

**Effect van zeer grootschalige
zandwinning langs de Nederlandse
kust op de waterbeweging,
zandtransporten en morfologie**



Effect van zeer grootschalige zandwinning langs de Nederlandse kust op de waterbeweging, zandtransporten en morfologie

Jebbe van der Werf
Alessio Giardino

Titel

Effect van zeer grootschalige zandwinning langs de Nederlandse kust op de waterbeweging, zandtransporten en morfologie

Opdrachtgever

RWS Waterdienst

Project

1200996-000

Pagina's

74

Trefwoorden

Zeer grootschalige zandwinning, kustmorfologie, Nederland, modelberekeningen, Delft3D

Samenvatting

Dit rapport onderzoekt het effect van zeer grootschalige zandwinning langs de gehele Nederlandse kust op de golfwerking, waterbeweging en zandtransporten met een doorvertaling naar morfologie uitgedrukt in het zandvolume in het kusbundament en de duinerosie. Daartoe zijn met het modelsysteem Delft3D verschillende zandgootscenario's doorgerekend. In de meeste scenario's is een extreme waarde voor de hoeveelheid te winnen zand genomen om de effecten goed zichtbaar te maken. De bijbehorende dieptes zullen pas over enkele eeuwen bereikt worden. Er zijn ook twee meer realistische scenario's doorgerekend, waarbij is uitgegaan van een zandwinning die een zeespiegelstijging van 1.3 m in 2100 moet compenseren. Ook de manier waarop de scenario's zijn doorgerekend resulteert in extreme effecten. De verdieping is instantaan aangelegd, het zand is niet teruggestort en alleen het initiële effect van de zandgoot is bepaald.

De modelberekeningen tonen dat de golfhoogte toeneemt door de aanwezigheid van de zandgoot. De maximale toename, voor een 12 m diepe zandgoot, is ca. 20% ter plekke van de zandgoot en 10% in de kustzone. De stroomsnelheden nemen toe dan wel af afhankelijk van de getijfase. De veranderingen zijn maximaal 0.3 m/s oftewel bijna 20% van de piekwaarden. Bij de kust zijn de veranderingen aanzienlijk minder; 0.0-0.1 m/s. Het grootste effect op de zandtransporten (20-80%) is merkbaar voor de kustvakken nabij de versmalling van de zandgoot; de Delflandse en Rijnlandse kust. Ten zuiden van de versmalling neemt het kustwaartse transport af door stromingscontractie. Ten noorden gebeurt het tegenovergestelde: hier neemt het zeewaartse transport af. Hierdoor resulteert de zandgoot in minder zandimport in de vakken ten zuiden van de versmalling in de zandgoot (Delflandse en Rijnlandse kust, Zuid-Holland) en meer zandimport ten noorden ervan (Rijnlandse kust, Noord-Holland). De waargenomen invloed van de zandgoot neemt toe met de diepte ervan.

DUROS+ berekeningen voor 1 dwarsraai nabij Zandvoort tonen dat de aanleg van een aaneengesloten verdieping langs de Nederlandse kust leidt tot een toename van de duinerosie die optreedt bij een maatgevende stormconditie. Het verschil tussen de 6 m en 12 m diepe zandgoot is klein. De maximale toename, voor de 12 m diepe zandgoot, is 7%.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	15-12-2009	Jebbe van der Werf		John de Ronde		Tom Schilperoort	
		Alessio Giardino					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doel	1
1.3 Aanpak	1
1.4 Leeswijzer	2
2 Model opzet	3
2.1 Rekenroosters	3
2.2 Randvoorwaarden	4
2.2.1 Stromingsmodel	4
2.2.2 Golfmodel	5
2.3 Modelinstellingen	7
2.4 Modelvalidatie	8
2.5 Beschrijving zandgootscenario's en modelberekeningen	9
3 Modelresultaten	13
3.1 Golven	13
3.1.1 Effect diepte zandgoot	14
3.1.2 Effect aangepaste randvoorwaarden	16
3.1.3 Effect ruimtelijke variatie diepte zandgoot	17
3.1.4 Effect zanddammen	18
3.1.5 Effect weghalen versmalling zandgoot	20
3.1.6 Realistisch zandgootscenario	20
3.2 Stroomsnelheden	21
3.2.1 Effect zandgoot	24
3.2.2 Effect aangepaste randvoorwaarden	28
3.2.3 Effect zanddammen	28
3.2.4 Effect weghalen versmalling zandgoot	28
3.3 Zandtransporten	35
3.3.1 Effect diepte zandgoot	35
3.3.2 Effect zanddammen	38
3.3.3 Effect weghalen versmalling zandgoot	40
3.4 Doorvertaling naar morfologie	40
3.4.1 Zandvolume kustfundament	41
3.4.2 Duinerosie	43
4 Conclusies en aanbevelingen	47
4.1 Conclusies	47
4.2 Aanbevelingen	49
Referenties	51
Bijlage(n)	
A Stroomsnelheden	53
A.1 Scenario 2	53
A.2 Scenario 3	55

A.3	Scenario 5	57
A.4	Scenario 6	59
A.5	Scenario 9	61
B	Zandtransporten	63
B.1	Scenario 4b	63
B.2	Scenario 9	64
C	Zandvolume kustfundament	65

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Momenteel wordt er jaarlijks 25-30 miljoen m³ zand gewonnen in het Nederlandse deel van de Noordzee. De zandwinning vindt vrijwel geheel plaats tussen de doorgaande NAP -20 m dieptelijn (zeewaartse grens kustfundament) en de 12 mijlsgrens (ruim 22 km uit de kust). Het is mogelijk dat de zandvraag in de nabije toekomst sterk zal toenemen gegeven een eventuele versnelde zeespiegelstijging en toekomstige landreclamaties.

Om aan de toenemende zandvraag te voldoen zal er dieper en grootschaliger gewonnen moeten worden dan tot nu toe gebruikelijk. Indien deze winning in de strook tussen de doorgaande NAP -20 m dieptelijn en de 12 mijlsgrens een lange tijd (decennia tot eeuwen) doorgaat, kan er een aanzienlijke aaneengesloten verdieping van de zeebodem langs de gehele Nederlandse kust ontstaan; een zogenaamde “zandgoot”.

Een dergelijke zandgoot in de Noordzee betekent een grootschalige interventie in een complex hydrodynamisch (golven en getij), morfodynamisch en ecologisch systeem. De gevolgen hiervan zijn onbekend, omdat bestaande studies zich richtten op de (lokale) impact van zandwinning in zandwinputten met veel kleinere afmetingen dan bovengeschetst zandgootscenario (zie bijvoorbeeld Ribberink, 1989; Boers, 2005). Binnenkort wordt er een zandwinstrategie voor de Noordzee opgesteld met daarin keuzes ten aanzien van hoeveelheden en locaties, waarvoor kennis van het effect van zeer grootschalige zandwinning op de Nederlandse kust onontbeerlijk is.

1.2 Doel

Het doel van deze verkennende studie is het in kaart brengen van het effect van verschillende zandgootscenario's op de golfwerking, waterbeweging en zandtransporten langs de Nederlandse kust met een doorvertaling naar de korte en lange termijn kustveiligheid. Hierbij hanteren we het zandvolume in het kustfundament en duinerosie volume als indicatoren (zie paragraaf 1.3).

1.3 Aanpak

Om de effecten van de zandgootscenario's te bepalen zijn de volgende fasen doorlopen:

- 1 Opzet en globale validatie procesgebaseerd morfologisch model Nederlandse kust
- 2 Doorrekenen verschillende zandgootscenario's
- 3 Analyseren effect zandgoot op de golven, stroming, zandtransporten en morfologie

Hieronder volgt een korte beschrijving van deze fasen.

Fase 1: Modelopzet en modelvalidatie

Dit onderdeel betreft onder meer het construeren van de modelroosters en modelbodems en het afleiden en schematiseren van de randvoorwaarden en het golfklimaat. De waterbeweging en zandtransporten worden gesimuleerd met een dieptegemiddeld Delft3D model welke gekoppeld is aan een SWAN model voor de golven. De met dit model, het *Netherlands Coastal Model* (NCM), berekende waterstanden, stroomsnelheden en geïntegreerde zandtransporten zijn grofstoffelijk gevalideerd aan de hand van metingen en resultaten uit eerdere (model)studies.

Fase 2: Doorrekenen zandgootscenario's

Met dit model zijn in totaal 13 berekeningen gedaan. In de simulaties vindt geen bodem update plaats, dat wil zeggen: de bodem wordt vast gehouden. Er zijn in totaal 9 verschillende zandgootscenario's bestudeerd (waaronder de referentiesituatie zonder verdieping), waarbij we de diepte en vorm hebben gevarieerd. Alle scenario's zijn doorgerekend voor een morfologisch golfklimaat. Tevens zijn 3 scenario's doorgerekend voor een maatgevende (1/10000 jaar) stormconditie.

Fase 3: Analyseren effect zandgoot

Voor elk scenario is geanalyseerd hoe de zandgoot de golfwerking, stroomsnelheden en zandtransporten beïnvloedt. Vervolgens zijn deze resultaten doorvertaald naar de morfologie. Er is gekozen om het (initiële) effect van de zandgoot op het zandvolume in het kustfundament te onderzoeken en het effect op de duinerosie. De eerste is een belangrijke beleids- en beheersparameter voor de lange termijn kustveiligheid, de tweede voor de momentane kustveiligheid.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 beschrijft de modelopzet, de modelvalidatie en de zandgootscenario's die doorgerekend zijn. De invloed van de verschillende scenario's op de golfwerking, stroomsnelheden, zandtransporten en morfologie wordt besproken in Hoofdstuk 3. De conclusies en aanbevelingen worden gepresenteerd in Hoofdstuk 4.

2 Model opzet

De waterbeweging en zandtransporten zijn gesimuleerd met een dieptegemiddeld, tweedimensionaal-horizontaal (2DH) Delft3D model (versie 3.60.00.5590, 10 december 2008). Dit Delft3D model is gekoppeld aan het SWAN model (versie 40.51a) dat de golfwerking simuleert. De opzet van het model, het *Netherlands Coastal Model* (NCM), staat centraal in dit hoofdstuk. Achtereenvolgens worden de rekenroosters, modelrandvoorwaarden en modelinstellingen besproken. De laatste twee paragrafen zijn gewijd aan de modelvalidatie en de scenario's die doorgerekend zijn.

2.1 Rekenroosters

De rekenroosters van zowel het stromingsmodel als het golfmodel beslaan (bijna) de gehele Nederlandse kust van de Belgisch-Nederlandse grens in het zuiden tot het Eems-Dollard estuarium in het noordoosten, inclusief de Westerschelde, Oosterschelde en de Waddenzee. De zeewaartse modelgrens ligt bijna 50 km van de kust. Het rekenrooster van het stromingsmodel heeft 275 (kustdwarse richting) x 683 (kustlangse richting) = 187825 cellen. De resolutie van het rooster in kustwaartse richting loopt af van ongeveer 1500 m op diep water tot 75 m bij de kust en varieert in kustlangse richting van 1500 m tot 200 m (Westerschelde, Oosterschelde en Marsdiep). Het rekenrooster van het golfmodel is een drietal maal grover met 92 x 228 = 20976 cellen en een kustdwarse resolutie tussen de 150 en 4000 m en een kustlangse resolutie tussen de 300 en 6500 m, respectievelijk. Figuur 2.1 en Figuur 2.2 tonen de rekenroosters van het stromingsmodel en het golfmodel.



Figuur 2.1 Rekenrooster stromingsmodel.



Figuur 2.2 Rekenrooster golfmodel.

De bodemligging in het model is afkomstig van het zuidelijke Noordzee model (Zuno-fijn model; Roelvink et al., 2001), waarin het NCM genest is (zie paragraaf 2.2). Deze bodemligging is dus anders dan de huidige bodemligging, maar dit is niet van groot belang gezien de aard van deze studie.

2.2 Randvoorwaarden

2.2.1 Stromingsmodel

Op de laterale randen van het stromingsmodel leggen we als randvoorwaarden stroomsnelheden op en op de zeewaartse rand waterstanden. Debieten ter plaatse van de Nieuwe Waterweg, Haringvlietsluizen en Schelde nemen we niet mee. De gebruikte stromingsrandvoorwaarden zijn afkomstig uit het gevalideerde ZUNO-fijn model waarbinnen NCM genest is (zie Figuur 2.3).



Figuur 2.3 Rekenrooster ZUNO-fijn model (zwarte lijnen) dat gebruikt is voor het afleiden van de randvoorwaarden van het NCM model (rode lijnen).

De randvoorwaarden zijn afgeleid voor een zogenaamd morfologisch getij. Dit is een getij dat representatief is voor de lange termijn morfologische ontwikkelingen en dat ook een goede weergave geeft van de gemiddelde residuele zandtransporten. Het hier gebruikte morfologische getij is indertijd afgeleid door in een tiental raaien langs de Hollandse kust de langstransporten over een doortij-springtij cyclus te simuleren en hieruit het meest representatieve getij te bepalen. Het morfologische getij loopt van 23 maart 2001 23:32 tot 24 maart 2001 11:57. Dit getij is eerder gebruikt in morfologische modelstudies, zoals die van Tonnon et al. (2009).

2.2.2 Golfmodel

Het golfmodel beslaat een groot gebied. Van de Rest (2004) heeft middels een data-analyse laten zien dat het offshore golfklimaat bij verschillende stations langs de Nederlandse vergelijkbaar is in termen van golfhoogte en golfrichting. Daarom is gekozen voor ruimtelijk constante golfrandvoorwaarden.

Voor het afleiden van de randvoorwaarden is gebruik gemaakt van golfdata afkomstig van het meetstation 'Euro Platform' (EUR). Meetstation EUR ligt op relatief diep water (32 m). De Rijksdriehoek (RD) coördinaten zijn $x_{RD} = 9963$ m en $y_{RD} = 447601$ m; het station ligt nabij de rand van het golfmodel (zie Figuur 2.2). De data betreffen significante golfhoogte ($H_{1/3}$), significante golfperiode ($T_{1/3}$), golfvoortplantingsrichting (θ_{golf}), magnitude van de windsnelheid (V_{wind}), windrichting (θ_{wind}) en stormopzet elke 3 uur voor de periode 1979-2001.

De data zijn geclusterd in 10 golfhoogte-klassen van 0 tot 5.0 m met een interval van 0.5 m en 6 golfrichting-klassen van 180 tot 360°N met een interval van 30°. Golven met een invalshoek tussen de 0 en 180°N zijn niet meegenomen, aangezien het aflandige golven

betreft. Tabel 2.1 laat per gecombineerde golfhoogte- en golfrichting-klasse de kans van voorkomen zien. De karakteristieke windrichting per klasse is bepaald door het sommeren van de windvectoren behorende bij de condities in de betreffende klasse, zodat hogere windsnelheden een groter aandeel hebben.

Tabel 2.1 Kans van voorkomen (%) van golfcondities in het golfklimaat welke is afgeleid aan de hand van data van het meetstation Europlatform.

$H_{1/3}$ (m)	θ_{golf} (°N)						Totaal
	180 - 210	210 - 240	240 - 270	270 - 300	300 - 330	330 - 360	
0.0 – 0.5	0.72	1.38	1.72	1.25	1.54	2.68	9.29
0.5 – 1.0	2.13	5.11	3.15	2.16	2.57	5.69	20.80
1.0 – 1.5	1.49	5.58	2.62	1.46	1.84	3.82	16.80
1.5 – 2.0	0.80	3.96	1.82	1.00	1.05	2.25	10.88
2.0 – 2.5	0.34	2.60	1.10	0.62	0.69	1.16	6.52
2.5 – 3.0	0.13	1.43	0.66	0.36	0.35	0.60	3.53
3.0 – 3.5	0.04	0.64	0.37	0.24	0.21	0.31	1.81
3.5 – 4.0	0.01	0.20	0.18	0.11	0.09	0.15	0.75
4.0 – 4.5	0.00	0.06	0.07	0.06	0.05	0.06	0.31
4.5 – 5.0	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.11
Totaal	5.66	20.99	11.72	7.28	8.42	16.72	70.79

De totale som van de condities in het golfklimaat is 71%; de overige condities betreffen aflandige golven.

Het golfklimaat zoals weergegeven in Tabel 2.1 bevat 60 verschillende condities. Om de rekentijd van de simulaties te beperken, reduceren we dit golfklimaat tot een hanteerbaar aantal condities. Berekeningen met dit gereduceerde golfklimaat dienen een vergelijkbare morfologische ontwikkeling te geven als met het volledige aantal golfcondities. Dit zogeheten morfologische golfklimaat wordt afgeleid met behulp van het programma OPTI (Van Duin et al., 2004; Mol, 2007). Het doel van de exercitie met OPTI is het bepalen van een kleinere set golfcondities waarmee de getijgemiddelde zandtransporten op basis van alle 60 condities goed gereproduceerd worden. Gezien het verkennende karakter van deze studie is dit op een relatief eenvoudige manier gedaan.

Hierbij nemen we aan dat het transport alleen bepaald wordt door de golfhoogte en evenredig is met $H_{1/3}^{2.4}$ (zoals ook verondersteld in Soulsby, 1997). Vervolgens is hiervan een gewogen gemiddelde bepaald op basis van de (geschaalde) weegfactoren (kans van voorkomen), zoals weergegeven in Tabel 2.1. Dit getal vormt het doel in de OPTI routine. Dan begint de "afvalrace" van golfcondities. Van elke golfconditie wordt de bijdrage aan het doel bepaald aan de hand van het product van de weegfactor en het bij deze conditie horende zandtransport. De golfconditie met de kleinste bijdrage wordt verwijderd door de weegfactor van deze conditie op 0 te zetten. Vervolgens worden de weegfactoren van de resterende golfcondities een 100-tal keer willekeurig veranderd, de set van weegfactoren dat de grootste overeenkomst met het doel vertoont geselecteerd en de afvalrace hervat tot het gewenste aantal golfcondities resteert. Dit leidt tot een gereduceerd golfklimaat dat bestaat uit 6 condities, zoals weergegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Gereduceerd golfklimaat.

Conditie	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (m)	θ_{golf} (°N)	V_{wind} (m/s)	θ_{wind} (°N)	opzet (m)	weegfactor (-)
w1	1.72	5.48	226	10.2	234	0.04	0.034
w2	1.73	5.67	284	8.5	178	0.19	0.044
w3	1.72	6.40	345	6.7	118	0.07	0.067
w4	3.23	6.97	283	13.5	165	0.58	0.150
w5	4.21	8.00	315	16.3	141	0.90	0.002
w6	4.66	7.94	234	20.5	225	0.10	0.001

Het gereduceerde golfklimaat bevat 3 golven uit de zuidwestelijke sector en 3 uit de noordwestelijke sector. Qua kans van voorkomen is 1 conditie dominant, w4; een WNW golf met een significante hoogte van 3.2 m. De som van de weegfactoren is 0.30 en dus aanzienlijk kleiner dan 1. Dit komt omdat het gereduceerde golfklimaat gewogen gemiddeld beschouwd hogere golven bevat die om hetzelfde transport (de relatie tussen het sediment transport en de golfhoogte is niet-lineair) als de totale set te geven gesommeerd een lagere weegfactor nodig hebben. Opvallend is het verschil tussen golf- en windrichting voor de golven uit de noordwestelijke sector. Dit zijn blijkbaar niet lokaal opgewekte golven. Naar verwachting heeft de windrichting overigens maar een klein effect op de berekende golfhoogtes en stroomsnelheden, gezien het feit dat het modeldomein relatief klein is. Het belangrijkste effect van de wind op een grotere schaal (golven en windopzet) wordt direct op de modelrand opgelegd.

Er zijn ook drie modelberekeningen gedaan voor een maatgevende stormconditie met een kans van voorkomen van eens in de 10000 jaar. Het betreft een golf met de volgende karakteristieken: $H_{1/3} = 9.0$ m, $T_{1/3} = 15.5$ s, $\theta_{\text{golf}} = 330^\circ\text{N}$, $V_{\text{wind}} = 30$ m/s, $\theta_{\text{wind}} = 330^\circ\text{N}$ en een opzet van 3.5 m. Deze getallen zijn afkomstig uit het rapport *Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen* (2007) (HR, 2006) en gelden voor de JARKUS raaien 6400-7150, rondom Zandvoort, Zuid-Holland.

2.3 Modelinstellingen

Voor de meeste modelparameters zijn de standaardinstellingen genomen. Hieronder worden de belangrijkste instellingen vermeld.

Waterbeweging (Delft3D-FLOW)

- tijdstap: 1 min.
- horizontale achtergrondviscositeit: $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
- voorspeller Van Rijn (2007a) voor bodemruwheid
- methode Fredsoe (1984) voor bodemschuifspanning als gevolg van golven

Golven (SWAN)

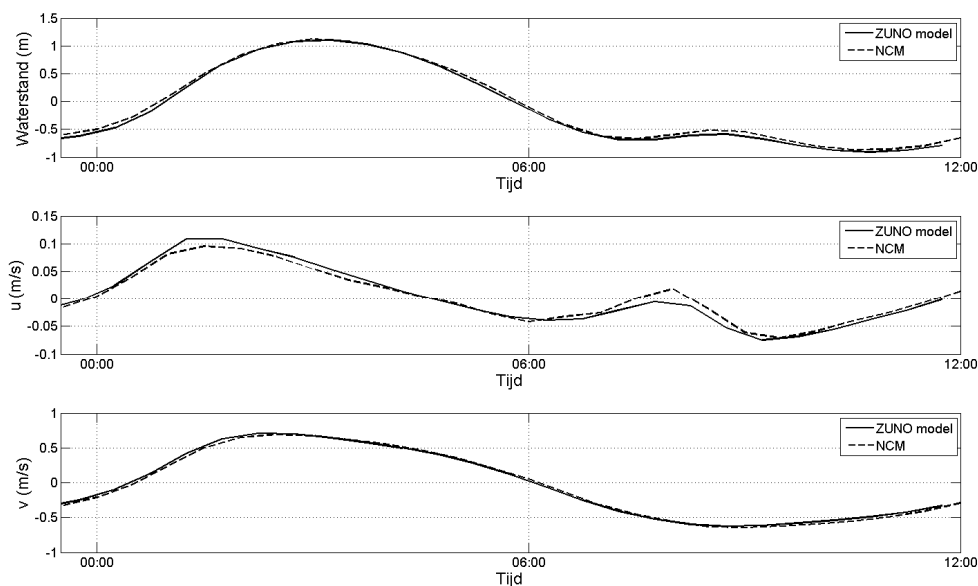
- interval golfberekeningen: 30 min
- SWAN modus: derde generatie fysica
- resolutie golfrichting: 10° , resolutie golfrequentie: van 0.05 tot 1 Hz met 24 bins
- golf-stroom interactie meegenomen
- methode Battjes & Janssen (1978) voor golfbreking met $\alpha = 1$ en $\gamma = 0.73$
- JONSWAP uitdrukking voor bodemwrijving met een coëfficiënt van 0.067
- white-capping, refractie en frequentieverschuiving meegenomen

Sediment

- 1 zandfractie met $D_{50} = 0.215$ mm en een dichtheid van 2650 kg/m^3
- bodemtransport en golfgerelateerd suspensietransport volgens Van Rijn (2007a,b) formule
- factor bodemtransport: 0.7
- factor suspensietransport: 0.7
- factor golfgerelateerd bodemtransport: 1.0
- factor golfgerelateerd suspensietransport: 0.3

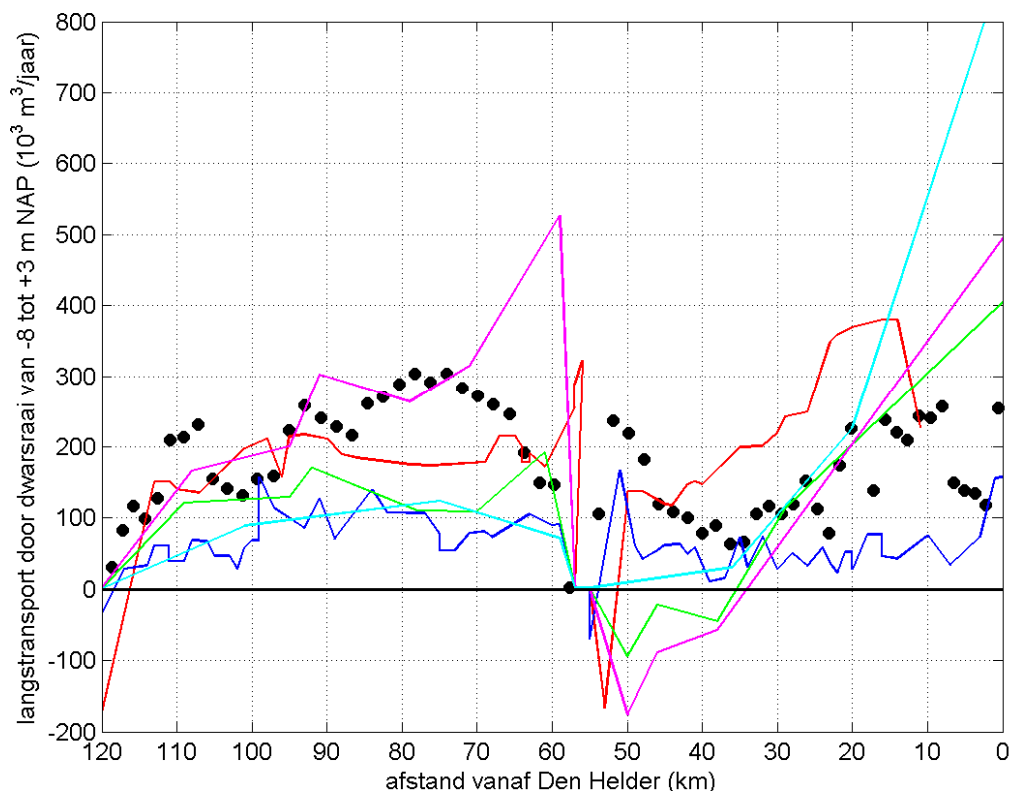
2.4 Modelvalidatie

Ter validatie van het stromingsmodel zijn de berekende waterstanden en stroomsnelheden bij Meetpost Noordwijk ($x = 80443$ mRD, $y = 476683$ mRD) vergeleken met het ZUNO-fijn model, een gekalibreerd, betrouwbaar stromingsmodel. Beide modellen zijn gedraaid zonder golven. Figuur 2.4 toont dat de modellen zeer vergelijkbare resultaten geven.



Figuur 2.4 Vergelijking tussen de waterstanden en stroomsnelheden (kustdwars: U, kustlangs: V) bij Meetpost Noordwijk zoals berekend met het ZUNO-fijn model en het NCM model.

Figuur 2.5 toont de berekende jaarlijks gemiddelde langstransporten tussen de -8 en +3 m dieptecontour van Hoek van Holland (118 km vanaf Den Helder) tot Scheveningen (102 km vanaf Den Helder). Positief langstransport is richting Den Helder. Deze figuur bevat ook de langstransporten in deze zone volgens een aantal andere studies (zie Van de Rest, 2004). Hieruit volgt dat de langstransporten zoals berekend met het huidige model goed overeenkomen met de waarden afkomstige uit eerdere studies.



Figuur 2.5 Jaarlijks gemiddeld langstransport in de brandingszone langs de Hollandse kust zoals volgt uit de huidige studie (zwarte rondjes) en andere studies. Rode lijn: Steetzel & De Vroeg (1999), blauwe lijn: Roelvink (2001), magenta lijn: Van Rijn (1995), groene lijn: Van Rijn (1995) aangepast door Van de Rest (2004), cyane lijn: Stive & Eysink (1989). Zie ook Van de Rest (2004).

