

Vlaanderen
is wetenschap

15_068_3
WL rapporten

Modellering
Belgische Kustzone en Scheldemonding

Deelrapport 3
Modellering van de morfologische effecten na aanleg nieuwe Geul van de Walvischstaart

DEPARTEMENT
MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Modellering Belgische Kustzone en Scheldemonding

Deelrapport 3 – Modellering van de morfologische effecten na aanleg nieuwe Geul van de Walvischstaart

De Maerschalck, B.; Dijkstra, J.; Nnafie, A.; Vroom, J.; Van Oyen, T.; Röbke, B.R.; van der Werf, J; van der Wegen, M.; van Maren, B.; Taal, M.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

Deltares

Waterbouwkundig Laboratorium

Vlaanderen is wetenschap

Cover figuur © Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017

Juridische kennisgeving

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

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2017
D/2017/3241/140

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

De Maerschalck, B.; Dijkstra, J.; Nnafie, A.; Vroom, J.; Van Oyen, T.; Röbke, B.R.; van der Werf, J; van der Wegen, M.; van Maren, B.; Taal, M.; Vanlede, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2017). Modellering Belgische Kustzone en Scheldemonding: Deelrapport 3 – Modellering van de morfologische effecten na aanleg nieuwe Geul van de Walvischstaart. Versie 4.0. WL Rapporten, 15_068_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Deltares referentie: 1210301-010-ZKS-0004

Tot en met de datum van vrijgave, kan overname uit en verwijzen naar deze publicatie enkel mits uitdrukkelijke en schriftelijke toestemming van de opdrachtgever of het Waterbouwkundig Laboratorium. Correcte bronvermelding is steeds noodzakelijk.

Documentidentificatie

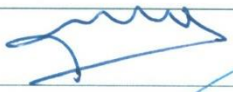
Opdrachtgever:	Vlaams Nederlands Scheldecomissie (VNSC)	Ref.:	WL2017R15_068_3
Keywords (3-5):	Scheldemonding; Toegankelijk		
Tekst (p.):	64	Bijlagen (p.):	12
Vertrouwelijk:	☒ Ja	Vrijgegeven vanaf:	01/01/2025

Auteur(s):	De Maerschalck, B.; Dijkstra, J.; Nnafie, A.; Vroom, J.; Van Oyen, T.; Röbke, B.R.; van der Wegen, M.; van der Werf, J; Taal, M.

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Vanlede, J. van der Werf, J. van Maren, B.	
Projectleider:	De Maerschalck, B.	

Goedkeuring

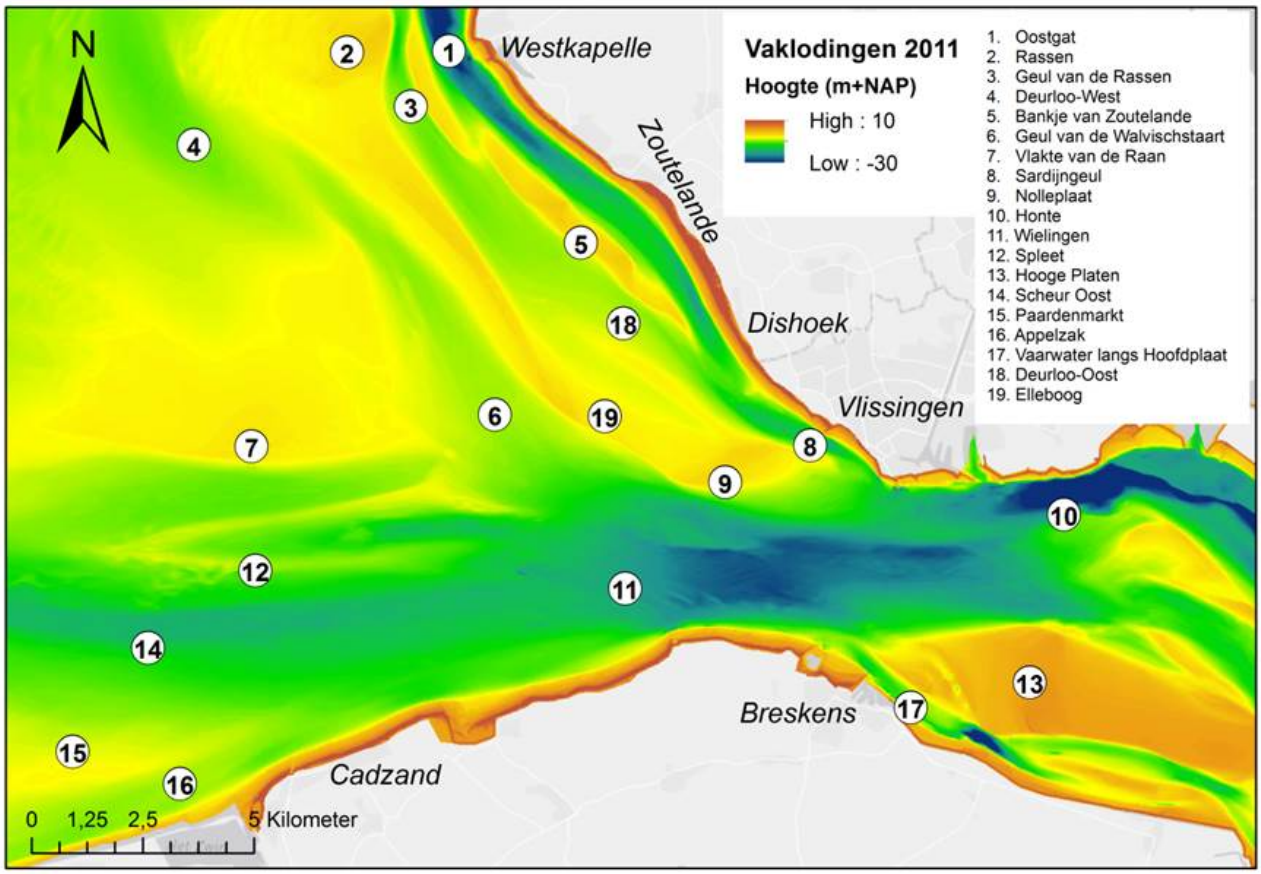
Coördinator onderzoeksgroep:	Verwaest, T.	
Afdelingshoofd:	Mostaert, F.	

Abstract

AANLEIDING

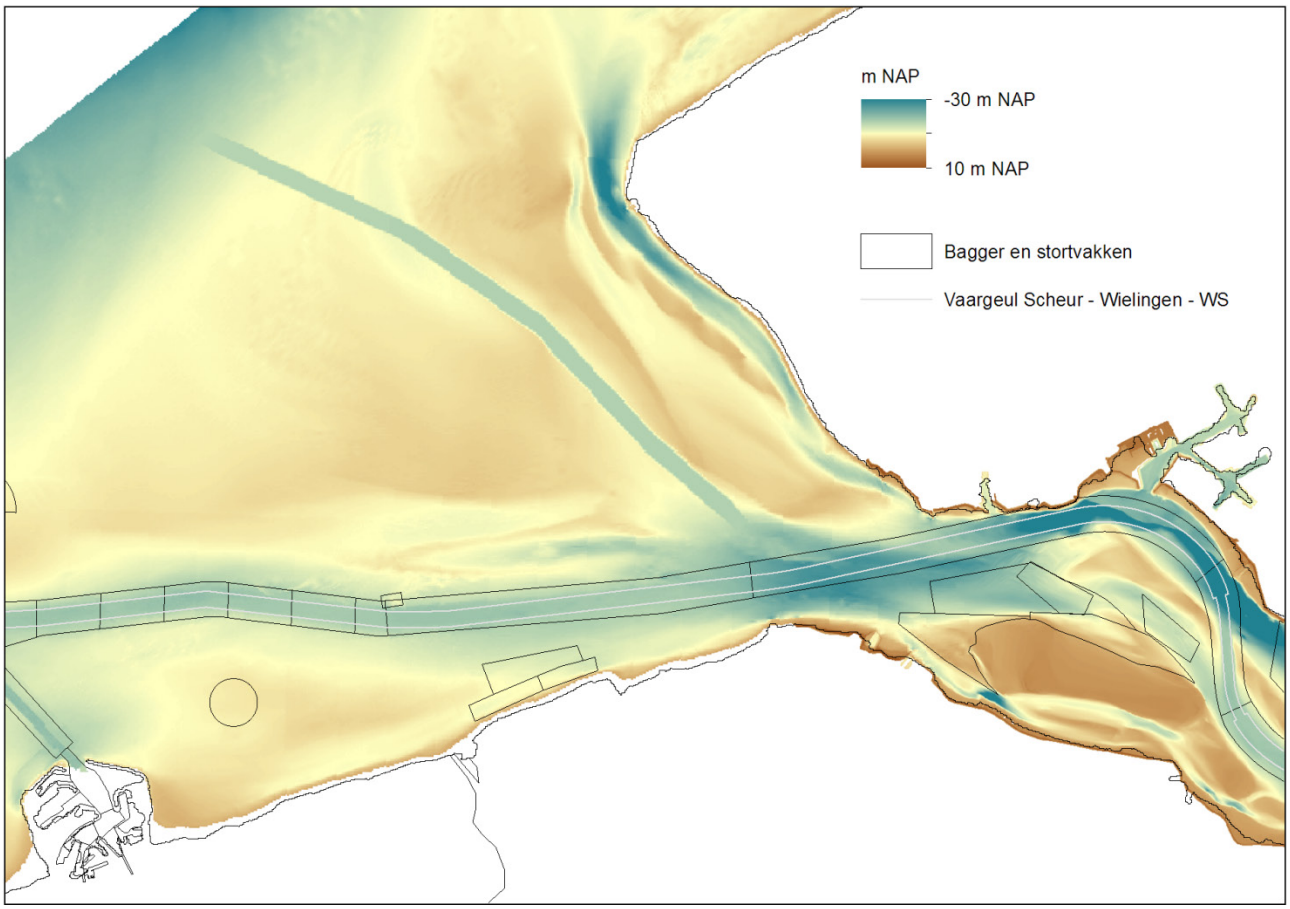
In het kader van de stuurgroep Toegankelijkheid Scheldemonding (TSM) wordt onderzocht of het haalbaar en wenselijk is de Schelde te ontsluiten via een nieuwe toegangsgeul, zie Figuur 1 en Figuur 2. Hierom wordt morfologisch onderzoek verricht naar het gedrag van het natuurlijke mondingsgebied en effecten erop van het verdiepen van de natuurlijke Geul van de Walvischstaart, inclusief doortrekken naar het noordwesten, richting Westpit. Dit onderzoek gebeurt onder meer met verschillende morfologische modellen, door het Waterbouwkundig Laboratorium en Deltares, in opdracht van afdeling Maritieme Toegang. Daarnaast wordt de systeemkennis van de monding vergroot door data-analyses en integrerende analyses.

Figuur 1 - Huidige configuratie van geulen en platen in de Westerscheldemonding.



bathymetrie gebaseerd op vaklodingen uit 2011.

Figuur 2 - Nieuwe toegangsgeul tot de Westerschelde via verdiepte Geul van de Walvischstaart



Recent werden de modellen ingezet voor een eerste verkennend onderzoek naar de hydrodynamische en morfologische impact van de verdieping en uitbreiding van de Geul van de Walvischstaart, met in het bijzonder aandacht voor de vereiste onderhoudsbaggerwerken. De resultaten van deze studie werden op donderdag 22 september 2016 voorgelegd aan een commissie van experts (20160922_V_Geul van de Walvischstaart_ExpertMeeting; verslag is opgenomen als hoofdstuk 4).

Het modelleren van de bodemveranderingen op zowel korte en lange termijn is een complexe uitdaging. Om de onzekerheden op te vangen en in de mate van het mogelijke onderbouwde antwoorden te geven werden er meerdere modellen en modelvarianten ingezet. De modellen verschillen in complexiteit, resolutie, simulatietijd en de beheersvragen waarvoor ze ingezet kunnen worden. De spreiding in de berekende effecten van de aanleg van de geul van Walvischstaart zijn een maat voor de onzekerheid in de voorspelling.

Voorafgaand aan de studies was al bekend dat de interactie van het grootschalige getijsysteem met de geometrie leidt tot twee hoofdstroomrichtingen in de Schelde-monding: een west-oost-richting (Wielingen) en een noordwest-zuidoost-richting langs de kust van Walcheren (Oostgat en Sardijngeul). Deze geulen vereisen nagenoeg geen onderhoud om op diepte te blijven. De Wielingen gaat over in de geul Scheur Oost en West. Deze geul is in de loop van de tweede helft vorige eeuw een aantal malen verdiept. Om de huidige streefdiepte te behouden moet de geul regelmatig gebaggerd worden, zie ook Figuur 3. De Pas van het Zand vormt de verbindingsgeul tussen het Scheur en de Haven van Zeebrugge en moet permanent onderhouden worden.

ONDERZOEKSRESULTATEN

De verruiming van de Geul van de Walvischstaart tot -16,7 m NAP met een 1/30 helling van de geulwanden betekent dat er voor de aanleg ca. 145 miljoen m^3 sediment gebaggerd moet worden. Om de vaargeul door deze Geul van de Walvischstaart te onderhouden zal vervolgens onderhoudsbaggerwerk, van zand en slib, nodig zijn. Een deel van het sediment zal de eerste decennia afkomstig zijn van de taluds die zeer waarschijnlijk langzaamaan verder gaan verflauwen.

De verschillende modellen voorspellen een jaarlijks baggerbezwaar voor onderhoud tussen de 1,6 en 4,4 miljoen m^3, of tussen de 2,5 en 6,4 miljoen ton droge stof (TDS) per jaar. Hiervan is tussen de 1,6 en 3,6 miljoen m^3 (2,5 – 5.7 miljoen TDS) zandige specie, de overige hoeveelheid is eerder slibrijk materiaal, zie Figuur 4. De resultaten van de verschillende modellen liggen in lijn wat betreft de jaarlijkse hoeveelheid zand, behalve dan in de variant van het ZWeM model met eroderende Holocene bron. De overschatting van de zandfractie in deze laatste heeft ook te maken met inspeeleffecten van het model. De grootste onzekerheid betreft de jaarlijkse hoeveelheid slib die zou kunnen sedimenteren in de geul. Dit heeft te maken met de onzekerheid die er bestaat met betrekking tot de sedimentbeschikbaarheid, d.w.z. de omvang en de erodeerbaarheid van de Holocene laag sediment in de omgeving van Zeebrugge. Voor zand lijkt de transportcapaciteit eerder de beperkende factor te zijn. Op basis van de huidige beschikbare meetgegevens is het moeilijk om de rol van de Holocene sliblaag beter te bepalen. Bij het inschatten van de onderhoudsvolumes is rekening gehouden met het voorkomen van stormen.

Alle modellen voorspellen sedimentatie aan de geuluiteinden, zowel de westelijke als de oostelijke. Ze verwachten een verruiming van het centrale deel. Door in het westen het tracé van de geul beter af te stemmen op de richting van de stroming, i.e. in de richting van de geul Deurloo-West, kunnen de baggerinspanningen waarschijnlijk nog verminderd worden.

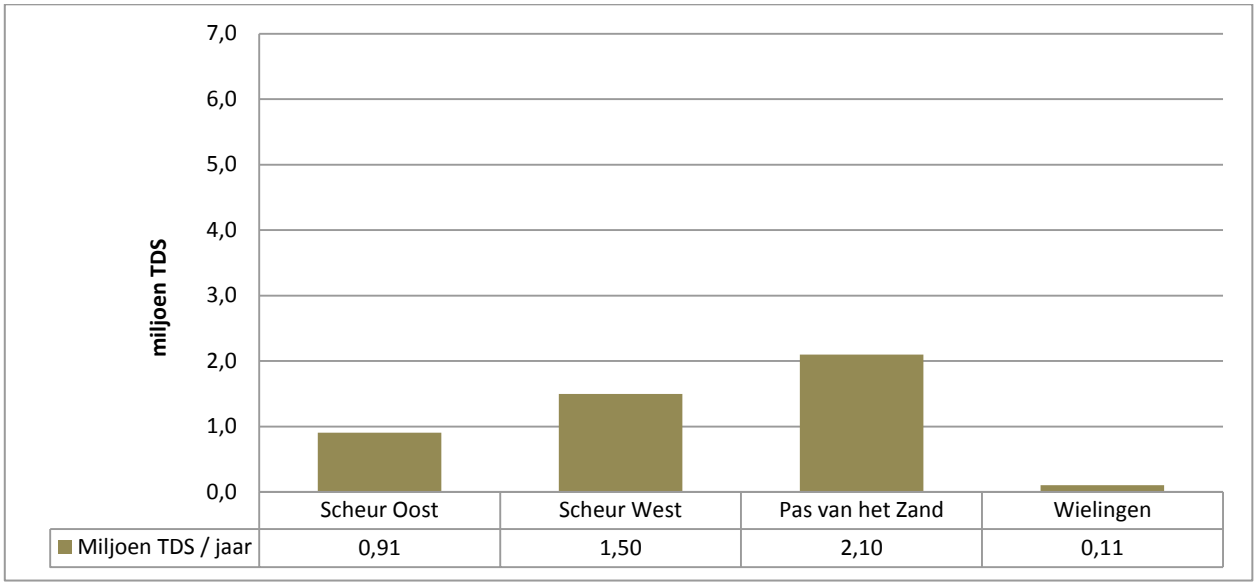
INTERPRETATIE

Centraal en in het zuidoostelijke deel van de geul zijn de stromingscondities vergelijkbaar met deze in de Wielingen, sterke stromingen in de geulrichting. In het noordoosten van de geul zijn de stromingscondities vergelijkbaar met Scheur west: de hoofdstroom gaat nog wel door de geul, maar tijdens kentering is er toch nog een aanzienlijke dwarsstroming waarneembaar. Het is te verwachten dat de baggerinspanningen niet zo hoog zullen zijn als voor Pas van het Zand. Bij het Pas van het Zand staat de stroming tijdens maximale eb en vloed nagenoeg loodrecht op de geul, maar zijn ook de sedimentconcentraties hoger. Let wel: de Geul van de Walvischstaart heeft een aanzienlijke lengte (±22 km).

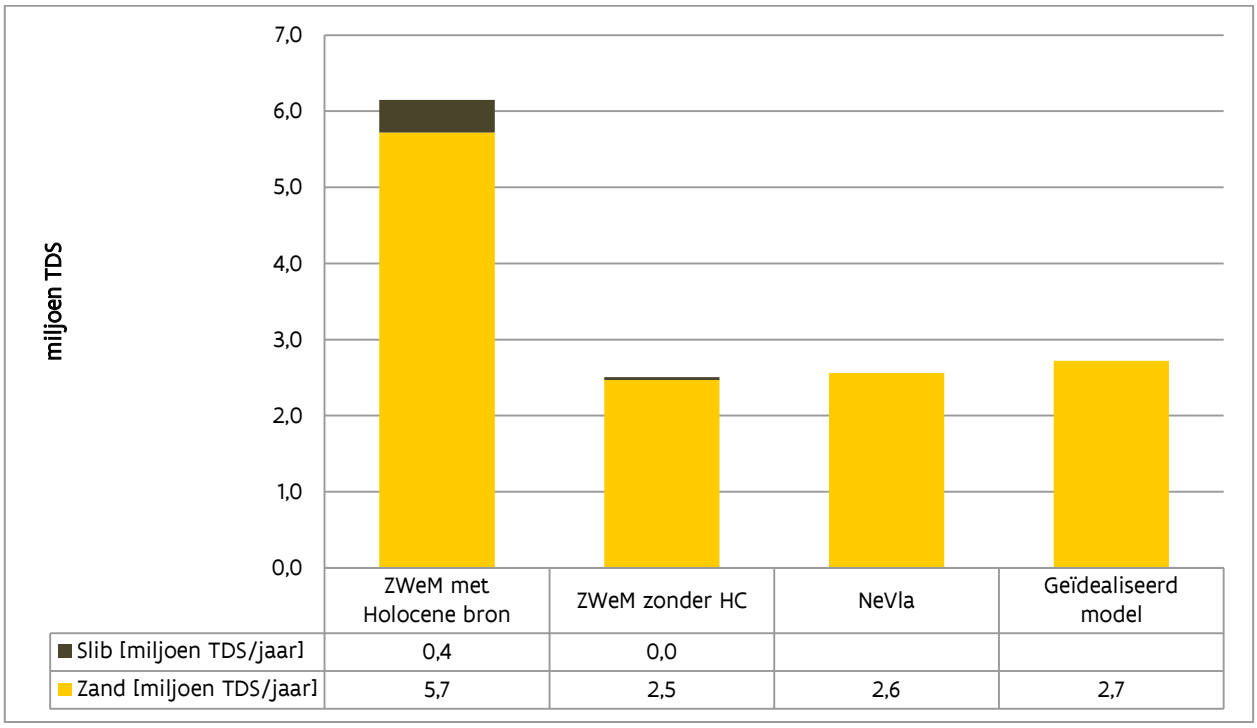
Op basis van de huidige modelresultaten lijkt de aanleg van de geul beperkte invloed te hebben op de natuurlijke ontwikkeling van het mondingsgebied. De debieten in de Wielingen en Oostgat verminderen onder invloed van de geul met ongeveer 10%, respectievelijk 3%. Op de lange termijn is er een licht effect waarneembaar ter hoogte van het Oostgat. Het uitschurend effect en de landwaartse migratie van het Oostgat worden licht getemperd. Dit wordt als positief ingeschat.

De modellen voorspellen belangrijke veranderingen binnen in het estuarium, waarbij het feit dat in de onderzochte scenario's de specie (van zowel de aanleg- als onderhoudsbaggerwerken) uit het systeem onttrokken wordt zeer waarschijnlijk de sturende factor is. Afhankelijk van de stortstrategie zullen de langetermijneffecten in het estuarium anders zijn. Dit is nog niet onderzocht en dat maakt het op dit moment niet mogelijk om uitspraken te doen over te verwachten effecten in het estuarium. Andere invloeden die door experts naar voren zijn gebracht, maar (vanwege rekentijden en doorlooptijd project) nog niet onderzocht zijn, zijn de impact van zeespiegelstijging en de gevoeligheid van de modeluitkomsten voor het rekenen met verschillende zandfracties en nog fijnere gridresoluties.

Figuur 3 - Huidig gemiddeld jaarlijks baggerbezwaar (totaal TDS zand-slib) voor de huidige geulen (periode 2005 - 2014) op basis van BIS[1] data

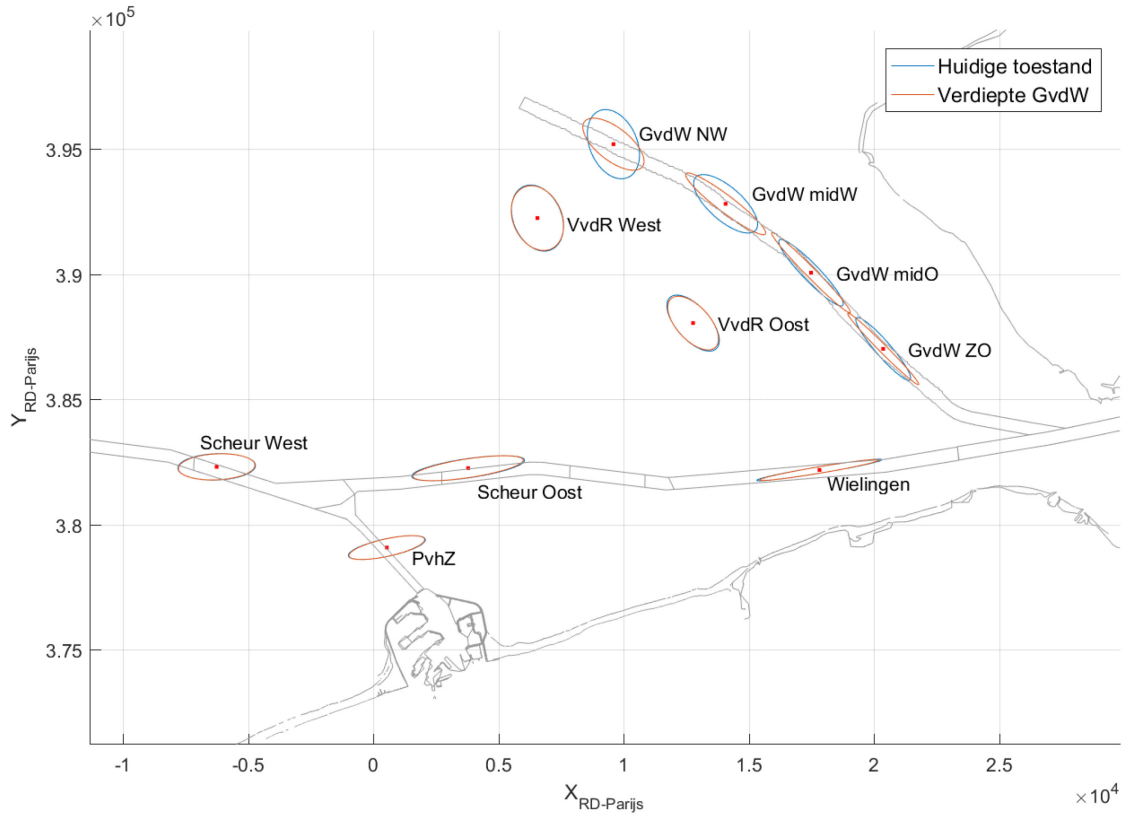


Figuur 4 - Gemodelleerd jaarlijks baggerbezwaar voor Geul van de Walvischstaart op basis van de verschillende modellen



[1] Bagger Informatie Systeem: automatische registraties van baggergegevens aan boord van de sleephoppers

Figuur 5 - Vergelijking van de getij-ellipsen voor de verschillende geulen en op de Vlakte van de Raan (M2-component).



