

Noodmaatregelen voor de bescherming van de Delflandse kust

Modelonderzoek naar de effecten van gestrande zeeschepen op de kustveiligheid

Hoogheemraadschap Delfland



Opdrachtgever:
Hoogheemraadschap Delfland

Noodmaatregelen voor de bescherming van de Delflandse kust

D.J.R. Walstra en C. Bos

Rapport

oktober 2009

Opdrachtgever	Hoogheemraadschap Delfland
Titel	Noodmaatregelen voor de bescherming van de Delflandse kust

Samenvatting

De invloed van het parallel aan de kust, of onder een kleine hoek met de kust, laten stranden van schepen voor de kust van Delfland op de lokale duinafslag is middels schematische numerieke berekeningen onderzocht. Uitgangspunt waren de zeer extreme omstandigheden, met een kans van voorkomen van ongeveer eens per honderdduizend jaar, welke ook bij de landelijke oefening Waterproef (november 2008) zijn gebruikt. Hierbij is in detail gekeken naar de effecten van golfdoordringing en circulatiestromingen op de optredende duinafslag.

De belangrijkste bevinding is dat een rij van schepen als één geheel werken en een positief reducerend effect op de duinafslag hebben indien de onderlinge afstanden tussen de gestrande schepen niet te groot zijn. Het is echter ook aangetoond dat de duinafslag lokaal in het beschermde kustvak kan toenemen indien de onderlinge afstand te groot wordt. Op basis van de bestudeerde configuraties lijkt een afstand van 100 m een bovengrens. Bij een te grote afstand (of door het wegslaan van een schip) kan dus lokaal extra duinafslag optreden. Voor de situatie waarbij één schip niet meer aanwezig is wordt er 5% - 10% extra duinafslag voorspeld ten opzichte van de situatie zonder schepen. Als de schepen onder een hoek stranden heeft dat een beperkt (positief) effect op de beschermende werking. Echter, ten noorden van de gestrande schepen blijkt, voor noordwestelijke golven, een aanzienlijke toename (15%) van de duinafslag plaats te vinden welke wordt veroorzaakt door een opstuwing van water. Voor noordwestelijke golfcondities treedt ten zuiden van de gestrande schepen over 1 – 2 km ongeveer 5%-10% extra duinafslag (lijzijde erosie) op voor alle onderzochte configuraties.

Referenties			1200465-000-HYE-0003					
Ver	Auteur		Datum	Opmerk.	Review	Goedkeuring		
1	D.J.R. Walstra		7 Juli 2009	Concept	AR Van Dongeren	KJ Bos		
2	D.J.R. Walstra		15 Oktober 2009	Definitief	AR Van Dongeren	KJ Bos		
Projectnummer			1200465					
Trefwoorden			Duinafslag, Noodmaatregel, Stranden van schepen, Delft3D, DurosTa					
Aantal bladzijden			21					
Classificatie			Geen					
Status			Definitief					

Inhoud

1	Inleiding.....	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Leeswijzer	1
1.3	Aanpak.....	1
1.4	Toegepaste rekenmodellen	5
1.4.1	Delft3D.....	5
1.4.2	DurosTa.....	6
2	Effect van gestrande zeeschepen	7
2.1	Inleiding.....	7
2.2	Invloed van diffractie.....	7
2.3	Invloed van Circulatiestromingen	8
2.3.1	algemeen.....	8
2.3.2	Stromingspatronen.....	9
2.4	Bodemveranderingen en duinafslag.....	9
3	Conclusies en Aanbevelingen	14
3.1	Conclusies	14
3.2	Aanbevelingen	15
4	Referenties	17

Figuren

Figuren in de tekst:

Figuur I	Jarkusprofiel 11221 (2004) bij Ter Heijde met schematische weergave van locatie van zeeschepen.	2
Figuur II	Overzicht van de beschouwde configuraties van gestrande schepen in de huidige studie (niet op schaal). Boven: Configuratie 1: 7 schepen met tussenruimte van 50 m, 2 ^{de} : Configuratie 2: 6 schepen met tussenruimte van 100 m, 3 ^{de} : Configuratie 3: 6 schepen met tussenruimte van 50 m en middelste schip niet geplaatst, onder: Configuratie 4: 6 schepen onder hoek van 20°.....	3
Figuur III	Golfdiffractie door een gat (bron: www.grandinetti.org).	7
Figuur IV	Golfdiffractie door een meerdere gaten met interferentie (bron: Wikipedia).	8
Figuur V	Kustlijnbepaling op basis van MKL benadering (integratie van -2 m tot 10 m NAP). Zwart: initiële profiel, Rood: eind profiel.	10
Figuur VI	Duinafslag (zwarte pijl) op basis van DurosTa berekening. Zwart: initiële profiel, Rood: eind profiel.....	11

Figuren achterin rapport:

Figuur 1	Overzicht van rekenroosters en modelbodem
Figuur 2	Bovenaanzicht en transecten van golfhoogteverloop voor deining
Figuur 3	Bovenaanzicht en transecten van golfhoogteverloop voor windzee
Figuur 4	Dieptegemiddelde snelheid zonder gestrande schepen; Golven uit Noordwestelijke richting
Figuur 5	Dieptegemiddelde snelheid met gestrande schepen; Golven uit Noordwestelijke richting
Figuur 6	Dieptegemiddelde snelheid met gestrande schepen; Golven uit Westelijke richting
Figuur 7	Cumulatieve erosie en sedimentatie zonder gestrande schepen; Golven uit Noordwestelijke richting
Figuur 8	Cumulatieve erosie en sedimentatie met gestrande schepen; Golven uit Noordwestelijke richting
Figuur 9	Relatieve erosie en sedimentatie: verschil tussen situatie met en zonder gestrande schepen; Golven uit Noordwestelijke richting
Figuur 10	Relatieve kustlangse duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Noordwestelijke richting; 7 schepen met tussenafstand van 50 m
Figuur 11	Relatieve kustdwarse duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Noordwestelijke richting; 7 schepen met tussenafstand van 50 m
Figuur 12	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Noordwestelijke richting; 7 schepen met tussenafstand van 50 m

Figuur 13	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Noordwestelijke richting; 6 schepen met tussenafstand van 100 m
Figuur 14	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Noordwestelijke richting; 6 schepen met tussenafstand van 50 m, middelste schip van de oorspronkelijke 7 schepen niet gestrand
Figuur 15	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Noordwestelijke richting; 7 schepen onder hoek van 20° t.o.v. de kust met tussenafstand van 100 m
Figuur 16	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Westelijke richting; 7 schepen met tussenafstand van 50 m
Figuur 17	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Westelijke richting; 6 schepen met tussenafstand van 100 m
Figuur 18	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Westelijke richting; 6 schepen met tussenafstand van 50 m, middelste schip van de oorspronkelijke 7 schepen niet gestrand
Figuur 19	Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen; Golven uit Westelijke richting; 7 schepen onder hoek van 20° t.o.v. de kust met tussenafstand van 100 m

Begrippenlijst

Circulatiestroming:	Ronddraaiende waterstroming ten gevolge van variaties in de golven en getij
Deining:	Door wind gegenereerd golfpatroon aan het wateroppervlak van de zee of oceaan. In tegenstelling tot windzee/zeegang wordt het niet langer gevoed door wind. Hoe verder van de oorsprong — waar de deining als zeegang ontstaan is — hoe langer de periode en de golflengte, en hoe langer en rechter de golfkammen worden, terwijl de golfhoogte (zeer) langzaam afneemt.
Delft3D:	Numeriek gebiedsmodel waarmee de bodemveranderingen ten gevolge van de gecombineerde werking van golven, wind en getijgedreven stroming kunnen worden gesimuleerd
Duinafslag:	Horizontale (landwaarste) verplaatsing van het duinfront ten gevolge van golfaanval
DurosTa:	Numeriek (kustdwars)profielmodel
Erosie:	Slijtage van een vast oppervlak waarbij materiaal wordt verplaatst of geheel verdwijnt. Op Aarde gebeurt erosie vooral door de werking van wind, golven, stromend water en ijs.
Getijgedrevenstroming:	Ten gevolge van de verticale waterbeweging die optreedt onder invloed van de zwaartekracht van de maan en in mindere mate de zon en de andere planeten op de roterende aarde ontstaat ook een horizontale waterbeweging tot gevolg: de getijstroom.
Golfdiffractie:	Het afbuigen van een golf langs een ondoordringbaar obstakel. Meestal gaat het om de zijdelingse verbreding door interferentie van een golf die een opening in een ondoordringbaar scherm passeert.
Golfoordringing:	Hoeveelheid golven die <i>door</i> een constructie heen komt.
Golfoverslag:	Hoeveelheid golven die <i>over</i> een constructie heenslaan
Hydrodynamica:	Wiskundige beschrijving van het gedrag van fluida (vloeistoffen en gassen).
Lijzijde erosie:	Benedenstroomse erosie ten gevolge van variaties in de langsstroming.
Kustvak:	Deel van de kust.
Rekenrooster:	Grid waarop de water, transport en bodemvergelijkingen worden opgelost.
Sediment:	Door wind, water en/of ijs getransporteerd materiaal. Voorbeelden van sedimenten zijn grind, zand, silt en lutum.
Windzee/Zeegang:	Door de wind gegenereerd golfpatroon aan het wateroppervlak op zee of op de oceaan. Zeegang is onregelmatig, steil, met korte kammen, vol met kleine golfjes en rimpels en vaak met schuim bedekt.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het kader van de landelijke oefening Waterproef die begin november 2008 gehouden werd heeft Deltares een spoedadvies (Walstra, 2008) gegeven betreffende beschermende werking van gestrande zeeschepen voor de Delflandse kust (Ter Heijde en Scheveningen) aan het Hoogheemraadschap van Delfland (HHD). Dit spoedadvies toonde aan dat gestrande zeeschepen een beschermende werking hebben indien de gaten tussen de schepen niet te groot zijn. Deze studie heeft echter uitsluitend gekeken naar de golfdoordringing en een eerste schatting gemaakt van de duinafslag zonder een terugkoppeling met de optredende lokale hydrodynamica. Tevens is het effect van golfdiffractie niet voldoende onderzocht. In het spoedadvies is aanbevolen deze aspecten nader te onderzoeken.

Aangezien de beschermende werking van gestrande schepen potentieel een doorslaggevende rol kan spelen bij het voorkomen van een duindoorbraak onder zeer extreme omstandigheden is een vervolgtraject ingezet om het effect beter te kwantificeren en de grootste onzekerheden uit het spoedadvies verder te onderzoeken. Middels een email op 1 april 2009 en brief op 26 juni 2009 (kenmerk: 764986) heeft de heer Woudenberg (senior beleidsadviseur calamiteitenzorg) Deltares' aanbieding met kenmerk 1200465-000-HYE-0003 (24 maart 2009) geaccepteerd.

Deze studie is uitgevoerd door ir. Dirk-Jan Walstra (projectleiding, modelinterpretatie en rapportage), ir. Carline Bos (modellering en modelinterpretatie) en ir. Arjen Luijendijk (modellering en modelinterpretatie). Dr.ir. Ap van Dongeren was verantwoordelijk voor de review van het rapport.

Een aantal afbeeldingen op het voorblad zijn beschikbaar gesteld door Smit Salvage.

1.2 Leeswijzer

In de resterende secties van Hoofdstuk 1 wordt de gevolgde aanpak uitgewerkt en wordt het geconstrueerde drie-dimensionaal rekenmodel beschreven. In Hoofdstuk 2 wordt een gedetailleerde analyse van de modelresultaten gegeven. Ten slotte worden in Hoofdstuk 3 de conclusie en aanbevelingen gegeven. De meeste modelresultaten worden getoond in figuren achter het tekstgedeelte van het rapport welke worden aangegeven met normale (Arabische) cijfers. Figuren die zijn opgenomen in het tekstgedeelte van het rapport worden aangegeven met Romeinse cijfers.

1.3 Aanpak

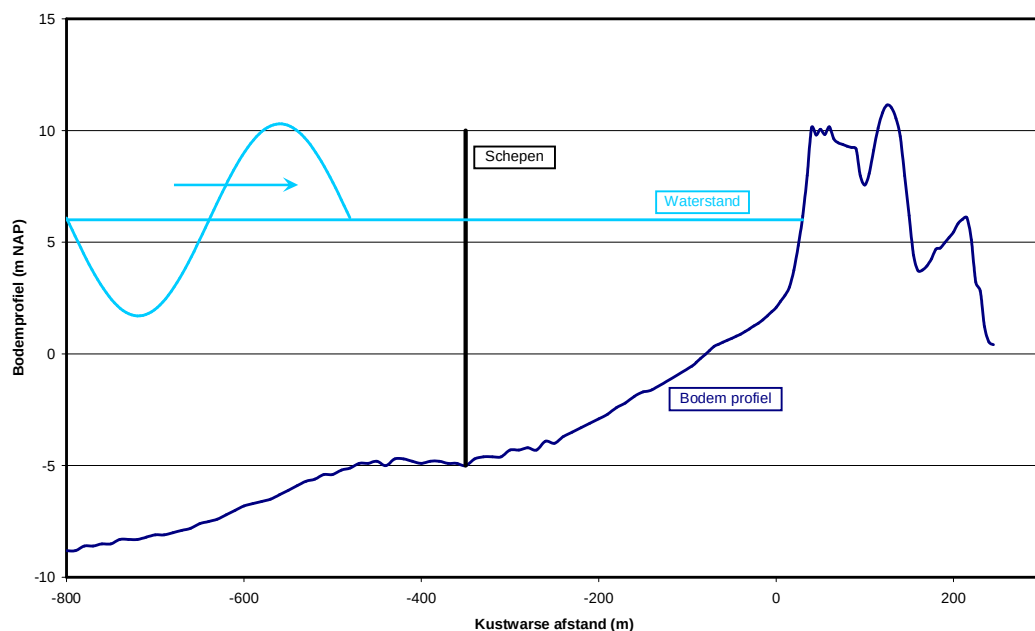
Zoals gezegd vormen golfdiffractie en circulatiestromingen de grootste onzekerheden in het spoedadvies welke middels de toepassing van een drie-dimensionaal model onderzocht kunnen worden. Golfdiffractie heeft vooral invloed op de lokale golfdoordringing en de daarbij behorende toe- of afnemende duinafslag. Circulatiestromingen kunnen vooral ontstaan door de (terug)koppeling de bodemontwikkeling en de hydrodynamica. Deze circulatiestromingen kunnen lokaal zowel een toename als een afname van de duinafslag bewerkstelligen. Dergelijke stromingen kunnen zand in kustlangse richting verplaatsen waardoor een evenwichtsprofiel zich later (eerder) instelt met een toename (afname) van de

duinafslag als gevolg. Tevens zijn er effecten te verwachten in de overgangsgebieden (van beschermd naar onbeschermd). Afhankelijk van de golfrichting kan dit lokaal leiden tot een vermindering of vermeerdering van de duinafslag.

De studie wordt zodanig opgezet dat bovenstaande effecten apart worden onderzocht:

- 1 Ten aanzien van golfdiffractie zal middels een aantal golfsimulaties (met het SWAN-golfmodel waarin diffractie benaderend wordt beschreven) worden onderzocht in hoeverre dit fysische proces van belang is voor de lokale duinafslag.
- 2 Op basis van een numeriek gebiedsmodel zal onderzocht worden in hoeverre de interactie tussen de hydrodynamica (golven en stroming) en de morfologie (duinafslag en kustontwikkeling) van belang is voor lokale erosie achter de gaten en in het overgangsgebied. Aangezien het gebiedsmodel de volledige configuratie kan meenemen wordt de erosie tussen de gaten en de lijzijde erosie integraal beschouwd.

In de studie wordt uitgegaan van de modelschematisatie van het speedadvies. Het betreft een bodemprofiel zoals aangeleverd door HHD (Jarkus profiel 11221 bij Ter Heijde, jaar 2004), zie ook Figuur I.

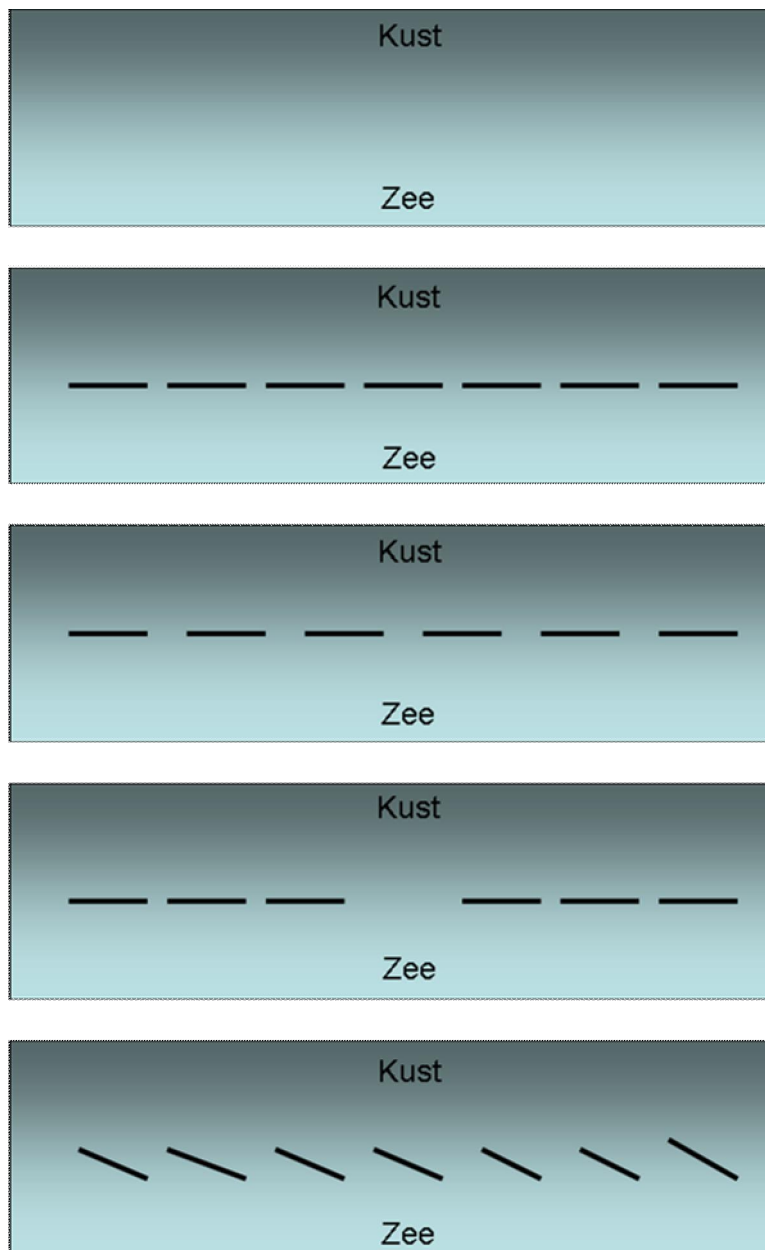


Figuur I Jarkusprofiel 11221 (2004) bij Ter Heijde met schematische weergave van locatie van zeeschepen.