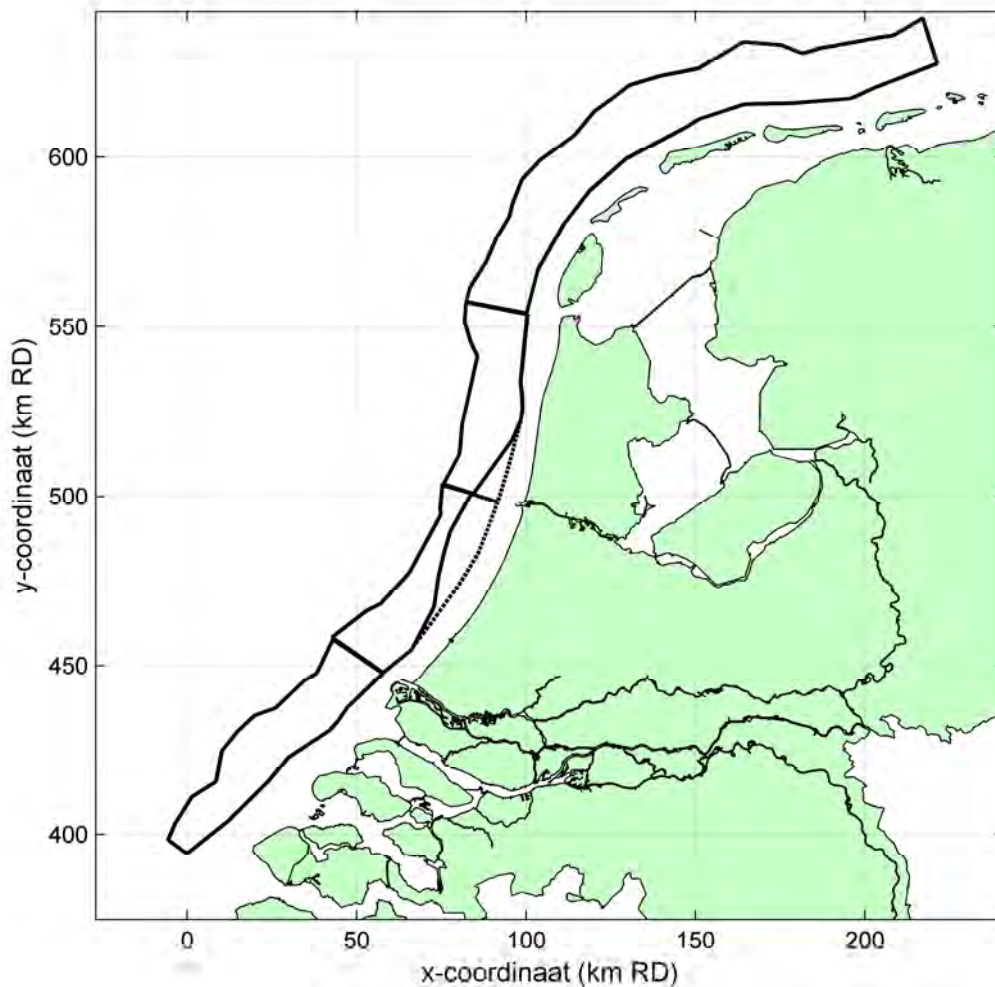
2.5 Beschrijving zandgootscenario's en modelberekeningen

Er zijn 9 verschillende zandgootscenario's doorgerekend:

- 1 Referentie situatie (i.e. zonder zandgoot)
- 2 Zandgoot met een uniforme diepte van 2 m
- 3 Zandgoot met een uniforme diepte van 6 m
- 4 Zandgoot met een uniforme diepte van 12 m
- 5 Getrapte zandgoot met hetzelfde volume als Scenario 3
- 6 Scenario 5 met een zanddam ter hoogte van de "buik"
- 7 Scenario 5 met een zanddam ter hoogte van Noordwijk, Castricum en Callantsoog
- 8 Scenario 3 zonder de versmalling in de zandgoot
- 9 Getrapte zandgoot met (bijna) hetzelfde volume als Scenario 2

Hierbij is de bodem in het gebied omsloten door de doorgaande NAP -20 m dieptelijn, de 12 zeemijlsgrens en (ruwweg) de Belgisch-Nederlandse en de Nederlands-Duitse grens verdiept. In de meeste scenario's is een extreme waarde voor de hoeveelheid te winnen zand aangenomen om de effecten goed zichtbaar te maken. De bijbehorende dieptes van de zandgoot zullen pas over enkele eeuwen bereikt worden. Er zijn ook twee meer realistische scenario's (Scenario's 2 en 9) doorgerekend, waarbij is uitgegaan van een zandwinning die een zeespiegelstijging van 130 cm in 2100 moet compenseren. In Scenario's 2, 3, 4 en 8 is

de verdieping ruimtelijk uniform, terwijl in Scenario's 5, 6, 7 en 9 het zandvolume is verdeeld volgens de verwachte vraag in de verschillende regio's (Ad Stolk, persoonlijke communicatie). Hierdoor ontstaat een getrapte zandgoot met verschillende dieptes in het Delta gebied, Zuid-Holland, Noord-Holland en het Wadden gebied (zie Figuur 2.6).



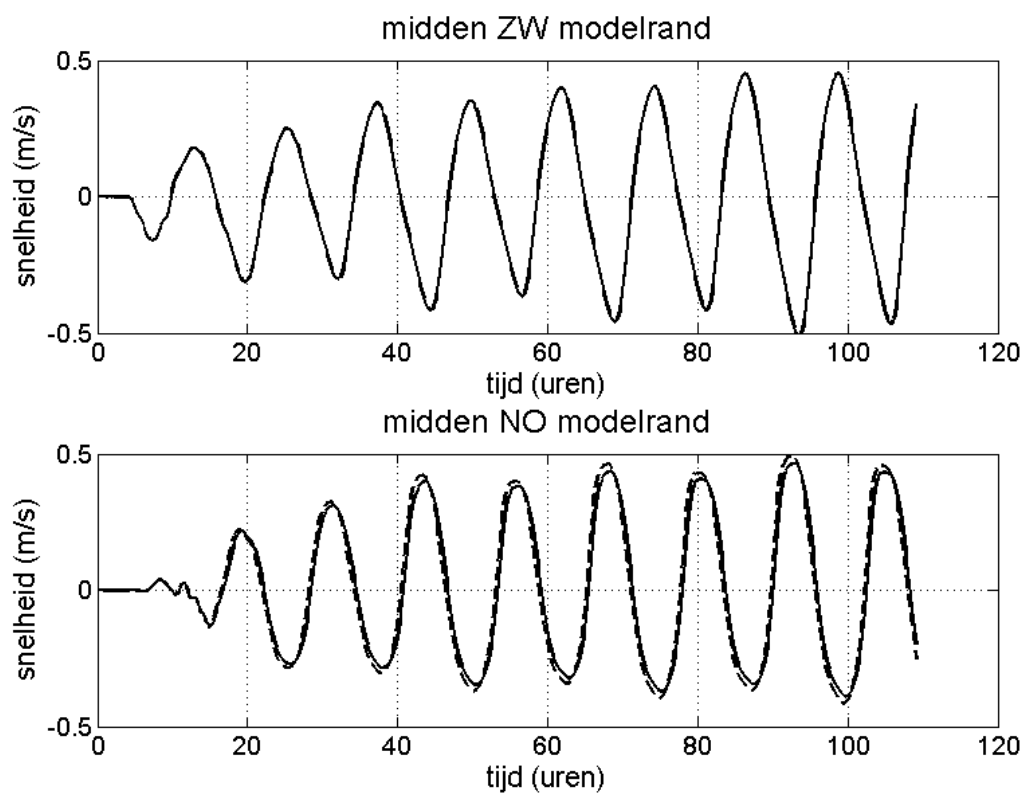
Figuur 2.6 Afmetingen zandgoot met onderscheid tussen de Delta, Zuid-Holland, Noord-Holland en het Wadden gebied (doorgetrokken lijnen). De gestippelde lijn geeft de afmetingen van de zandgoot zonder de versmalling weer.

Verder zijn er in twee scenario's (no. 6 en 7) "zanddammen" geplaatst; een onderbreking van de verdieping over een kustlangse afstand van 10 km als representatie van een gebied waar zich boorplatforms, windturbines, kabels en pijpleidingen gebundeld bevinden. In Scenario 6 is deze geplaatst ter plekke van de zandgootversmalling. In Scenario 7 betreft het 3 zanddammen bij Noordwijk, Castricum en Callantsoog. In Scenario 8 is de versmalling in de zandgoot weggehaald en loopt deze meer parallel (zie Figuur 2.6). Onderstaande tabel geeft de kenmerken van de verschillende zandgootscenario's weer. De zanddammen uit zich in een reductie van het verdiepte oppervlak.

Tabel 2.3 Kenmerken van de verschillende zandgootscenario's. "D" staat voor Delta, "ZH" voor Zuid-Holland, "NH" voor Noord-Holland en "W" voor Wadden.

Scenario	Verdiept oppervlak (km ²)				Verdieping (m)				Zandvolume (10 ⁹ m ³)				
	D	ZH	NH	W	D	ZH	NH	W	D	ZH	NH	W	Tot
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1138	659	802	2632	2	2	2	2	2.3	1.3	1.6	5.3	10.5
3	1138	659	802	2632	6	6	6	6	6.8	4.0	4.8	15.8	31.4
4	1138	659	802	2632	12	12	12	12	13.7	7.9	9.6	31.6	62.8
5	1138	659	802	2632	10.1	17.1	6.1	1.4	11.5	11.3	4.9	3.7	31.4
6	1138	613	802	2632	10.1	17.1	6.1	1.4	11.5	10.5	4.9	3.7	30.6
7	1138	564	541	2632	10.1	17.1	6.1	1.4	11.5	9.7	3.3	3.7	28.2
8	1138	977	928	2632	6	6	6	6	6.8	5.9	5.6	15.8	34.1
9	1138	659	802	2632	3	4	2	1	3.4	2.6	1.6	2.6	10.3

In totaal zijn er niet 9 maar 13 modelberekeningen gedaan. Zo is er nog zandgootscenario 4b. De verdieping is gelijk aan Scenario 4, dat wil zeggen een ruimtelijk uniforme verdieping van 12 m. Echter, de stromingsrandvoorwaarden van Scenario 4b zijn anders. Deze zijn net zoals Scenario 4 afgeleid met behulp van het ZUNO-fijn model, maar met het verschil dat de 12 m verdieping ook is aangebracht in de modelbodem van het ZUNO-fijn model. Op deze wijze wordt het effect van de zandgoot op een grotere schaal dan het modeldomein van het NCM model meegenomen. De waterstand op de zeewaartse rand blijkt niet of nauwelijks beïnvloed te worden door de verdieping. Hetzelfde geldt voor de stroomsnelheid zoals opgelegd aan de zuidwestelijke, laterale modelrand. Echter, de stroomsnelheden aan de noordoostelijke, laterale modelrand verschillen enigszins (maximaal 10% bij eb en vloed), zoals weergegeven in Figuur 2.7. Hoe dit verschil zal doorwerken, onderzoeken we in Hoofdstuk 3.



Figuur 2.7 *Vergelijking tussen de stroomsnelheden in langsrichting in ongeveer het midden van de laterale randen van het NCM model. Getrokken lijn: zonder de 12 m diepe zandgoot, gestippelde lijn: met deze verdieping.*

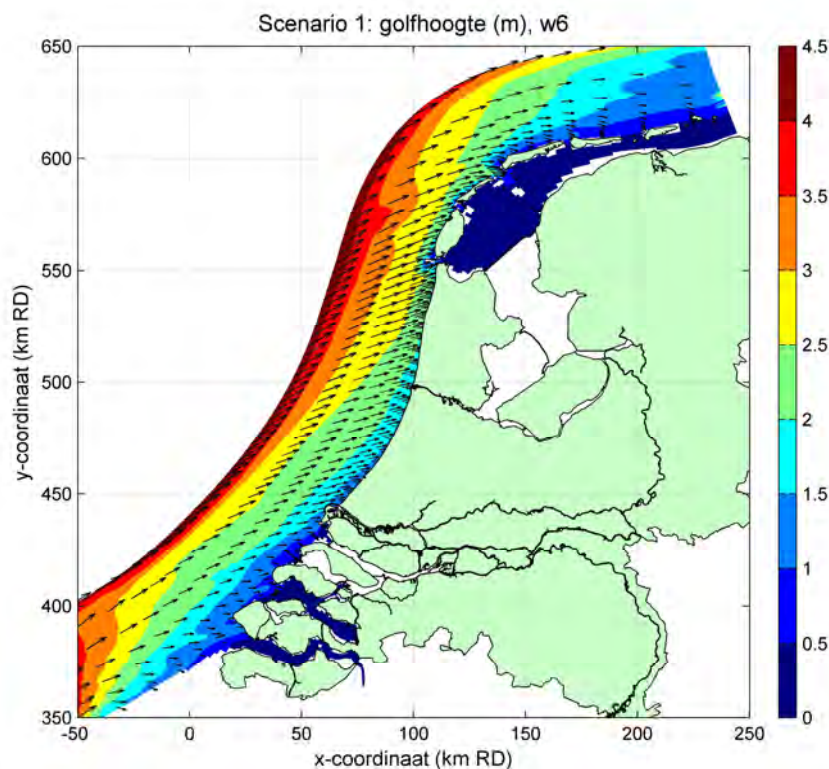
Verder zijn Scenario's 1 (referentie), 3 (6 m diepe zandgoot) en 4 (12 diepe zandgoot) ook doorgerekend voor de maatgevende stormconditie om later het effect van de doorgaande verdieping langs de Nederlandse kust op duinerosie te bepalen.

3 Modelresultaten

In dit hoofdstuk bespreken we de modelresultaten. We bestuderen het effect van de zandgootscenario's op de golven, stroming en zandtransporten met een doorvertaling naar morfologie. Om de invloed van de zandgoot op de golfwerking en stroming te bepalen richten we ons op 1 golfconditie: w6. Dit is een 4.66 m hoge golf afkomstig uit het zuidwesten (zie Tabel 2.2). Kwalitatief is de invloed van de zandgoot op de golfwerking en stroming grotendeels hetzelfde voor de verschillende golfcondities. We kiezen voor de hoogste golf in het gereduceerde golfklimaat, omdat de impact van de zandgoot dan het best zichtbaar is. In het onderstaande ligt de nadruk op het verschil tussen de berekende golfhoogte, stroomsnelheden en zandtransporten voor de verschillende zandgootscenario's en het referentiescenario (i.e. zonder verdieping).

3.1 Golven

De golfhoogte en, in mindere mate, de golfrichting variëren met de fase van het getij. Bij laag water, bijvoorbeeld, zijn de golven over het algemeen wat lager omdat de waterdieptes lager zijn en daardoor het energieverlies door bodemwrijving en golfbreking groter. De fase van het getij is vanzelfsprekend niet hetzelfde langs de Nederlandse kust. Figuur 3.1 toont de berekende significante golfhoogte en gemiddelde golfrichting voor het referentiescenario. Het getoonde moment betreft de situatie nabij hoog water aan de zuidwestelijke modelrand, laag water bij Noord-Holland en dichtbij hoog water aan de noordoostelijke modelrand. Alle onderstaande figuren waarin (verschillen in) golfhoogtes getoond worden zijn modelresultaten voor dezelfde fase in het getij.



Figuur 3.1 Golfhoogte en golfrichting voor golfconditie w6 zoals berekend voor Scenario 1.

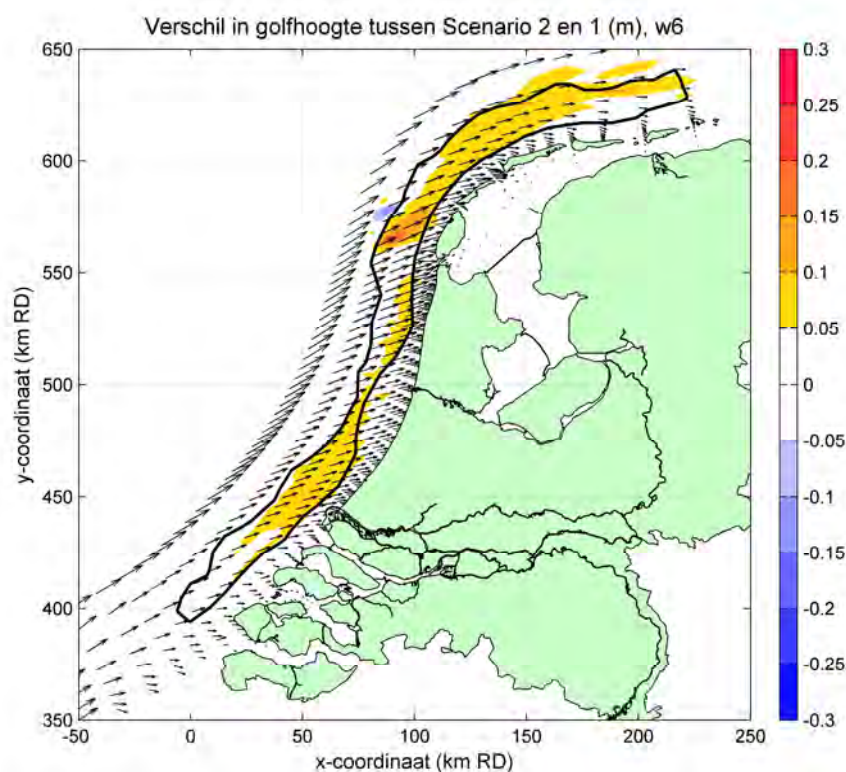
Figuur 3.1 geeft een beeld van de golfwerking in geval van golfconditie w6. Het toont hoe de golfhoogte afneemt door bodemwrijving (dominant in diep water) en golfbreking (dominant in ondiep water). Tevens is zichtbaar hoe door golfrefractie de voortplantingsrichting van de golven verandert van diep naar ondiep water. De golven draaien bij in de richting van de kustnormaal. Verder is goed te zien dat de golven nauwelijks kunnen doordringen in de Westerschelde, Oosterschelde en Waddenzee, waardoor hier de golven laag zijn (0-0.5 m).

3.1.1 Effect diepte zandgoot

Figuur 3.2 t/m Figuur 3.4 tonen het verschil tussen de significante golfhoogte berekend voor Scenario's 2, 3 en 4 en Scenario 1 (de referentie). Het betreft de scenario's met een ruimtelijk uniforme zandgoot met een diepte van 2, 6 en 12 m, respectievelijk. Rood duidt op een toename in golfhoogte, blauw op een afname. Nota bene: de kleurschaal van Figuur 3.4 wijkt af ten opzichte van Figuur 3.2 en Figuur 3.3. De zwarte getrokken lijn duidt de randen van de zandgoot aan.

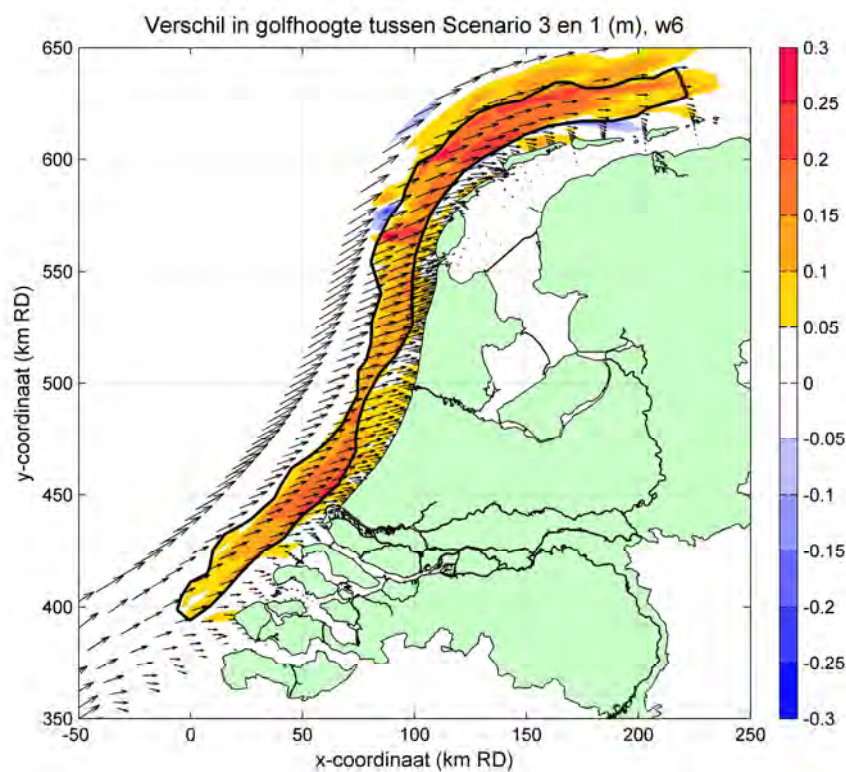
Deze figuren laten zien dat het aanleggen van een zeer grootschalige verdieping langs de Nederlandse kust leidt tot een toename in golfhoogte. Dit komt omdat er relatief minder golfenergie gedissipeerd wordt door bodemwrijving als gevolg van de toegenomen waterdiepte. Dit effect is het sterkst ter plekke van de zandgoot en minder van belang in de kustnabije zone waarbij niet bodemwrijving maar golfbreking het belangrijkste proces voor golfhoogte afname is. Zeewaarts van de zandgoot is het effect van de verdieping nihil, met uitzondering van het gebied ten noorden van de Waddenzee. Het neemt de golfhoogte toe. Deze toename wordt veroorzaakt door golfrefractie. In de diepere zandgoot kunnen de golven zich sneller voorplanten, waardoor ze bijbuigen in noordelijke richting. Hierdoor concentreert zich golfenergie in deze gebieden. Dit proces hangt af van de voortplantingsrichting van de golf. Voor golven uit het noordwesten zal dit niet of ergens anders plaatsvinden.

De invloed van de zandgoot neemt toe met de diepte ervan. Bij de 2 m diepe zandgoot (Scenario 2) is de maximale toename van de golfhoogte 0.15-0.20 m in de goot en enkele centimeters bij de kust. De verdieping van 6 m (Scenario 3) leidt tot een toename van 0.2-0.3 m ter plekke van de verdieping; bij de kust zijn de golven maximaal 0.05-0.10 m hoger. De 12 m diepe zandgoot (Scenario 4) resulteert in 0.3-0.4 m hogere golven in de goot (ca. 20%), terwijl bij de kust de maximale toename 0.1-0.2 m bedraagt (ca. 10%). De variaties langs de zeewaartse modelrand zijn niet fysisch maar modelartefacten.



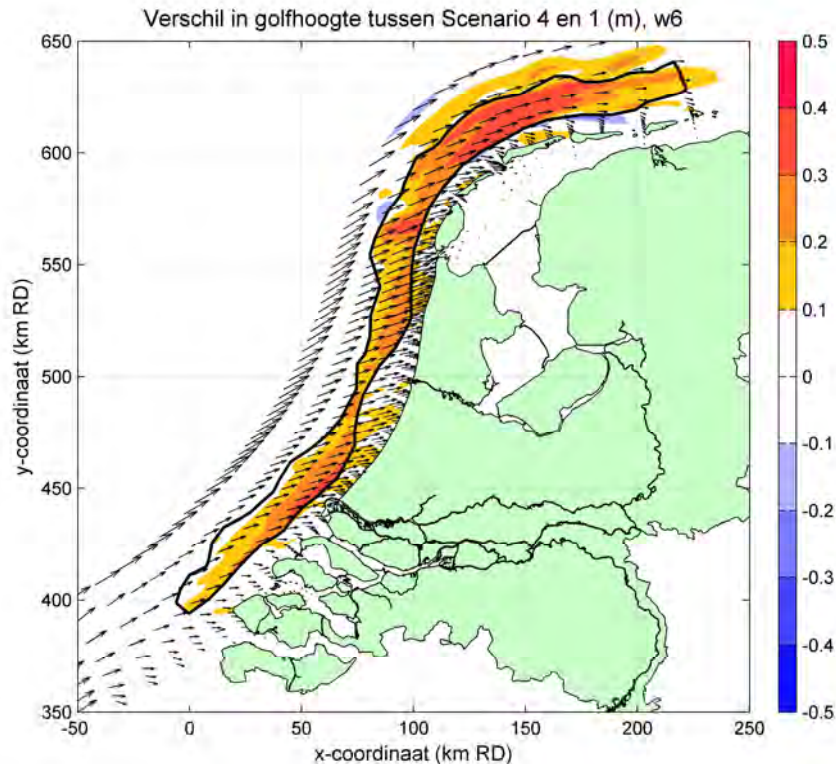
Figuur 3.2

Vershil in golfhoogte tussen Scenario 2 en Scenario 1 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 2.



Figuur 3.3

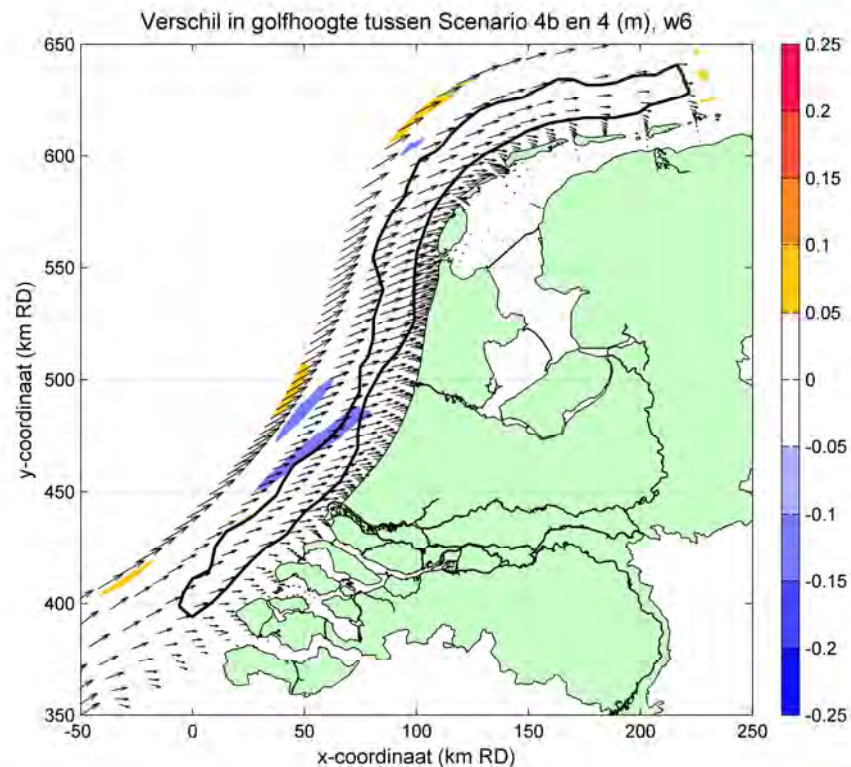
Vershil in golfhoogte tussen Scenario 3 en Scenario 1 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 3.



Figuur 3.4 Verschil in golfhoogte tussen Scenario 4 en Scenario 1 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 4. (Kleurschaal wijkt af t.o.v. Figuur 3.2 en Figuur 3.3).

3.1.2 Effect aangepaste randvoorwaarden

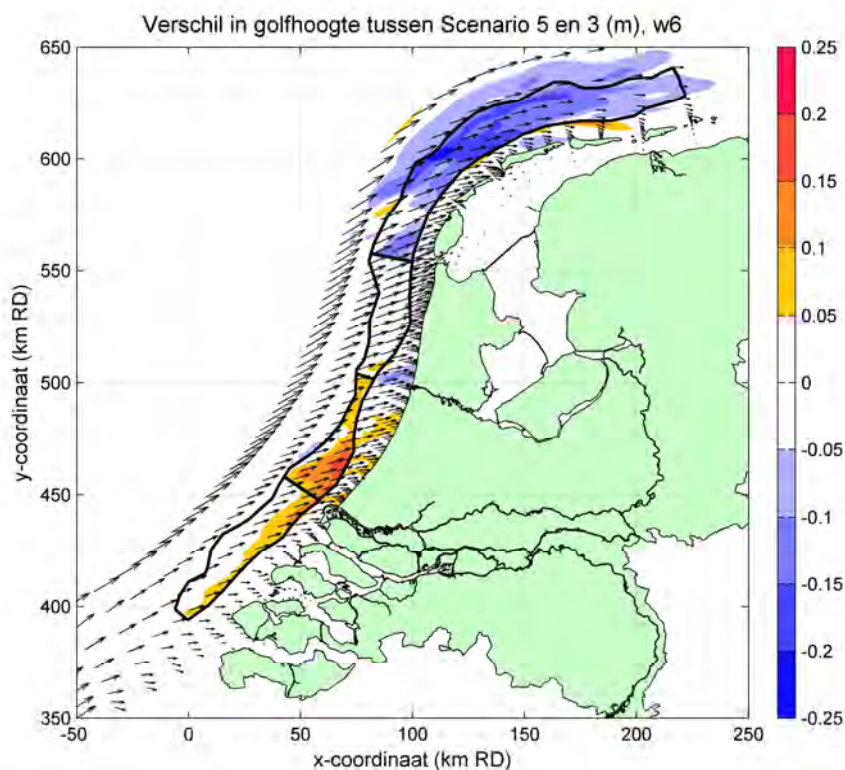
In Scenario 4b heeft de zandgoot dezelfde afmetingen als in Scenario 4: een 12 m verdieping langs de gehele Nederlandse kust. Het verschil tussen deze scenario's zit in de randvoorwaarden. De randvoorwaarden voor Scenario 4b zijn afgeleid aan de hand van het ZUNO-fijn model waarin een 12 m diepe zandgoot ligt, terwijl voor Scenario 4 de randvoorwaarden afkomstig zijn uit het ZUNO-fijn model zonder zandgoot (zie ook paragraaf 2.2.1). Het verschil tussen beiden, zoals geplot in Figuur 3.5, is dan ook een indicatie van de invloed van de zandgoot op een gebied groter dan het domein van het NCM model. Deze figuur toont dat het verschil in randvoorwaarden niet tot uiting komt in de berekende golfhoogtes. De verschillen zijn marginaal en lokaal en niet toe te schrijven aan de verschillen in de modelrandvoorwaarden.



Figuur 3.5 Vershil in golfhoogte tussen Scenario 4b en Scenario 4 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 4b.

3.1.3 Effect ruimtelijke variatie diepte zandgoot

Omdat de zandvraag per deelgebied (Delta, Zuid-Holland, Noord-Holland en Wadden) anders is, is een “getrapt” zandgoots scenario doorgerekend. In dit scenario, Scenario 5, is het totale volume zand afkomstig uit de verdieping gelijk aan dat van Scenario 3 (6 m verdieping). De verdeling per deelgebied zorgt er echter voor dat de zandgoot een stuk ondieper is in de Wadden (1.4 m), iets dieper is in Noord-Holland (6.1 m) en veel dieper in het Delta gebied (10.1 m) en Zuid-Holland (17.1 m). Figuur 3.6 laat zien dat dit verschil in diepte tot uiting komt in de berekende golfhoogte. Voor de kust van Noord-Holland zijn de golfhoogtes nagenoeg gelijk, bij de Wadden nemen de golfhoogtes af met 0.1-0.2 m, terwijl in de Delta en Zuid-Holland de golfhoogtes door de grotere diepte van de zandgoot toenemen met 0.0-0.1 m en 0.0-0.2 m, respectievelijk.