Hoe meer de ellips in de geulrichting staat, hoe beter de geul zichzelf in stand moet kunnen houden. Vergelijking huidige toestand versus scenario met verdiepte Geul van de Walvischstaart

Inhoudstafel

Abstract III
Inhoudstafel IX
Lijst van de tabellen XI
Lijst van de figuren XII
1 Inleiding 1
1.1 Context 1
1.2 De ingreep 3
1.3 Belangrijke beperkingen 4
1.4 Leeswijzer 4
2 Modelbeschrijving 5
2.1 3D zand-slib ZWeM model 5
2.2 2DH ZWeM-DD zand model 8
2.3 2DH zand NeVla model, gehele estuarium 9
2.4 WL-geïdealiseerd 2DH model 11
3 Resultaten 17
3.1 Effecten op hydrodynamica 17
3.1.1 Stroomsnelheden (Zand-slib ZWeM 3D) 17
3.1.2 Getijellipsen (Zand-slib ZWeM 3D) 20
3.1.3 Getijvolumes (Zand-slib ZWeM 3D) 21
3.1.4 Golfhoogte en –richting (Zand-slib ZWeM 3D) 22
3.1.5 Bodemschuifspanning (Zand-slib ZWeM 3D) 25
3.1.6 Getijvoortplanting Westerschelde (2DH zand-NeVla) 28
3.2 Effecten op sedimentdynamiek 30
3.2.1 Zand- en slibtransport (2DH zand-NeVla, Zand-slib ZWeM 3D) 30
3.2.2 Sedimentconcentraties en slibmassa in en op de bodem (Zand-slib ZWeM 3D) 33
3.2.3 Stormeffecten (Zand-slib ZWeM 3D) 36
3.2.4 Baggerbezwaar (Zand-slib ZWeM 3D) 37
3.3 Middellange-termijn morfologische effecten 39
3.3.1 Grootschalige bodemverandering tussen 2012 en 2042 (Delft3D-NeVla model) 39
3.3.2 Morfologische ontwikkeling Geul van de Walvischstaart (Delft3D-NeVla model) 41
3.3.3 Taludontwikkeling Geul van de Walvischstaart (ZWeM-DD model) 45

3.3.4 Morfologische ontwikkeling Oostgat (Delft3D-NeVla model) 48
3.3.5 Stormeffect (2DH ZWeM-DD model) 49
3.4 Lange-termijn effecten: WL-geïdealiseerd model 51
3.4.1 Morfodynamische evolutie nieuwe geul 51
3.4.2 Effecten op de morfologische evolutie monding en estuarium 57
3.4.3 Gevoeligheid voor bedslope parameter α_{BN} 58
4 Verslag expert meeting 22 september 2016 59
4.1 Discussieronde 59
5 Conclusies 62
5.1 Is de nieuwe geul voldoende stabiel? Wat is de geschatte omvang van de onderhoudsbaggerwerken? 62
5.2 Wat zijn de gevolgen voor de rest van het estuarium, vooral op de lange termijn ontwikkeling van de morfologie? 63
Referenties 64
Appendix A: Memo ter voorbereiding van de expertmeeting van 22/09/2016 ..... A1
Onderzoeksvragen en voorlopige antwoorden A1
Appendix B: Ontwikkeling van geulprofielen in de Westerscheldemonding A8

Lijst van de tabellen

Tabel 1 - Overzicht van de verschillen tussen de gebruikte modellen. Zie verder Hoofdstuk 2. 2
Tabel 2 - Overzicht gebruikte parameters in het geïdealiseerd model. 12
Tabel 3 - Overzicht experimenten in het geïdealiseerd model. 16

Lijst van de figuren

Figuur 1 - Huidige configuratie van geulen en platen in de Westerscheldemonding. III

Figuur 2 - Nieuwe toegangsgeul tot de Westerschelde via verdiepte Geul van de Walvischstaart IV

Figuur 3 - Huidig gemiddeld jaarlijks baggerbezwaar (totaal TDS zand-slib) voor de huidige geulen (periode 2005 - 2014) op basis van BIS data VI

Figuur 4 - Gemodelleerd jaarlijks baggerbezwaar voor Geul van de Walvischstaart op basis van de verschillende modellen VI

Figuur 5 - Vergelijking van de getij-ellipsen voor de verschillende geulen en op de Vlakte van de Raan (M2-component). VII

Figuur 6 - De verdiepte Geul van de Walvischstaart (bodemligging ZWeM-model, diepte t.o.v. NAP in meters) 3

Figuur 7 - Modeldomein van het ZWeM-model. 6

Figuur 8 - Roosteroriëntatie en resolutie in de verdiepte Geul van de Walvischstaart. 6

Figuur 9 - Rekenrooster 2D ZWeM-DD zand model 8

Figuur 10 - Overzicht van het 5 domeinen Delft3D-NeVla model. 9

Figuur 11 - Profieldoorsnedes van het noordelijke, centrale en zuidelijke deel van de (verdiepte) Geul van de Walvischstaart. 10

Figuur 12 - Gebruikte grid in het geïdealiseerd model. 12

Figuur 13 - a) Gemeten bodem in de monding en het estuarium. (b-f) Snapshots van de bodem evolutie tijdens de model spin-up. g) Zoom in op gemodelleerde bodem na 400 jaar. 13

Figuur 14 - Zoals in Figuur 13, maar in het geval van golven uit het noordwesten. 14

Figuur 15 - De uiteindelijke bodem die verkregen is uit de model spin up (na 400 jaar) wordt gebruikt om de nieuwe geul te creëren. 15

Figuur 16 - Gebruikte grid om de nieuwe geul aan te leggen. Hiervoor is het grid een factor 3 keer verfijnd in het interesse gebied. 15

Figuur 17 - Stroomsnelheid en –richting tijdens hoogwaterkentering. 17

Figuur 18 - Stroomsnelheid en –richting tijdens piek ebstroomsnelheid. 18

Figuur 19 - Stroomsnelheid en –richting tijdens. 18

Figuur 20 - Stroomsnelheid en –richting tijdens piek vloedstroomsnelheid. 19

Figuur 21 - Waterstand (boven), significante golfhoogte (midden) en diepte-gemiddelde stroomsnelheid (onder) voor de referentie (blauw), de verdieping (rood) en het verschil (groen) op een meetpunt in de Geul van de Walvischstaart. 20

Figuur 22 - Vergelijking van de getij-ellipsen (M2-component) voor de verschillende bestaande geulen en de nieuwe Geul van de Walvischstaart. 21

Figuur 23 - Procentuele verandering in getijvolumes door de verdieping ten opzichte van de referentie, voor vloed (F) en eb (E) voor verschillende raaien. 22

Figuur 24 - Procentuele verandering in significante golfhoogte door de verdieping ten opzichte van de referentie (midden) en golfrichting (onder) voor een golfconditie met een significante golfhoogte van 1,4 m en een golfrichting van 224 graden N bij station Vlakte van de Raan. 23

Figuur 25 - Procentuele verandering in significante golfhoogte door de verdieping ten opzichte van de referentie (midden) en golfrichting (onder) voor een golfconditie met een significante golfhoogte van 1,9 m en een golfrichting van 358 graden N bij station Vlakte van de Raan 24

Figuur 26 - Verschil in gemiddelde significante golfhoogte gedurende de maand mei 2014, verdieping ten opzichte van de referentie. 25

Figuur 27 - Bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming en turbulente diffusie door golven (gemiddelde bodemschuifspanning). 26

Figuur 28 - Maximale bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming en golven. 27

Figuur 29 - Berekende amplitudes van het M2 getij voor verschillende scenario's. 28

Figuur 30 - Berekende fases van het M2 getij voor verschillende scenario's. 29

Figuur 31 - Berekende relatieve amplitudes van het M4 en M2 getij voor verschillende scenario's. 29

Figuur 32 - Berekende relatieve fases van het M4 en M2 getij voor verschillende scenario's. 30

Figuur 33 - Verschillen in gemiddeld totaal zandtransport [m3/s/m] voor het NeVla-model (boven), het ZWeM-model met Holocene bron (midden) en het ZWeM-model met verminderde depositie (onder). 31

Figuur 34 - Cumulatief zandtransport door de ingang van de Westerschelde nabij Vlissingen in de periode 2012-2042. 32

Figuur 35 - Verandering in netto slibtransport, scenario met verdieping ten opzichte van de referentie, voor de modelvariant met Holocene bron (links) en de modelvariant met verminderde depositie (rechts). Een toename heeft een positief teken. 33

Figuur 36 - Verandering in sedimentconcentratie nabij de bodem (ZWeM 3D). 34

Figuur 37 - Verandering in slibmassa op de bodem (in de flufflaag). 35

Figuur 38 - Verandering in slibmassa in de bodem (in de onderlaag). 36

Figuur 39 - Verandering in bodemligging na een standaard maand (links: mei 2014) en een maand met zware storm (rechts: december 2013 inclusief Sinterklaasstorm) voor de modelvariant met Holocene bron. 37

Figuur 40 - Maandelijks baggerbezwaar (TDS) van zand (geel) en slib (bruin) voor de referentiesimulatie (boven), de simulatie met verdieping en normale zandlaag in de Geul van de Walvischstaart (onder) voor de variant met Holocene bron voor een periode van 1 maand. 38

Figuur 41 - Baggerbezwaar (TDS) van zand (geel) en slib (bruin) voor de referentiesimulatie (boven) en de simulatie met verdieping (onder) voor de variant met verminderde depositie voor een periode van 1 maand. 38

Figuur 42 - Initiële bodemligging gebaseerd op de 2012 metingen en inclusief de Verdieping van de Geul van de Walvischstaart (Scenario GvdW1) 39

Figuur 43 - Berekende bodemligging in 2042 waarbij de Geul van de Walvischstaart vaargeul onderhouden wordt (Scenario GvdW1). 40

Figuur 44 - Berekende cumulatieve sedimentatie (rood) en erosie (blauw) tussen 2012 en 2042 voor Scenario GvdW1. 40

Figuur 45 - Verschil tussen de berekende bodems in 2042 volgens Scenario GvdW1 met de Geul van de Walvischstaart vaargeul en de referentieberekening zonder vaargeul. 41

Figuur 46 - Initiële bodemligging gebaseerd op de 2012 metingen en inclusief de Verdieping van de Geul van de Walvischstaart (Scenario GvdW1) 42

Figuur 47 - Berekende bodemligging in 2042 waarbij de Geul van de Walvischstaart vaargeul onderhouden wordt (Scenario GvdW1). 42

Figuur 48 - Berekende cumulatieve sedimentatie (rood) en erosie (blauw) tussen 2012 en 2042 voor Scenario GvdW1. 43

Figuur 49 - Berekende bodemligging in 2042 waarbij de Geul van de Walvischstaart vaargeul niet onderhouden wordt (Scenario GvdW2). 43

Figuur 50 - Berekende diepte-gemiddelde stroomsnelheden in de Schelde-monding gedurende inkomend (boven) en uitgaand getij (onder). 44

Figuur 51 - Cumulatieve onderhoudsvolumes voor het oorspronkelijke (Scenario GvdW1) en aangepaste Geul van de Walvischstaart vaargeul tracé (Scenario GvdW3) zoals berekend met het Delft3D-NeVla model. 45

Figuur 52 - Ontwikkeling van profielen dwars op de Geul van de Walvischstaart vaargeul tussen 2012 en 2020 zoals berekend met het 2DH ZWeM-DD model (Scenario GvdW-DD3). 46

Figuur 53 - Ligging dwarsraaien t.b.v. analyse geulhellingen. Diepte in m NAP. Profiel 3 en 5 zijn weergeven in onderstaande figuren, de overige profielen zijn opgenomen in Appendix B. 46

Figuur 54 - Morfologische ontwikkeling Profiel 3: Scheur Oost en ruwe inschatting van de helling. Links=Zuid, rechts=Noord. 47

Figuur 55 - Morfologische ontwikkeling Profiel 5: Geul van de Walvischstaart (huidige) en ruwe inschatting van de helling. Links=Zuid, rechts=Noord. 47

Figuur 56 - Dwarsprofielen van het Oostgat in 2012 en in 2042 berekend met het Delft3D-NeVla model met (Scenario GvdW1) en zonder (Ref) Geul van de Walvischstaart vaargeul. 48

Figuur 57 - Berekende sedimentatie/erosie voor de periode mei 2014 (Scenario GvdW-DD1). 49

Figuur 58 - Berekende sedimentatie/erosie voor de periode december 2013 (Scenario GvdW-DD2). 50

Figuur 59 - Dwarsprofielen van de Geul van de Walvischstaart; initieel en berekend met het ZWeM-DD model voor de maand mei 2014 (Scenario GvdW-DD1) en de maand december 2013 (Scenario GvdW-DD2). 50

Figuur 60 - Bodem evolutie zonder baggeronderhoud van het mondingsgebied in het geval van geen (links) en een nieuwe geul (rechts). 52

Figuur 61 - Sedimentatie/erosie plots in het geval van geen (links) en een nieuwe geul (rechts) en in het geval zonder baggeronderhoud. Contour levels representeren een diepte van 15 m. 53

Figuur 62 - Sedimentatie/erosie plots zonder baggeronderhoud (rechts) na 200 jaar in het geval van andere diepten van de nieuwe geul (20m, 30m, 40 en 50m). Linker panelen geven de bodem weer op t=0..... 54

Figuur 63 - (a-b) Sedimentatie/erosie plots in de gevallen zonder (a) en met baggeronderhoud (b). (c-d) Cumulatieve (c) en jaarlijkse (d) baggervolume van zand dat nodig is om de nieuwe geul op de initiële streefdiepte te houden (in dit geval 40m) 55

Figuur 64 - a) Gebruikte initiële bodempatroon verkregen uit het spin-up experiment in het geval van golven uit het noordwesten. b-d) Sedimentatie/erosie plots tot 200 jaar. 56

Figuur 65 - Debiet Q (panel b) en zandtransport q (panel c) door de 3 hoofdgeulen (Secties Wiel-S3, NewNav-S3 en Oostgat-S2 in panel a). 57

Figuur 66 - Bodem evolutie langs de cross-sectie D (~Oostgat) in het geval zonder (panel a) en met de nieuwe geul (panel b). 58

Figuur 67 - Verandering van zandvolume (tov t=0) van de Westerschelde (zwarte lijnen) en de Zeeschelde (blauwe lijnen) in de situaties zonder (doorgetrokken) en met de nieuwe geul (gestippeld). Negatief betekent export van zand..... 58

Figuur 68 - Snapshots sedimentatie/erosie op tijdstippen t=10, 50, 150 jaar voor bedslope parameters α_{BN}=15, 1.5 en 25. De contourlijnen geven de bathymetrie weer (-15 m NAP). Er wordt niet gebaggerd in het model..... 61

Figuur 69 - Jaarlijkse baggervolumes van zand en slib uitgedrukt in volume (bovenste figuur) en uitgedrukt in massa (onderste figuur) voor de verschillende modelsimulaties..... A2

Figuur 70 - Cumulatieve baggervolumes van zand in de Geul van de Walvischstaart voor de periode 2012-2042 voor de simulatie met de gemeten initiële bodemligging (blauw) en de berekende initiële bodemligging (rood). A3

Figuur 71 - Jaarlijkse baggervolume van zand verkregen met het geïdealiseerd model. A3

Figuur 72 - Cumulatieve erosie en sedimentatie voor een simulatie met het ZWeM-model zonder baggeren en storten na 30 dagen..... A4

Figuur 73 - Morfologische ontwikkeling Profiel 1: Scheur Oost. A8

Figuur 74 - Morfologische ontwikkeling Profiel 2: Scheur Oost. A9

Figuur 75 - Morfologische ontwikkeling Profiel 4: Sardijngeul. A10

Figuur 76 - Morfologische ontwikkeling Profiel 6: Geul van de Walvischstaart..... A11

Figuur 77 - Morfologische ontwikkeling Profiel 7: Oostgat. A12

1 Inleiding

1.1 Context

De Vlaamse overheid (afdeling aMT) wil graag weten of de Geul van de Walvischstaart een mogelijk alternatief zou kunnen worden in de toekomst als toegangsgeul naar de Scheldehavens door het mondingsgebied. Hiervoor is systeemkennis nodig die met literatuuronderzoek, data-analyses en verschillende modelsystemen is verzameld. Onderzoeksresultaten zijn de afgelopen twee jaar in verschillende bezettingen besproken met het Havenbedrijf Antwerpen, Rijkswaterstaat en externe experts.

Op 15 maart 2016 is in een expertworkshop vertrouwen uitgesproken in verschillende modelinstrumentaria om de systeemkennis uit te breiden, in het bijzonder gericht op de reactie van het systeem op scenario's waarbij de Geul van de Walvischstaart is verdiept. De opdrachtgever heeft vervolgens besloten dat de scenario's met het instrumentarium verder dienen te worden onderzocht. In het initiële ontwerp wordt de bestaande Geul van de Walvischstaart verdiept naar -16.7 m NAP en verder doorgetrokken naar het noordoosten. Deze ingreep is in meer detail beschreven in Hoofdstuk 1.2. Het ontwerp van de geul werd aangereikt door afdeling Maritieme toegang en is gebaseerd op eerdere nota's in kader van het *Gemeenschappelijke Nautische Beheer op de Westerschelde*, waar een gecombineerd loodsstation Westpit en geul worden vooropgesteld (M. Mesuere, Administratie Waterwegen en Zeewezen, afdeling Scheepvaartbegeleiding, 2002). Het vooropgestelde tracé in de nota is langs westelijke zijde gericht op het loodsstation.

Om te komen tot besluiten of een verdiepte Geul van de Walvischstaart een verder te ontwikkelen project kan zijn, dienen twee (clusters van) vragen beantwoord te worden:

A. Is de nieuwe geul voldoende stabiel? Wat is de geschatte omvang van de onderhoudsbaggerwerken? (vraag 1 en 2)
B. Wat zijn de gevolgen voor de rest van het estuarium, vooral op de lange termijn ontwikkeling van de morfologie? (vraag 3-6)

De meer precies geformuleerde vragen zijn:

1. Welke baggervolumes kunnen we verwachten in de verdiepte Geul van de Walvischstaart?

    1.1 Zijn deze volumes vooral zandig of slibrijk?

    1.2 Hoe veranderen de baggervolumes op de lange termijn?

    1.3 Waar binnen de Geul van de Walvischstaart vindt de meeste sedimentatie plaats?

    1.4 Hoe stabiel is de Geul van de Walvischstaart in het geval van een extreem event (hele hoge golven)?

    1.5 Hoe kan de verdeling van gebaggerde specie bovenstaande bevindingen beïnvloeden?

2.1 Welk effect heeft de verdieping van de Geul van de Walvischstaart op de debietverdeling van de 3 grote geulen (Geul van de Walvischstaart, Oostgat, Wielingen) in het mondingsgebied?

2.2 In hoeverre is een verdiepte Geul van de Walvischstaart in staat zichzelf in stand te houden?

3. Wat is het effect van de verdieping van de Geul van de Walvischstaart op de getijvoortplanting in het Schelde-estuarium?

4. Wat is het lange-termijn effect op de morfologie?

    4.1 Wat is het grootschalig effect in het mondingsgebied en de Westerschelde?

    4.2 Kleinschalig effect op de geulhelling van de Geul van de Walvischstaart en aangrenzende ondiepe zones?

4.3 Heeft verdieping van de Geul van de Walvischstaart een effect op de ontwikkeling van het Oostgat?

5. Is er een effect van de verdieping op de (grootschalige) slibhuishouding? En daarbij aansluitend, is er een invloed op de getij-asymmetrie?

6. Zijn er effecten op de golfhoogte in de monding en heeft dit gevolgen voor de maatgevende belastingen op de hoogwaterbescherming?

Het modelinstrumentarium dat op 15 maart was behandeld en ook gebruikt in rapport om bovenstaande vragen te beantwoorden bestaat uit drie verschillende numerieke modelsystemen:

1. **ZWeM**: Een zand-slib-model waarmee in detail op korte termijn (maand) gerekend kan worden;
2. **NeVla:** Een morfologisch model waarin alleen met zand wordt gerekend om op de middellange termijn (± 30 jaar) de morfologische ontwikkeling te begrijpen, uitgaand van de daadwerkelijke gemeten bodems;
3. **WL-Geïdealiseerd model**: Een morfologisch model (ook alleen zand) waarmee de morfologische ontwikkeling op lange termijn (honderden jaren) gemodelleerd wordt, uitgaand vanuit een geïdealiseerde weergave van het estuarium. Het model wordt eerst vanuit een vlakke bodem gestart totdat een min of meer stabiele bodem bereikt wordt die de grootschalige kenmerken van het systeem representeert. Vervolgens wordt deze bodem gebruikt om de nieuwe geul aan te leggen.

Aan deze lijst is een nog een variant op het ZWeM-model toegevoegd: **ZWeM-DD**. Dit is een 2DH morfologisch zandmodel van het mondingsgebied met een verfijnd rekenrooster ter hoogte van de verdiepte Geul van de Walvischstaart. Het model is gebruikt om de evolutie van de taluds op de korte tot middellange termijn te onderzoeken.

De gebruikte modellen worden uitgebreider besproken in §1.4 en samengevat in onderstaande tabel.

Tabel 1 - Overzicht van de verschillen tussen de gebruikte modellen. Zie verder Hoofdstuk 2.

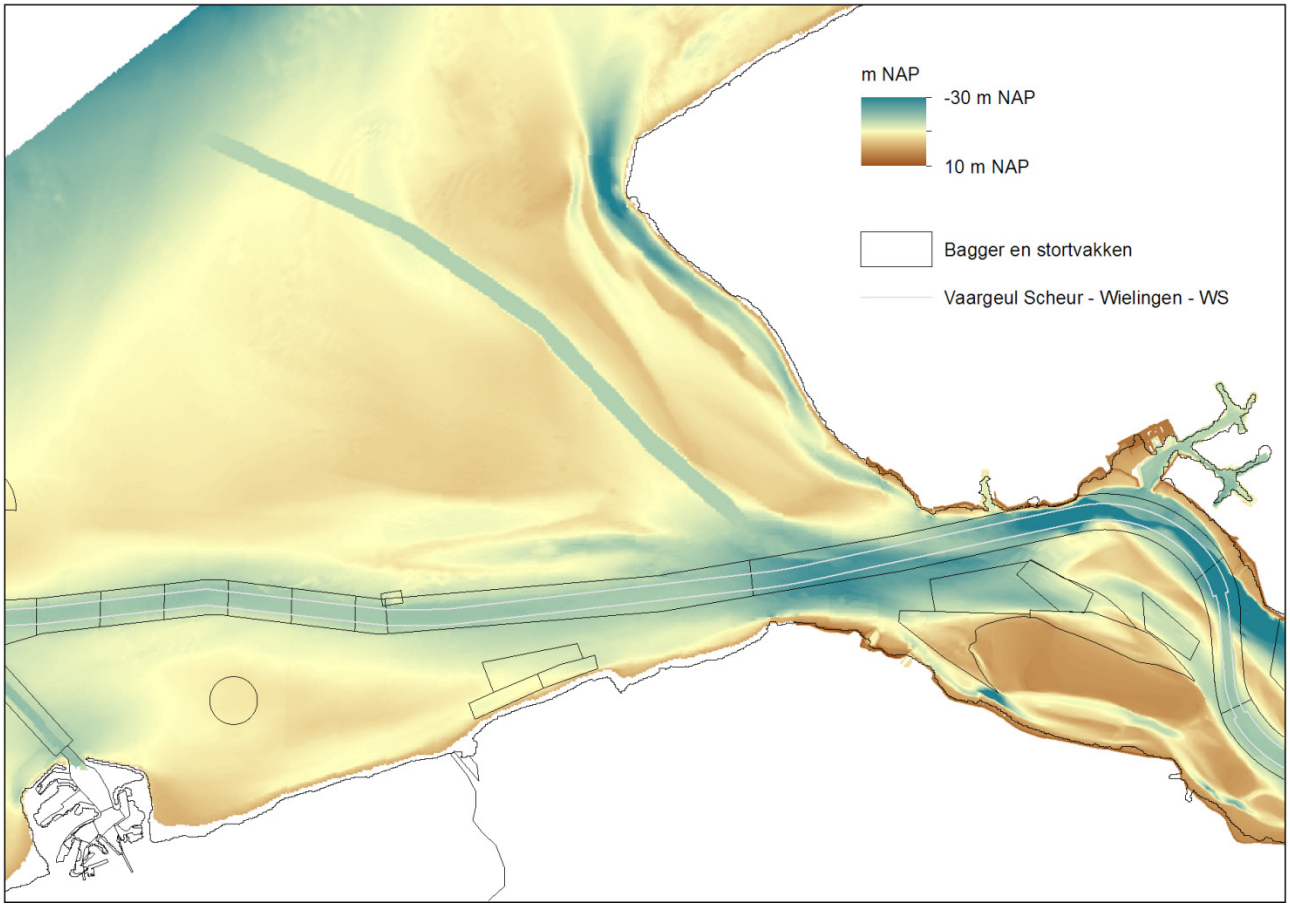
	ZWeM	ZWeM-DD	NeVla	WL-Geïdealiseerd
Domein	Monding	Monding	Noordzee - Gent	Noordzee-Gent
Sediment	Zand en slib	Zand	Zand	Zand
Periode van doorrekenen	1 maand	1 maand – 8 jaar	30 jaar	100-200 jaar
Golfklimaat	Tijdserie	Tijdserie	Geïdealiseerd; 4 condities	Geïdealiseerd, verschillende condities
Morfologische factor	1	1 – 100	104	100-200
Dimensies	3D, 10 lagen	2DH	2DH	2DH

1.2 De ingreep

Voor de verdieping van de bestaande Geul van de Walvischstaart is door aMT een nieuwe bodemligging aangeleverd, zie Figuur 6. De geul is verdiept tot -16,7m NAP en wordt gekenmerkt door vrij steile geulhellingen met een verhouding van 1/10. Op basis van de nieuwe bodemligging is door Deltares een polygoon getekend, die wordt gebruikt in de bagger- en stortmodule. De streefdiepte die binnen de polygoon wordt opgelegd bedraagt eveneens -16,7 m NAP.

De modelresultaten zijn gebaseerd op een geul met taluds met een initiële helling van 1/10. Een analyse op basis van beschikbare boringen toont aan dat een helling van 1/10 stabiel is: bij een talud van 1/10 is er geen zettingsvloeiing te verwachten (Mastbergen, 2016). Echter door erosie kan men wel verwachten dat op de middellange tot lange termijn de taluds van de geul zullen verflauwen. De aanleg van een geul met taluds van 1/10 vereist ca. 109 miljoen m³ aanlegbaggerwerken. Voor een geul met een helling 1/30 bedraagt de aanleg ca. 145 miljoen m³. Een aanleg helling van 1/30 is baggertechnisch gezien waarschijnlijk realistischer om aan te leggen. Niettegenstaande is er in de modellering uitgegaan van een aanleghelling van 1/10.

Figuur 6 - De verdiepte Geul van de Walvischstaart (bodemligging ZWeM-model, diepte t.o.v. NAP in meters)



1.3 Belangrijke beperkingen

Vooruitlopend op hoofdstuk 4 wordt nu al benadrukt dat, er gezien het karakter van het onderzoek en op verzoek van de opdrachtgever, gewerkt is met scenario's waarin het onttrokken sediment (zowel van de initiële ingreep als van het onderhoud) niet wordt teruggestort. Het is namelijk bekend dat de keuzes in het storten van baggerspecie een zeer sturende factor zijn in de ontwikkeling van een estuarium.

Dit feit heeft ook betekenis voor de interpretatie die aan de antwoorden op de vragen in §1.1 moet worden gegeven. De eerste twee vragen (over stabiliteit en onderhoud aan een verdiepte geul) zijn voor de opdrachtgever de meest urgente vragen en kunnen ook grotendeels behandeld worden zonder keuze in wat met het gebaggerde materiaal gebeurt. Om de gevoeligheid voor het laatste toch te kunnen begrijpen is echter wel vraag 1.5. ingevoegd ("Hoe kan de verdeling van gebaggerde specie bovenstaande bevindingen beïnvloeden?").

Vragen 3 tot en met 6 zijn uiteraard eveneens belangrijk, maar deze kunnen niet voldoende behandeld worden omdat de aanleg- en onderhoudsspecie uit het systeem verdwijnt. Het is de verwachting dat door het slim terugstorten van baggerspecie bepaalde effecten gerealiseerd kunnen worden die een positief effect kunnen hebben op de lange termijn morfologie van het estuarium. De huidige scenario's met volledige sediment onttrekking geven het worst-case scenario.

1.4 Leeswijzer

In 2 en 3 worden achtereenvolgens gebruikte modellen en de modelresultaten besproken. De resultaten zijn voorgelegd aan een Vlaamse – Nederlands commissie van experten. Het verslag van deze expert meeting is opgenomen in hoofdstuk 4. Voorafgaandelijk aan de expert meeting werd in samenspraak met de opdrachtgever een lijst met onderzoeksvragen vastgelegd. De lijst met beheersvragen en voorwaardelijke antwoorden[2] is opgenomen in 1.1. Een samenvatting van de discussie en opmerkingen van de experten is weergegeven in 4.1.