De zeeschepen worden beschouwd als vormvaste elementen die bovendien ruimtelijk gefixeerd zijn. De zeeschepen liggen op ongeveer -5 m NAP en 350 m uit de kust en hebben een lengte van 200 m. De ruimte tussen de schepen is in deze studie gevarieerd. Tevens zijn kustparallel gestrande schepen en schepen gestrand onder een hoek van ongeveer 20° onderzocht. In de beschouwing is ervan uitgegaan dat de zeeschepen alle golven tegenhouden, bijvoorbeeld golfoverslag wordt niet meegenomen. De onderzochte configuraties van de schepen zijn in samenspraak met HHD opgesteld. De configuraties worden samengevat in Tabel 1 en Figuur II.

Tabel 1 Overzicht van de onderzochte configuraties.

ID	Configuraties
0	Referentie situatie zonder gestrande zeeschepen
1	7 zeeschepen met een onderlinge tussenruimte van 50 m
2	6 zeeschepen met een onderlinge tussenruimte van 100 m
3	6 zeeschepen met een onderlinge tussenruimte van 50 m en gat van 300 m
4	7 zeeschepen met een onderlinge tussenruimte van 50 m welke onder een hoek van ongeveer 20° zijn gestrand



Figuur II Overzicht van de beschouwde configuraties van gestrande schepen in de huidige studie (niet op schaal). Achtereenvolgens van boven naar beneden: Configuratie 0: Referentie situatie zonder schepen, Configuratie 1: 7 schepen met tussenruimte van 50 m, Configuratie 2: 6 schepen met tussenruimte van 100 m, Configuratie 3: 6 schepen met tussenruimte van 50 m en middelste schip niet geplaatst, Configuratie 4: 6 schepen onder hoek van 20°.

De invloed van diffractie is op basis van Configuratie 1 onderzocht door het uitvoeren van een viertal simulaties waarbij de golfdoordringing voor zowel het soort golven (deining of windgolven) als het diffractie proces (in- of uitgeschakeld) is vergeleken. Hierbij zijn uitsluitend de situatie zonder schepen (Configuratie 0) en de situatie met 7 schepen (Configuratie 1) beschouwd. De overige configuraties zijn niet onderzocht voor dit aspect omdat golfdiffractie vooral voor kleinere tussenruimten belangrijk kan zijn.

Tabel 2 *Golfdiffractie, overzicht van de golfsimulaties*

ID	Configuratie	Bijzonderheden
h00	0	Windzee ¹
h01a	1	Windzee, met diffractie
h02d	1	Deining, met diffractie
h01	1	Windzee, zonder diffractie
h02	1	Deining, zonder diffractie

Het effect van de circulatiestromingen op de duinafslag is voor een viertal configuraties (Figuur II) onderzocht waarbij de effecten op de duinafslag bepaald zijn voor bijna loodrecht en schuin invallende golven (zie ook Sectie 2.2). Om het effect van de gestrande schepen goed te kunnen bepalen is de afslag met de schepen vergeleken met afslag voor een open kust zonder schepen als referentie. Aangezien het drie-dimensionaal rekenmodel (Delft3D) niet direct geschikt is om duinafslag zelf te bepalen is een koppeling gemaakt met het DurosTa duinafslagmodel (Steetzel, 1993). Op deze manier is een eenduidige opsplitsing te maken tussen mogelijke circulatiestromen (kustlangs effect) en het duinafslagproces zelf (kustdwars effect), dit wordt verder uitgewerkt in Sectie 2.4. Aangezien het DurosTa model ook is gebruikt in het spoedadvies zijn de resultaten uit de huidige studie vergelijkbaar en consistent met de eerdere resultaten (Walstra, 2008). De duur van zowel de Delft3D als de DurosTa simulaties is op 5 uur gezet.

Voor de referentie situatie (zonder gestrande schepen) en de vier configuraties is volgens bovenstaande methode de duinafslag bepaald. De stromingspatronen zijn geanalyseerd op basis de initiële (vaste) bodem voor de referentie situatie en Configuratie 1. Een overzicht van de uitgevoerde simulaties is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3 *Duinafslag, overzicht van de simulaties, ID's tussen haken geven initiële simulaties weer die gebruikt zijn bij onderzoeken van de circulatiestromingen.*

ID	Configuratie	Conditie
w01 (h08d)	0	West
m01h (h07c)	0	Noordwest
w02 (h08h)	1	West
m02d (h08a)	1	Noordwest
w03a	2	West
m03a	2	Noordwest
w03	3	West
m03	3	Noordwest
w02e	4	West
m02e	4	Noordwest

1. Windzee wordt ook wel zeegang of windgolven genoemd.

1.4 Toegepaste rekenmodellen

In deze sectie worden gebruikte rekenmodellen (Delft3D en DurosTa) beknopt beschreven.

1.4.1 Delft3D

Voor de studie is gebruik gemaakt van het Delft3D model (Lesser et al., 2004) dat op basis van golf-, stromings-, en sedimenttransportssimulaties de bodemveranderingen op een rekenrooster kan bepalen. Hierbij is het van groot belang dat met name de interactie tussen de golven en de stroming wordt meegenomen (bijv. door brekende golven aangedreven langsstroming en het effect van de stroming op de golfvoortplanting). De basis voor een dergelijk model is het zogenaamde rekenrooster en de daarbij behorende modelbodems. Deze worden getoond in Figuur 1 voor het stromingsmodel en het golfmodel. De modelbodem is gebaseerd op een door de opdrachtgever toegeleverd bodemprofiel op basis waarvan een kustlangs uniforme bodem is geconstrueerd. Figuur 1 toont ook een schematische weergave van het rekenmodel waarin de locatie van de gestrande schepen is aangegeven. Het golfmodel opereert op een wat groter grid dan het stromingsmodel zodat eventuele randverstoringen uit het golfmodel geen invloed hebben op de golfgedreven stromingen. Aangezien loodrechte (westelijk) en schuininvallende (noordwestelijk) invallende golfcondities worden beschouwd zijn de grids aan de zuidkant wat langer om eventuele negatieve effecten benedenstrooms van de gestrande schepen mee te kunnen nemen. In het gebied rond de schepen is een gridresolutie van 10 m x 10 m aangehouden, in het gebied ten zuiden van de schepen loopt de kustlangse resolutie geleidelijk terug tot ongeveer 30 m.

Behalve de modelbodems zijn de opgelegde randvoorwaarden voor getij en golven van belang. Uitgangspunt voor deze studie is dat gekeken wordt naar een stationaire situatie zonder getij. De golfrandvoorwaarden zijn wat betreft golfhoogte en golfperiode identiek aan de condities gebruikt in het spoedadvies (Walstra, 2008). De golfrichting zal wel worden gevarieerd om een conservatieve inschatting te kunnen maken van lijzijde-erosie. De beschouwde golfrichtingen zijn (bijna) kustnormaal (273 °N) en onder een hoek van 30° met de kustnormaal (300 °N), zie ook Tabel 4. Het stromingsmodel wordt aangestuurd met in de tijd constante waarden. De zeewaartse rand wordt opgelegd als een waterstandsrand en op beide laterale (kustdwarse) randen wordt het langsverhang (kustlangse gradiënt in de waterstand) horizontaal, 0°, vastgelegd (Roelvink en Walstra, 2004). Op deze manier zijn zowel de stromingen als de waterstanden volledig “vrij” op de laterale randen waardoor het stromingsmodel nagenoeg geen randverstoringen heeft.

Tabel 4 Overzicht van de gebruikte hydraulische randvoorwaarden.

Golfhoogte (H_s)	8,6 m
Golfperiode (T_p)	14,3 s
Golfrichting (°N)	273° en 300° (Westelijk tot Noordwestelijk) ²
Waterstand (constant)	+6 m NAP

2. Het betreft hier een relatieve oriëntatie. In de simulaties is de kust Noord-Zuid georiënteerd, aangezien de werkelijke kustoriëntatie Noordoost-Zuidwest is zijn de hier gehanteerde Westelijke en Noordwestelijke richtingen in feite respectievelijk Noordwestelijk en Noordnoordwestelijk.

Behalve de hierboven beschreven modelcomponenten dienen er nog vele modelinstellingen te worden voorgeschreven (bijv. sediment karakteristieken). In Tabel 5 worden de belangrijkste instellingen zonder nadere toelichting samengevat (een uitgebreide beschrijving kan in de Delft3D gebruikershandleiding worden gevonden).

Tabel 5 Overzicht van de belangrijkste modelinstellingen.

Beschrijving	Symbool	Waarde
Sediment diameter	D_{50}	0.200 mm
Tijdstap	Δt	6 s
Aantal verticale lagen	σ	8

Aangezien het drie-dimensionaal rekenmodel (Delft3D) niet direct geschikt is om duinafslag zelf te bepalen is een koppeling gemaakt met het DurosTa duinafslagmodel (Steetzel, 1993).

1.4.2 DurosTa

DurosTa is een zogenaamd profielmodel wat inhoudt dat het uitsluitend een kustdwarse raai kan modelleren (Steetzel, 1993). Het model is specifiek ontwikkeld om duinafslag in kustdwarse richting te voorspellen. Hierbij worden in essentie dezelfde processen beschouwd als in Delft3D (golven, stroming, sediment transport en bodemveranderingen). DurosTa bevat echter speciale (gecalibreerde) algoritmen die speciaal ontwikkeld zijn om duinafslag onder de invloed van golfaanval te voorspellen. De gebruikte sedimentkarakteristieken (D_{50} en een valsnelheid) hebben dezelfde waarden als in Delft3D. Het rekenrooster heeft een constante gridafstand van 2.0 m. Alle overige modelinstellingen zijn op hun standaardwaarden gelaten.

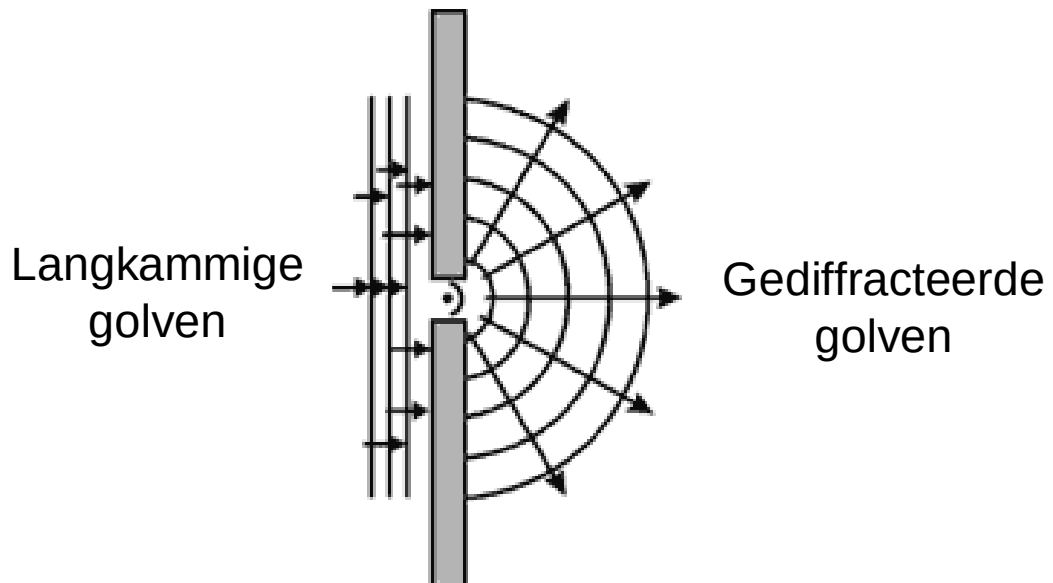
2 Effect van gestrande zeeschepen

2.1 Inleiding

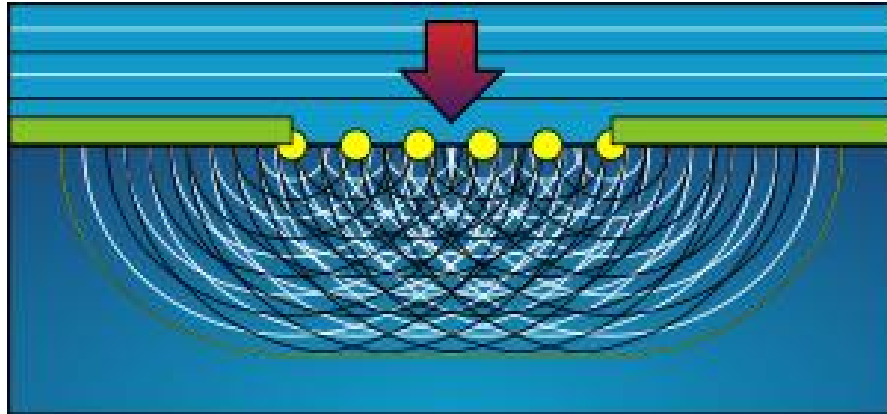
De invloed van diffractie is onderzocht door het uitvoeren van een viertal simulaties waarbij de golfdoordringing voor zowel het soort golven (deining of windgolven) als het diffractie proces (in- of uitgeschakeld) is vergeleken. Dit wordt verder uitgewerkt in Sectie 2.2. In Sectie 2.3 wordt het effect van circulatiestroming nader onderzocht. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een gedetailleerde beschrijving van de voorspelde duinafslag in Sectie 2.4.

2.2 Invloed van diffractie

Diffractie is een fysisch proces waarbij golfenergie langs de golfkammen wordt herverdeeld. Dit wordt schematisch weergegeven in Figuur III waarin duidelijk is te zien dat de golven zich over het hele afgeschermd gebied verspreiden. In geval van meerdere gaten bestaat er de mogelijkheid dat de golven gaan interfereren wat kan leiden tot lokale verhogingen en verlagingen van de golfhoogte in het beschermde gebied. Dit is schematisch, voor vijf gaten, weergegeven in Figuur IV. Dergelijke interferentie kan theoretisch tot een lokaal verhoogde duinafslag leiden.



Figuur III Golfdiffractie door een gat (bron: http://cord.org/cm/leot/course06_mod09/mod06_09.htm).



Figuur IV Golfdiffractie door een meerdere gaten met interferentie (bron:
http://en.wikipedia.org/wiki/Photon_dynamics_in_the_double-slit_experiment).

Diffractie is vooral van belang voor langkammige golven (deining), voor zeegolven (windzee) is het effect (vanwege richtingsverspreiding) veelal verwaarloosbaar. Dit is onderzocht voor Configuratie 1 waarvoor zowel deining (Figuur 2⁽³⁾) als windzee (Figuur 3⁽³⁾) zijn beschouwd. Beide figuren tonen een bovenaanzicht van de golfdoordringing achter de schepen (op basis van de significante golfhoogte welke gedefinieerd is als het gemiddelde van het hoogste één-derde deel van de golven). Tevens zijn raaien weergegeven waarlangs het golfhoogteverloop in kustlangse en kustdwarse richting wordt getoond. Hierbij is golfdiffractie zowel aangezet (zwarte lijnen) als uitgezet (rode lijnen). Als referentie is in zowel de kustdwarse als kustlangse raai ook het golfhoogteverloop voor de situatie zonder schepen weergegeven (blauwe lijnen). De voorspellingen voor Configuratie 1 laten duidelijk zien dat diffractie voor deining een aanzienlijk effect heeft: het kustlangse golfhoogteverloop is uitgevlakt maar er lijkt geen interferentie (lokale opslingering en damping) te zijn. Ten opzichte van de situatie zonder zeeschepen (vergelijk zwarte en rode lijn met blauwe lijn) is er een aanzienlijke golfhoogtereductie te zien in het gehele afgeschermd gebied. Voor windzee blijkt diffractie slechts van beperkt belang te zijn. Het verschil tussen de simulaties met en zonder diffractie (zwarte en rode lijnen in Figuur 3) is beperkt tot enkele decimeters golfhoogte.

Aangezien golfcondities in de Noordzee als windzee kunnen worden aangemerkt lijkt het effect van diffractie van beperkt belang. Het proces is overigens wel meegenomen in de verdere simulaties die in de volgende secties besproken worden.