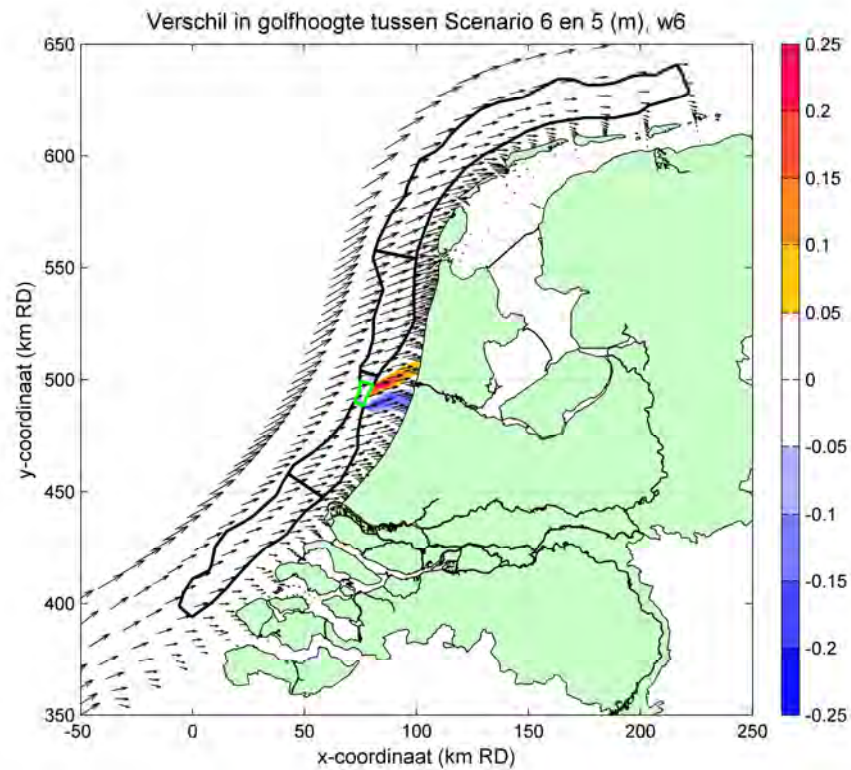


Figuur 3.6 Vershil in golfhoogte tussen Scenario 5 en Scenario 3 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 5.

3.1.4 Effect zanddammen

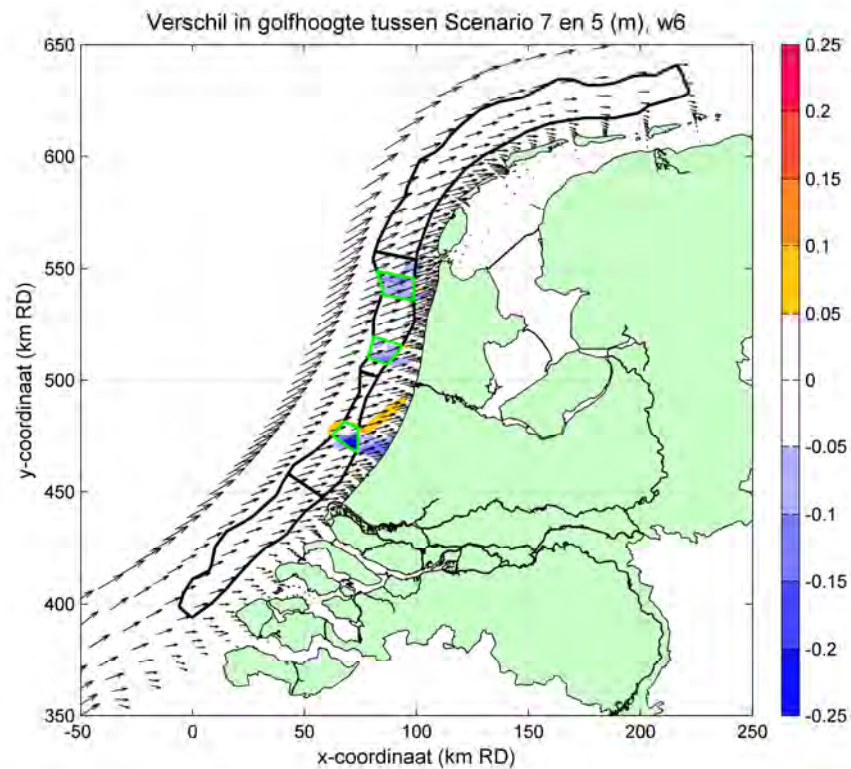
In de Noordzee bodem bevinden zich boorplatforms, windturbines, kabels en pijpleidingen. Om schade hieraan te voorkomen, mag er in een straal van 500 m eromheen geen zand worden gewonnen. Als de bovengenoemde activiteiten geconcentreerd worden, kunnen er “zanddammen” in de zandgoot ontstaan. Dat wil zeggen: een onderbreking van de verdieping. Bij Scenario 6 ligt een zanddam bij de versmalling in de zandgoot. Er liggen drie zanddammen in de verdieping bij Scenario 7; bij Noordwijk, Castricum en Callantsoog (van zuid naar noord). Uitgezonderd de zanddammen is de configuratie van de verdieping dezelfde als voor Scenario 5. Onderstaande figuren vergelijken dan ook de golfhoogte in geval van de scenario's met zanddammen met Scenario 5.

Uit de figuren valt op te maken dat het effect van de zanddammen vrij lokaal is. Ter plekke van de zanddam reduceert de golfhoogte 0.05-0.15 m ten opzichte van de doorgaande zandgoot, omdat er golfenergie verloren gaat doordat de bodem hoger ligt. Golfrefractie zorgt voor een toename in golfhoogte met 0.05-0.15 m ten noordoosten van de zanddammen en een afname van eenzelfde orde van grootte ten zuiden van deze toename. Deze verandering in golfhoogte is erg gevoelig voor de oriëntatie van de zanddam ten opzichte van de voortplantingsrichting van de golf. Het effect is daarom het meest zichtbaar voor de zanddammen in Zuid-Holland, waar de zanddammen meer dwars op de golfrichting staan dan de meer noordelijk gelegen dammen.



Figuur 3.7

Vershil in golfhoogte tussen Scenario 6 en Scenario 5 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 6. Het groene polygoon geeft de zanddam weer.

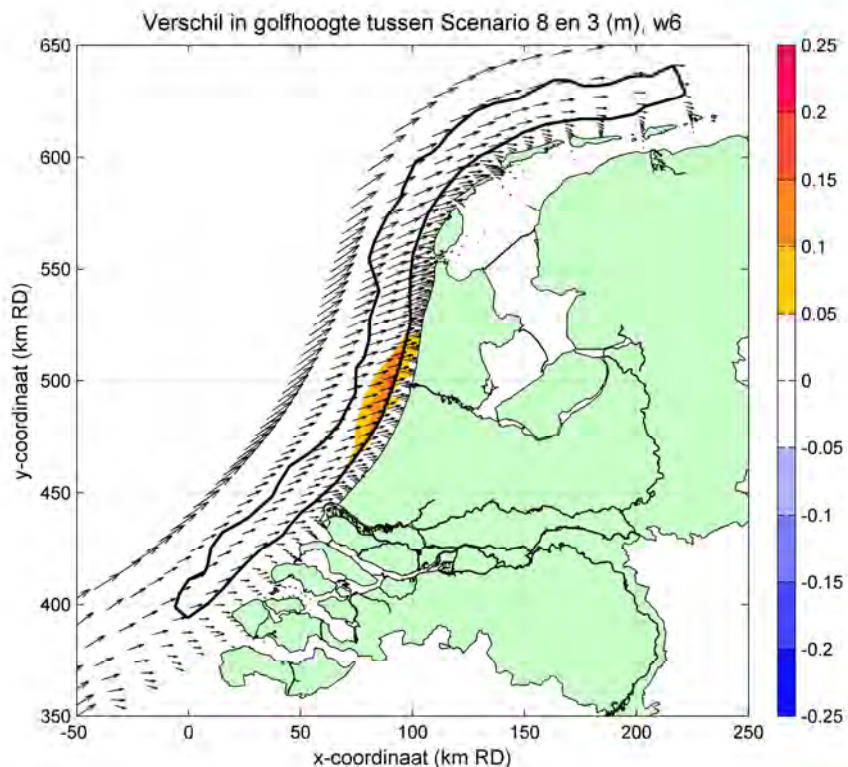


Figuur 3.8

Vershil in golfhoogte tussen Scenario 7 en Scenario 5 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 7. De groene polygonen geven de zanddammen weer.

3.1.5 Effect weghalen versmalling zandgoot

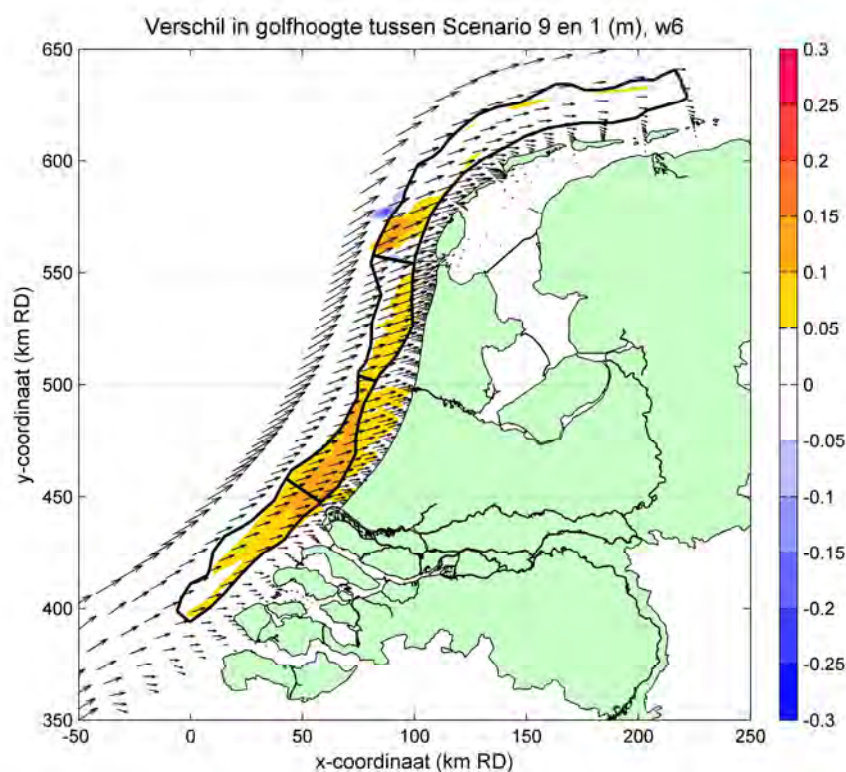
Figuur 3.9 toont het verschil in golfhoogte tussen Scenario 8 en Scenario 3. In beide gevallen is de verdieping 6 m. Het verschil is gerelateerd aan het weghalen van de versmalling van de goot ter hoogte van ongeveer Haarlem. De zandgoot in Scenario 8 loop meer parallel. Het ook uitdiepen van dit gebied resulteert in een toename in golfhoogte van 0.05-0.15 m op de betreffende locatie. Deze toename houdt verband met de toegenomen waterdiepte en de daarmee afgenomen bodemwrijving. Het effect van het parallel maken van de zandgoot is vrij lokaal. Alleen ten noordwesten ervan verandert de golfhoogte licht.



Figuur 3.9 Verschil in golfhoogte tussen Scenario 8 en Scenario 3 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 8.

3.1.6 Realistisch zandgootsscenario

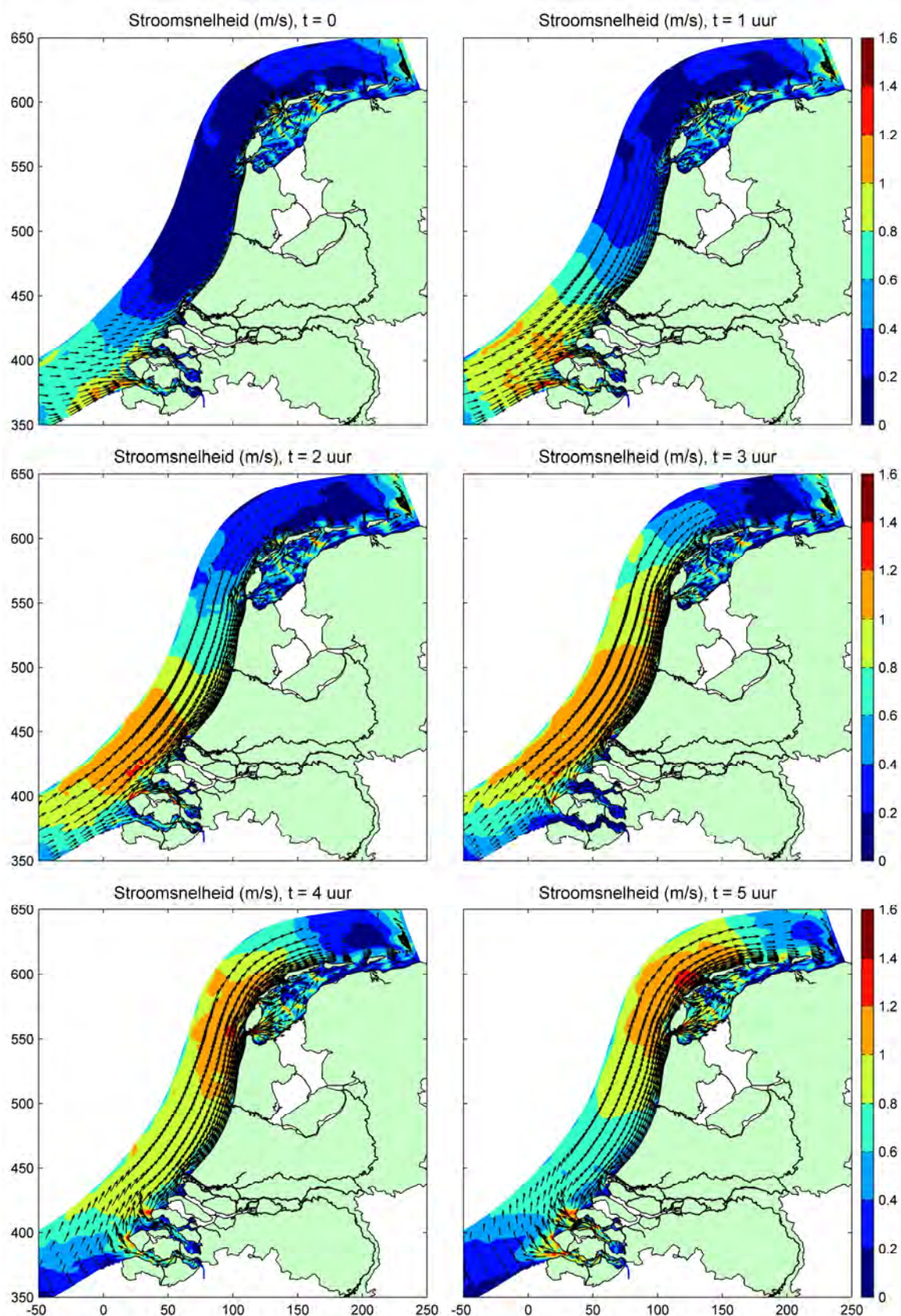
Het laatste zandgootsscenario is een meer realistisch scenario qua volume. Dit scenario is gedefinieerd door Rijkswaterstaat Dienst Noordzee. Net zoals Scenario 5, is de zandgoot in Scenario 9 “getrapt”, waarbij het Wadden gebied verdiept is met 1 m, Noord-Holland met 2 m, het Delta gebied met 3 m en Zuid-Holland met 4 m. Het totale zandvolume is met $10.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ een factor 3 lager dan Scenario 3 en Scenario 5, en van dezelfde grootte als Scenario 2 (2 m verdieping). Figuur 3.10 toont de invloed van dit meer realistische zandgootsscenario op de berekende golfhoogte. Deze figuur bevestigt de eerder gevonden effecten: de golfhoogte toename neemt toe met de mate van verdieping. Verder valt de golfhoogte toename in het westelijke gedeelte van de zandgoot ter hoogte van de Wadden op. Deze toename is toe te schrijven aan concentratie van golfenergie door golfrefractie. De toename is 0-0.15 m in de zandgoot en 0-0.1 m nabij de kust. Dit correspondeert met maximaal 8% en 5% van de lokale golfhoogte, respectievelijk.



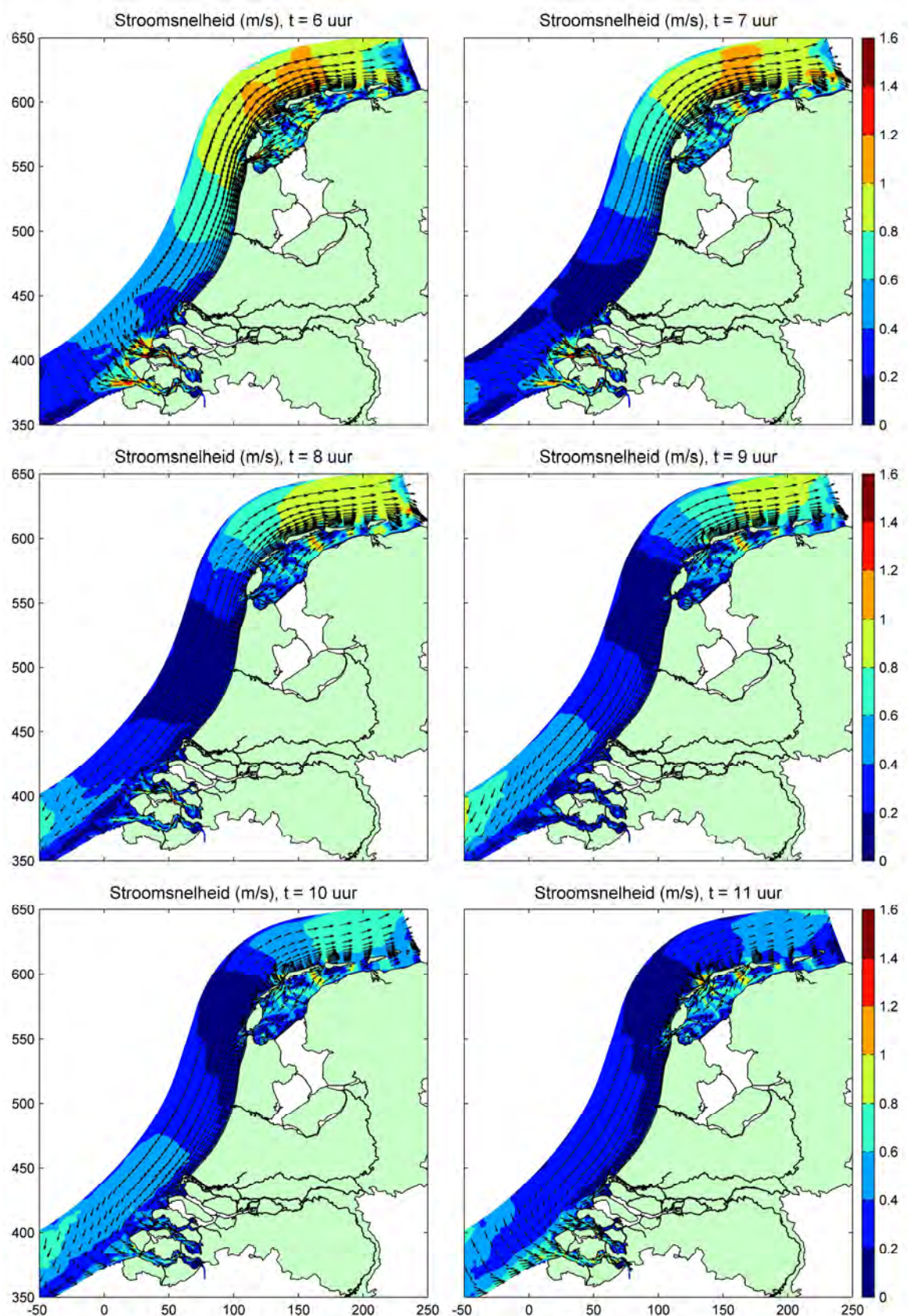
Figuur 3.10 Verskil in golfhoogte tussen Scenario 9 en Scenario 1 bij golfconditie w6. De vectoren geven de golfrichting weer voor Scenario 9.

3.2 Stroomsnelheden

Het stroombeeld gedurende 12 fases binnen het getij wordt getoond in Figuur 3.11 en Figuur 3.12. Het betreft Scenario 1 (referentie, geen zandgoot) en golfconditie w6. Deze figuren laten zien hoe de (dieptegemiddelde) stroomsnelheden variëren met het getij. De stroomsnelheden zijn maximaal 1.6 m/s groot.



Figuur 3.11 Stroombeeld gedurende de eerste serie getijfasen voor Scenario 1, golfconditie w6.



Figuur 3.12 Stroombeeld gedurende de tweede serie getijfasen voor Scenario 1, golfconditie w6.

3.2.1 Effect zandgoot

Voordat we het effect van de zandgoot op de stroomsnelheid tonen, bespreken we eerst de processen die een rol spelen. Deze beschouwing is gebaseerd op een situatie met een stationaire stroming die parallel loopt aan de as van een langwerpige verdieping (zie Roos, 2004). In dit geval vertoont de stroming het volgende gedrag:

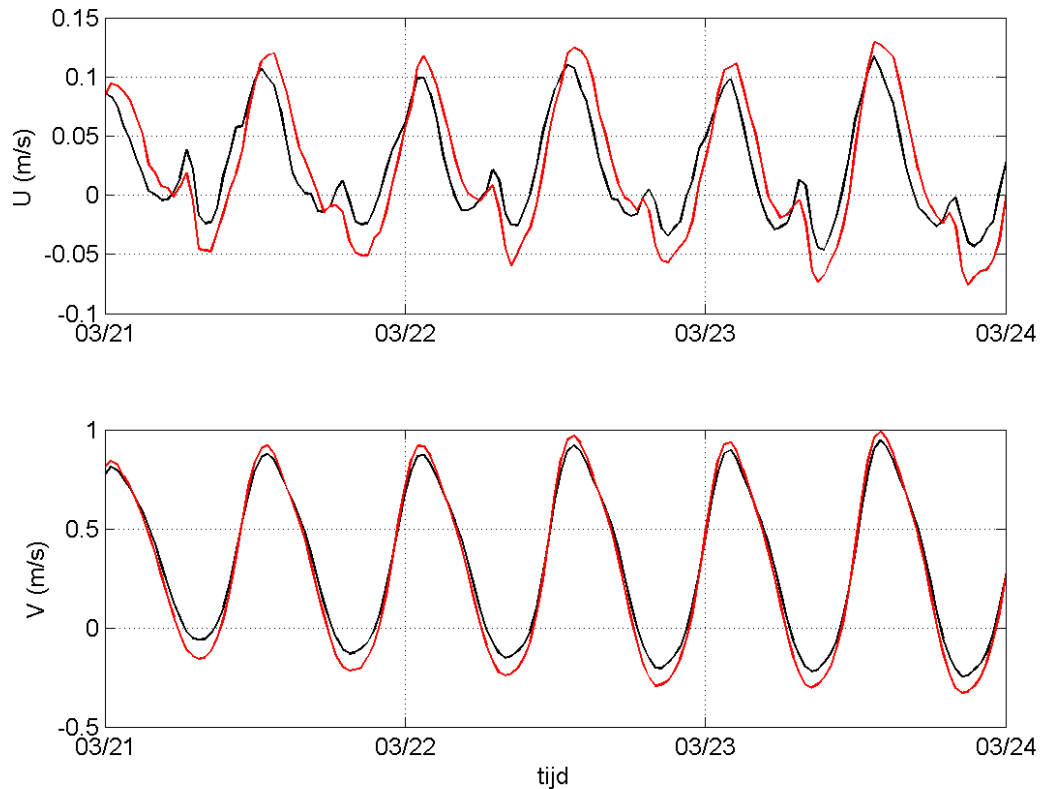
- 1 De stroming versnelt net voor het begin van de verdieping als gevolg van stromingscontractie. De stroomlijnen convergeren van buiten naar binnen aangezien het water in de verdieping sneller kan stromen door de lagere bodemwrijving.
- 2 Als de stroming de verdieping inkomt, neemt de stroomsnelheid plots af om te compenseren voor de toegenomen waterdiepte (massabehoud).
- 3 Vervolgens neemt de stroomsnelheid geleidelijk toe in de verdieping gegeven de afgenomen bodemwrijving.
- 4 Dan neemt de stroomsnelheid geleidelijk af richting het einde van de verdieping. Massabehoud zorgt bij het einde van de verdieping voor weer voor een plotselinge toename, waarna de stroomsnelheid weer geleidelijk afloopt tot de ongestoorde waarde.

In ons geval spelen hiernaast nog de volgende processen een rol:

- 5 Lokale variaties in de zandgoot, met name de versmalling. Deze versmalling zorgt voor een versnelling van de stroming ter plekke.
- 6 Traagheidseffecten. De watermassa in de zandgoot is groter waardoor deze meer traagheid bevat. Hierdoor reageert deze wat langzamer op de in de tijd variërende drukgradiënt welke de stroming aandrijft. Als de stroming op vaste getijfasen wordt vergeleken, leidt dit tot een schijnbare afname in stroomsnelheid ongeveer gedurende de periode tussen piek eb- en vloed-snelheid en een schijnbare toename ongeveer tussen piek vloed- en ebsnelheid.
- 7 Golfwerking. De verwachting is dat golven een beperkte rol spelen in het effect van de zandgoot op het stroombeeld, aangezien ter plekke van de goot de stroming gedomineerd wordt door het getij gezien de relatief grote waterdiepte.

De invloed van de zandgoot is het best zichtbaar voor Scenario 4, aangezien de verdieping het grootste is (12 m). Figuur 3.13 toont de stroomsnelheden op een locatie in de zandgoot ten noordwesten van het Eijerlandse gat. Figuur 3.14 en Figuur 3.15 laten zien hoe de magnitude van de stroomsnelheid verandert binnen het getij.

Figuur 3.13 laat zien dat de piek eb- en vloed-snelheden 0.05-0.1 m/s groter zijn als gevolg van de 12 m verdieping (zie punt 3 boven). De invloed van de zandgoot is relatief sterker gedurende de ebfase van het getij. Met name voor de snelheid in kustdwarse richting is de faseverschuiving als gevolg van traagheidseffecten goed zichtbaar (zie punt 6 hierboven).