[2] Op basis van de resultaten zoals deze gekend waren op het moment van de expertmeeting. Later in het onderzoek zijn de conclusies bijgesteld op basis van voortschrijdend inzicht

2 Modelbeschrijving

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen zijn vier numerieke modellen ingezet:

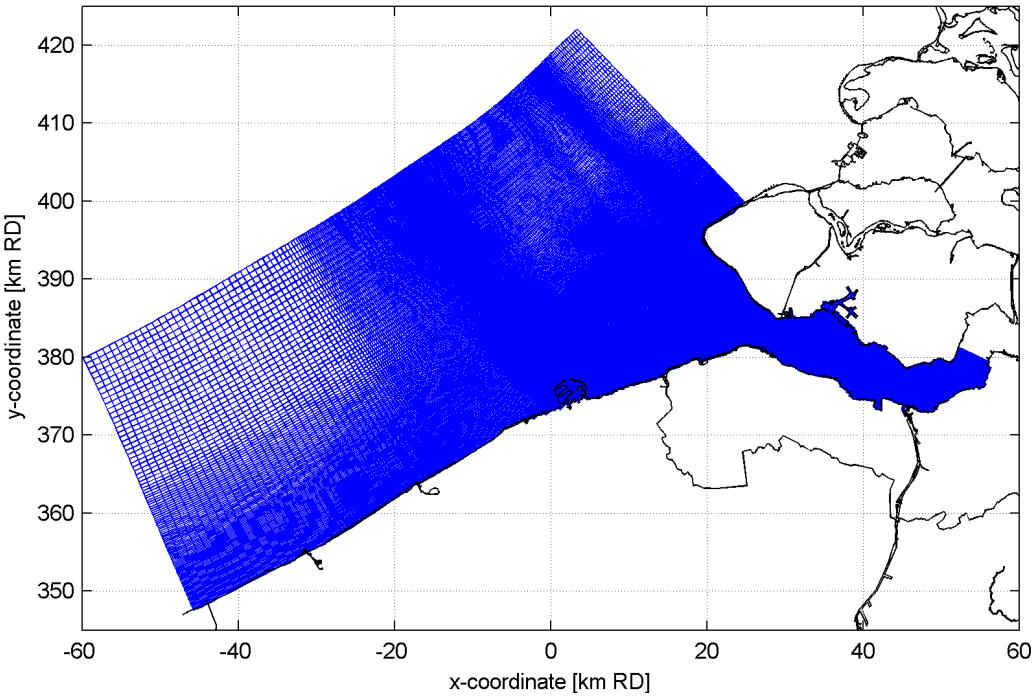
1. **ZWeM**: een 3D model van het mondingsgebied om het slibtransport te simuleren, waarbij ook zand wordt meegenomen. Dit model geeft antwoorden voor het gedrag net na de ingreep.
2. **ZWeM-DD:** een 2DH model van het mondingsgebied om zandtransport en morfologische ontwikkeling te simuleren. Het rekenrooster is met ca. 20 m x 20 m ter plekke van de verdieping fijn genoeg om de ontwikkeling van het talud te simuleren. Dit model geeft antwoorden op de korte tot middellange termijn (tot ± 8 jaar).
3. **NeVla**: een 2DH model van het gehele Schelde-estuarium vanaf Gent tot op de Noordzee om het zandtransport en de morfologische ontwikkeling te simuleren. Dit model geeft antwoorden voor de middellange termijn (30 jaar). Ook kan het effect van de verdieping op de hydrodynamica in de Westerschelde en de Zeeschelde worden onderzocht.
4. **WL-geïdealiseerd model**: een 2DH model vanaf Gent tot op de Noordzee waarin zo weinig mogelijk fysische processen worden meegenomen. Centraal in dit model staat het fundamenteel inzicht krijgen in de mogelijke invloeden van het aanleggen van de nieuwe geul op de morfologie van de Scheldemonding en het estuarium op lange tijdschalen (100-200 jaar).

2.1 3D zand-slib ZWeM model

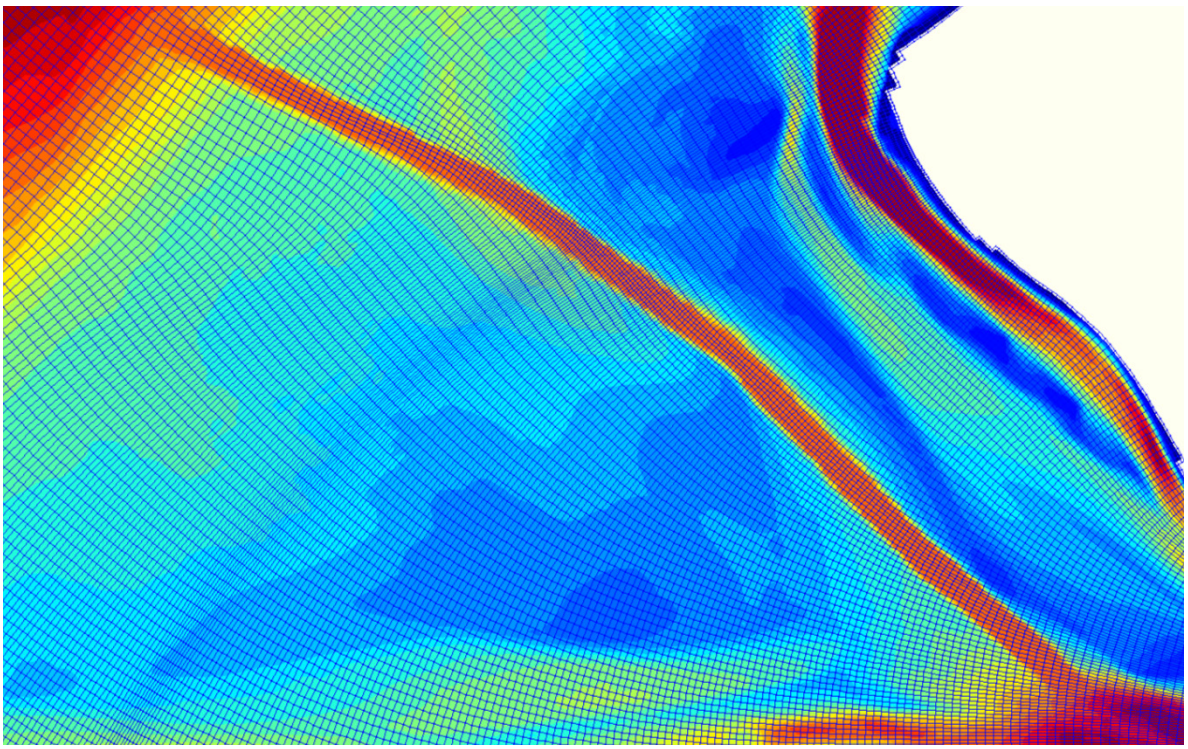
Het 3D zand-slib model van Zeebrugge en de Westerschelde Monding (ZWeM) beslaat het gebied zoals aangegeven in Figuur 7. In de Geul van de Walvischstaart is de roosterresolutie ca. 50-100 bij 75 m, zie Figuur 8. Het rooster betreft een in 2 richtingen 2x verfijnde versie van het originele ZWeM-model, waarvan de modelopzet en kalibratie –o.a. op basis van sedimentconcentraties en baggervolumes- uitvoerig is beschreven in Vroom et al. (2016). De belangrijkste modelkarakteristieken worden hier samengevat.

Het ZWeM-model is in 2D modus gekalibreerd voor het jaar 2014 op waterstanden.. Vervolgens zijn in 3D modus (10 logaritmische σ-lagen) , stroomsnelheden, zoutverdeling , golven en het sedimentmodel gekalibreerd met goede resultaten. Bij het afregelen van het model zijn het netto langstransport in de Noordzee en het troebelheidsmaximum rond Zeebrugge als belangrijke gebiedskenmerken meegenomen. Het model bevat (initieel) een zandige bodem (d_{50} = 200 µm) met een dikte van 30 cm, die belangrijk is om slib in te kunnen bufferen. Onder energetische omstandigheden komt dit slib vrij. Op de bodem kan zich ook slib verzamelen, in de makkelijk erodeerbare *flufflaag*. Het model bevat, naast zand, 3 slibfracties met valsnelheden van 0.5, 2 en 4 mm/s. Deze relatief hoge valsnelheden zijn nodig om de sterke getijsignatuur die uit de troebelheidsmetingen blijkt te kunnen reproduceren en lijkt bovendien overeen te komen met metingen. Het model is voor meerdere jaren ingespeeld om de initieel volledig zandige bodem naar een zand-slibmengsel te laten evalueren dat in dynamisch evenwicht is met de hydrodynamische condities.

Figuur 7 - Modeldomein van het ZWeM-model.



Figuur 8 - Roosteroriëntatie en resolutie in de verdiepte Geul van de Walvischstaart.



Om voldoende hoge concentraties in het troebelheidsmaximum te kunnen genereren, zijn er twee modelvarianten met verschillende parameterisaties ontwikkeld.

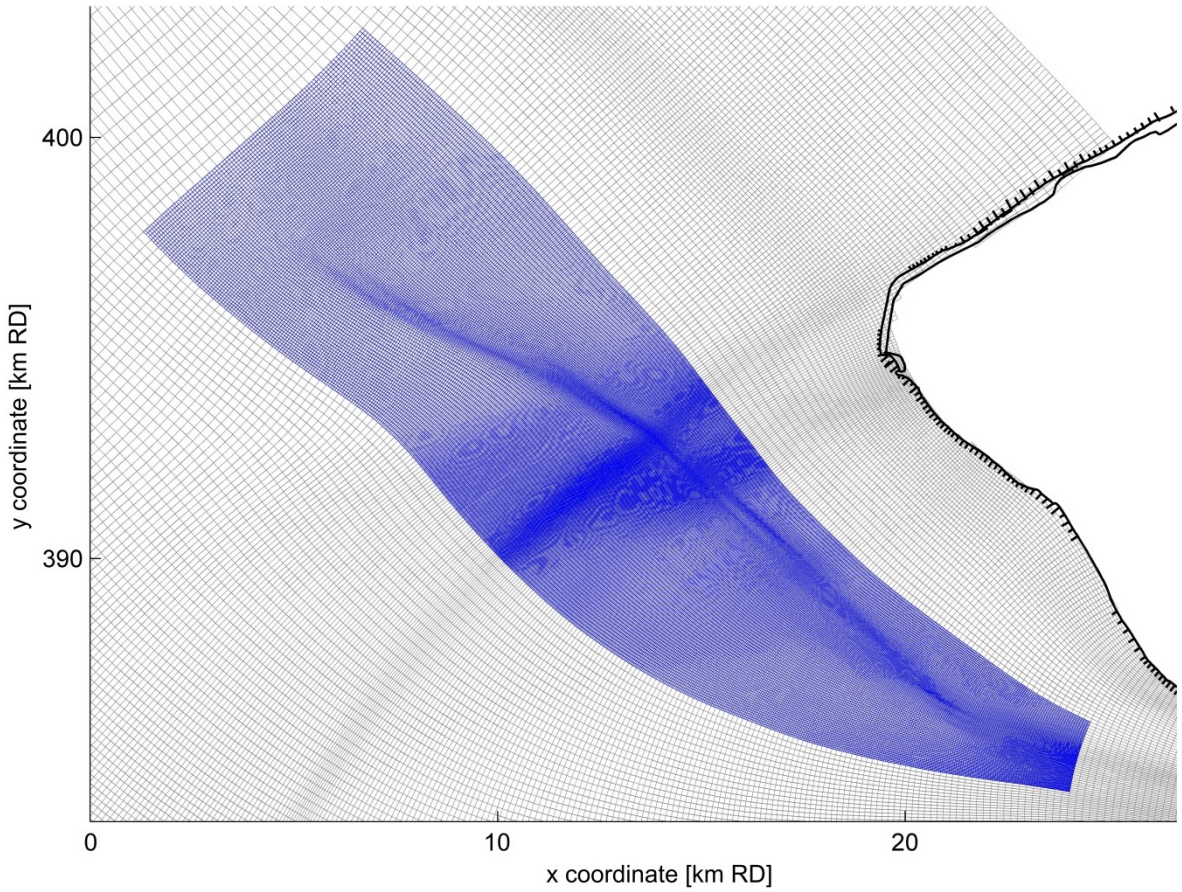
- De ene ('Holocene bron') variant bevat een lokale bron van slib in de bodem voor de haven van Zeebrugge. Uit literatuur (Lauwaert et al. 2006) blijkt dat in de bodem rond Zeebrugge Holocene slibrijke lagen aanwezig zijn, die mogelijk een belangrijke bijdrage kunnen vormen of hebben gevormd aan het troebelheidsmaximum. Het toevoegen van een dergelijke Holocene slibbron aan het model leidt inderdaad tot een toename van de sedimentconcentraties, en daarnaast ook tot baggervolumes waarvan de samenstelling (zand-slib verhouding) in overeenstemming is met metingen. De sedimentconcentraties in deze modelvariant komen goed overeen met metingen halverwege de waterkolom, maar de sedimentconcentratie bij de bodem is aan de lage kant. Omdat een slibrijke bodem gladder is dan een zandige bodem, is in deze modelvariant ook de bodemruwheid ter plaatse van de slibbron verlaagd.
- De andere ('verminderde depositie') variant laat de sedimentconcentraties in de waterkolom toenemen, door de depositie naar de bodem (onderlaag en flufflaag) te verminderen. Als gevolg hiervan nemen de sedimentconcentraties in de onderste laag van de waterkolom toe ('file-vorming') en wordt het sedimentconcentratieprofiel over de waterkolom steiler. De reden om de depositie in het model te verminderen wordt gevormd door (1) de beperkte verticale roosterresolutie bij de bodem (10 logaritmische lagen is niet voldoende) waardoor effecten van de dichtheidskoppeling en hindered settling worden onderschat, (2) de ruimtelijke variabiliteit binnen een rekencel, waardoor niet overal binnen de cel sediment even gemakkelijk kan bezinken, en (3) het gebruik van een constante kritische bodemschuifspanning (in werkelijkheid neemt de kritische bodemschuifspanning toe in de periode na depositie). De variant met verminderde depositie geeft goede overeenstemming tussen de berekende en gemeten sedimentconcentraties bij de bodem en halverwege de waterkolom, maar de baggervolumes zijn in het mondingsgebied zandiger dan op basis van de meetdata mag worden verwacht.

Voor baggervolumes geeft de Holocene bron variant waarden die beter overeenkomen met metingen, terwijl de variant met verminderde depositie de sedimentconcentraties bij de bodem beter reproduceert. Beide modelvarianten zijn ingezet om een inschatting te maken van de effecten van de verdieping van de Geul van de Walvischstaart op de slibdynamiek. Hiervoor is het model gedraaid met tijdseries van afvoeren, getij, wind en golven voor de maand mei 2014, waarvan de golf- en windcondities met meest karakteristiek zijn voor het jaar 2014.

2.2 2DH ZWeM-DD zand model

Het 2DH ZWeM-DD zand model beslaat hetzelfde gebied als het 3D ZWeM model. Middels domeindecompositie (DD) is het rekenrooster opgesplitst in twee domeinen, zie Figuur 9. Het domein om de Geul van de Walvischstaart heeft een resolutie van ca. 20 m x 20 m die hoog genoeg is om goed de taludontwikkeling te simuleren (4-6 roosterpunten langs het talud).

Figuur 9 - Rekenrooster 2D ZWeM-DD zand model



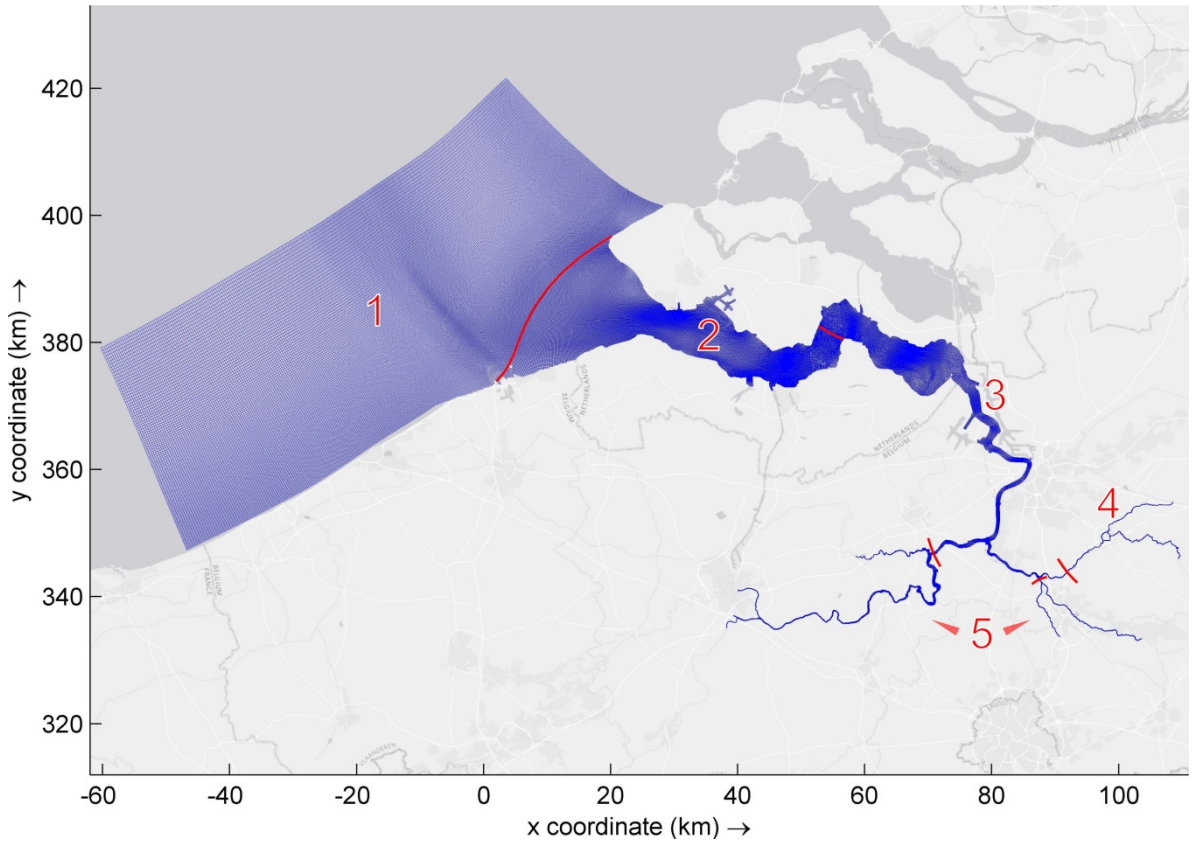
Het 2D ZWeM-DD model heeft grotendeels dezelfde modelinstellingen als het 3D ZWeM model. Ondanks de hogere rekenresolutie dan het 3D ZWeM model is de rekentijd korter omdat 2DH wordt gerekend. Daarom kan het 2D ZWeM-DD zand model worden ingezet om de morfologische ontwikkeling op een tijdsschaal van ~8 jaar te berekenen met een hoge resolutie rondom de GvdW. Een belangrijke notie is dat het 2DH ZWeM model niet morfologisch gevalideerd is. De hydrodynamica, d.w.z. waterstanden, stroomsnelheden en afvoeren zijn echter vergelijkbaar met die van het ZWeM 3D model gebaseerd op meerdere observatiepunten en dwarsprofielen. Met dit model zijn de volgende simulaties gedaan:

1. Scenario GvdW-DD1: Geul van de Walvischstaart met verdieping, 1-31 mei 2014 (representatieve periode), Morfac = 1, met baggeren en storten.
2. Scenario GvdW-DD2: Geul van de Walvischstaart met verdieping, 1-31 december 2013 (inclusief de Sinterklaasstorm), Morfac = 1,met baggeren en storten.
3. Scenario GvdW-DD3: Geul van de Walvischstaart met verdieping, 1-31 mei 2014 (representatieve periode), Morfac = 100 (morfologische tijdschaal van 8.4 jaar), met baggeren en storten.

2.3 2DH zand NeVla model, gehele estuarium

Het Delft3D-NeVla model beslaat het hele Westerschelde estuarium, de monding en het aangrenzende deel van de Noordzee (Figuur 10). Het model is daarmee geschikt om hydrodynamische en morfodynamische ontwikkelingen te analyseren, al dan niet als gevolg van menselijk ingrijpen. Het model is verdeeld in 5 domeinen met een roosterresolutie die varieert van enkele meters in het stroomopwaartse rivierendeel tot enkele honderden meters in het mondingsgebied. Naast getij-hydrodynamiek, wordt het model ook door windgolven geforceerd middels een golfklimaat op de randen en een windtijdserie die uniform over het gehele domein opgelegd wordt. Het model is dieptegemiddeld.

Figuur 10 - Overzicht van het 5 domeinen Delft3D-NeVla model.



Het stromingsmodel kent een getijforcering middels Riemann-randen in het noordwesten en stroomsnelheidsranden in het westzuidwesten en noordnoordoosten in domein 1, en afvoerranden voor de rivier en gemalen in domeinen 2 tot 5. Het golfmodel kent vier golfcondities, waarbij condities 1 (242.8°, H_s = 1.19 m) en 2 (355.9°, H_s = 1.01 m) dominant zijn (voor meer details zie Van der Wegen et al., in voorbereiding). Het NeVla model kent één zandige sedimentfractie met een D_{50} van 0.2 mm, die representatief is voor het sediment in het studiegebied. De hydrodynamische simulatietijd is ongeveer 3.5 maanden, wat door een MorFac van 104 resulteert in een morfodynamische simulatietijd van 30 jaar.

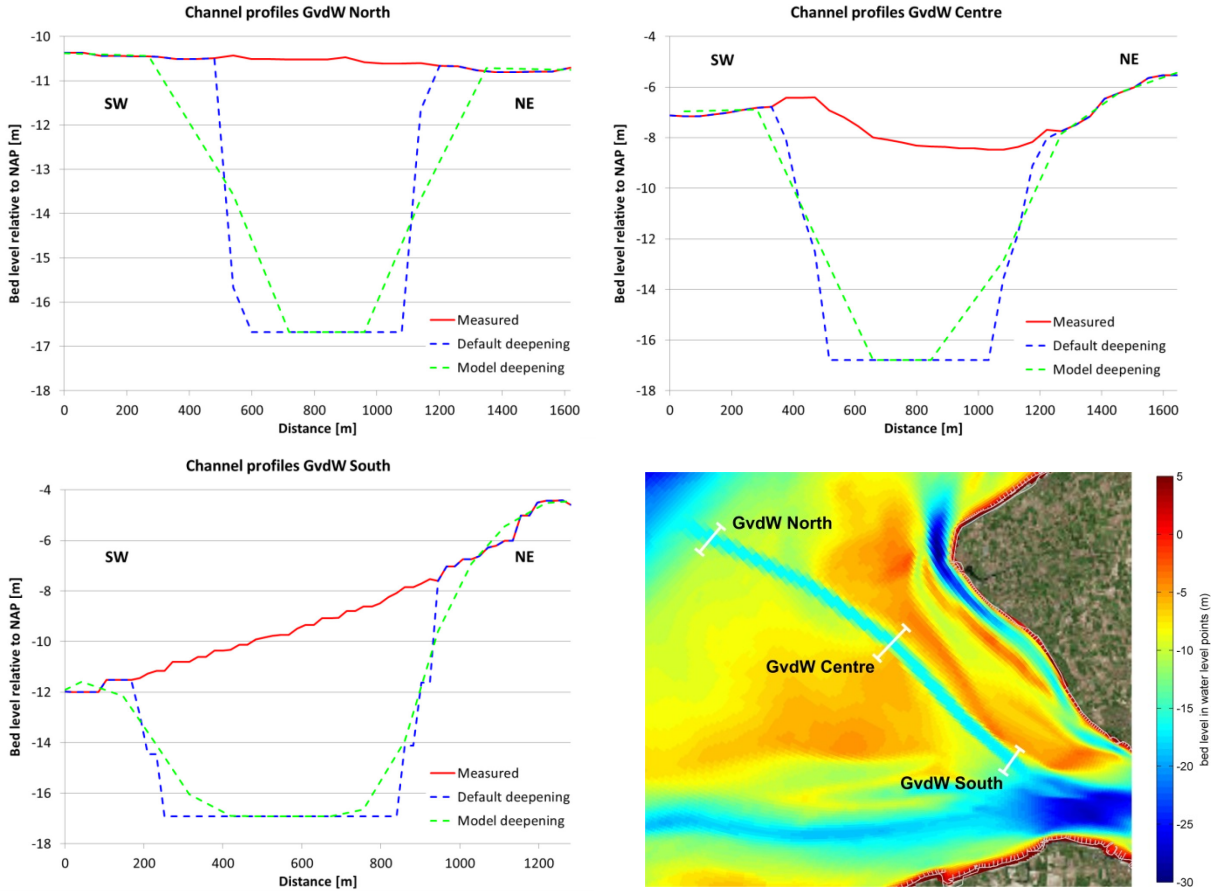
Van der Wegen et al. (in voorbereiding) beschrijft de morfodynamische hindcast van de monding van de Westerschelde over de periode 1963-2011 met het Delft3D-NeVla model. Het doel van dat onderzoek is om te kijken hoe goed Delft3D een morfologische voorspelling kan doen door te vergelijken met de gemeten bodemontwikkeling. In de periode 1963-1985 vond een zeer beperkt aantal menselijke ingrepen in de monding plaats, maar dat veranderde met de uitbreiding van de haven van Zeebrugge (golfbrekers), de verdieping van de vaargeulen naar Zeebrugge en Antwerpen en de zandwinningsactiviteiten in de Westerschelde tussen 1985 en 2011.

De rekentijden waren aanzienlijk (15 dagen voor een 2D simulatie voor de periode 1963-2011 met een morfac van 104) waardoor slechts een beperkte gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd op basis van 2D berekeningen (met en zonder golfwerking, met en zonder baggeren en storten). Eén simulatie is uitgevoerd in 3D.

Simulaties zonder golven en bagger- en stortactiviteiten presteren slechter dan wanneer deze wel worden meegenomen. Het 3D model geeft een betere reproductie van de gemeten ontwikkeling, wat waarschijnlijk komt door het effect van secondaire stroming. Alle runs met golven laten realistische ontwikkelingen zien rond het Oostgat en de Vlakte van de Raan en het onderhoudsvolume is van dezelfde orde van grootte als de autonome morfologische ontwikkeling. Hoewel baggervolumes in de Westerschelde zelf binnen een factor twee overeenkomen met metingen, worden de baggervolumes bij Zeebrugge behoorlijk onderschat, waarschijnlijk omdat slibfracties niet gemodelleerd worden. Verbetering van de hindcast is mogelijk maar zou vergezeld gaan van zeer rekenintensieve gevoeligheidsanalyse. Aandachtspunten voor verbetering zijn stort-algoritmes (die nu niet diffuus genoeg zijn waardoor ‘eilanden ontstaan’): de ligging van moeilijk erodeerbare lagen, bed slope factor, meerdere zand- en slibfracties en een completer golfklimaat.