2.3 Invloed van Circulatiestromingen

2.3.1 algemeen

De circulatiestromingen zijn onderzocht voor twee hoeken van inval, die zijn toegepast op een viertal configuraties van gestrande schepen en als referentie de situatie zonder schepen. Alle tien simulaties (zie ook Tabel 3) zijn uitgevoerd met identieke instellingen zodat een goede vergelijking tussen de referentie situatie en de verschillende configuraties kan worden uitgevoerd. Vanwege de extreme golfcondities die in deze studie beschouwd worden bleek het onmogelijk om stabiele simulaties uit te voeren met exact loodrecht invallende golven. In plaats daarvan is een, op de zeewaartse modelrand, kleine golfhoek (3°) met de kustnormaal opgelegd.

3. Figuren 2 en 3 hebben een afwijkend assenstelsel. De relatieve positie en de onderlinge afstand van de schepen is echter identiek met de overige figuren.

2.3.2 Stromingspatronen

In Figuur 4 worden de snelheidsvectoren voor de noordwestelijke golfconditie getoond in het geval zonder schepen. Het is duidelijk dat de grootste snelheden vlak voor het duin optreden. In Figuur 5 wordt voor dezelfde golfconditie de situatie voor Configuratie 1 weergegeven. De afschermende werking van de schepen is opnieuw duidelijk zichtbaar: er wordt een aanzienlijke reductie van de langstroming bewerkstelligd. Hierbij is overigens wel een duidelijke vertraging in de reactie van de stroming zichtbaar. Aan de noordzijde duurt het ongeveer 500 m voordat een significante vertraging optreedt. Dit wordt veroorzaakt door traagheid: zelfs bij een volledige afwezigheid van de golven zal het water niet instantaan reageren maar geleidelijk vaart minderen (vergelijkbaar met het feit dat een auto niet meteen stilstaat als het gaspedaal wordt losgelaten). Het omgekeerde effect vindt plaats aan de zuidzijde: het kost de stroming enige tijd om weer de maximale snelheid te bereiken. Hierdoor wordt de locatie van de maximale reductie van de langs-stroming zelfs ten zuiden van de gestrande schepen voorspeld. De stroomsnelheden voor de westelijke golfconditie (Figuur 6) zijn aan de uiteinden van de gestrande schepen lokaal hoger. Dit wordt veroorzaakt door een verschil in waterstand achter de schepen en de onbeschermdde kust: er vindt meer opstuwing door golven plaats in de onbeschermdde kust waardoor er een stroming van de onbeschermdde naar de beschermdde kustvakken ontstaat. Overigens zijn de stroomsnelheden voor de normaal invallende golven aanzienlijk lager.

Voor beide golfcondities blijkt dat de zeven schepen min of meer als één geheel werken aangezien er geen effecten van de individuele schepen terug te vinden zijn in de stromingspatronen bij de kust.

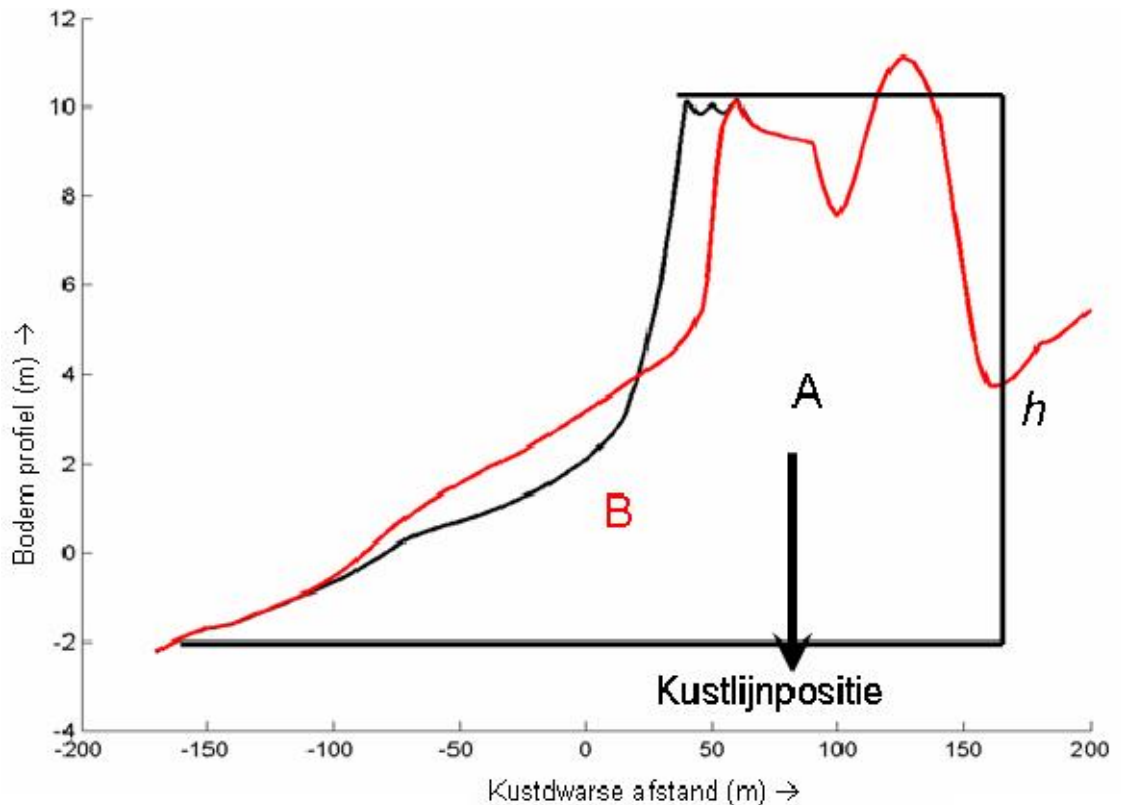
2.4 Bodemveranderingen en duinafslag

Om het effect van de schepen op de duinafslag te bepalen is een gecombineerde aanpak gevolgd waarbij het drie-dimensionaal model Delft3D is gebruikt om het effect van eventuele circulatiestromingen en langs-stromingen en het daaruit voortvloeiende *kustlangse* effect op de duinafslag te identificeren en het DurosTa duinafslag model om de daadwerkelijke *kustdwarse* duinafslag te bepalen. Op deze manier zijn realistische schattingen van de duinafslag gewaarborgd en zijn de resultaten ook consistent met het spoedadvies gegeven in het kader van de Waterproef oefening (Walstra, 2008).

Om de Delft3D resultaten te kunnen koppelen aan de door DurosTa voorspelde duinafslag dient de door Delft3D voorspelde duinafslag door kustdwarse processen te worden gescheiden van de kustlangse processen. Op basis van Delft3D simulaties zonder schepen (waar in principe vooral kustdwarse processen de duinafslag bepalen) is gekeken tot wat voor dieptecontour het duinafslagproces in Delft3D wordt voorspeld. Door het gebied landwaarts van deze dieptecontour als één geheel te beschouwen wordt de door Delft3D berekende duinafslag weggefilterd. Hiertoe zijn de bodemveranderingen rond het duin en het strand middels een MKL benadering vertaald in een kustlijnverplaatsing die dus nagenoeg geheel wordt bepaald door kustlangse variaties in golven, stroming en de daaruit resulterende zandtransporten. De gevolgde methode wordt hieronder verder uitgewerkt. Om te voorkomen dat bijvoorbeeld kopeffecten rondom de schepen de kustlijnbeplating beïnvloeden moet uitsluitend de bodemverandering door duinafslag meegenomen worden.

De MKL benadering bestaat uit het integreren van het bodemprofiel van het duin (+10 m NAP) tot de ondiepe vooroever (-2 m NAP) en deze vervolgens te delen door de beschouwde profielhoogte h (12 m). Deze begrenzing is zodanig gekozen dat de duinafslag en depositie zoals die door Delft3D wordt voorspeld volledig wordt omsloten.

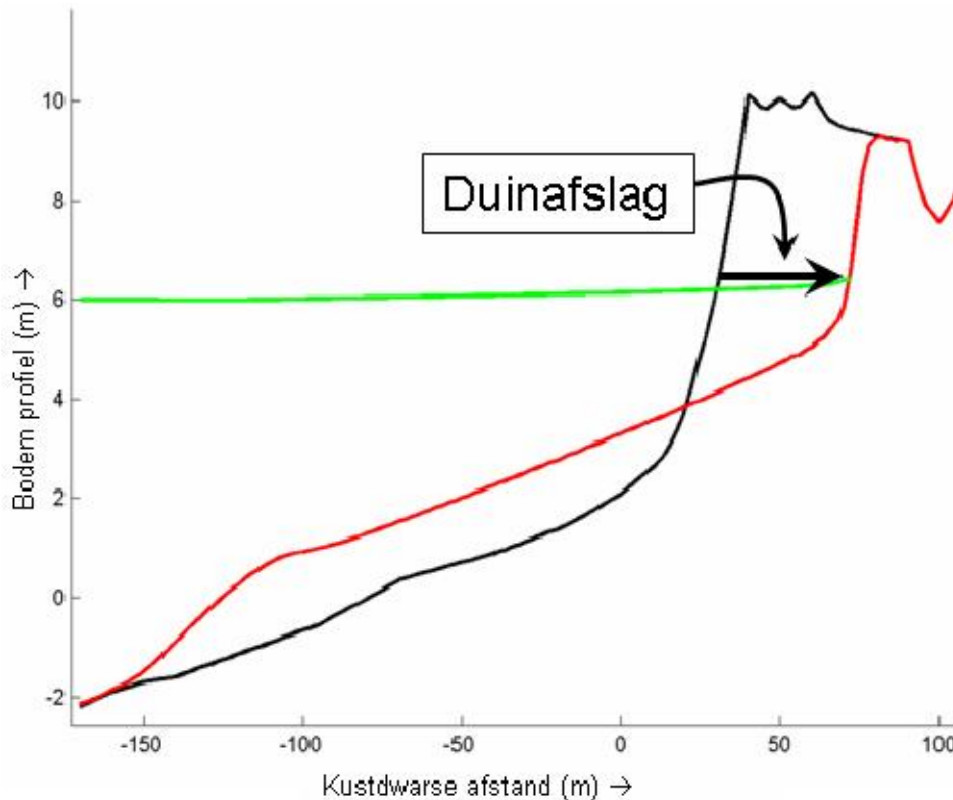
Dit is schematisch weergegeven in Figuur V waar het initiële (zwart) en eindprofiel (rood) zijn weergegeven. Het aanwezige zandvolume in beide profielen is, indien uitsluitend kustdwarse processen een rol spelen, per definitie gelijk (Volume A = Volume B). Hierdoor zal dus ook de kustlijnpositie voor beide profielen identiek zijn. Met andere woorden: de kustdwarse processen (door Delft3D voorspelde afslag van het duin en depositie van het afgeslagen duinzand op het voorliggende strand) vinden volledig binnen het beschouwde profiel plaats en hebben dus geen invloed op de verkregen kustlijnpositie.



Figuur V Kustlijnbepaling op basis van MKL benadering (integratie van -2 m tot 10 m NAP). Zwart: initiële profiel, Rood: eind profiel.

Op deze manier wordt een objectieve indicator voor de kustlijn verkregen door kustlangse variaties in golven, stromingen en transporten.

De door DurosTa voorspelde duinafslag (aangegeven met zwarte pijl in Figuur VI) wordt gecombineerd met de kustlijnbepaling van Delft3D (waarin de duinerosie is weggefilterd) om de totale afslaglengte te bepalen. De DurosTa simulaties worden uitgevoerd op elke kustlangse gridpositie van het Delft3D model waarbij de berekende golfkarakteristieken op de -2 m NAP dieptecontour als randvoorwaarde worden gebruikt (consistent met de benadering in het speedadvies; Walstra, 2008).



Figuur VI Duinafslag (zwarte pijl) op basis van DurosTa berekening. Zwart: initiële profiel, Rood: eind profiel.

Als eerste stap zullen de resultaten voor de noordwestelijke golfconditie zonder schepen en met gestrande schepen volgens Configuratie 1 worden besproken. Vervolgens worden de relatieve eindresultaten (netto effect van de gestrande schepen) van de overige configuraties beschouwd.

In Figuur 7 worden bodemveranderingen voor de situatie zonder schepen getoond. Deze zogenaamde sedimentatie-erosie patronen laten duidelijk de afslag van het duin zien (blauwe gebieden rond $x = 50$ m) en de daarbijbehorende sedimentatie (geel-oranje gebieden net zeewaarts hiervan). Verder is de afslag min of meer kustlangs uniform, de kleine afwijkingen aan de noordzijde worden veroorzaakt door kleine randverstoringen. In Figuur 8 is te zien dat de gestrande schepen een aanzienlijke invloed hebben op de bodemveranderingen. Rond de noordzijde van de gestrande schepen vindt aanzienlijke sedimentatie plaats, terwijl in het zuiden van de gestrande schepen extra erosie optreedt. Het duin wordt achter de gestrande schepen duidelijk minder aangevallen maar lokaal (ter hoogte van het noordelijkste schip) is de duinafslag ook toegenomen. Dit wordt inzichtelijk gemaakt in Figuur 9 waar de relatieve sedimentatie-erosie patronen worden getoond door de eindbodems van de situatie zonder schepen af te trekken van de situatie met schepen. De aldus verkregen patronen tonen uitsluitend het effect dat de gestrande schepen hebben op de bodemontwikkeling en duinafslag: blauwe kleuren geven aan waar door de aanwezigheid van de schepen extra erosie (of minder sedimentatie) is opgetreden, de geel-oranje gebieden geven aan waar door de aanwezigheid van de schepen minder erosie (of meer sedimentatie) optreedt. De figuur toont duidelijk aan dat nagenoeg overal de duinafslag vermindert. Op wat dieper water zijn de ontgrondingskuilen tussen de schepen duidelijk zichtbaar. De diepte van deze kuilen is rond de 1 – 2 m. Aangezien het in het model niet mogelijk is om stromingen onder de gestrande schepen

door te beschouwen is het waarschijnlijk dat de ontgrondingsdiepten aanzienlijk groter kunnen worden. De tijdschaal waarop dit gebeurt, is op basis van de huidige simulaties niet in te schatten.

In de hierna volgende paragrafen wordt de kustlangse en kustdwarse effecten eerst apart beschouwd om vervolgens gecombineerd besproken te worden. Vanaf nu zullen de effecten *relatief* worden gemaakt aan de referentie situatie zonder de gestrande schepen. Groene balkjes betekenen een reductie van duinafslag, rode balkjes duiden op een toegenomen duinafslag (beide ten opzichte van de situatie zonder schepen). De relatieve duinafslag wordt uitgedrukt als het percentage van het verschil tussen de beschouwde configuratie en de situatie zonder schepen.

De relatieve kustlijnveranderingen ten gevolge van *kustlangse* variaties worden getoond in Figuur 10. De noordelijke helft van het beschermde kustvak wordt goed beschermt (groene balkjes). Dit wordt vooral veroorzaakt door de vertraagde stroming achter de schepen waardoor zand neerslaat. Lokaal in het noordelijke overgangsgebied is wat extra erosie aanwezig wat veroorzaakt wordt door een beperkte circulatiestroming. De zuidelijke helft van het beschermde kustvak zijn de positieve effecten kleiner en wordt lokaal, rond het zuidelijke overgangsgebied, de situatie zelfs verslechterd (rode balkjes). Ten zuiden van de gestrande schepen is een duidelijke achteruitgang van de kust te zien welke veroorzaakt wordt door de versnellende stroming die weer extra zand oppikt.

De relatieve kustlijnveranderingen ten gevolge van *kustdwarse* processen worden getoond in Figuur 11. Hieruit blijkt heel duidelijk dat de gestrande schepen een positief effect hebben op het beschermde kustvak terwijl er geen verschil is te zien langs de onbeschermde kustvakken. Tevens is de invloed van de gaten tussen de schepen goed zichtbaar.

Het gecombineerde effect wordt getoond in Figuur 12. Hieruit blijkt duidelijk de dominantie van de kustdwarse effecten. Achter de gestrande schepen reduceert de duinafslag met gemiddeld ongeveer 50%. Rond de gaten is de reductie ongeveer 40% en achter de schepen rond de 70%. Rond de overgangen slaat het beschermende effect vrij snel om in kleine negatieve effecten. Vooral ten Zuiden van de gestrande schepen wordt over een afstand van meer dan 1 km een beperkt negatief effect, 5 – 10% extra duinafslag voorspeld.

Voor gestrande schepen met tussenruimten van 100 m (Configuratie 2, zie Figuur 13) is te zien dat de positieve effecten achter de schepen nog steeds aanwezig zijn maar vooral achter de gaten wordt de kust nu minder beschermd. Hier is de reductie in duinafslag ongeveer 20% (een halvering t.o.v. tussenruimten van 50 m). Midden achter de schepen is de reductie vergelijkbaar met Configuratie 1. Ten Zuiden van het beschermde kustvak is de extra duinafslag nagenoeg hetzelfde. Ten Noorden is echter vrij lokaal wat meer duinafslag voorspeld. Dit wordt veroorzaakt door een iets toegenomen circulatie door de grotere gaten, het effect is echter vrij beperkt.

Voor Configuratie 3 (middelste schip is afwezig) waardoor er een gat van 300 m ontstaat laat zien dat dit lokaal een beperkte toename (5%) van de duinafslag tot gevolg heeft (Figuur 14).

Voor schepen die onder een hoek van 20° gelegd zijn (Figuur 15) geldt achter de schepen zelfs een hogere bescherming van gemiddeld ongeveer 60%. Ten zuiden is een vergelijkbare verslechtering te zien ten opzichte van voor de andere configuraties.

Rond het noordelijke overgangsgebied is de afslag lokaal met 10 – 20% toegenomen. Dit wordt veroorzaakt doordat de schepen nu een groter obstakel zijn voor de langsstroming (de schepen liggen immers onder een hoek met de kust) waardoor het water als het ware tussen de schepen en de kust wordt doorgeperst. Dit heeft een verhoging van de langs-stroming tot gevolg in een gebied waar de golven niet gedempt worden door de schepen met extra duinafslag als gevolg.