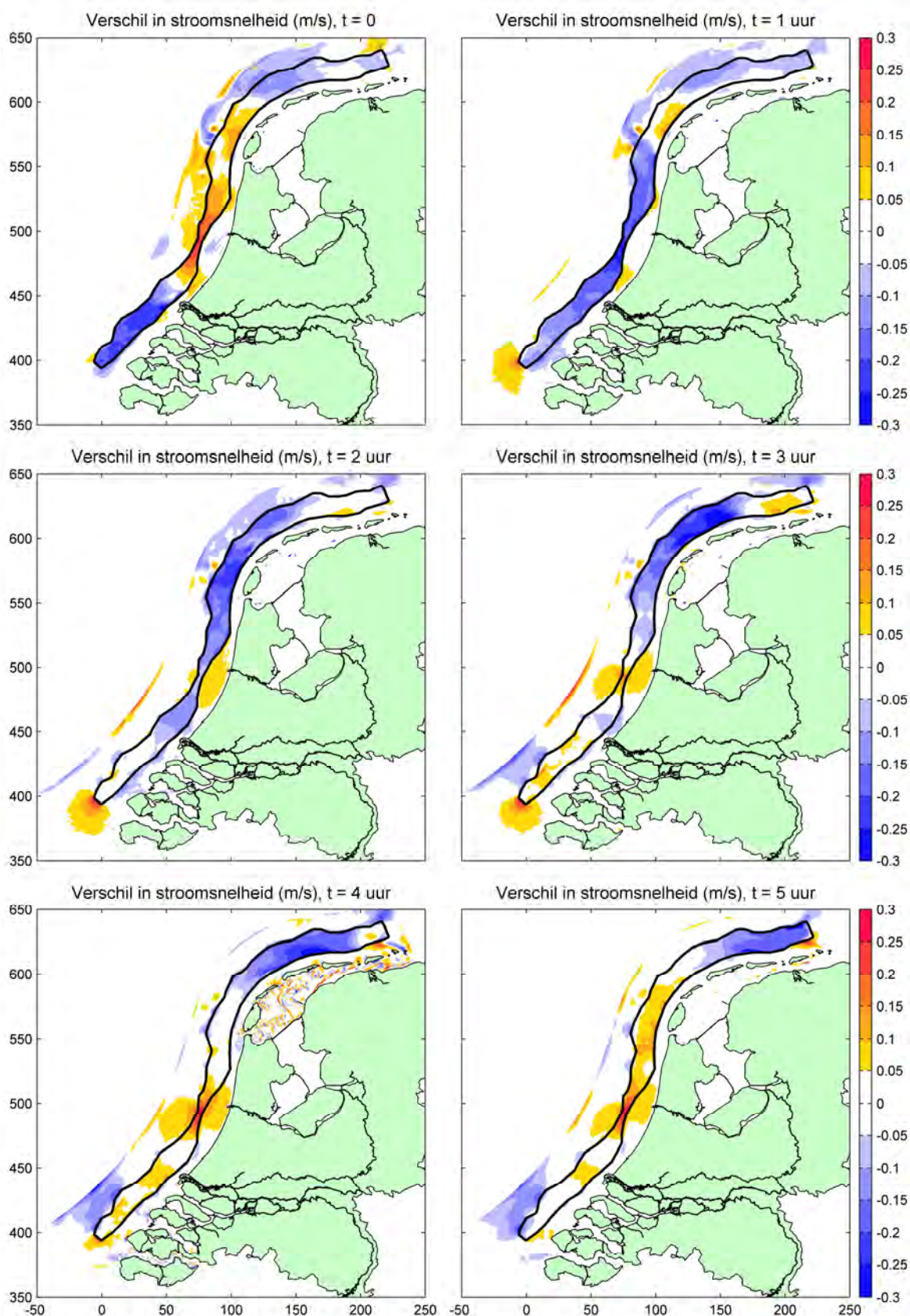


Figuur 3.13 *Stroomsnelheid in kustdwarse richting (U) en kustlangse richting (V) op een locatie in de zandgoot ten noordwesten van het Eijerlandse gat. Zwarte lijnen: Scenario 1 (geen zandgoot), rode lijnen: Scenario 4 (12 m diepe zandgoot).*

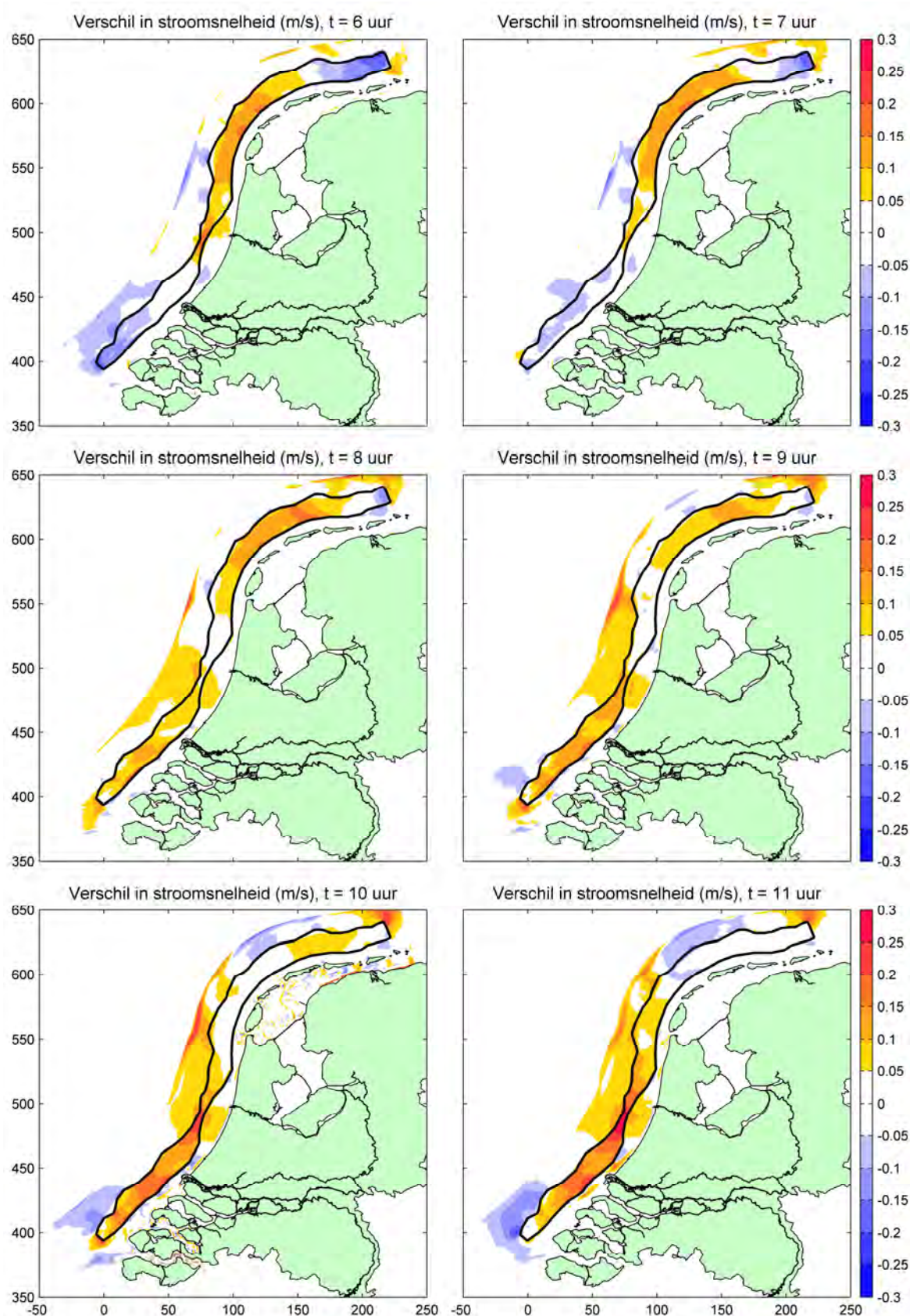
De belangrijkste observaties uit Figuur 3.14 en Figuur 3.15 zijn:

- De toe- en afnames in de stroomsnelheid zijn maximaal 0.3 m/s oftewel bijna 20% van de maximale waarden. Bij de kust zijn de veranderingen aanzienlijk minder; 0.0-0.1 m/s.
- De variaties langs de zeewaartse modelrand zijn niet fysisch maar modelartefacten.
- De toename in stroomsnelheid vlak voor het binnenstromen van de zandgoot is duidelijk zichtbaar op $t = 1, 2$ en 3 uur in het zuidwesten en $t = 8, 9$ en 10 uur in het noordoosten.
- Gedurende een groot gedeelte van de getijperiode versnelt de stroming bij de versmalling van de zandgoot. De lokale snelheidstoename is maximaal 0.2-0.3 m/s. Deze toename is niet zichtbaar op $t = 1$ en 2 uur, omdat dan de snelheid ter plekke minimaal is (zie Figuur 3.11).
- Afhankelijk van het getij, nemen de snelheden schijnbaar toe dan wel af in de goot vanwege de faseverschuiving door traagheidseffecten (zie punt 6 hierboven).
- Over het algemeen zijn de snelheden in de verdieping toegenomen als gevolg van de afgenomen bodemwrijving (zie punt 3 boven). De figuren bevatten meer “geel” dan “blauw” in de verdieping.

Scenario's 2 en 3 tonen kwalitatief hetzelfde beeld, maar de invloed van de zandgoot is beperkter omdat deze minder diep is. Het stroombeeld berekend voor deze scenario's is terug te vinden in Bijlage A. Deze bijlage bevat ook het stroombeeld voor het getrapte zandgoot scenario, Scenario 5, en het realistische zandgoot scenario, Scenario 9.



Figuur 3.14 Verschil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 4 en Scenario 1 gedurende de eerste serie getijfases, golfconditie w6.



Figuur 3.15 Verschil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 4 en Scenario 1 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.

3.2.2 Effect aangepaste randvoorwaarden

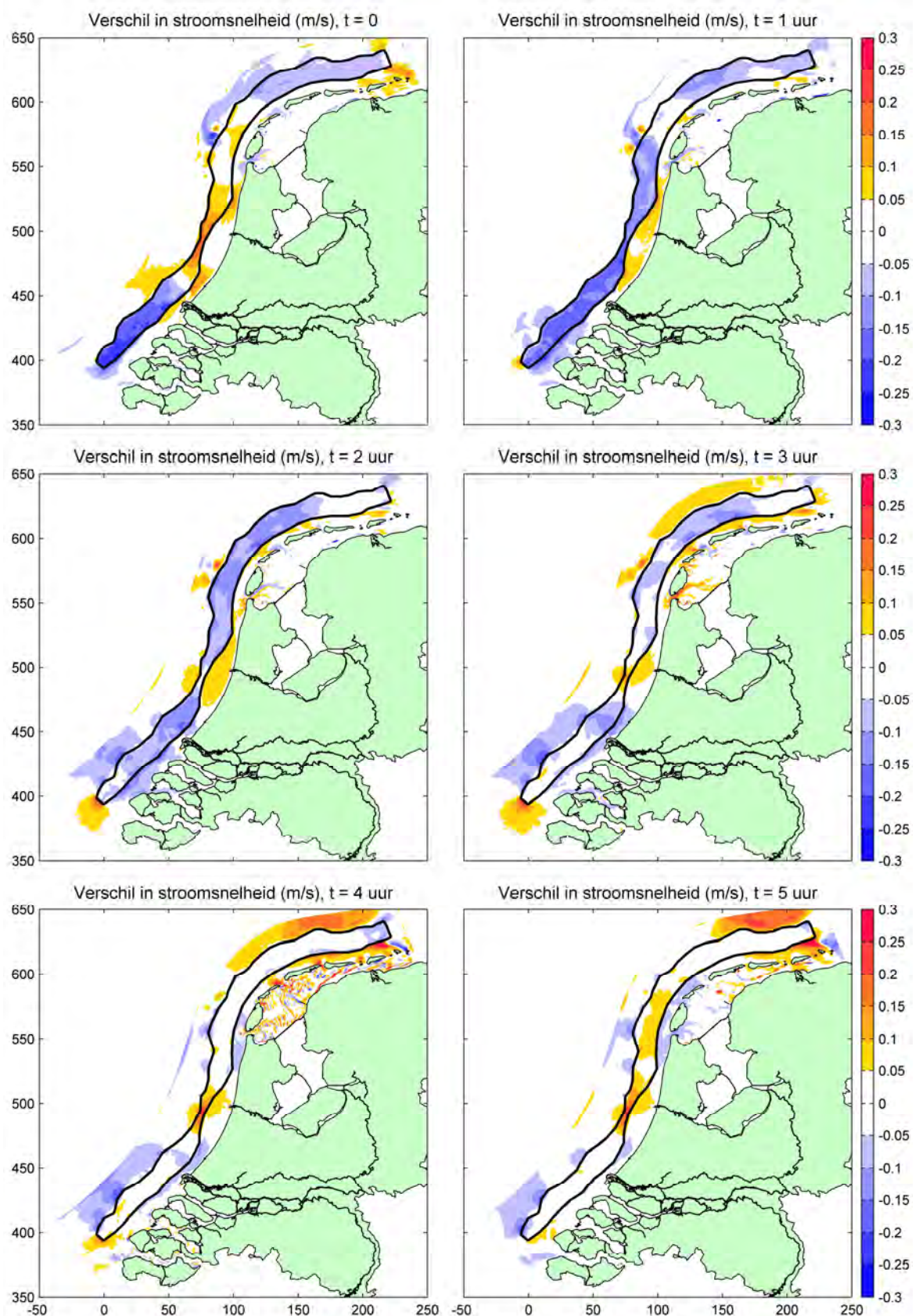
Figuur 3.16 en Figuur 3.17 tonen het verschil in de magnitudes van de stroomsnelheden gedurende het getij tussen Scenario 4b en Scenario 1. De zandgoot in Scenario 4b is 12 m diep langs de gehele Nederlandse kust. De zandgootafmetingen zijn gelijk aan die van Scenario 4. Het verschil zit in de randvoorwaarden. De piek eb- en vloednelheden zijn ca. 10% hoger voor Scenario 4b aan de noordoostelijke rand (zie ook paragraaf 2.2.1). De verschillen in de randvoorwaarden zijn maximaal bij de pieksnelheden en vlakken af bij lagere stroomsnelheden. Als we deze figuren vergelijken met de resultaten voor Scenario 4 (Figuur 3.14 en Figuur 3.15), valt de grote kwalitatieve gelijkenis op. De grootste onderlinge verschillen zijn zichtbaar bij de noordoostelijke rand, het Waddengebied. Hier zijn de snelheden voor Scenario 4b 0.1-0.2 m/s hoger dan Scenario 4 bij opkomend getij ($t = 2$ t/m 6 uur) en 0.05-0.15 m/s lager bij afgaand getij ($t = 8$ t/m 11 uur).

3.2.3 Effect zanddammen

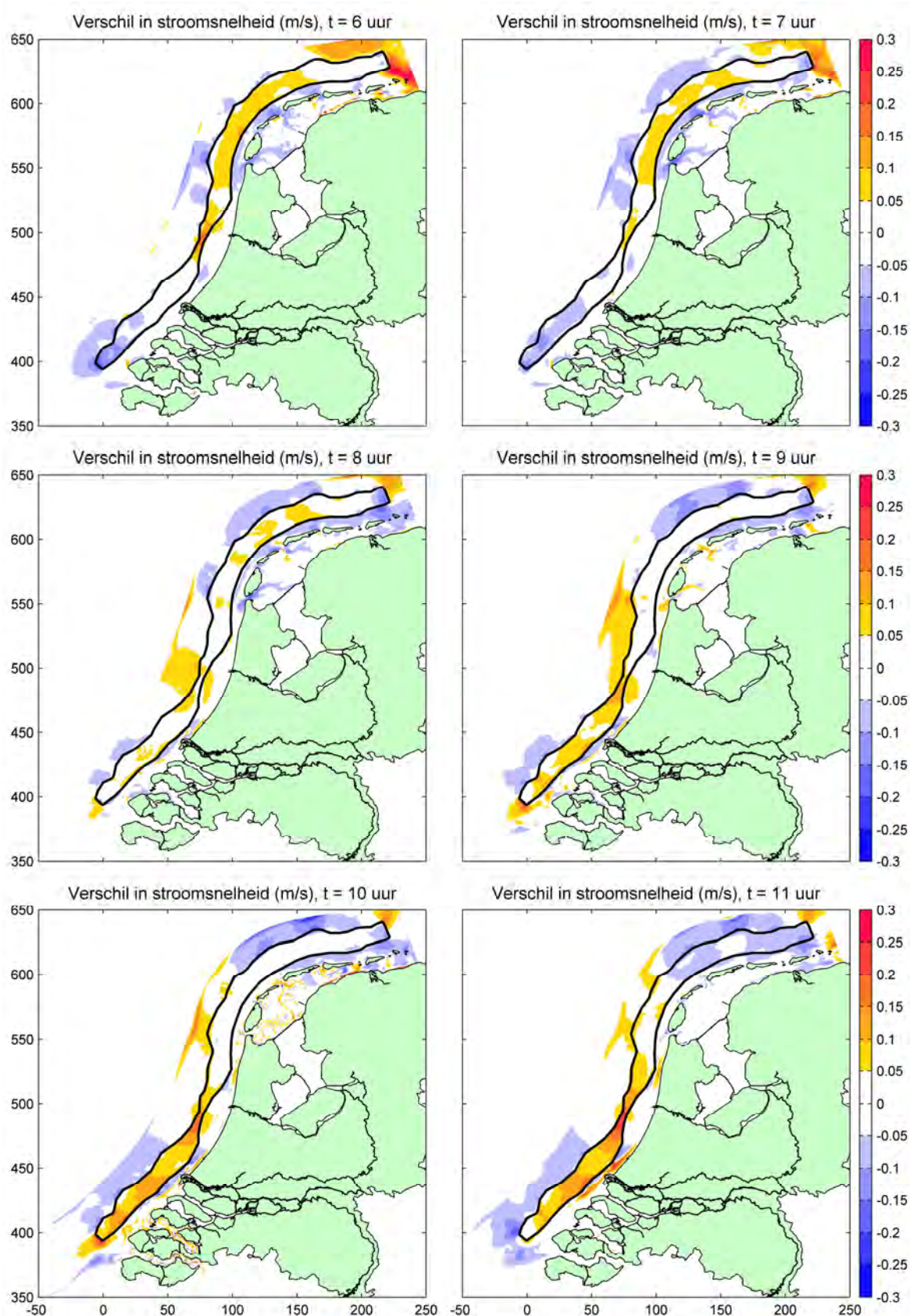
Het effect van de zanddammen wordt zichtbaar als we Scenario 7 en Scenario 5 met elkaar vergelijken. Figuur 3.18 en Figuur 3.19 tonen de verschillen. Het betreft het scenario met 3 zanddammen. De effecten op het stroombeeld voor Scenario 6 met 1 zanddam zijn vergelijkbaar, zie Bijlage A.4. Uit deze figuur blijkt dat de stroomsnelheid ter plekke van de zanddammen toeneemt met maximaal 0.25 m/s als gevolg van massabehoud. De zanddammen hebben een lengte van 10 km. Dit is blijkbaar te kort voor het effect van toegenomen bodemwrijving om te resulteren in een afname in stroomsnelheden. Ten westen en ten oosten van de zanddammen nemen de stroomsnelheden over het algemeen ook toe, wat komt door convergentie van stroomlijnen. Het water “wil” enigszins om de blokkade heen stromen. Vanwege hetzelfde proces neemt de stroomsnelheid zowel boven- als benedenstrooms van de zanddammen af. De stroomlijnen divergeren hier immers. De afname van stroomsnelheid stroomafwaarts houdt ook verband met het verlies aan impuls door de toegenomen bodemwrijving ter plekke van de zanddammen. De invloed van de zanddammen op de stroming is dus vrij sterk, maar ook vrij lokaal.

3.2.4 Effect weghalen versmalling zandgoot

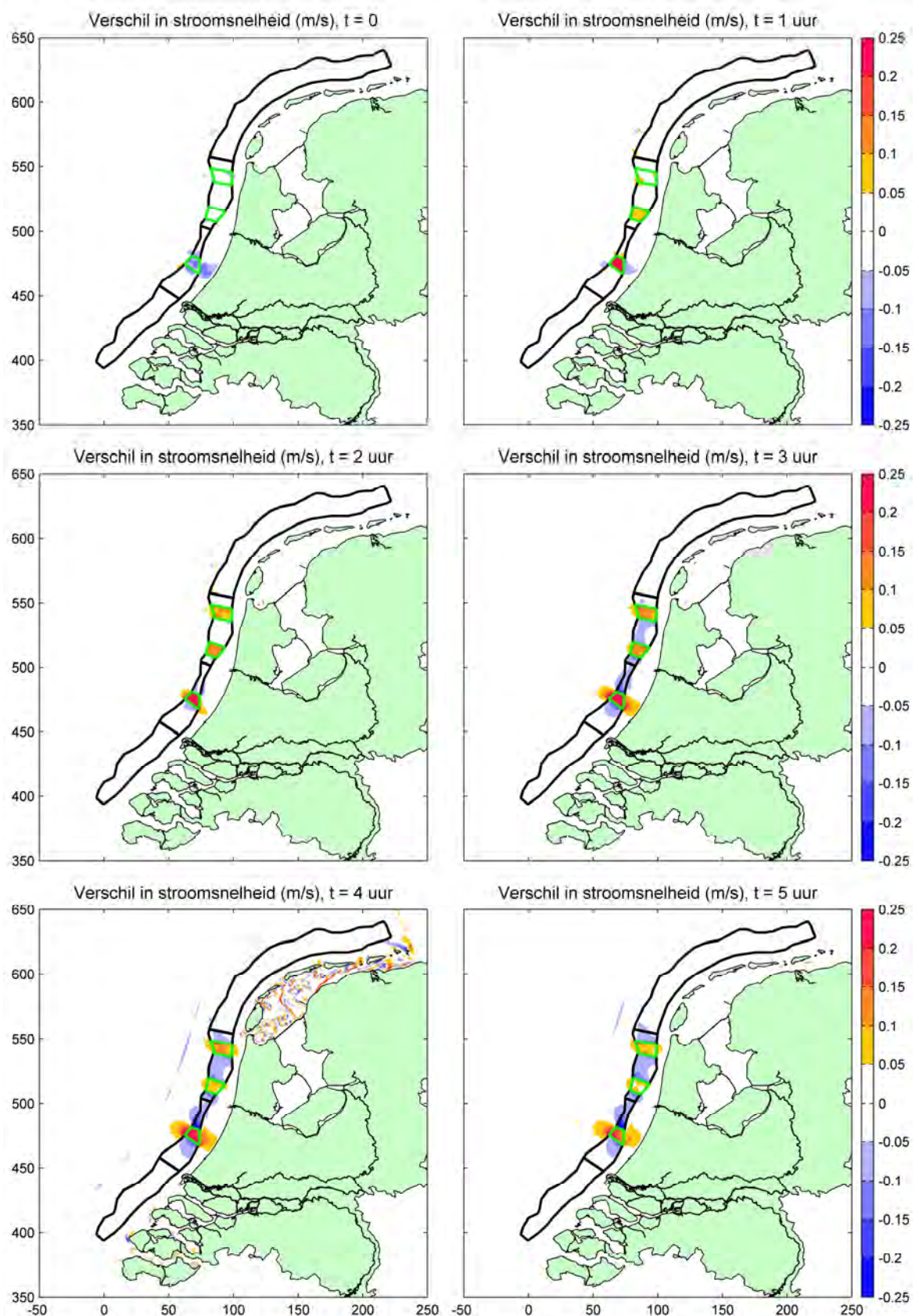
Het verschil tussen het stroombeeld voor Scenario 8 en Scenario 3 geeft het effect van het weghalen van de versmalling in de zandgoot weer, zie Figuur 3.20 en Figuur 3.21. Het effect van deze versmalling, waardoor de zandgoot meer parallel loopt, is lokaal. Ter plekke van de oorspronkelijke versmalling neemt de stroomsnelheid af (goed zichtbaar op $t = 3 - 5$ uur) aangezien de stromingscontractie minder is. Ter plekke van de oorspronkelijke “bui” vertoont de stroming hetzelfde gedrag als in de goot. Dit resulteert in een snelheidsafname op $t = 1$ en 2 uur (zie ook Figuur A.5) en een toename op $t = 10$ en 11 uur (zie ook Figuur A.6).



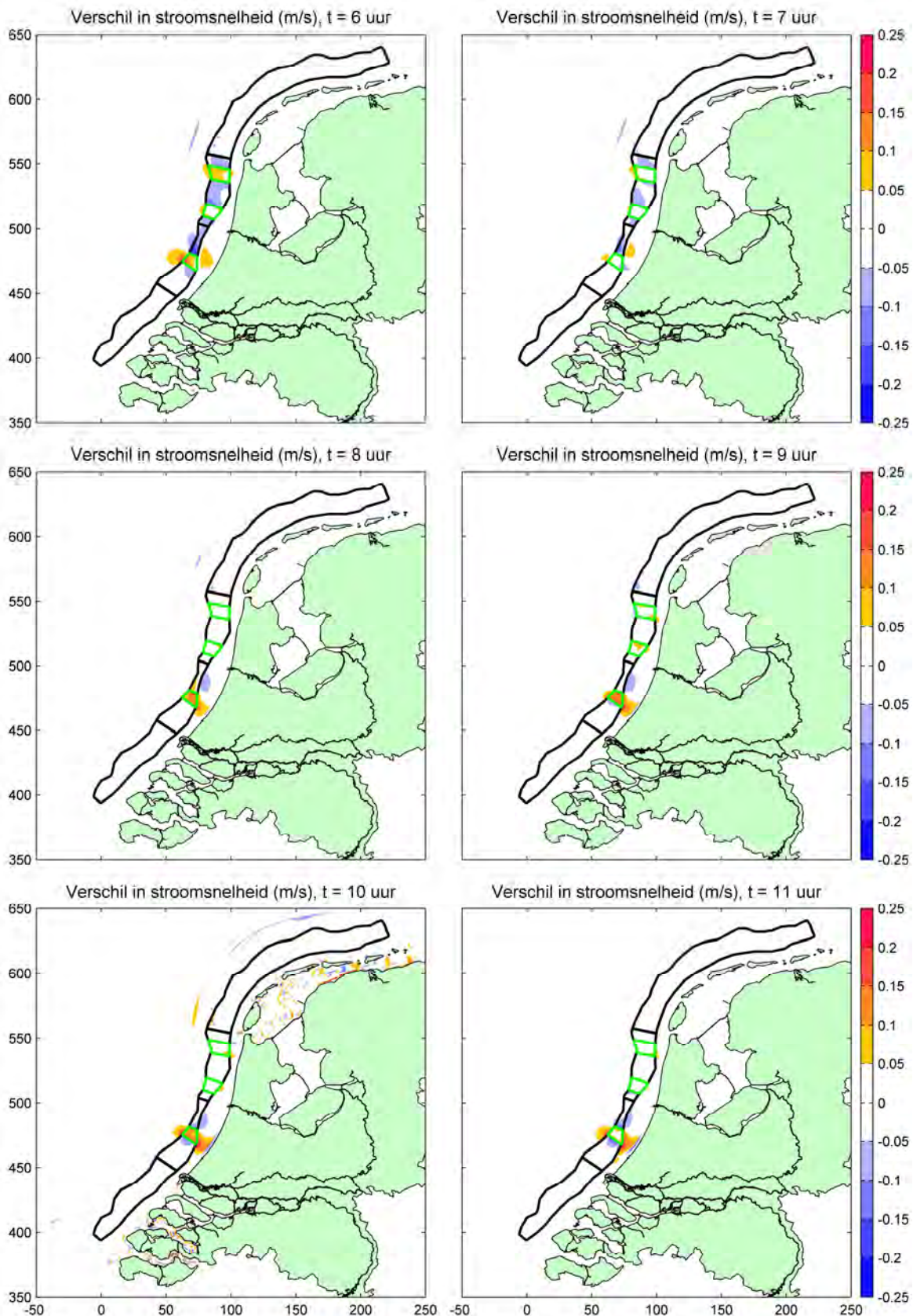
Figuur 3.16 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 4b en Scenario 1 gedurende de eerste serie getijfases, golfconditie w6.



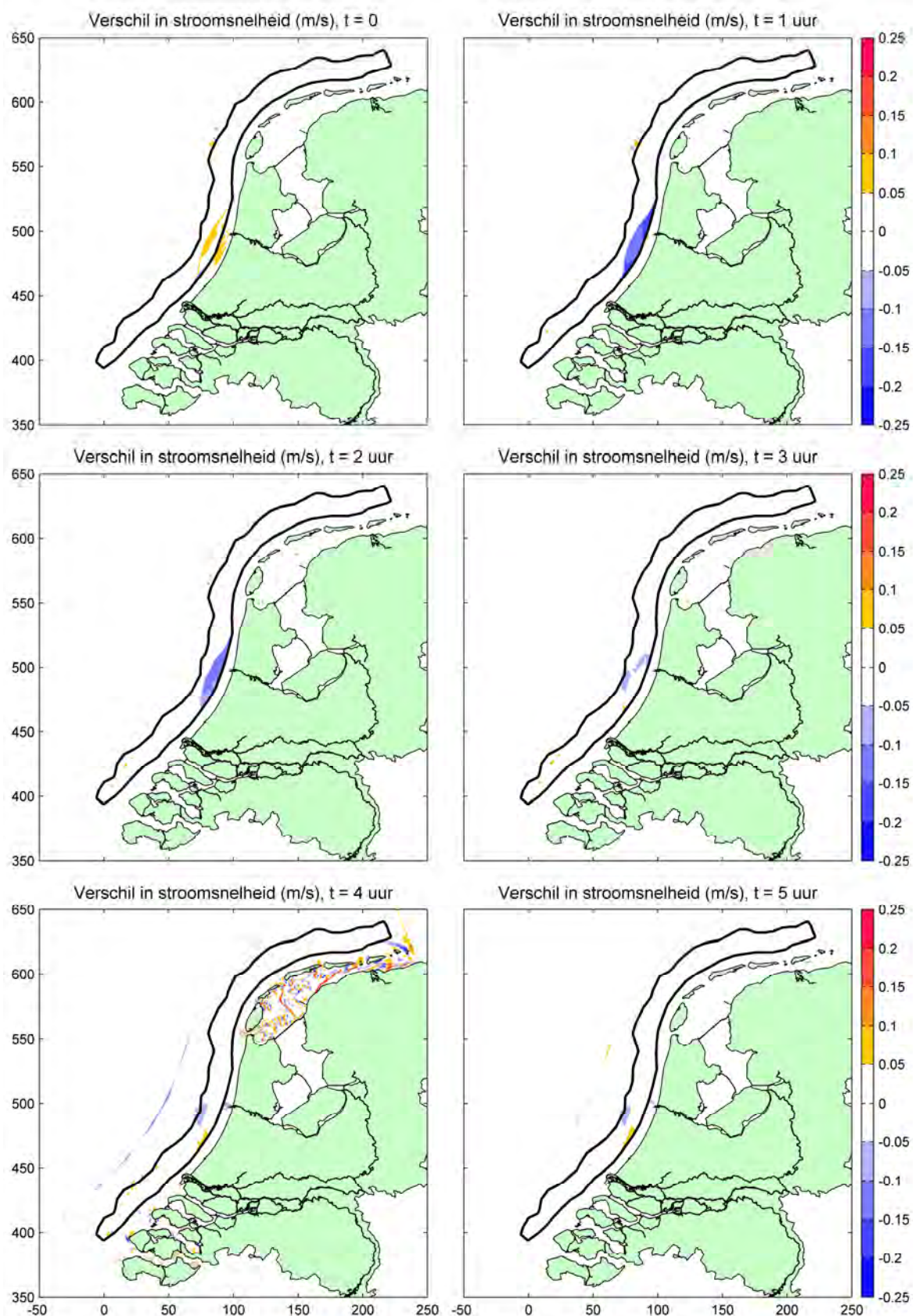
Figuur 3.17 Verschil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 4 en Scenario 1 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.