Figuur 11 geeft aan hoe de verdieping in het NeVla model is geïmplementeerd. Deze implementatie verschilt iets tussen de gebruikte modellen omdat de rekengrids verschillen. Omwille van de resolutie van het NeVla-model is het niet mogelijk om de vooropgestelde taluds in het model goed te representeren.

Figuur 11 - Profieldoorsnedes van het noordelijke, centrale en zuidelijke deel van de (verdiepte) Geul van de Walvischstaart.



In rood de huidige bodem, in blauw de door aMT aangeleverde verdieping en in groen de in het NeVla model geimplementeerde verdieping.

Op basis van het NeVla model zijn vier scenario's gesimuleerd voor de periode 2012-2042:

- Ref. 2012 bathymetrie.
- GvdW1. 2012 bathymetrie met verdieping Geul van de Walvischstaart. Vaargeul Geul van de Walvischstaart wordt onderhouden, waarbij het materiaal buiten het modeldomein gestort wordt.
- GvdW2. 2012 bathymetrie met verdieping Geul van de Walvischstaart. Vaargeul Geul van de Walvischstaart wordt niet onderhouden.
- GvdW3. Als scenario GvdW1, maar met een alternatief verloop van de vaargeul door de Geul van de Walvischstaart dat meer aansluit bij de huidige ligging van platen en geulen en daarmee mogelijk een lager baggervolume oplevert.

In alle scenario's wordt de Wielingen (en de ander vaargeulen) onderhouden.

2.4 WL-geïdealiseerd 2DH model

Het WL-geïdealiseerd 2DH model is ontwikkeld op het op het Waterbouwkundig lab om fundamenteel inzicht krijgen in de mogelijke invloeden van de nieuwe vaargeul op de morfologie van de Scheldemonding en -estuarium op lange tijdschalen (tientallen tot honderden jaren). De cijfers die uit dit model verkregen worden dienen daarom te worden geïnterpreteerd als indicatoren voor een bepaalde trend van het systeem.

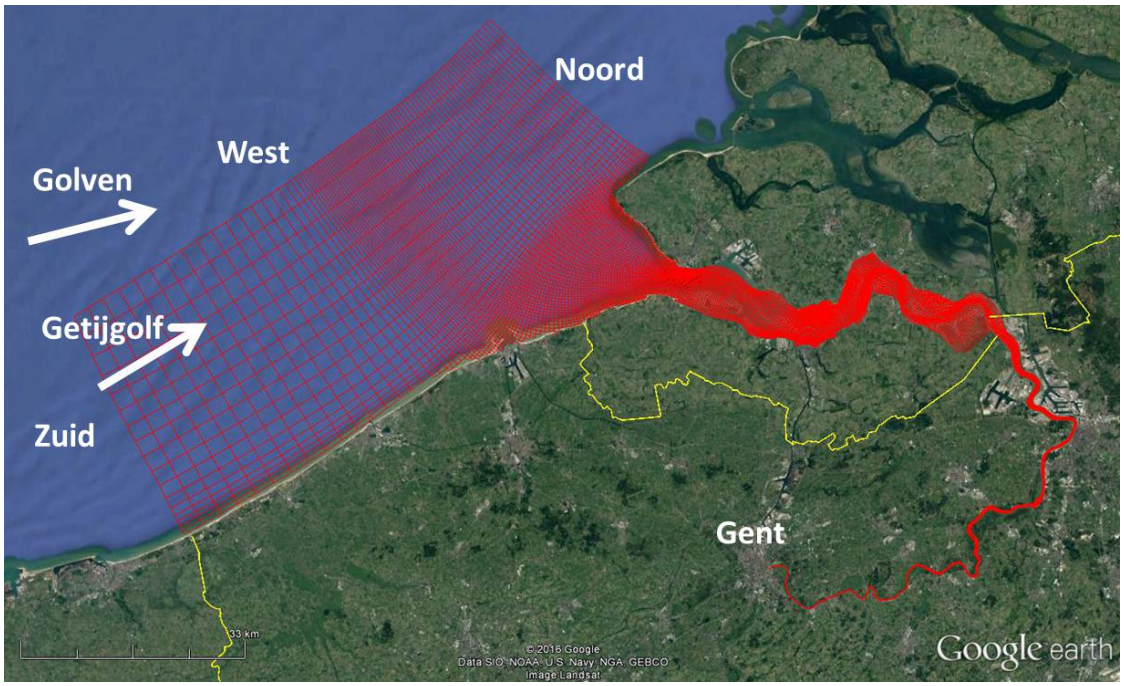
Figuur 12 geeft het gebied dat het grid beslaat weer. Bij de zeewaartse randen varieert de gridresolutie (hier gedefinieerd als de wortel van het celoppervlak) tussen 3000 m bij de zuidelijke rand tot 1500 m bij de noordelijke rand. In het mondingsgebied neemt de gridresolutie toe van 500 m aan de zeewaartse rand tot 200 m bij Vlissingen. In de Westerschelde en Zeeschelde neemt de gridresolutie verder toe tot minder dan 50 m bij Gent.

Op de zeewaartse randen wordt een combinatie van waterstanden (West) en Neumann randen (Zuid en Noord) gebruikt. De getijgolf bestaat uit 3 componenten (M2, M4 en M6) en propageert van Zuid naar Noord.

In dit model wordt alleen met zand gerekend, met een diameter d_{50} = 0.2 mm. Van Rijn 2004 sediment transport wordt gebruikt die onderscheid maakt tussen bedload en suspended load. De overige model parameters zijn weergegeven in Tabel 2.

Twee experimenten zijn uitgevoerd: In het eerste wordt gerekend met golven uit het zuidwesten (Hs=1m, Tm=4.5s en θ=255^o). In het tweede experiment komen de golven vanuit het noordwesten (Hs=0.8m, Tm=5.5s en θ=335^o). De resultaten uit deze experimenten zijn weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14. Startend vanuit een vlakke bodem (op t=0, Figuur 13b) wordt het model gerund totdat er een bodempatroon ontstaat dat dezelfde grootschalige bodemkenmerken heeft als de gemeten bodem. Een dergelijke model spin up duurt een paar honderden jaren voordat de situatie bereikt wordt met weinig morfodynamische activiteit (nabij morfodynamisch evenwicht). Het model reproduceert een bodempatroon (panelen f-g) met een paar grootschalige kenmerken die gelijkenis vertonen met de gemeten bodem (panel a). De gemodelleerde hoofdgeul zuid en de smalle geul langs de noordelijke kust met daartussen een ondiep gebied zijn grootschalige patronen die ook voorkomen in de Scheldemonding (Figuur 13a). Soortgelijke grootschalige bodempatronen worden ook gevonden in het geval van golven uit het noordwesten (Figuur 14). Hierna worden de zuidelijke hoofdgeul en smalle noordelijke geul aangeduid als respectievelijk "Wielingen" en "Oostgat".

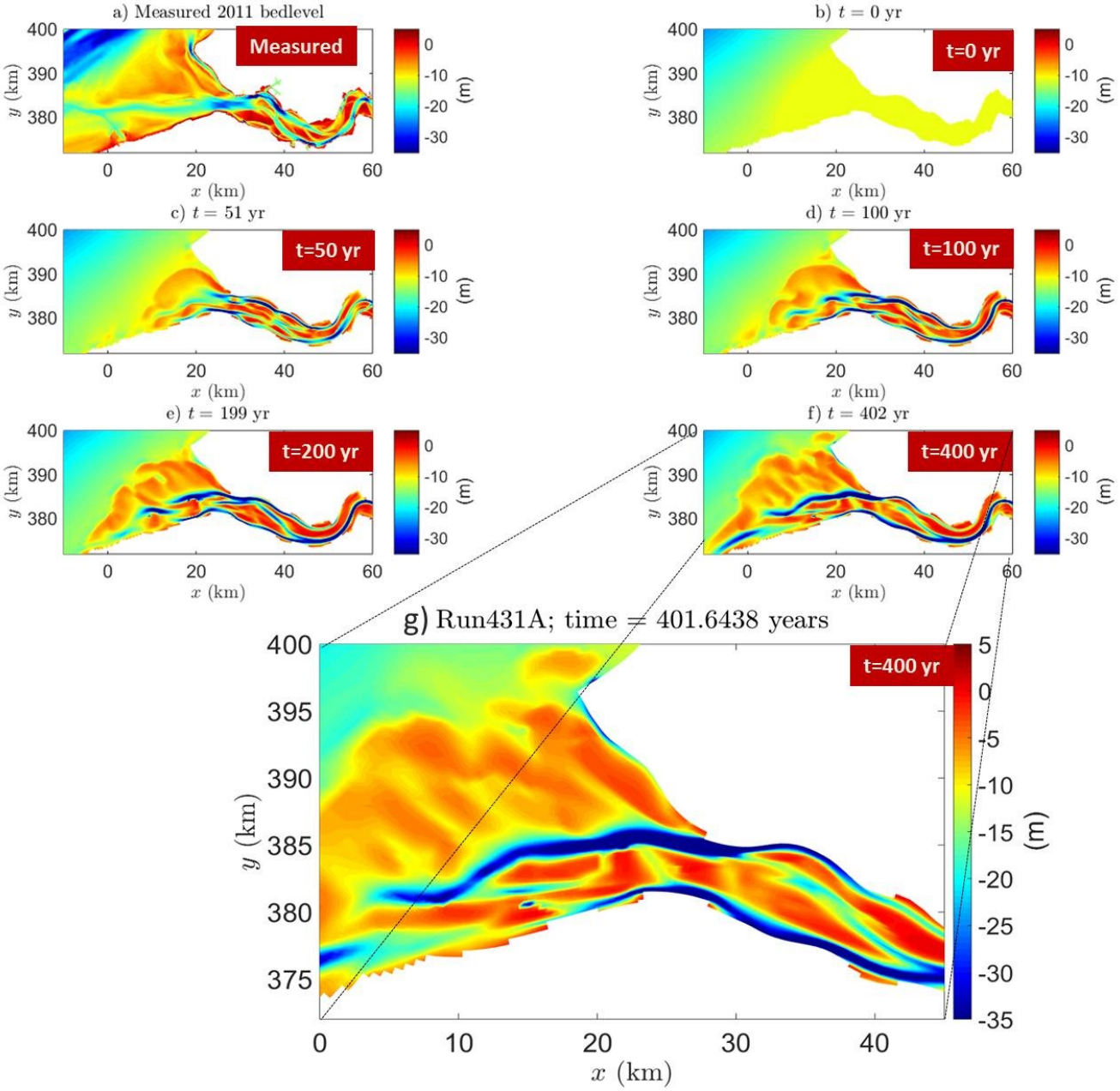
Figuur 12 - Gebruikte grid in het geïdealiseerd model.



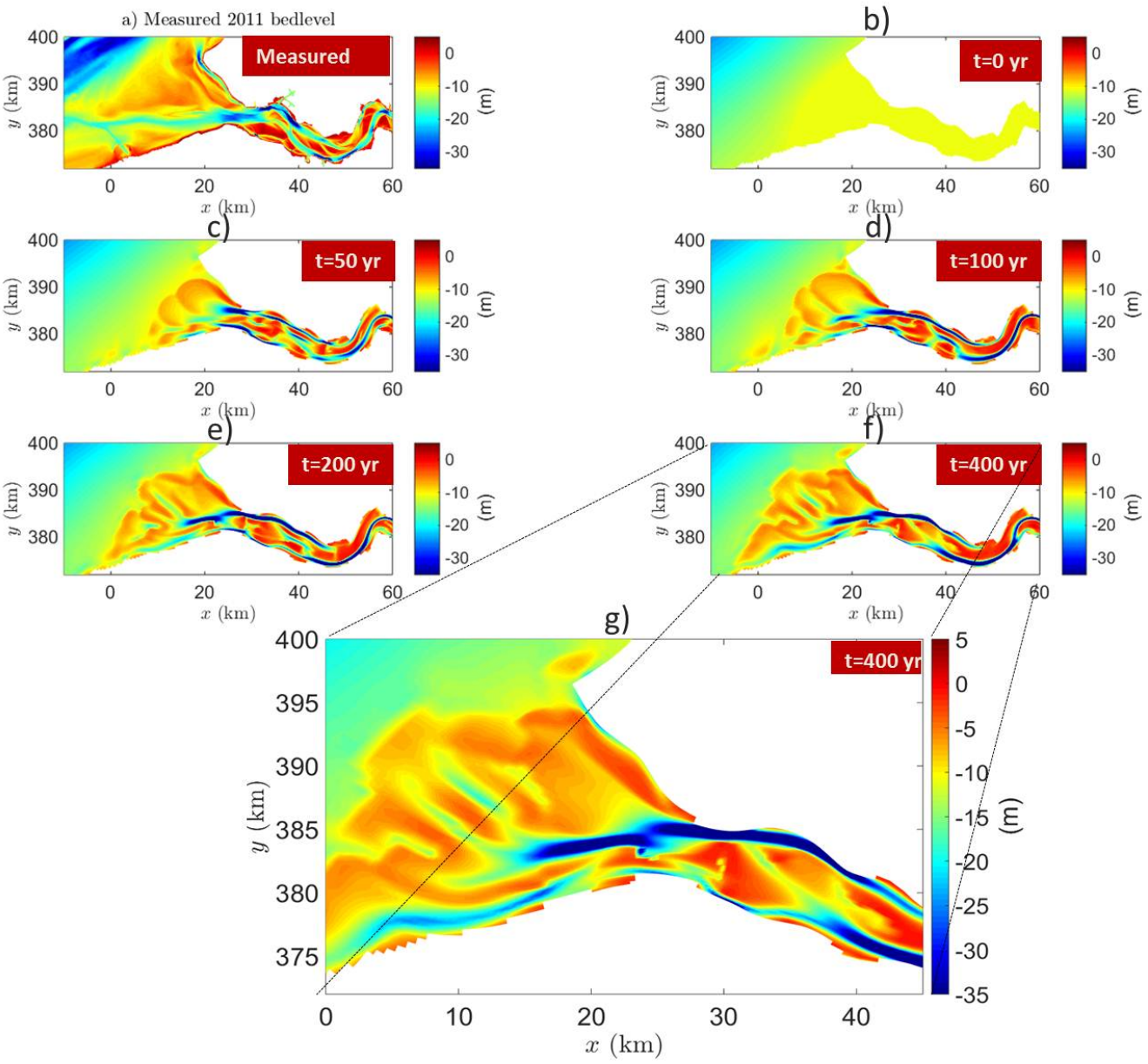
Tabel 2 - Overzicht gebruikte parameters in het geïdealiseerd model.

Component	Parameter/configuratie	Beschrijving
Stroming	C = 65 $m^{1/2}s^{-1}$	Chezy coëfficiënt
	v = 1 m^2s^{-1}	Eddy viscositeit
	ϵ = 1 m^2s^{-1}	Eddy diffusiviteit
	M_2, M_4, M_6	Getijcomponenten randen
	Geen wind, geen bovenafvoer	
Sediment	Van Rijn 2004	Transport vergelijking
	Bagnold (1966) + Ikeda (1988)	Hellingseffecten
	α_{BS} = 1	Effect bodemhelling in stroomrichting
	α_{BN} = 15	Effect bodemhelling haaks op stroomrichting
	Layer Thickness = 50 m	Dikte van de erodeerbare laag (uniform)
	d_{50} = 0,2 mm	Gemiddelde korrelgrootte (1 fractie)
Golven	H_s = 1 m	Significante golfhoogte
	Θ = 254°	Richting van de golven
	T_m = 4.5 s	Golfperiode
	2nd generation model, Triads nonlinear interactions	Golfmodel
Initiële condities	Linear sloping bed	Model start met vlakke bodem met constante helling
Numerieke parameters	Δt = 30 s	Tijdstap
	Morfac = 100, 200	Morfologische versnellingsfactor
	Coupling time = 60 min	Tijdsinterval voor data uitwisseling hydrodynamisch model en golfmodel
Baggermodule	Geen	Er wordt niet gebaggerd in het model

Figuur 13 - a) Gemeten bodem in de monding en het estuarium. (b-f) Snapshots van de bodem evolutie tijdens de model spin-up. g) Zoom in op gemodelleerde bodem na 400 jaar.



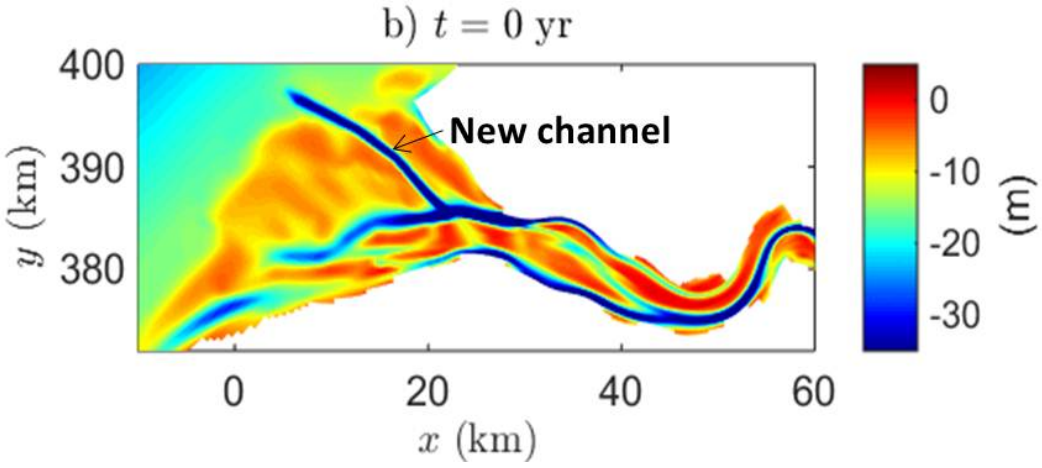
Figuur 14 - Zoals in Figuur 13, maar in het geval van golven uit het noordwesten.



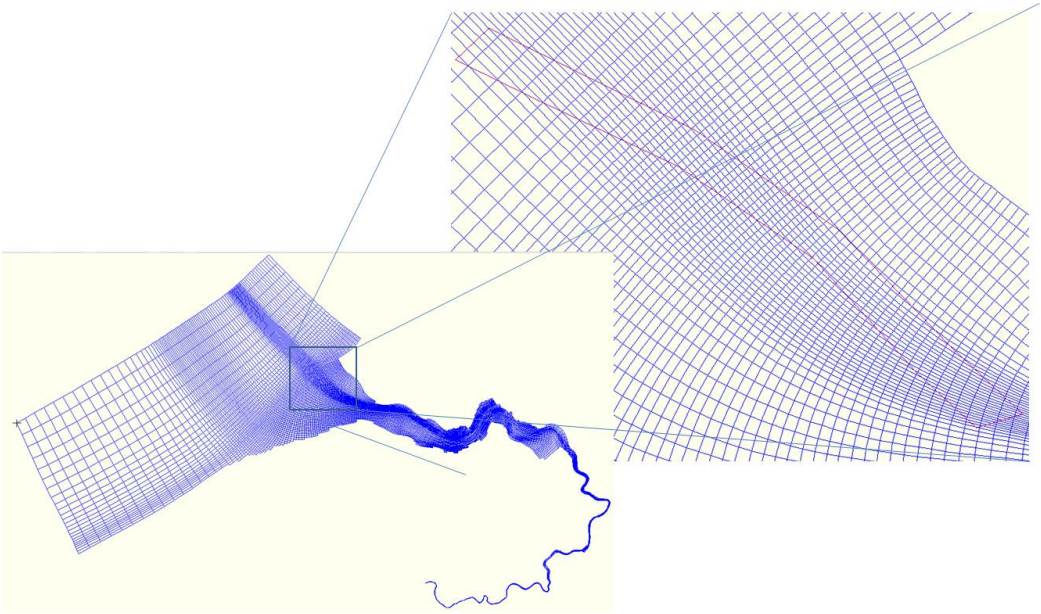
De golven hebben vooral een effect in het mondingsgebied (cfr. Vlakte van de Raan). Eerder onderzoek toonde aan dat wanneer er geen golven meegenomen worden, er zich in het mondingsgebied een delta bestaande uit kleinschalige bodempatronen zou ontstaan (Nnafie et al., 2016). De golfwerking zorgt in dit gebied voor redistributie van het zand en het uitsmeren van kleinschalige bodempatronen.

Een belangrijk verschil tussen de gemeten en gemodelleerde bodem is dat in het laatste geval de kanalen dieper zijn dan in de werkelijkheid. Zo heeft de zuidelijke hoofdgeul een diepte van tussen de 30 en 40 m, hetgeen een factor 2-3 groter is dan de gemeten diepte van de Wielingen. Dit heeft als consequentie dat de diepte van de nieuwe geul (die in werkelijkheid 16.7 m is) geschaald moet worden. Het bodempatroon na 400 jaar (panel f-g) wordt gebruikt om de nieuwe geul te aan te leggen Deze heeft een diepte van ongeveer 40 m Figuur 15. Ook is de grid resolutie met een factor 3 verhoogd in het interesse gebied om de dimensies (helling van de geulflanken) van nieuwe geul zo goed mogelijk weer te geven Figuur 16. Het lokaal verfijnen van het model had geen significant effect op de globale morfologische evolutie van het model.

Figuur 15 - De uiteindelijke bodem die verkregen is uit de model spin up (na 400 jaar) wordt gebruikt om de nieuwe geul te creëren.



Figuur 16 - Gebruikte grid om de nieuwe geul aan te leggen. Hiervoor is het grid een factor 3 keer verfijnd in het interesse gebied.



Tabel 3 - Overzicht experimenten in het geïdealiseerd model.

Runs	New Channel	Waves	Depth Channel	Maintenance	Notes
Reference (Natural)	No	Southwest, Hs=1m		--	α_{BN}=15
NewChannel	yes	Southwest, Hs=1m	40 m	No	α_{BN}=15
NewChannel_Depth	yes	Southwest, Hs=1m	20m, 30m, 50m	No	α_{BN}=15
NewChannel_Dredge	yes	Southwest, Hs=1m	40 m	No	α_{BN}=15
NewChannel_WavNW	yes	Northwest, Hs=0.8m	40 m	Yes	α_{BN}=15
NewChannel_Extreme	yes	Southwest, Hs=2.5m, Hs=4m	40 m	No	α_{BN}=15
NewChannel_BedSlope	yes	Southwest, Hs=1m	40 m	No	α_{BN}=1.5 α_{BN}=25

De verkregen bodem na 400 jaar wordt gebruikt om de morfodynamische response van de monding en estuarium op de constructie van de nieuwe geul te onderzoeken. Experimenten waarbij de nieuwe geul andere diepten heeft worden ook uitgevoerd. Ook wordt gekeken naar effecten van variaties in de golf forcering. Een van de onzekere factoren in de model parameters is de waarde van bedslope parameter α_{BN}, waarvoor standaard een waarde van 15 gebruikt wordt. Om het effect van deze keuze op de modelresultaten nader te onderzoeken zijn er twee experimenten gedaan met een lagere en een hogere *bedslope* parameter (α_{BN}=1.5 en α_{BN}=25, respectievelijk). Een verlaging/verhoging van deze parameter betekent dat er minder/meer diffusie in het systeem geïntroduceerd wordt.
Een overzicht van alle experimenten staat in Tabel 3. De meeste experimenten duren 100 tot 200 jaar.

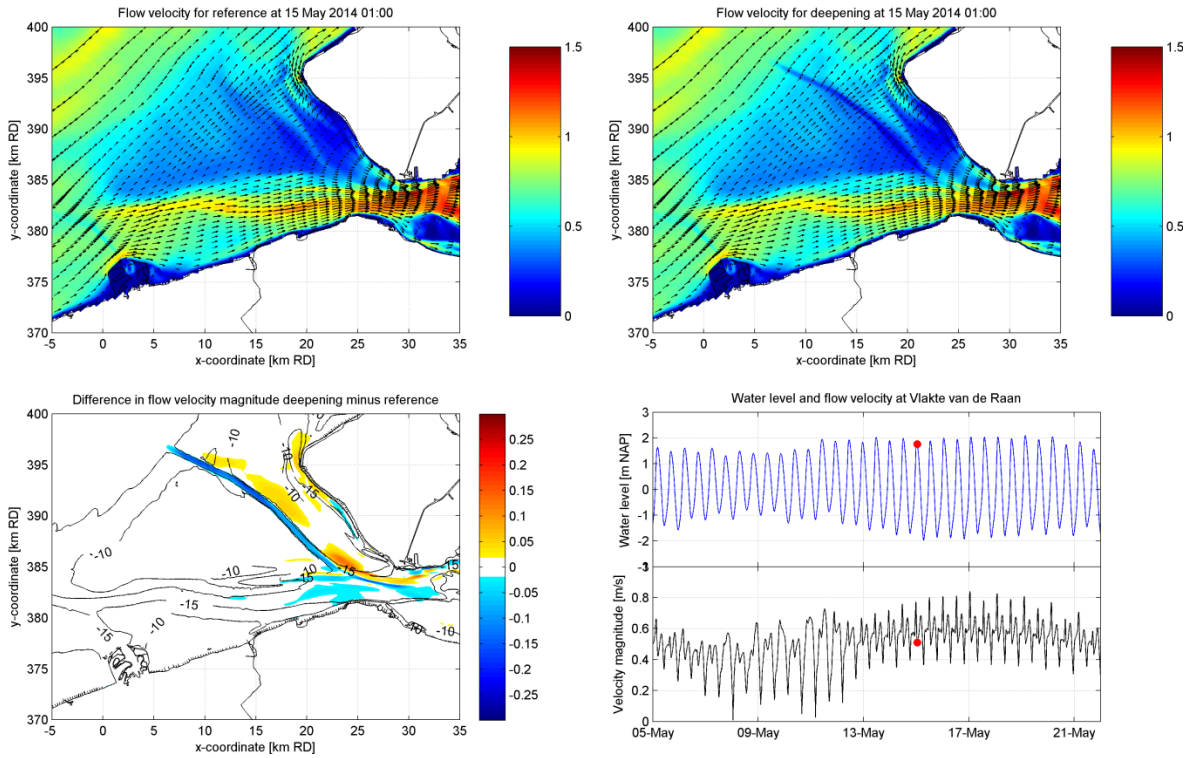
3 Resultaten

3.1 Effecten op hydrodynamica

3.1.1 Stroomsnelheden (Zand-slib ZWeM 3D)

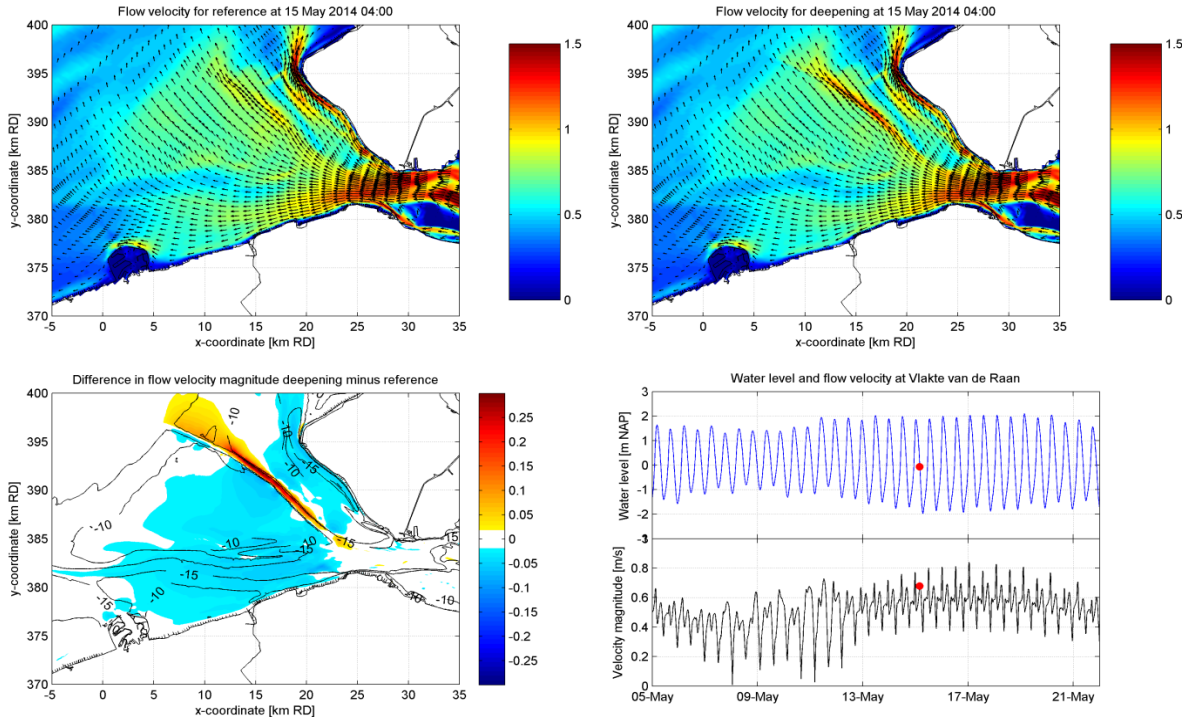
Het effect van het verdiepen van de Geul van de Walvischstaart heeft invloed op de stroomsnelheden en -richtingen, de getijvolumes, de golven en de bodemschuifspanning. In de Geul van de Walvischstaart nemen de maximale stroomsnelheden, zowel tijdens vloed als tijdens eb, toe. Tijdens kentering nemen de stroomsnelheden juist af, als gevolg van de grotere waterdiepte. Figuur 17 t/m Figuur 20 laten de stroomsnelheden in de monding zien voor de referentiesimulatie en het scenario met verdieping en het verschil in stroomsnelheidsgrootte tussen de twee simulaties op vier karakteristieke momenten in de getijcyclus (hoogwaterkentering, piekebstroming, laagwaterkentering en piekvloedstroming). Tijdens de laagwaterkentering neemt de stroomsnelheid aan de zuidhelling van de verdiepte Geul van de Walvischstaart wel toe ten opzichte van de referentie. Tijdens piekebstroming neemt de stroomsnelheid aan de noordwestzijde van de Geul van de Walvischstaart wel iets af. Als de stroming maximaal is, nemen de stroomsnelheden over de subgetijdenplaten en de andere geulen (Wielingen, Oostgat) af. Rond kentering kan de stroming over de subgetijdenplaten en in het Oostgat wel iets toenemen. Over het algemeen leidt de verdieping van de Geul van de Walvischstaart ertoe dat de stroming door deze geul toeneemt, ten koste van de stroming door de andere geulen en over de platen.