Voor de loodrecht invallende golven zijn de vier configuraties ook onderzocht. Het resultaat voor Configuratie 1 wordt getoond in Figuur 16. Ook in dit geval resulteert de aanwezigheid van de schepen in een aanzienlijke reductie van de duinafslag (tussen de 40 en 60% reductie). In de overgangsgebieden is lokaal een kleine verslechtering van rond 5 – 10% te zien. Voor Configuratie 2 blijkt dat de reductie achter de gaten nu beperkt is tot ongeveer 10% (Figuur 17). Achter de schepen wordt de duinafslag nog wel aanzienlijk gereduceerd (ongeveer 60%). Voor Configuratie 3 (Figuur 18) is het effect van het afwezige schip ook duidelijk te zien: er is lokaal een kleine verslechtering van enkele procenten voorspeld. Het stranden van de schepen onder een hoek van 20° (Configuratie 4) heeft weinig effect op de duinafslag (Figuur 19), de geboden bescherming is vergelijkbaar met die van Configuratie 1.

3 Conclusies en Aanbevelingen

De invloed van het parallel aan de kust, of onder een kleine hoek met de kust, laten stranden van schepen voor de kust van Delfland op de lokale duinafslag is middels schematische numerieke berekeningen onderzocht. Uitgangspunt waren de zeer extreme omstandigheden, met een kans van voorkomen van ongeveer eens per honderdduizend jaar, welke ook bij de landelijke oefening Waterproef (november 2008) zijn gebruikt. Hierbij is in detail gekeken naar de effecten van golfdoordringing en circulatiestromingen op de optredende duinafslag.

3.1 Conclusies

- Gestrande schepen hebben een positief reducerend effect op de duinafslag.
- Schepen werken als één geheel indien de onderlinge afstanden tussen de gestrande schepen niet te groot zijn. Het is echter ook aangetoond dat de duinafslag lokaal in het beschermde kustvak kan toenemen indien de onderlinge afstand te groot wordt. Op basis van de bestudeerde configuraties lijkt een afstand van 100 m een bovengrens. Bij een te grote afstand (of door het wegslaan van een schip) kan dus lokaal extra duinafslag optreden. Voor de situatie waarbij één schip niet meer aanwezig is (Configuratie 3) wordt er 5% - 10% extra duinafslag voorspeld.
- Als de schepen onder een hoek stranden heeft dat een beperkt (positief) effect op de beschermende werking. Echter, ten Noorden blijkt een aanzienlijke toename (15%) van de duinafslag plaats te vinden welke wordt veroorzaakt door een opstuwung van water. Voor noordwestelijke golfcondities treedt ten Zuiden van de gestrande schepen over 1 – 2 km ongeveer 5%-10% extra duinafslag op voor alle onderzochte configuraties. In Tabel 6 worden de resultaten van de 8 simulaties samengevat.
- Golfdiffractie is voor de gegeven omstandigheden niet belangrijk en heeft een zeer beperkt effect op de golfdoordringing door de gaten tussen de schepen. Ook treedt er geen lokale opslinging van golven plaats door interferentie.
- Verder zijn circulatie-stromingen door kustlangse variatie van golven achter de schepen vrijwel afwezig en hebben deze geen noemenswaardig effect op de duinafslag.
- Er treden kopeffecten rondom buitenste schepen op in de vorm van ontgrondingskuilen, welke mogelijk de stabiliteit en constructieve integriteit van de schepen aantasten. Met name stromingen onder de schepen door kunnen hierbij een grote rol spelen. Dit aspect is met het huidige modelinstrumentarium niet goed te onderzoeken. Het model voorspeld tussen de 1 en 2 m diepe ontgrondingskuilen rondom de schepen. Bovengenoemd aspect kan echter leiden tot ontgrondingskuilen die een factor 2 dieper zijn.

Tabel 6 Overzicht van de resultaten (percentages t.o.v. referentie situatie zonder gestrande schepen).

Noordwestelijke Golfconditie⁴				
Config. (figuur)	Duinafslagreductie achter schepen			Duinafslagtoename in aangrenzende kustvakken
	Gemiddeld	Max.	Min.	
1 (12)	50%	75%	40%	max. 10% ten zuiden over ongeveer 1 km
2 (13)	35%	65%	10%	max. 10% zowel ten noorden als ten zuiden
3 (14)	30%	75%	-5%	Vergelijkbaar met Configuratie 1
4 (15)	60%	90%	50%	max. 15% ten noorden
Westelijke Golfconditie³				
Config. (figuur)	Duinafslagreductie achter schepen			Duinafslagtoename in aangrenzende kustvakken
	Gemiddeld	Max.	Min.	
1 (16)	45%	60%	35%	lokaal max. 10% aan beide zijden
2 (17)	30%	60%	5%	lokaal max. 10% aan beide zijden
3 (18)	25%	65%	-5%	lokaal max. 10% aan beide zijden
4 (19)	45%	60%	35%	lokaal max. 10% aan beide zijden

3.2 Aanbevelingen

- 1 Ontgrondingskuilen rondom gestrande schepen
 - Door stroming rondom de schepen en mogelijk onder de schepen door kan aanzienlijke erosie rondom en onder de schepen veroorzaken. Bij (zeer) grote ontgrondingskuilen kan de stabiliteit en structurele integriteit van de schepen in gevaar komen.
 - ✓ Op basis van de huidige beschikbare modellen is een eerste inschatting gemaakt welke uitsluitend verder kan worden onderbouwd door middel van laboratorium onderzoek.
- 2 Invloed getij- en windgedreven stromingen
 - In de huidige studie is in feite de hydrodynamische forceringsmethode volgens de geldende leidraad (VTV2006, Katern Duinen) gevolgd. Dit betekent dat de duinafslag gedurende een storm wordt bepaald op basis van een constante (maximale) waterstand en golfcondities gedurende 5 uur. Deze aanpak is representatief voor een storm van ongeveer 30 uur (Vellinga, 2006). Hierbij is vanzelfsprekend geen rekening gehouden met de aanwezigheid van gestrande schepen voor de kust en ook niet met getij-, wind- en golfgedreven langstroming.
 - ✓ De beschikbare modellen zijn goed toegerust op het combineren van getij-, wind- en golfeffecten op de stroming stromingen en de daaruitvolgende bodemveranderingen. De vorm van het getij, het verloop van de stormopzet en golfcondities waarmee het model moet worden aangestuurd vereisen nog verder onderzoek.

4. Het betreft hier een relatieve oriëntatie. In de simulaties is de kust Noord-Zuid georiënteerd, aangezien de werkelijke kustoriëntatie Noordoost-Zuidwest is zijn de hier gehanteerde Westelijke en Noordwestelijke richtingen in feite respectievelijk Noordwestelijk en Noordoordwestelijk.

3 Integrale modellering Duinafslag

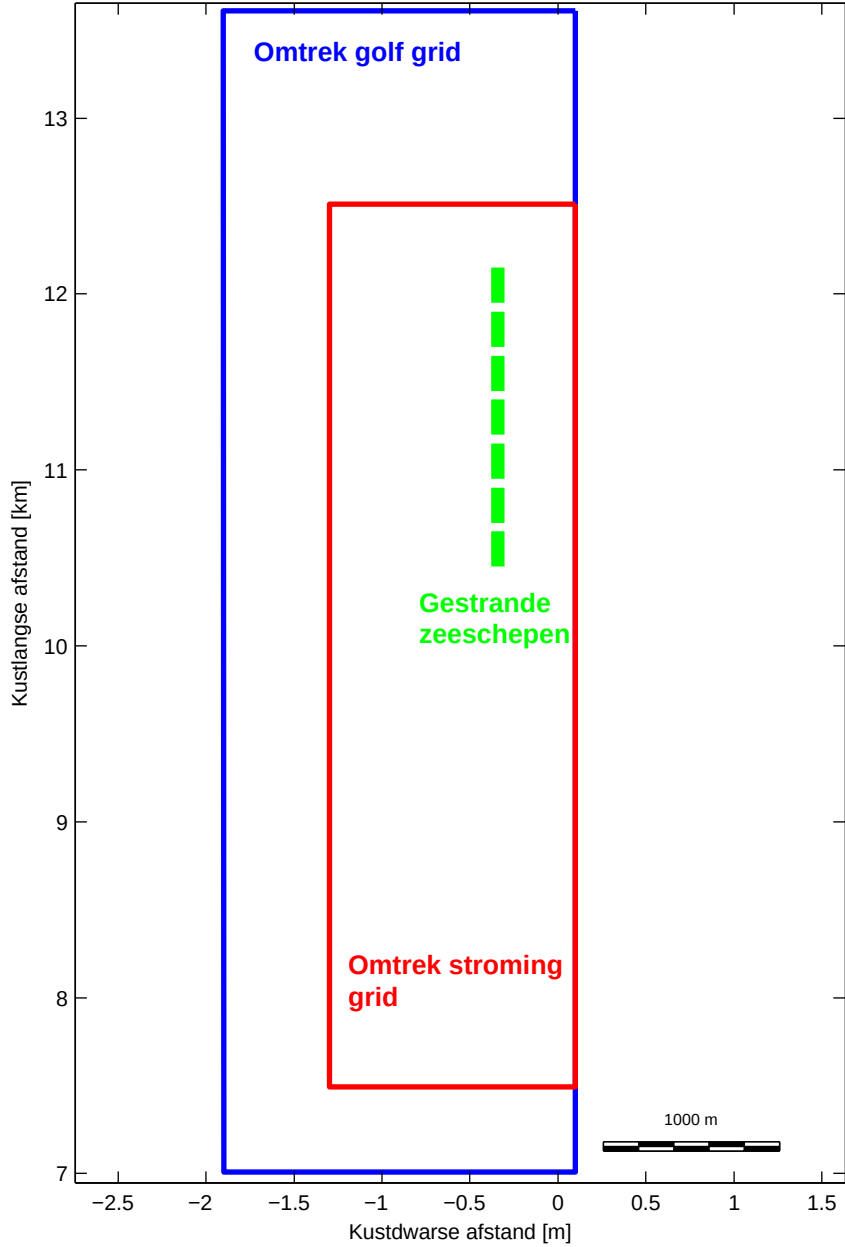
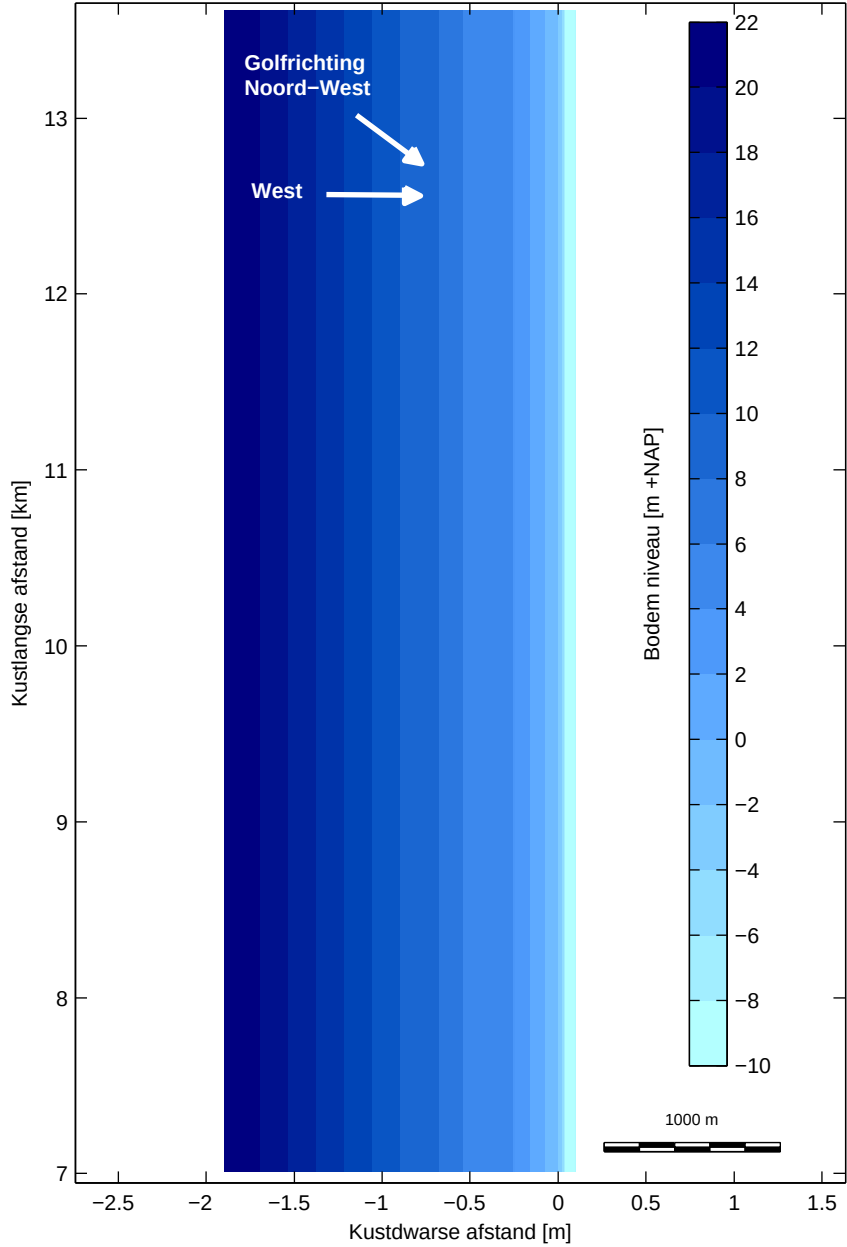
- De duinafslag is in de huidige studie bepaald door een drie-dimensionaal model (Delft3D) te koppelen aan een duinafslagmodel (DurosTa) welke uitsluitend kustdwarse processen kan meenemen. Recent is een gebiedsmodel (Xbeach) ontwikkeld dat de kustlangse en kustdwarse processen wel kan combineren (Roelvink et al., 2009). Dit model lijkt op dit moment (zomer 2009) voldoende robuust en gevalideerd.
- ✓ Aangezien het Xbeach model nog volop in ontwikkeling is lijkt een academische toepassing van het model een eerste logische stap. Hiermee kan nog meer inzicht worden verkregen in de beschermende werking van gestrande schepen en kunnen ook andere processen (met name lange golven) integraal worden meegenomen.

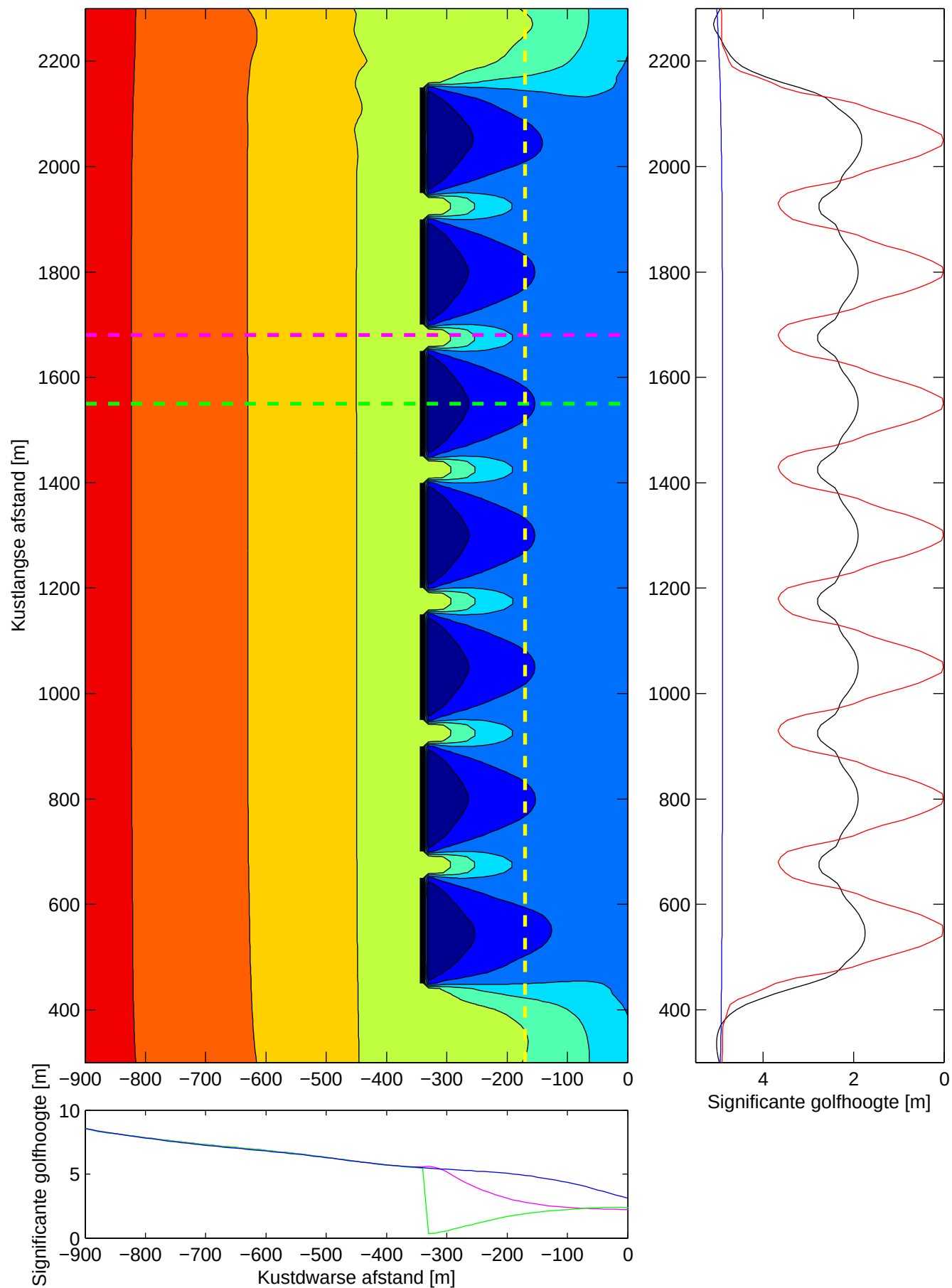
Indien het laten stranden van schepen als noodmaatregel nog verder wordt uitgewerkt verdient het aanbeveling de bovenstaande aspecten op te pakken in vervolgonderzoek. Punten 2 en 3 zouden gecombineerd kunnen bijvoorbeeld tegen beperkte kosten in een afstudeeronderzoek nader worden uitgewerkt. Hierbij is de verwachting dat robuustheid van de maatregel (bijvoorbeeld wat is de invloed van het wegslaan van een schip op de duinafslag) nog verder kan worden onderbouwd. Tevens kan op basis van dergelijk onderzoek waarschijnlijk een betere inschatting worden gemaakt van de ontgrondingskuilen rondom de schepen (Punt 1) waardoor wellicht de noodzaak tot (duur) experimenteel onderzoek komt te vervallen.