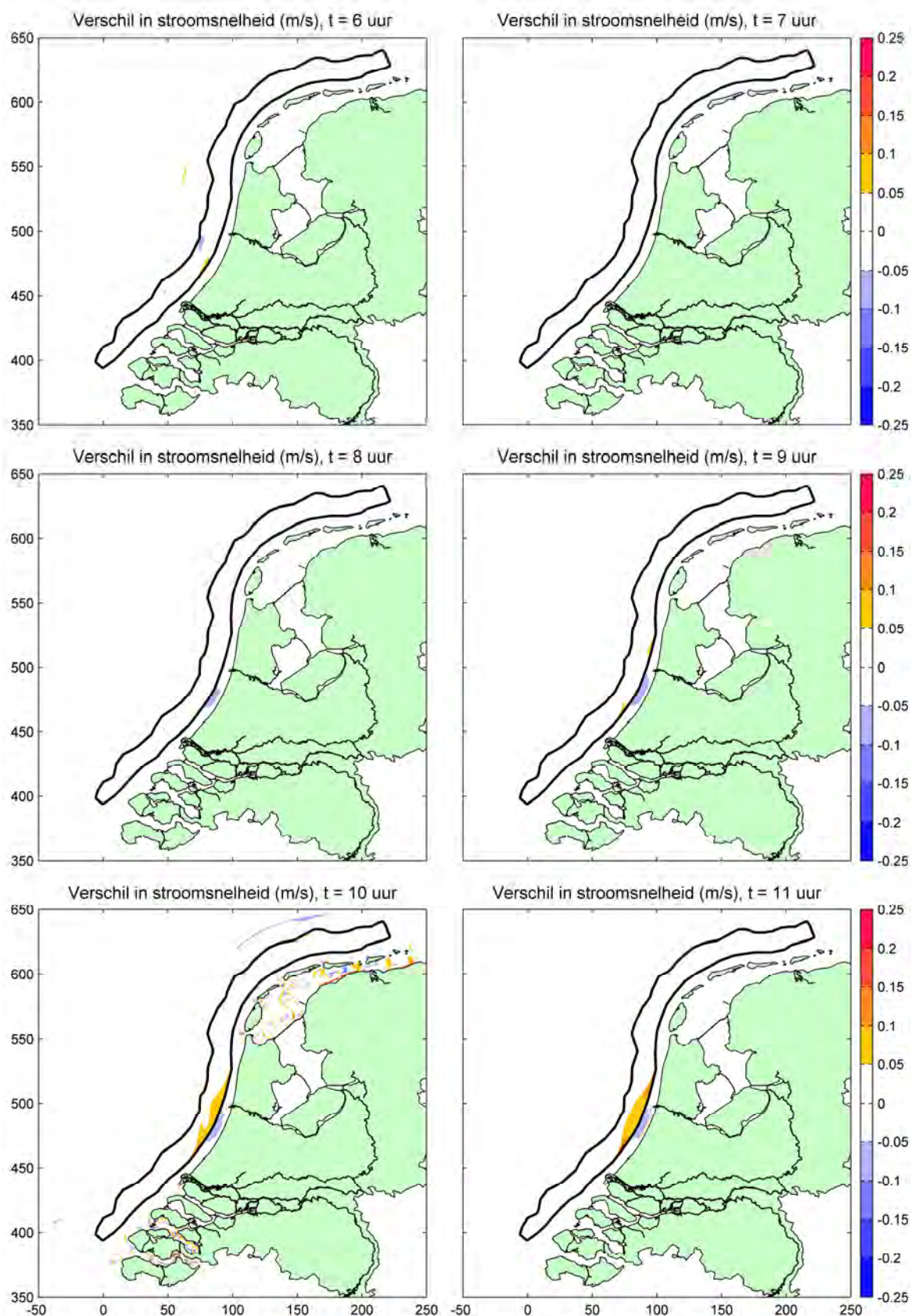
Figuur 3.18 Verskil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 7 en Scenario 5 gedurende de eerste serie getijfases, golfconditie w6.



Figuur 3.19 Verschil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 7 en Scenario 5 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.



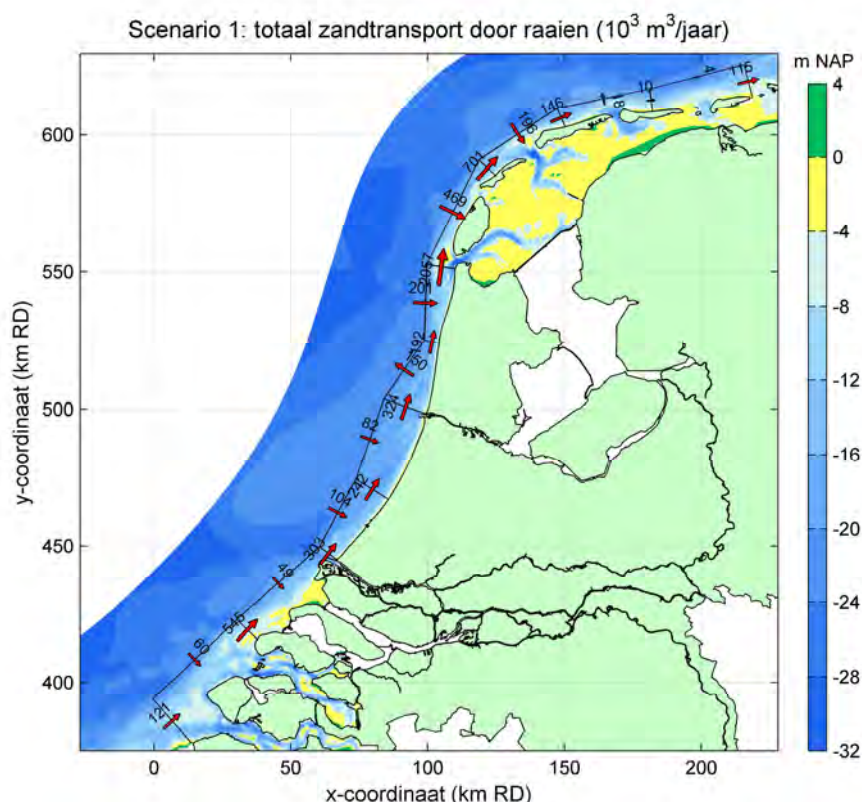
Figuur 3.20 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 8 en Scenario 3 gedurende de eerste serie getijfasen, golfconditie w6.



Figuur 3.21 Verschil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 7 en Scenario 5 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.

3.3 Zandtransporten

Figuur 3.22 toont de (berekende) netto jaarlijkse zandtransporten (exclusief poriën) door 11 raaien dwars op de kust en 10 raaien parallel aan de kust voor de referentiesituatie, Scenario 1. De dwarsraaien lopen van de -20 tot de +3 m diepte contourlijn. De langsraaien lopen ongeveer langs de -20 m diepte contourlijn. Door deze raaien worden 10 kustvakken omsloten: Delta (D) zuid en noord, Zuid-Holland (ZH) zuid en noord, Noord-Holland (NH) zuid en noord, Texel-Vlieland, Vlieland-Terschelling, Terschelling-Ameland en Ameland-Schiermonnikoog.



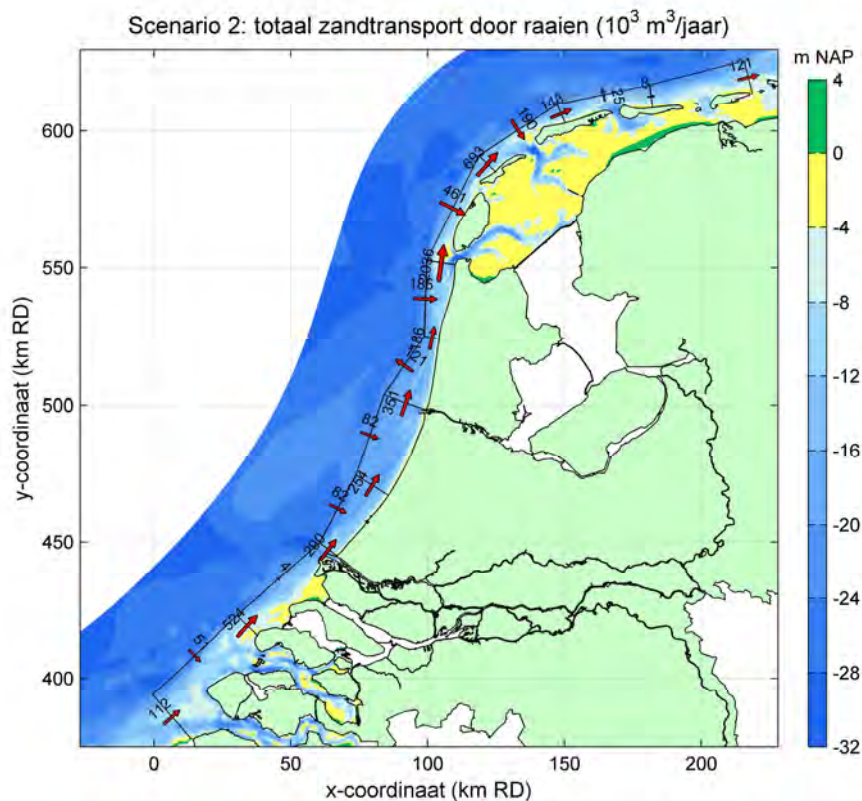
Figuur 3.22 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 1.

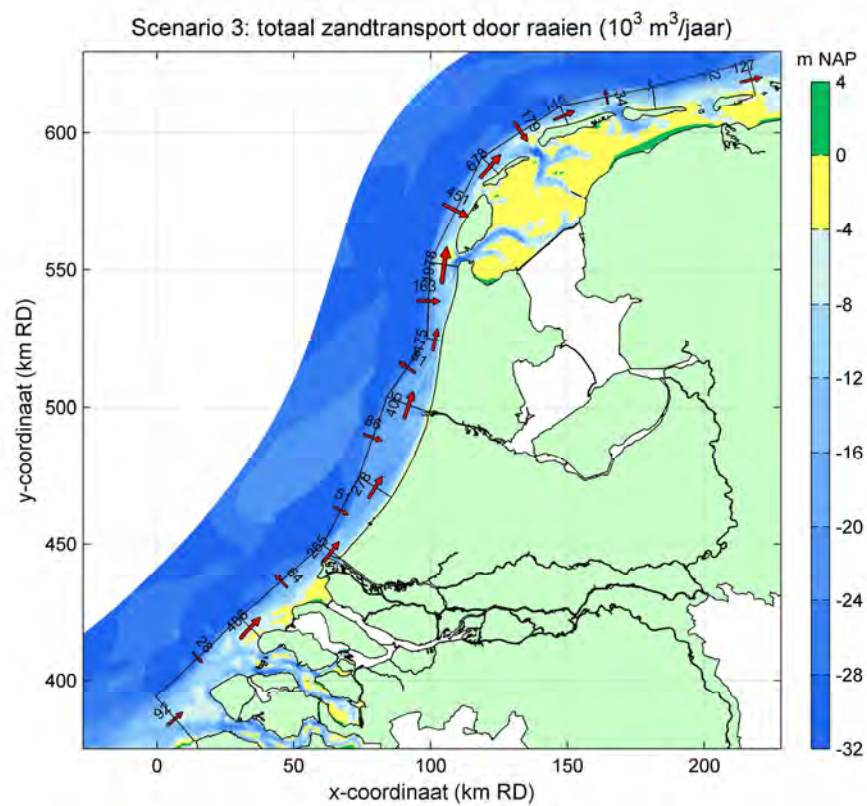
Deze figuur toont dat de zandtransporten door de dwarsraaien noord-/noordoostelijk gericht zijn en dat deze veelal groter zijn dan de zandtransporten door de langsraaien, welke over het algemeen naar de kust toe gericht zijn (hierbij dient wel rekening gehouden te worden met de lengte van de raaien). Onderstaande analyse richt zich op het effect van de diepte van de zandgoot, de aanwezigheid van zanddammen en het weghalen van de versmalling in de zandgoot. Het effect van de aanpassing van de randvoorwaarden is gering. De zandtransporten voor dit scenario, Scenario 4b, alsmede voor het realistische scenario zijn te vinden in de Bijlagen B.1 en B.2, respectievelijk.

3.3.1 Effect diepte zandgoot

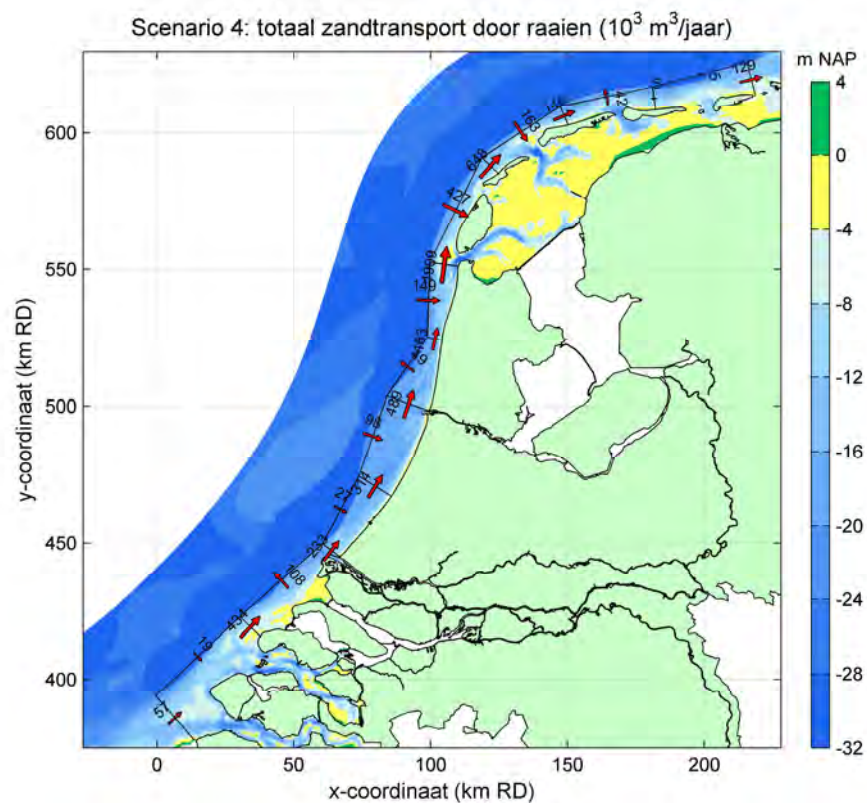
Figuur 3.23 t/m Figuur 3.25 tonen de jaarlijkse zandtransporten zoals berekend voor Scenario's 2 t/m 4. Het effect van de diepte van de zandgoot op de geïntegreerde zandtransporten kan worden afgeleid door deze figuren te vergelijken met de referentiesituatie, Figuur 3.22. Het grootste effect van de zandgoot is zichtbaar voor de vakken D-noord, ZH-zuid, ZH-noord en NH-zuid. Het betreft dan met name de zandtransporten door de langsraaien. De door de versmalling gegenereerde

stromingscontractie zorgt voor minder kustwaarts transport bij de vakken ten zuiden van de versmalling (D-noord en ZH-zuid) en minder zeewaarts transport bij de vakken ten noorden van de versmalling (NH-zuid). Dit effect neemt toe met de diepte van de zandgoot. Voor de 12 m diepe zandgoot, Scenario 4, neemt het kustwaarts transport in het vak ZH-zuid af van 104 naar $27 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (-74%) en het noordwaartse transport door de bovenrand toe van 242 naar $314 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (+30%). Het zeewaartse transport in het vak NH-zuid neemt juist toe met 67%. Hiernaast tonen de berekende zandtransporten op andere locaties kleine verschillen (10-20%) als gevolg van veranderingen in golven en stroming.





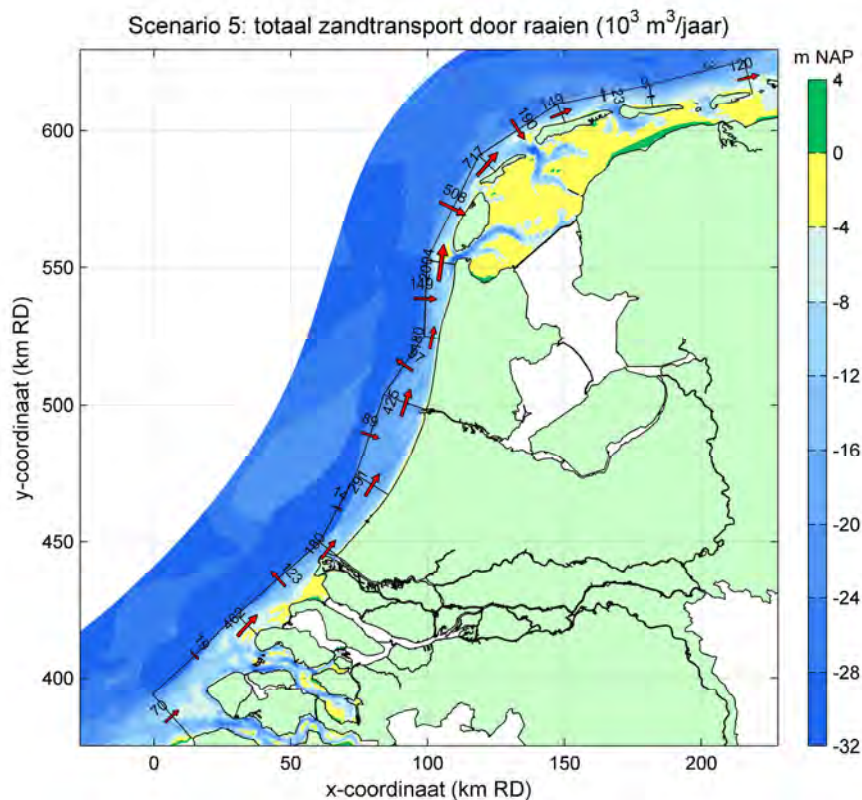
Figuur 3.24 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 3.



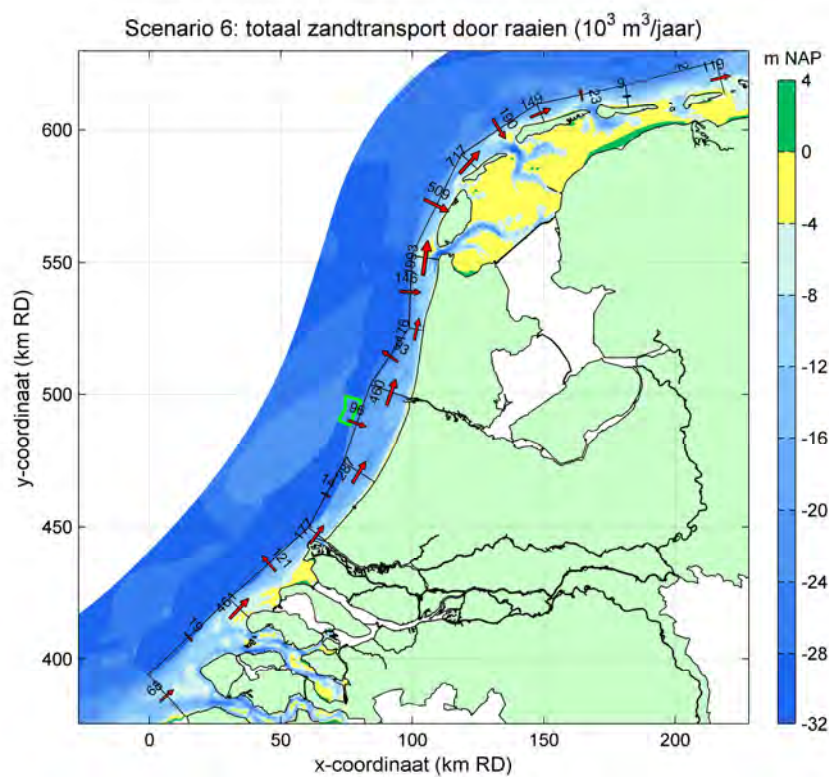
Figuur 3.25 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 4.

3.3.2 Effect zanddammen

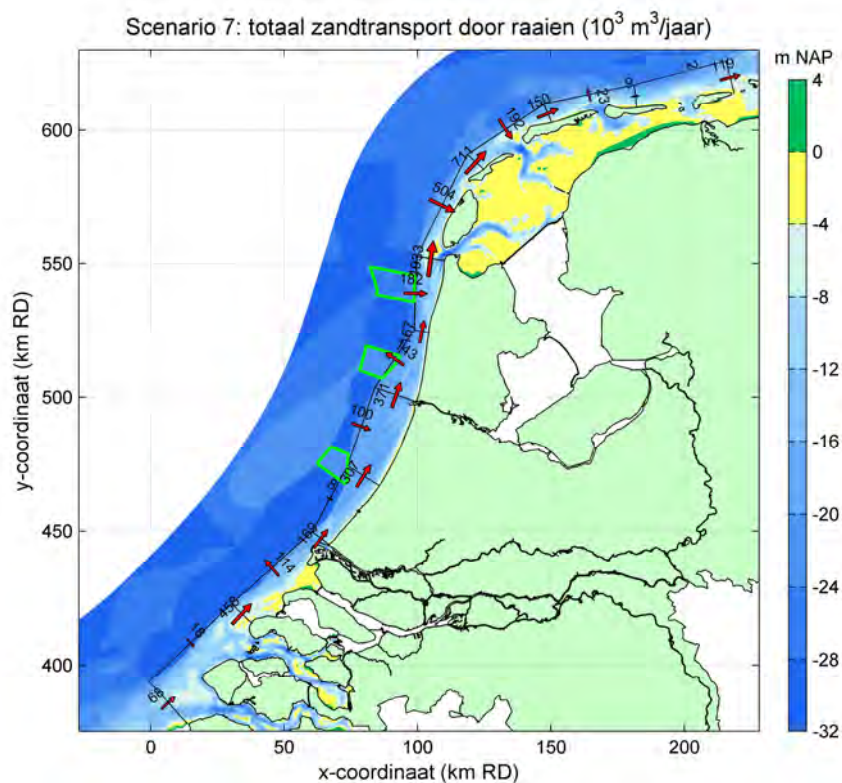
Onderstaande figuren tonen het effect van de aanleg van zanddammen op de geïntegreerde zandtransporten. Hieruit blijkt dat de invloed van de zanddammen op de zandtransporten lokaal is, wat in overeenstemming is met het gevonden effect op de golven en de waterbeweging. Alleen de zandtransporten in de vakken in de nabijheid van de zanddammen worden beïnvloed. De zanddammen resulteren in een toename van het kustwaartse transport, als gevolg van de stroomlijnen die om de zanddammen heen buigen. Een uitzondering hierop vormt de dam bij Castricum, de tweede van de drie. Het zeewaartse transport van het vak NH-zuid neemt hier toe van 93 naar $143 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$.



Figuur 3.26 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 5.



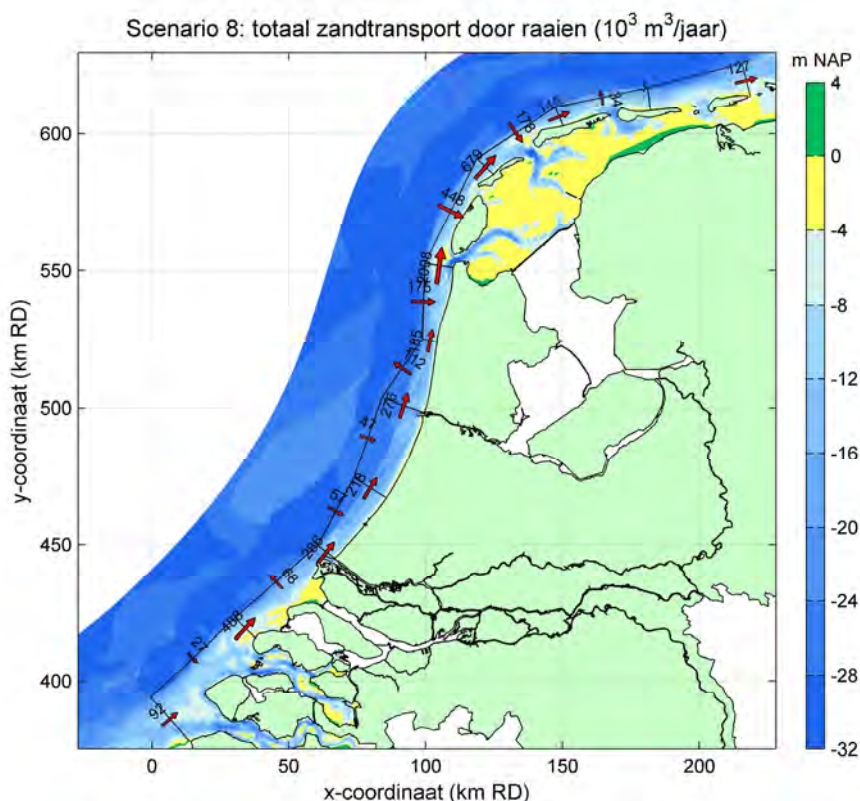
Figuur 3.27 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 6. De groene polygoon geeft de locatie van de zanddam weer.



Figuur 3.28 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 7. De groene polygonen geven de locaties van de zanddammen weer.

3.3.3 Effect weghalen versmalling zandgoot

De zandtransporten voor het zandgootscenario zonder versmalling worden getoond in Figuur 3.29. De verschillen met het scenario met de versmalling (Scenario 3, zie Figuur 3.24) worden vooral zichtbaar in de zandtransporten door de langsraaien nabij de versmalling, i.e. de kustvakken ZH-zuid, ZH-noord en NH-zuid. Het weghalen van de versmalling resulteert in meer kustwaarts transport ten zuiden ervan, aangezien de aanzuigende werking van de versmalling in de zandgoot verminderd is. Ten noorden, NH-noord, resulteert het wegnemen van de versmalling juist in een toename (van 81 naar $112 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) van het zeewaartse transport, omdat de door de versmalling gegenereerde divergentie van stroomlijnen ontbreekt. De zandtransporten in de overige vakken worden nauwelijks beïnvloed.



Figuur 3.29 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 8 (zonder "buik").

3.4 Doorvertaling naar morfologie

In voorgaande paragrafen is de invloed van de zandgoot op de golfwerking, stroomsnelheden en zandtransporten besproken. Aangezien de zeebodem drager is van vele functies, is het ook erg belangrijk te bestuderen hoe een eventuele zandgoot deze beïnvloedt. In de zandgoot simulaties is de bodem "vastgehouden"; de bodem is niet ge-update op basis van de optredende divergenties in zandtransporten. Daarom zullen we het effect van de zandgoot op de morfologie op een indirecte wijze bepalen op basis van de berekende golfhoogtes en zandtransporten.

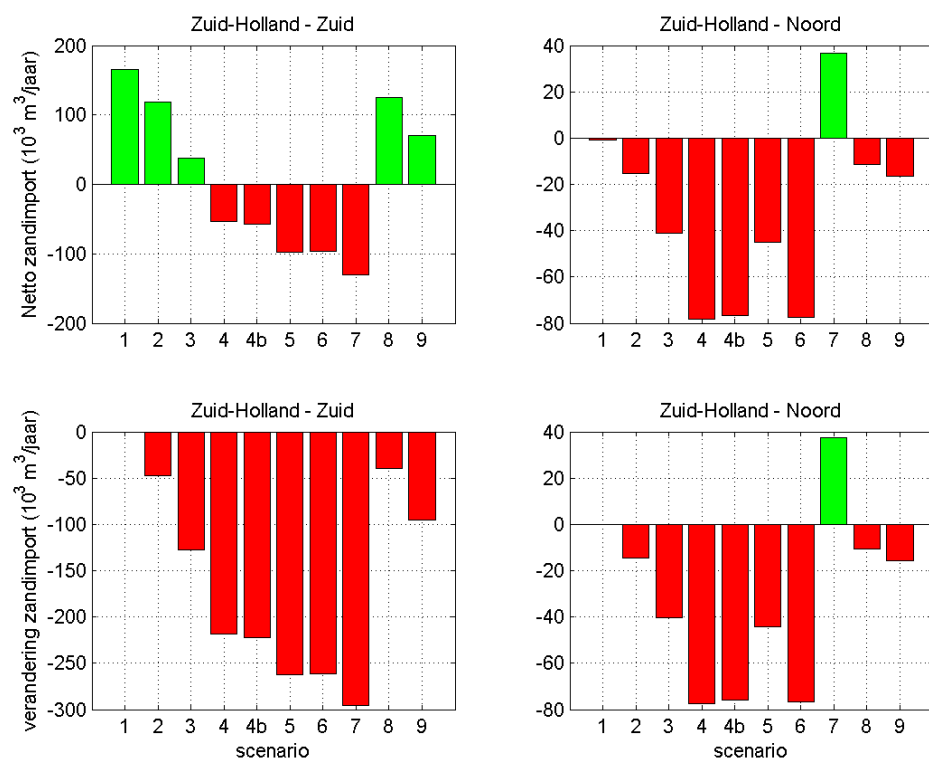
We bestuderen hierbij twee parameters: het zandvolume in het kustfundament en de duinerosie die optreedt bij een maatgevende stormconditie. Dit zijn beleids- en beheersparameters met betrekking tot de kustveiligheid (Leidraad Zandige Kust, 2002). Het kustfundament is het gebied dat van belang is voor de bescherming van het laaggelegen deel van Nederland tegen overstroming en omvat landwaarts zowel duinen als zeedijken. De

zeewaartse grens bestaat uit de doorgaande NAP -20 m lijn. Het volume is van belang voor de lange termijn veiligheid. Het idee is dat als het kustfundament voldoende zand bevat, de kust kan meegroeien met de zeespiegelstijging. Voor de momentane veiligheid is het van belang dat de duinen (en zeedijken) de maatgevende stormconditie kunnen weerstaan. Wij drukken het effect van de zandgoot op deze momentane veiligheid uit in de duinerosie die optreedt bij een maatgevende stormconditie (zie paragraaf 2.2.2).