Figuur 17 - Stroomsnelheid en –richting tijdens hoogwaterkentering.



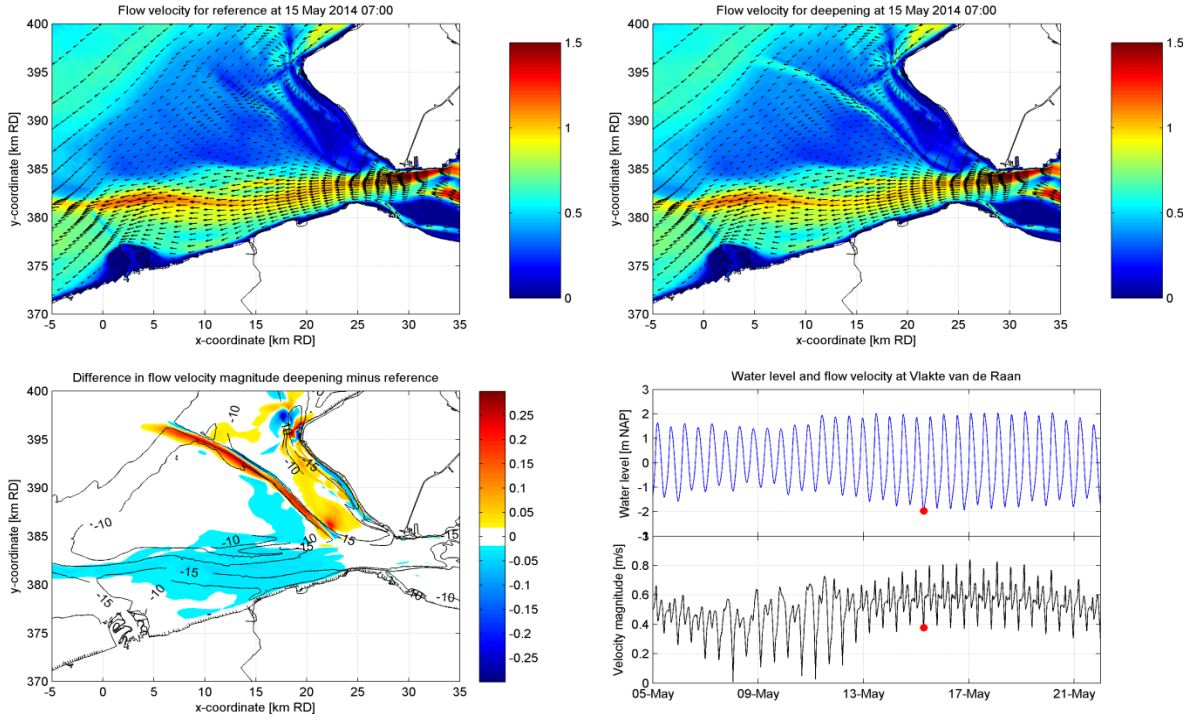
Linksboven: referentie, rechtsboven: voor de verdieping, linksonder: het verschil tussen de verdieping en de referentie. Rechtsonder ter indicatie de van de fase van het getij in de omgeving de waterstand en stroomsnelheidsgrootte bij station Vlakte van de Raan.

Figuur 18 - Stroomsnelheid en –richting tijdens piek ebstroomsnelheid.



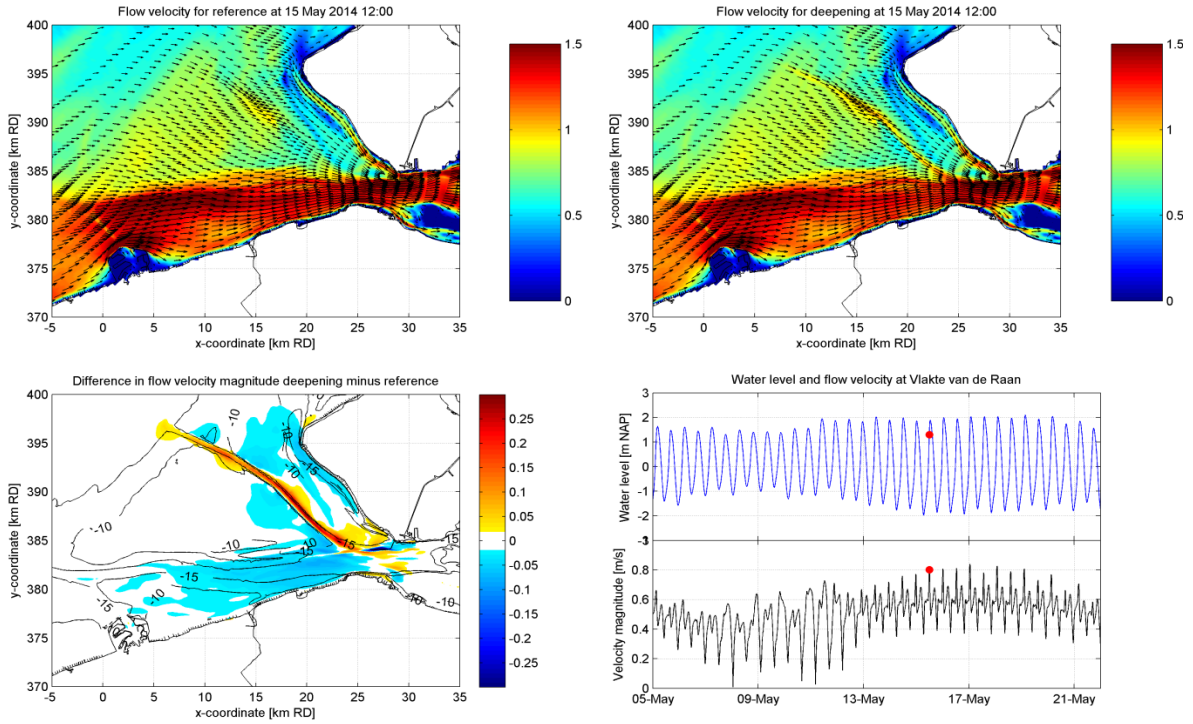
Linksboven: referentie, rechtsboven: voor de verdieping, linksonder: het verschil tussen de verdieping en de referentie. Rechtsonder ter indicatie de van de fase van het getij in de omgeving de waterstand en stroomsnelheidsgrootte bij station Vlakte van de Raan.

Figuur 19 - Stroomsnelheid en –richting tijdens.



Linksboven: referentie, rechtsboven: voor de verdieping, linksonder: het verschil tussen de verdieping en de referentie. Rechtsonder ter indicatie de van de fase van het getij in de omgeving de waterstand en stroomsnelheidsgrootte bij station Vlakte van de Raan.

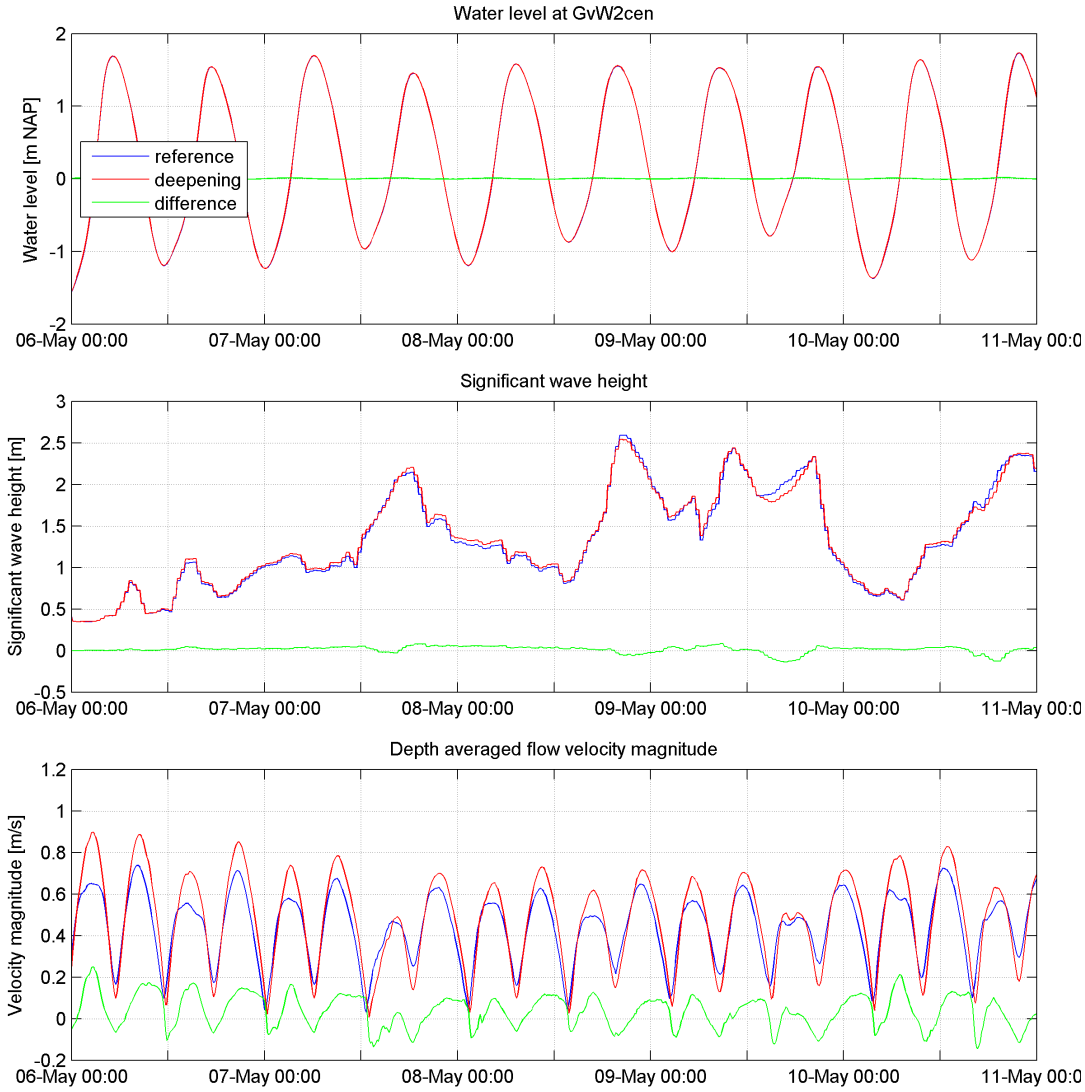
Figuur 20 - Stroomsnelheid en –richting tijdens piek vloedstroomsnelheid.



Linksboven: referentie, rechtsboven: voor de verdieping, linksonder: het verschil tussen de verdieping en de referentie. Rechtsonder ter indicatie de van de fase van het getij in de omgeving de waterstand en stroomsnelheidsgrootte bij station Vlakte van de Raan.

De variatie van de stroomsnelheid over de tijd wordt in Figuur 21 weergegeven voor een observatiepunt in de Geul van de Walvischstaart (GvdW midO in Figuur 21). Hieruit blijkt dat de stroomsnelheid tijdens piekstroming inderdaad toeneemt, en tijdens kentering afneemt. Ook blijkt dat de waterstand niet verandert, en de golfhoogte meestal marginaal toeneemt.

Figuur 21 - Waterstand (boven), significante golfhoogte (midden) en diepte-gemiddelde stroomsnelheid (onder) voor de referentie (blauw), de verdieping (rood) en het verschil (groen) op een meetpunt in de Geul van de Walvischstaart.



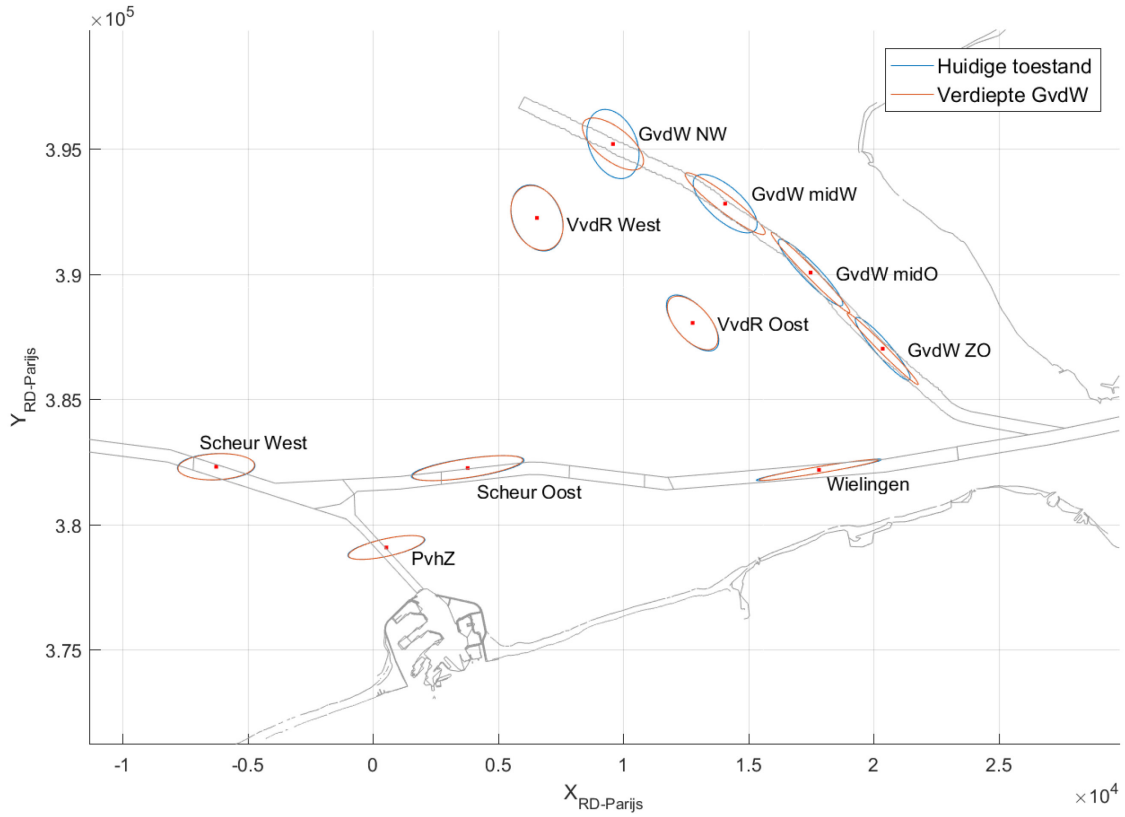
3.1.2 Getijellipsen (Zand-slib ZWeM 3D)

In Figuur 22 worden de getijellipsen (M2-component) in de verschillende geulen vergeleken voor de huidige toestand en het scenario met verdiepte Geul van de Walvischstaart. De M2-getijcomponenten werden berekend op basis van de dieptegemiddelde stromingen van het ZWeM-model. De oriëntatie van de ellips geeft de hoofdrichting van de stroming weer (eb- en vloed-richting). De excentriciteit van de ellips geeft de variabiliteit van de stroming weer. Bij een sterke excentriciteit treedt rechtlijnige stroming in de vloed en eb richting op, afgewisseld via een periode met zwakke stroomsnelheden (kentering). Bij een zwakke excentriciteit (cirkels) roteert de getijstroming continu, en treedt geen duidelijke kenteringsperiode op.. De ellipsen op de Vlakte van de Raan zijn meer ovaalvormig: door het verhang op de Vlakte van de Raan is er geen duidelijke overgang van eb naar vloed: ook bij kentering is er nog stroming.

De oriëntatie van de ellips ten opzicht van de geul geeft aan of de hoofdstroming door de geul gaat, zoals in de Wielingen of haaks op de geul, zie Pas van het Zand. Een sterke stroming door de geul in combinatie met geen dwarscomponenten tijdens kentering heeft de potentie om de geul op natuurlijke manier open te houden, zoals dit het gal is voor de Wielingen. Ook Scheur Oost kent een sterke vloed- en eb-stroming door de geul, echter de getijellips is minder excentrischer dan ter hoogte van de Wielingen.

De getijellipsen op basis van de M2-component van de dieptegemiddelde stroomsnelheden in Figuur 22 laten zien dat de aanleg geen effect heeft op de stromingsrichtingen buiten de directe omgeving van de Geul van de Walvischstaart maar dat wel de dominante stromingsrichting en –amplitude ter plaatse van de geul verandert: De dominante stromingsrichting centraal en in het oostelijke deel van de Geul van de Walvischstaart blijft NW-ZO-georiënteerd maar de amplitude neemt toe en de ellips wordt smaller. In het meest noordwestelijke deel van de geul (GvdW NW in Figuur 22) geldt dat de ellips zonder verdieping sterk lijkt op die van de westelijke Vlakte van de Raan maar dat deze na verdieping excentrischer (platter) wordt en een oriëntatie krijgt die meer overeenkomt met de geulrichting. Dit station blijft echter duidelijk anders dan de overige stations in de geul: de component dwars op de geul blijft aanzienlijk groter en de component parallel aan de geul juist kleiner. Na aanleg zijn de grootte en oriëntatie ten opzichte van de geul voor deze ellips het best vergelijkbaar met Scheur West. Station GvdW midW lijkt dan het meest op Scheur Oost en GvdW midO en ZO zitten tussen Scheur Oost en Wielingen in.

Figuur 22 - Vergelijking van de getij-ellipsen (M2-component) voor de verschillende bestaande geulen en de nieuwe Geul van de Walvischstaart.



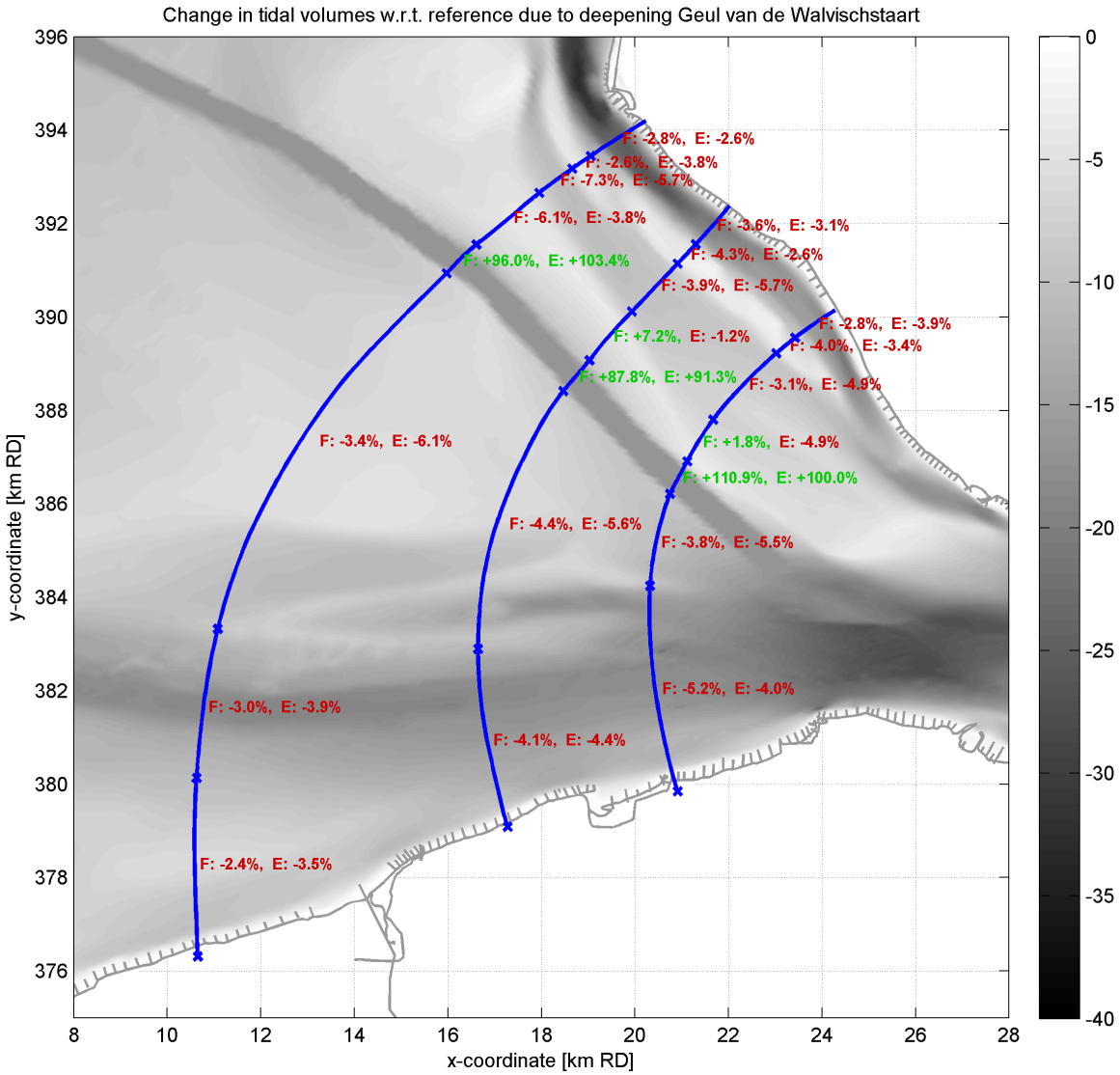
M2-getijcomonent berekend op basis van ZWeM simulaties. Blauw = huidige toestand, rood = scenario verdiepte Geul van de Walvischstaart.

3.1.3 Getijvolumes (Zand-slib ZWeM 3D)

De toename in de maximale stroomsnelheden leiden ook tot een toename van de getijvolumes door de Geul van de Walvischstaart, ten koste van de getijvolumes door de Wielingen en het Oostgat en over de platen (Figuur 23). Anderzijds, tijdens vloed neemt het getijvolume over de platen ten noordoosten (Elleboog, zie Figuur 1 op p. III) van de Geul van de Walvischstaart toe, terwijl het ebvolume hier kleiner wordt door de verdieping. Dat komt doordat tijdens eb de stroming meer de geulen volgt. Het getijvolume in de Geul van de Walvischstaart verdubbelt, en vormt daarmee ongeveer 10% van het totale getijvolume door de monding. Het Oostgat heeft een vergelijkbaar getijvolume, net als Deurloo. De Wielingen heeft echter een ongeveer 5x zo groot getijvolume als de Geul van de Walvischstaart na verdieping. De overige

20-30% van het getijvolume stroomt over de subgetijdenplaten. Het totale getijvolume dat door de monding stroomt, neemt met 0,3-0,4% toe door de verdieping. Dit komt omdat de getijslag in de Westerschelde en Zeeschelde iets toeneemt, zie 'Getijvoortplanting Westerschelde'.

Figuur 23 - Procentuele verandering in getijvolumes door de verdieping ten opzichte van de referentie, voor vloed (F) en eb (E) voor verschillende raaien.