4 Referenties

- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., and van Kester, J.A.T.M. and Stelling, G.S., 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51: 883-915.
- Roelvink, J.A. and Walstra, D.J.R., 2004. Keeping it simple by using complex models. *Proceed. 6th International Conference on Hydrosience and Engineering*, Brisbane, Australia, <http://kfki.baw.de/fileadmin/conferences/ICHE/2004-Brisbane/Home.pdf> (ISBN 0-937099-12-0).
- Roelvink, J.A. Reniers, A.J.H.M, van Dongeren, A.R., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Submitted to *Coastal Engineering*. Also at: http://groups.google.com/group/xbeach/web/Xbeach_paper_final_resubmitted.pdf
- Steetzel, H.J., 1993. Cross-shore transport during storm surges. Phd-thesis, Delft University of Technology. ISSN 0920-9808 and Delft Hydraulics communication No. 476.
- Vellinga, P., 1986. Beach and dune erosion during storm surges. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology; also: WL | Delft Hydraulics report no. 372, December 1986.
- VTV2006, 2007. Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. ISBN 978-90-369-5762-5, NUR 956.
- Walstra, D.J.R., 2008. Effect van Zeeschepen voor de kust. Deltares Memo H4596.27, 4 november 2008.

DELTA RES DELFT HYDRAULICS	Boven: Waterbeweging (1400m x 5000m) en golf (2000m x 6600m) grid Onder: Bodemprofiel (o.b.v. Jarkus profiel 11221 bij Ter Heijde, jaar 2004)	
	Delft3D	
	1200465	Fig. 1





Linksboven: H_s deining + diffractie ; Onder: dwarsprofielen (zie linksboven) in groen en magenta. Blauw: zonder schepen. Rechts: NAP -2m langsprofielen van: blauw – zonder schepen ; rood – deining ; black – deining + diffractie

Deining

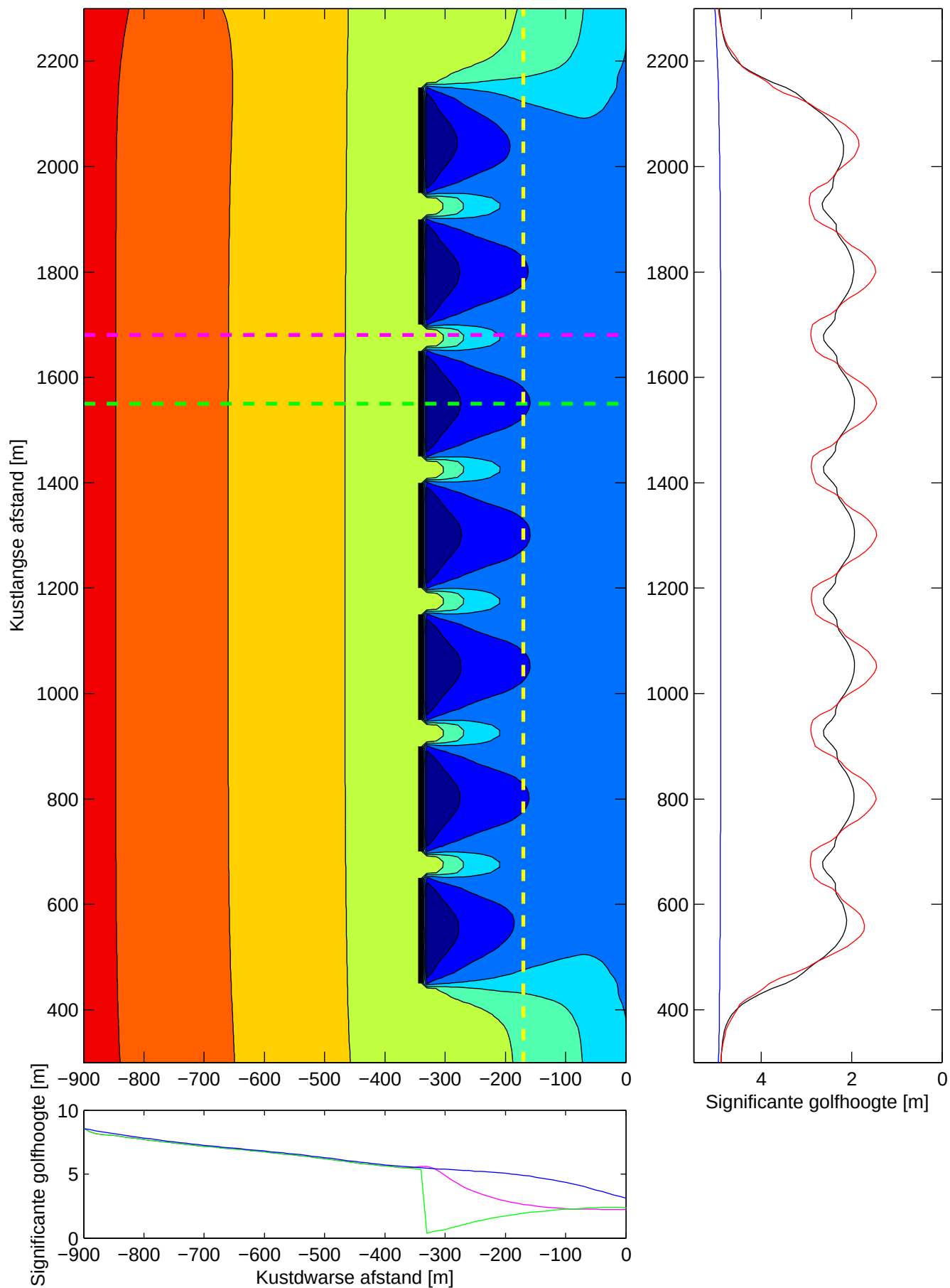
West

Delft3D

DELTAIRES | DELFT HYDRAULICS

1200465

Fig. 2



Linksboven: H_s windzee + diffractie ; Onder: dwarsprofielen (zie linksboven) in groen en magenta. Blauw: zonder schepen. Rechts: NAP -2m langsprofielen van: blauw – zonder schepen ; rood – windzee ; black – windzee + diffractie