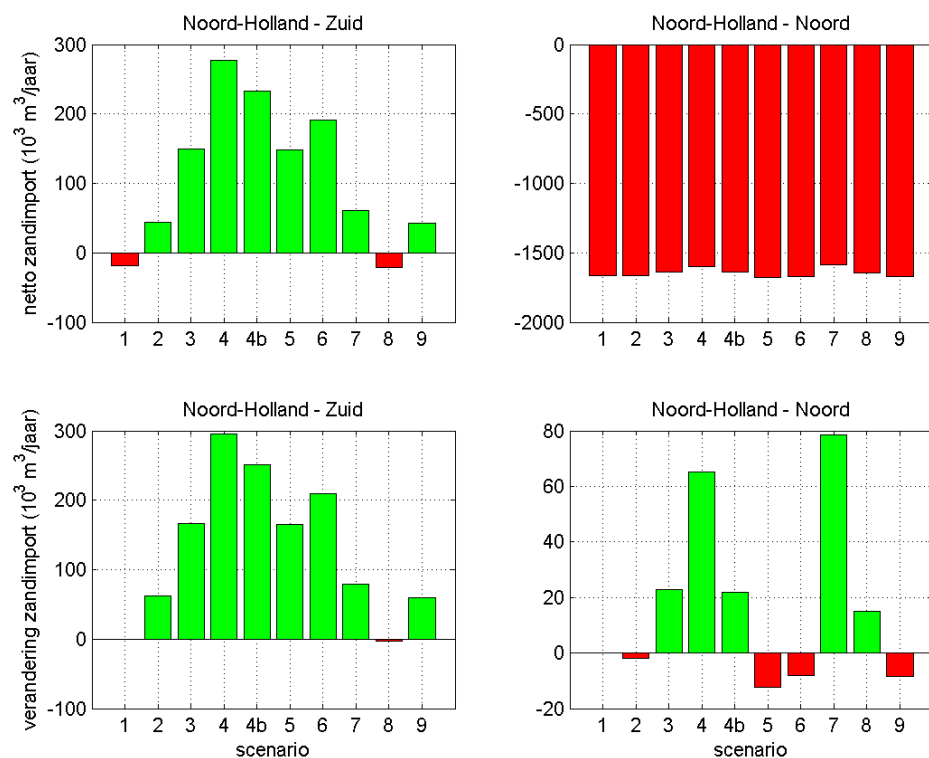
3.4.1 Zandvolume kustfundament

Per kustvak hebben we de netto zandimport bepaald door het sommeren van de ingaande en uitgaande zandtransporten. De resultaten worden voor de kustvakken in Zuid-Holland en Noord-Holland getoond in Figuur 3.30 en Figuur 3.31. Het effect van de zandgoot is hier het grootste. De netto zandimport voor de andere kustvakken is terug te vinden in Bijlage C. De figuren tonen zowel de netto zandimport in m³/jaar als ook de verandering ten opzichte van de referentiesituatie. Rode balken zijn een indicatie van zandexport en minder zandimport cq. meer zandexport. Het is belangrijk te realiseren dat onderstaande analyse alleen inzicht geeft in de (mogelijke) initiële verandering van het zandvolume in de gedefinieerde vakken. Er wordt geen rekening gehouden met de terugkoppeling van morfologische verandering op de golfwerking, waterbeweging en zandtransporten. Alleen met behulp van morfodynamische simulaties kan hier inzicht in worden verschaft. Onderstaande figuren zijn dan ook enkel en alleen een aanwijzing tot kwalitatieve veranderingen in het kustfundament welke optreedt als gevolg van het aanleggen van een verdieping langs de gehele Nederlandse kust. De getoonde resultaten zijn ook afhankelijk van de gekozen controlevakken.

De zandgoot resulteert in minder zandimport/meer zandexport in de vakken ZH-noord en ZH-zuid en meer zandimport/minder export in NH-zuid. Dit is het gevolg van stromingscontractie bij de versmalling van de zandgoot waardoor water en hiermee sediment de versmalling instroomt ten zuiden ervan en de versmalling uitstroomt (richting kust) ten noorden hiervan. Dit effect neemt toe met de diepte van de zandgoot (vergelijk Scenario's 2-4). Het weghalen van de versmalling (Scenario 8) leidt dan ook een sterke vermindering van dit effect; de verschillen tussen de zandtransporten voor Scenario's 8 en 1 zijn miniem. De aanleg van een zanddam in de goot ter plekke van de versmalling (Scenario 7) heeft een positief effect op de zandbalans van vak ZW-noord. Het water stroomt gedeeltelijk om de blokkade heen en hiermee wordt zand richting kust getransporteerd. Hetzelfde effect is zichtbaar voor het vak NH-zuid, als gevolg van de zanddam bij Castricum. De verschillen tussen Scenario 4 en Scenario 4b zijn vrij klein, wat duidt op een klein effect van de aanpassing van de randvoorwaarden.

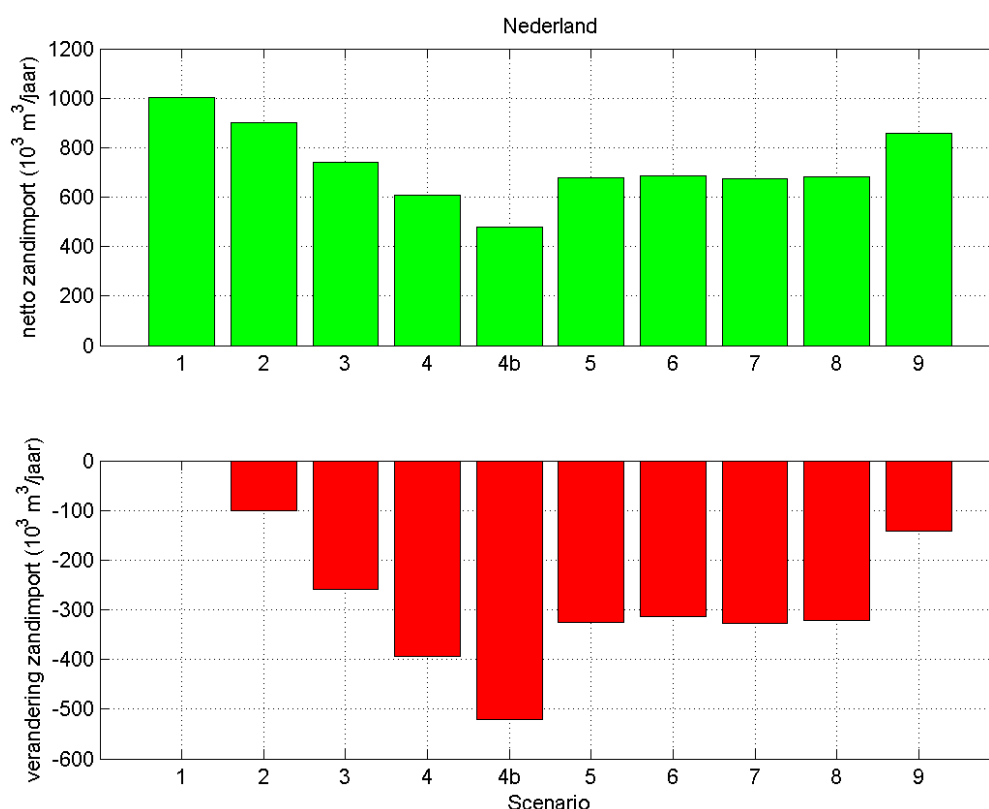


Figuur 3.30 Netto zandimport en de verandering hierin voor de kustvakken Zuid -Holland – Zuid en Zuid-Holland – Noord.



Figuur 3.31 Netto zandimport en de verandering hierin voor de kustvakken Noord-Holland – Zuid en Noord-Holland – Noord.

Tenslotte hebben we bestudeerd hoe de balans van het kustfundament van de gehele Nederlandse kust wordt beïnvloed door de aanleg van een zandgoot, zie Figuur 3.32. De zandbalans wordt voor het grootse gedeelte bepaald door de veranderingen van de kustdwarse transportcomponenten.



Figuur 3.32 Netto zandimport en de verandering hierin voor het Nederlandse kustfundament.

Deze figuur toont dat de zandgoot initieel resulteert in een maximale afname van de zandimport van $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (Scenario 1, referentiesituatie) naar $0.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (Scenario 4, 12 m diepe zandgoot), oftewel ca. 40%. Initieel verdwijnt er dus netto zand in de verdieping. Dit effect neemt toe met de diepte van de zandgoot. Het effect van het aanpassen van de randvoorwaarden is niet verwaarloosbaar: de zandimport neemt hierdoor met nog eens 10% af. De invloed van de zanddammen is nauwelijks zichtbaar in de zandbalans van het Nederlandse kustfundament (vergelijk Scenario's 5 t/m 7). Hetzelfde geldt voor het weghalen van de versmalling van de zandgoot (Scenario 8). Deze effecten zijn van lokaal belang en niet belangrijk op de schaal van geheel Nederland. De realistische zandgootscenario's (no. 2 en 9) resulteren in een ongeveer 10% afname van de zandimport.

3.4.2 Duinerosie

We bepalen de duinerosie met behulp van het DUROS+ model (WLIDelft Hydraulics, 2006). Dit model berekent de hoogteligging en de vorm van het bovenste gedeelte van het dwarsprofiel zoals dat na afloop van de stormvloed kan worden verwacht aanwezig te zijn; ook wel afslagprofiel genoemd. Gegeven de ligging van het dwarsprofiel juist vóór de stormvloed, kan vervolgens de mate van duinafslag worden bepaald door uit te gaan van een sluitende zandbalans in de richting dwars op de kust. Deze sluitende zandbalansprocedure bepaalt dus de positie van het afslagprofiel in horizontale zin. Het DUROS+ model is een

uitbreiding van het DUROS model met het effect van de golfperiode op de vorm van het afslagprofiel en dus op de mate van duinafslag.

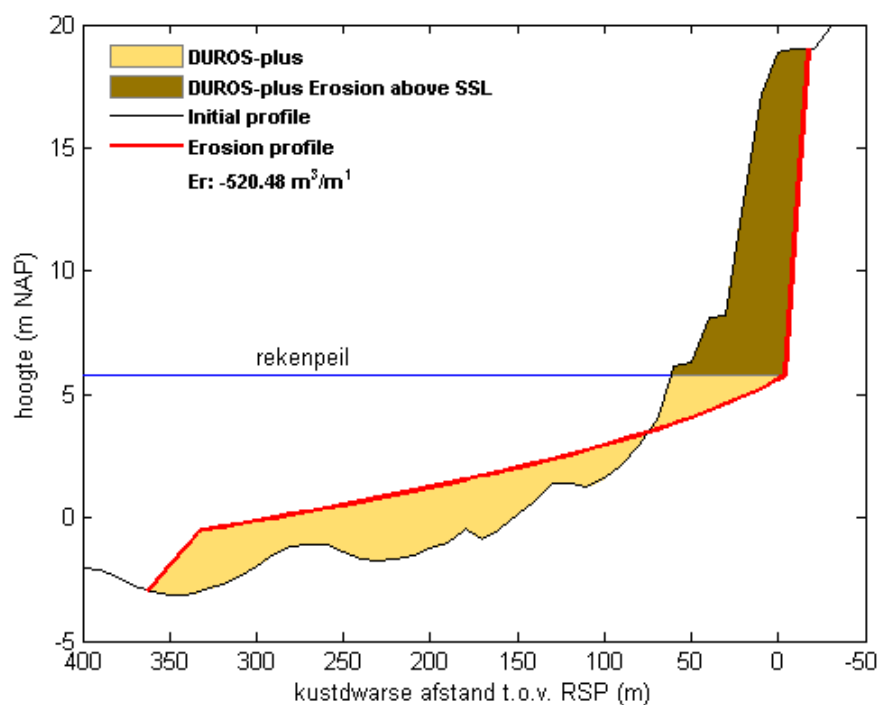
De ligging van het kustprofiel (vooroever, strand en duinen) vlak vóór de stormvloed, de korrelgrootte van het duinzand, het stormvloedpeil (ook wel rekenpeil genoemd) en de golfkarakteristieken op een waterdiepte van circa NAP -20 m (significante golfhoogte en golfperiode) zijn bepalend voor de mate van afslag. We hebben de duinerosie bepaald voor JARKUS raai 6400; nabij Zandvoort in Zuid-Holland. We hebben een mediane korrelgrootte van 0.215 mm genomen, overeenkomstig de korrelgrootte in het NCM model. Als rekenpeil nemen we +5.8 m NAP, afkomstig uit HR (2006). We nemen aan dat het rekenpeil niet beïnvloed wordt door de aanwezigheid van de verdieping. De golfkarakteristieken op diep water volgen uit simulaties met het NCM model. Dit resulteert in de randvoorwaarden voor het DUROS+ model zoals weergegeven in Tabel 3.1. Hieruit blijkt dat de significante golfhoogte ongeveer 10% toeneemt op 20 waterdiepte ter plekke van JARKUS raai 6400. De diepte van de zandgoot doet er niet veel toe. De piekperiode wordt nauwelijks beïnvloed door de aanwezige verdieping. In geval van de diepste goot (12 m) is deze 0.1 s groter, wat verwaarloosbaar is gegeven de nauwkeurigheid van SWAN en de resolutie van de golffrequentie in de modelberekeningen. Figuur 3.33 t/m Figuur 3.35 tonen de berekende afslagprofielen voor Scenario 1, 3 en 4. Tabel 3.1 toont ook het berekende erosievolume.

Tabel 3.1 Invoer voor de DUROS+ berekeningen en het duinerosievolume dat hieruit volgt.

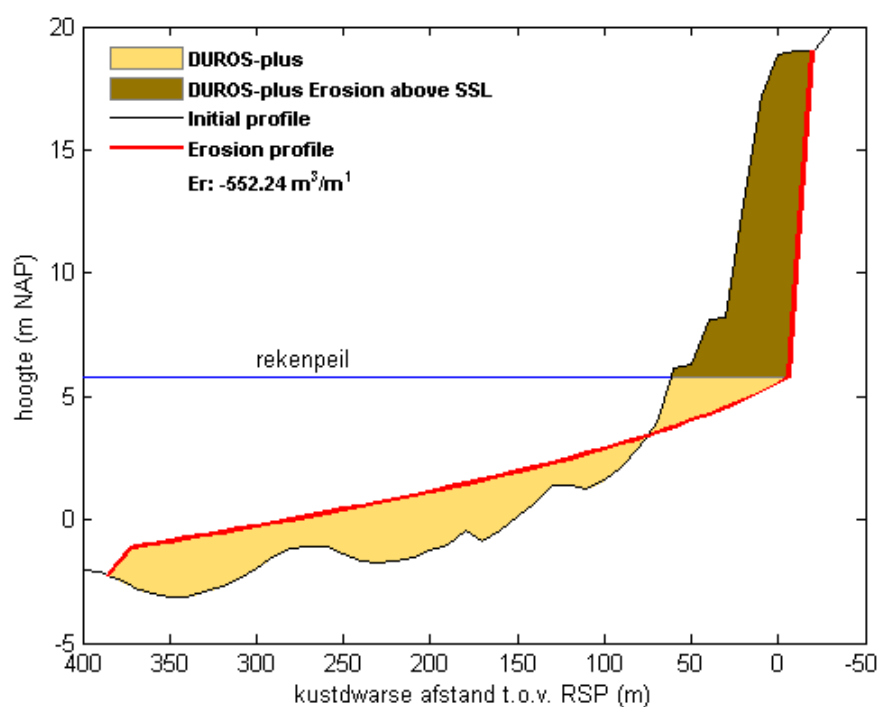
Scenario	$H_{1/3}$ (m)	T_p (s)	Rekenpeil (m NAP)	Duinerosie (m ³ /m)
1	9.00	15.5	5.8	520
3	9.86	15.5	5.8	552 (+6%)
4	9.86	15.6	5.8	554 (+7%)

Hieruit blijkt dat de aanleg van een 6 m zandgoot resulteert in een 6% toename in duinerosie als gevolg van de toegenomen golfhoogte. De toename is met 7% iets groter voor de 12 m diepe zandgoot als gevolg van de iets grotere piekperiode. Het dient gezegd dat de berekende effecten op duinerosie afhankelijk zijn van het gekozen kustprofiel. De consistentie van de gepresenteerde resultaten moet dan ook nader onderzocht worden door de duinerosie voor verschillende JARKUS raaien te bepalen.

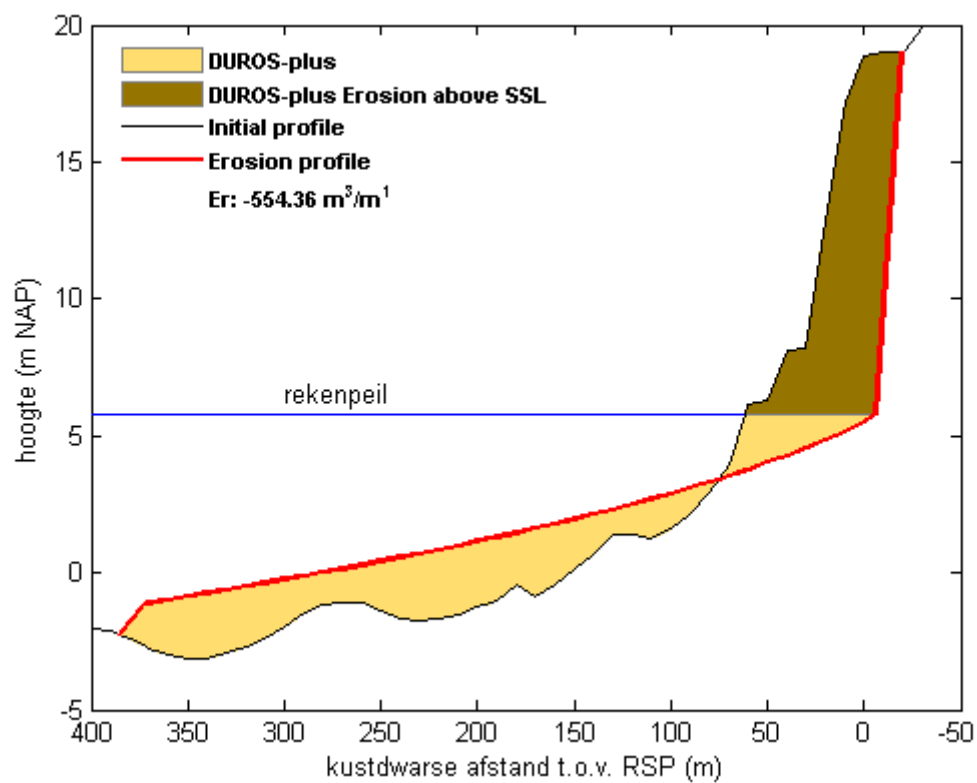
Van Thiel de Vries (2009) heeft de duinerosie voor een typisch Nederlands kustprofiel bij een maatgevende stormconditie zoals berekend met DUROS+ vergeleken met het procesgebaseerde model XBeach. Uit deze vergelijking volgt dat het door XBeach berekende duinerosievolume substantieel kleiner (ongeveer 40%) is dan hetgeen volgt uit de DUROS+ berekening. Gegeven deze grote verschillen lijkt het zinnig bovenstaande exercitie te herhalen met het XBeach model.



Figuur 3.33 Duinerosie bij een maatgevende stormconditie voor JARKUS raai 6400 voor Scenario 1.



Figuur 3.34 Duinerosie bij een maatgevende stormconditie voor JARKUS raai 6400 voor Scenario 3.



Figuur 3.35 Duinerosie bij een maatgevende stormconditie voor JARKUS raai 6400 voor Scenario 4.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

In dit rapport hebben we het effect van een verdieping langs de gehele Nederlandse kust – een zandgoot – op de golfhoogte, stroomsnelheden, zandtransporten en morfologie bestudeerd met een 2DH Delft3D model. De beschouwde zandgootsscenario's zijn extreem qua volume (overeenkomstig 100 jaar zand winnen met $100 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en meer). Ook de manier waarop de scenario's zijn doorgerekend resulteert in extreme effecten. De verdieping is instantaan aangelegd en het zand is niet teruggestort in het kustfundament. In dit kader heeft deze studie ons het navolgende geleerd over het effect van een zandgoot.

Golfhoogte

De golfhoogte neemt toe door de aanwezigheid van de zandgoot, omdat bodemwrijving minder is door de grotere waterdiepte. De golfhoogte toename neemt toe met de diepte van de zandgoot. De maximale toename, voor de 12 m diepe zandgoot, is ca. 20% ter plekke van de zandgoot en 10% in de kustzone.

Door het weghalen van de versmalling in de zandgoot ter hoogte van Zandvoort neemt de golfhoogte ter plekke van de oorspronkelijke “buik in het kustfundament” toe.

De aanleg van zanddammen in de verdieping – welke gebundelde leidingen, boorplatforms, kabels, etc. representeren – resulteert in een lokale toename en afname van de golfhoogte.

Het aanpassen van de stroming op de laterale randen – om de invloed van de verdieping op een grotere schaal dan het Nederlandse kuststelsel mee te nemen – heeft nauwelijks invloed op de berekende golfhoogtes.

Stroomsnelheden

De stroomsnelheden gedurende het getij veranderen door een samenspel van processen. De afgenomen bodemwrijving in de verdieping zorgt voor een snelheidstoename. Net buiten de zandgoot nemen de stroomsnelheden toe dan wel af door convergentie (bij het instromen) en divergentie (bij het uitstromen) van de stroomlijnen. Op de randen van de zandgoot nemen de snelheden abrupt af (bij het instromen) dan wel toe (bij het uitstromen) om massabehoud te garanderen. De watermassa in de zandgoot is vergroot en bevat als zodanig meer traagheid. De stroming reageert daarom langzamer op de variërende waterstandsgradiënt die de stroming aandrijft. Hierdoor ontstaan veranderingen in de stroomsnelheid als deze op een bepaalde getijfase wordt vergeleken met de referentiesituatie. Lokale variaties in de verdieping, bijvoorbeeld de versmalling en zanddammen, zorgen voor lokale veranderingen. Golven spelen een ondergeschikte rol in deze.

De veranderingen in de stroomsnelheid zijn maximaal 0.3 m/s oftewel bijna 20% van de pieksnelheden. Bij de kust zijn de veranderingen aanzienlijk minder; 0.0-0.1 m/s. De versmalling van de zandgoot zorgt gedurende bepaalde getijfasen voor een lokale snelheidstoename van maximaal 0.2-0.3 m/s. De invloed van de zandgoot op het stroombeeld neemt toe met de diepte.

Het effect van het weghalen van de versmalling is lokaal. Ter plekke van de oorspronkelijke versmalling neemt de stroomsnelheid af aangezien stromingscontractie minder is. Ter plekke van de oorspronkelijke “buik” vertoont de stroming hetzelfde gedrag als in de zandgoot.

De zanddammen zorgen voor een toename van maximaal 0.25 m/s vanwege massabehoud. Convergentie en divergentie van de stroomlijnen zorgen voor een lokale toename ten westen en oosten van de zanddammen en een lokale afname ten noorden en zuiden ervan.

De invloed van de aanpassing van de randvoorwaarden op het kwalitatieve stroombeeld is miniem. Alleen in het Waddengebied resulteert de aanpassing tot hogere vloedsnelheden en lagere ebsnelheden, welke een direct gevolg zijn van de hoger opgelegde snelheidsmaxima op de noordoostelijke laterale modelrand.

Zandtransporten

De berekende zandtransporten worden direct en indirect beïnvloed door de (veranderingen) in golfhoogtes en stroomsnelheden. Dit maakt het niet altijd eenvoudig de optredende veranderingen in de zandtransporten te verklaren. Om de invloed van de verdieping op de zandtransporten te analyseren, hebben we de Nederlandse kust opgedeeld in 10 vakken met de doorgaande NAP -20 m dieptelijn ongeveer als zeewaartse grens en de geïntegreerde jaarlijkse totale zandtransporten over de zeewaartse en laterale randen hiervan bepaald.

Het grootste effect van de zandgoot op de transporten is merkbaar voor de kustvakken nabij de versmalling van de zandgoot; Zuid-Holland en Noord-Holland. Dit geldt met name voor de dwarstransporten. Ten zuiden van de versmalling neemt het kustwaartse transport af; stromingscontractie zorgt ervoor dat de stroming meer richting de versmalling en dus van de kust af gaat. Ten noorden gebeurt het tegenovergestelde: hier neemt het zeewaarts gerichte transport af. De veranderingen zijn hier ca. 20-80% voor de diepste zandgoot. Op andere locaties veroorzaakt de zandgoot kleinere veranderingen; 10-20%. De invloed van de zandgoot neemt toe met de diepte ervan.

Het weghalen van de zandgootversmalling vermindert de “aanzuigende” werking ervan. De berekende transporten lijken meer op de referentiesituatie. De invloed van de aanpassing van de modelrandvoorwaarden op de geïntegreerde jaarlijkse totale zandtransporten blijkt gering. Het effect van de zanddammen, daarentegen, is duidelijk zichtbaar, maar lokaal. Alleen de transporten in de vakken nabij de dammen worden beïnvloed. Hier neemt het kustwaartse transport toe, als gevolg van de stroomlijnen die om de dammen heen buigen. Een uitzondering hierop vormt de dam bij Castricum waar het zeewaartse transport toeneemt.

Morfologie

In de modelsimulaties is de bodem is niet ge-update op basis van de optredende divergenties in zandtransporten. Daarom is het effect van de zandgoot op de morfologie op een indirecte wijze bepaald. De veranderingen in het zandvolume van het kustfundament – van belang voor de lange termijn kustveiligheid – en de duinerosie die optreedt bij een maatgevende stormconditie – van belang voor de momentane veiligheid – zijn geanalyseerd. De volumeveranderingen zijn bepaald voor 10 kustvakken langs de Nederlandse kust; de duinerosie voor 1 JARKUS raai nabij Zandvoort, Zuid-Holland. Deze analyse geeft alleen inzicht geeft in de (mogelijke) initiële morfologische veranderingen.

De zandgoot resulteert in minder zandimport in de vakken ten zuiden van de versmalling (Delflandse en Rijnlandse kust, Zuid-Holland) en meer zandimport ten noorden ervan (Rijnlandse kust, Noord-Holland). Dit is het gevolg van stromingscontractie bij de versmalling van de zandgoot. Dit effect neemt toe met de diepte van de zandgoot. Het weghalen van de versmalling leidt dan ook tot een sterke vermindering van dit effect. Een zanddam in de goot (die zou kunnen ontstaan ter plekke van kabels en leidingen) in de versmalling heeft een

positief effect op de zandbalans van de Rijnlandse kust (ZH). Hetzelfde effect is zichtbaar voor het vak Rijnlandse kust (NH), als gevolg van de dam bij Castricum. De aanpassing van de randvoorwaarden heeft een vrij klein effect op de zandbalansen.

Het aanleggen van de verdieping resulteert in een afname van maximaal 40% van de zandimport van het gehele Nederlandse kustfundament. Het effect neemt toe met de diepte van de zandgoot. Het aanpassen van de modelrandvoorwaarden geeft een additionele afname van 10%. Bij de realistische zandgootscenario's is deze afname 10-15%. De aanleg van zanddammen en het weghalen van de versmalling hebben een lokaal effect, maar komen nauwelijks tot uiting in de balans van het gehele Nederlandse kustfundament.

De duinerosie is berekend met behulp van het DUROS+ model gegeven een maatgevende stormconditie met een frequentie van 1/10000 jaar. De aanleg van de zandgoot zorgt voor een toename van de significante golfhoogte behorende bij deze stormconditie met ongeveer 10% op 20 m waterdiepte ter plekke van Zandvoort. De diepte van de zandgoot doet er niet veel toe. Hierdoor resulteert de 6 m zandgoot in een 6% toename en de 12 m verdieping in een 7% toename van de duinerosie ter plekke van de beschouwde dwarsraai.