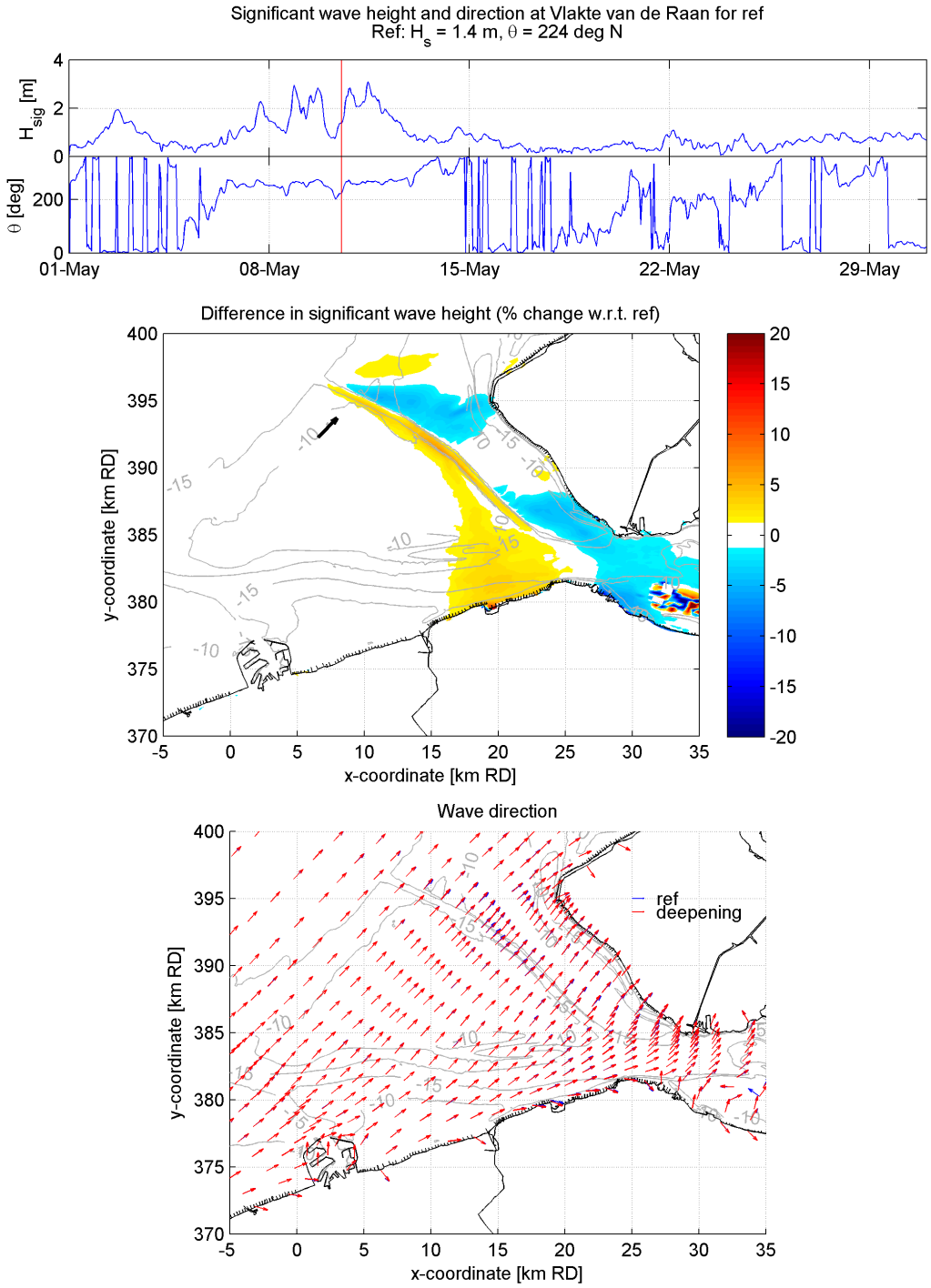


Toename aangeven in groen, afname in rood.

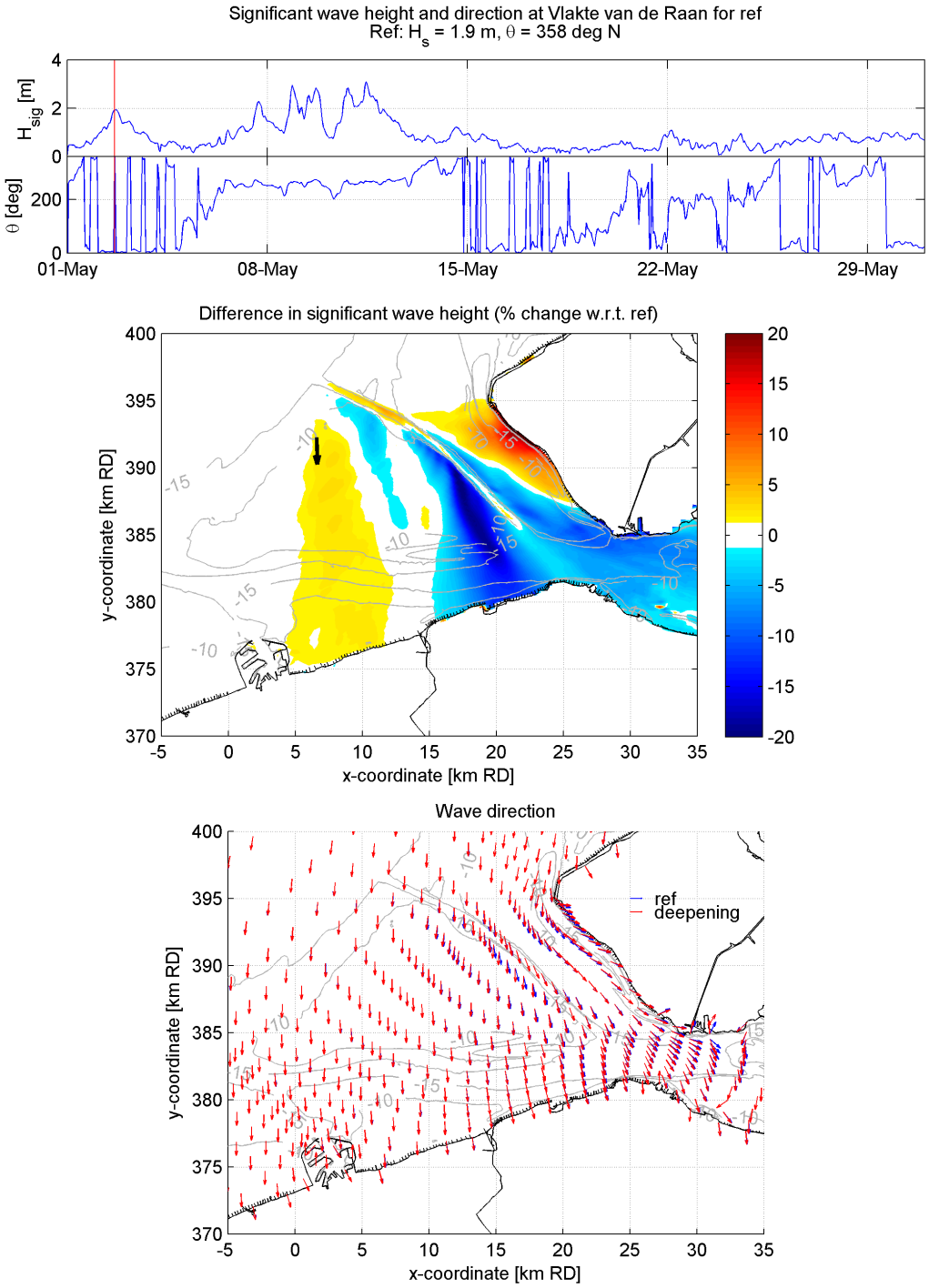
3.1.4 Golfhoogte en –richting (Zand-slib ZWeM 3D)

Om te onderzoeken welk effect de verdieping heeft op de golfvoortplanting is de golfroos opgedeeld in 8 segmenten. Per segment wordt vervolgens gekeken wat de hoogste golf is die in de simulatieperiode is opgetreden. Voor deze golfconditie is vervolgens het verschil tussen de verdieping en de referentiesimulatie berekend als percentage van de totale golfhoogte in de referentiesituatie. De dominante golfrichting qua voorkomen en golfhoogte wordt gevormd door golven uit het zuidwesten, maar ook golven uit het noordwesten treden frequent op en kunnen hoog zijn. Deze twee golfcondities zijn weergegeven in Figuur 24 en Figuur 25.

Figuur 24 - Procentuele verandering in significante golfhoogte door de verdieping ten opzichte van de referentie (midden) en golfrichting (onder) voor een golfconditie met een significante golfhoogte van 1,4 m en een golfrichting van 224 graden N bij station Vlakte van de Raan.

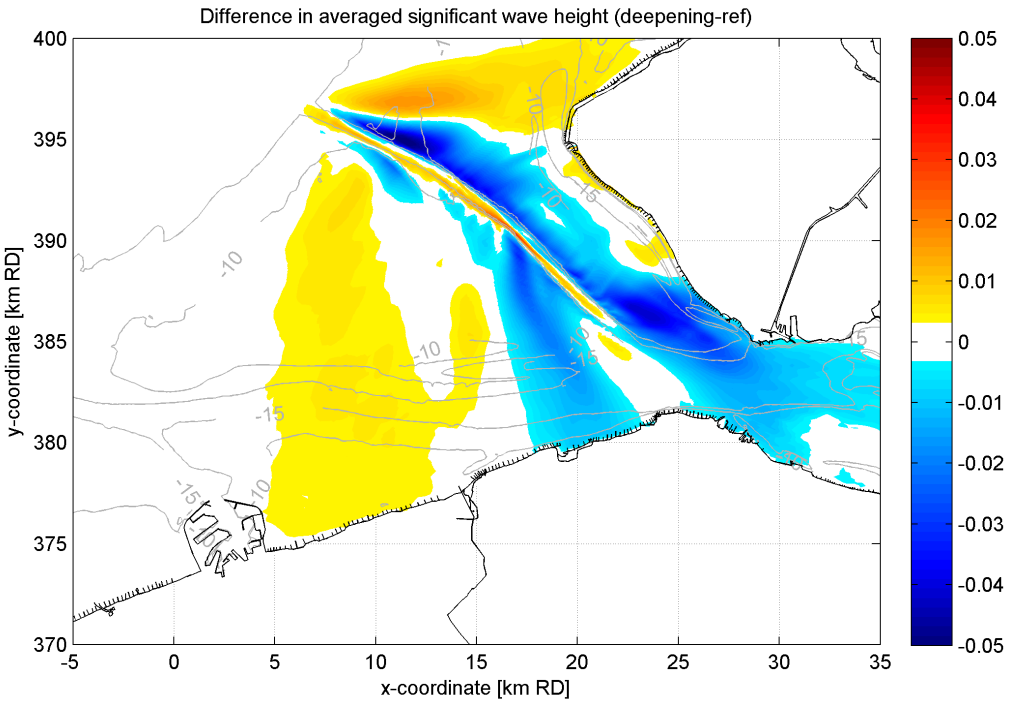


Figuur 25 - Procentuele verandering in significante golfhoogte door de verdieping ten opzichte van de referentie (midden) en golfrichting (onder) voor een golfconditie met een significante golfhoogte van 1,9 m en een golfrichting van 358 graden N bij station Vlakte van de Raan



Als de golfhoogte wordt gemiddeld over de simulatieperiode en de verdieping wordt vergeleken met de referentiesimulatie (Figuur 26), blijkt dat aan de zuidwestzijde en noordwestzijde van de geul de golfhoogte gemiddeld met 1 a 2 cm toeneemt. Direct rondom de geul neemt de golfhoogte met 1 tot 5 cm af.

Figuur 26 - Verschil in gemiddelde significante golfhoogte gedurende de maand mei 2014, verdieping ten opzichte van de referentie.



3.1.5 Bodemschuifspanning (Zand-slib ZWeM 3D)

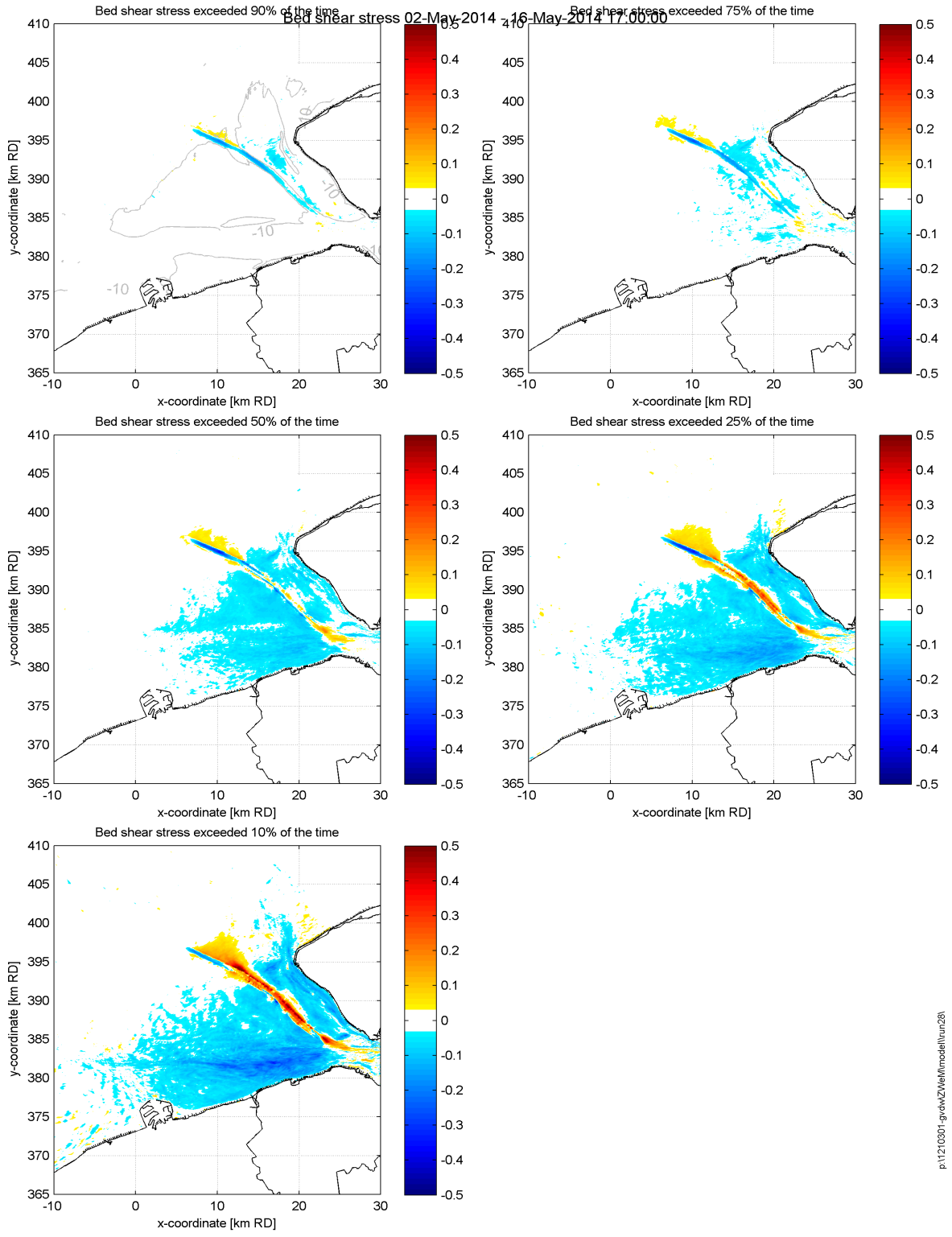
De bodemschuifspanning is bepalend voor de erosie van de bodem. Omdat zowel de stroming als de golven een bijdrage hebben aan de bodemschuifspanning, geven veranderingen in de bodemschuifspanning het gecombineerde effect van stroming en golven weer. Voor slibtransport is de maximale bodemschuifspanning maatgevend (=als gevolg van stroming, orbitaalbeweging en niet-lineaire interacties), voor zandtransport is de gemiddelde bodemschuifspanning (=als gevolg van stroming en niet-lineaire interacties) bepalend. De belangrijkste veranderingen in de stroming zijn dat de stroomsnelheden buiten de Geul van de Walvischstaart afnemen en de pieksnelheden in de Geul van de Walvischstaart toenemen. Het effect van de veranderende stroming en de bijdrage van extra turbulentie door golven op de gemiddelde bodemschuifspanning is weergegeven in Figuur 27. Bij de bodemschuifspanning die 90% van de tijd worden overschreden is te zien dat de bodemschuifspanning in de Geul van de Walvischstaart afneemt, zonder noemenswaardige veranderingen in de rest van het interessegebied. Dit wordt veroorzaakt door de afname van de stroomsnelheden tijdens kentering. Dat de pieksnelheden toenemen in de Geul van de Walvischstaart is te zien aan het figuur met de bodemschuifspanning die maar 10% van de tijd wordt overschreden. Aan het zeewaartse uiteinde van de Geul van de Walvischstaart nemen de hoge bodemschuifspanningen wel altijd af. Door veranderde aanstroming neemt de bodemschuifspanning direct ten noordoosten van het zeewaartse uiteinde toe, zowel bij lage als hoge stroomsnelheden. Over de rest van het mondingsgebied nemen de bodemschuifspanningen af, en deze afname is groter naarmate de bodemschuifspanning, en dus de stroomsnelheid, hoger is.

Onder de meeste condities neemt de golfhoogte in de Geul van de Walvischstaart iets toe.. Daarbuiten is het afhankelijk van de specifieke locatie of de golfhoogte toe- of afneemt. Omdat de waterdiepte in de Geul van de Walvischstaart ook is toegenomen, neemt de bodemschuifspanning af ondanks de toegenomen golfhoogte (Figuur 27).

Het verschil in gemiddelde en maximale bodemschuifspanning geeft aan dat de Geul van de Walvischstaart onder stroming gedomineerde condities waarschijnlijk beter in staat is zichzelf in stand te houden (met uitzondering van het meest zeewaartse gedeelte). Onder golf-gedomineerde condities kan de sedimentatie

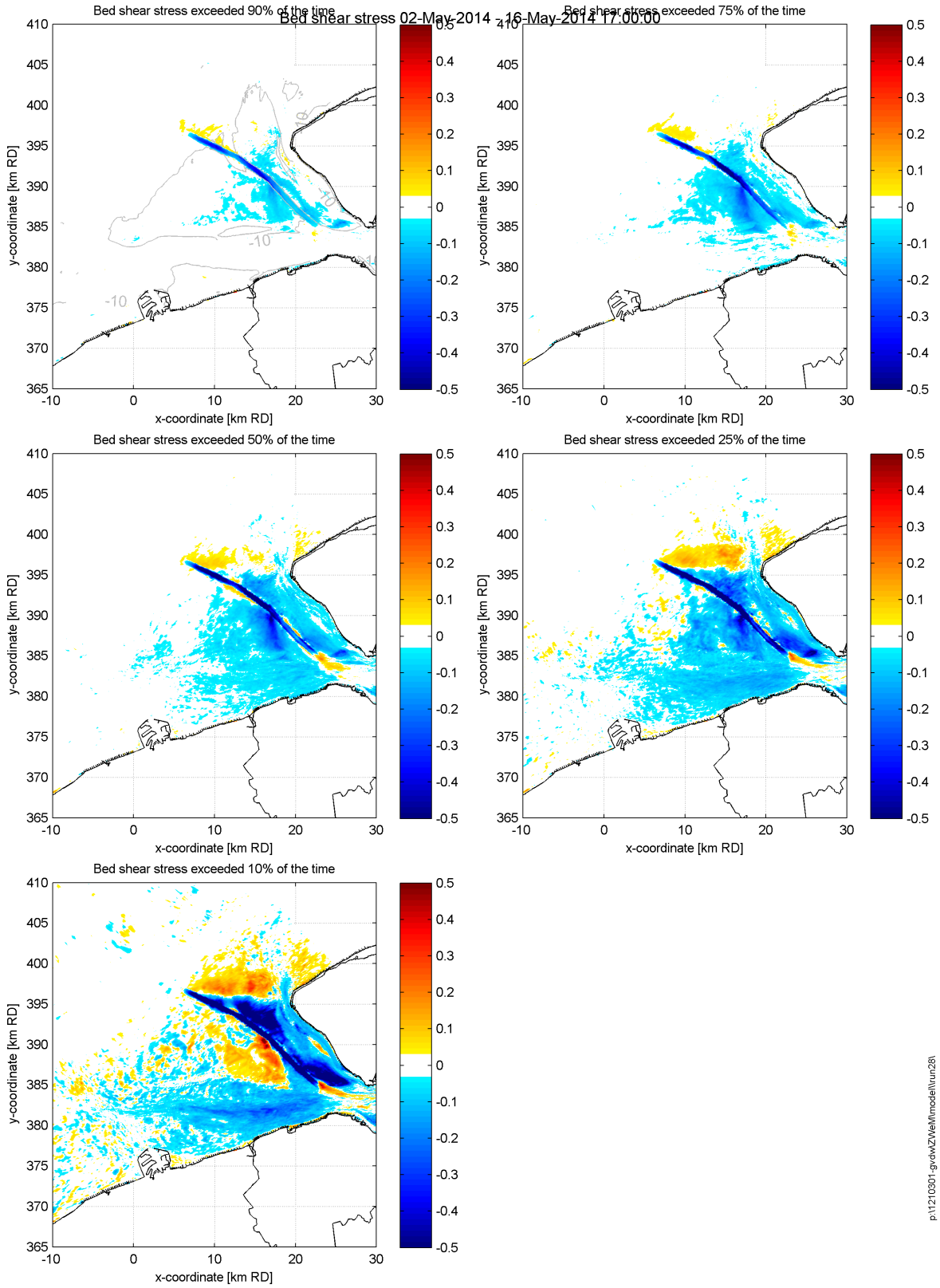
daarentegen aanzienlijk zijn, omdat dan in de monding een relatief grote hoeveelheid sediment in suspensie kan worden gebracht, terwijl de bodemschuifspanning in de Geul van de Walvischstaart dan relatief laag is.

Figuur 27 - Bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming en turbulente diffusie door golven (gemiddelde bodemschuifspanning).



Bodemschuifspanning weergegeven als percentage van de tijd dat deze wordt overschreden, verschil tussen verdieping en referentiescenario. Een toename in bodemschuifspanning is heeft een positief teken.

Figuur 28 - Maximale bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming en golven.

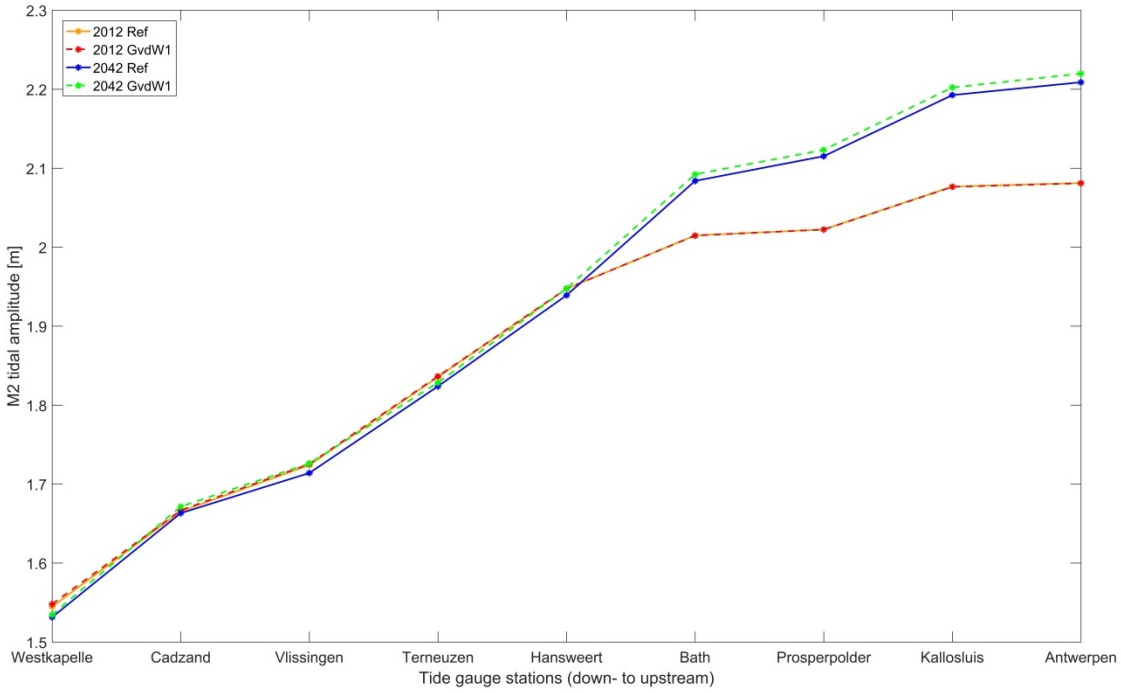


Bodemschuifspanning weergegeven als percentage van de tijd dat deze wordt overschreden, verschil tussen verdieping en referentiescenario. Een toename in bodemschuifspanning heeft een positief teken.

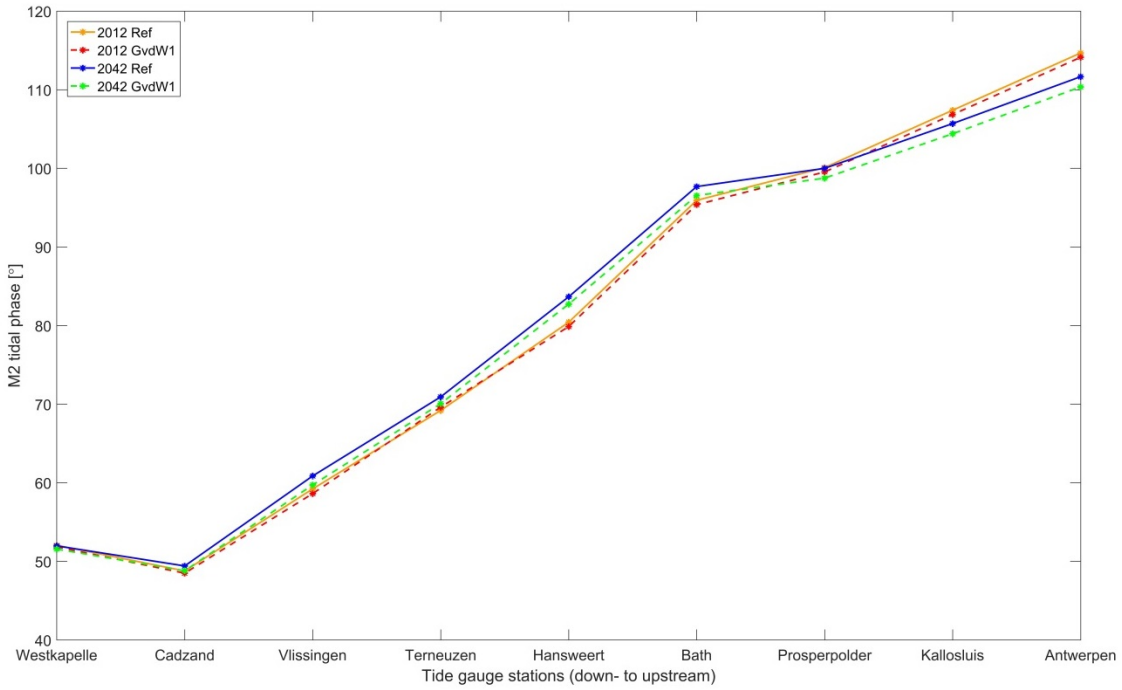
3.1.6 Getijvoortplanting Westerschelde (2DH zand-NeVla)

Alle Delft3D-NeVla simulaties, dus ook zonder Verdieping van de Geul van de Walvischstaart, resulteren in een toename van de amplitude van het M2 getij in de Westerschelde (Figuur 29) en een afname van de fase (Figuur 30). De M2-amplitude toename loopt op tot 14 cm bij Antwerpen. Aan het begin van de simulaties (2012) is het effect van de verdieping op de getijamplitude beperkt, terwijl de toename orde 4 cm bedraagt in het bovenstroomse gedeelte aan het eind van de simulaties (2042). Tegelijkertijd zorgt de verdieping voor een kleine afname in de getijfase. Deze getijontwikkelingen zijn gekoppeld aan de verdieping van de hoofdgeulen in de Westerschelde die enigszins versterkt wordt door de verdieping van de Geul van de Walvischstaart (Sectie 4.3) en uiten zich ook in de toename van de getijvolumes (Sectie 4.1.2). De verdieping van de Westerschelde zorgt ook voor de afname van de relatieve amplitudes en fases van het M2- en M4-getij (Figuur 31 en Figuur 32), wat betekent dat de getijasymmetrie over het algemeen minder sterk en minder vloeddominant wordt. De verdieping van de Geul van de Walvischstaart zorgt zo voor een toename van het sedimentexport (Figuur 34).