Windzee

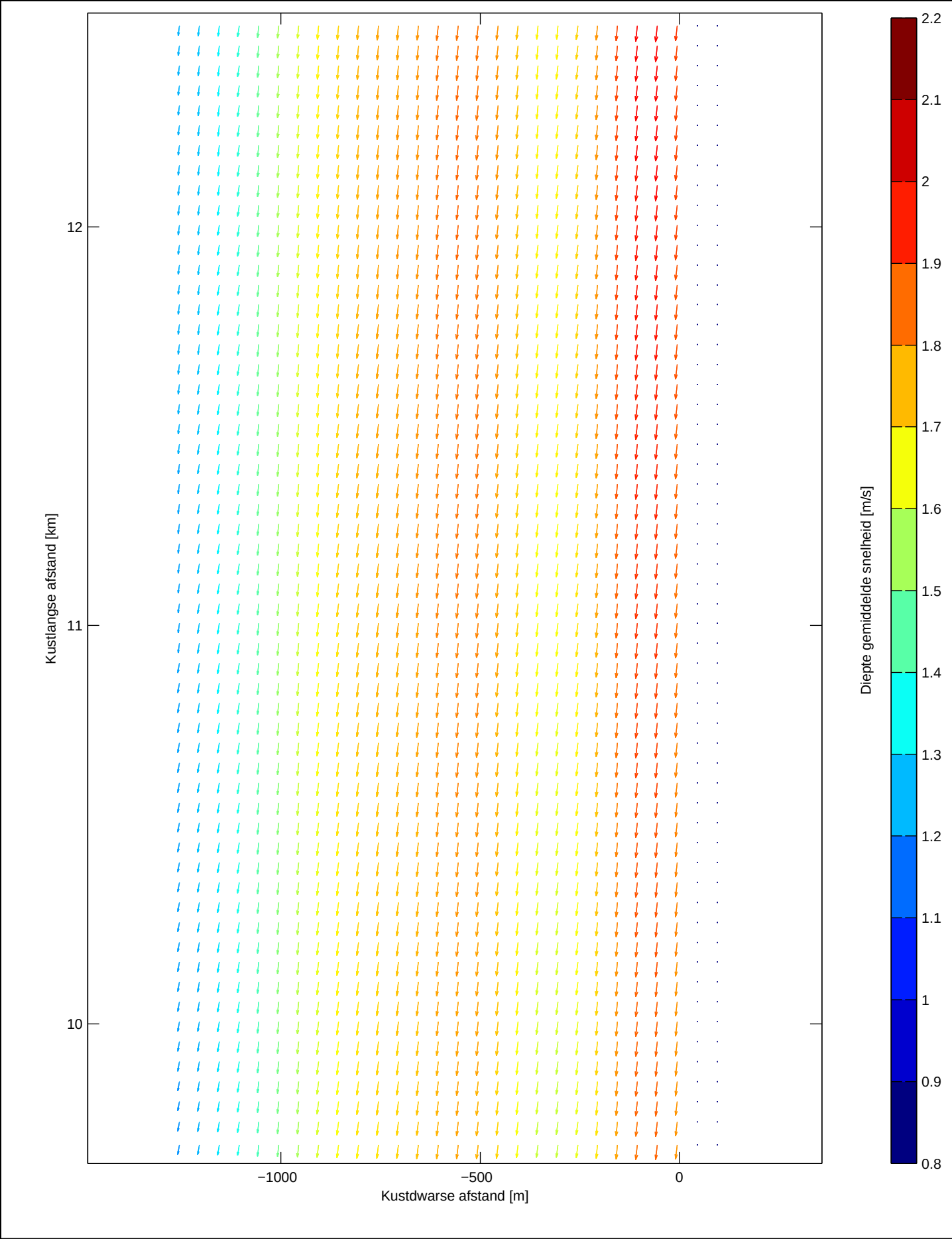
West

Delft3D

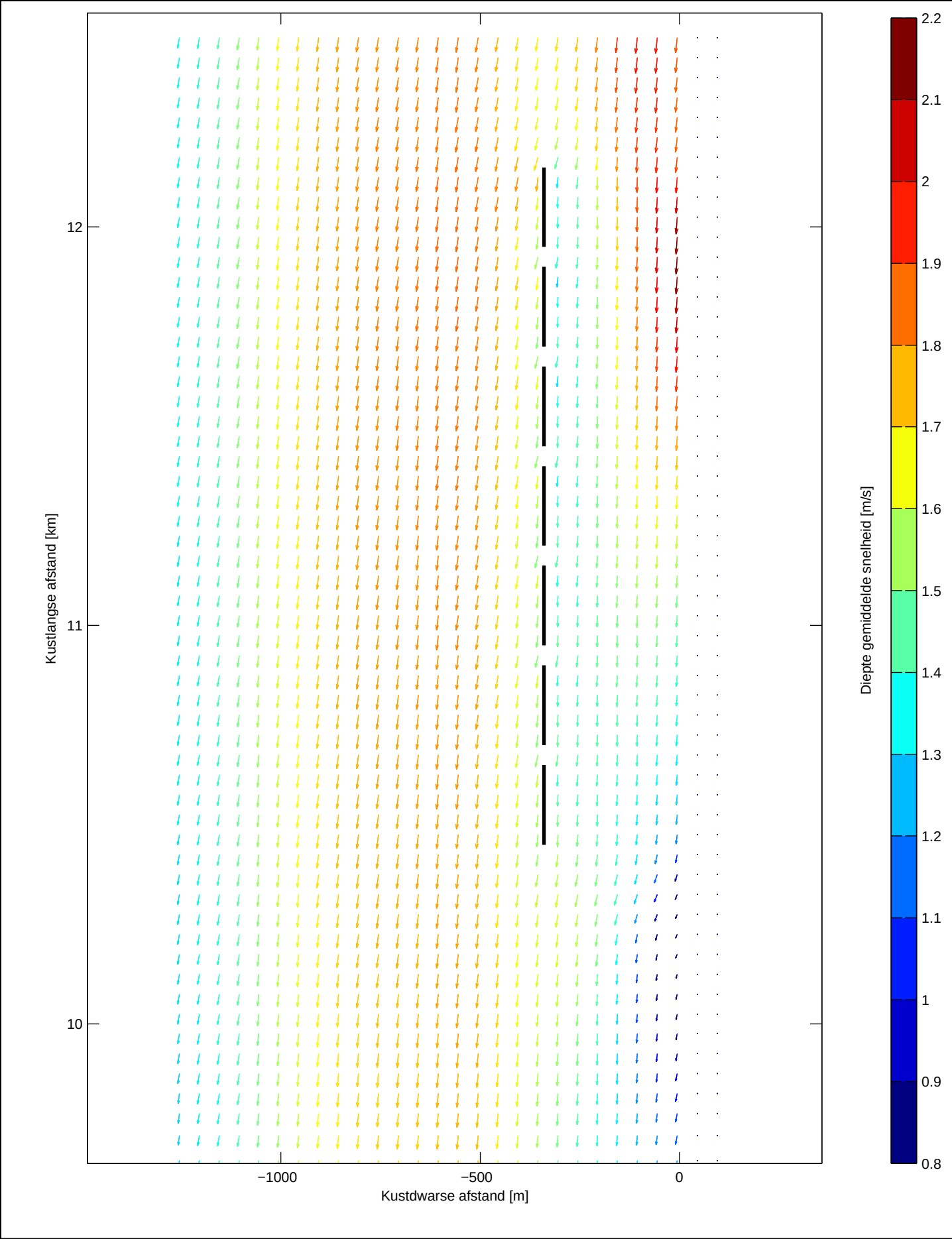
DELTAIRES | DELFT HYDRAULICS

1200465

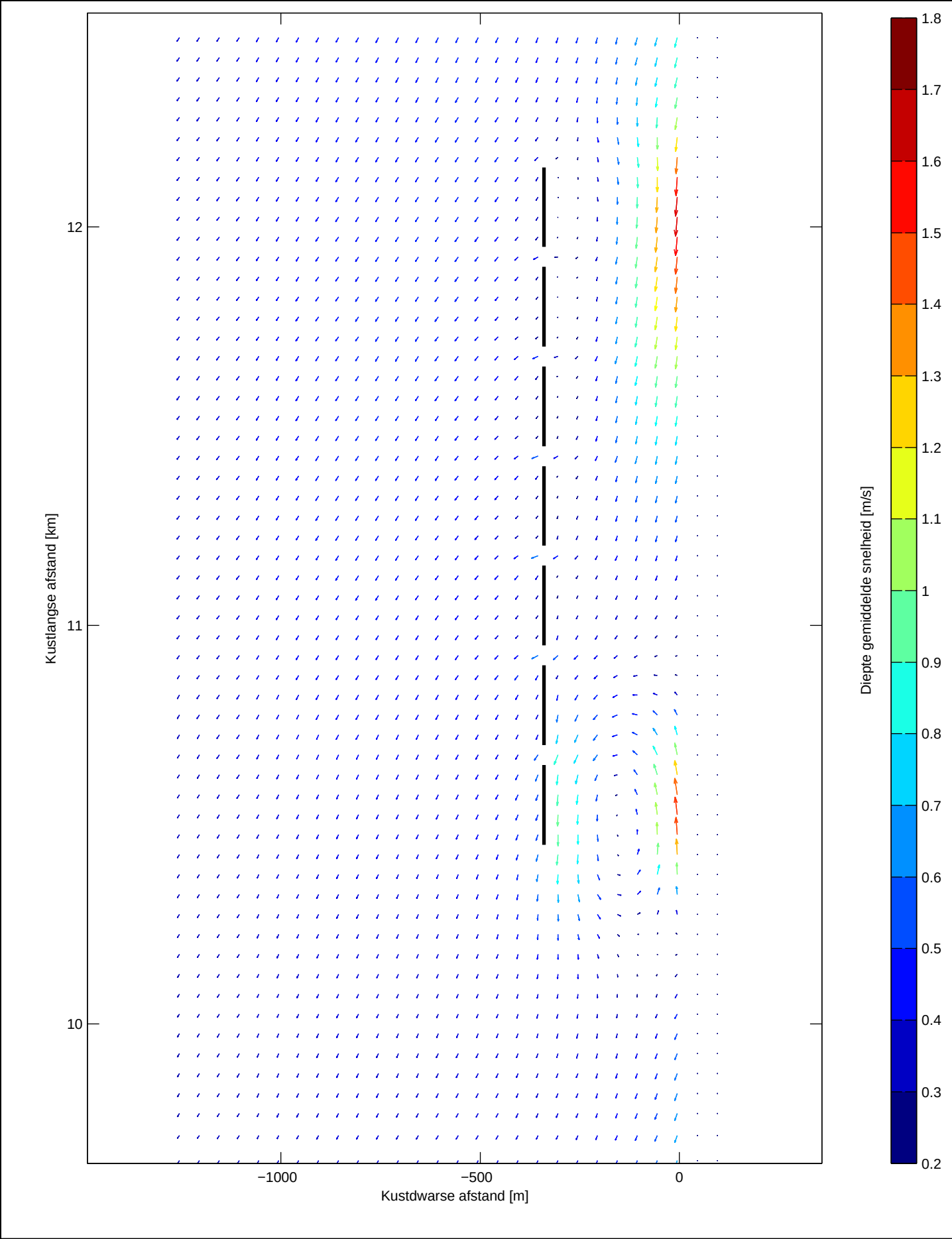
Fig. 3



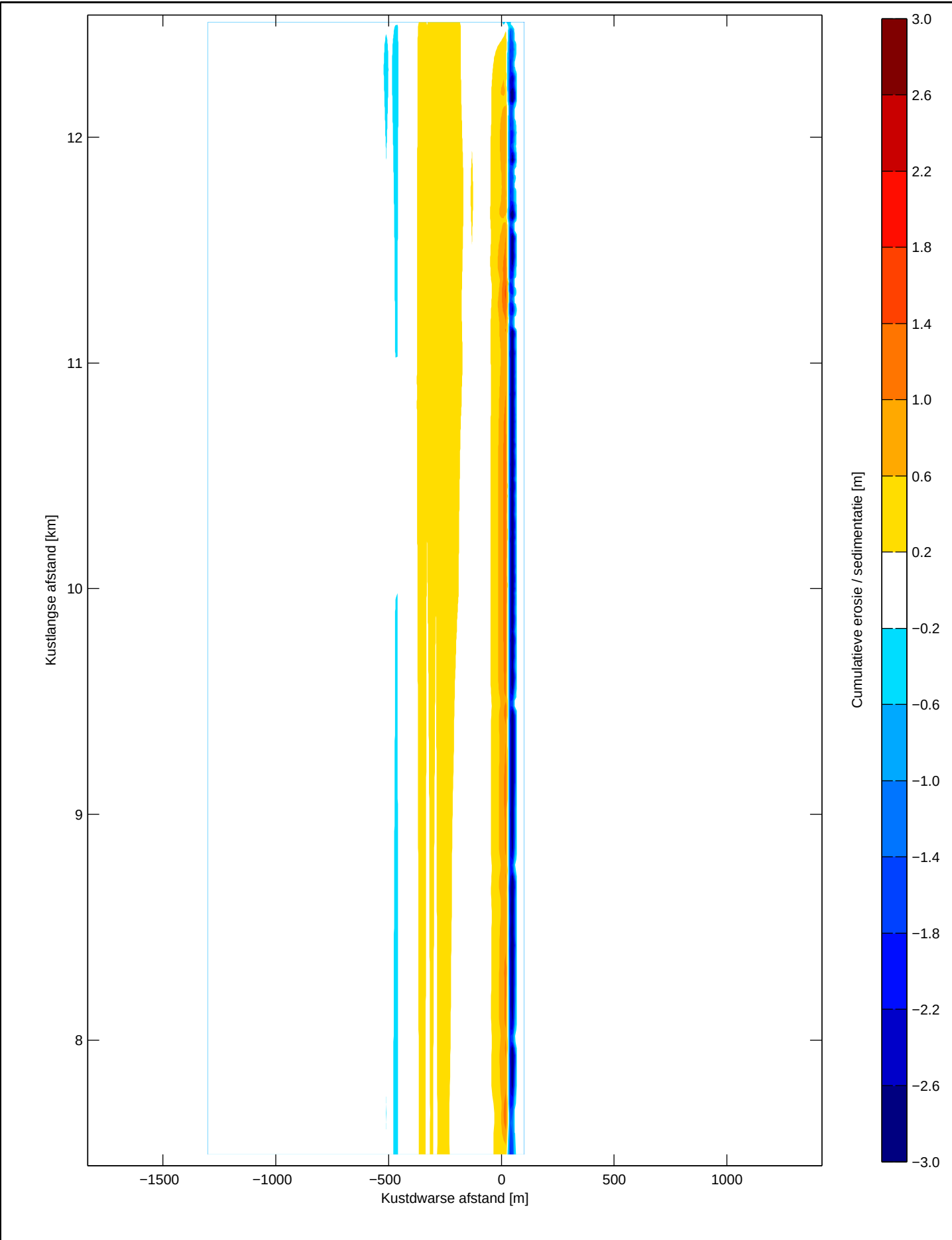
Diepte gemiddelde snelheid zonder gestrande schepen Noordwestelijke golfrichting	h07c	Noordwest
	Delft3D	
DELTAIRES DELFT HYDRAULICS	1200465	Fig. 4



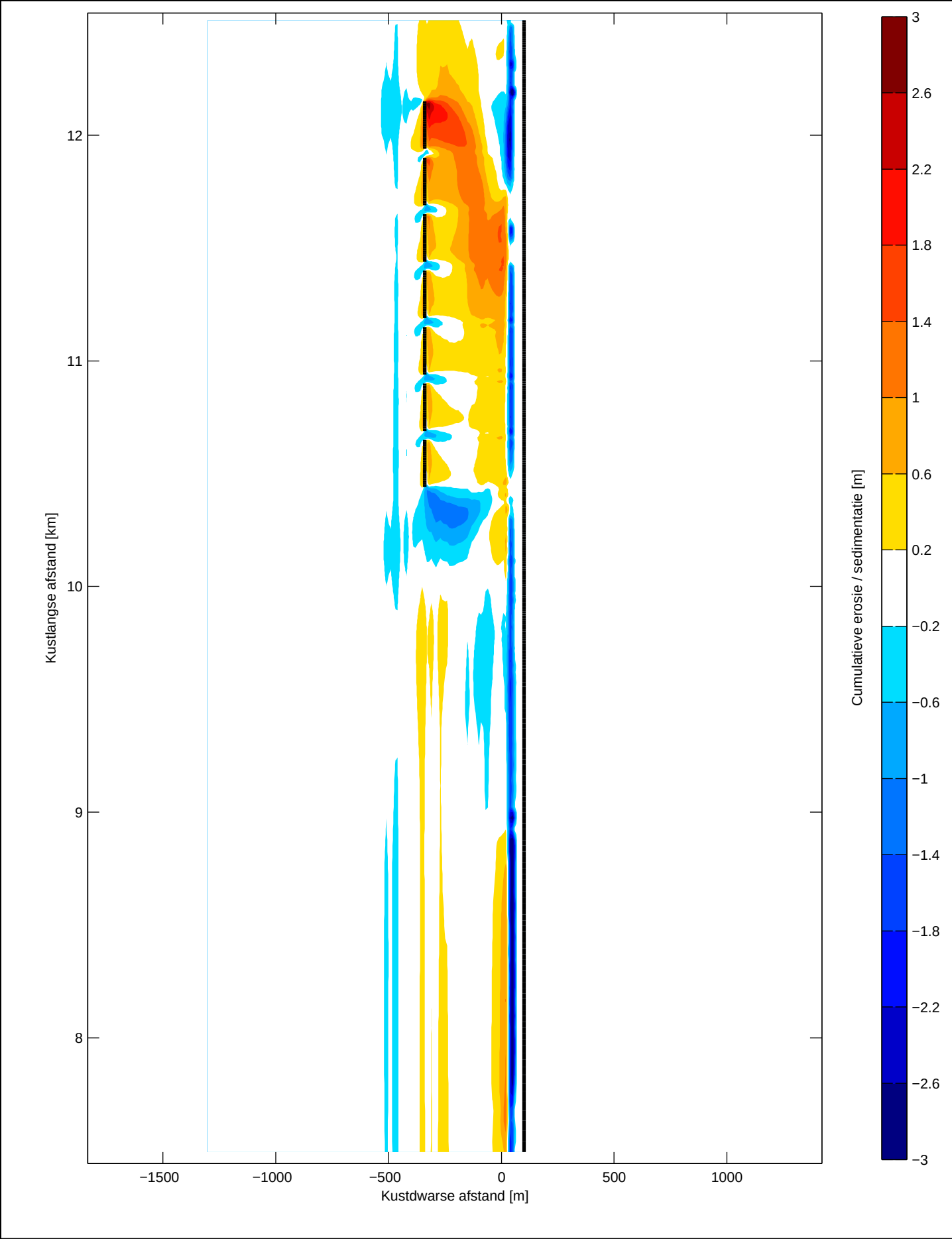
Diepte gemiddelde snelheid met gestrande schepen Noordwestelijke golfrichting	h08a	Noordwest
	Delft3D	
DELTAIRES DELFT HYDRAULICS	1200465	Fig. 5



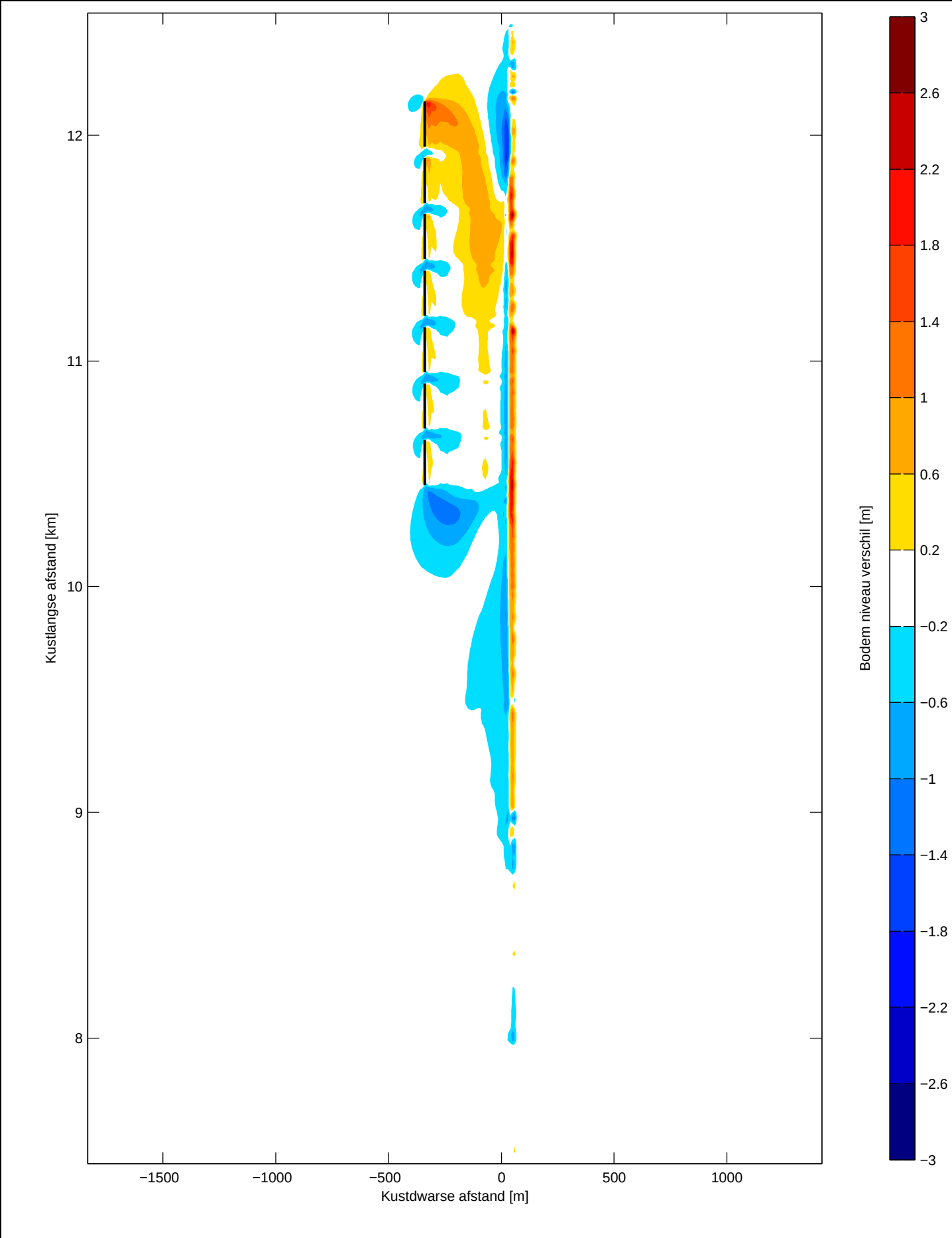
Diepte gemiddelde snelheid met gestrande schepen Westelijke golfrichting	h08h	West
	Delft3D	
DELTARES DELFT HYDRAULICS	1200465	Fig. 6



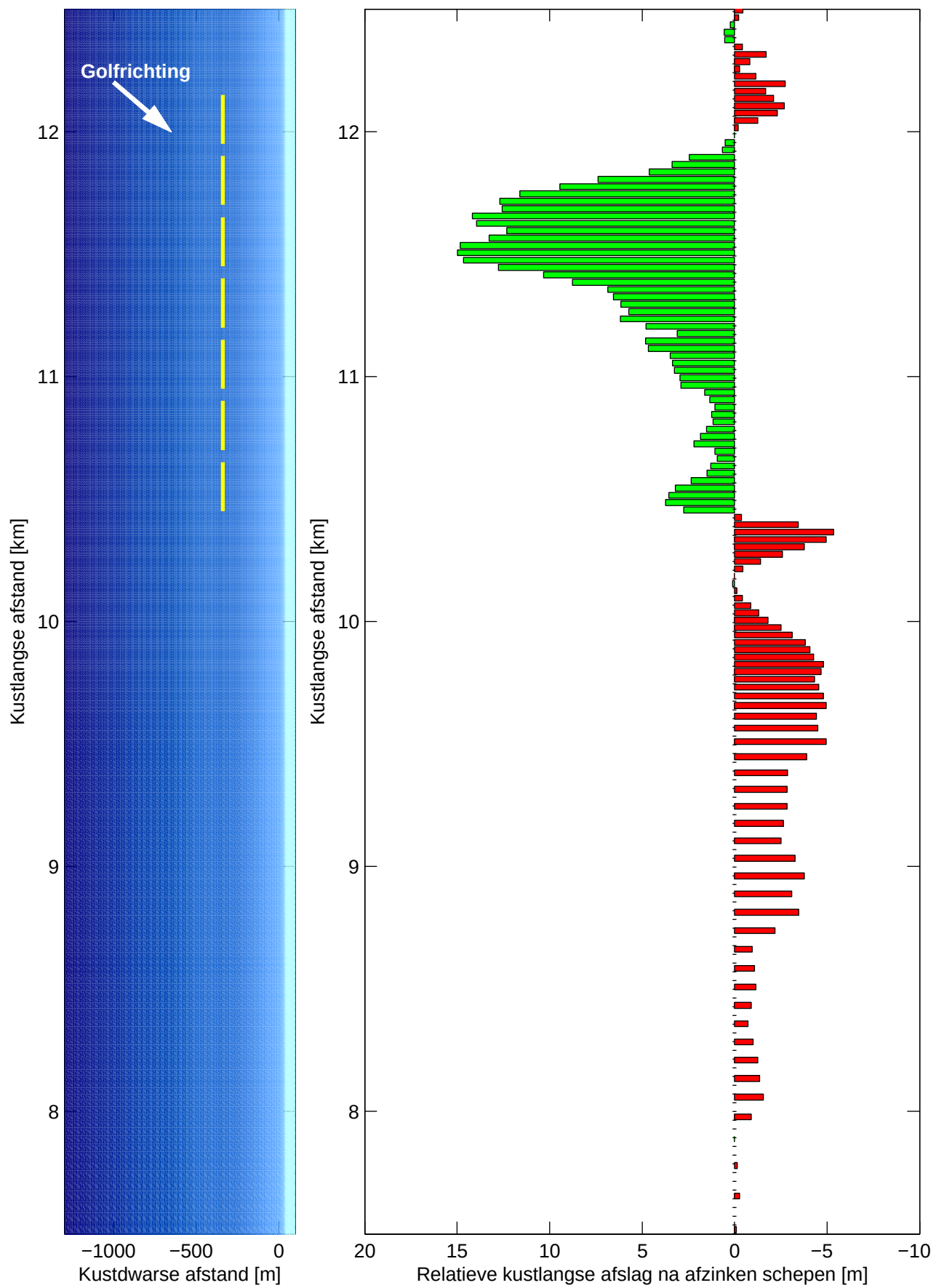
Cumulatieve erosie en sedimentatie zonder gestrande schepen Noordwestelijke golfrichting	m01h	Noordwest
	Delft3D	
DELTARES DELFT HYDRAULICS	1200465	Fig. 7



Cumulatieve erosie en sedimentatie met gestrande schepen Noordwestelijke golfrichting	m02d	Noordwest
	Delft3D	
DELTARES DELFT HYDRAULICS	1200465	Fig. 8



Bodem niveau verschil zonder gestrande schepen – met gestrande schepen Noordwestelijke golfrichting Rode kleur: minder erosie ten gevolge van stranden schepen	m01h – m02d	Noordwest
	Delft3D	
Deltares Delft Hydraulics	1200465	Fig. 9