4.2 Aanbevelingen

Deze studie heeft inzicht gegeven in de (mogelijke) initiële verandering van het zandvolume in de gedefinieerde vakken. De getoonde resultaten zijn afhankelijk van de gekozen vakgrenzen. Ook wordt er geen rekening gehouden met de terugkoppeling van morfologische veranderingen op golven, stroming en zandtransporten. Dit rapport geeft alleen een aanwijzing tot kwalitatieve veranderingen in het kustfundament welke optreden als gevolg van het aanleggen van een verdieping langs de Nederlandse kust. Alleen met behulp van morfodynamische simulaties kan hier inzicht in worden verschaft.

De berekende effecten van de zandgoot op duinerosie zijn afhankelijk van het gekozen kustprofiel. De consistentie van de gepresenteerde resultaten moet dan ook nader onderzocht worden door de duinerosie voor verschillende JARKUS raaien te bepalen. Ook verdient het aanbeveling het effect van de zandgoot op duinerosie door te rekenen met het procesgebaseerde model XBeach.

Het gehanteerde morfologische golfklimaat is op een relatief simpele manier afgeleid. Ondanks dat de berekende langstransporten in de brandingszone redelijk goed overeenkomen met andere studies, bevelen we aan het golfklimaat opnieuw af te leiden. Dit kan gedaan worden door voor elke conditie in het volledige golfklimaat een modelberekening uit te voeren en het aantal condities te reduceren met als doel de jaarlijkse zandtransporten als gevolg van de volledige set golfcondities te reproduceren.

Het zou interessant zijn het effect van de verdieping op de getijkarakteristieken – amplitude, fase en frequentie van de waterstand en stroomsnelheid – langs de Nederlandse kust te onderzoeken. Dit kan met behulp van een Fourieranalyse van de huidige modelresultaten. Deze zouden dan vergeleken kunnen worden met de studie van De Boer (2008), een analytische studie met een geïdealiseerd model naar de voortplanting van een getijgolf door een halfgesloten bassin met grootschalige dieptevariaties in laterale richting.

Als laatste bevelen we aan de gevoeligheid van de resultaten voor modelinstellingen en modelschematisaties te onderzoeken. Hierbij valt te denken aan bijvoorbeeld het meenemen van variaties in verticale richting (3D simulatie), de bodemruwheid en de korrelgrootte.

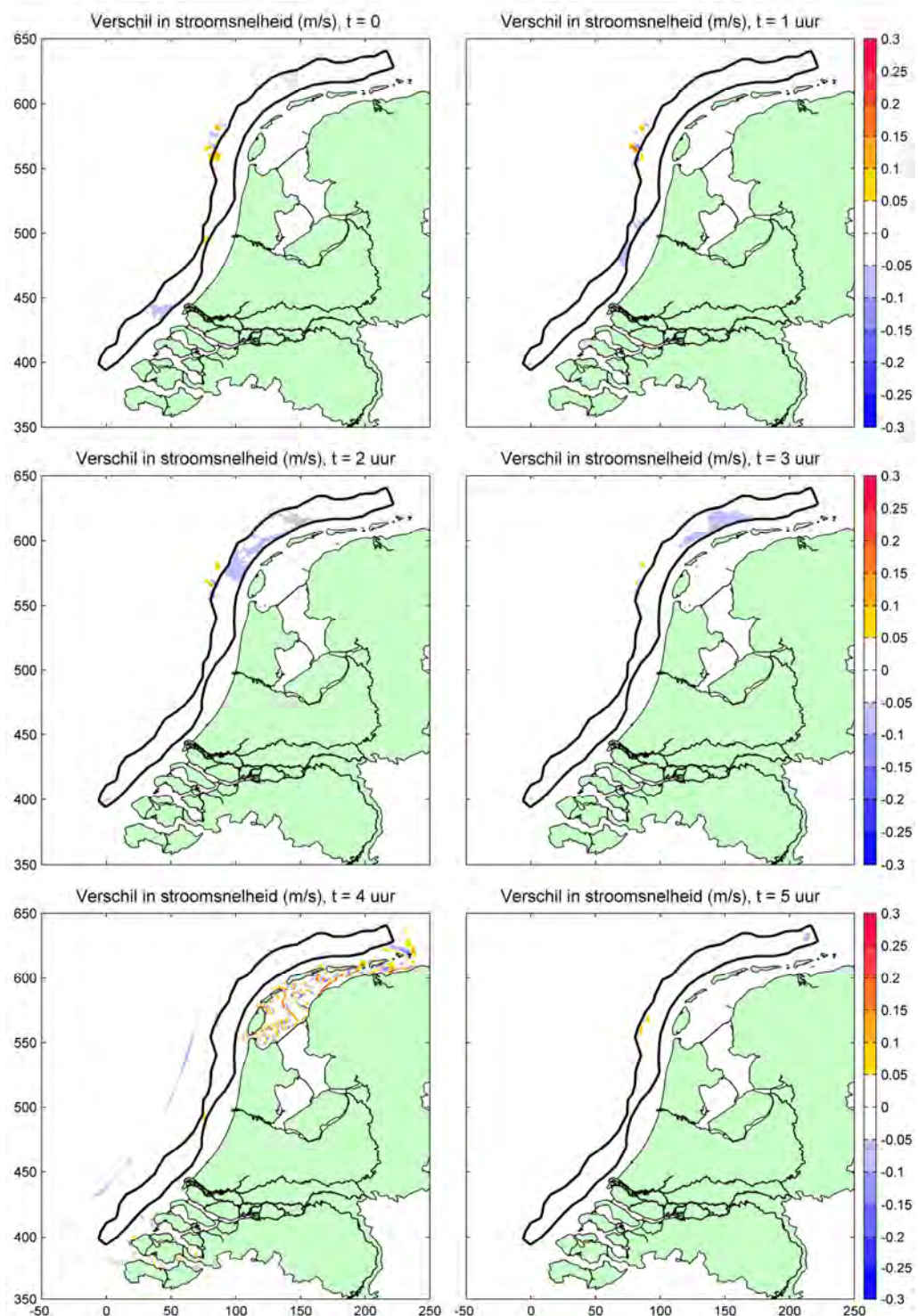
Referenties

- Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M. (1978). Energy loss and setup due to breaking of random waves. Proceedings 16th International Conference on Coastal Engineering, Hong Kong, pp. 569-587.
- Boers, M. (2005). Effects of a deep sand extraction pit, Final report of the PUTMOR measurements at the Lowered Dump Site. Rapport RIKZ/2005.001, RIKZ, Nederland.
- HR (2006). Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Nederland.
- Leidraad Zandige Kust (2002). Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. DWW rapport 2003-046, Nederland.
- Fredsoe, J. (1984). Turbulent boundary layers in wave-current motion. Journal of Hydraulic Engineering 110: 1103-1120.
- Mol, A.C.S. (2007). R&D Kustwaterbouw Reductie Golfvandvoorwaarden, OPTI Manual. Rapport H4959.10, WL|Delft Hydraulics, Nederland.
- Ribberink, J.S. (1989) Zeezandwinning, onderbouwend rapport. Rapport H0825, WL|Delft Hydraulics, Nederland.
- Roelvink, J.A., Van der Kaaij, T., Ruessink, B.G. (2001). Calibration and verification of large-scale 2D/3D flow models, Phase 1. Rapport Z3029.11, WL|Delft Hydraulics/MARE, Nederland.
- Roos, P.C. (2004). Seabed Pattern Dynamics and Offshore Sand Extraction. Proefschrift, Universiteit Twente, Nederland.
- Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands. Thomas Telford, UK.
- Steezel, H.J., De Vroeg, J.H. 1999. Update and validation of the PonTos-model. Rapport A244/Z2259, Alkyon Hydraulic Consultancy & Research en WL|Delft Hydraulics, Nederland. (in het Engels)
- Stive, M.J.F., Eysink, W.D., 1989. Voorspelling ontwikkeling kustlijn 1990-2090, fase 3 (deelrapport 3.1): dynamisch model van het Nederlandse kuststelsel deelrapport. Rapport H0825, WL|Delft Hydraulics, Nederland.
- Tonnon, P.K., Van der Werf, J.J., Mulder, J.P.M. (2009). Morfologische berekeningen MER zandmotor. Rapport 1201001-001, Deltares, Nederland.
- Van de Rest, P. 2004. Morfodynamica en hydrodynamica van de Hollandse kust. Afstudeerrapport, Technische Universiteit Delft, Nederland.
- Van Duin, M.J.P., Wiersma, N.R., Walstra, D.J.R., Van Rijn, L.C., Stive, M.J.F. (2004). Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. Coastal Engineering 51: 813-837.
- Van Rijn, L.C., Ribberink, J.S., Reniers, A., Zitman, T. 1995. Sand Budget and coastline change of the Central Dutch Coast between Den Helder and Hoek van Holland. Delft hydraulics, report H2129, Project Kustgenese.
- Van Rijn, L.C. (2007a). Unified view of sediment transport by currents and waves, I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. Journal of Hydraulic Engineering 133: 649-667.
- Van Rijn, L.C. (2007b). Unified view of sediment transport by currents and waves, II: Suspended transport. Journal of Hydraulic Engineering 133: 668-689.

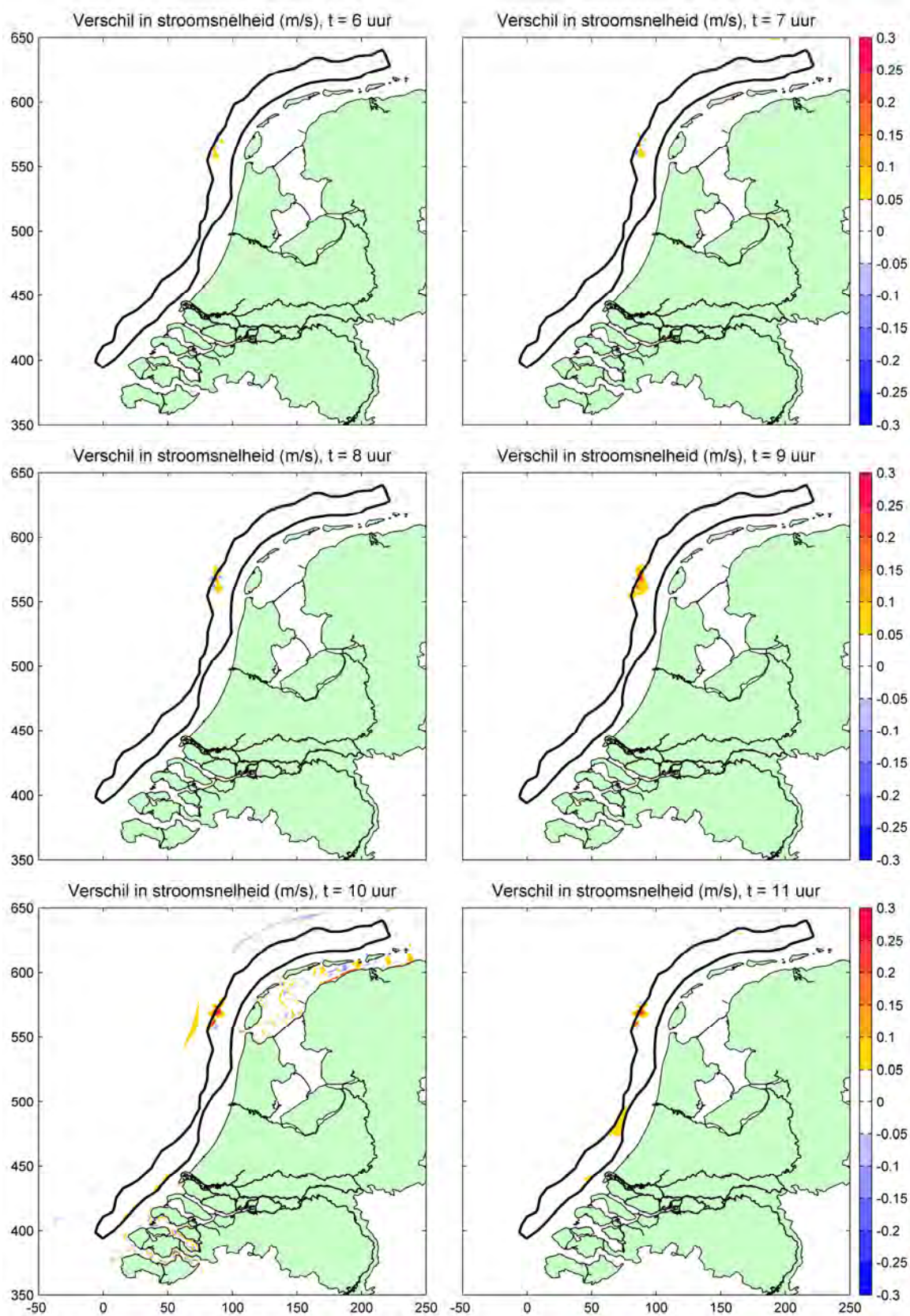
- Van Thiel de Vries, J.S.M. (2009). Dune erosion during storm surges. Proefschrift, Technische Universiteit Delft, Nederland.
- WL|Delft Hydraulics (2006). Dune erosion, Product 2: Large-scale model tests and dune erosion prediction, methods. Rapport H4357, WL|Delft Hydraulics, Nederland.

A Stroomsnelheden

A.1 Scenario 2

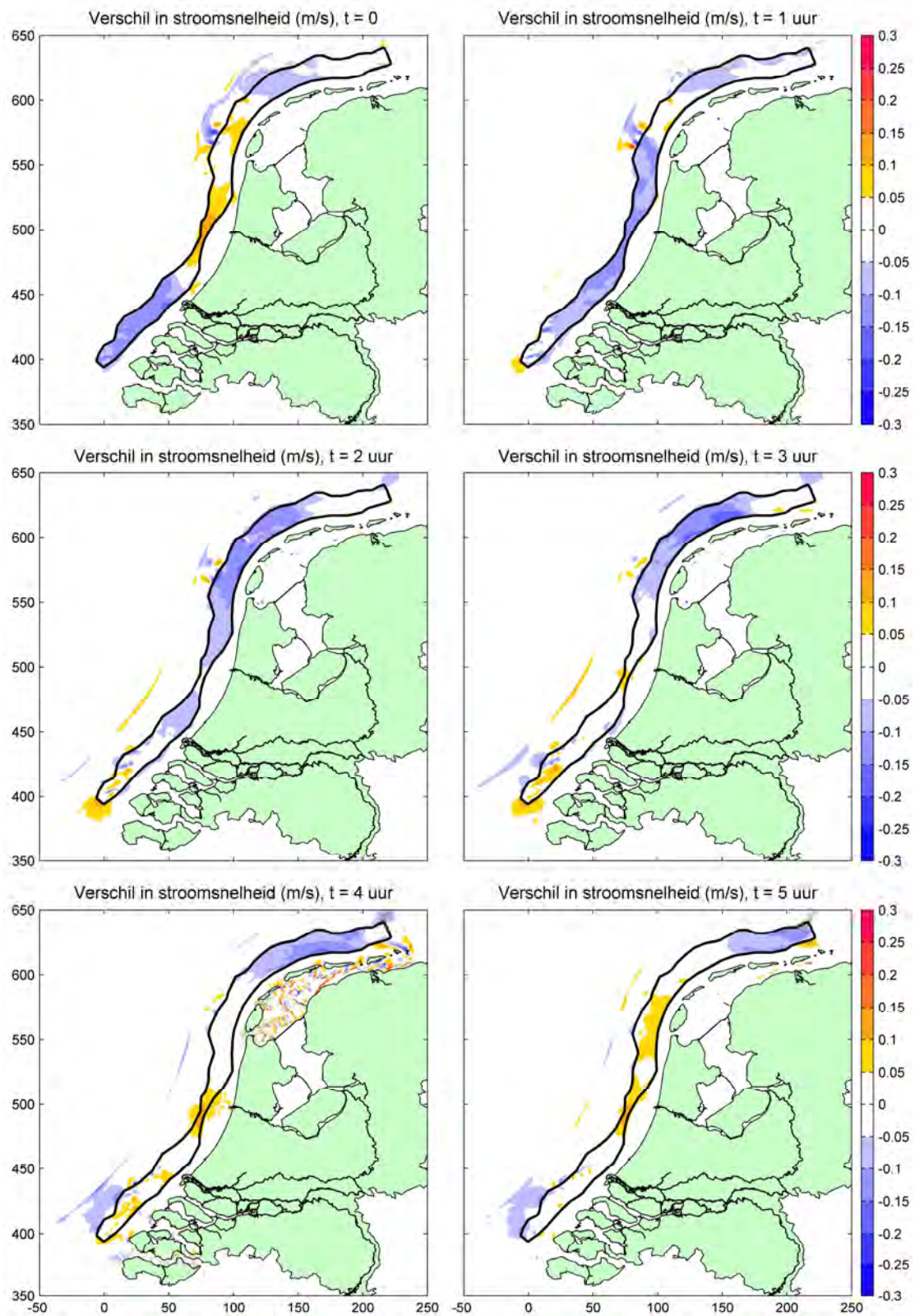


Figuur A.1 *Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 2 en Scenario 1 gedurende de eerste serie getijfases, golfconditie w6.*

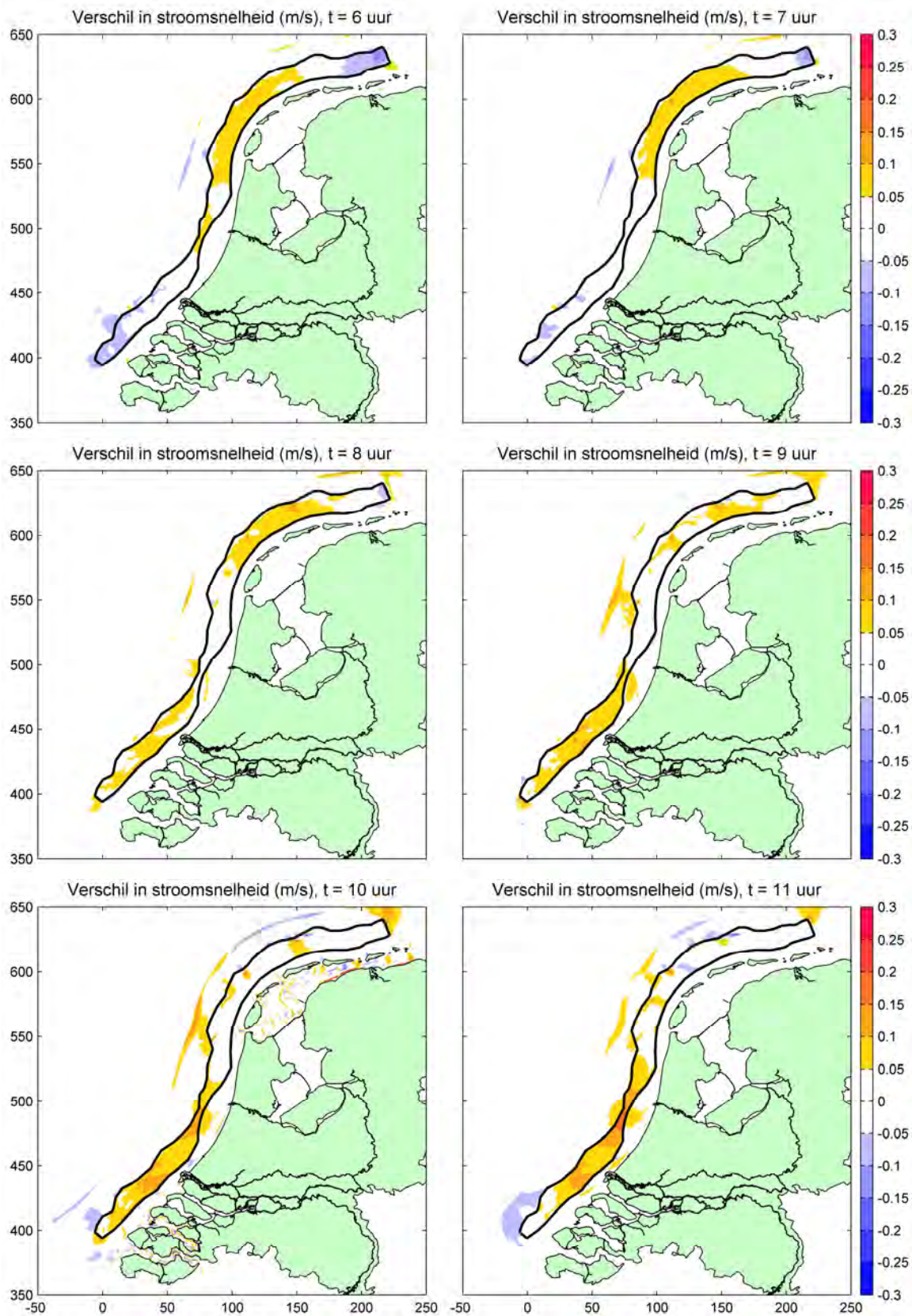


Figuur A.2 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 2 en Scenario 1 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.

A.2 Scenario 3

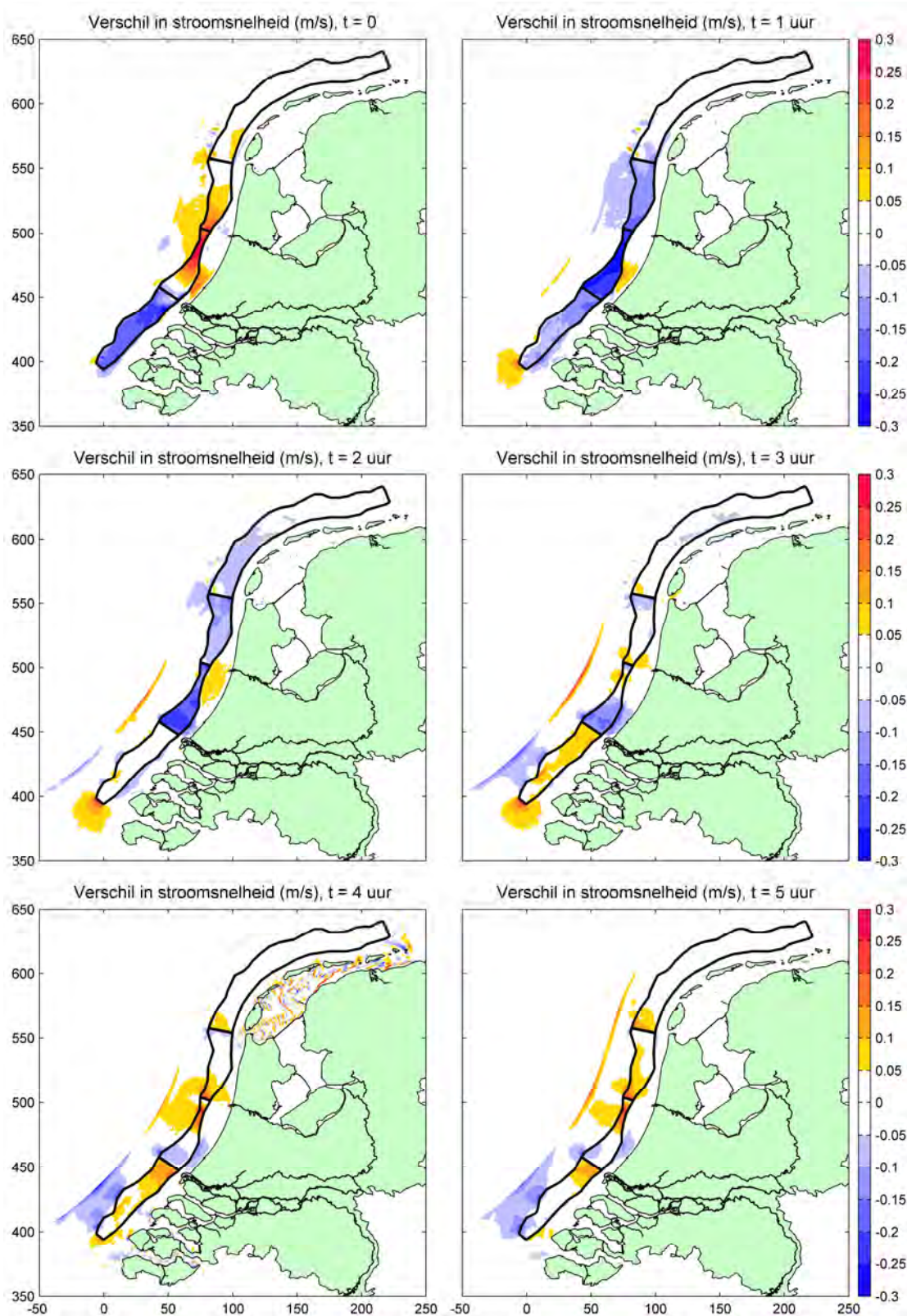


Figuur A.3 Verskil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 3 en Scenario 1 gedurende de eerste serie getijfasen, golfconditie w6.

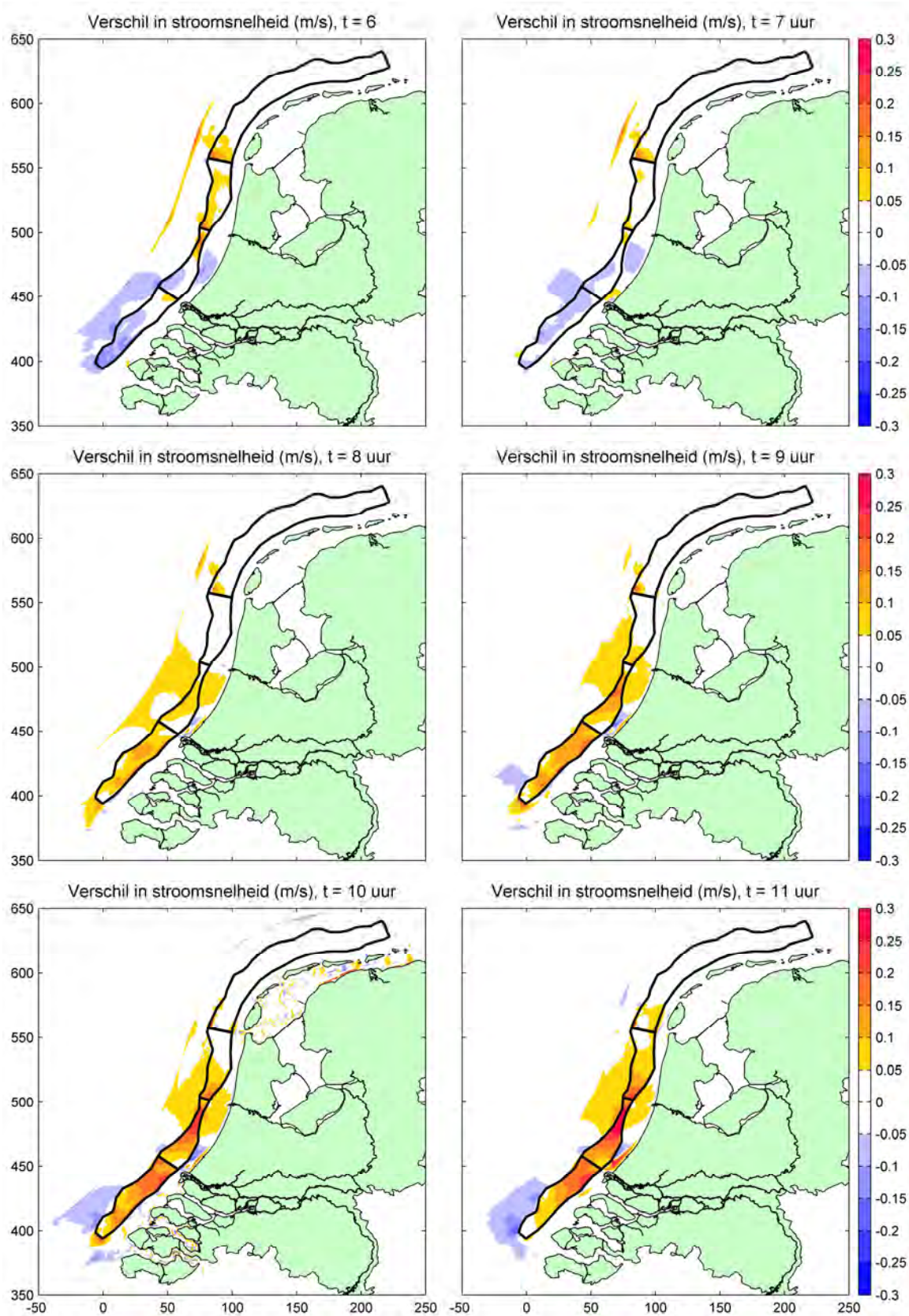


Figuur A.4 Verschil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 3 en Scenario 1 gedurende de tweede serie getijfasen, golfconditie w6.