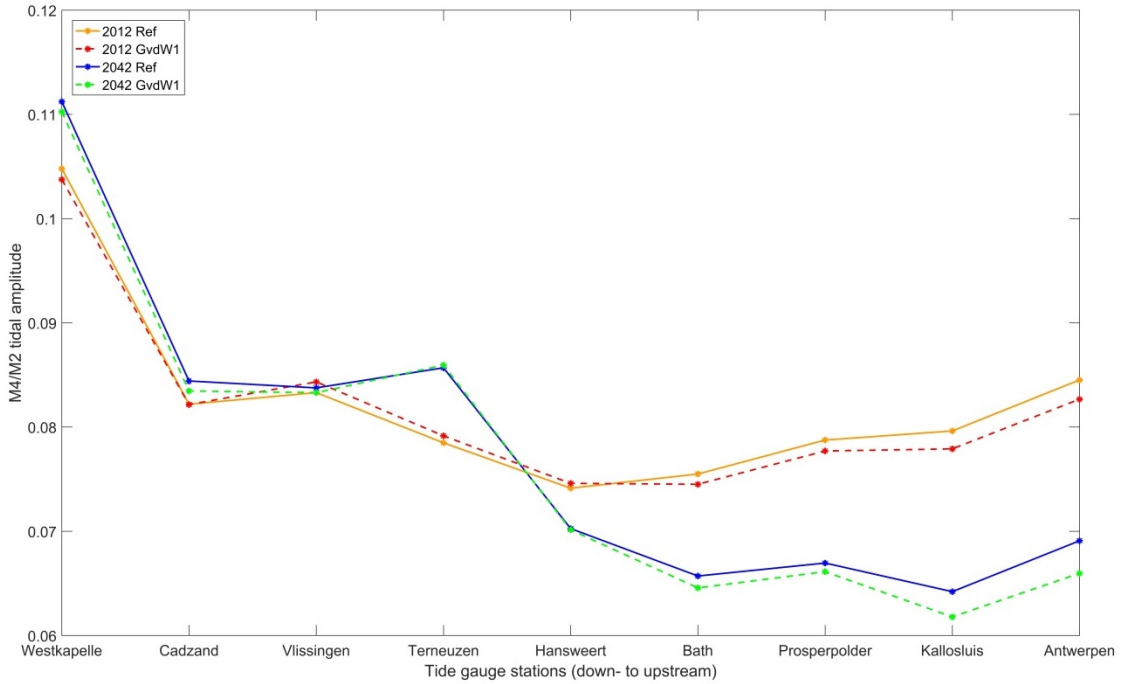
Figuur 29 - Berekende amplitudes van het M2 getij voor verschillende scenario's.



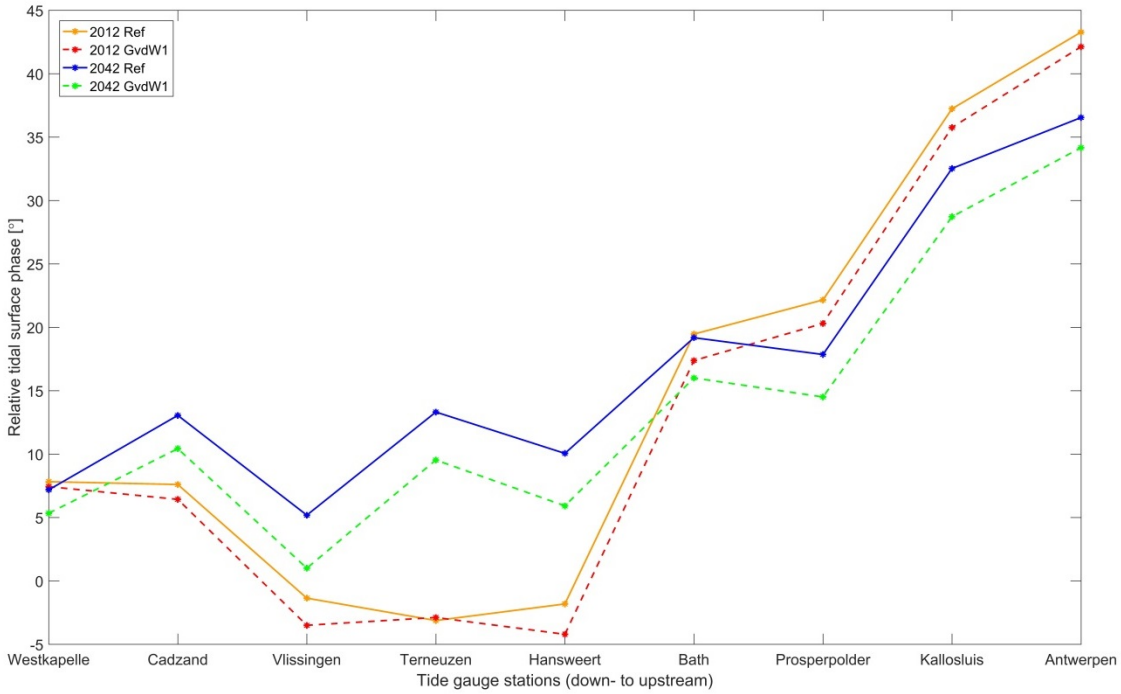
Figuur 30 - Berekende fases van het M2 getij voor verschillende scenario's.



Figuur 31 - Berekende relatieve amplitudes van het M4 en M2 getij voor verschillende scenario's.



Figuur 32 - Berekende relatieve fases van het M4 en M2 getij voor verschillende scenario's.



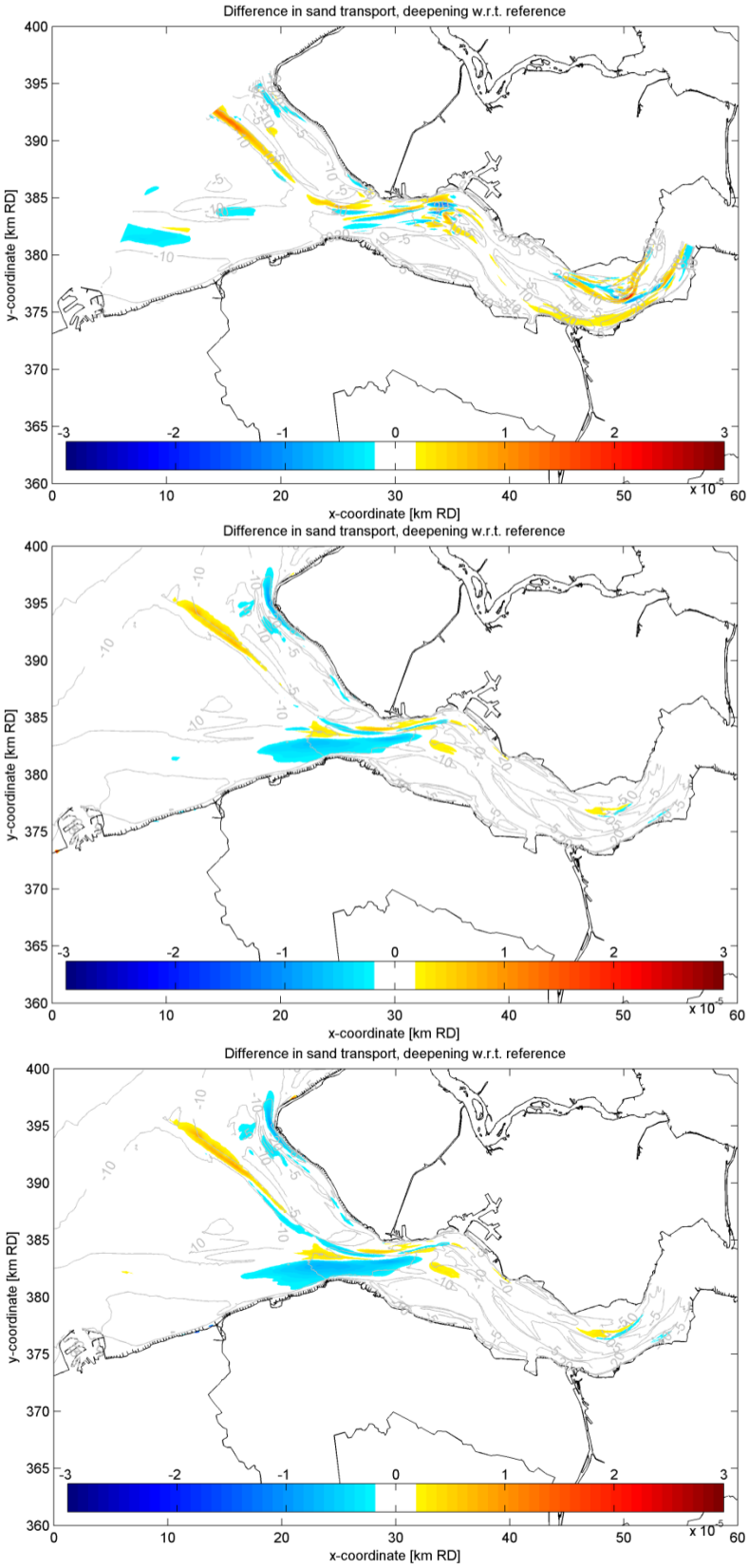
3.2 Effecten op sedimentdynamiek

3.2.1 Zand- en slibtransport (2DH zand-NeVla, Zand-slib ZWeM 3D)

Het verdiepen van de Geul van de Walvischstaart heeft effect op de sedimenttransporten in het mondingsgebied en het Schelde-estuarium. Omdat de bruto transporten groot zijn en de veranderingen hierin klein, wordt alleen gekeken naar de veranderingen in netto transporten. De veranderingen in slib- en zandtransport worden afzonderlijk behandeld.

Het netto zandtransport, dat ebdominant is in de Geul van de Walvischstaart, neemt toe door de verdieping (Figuur 33). In het Oostgat neemt het netto ebtransport licht af. In de Wielingen laten beide modellen (NeVla en ZWeM) een ander gedrag zien: in het NeVla-model is het netto transport in de ebrichting, terwijl in het ZWeM-model het netto zandtransport in de vloedrichting plaatsvindt. De netto transporten zijn in dit gebied in beide modellen echter klein, waardoor een verandering van teken veroorzaakt kan worden door een relatief klein verschil in bruto sedimenttransporten. De getij-asymmetrie in de Wielingen is volgens Verduin (2009) ook vloeddominant qua pieksnelheid, wat overeenkomt met het vloeddominante netto transport in het ZWeM-model. Volgens het ZWeM-model neemt het vloedtransport af door de verdieping. Mogelijk heeft dit lichte sedimentatie aan de oostzijde van de Wielingen tot gevolg.

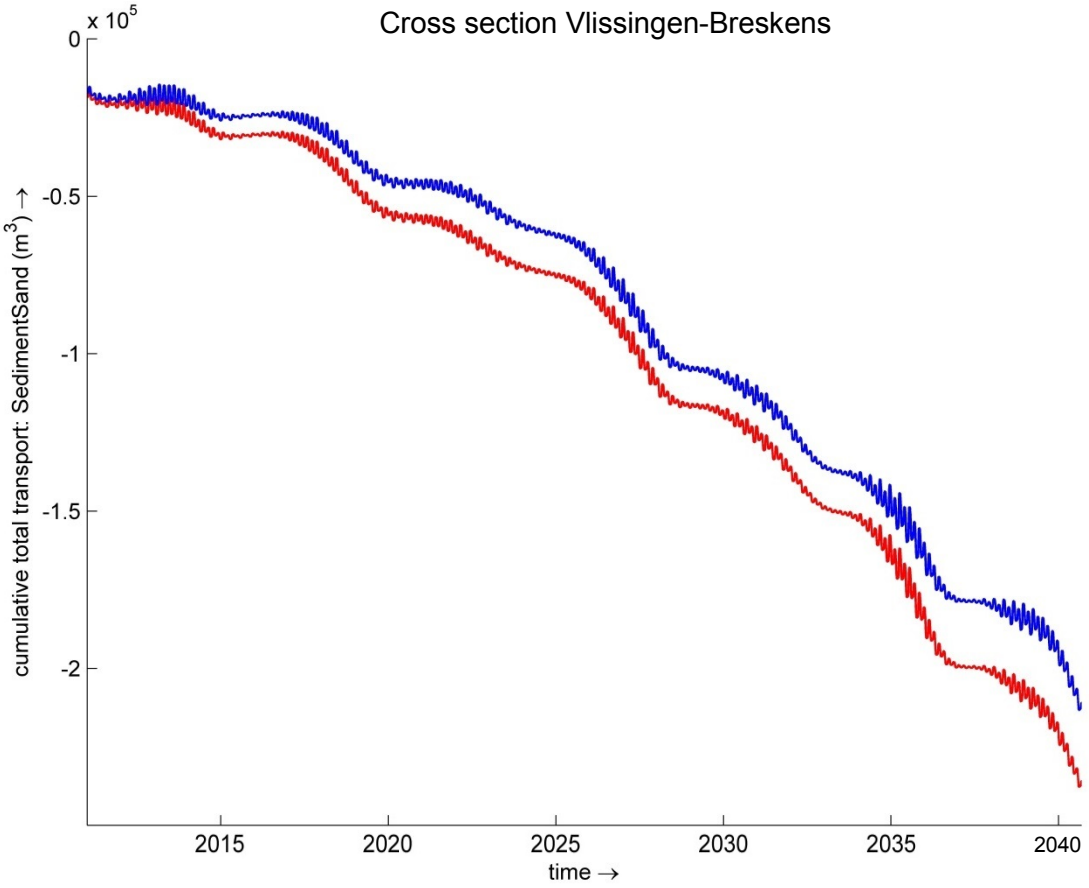
Figuur 33 - Verschillen in gemiddeld totaal zandtransport [m3/s/m] voor het NeVla-model (boven), het ZWeM-model met Holocene bron (midden) en het ZWeM-model met verminderde depositie (onder).



Een toename het netto zandtransport heeft een positief teken.

Figuur 34 laat zien dat de Westerschelde zandexporterend is volgens de Delft3D-NeVla modelberekeningen (Scenario's Ref en GvdW1). De afname van vloeddominantie (Sectie 4.1.5) door de verdieping van de Geul van de Walvischstaart, door de verdere verdieping van de Westerschelde, zorgt voor een toename van de zandexport. Dit effect wordt sterker in de tijd, resulterend in een toename van zandexport van 11% aan het einde van de simulatie in 2042.

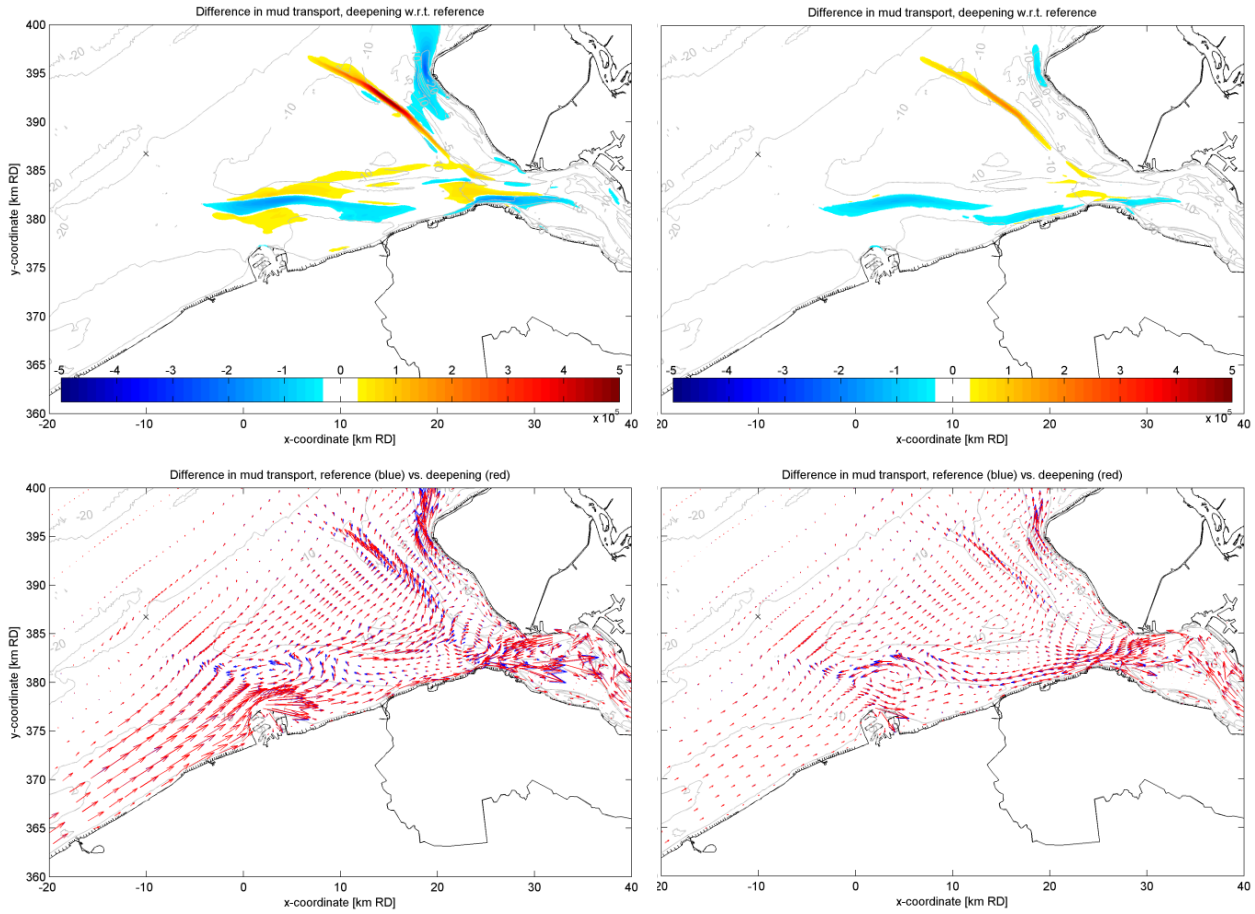
Figuur 34 - Cumulatief zandtransport door de ingang van de Westerschelde nabij Vlissingen in de periode 2012-2042.



Positief: import, negatief: export. Het betreft 2DH Delft3D-NeVla berekeningen zonder (blauw) en met (rood) verdieping van de Geul van de Walvischstaart.

Het slibtransport verandert ook als gevolg van de verdieping. In beide modelvarianten van het ZWeM-model neemt het netto ebtransport als gevolg van de verdieping toe. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de grotere waterdiepte. In het Oostgat en de Wielingen neemt het netto ebtransport juist af.

Figuur 35 - Verandering in netto slibtransport, scenario met verdieping ten opzichte van de referentie, voor de modelvariant met Holocene bron (links) en de modelvariant met verminderde depositie (rechts). Een toename heeft een positief teken.



3.2.2 Sedimentconcentraties en slibmassa in en op de bodem (Zand-slib ZWeM 3D)

Het verschil in sedimentconcentraties nabij de bodem is weergegeven in Figuur 36, waarbij het verschil tussen de maandgemiddelde sedimentconcentratie bij de bodem voor variant met verdieping ten opzichte van de referentie is berekend. Wederom is er een verschil tussen de modelvariant met Holocene bron en de modelvariant met verminderde depositie, maar er zijn ook overeenkomsten. Zo laten beide modelvarianten een afname van de sedimentconcentratie ten noordoosten van de Geul van de Walvischstaart zien, evenals een afname in de keel van het estuarium en een afname rondom Zeebrugge. In de Geul van de Walvischstaart, de Wielingen en op de Vlakte van de Raan is het gedrag tegengesteld: de variant met Holocene bron voorspelt een afname van de sedimentconcentratie, terwijl de variant met verminderde depositie een toename voorspelt.

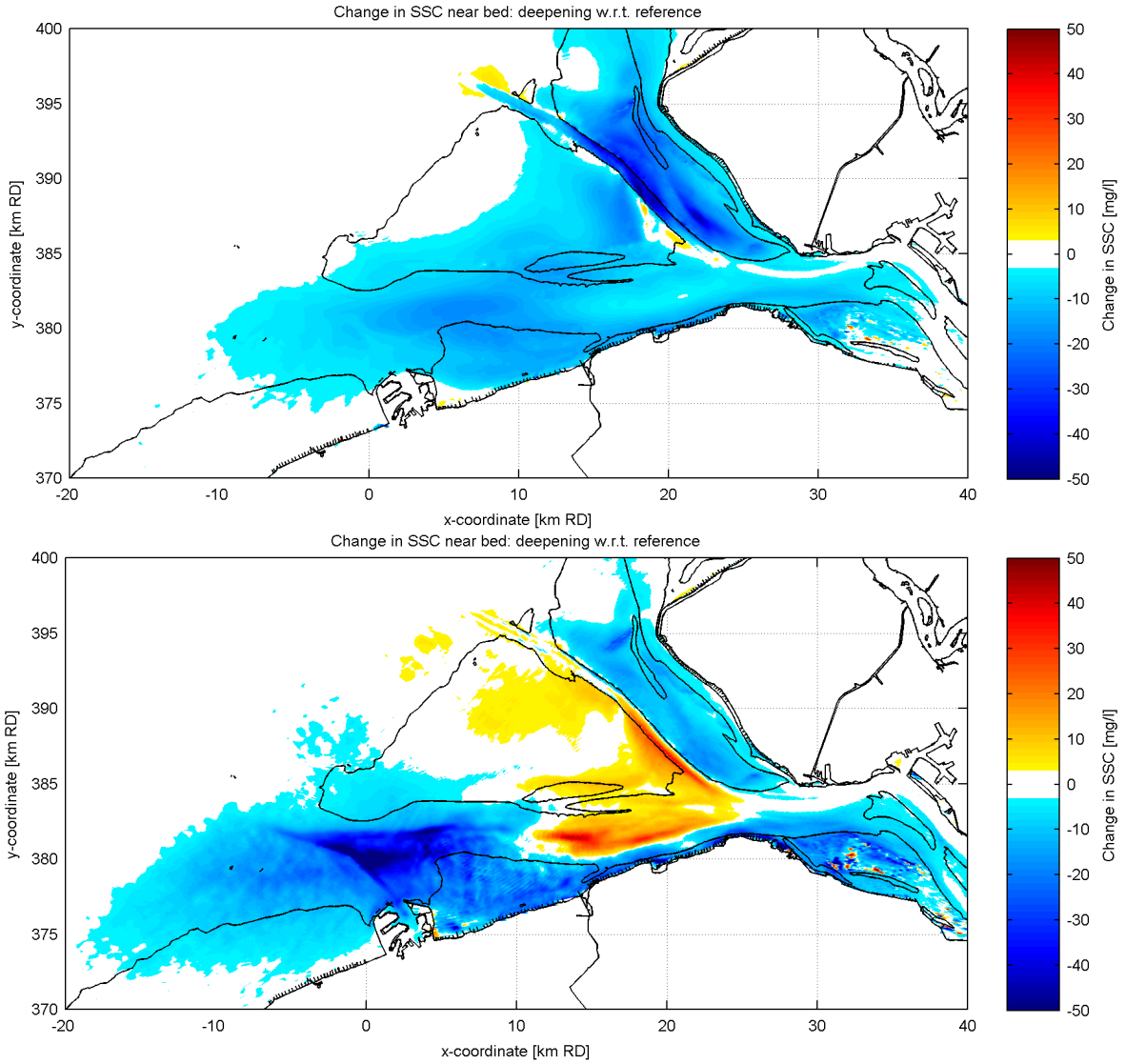
De veranderingen in sedimentconcentratie moeten bekeken worden in combinatie met de veranderingen in hoeveelheid slib in en op de bodem (Figuur 37 en Figuur 38). De figuren laten zien dat de hoeveelheid slib in en op de bodem in de Geul van de Walvischstaart, de Wielingen en op de Vlakte van de Raan toeneemt. Ten noordoosten van de Geul van de Walvischstaart en rondom Zeebrugge neemt de hoeveelheid slib in en op de bodem juist af. Er vindt dus een herverdeling van slib plaats als gevolg van de verdieping. Ook in de referentiesimulaties zijn er gedurende de periode mei verschillen in de massa slib in en op de bodem, als gevolg van de natuurlijke dynamiek (getij, golven, wind). De afname van de massa slib op de bodem bij Zeebrugge treedt ook in de referentie op, alleen is dit effect met verdieping sterker. Hetzelfde geldt voor de toename in de Wielingen en de Vlakte van de Raan.

Door het afgenomen ebtransport in de Wielingen en de verminderde bodemschuifspanning in dezelfde zone, verzamelt er meer slib in de Wielingen en op de Vlakte van de Raan. Dit slib accumuleert op en in de

bodem in de modelvariant met Holocene bron, omdat deze een directe uitwisseling tussen de waterkolom en de bodem heeft. In de variant met verminderde depositie wordt het sedimenttransport naar de bodem geremd, waardoor de sedimentconcentratie in de waterkolom toeneemt. Dit verklaart het verschil in sedimentconcentraties bij de bodem tussen de beide modelvarianten. De toe- en afnames zijn in de orde van 5-10% van de totale sedimentconcentratie.

Hoewel de sedimentconcentratie op sommige locaties dus afneemt, zal de totale hoeveelheid slib in het systeem waarschijnlijk niet sterk veranderen, omdat een groot deel van het slib op en in de bodem terecht komt en van daaruit weer makkelijk kan resuspenderen. Wel zorgt de stortstrategie in het model ervoor dat er minder slib in het systeem aanwezig is: het materiaal dat uit de Geul van de Walvischstaart wordt gebaggerd, wordt uit het model gehaald en niet teruggestort. Hierdoor neemt de hoeveelheid sediment in het systeem af. Dit effect is echter klein ten opzichte van de veranderingen in slibverdeling.