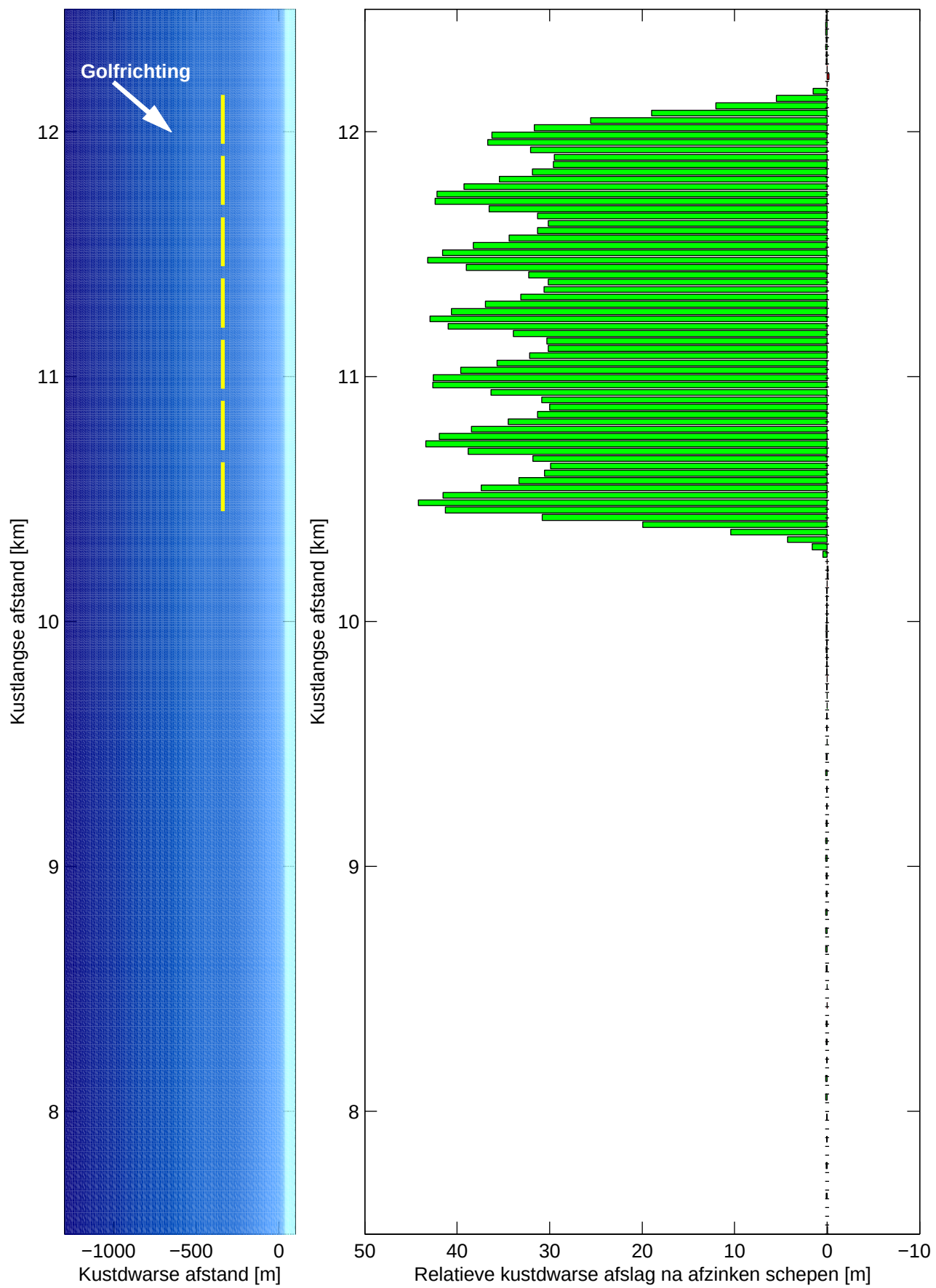


Relatieve kustlangse duinafslag ten gevolge van stranden schepen
Noordwestelijke golfrichting, 7 schepen met scheepsafstand 50 m

m01h m02d

Noordwest

Delft3D

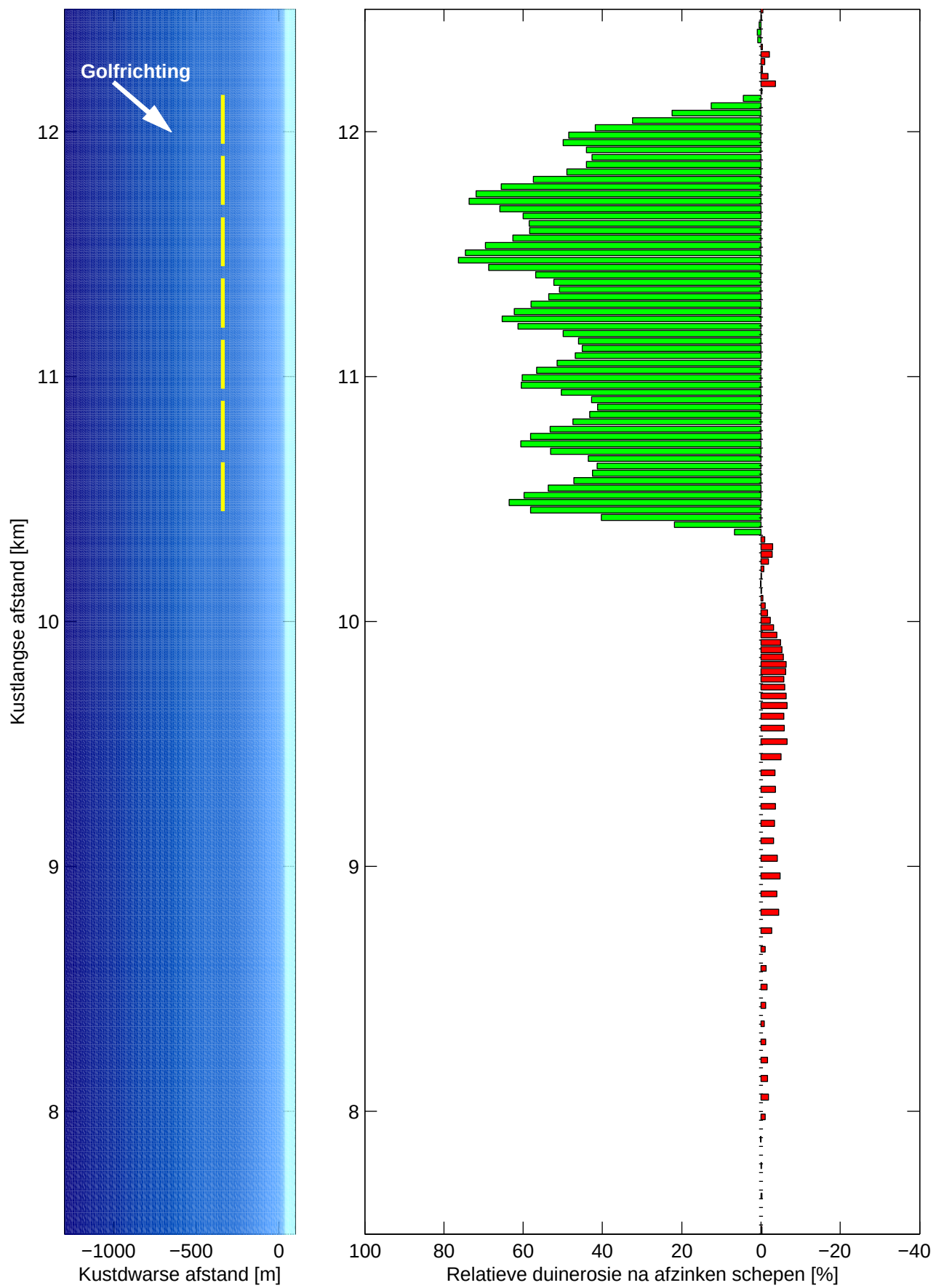


Relatieve kustdwarse duinafslag ten gevolge van stranden schepen
Noordwestelijke golfrichting, 7 schepen met scheepsafstand 50 m

m01h m02d

Noordwest

Delft3D

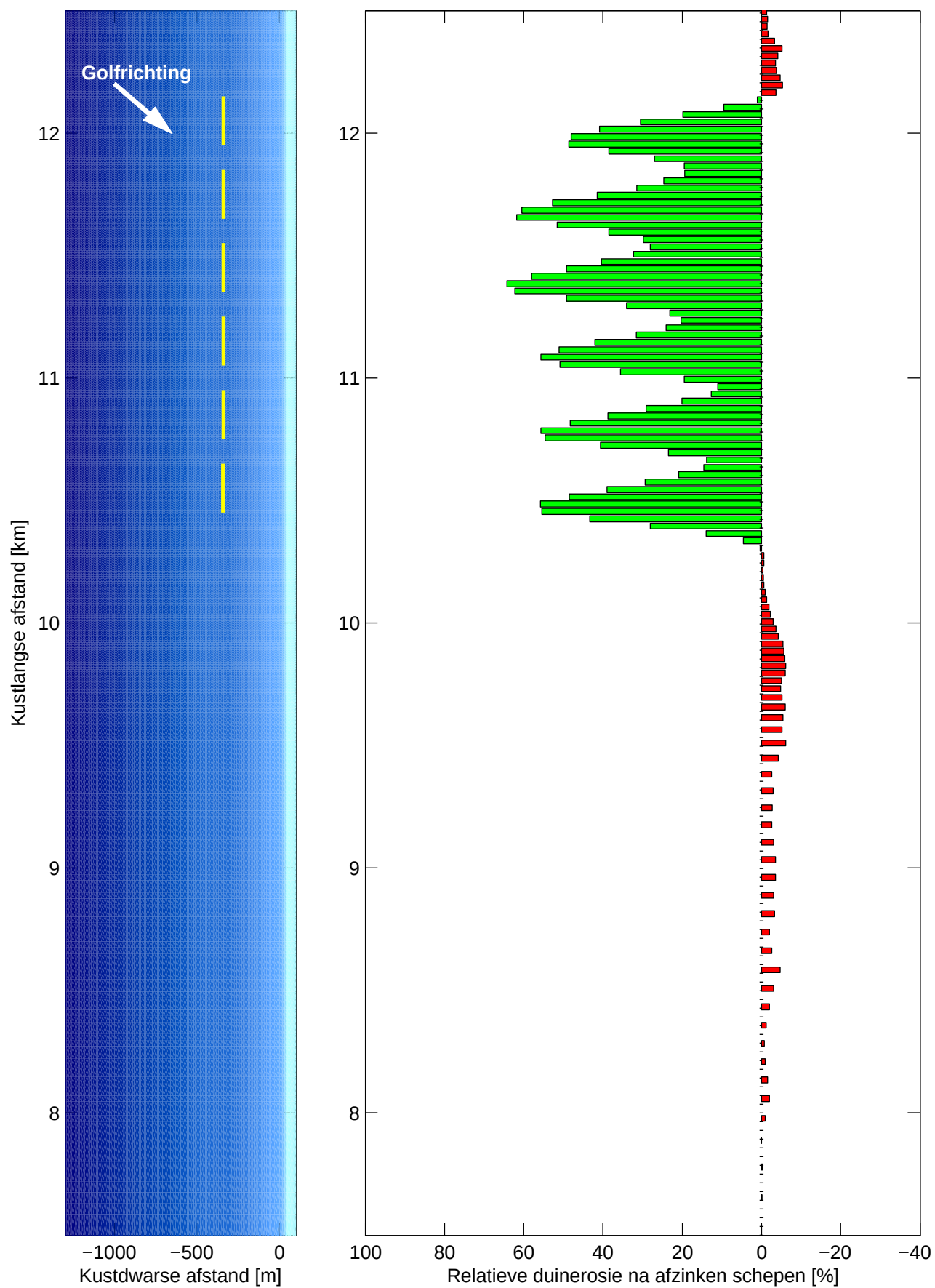


Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
 Noordwestelijke golfrichting, 7 schepen met scheepsafstand 50 m

m01h m02d

Noordwest

Delft3D

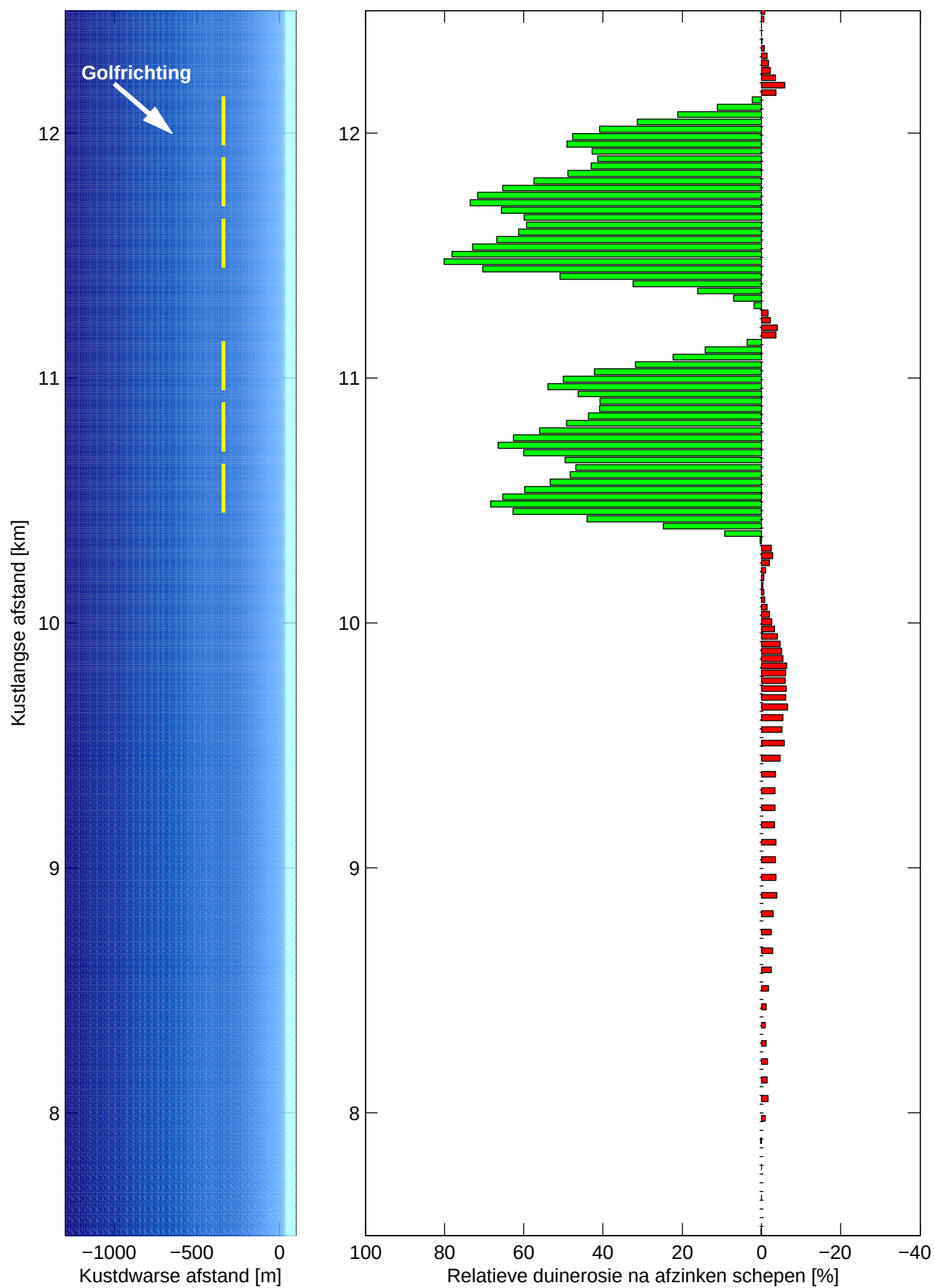


Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
Noordwestelijke golfrichting, 6 schepen met scheepsafstand 100 m

m01h m03a

Noordwest

Delft3D

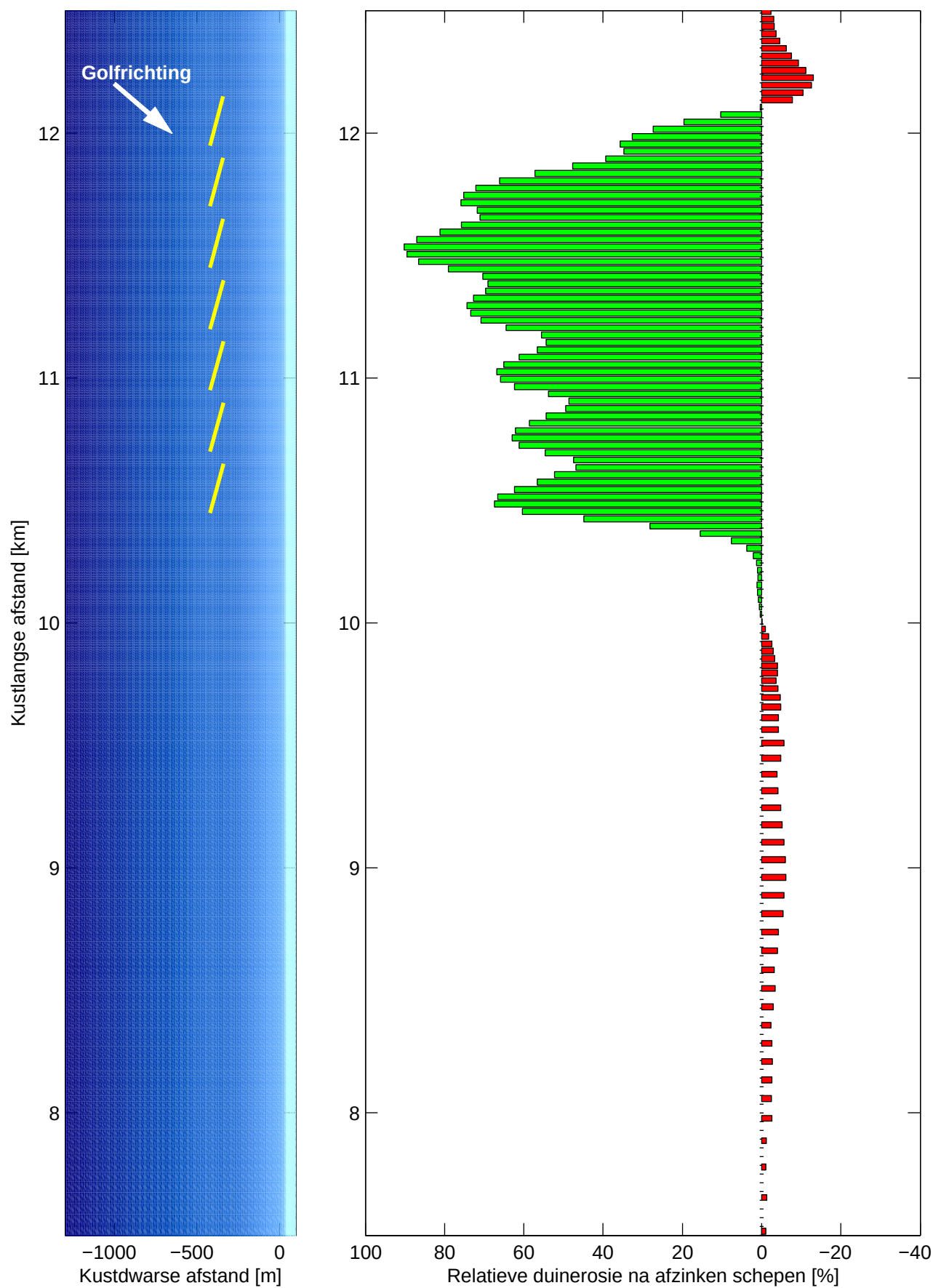


Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
 Noordwestelijke golfrichting, 6 schepen met scheepsafstand 50 m
 Middelste schip van de oorspronkelijk 7 schepen niet gestrand