A.3 Scenario 5

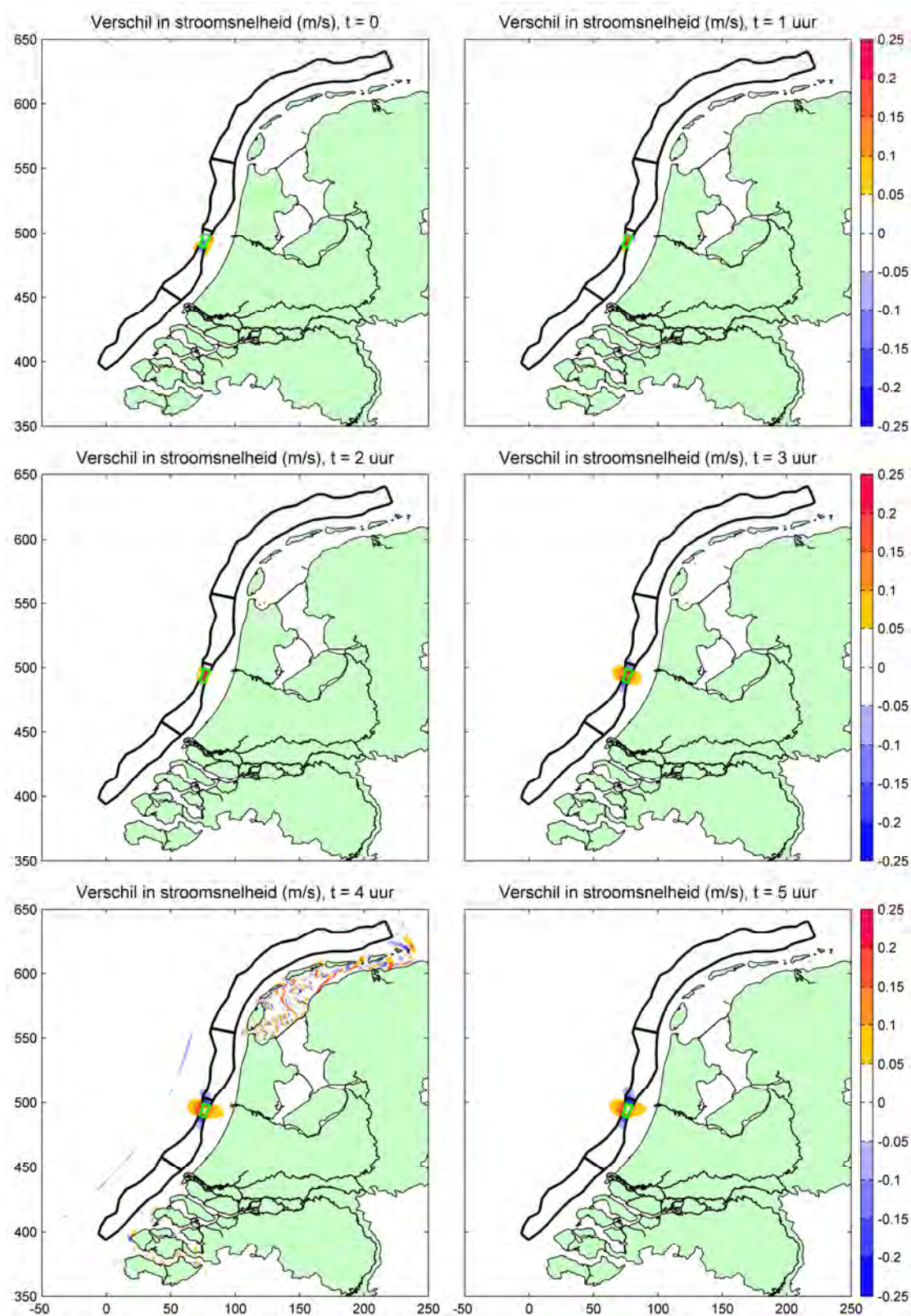


Figuur A.5 Verschil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 5 en Scenario 1 gedurende de eerste serie getijfases, golfconditie w6.

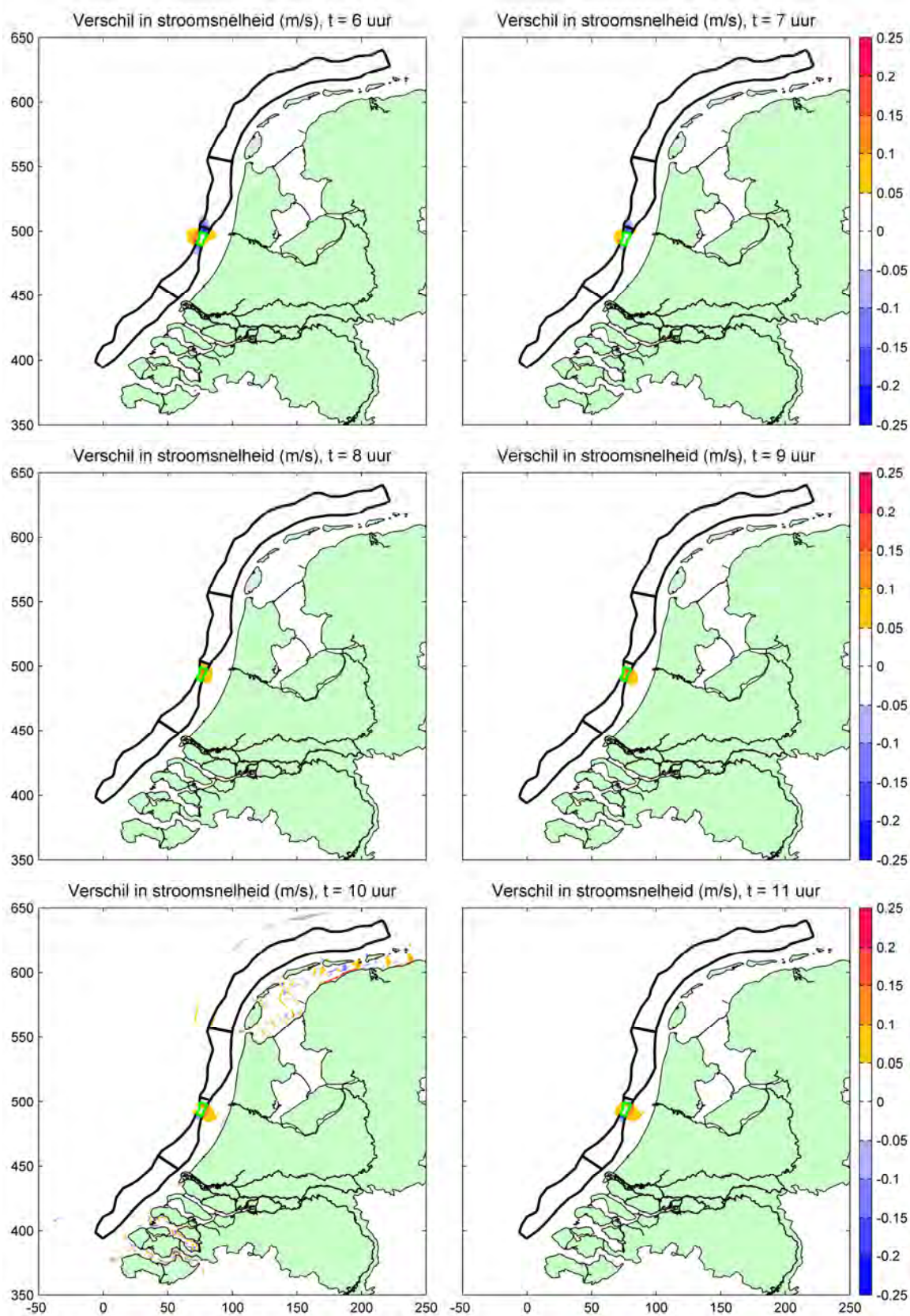


Figuur A.6 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 5 en Scenario 1 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.

A.4 Scenario 6

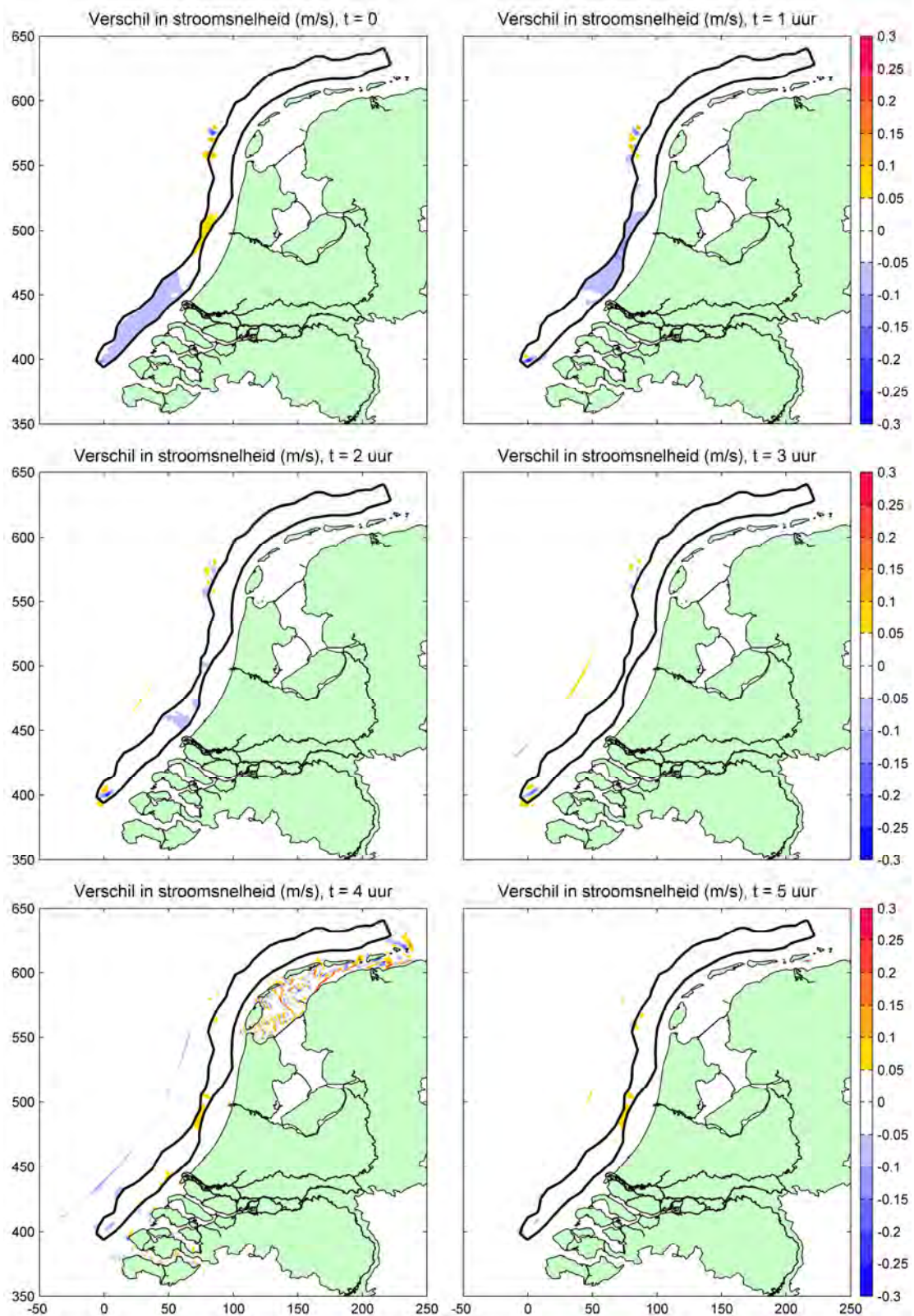


Figuur A.7 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 6 en Scenario 5 gedurende de eerste serie getijfases, golfconditie w6.

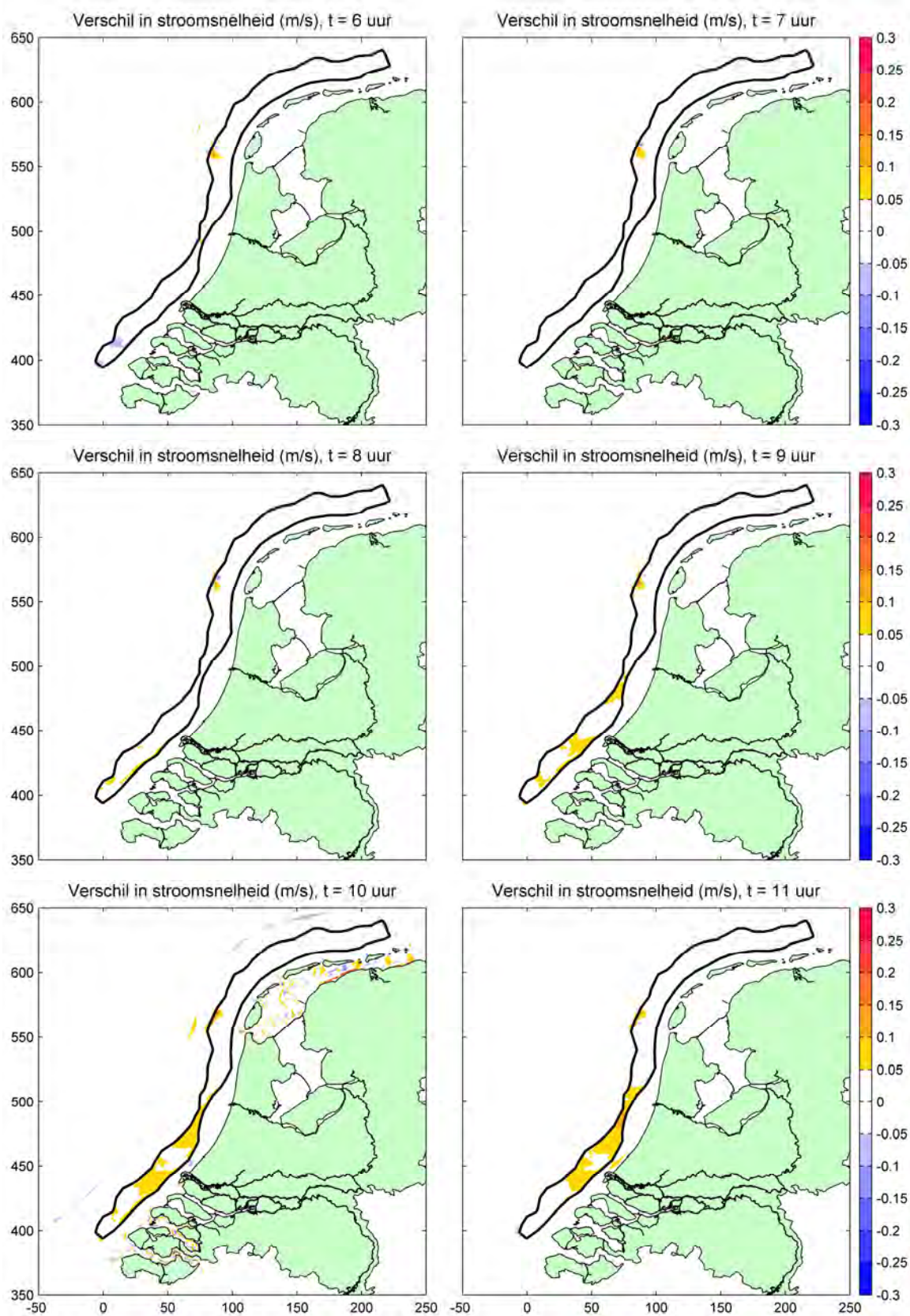


Figuur A.8 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 6 en Scenario 5 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.

A.5 Scenario 9



Figuur A.9 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 9 en Scenario 1 gedurende de eerste serie getijfases, golfconditie w6.

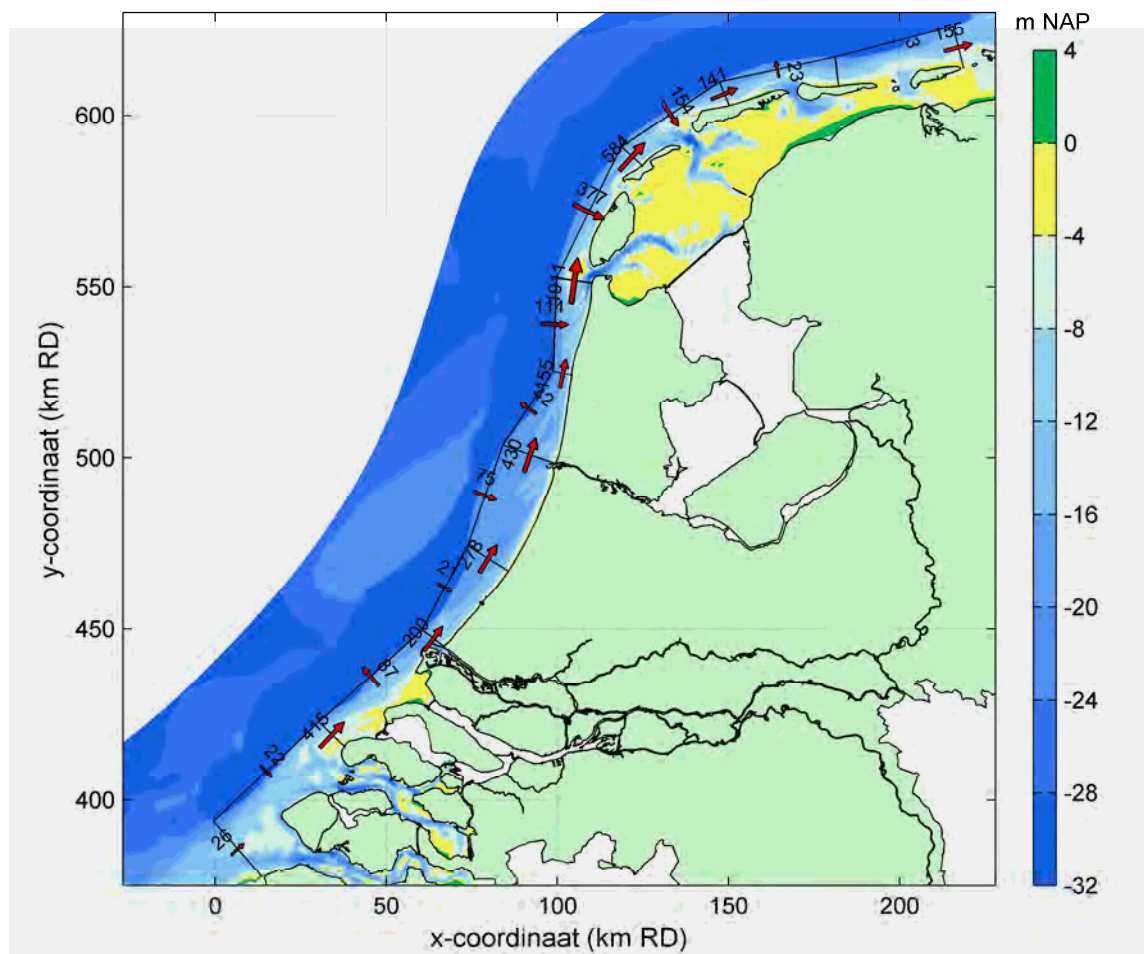


Figuur A.10 Vershil in magnitude van de stroomsnelheid tussen Scenario 9 en Scenario 1 gedurende de tweede serie getijfases, golfconditie w6.

B Zandtransporten

B.1 Scenario 4b

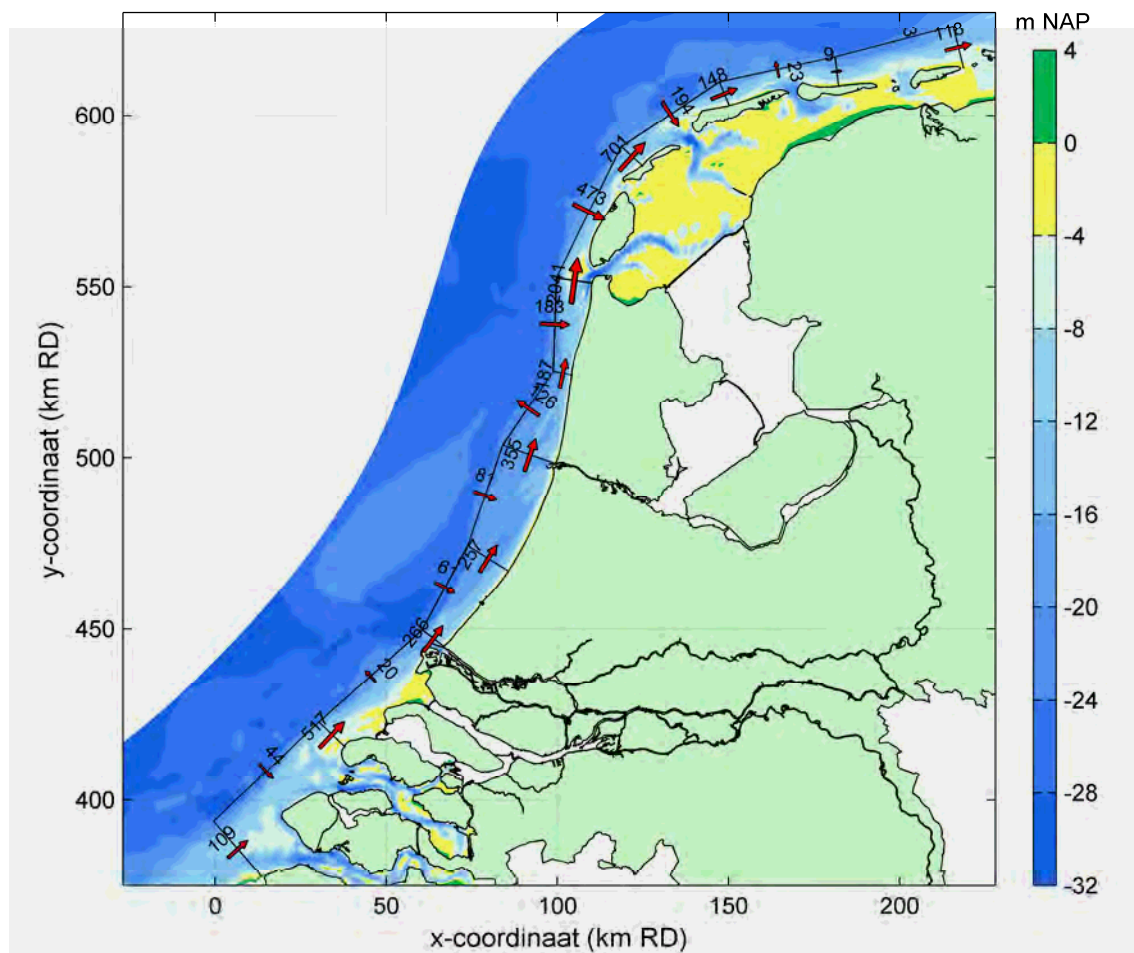
Scenario 4b: totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$)



Figuur B.1 Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 4b.

B.2 Scenario 9

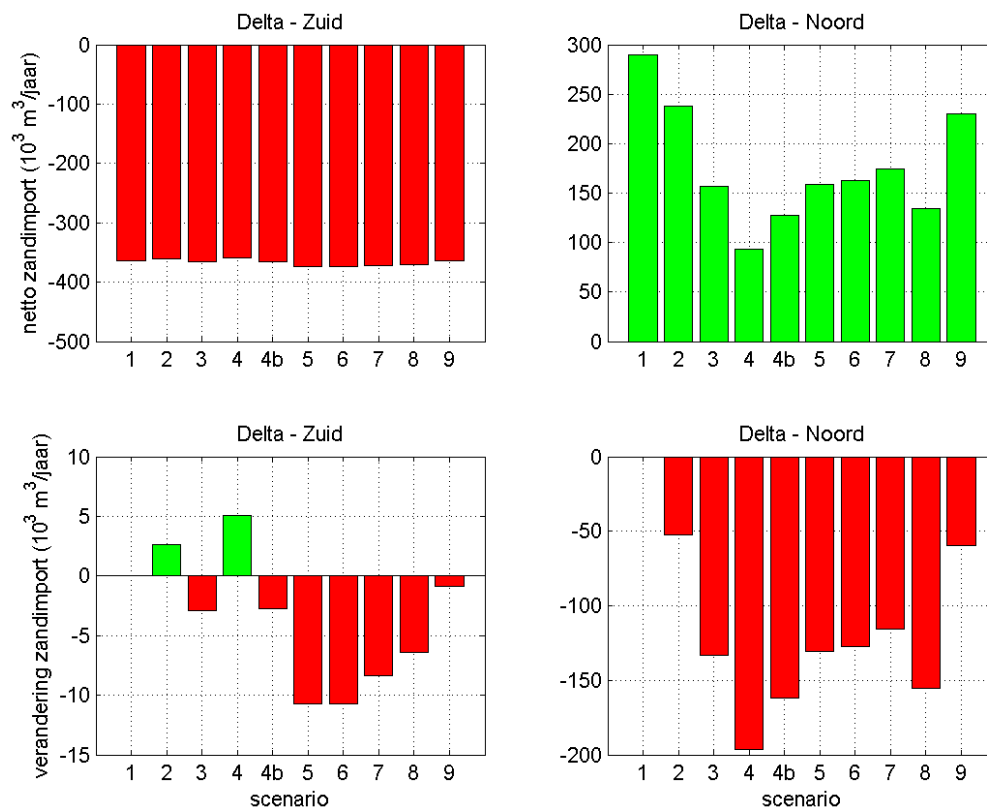
Scenario 9: totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$)



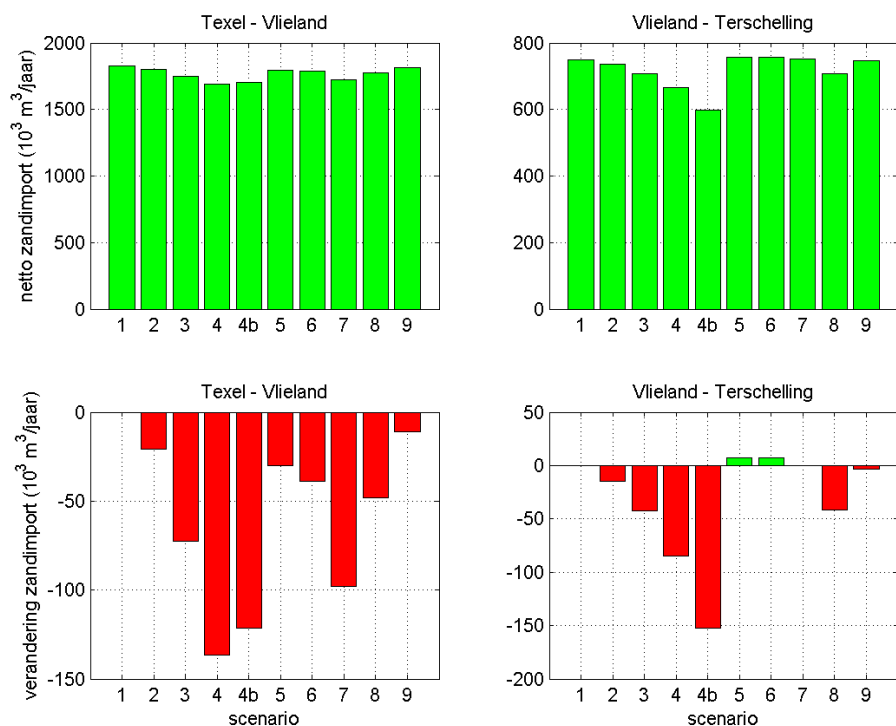
Figuur B.2

Getijgemiddeld totaal zandtransport door raaien ($10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) voor Scenario 9.

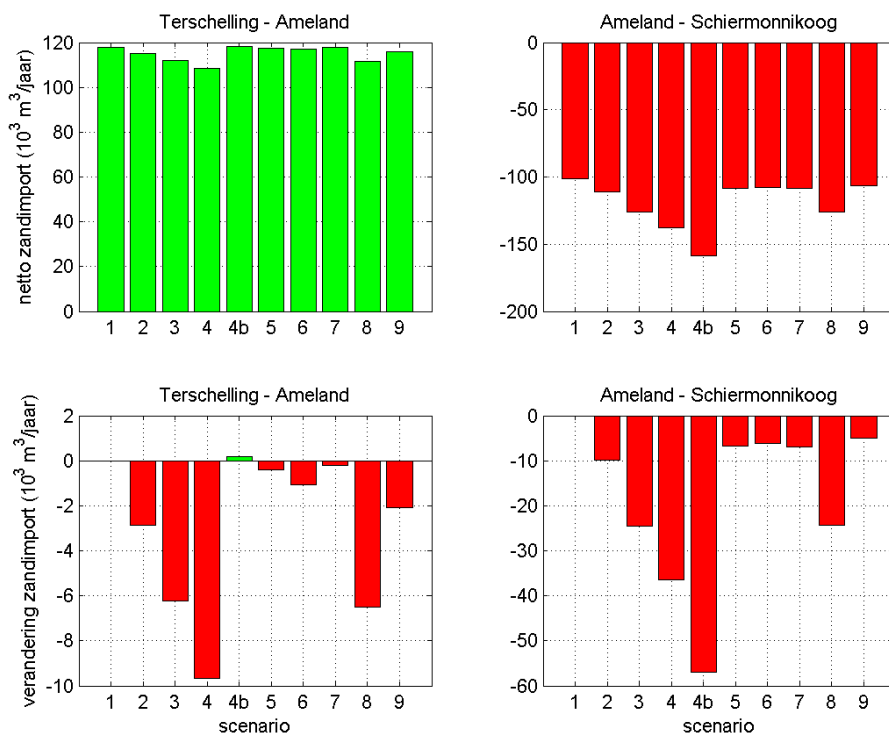
C Zandvolume kustfundament



Figuur C.1 Netto zandimport en de verandering hierin voor de kustvakken Delta – Zuid en Delta – Noord.



Figuur C.2 Netto zandimport en de verandering hierin voor de kustvakken Texel-Vlieland en Vlieland-Terschelling.



Figuur C.3 Netto zandimport en de verandering hierin voor de kustvakken Terschelling-Ameland en Ameland-Schiermonnikoog.