 795.010 2075.930
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 795.010 2075.930 789.678 2001.210
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 789.678 2001.210 808.659 1999.732
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 808.659 1999.732 807.202 1980.301
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 807.202 1980.301 788.404 1981.763
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 788.404 1981.763 775.232 1803.227
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 775.232 1803.227 790.100 1802.150
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 790.100 1802.150 773.425 1727.534
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 773.425 1727.534 785.627 1725.001
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 785.627 1725.001 808.076 1800.907
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 808.076 1800.907 840.316 1798.491
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 840.316 1798.491 871.409 2020.632
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 871.409 2020.632 876.730 2019.854
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 876.730 2019.854 909.617 2061.497
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 909.617 2061.497 914.930 2061.231
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 914.930 2061.231 920.524 2045.023
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 920.524 2045.023 895.130 1867.060

```


OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 895.130	1867.060	911.756	1864.539
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 911.756	1864.539	897.417	1729.387
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 897.417	1729.387	928.372	1726.041
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 928.372	1726.041	924.838	1475.660
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 924.838	1475.660	908.995	1477.122
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 908.995	1477.122	917.351	1193.844
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 917.351	1193.844	969.344	1206.590
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 969.344	1206.590	1007.966	1075.415
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1007.966	1075.415	1026.877	1080.439
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1026.877	1080.439	1012.483	1161.112
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1012.483	1161.112	1011.395	1266.135
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1011.395	1266.135	1058.555	1267.317
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1058.555	1267.317	1277.431	926.841
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1277.431	926.841	1498.614	643.398
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1498.614	643.398	1607.407	527.627
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1607.407	527.627	1903.068	278.753
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1903.068	278.753	1949.986	331.693
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1949.986	331.693	1870.358	401.404
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1870.358	401.404	1874.645	411.756
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1874.645	411.756	1998.164	417.901
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1998.164	417.901	2024.357	411.638
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2024.357	411.638	2061.626	390.386
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2061.626	390.386	2083.811	416.262
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2083.811	416.262	2103.744	417.360
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2103.744	417.360	2155.609	404.511
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2155.609	404.511	2554.777	251.577
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2554.777	251.577	2610.232	235.624
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2610.232	235.624	2621.159	262.002
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2621.159	262.002	2582.638	277.958
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2582.638	277.958	2561.245	289.061
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2561.245	289.061	2040.859	483.291
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2040.859	483.291	2001.875	486.457
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 2001.875	486.457	1972.897	477.689
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1972.897	477.689	1926.610	447.532
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1926.610	447.532	1848.293	446.543
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1848.293	446.543	1805.996	455.341
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1805.996	455.341	1655.622	580.924
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1655.622	580.924	1624.467	610.219
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1624.467	610.219	1583.323	679.946
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1583.323	679.946	1593.093	695.340
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1593.093	695.340	1655.490	674.394
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1686.852	750.795	1616.870	779.060
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1616.870	779.060	1605.004	799.446
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1605.004	799.446	1606.266	814.915
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1606.266	814.915	1512.518	935.264
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1512.518	935.264	1396.196	984.783
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1396.196	984.783	1381.097	974.559
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1381.097	974.559	1198.085	1258.486
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1198.085	1258.486	1050.778	1535.709
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1050.778	1535.709	1034.227	1635.759
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1034.227	1635.759	1047.734	1670.645
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1047.734	1670.645	1142.027	1689.877
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1142.027	1689.877	1255.879	1462.124
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1255.879	1462.124	1329.752	1498.591
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1329.752	1498.591	1210.221	1747.207
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1210.221	1747.207	1215.658	1759.822
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1215.658	1759.822	1229.035	1755.651
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1229.035	1755.651	1285.587	1638.191
OBST TRANSM	0	REFL 0.9	LINE 1285.587	1638.191	1320.765	1655.169

```

OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1320.765 1655.169 1222.256 1938.164
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1222.256 1938.164 1189.942 1975.506
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1189.942 1975.506 1190.910 1995.961
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1190.910 1995.961 1227.786 1994.693
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1227.786 1994.693 1227.978 2010.814
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1227.978 2010.814 1191.681 2012.246
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1191.681 2012.246 1192.818 2036.966
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1192.818 2036.966 1150.365 2057.178
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1150.365 2057.178 1133.170 2056.842
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1133.170 2056.842 1125.652 2041.976
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1125.652 2041.976 1116.639 2046.361
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1116.639 2046.361 1127.370 2066.985
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1127.370 2066.985 1167.991 2066.350
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1167.991 2066.350 1189.391 2060.707
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1189.391 2060.707 1193.839 2078.323
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1193.839 2078.323 1172.223 2083.543
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1172.223 2083.543 1108.201 2115.955
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1108.201 2115.955 1110.975 2144.532
OBST TRANSM 0 REFL 0.9 LINE 1110.975 2144.532 1190.139 2136.847
OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 1391.310 2284.979 1214.249 2949.206
OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 1214.249 2949.206 1065.741 3010.720
OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 1065.741 3010.720 971.086 3010.764

```

\$ ingang sluiten

```

OBST TRANSM 0 REFL 0.2 LINE 971.086 3010.764 732.255 2986.515

```

\$

\$

\$

\$*****MODEL OUTPUT*****

\$

OUTPUT OPTIONS TABLE 16 BLOCK 9 6

\$

```

BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_xp.blk' LAY-OUT 1 XP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_yp.blk' LAY-OUT 1 YP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_dep.blk' LAY-OUT 1 DEP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_hs.blk' LAY-OUT 1 HS
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_tmm10.blk' LAY-OUT 1 TMM10
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_per.blk' LAY-OUT 1 PER
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_rtp.blk' LAY-OUT 1 RTP
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_tps.blk' LAY-OUT 1 TPS
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_dspr.blk' LAY-OUT 1 DSPR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_dir.blk' LAY-OUT 1 DIR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_pdir.blk' LAY-OUT 1 PDIR
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_ubot.blk' LAY-OUT 1 UBOT
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_urms.blk' LAY-OUT 1 URMS
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_dhsign.blk' LAY-OUT 1 DHSIGN
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD '{ident}_drtm01.blk' LAY-OUT 1 DRMT01

```

\$

\$

```

POINTS 'uitptn' FILE '..\..\..\Coordn\uitvoerptn.txt'
TABLE 'uitptn' NOHEADER '{ident}_uitvoerptn_tbl.swn' XP YP DEP HS RTP
& TPS DIR PDIR TM01 TM02 TMM10 WIND
SPEC 'uitptn' SPEC1D ABS '{ident}_uitvoerptn_spec1D.swn'
SPEC 'uitptn' SPEC2D ABS '{ident}_uitvoerptn_spec2D.swn'

```

\$

WIND {wvs} {wrs}

COMPUTE

STOP

\$



Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.watlab.be