m01h m03

Noordwest

Delft3D

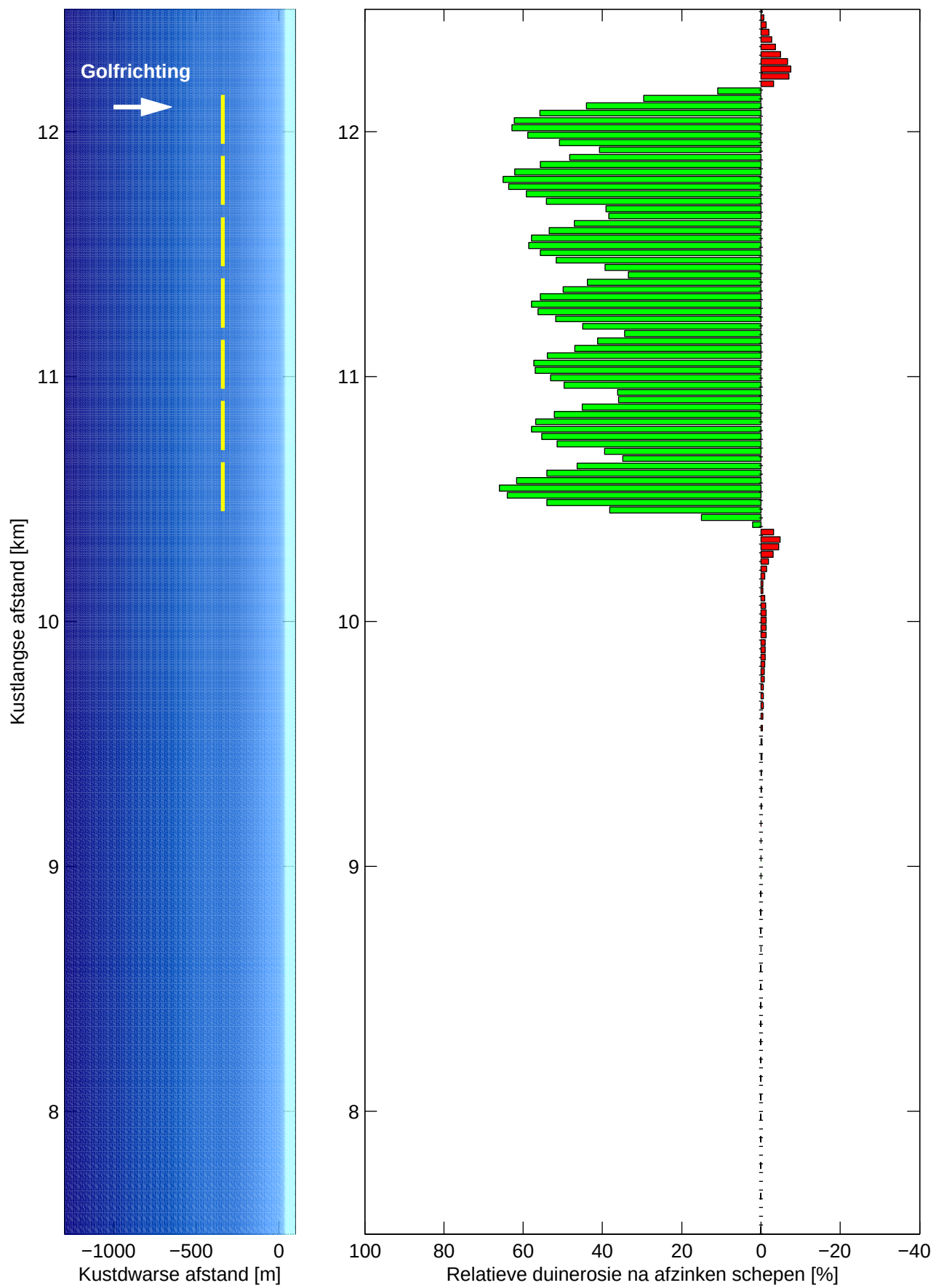


Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
 Noordwestelijke golfrichting, schepen onder hoek van 20° t.o.v. de kust met
 een scheepsafstand van 50 m

m01h m02e

Noordwest

Delft3D

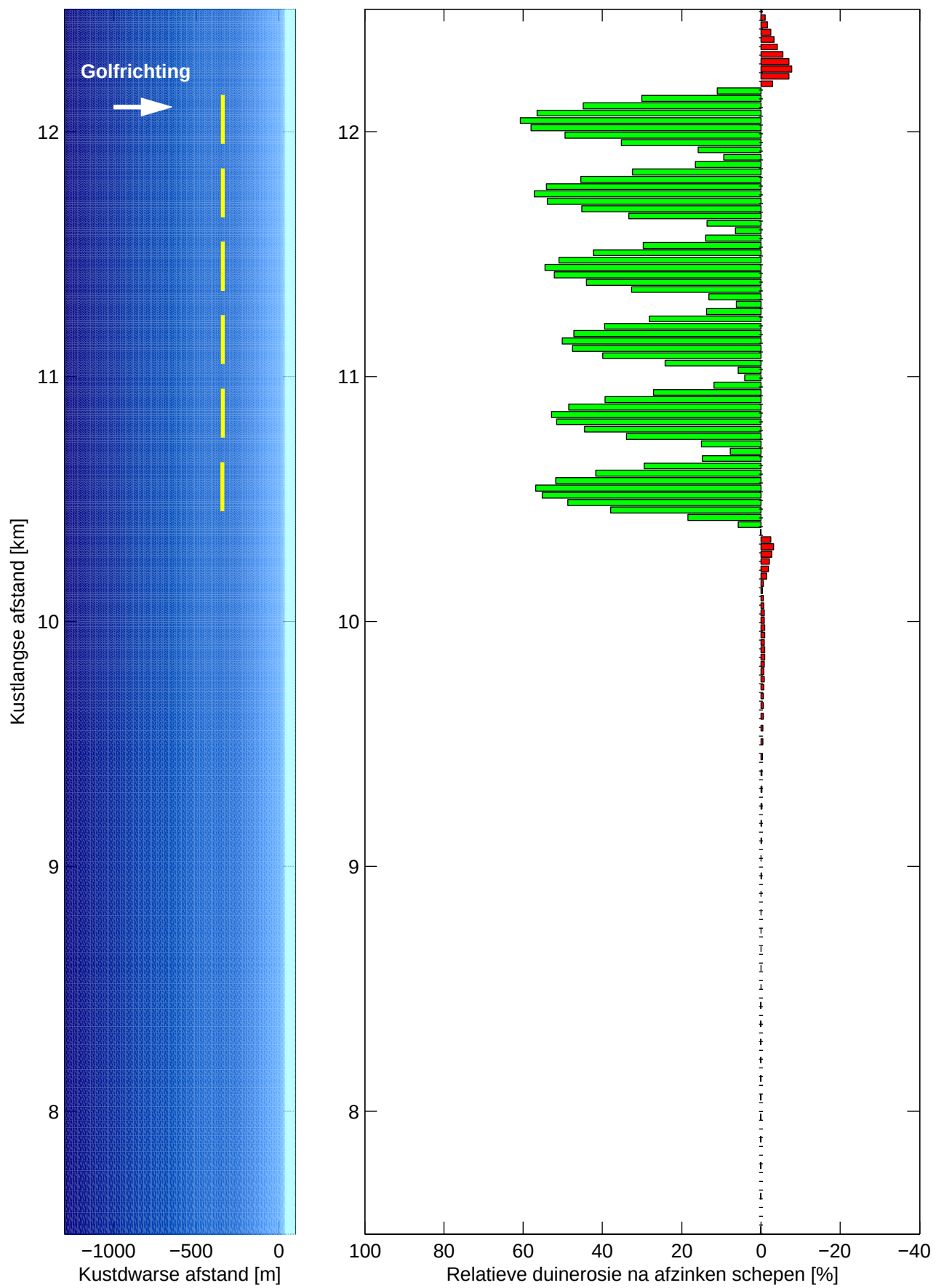


Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
Westelijke golfrichting, 7 schepen met scheepsafstand 50 m

w01 w02

West

Delft3D

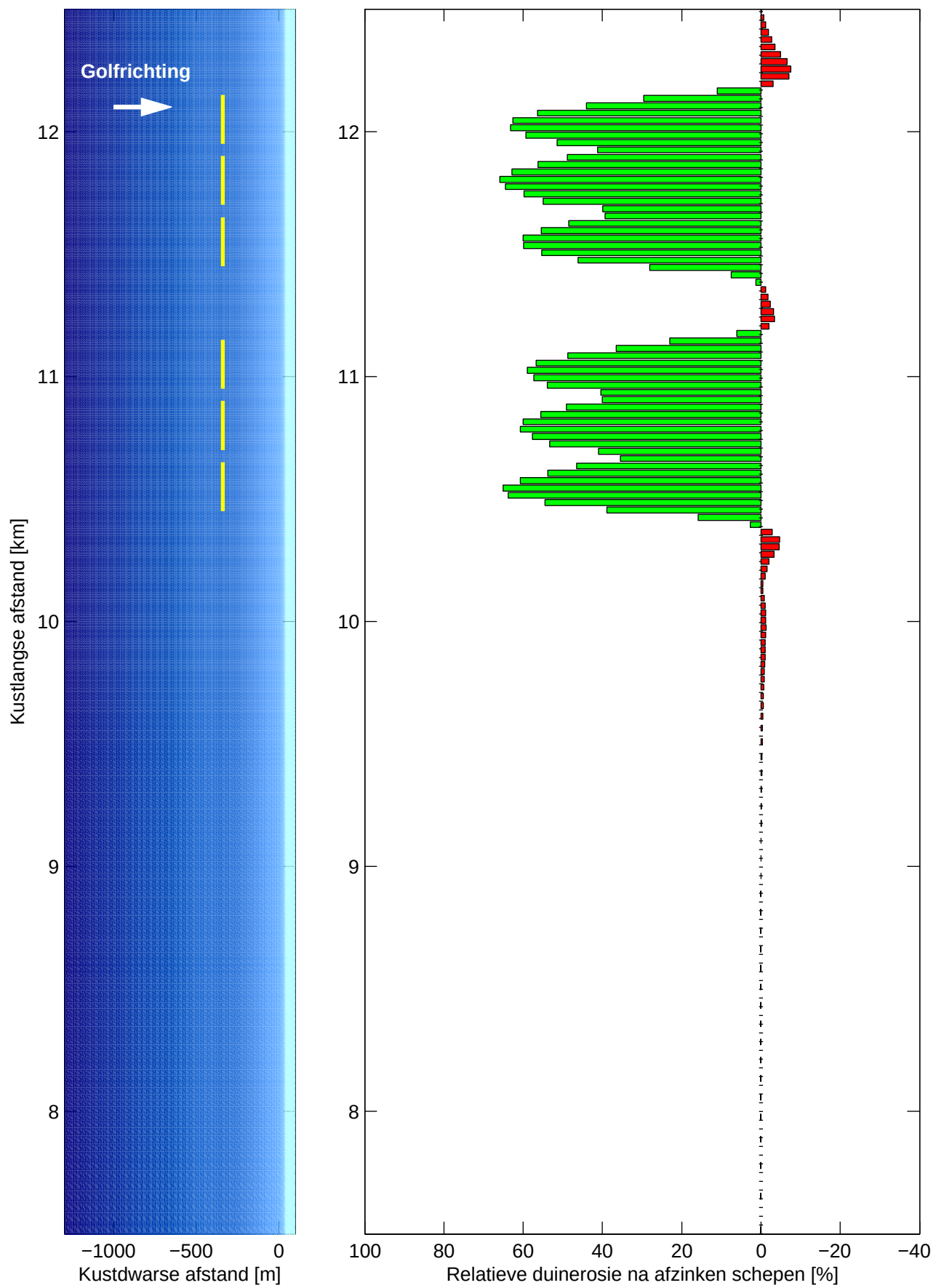


Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
Westelijke golfrichting, 6 schepen met scheepsafstand 100 m

w01 w03a

West

Delft3D

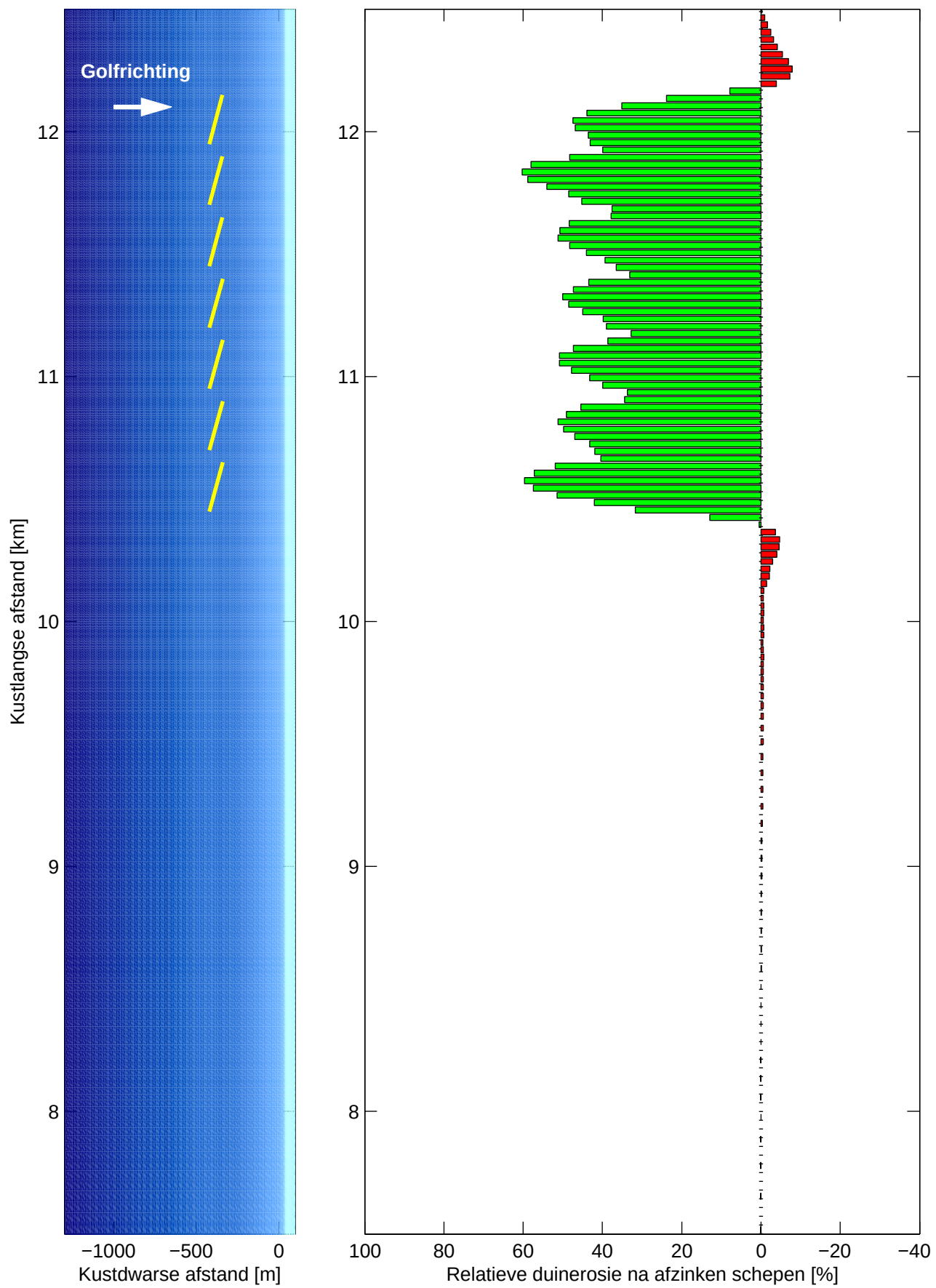


Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
 Westelijke golfrichting, 6 schepen met scheepsafstand 50 m
 Middelste schip van de oorspronkelijk 7 schepen niet gestrand

w01 w03

West

Delft3D



Relatieve duinafslag ten gevolge van stranden schepen
Westelijke golfrichting, schepen onder hoek van 20° t.o.v. de kust met
een scheepsafstand van 50 m

w01 w02e

West

Delft3D