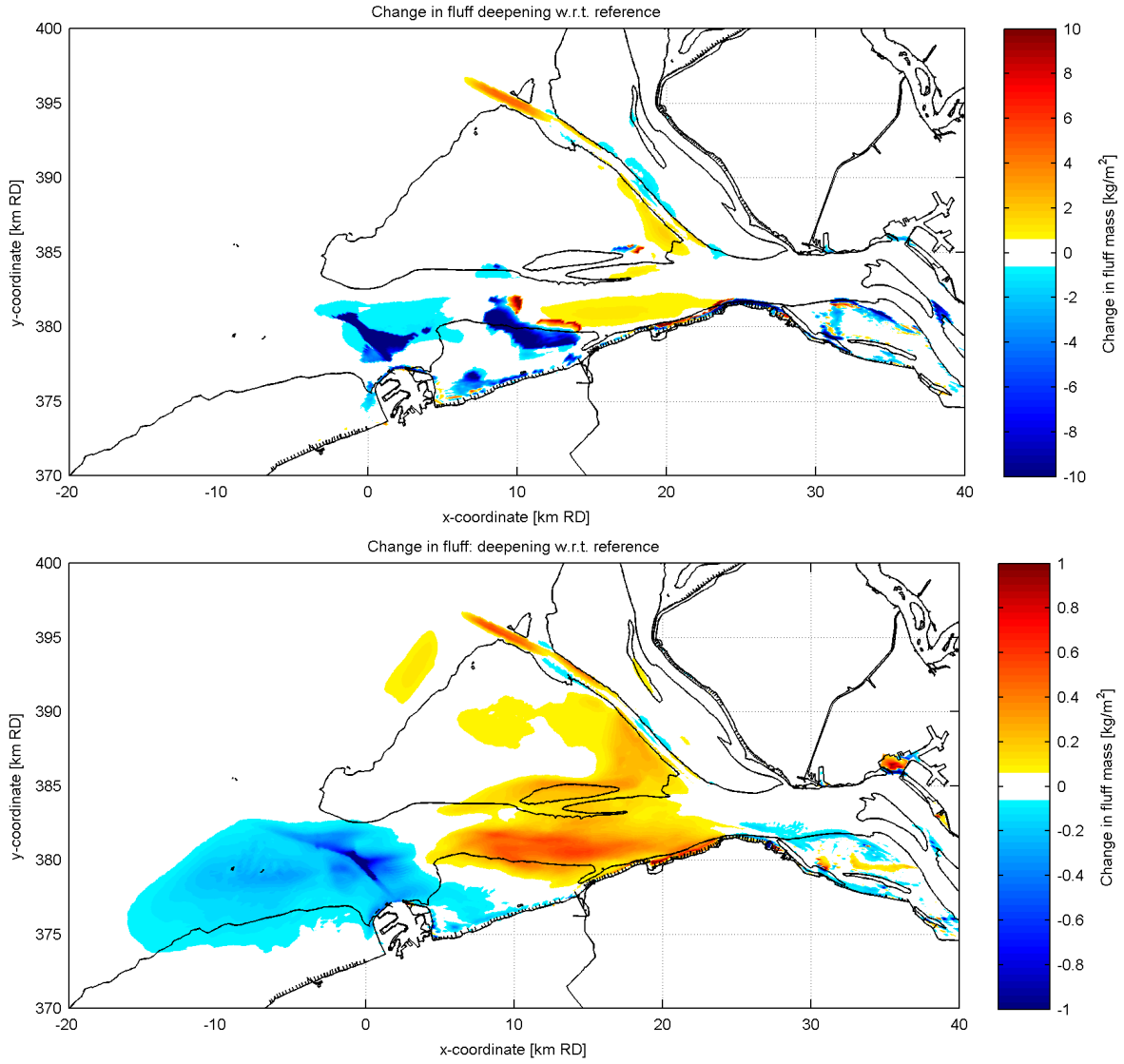
Figuur 36 - Verandering in sedimentconcentratie nabij de bodem (ZWeM 3D).



Verdieping ten opzichte van de referentie, voor de modelvariant met Holocene bron (boven) en de modelvariant met verminderde depositie (onder). De sedimentconcentratie betreft het gemiddelde van de simulatieperiode (maand mei). Ter vergelijking: de sedimentconcentratie aan het wateroppervlak bedraagt tussen de 25 en 50 mg/l in deze tijd van het jaar in de omgeving van de Vlakte van de Raan

Figuur 37 toont dat de massa slib op de bodem in beide modelvarianten inderdaad toeneemt in de Wielingen en ook op de Vlakte van de Raan. Voor de variant met verminderde depositie zijn de toenames in de orde van 10-30% van de totale massa slib op de bodem, en de afnames zijn in de orde van 10%. In de Geul van de Walvischstaart zijn de toenames groter. Bij de variant met Holocene bron is het effect iets minder sterk: afnames in de orde van 5% en toenames tot 15%. Dit is ook het gevolg van het feit dat er in de variant met Holocene bron veel meer slib in het systeem aanwezig is, waardoor verschillen hierin al snel relatief klein zijn.

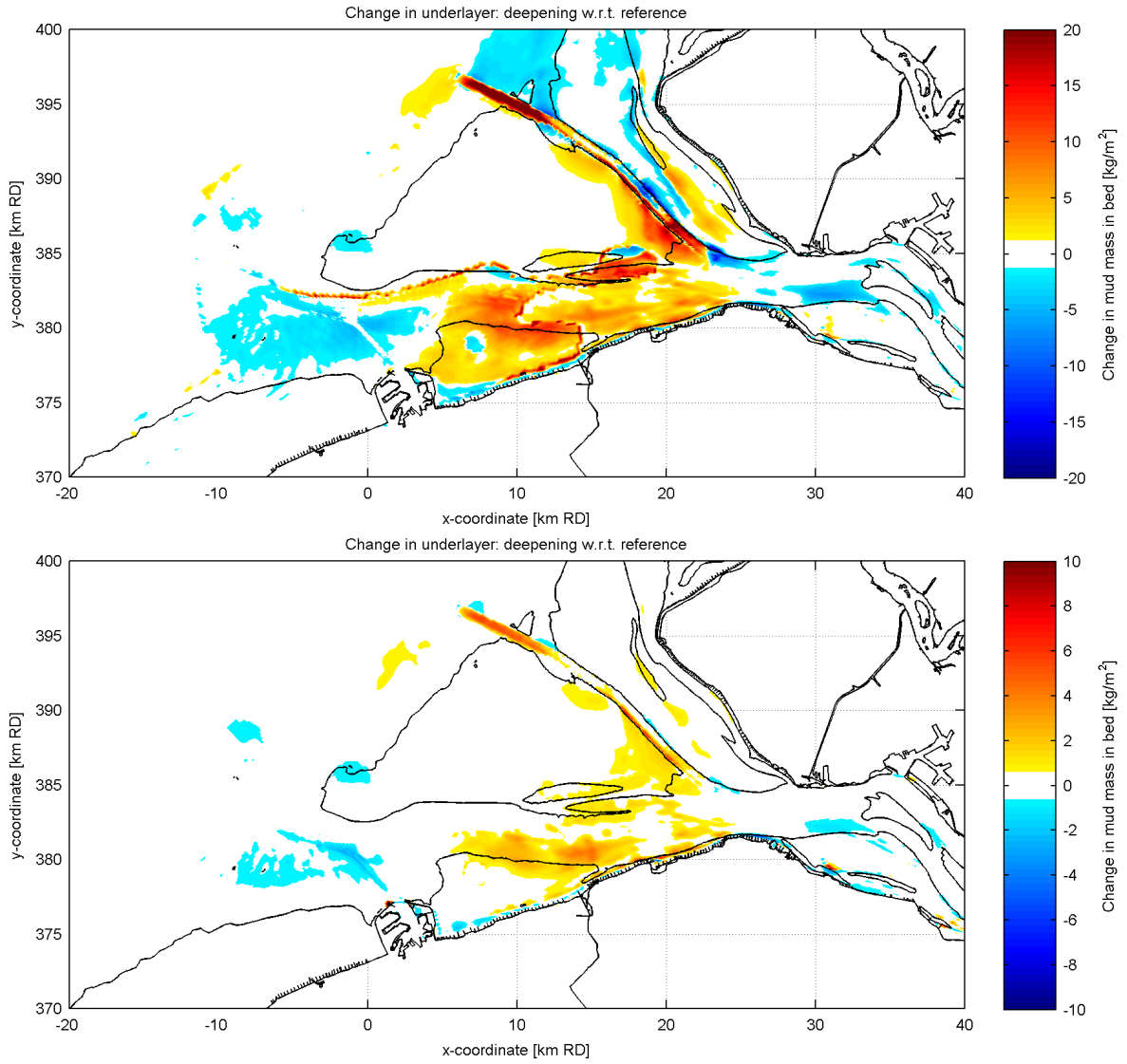
Figuur 37 - Verandering in slibmassa op de bodem (in de flufflaag).



Verdieping ten opzichte van de referentie, voor de modelvariant met Holocene bron (boven) en de modelvariant met verminderde depositie (onder). De kleurenschalen van beide figuren zijn verschillend

De hoeveelheid slib in de bodem (Figuur 37) neemt op dezelfde plekken toe en af als de bij de hoeveelheid slib op de bodem (Figuur 36). Opnieuw zijn de veranderingen in de variant met Holocene bron groter, omdat er meer slib in het systeem beschikbaar is.

Figuur 38 - Verandering in slibmassa in de bodem (in de onderlaag).



Verdieping ten opzichte van de referentie, voor de modelvariant met Holocene bron (boven) en de modelvariant met verminderde depositie (onder). De kleurenschalen van beide figuren zijn verschillend

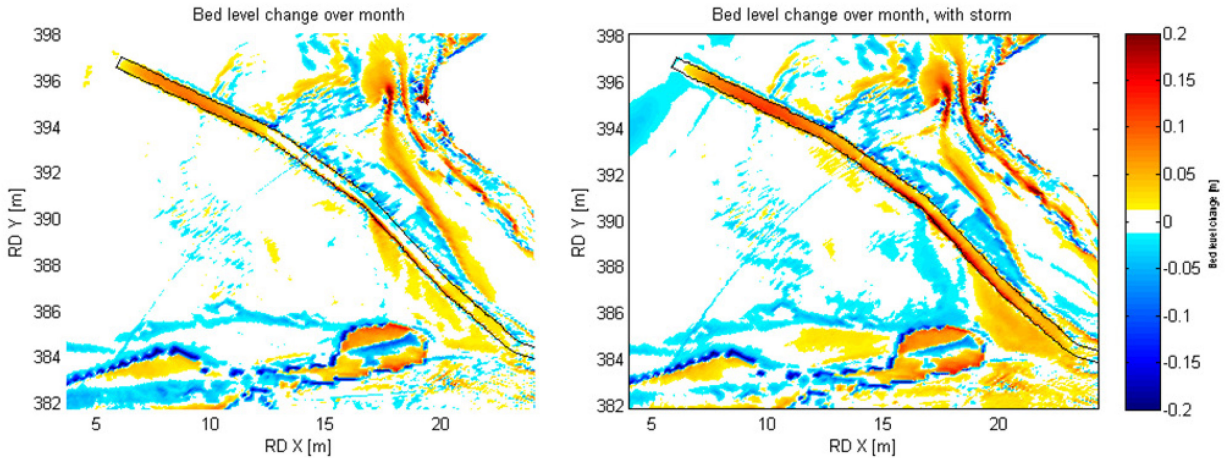
3.2.3 Stormeffecten (Zand-slib ZWeM 3D)

Naast simulaties voor de representatieve maand mei 2014 zijn ook simulaties uitgevoerd met de condities van de maand december 2013 om de mogelijke effecten van stormen te kunnen kwantificeren. In december 2013 vond de zogenaamde ‘Sinterklaasstorm’ plaats: een storm van meer dan een etmaal waarbij hoge waterstanden, golven en harde wind van het zuidwesten naar het noordwesten draaide. De waterstanden horende bij een dergelijke storm komen eens in de 10-20 jaar voor, de golfhoogten en periodes komen vaker voor: een vergelijkbare combinatie van golfhoogte en windsnelheid treedt gemiddeld drie keer per tien jaar op. Hoe de herhalingsperiode van deze storm in termen van morfologische impact zich precies verhoudt tot die van andere stormen kan alleen ex-ante bepaald worden door een uitgebreide vergelijking van events, bijvoorbeeld ook met lagere waterstanden die hogere bodemschuifspanningen kunnen veroorzaken. Desalniettemin kan de Sinterklaasstorm beschouwd worden als een voorbeeld van zeer dynamische condities die niet meerdere malen per jaar op zullen treden.

In een standaardmaand treedt vooral sedimentatie in de Geul van de Walvischstaart op aan de westelijke en oostelijke uiteinden; het midden is licht erosief (Figuur 39). Als gevolg van een storm wordt de sedimentatie aan de uiteinden sterker (van ca. 5 cm per maand tot lokaal bijna 10 cm) en treedt ook

sedimentatie in het midden op, vooral langs de zuidelijke geulwand. Dit heeft als gevolg dat het baggerbezwaar in een maand met deze storm ca. 80% (voor de modelvariant met Holocene bron) tot 40% (verminderde depositievariant) hoger is dan in de standaardcondities die ook een iets dynamischer periode kennen. Het effect van een storm op het baggerbezwaar is duidelijk waarneembaar in de ontwikkeling van het baggervolume in de tijd: in de eerste tien dagen rondom de Sinterklaasstorm vindt ongeveer twee derde van de totale sedimentatie in de maand plaats. Op jaarbasis reduceert dit echter tot minder dan 2% als uitgegaan wordt van het eens per 3 jaar voorkomen van een dergelijke storm als er vanuit gegaan wordt dat de sedimentatie onder standaardcondities representatief is voor de jaarlijkse ontwikkeling. Gezien de beperkte temporale dynamiek in baggervolumes over een jaar (zie Vroom et al., 2016) lijkt dit gerechtvaardigd.

Figuur 39 - Verandering in bodemligging na een standaard maand (links: mei 2014) en een maand met zware storm (rechts: december 2013 inclusief Sinterklaaststorm) voor de modelvariant met Holocene bron.



De patronen van sedimentatie en erosie in de omgeving van de geul zijn vergelijkbaar maar de periode met storm laat sterkere sedimentatie in de geul zelf zien.

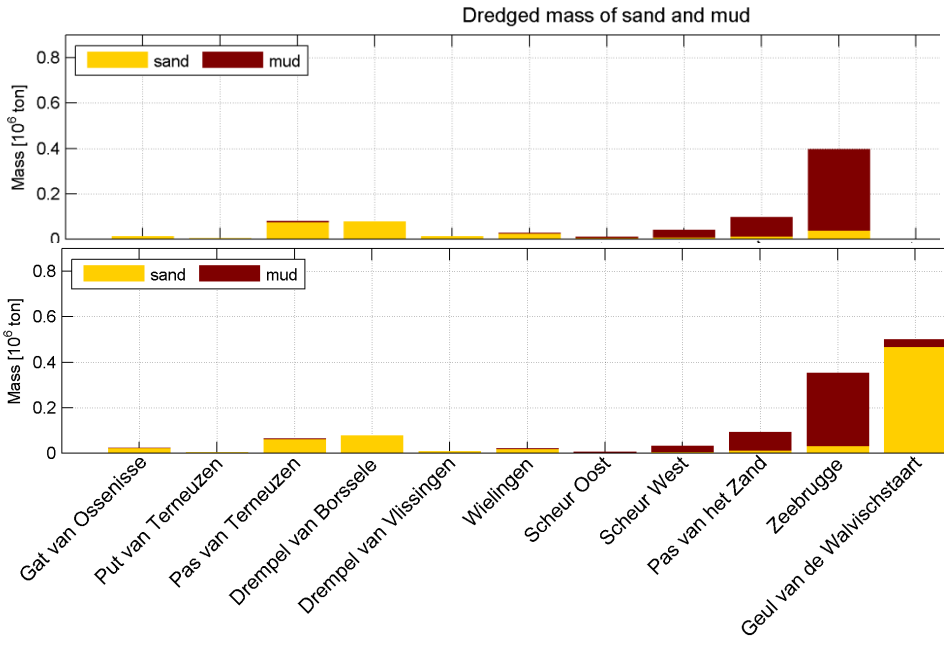
3.2.4 Baggerbezwaar (Zand-slib ZWeM 3D)

De baggervolumes in de Geul van de Walvischstaart op basis van het zand-slibmodel (ZWeM) variëren tussen de 0,2 en de 0,5 miljoen ton droge stof (TDS) per maand, equivalent met 2,5 tot 6,4 miljoen TDS per jaar. Het merendeel van de baggerhoeveelheid bestaat uit zand (2,5 – 5,7 miljoen TDS per jaar). Voor de variant met Holocene bron (Figuur 39) is dit onder andere het gevolg van de initiële bodemsamenstelling in de Geul van de Walvischstaart. Bij aanvang van de simulaties ligt er een zandpakket van 30 cm in de geul, wat representatief is voor de dikte van de actieve laag in kustgebieden. De sedimentatie van een grote hoeveelheid slib leidt hierdoor echter tot het baggeren van een grote hoeveelheid zand, omdat het slib uniform wordt gemixt over de ~30 cm dikke zandige onderlaag. Als er bijvoorbeeld 2 cm slib in de Geul van de Walvischstaart bezinkt met een zandige bodem van 30 cm dik en er moet daardoor 2 cm van het zandslibmengsel worden gebaggerd, dan is dit ca. 94 % zand en 6 % slib. Omdat zand een grotere dichtheid heeft dan slib (1,6 TDS/m^3 versus 0,500 TDS/m^3) leidt dit tot een nog groter relatief aandeel zand in de baggermassa (in kg). Dit effect is initieel: naarmate de simulatie langer zal lopen, zal door het baggeren de hoeveelheid zand in de Geul van de Walvischstaart afnemen, terwijl de hoeveelheid slib toeneemt. Dit is ook te zien in Figuur 38. De totale hoeveelheid gebaggerd materiaal zal echter niet significant veranderen, enkel de zand-slibverhouding.

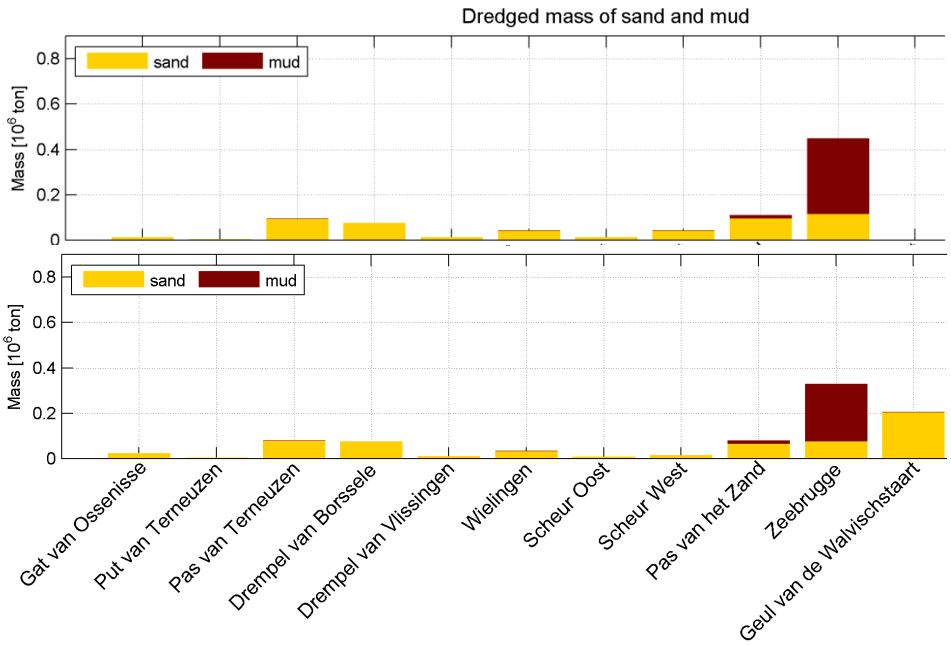
De variant met Holocene bron (Figuur 39) voorspelt een veel grotere slibvolumes dan de variant met verminderde depositie (Figuur 40). Dit is het gevolg van de veel grotere beschikbaarheid van slib in de variant met Holocene bron. Dit wordt ook gereflecteerd in het verschil in sedimentsamenstelling van de andere geulen in het mondingsgebied, zoals de Pas van het Zand, waar in de variant met Holocene bron

vooral slib wordt gebaggerd, terwijl de variant met verminderde depositie vooral een zandig volume voorspelt.

Figuur 40 - Maandelijks baggerbezwaar (TDS) van zand (geel) en slib (bruin) voor de referentiesimulatie (boven), de simulatie met verdieping en normale zandlaag in de Geul van de Walvischstaart (onder) voor de variant met Holocene bron voor een periode van 1 maand.



Figuur 41 - Baggerbezwaar (TDS) van zand (geel) en slib (bruin) voor de referentiesimulatie (boven) en de simulatie met verdieping (onder) voor de variant met verminderde depositie voor een periode van 1 maand.



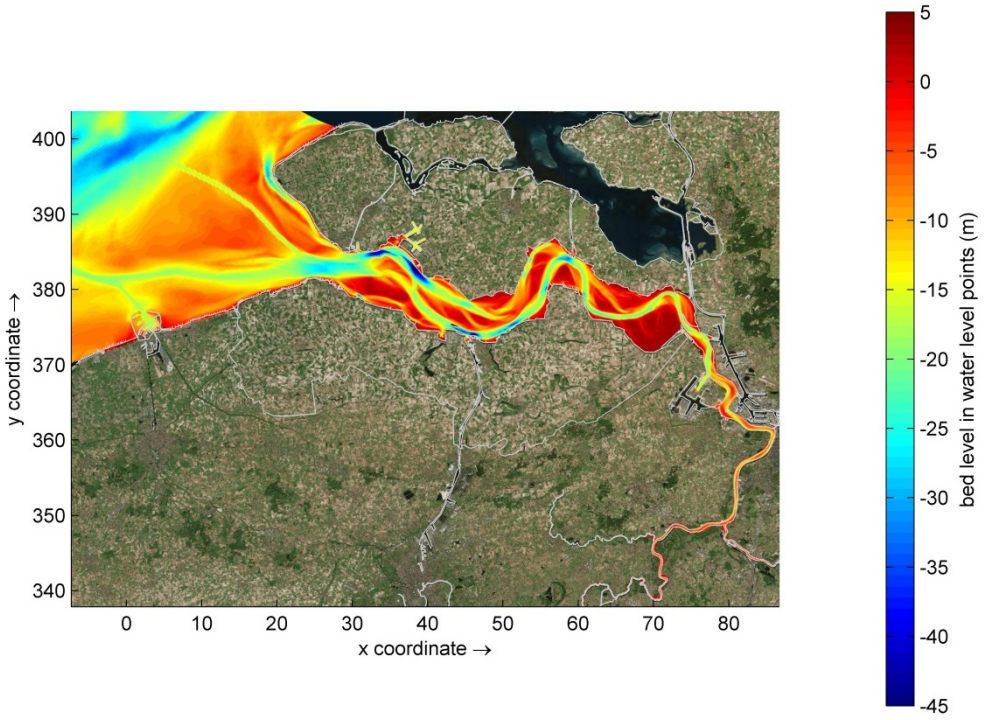
3.3 Middellange-termijn morfologische effecten

3.3.1 Grootschalige bodemverandering tussen 2012 en 2042 (Delft3D-NeVla model)

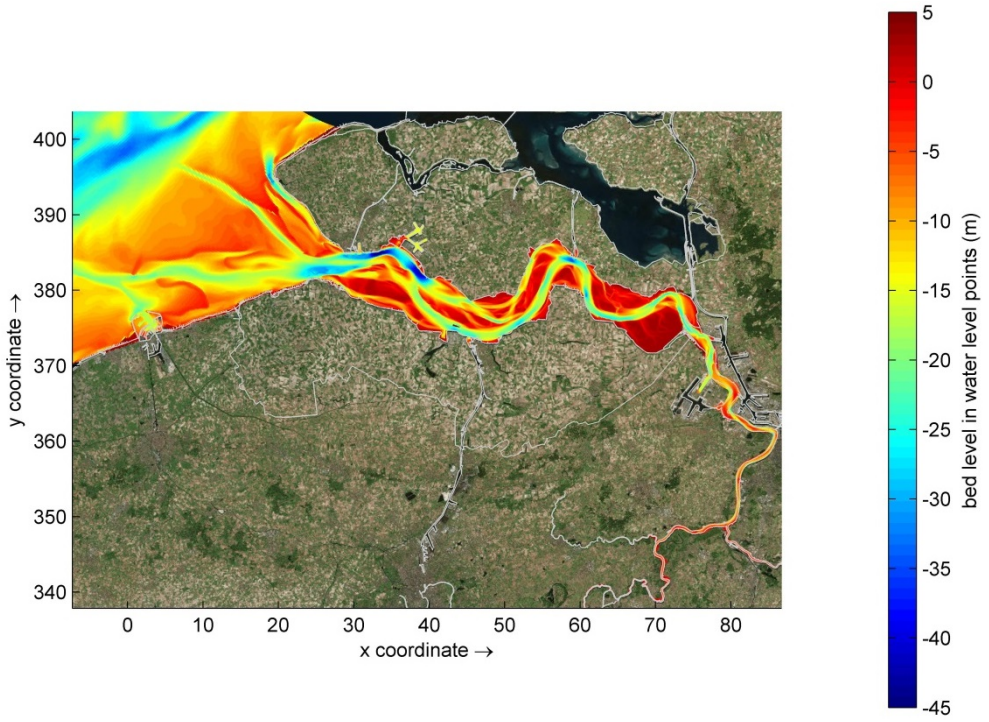
Het Delft3D-NeVla model berekent voor de periode 2012-2042 aanzienlijke bodemveranderingen (Figuur 42 - Figuur 44). De berekende sedimentatie/erosie is met ±15 m met name sterk in de Westerschelde. Het areaal intergetijdengebied neemt toe, en de hoofgeulen in de Westerschelde verruimen. Dit is gerelateerd aan de toename van de getijamplitude en getijvolumes tussen Westkapelle en Antwerpen (Sectie 3.1.6).

Deze verruiming van de hoofdgeulen is zichtbaar in beide scenario's, maar dit effect is sterker in geval van de verdieping van de Geul van de Walvischstaart (Scenario GvdW1). Dit blijkt uit de overwegend blauwe kleuren rond de hoofdgeulen van de Westerschelde die wijzen op aanvullende erosie door toedoen van de verdieping (Figuur 45). Deze ontwikkeling is gekoppeld aan de toegenomen getijamplitudes, afgenomen vloeddominantie en de hieraan gekoppelde toegenomen export van zand uit de Westerschelde (Figuur 34).

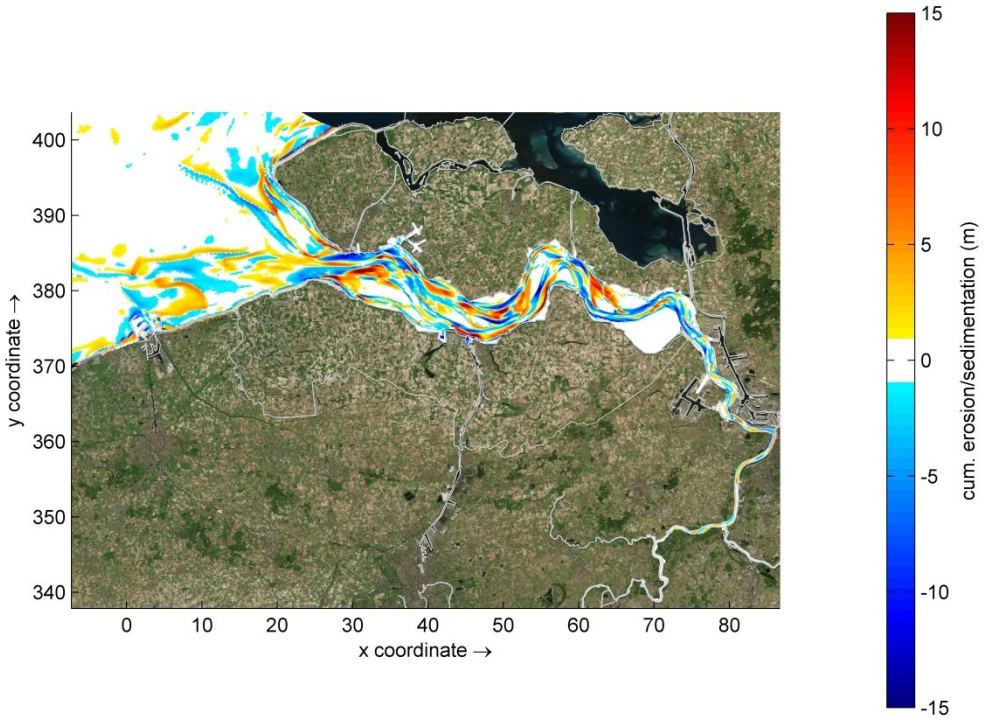
Figuur 42 - Initiële bodemligging gebaseerd op de 2012 metingen en inclusief de Verdieping van de Geul van de Walvischstaart (Scenario GvdW1)



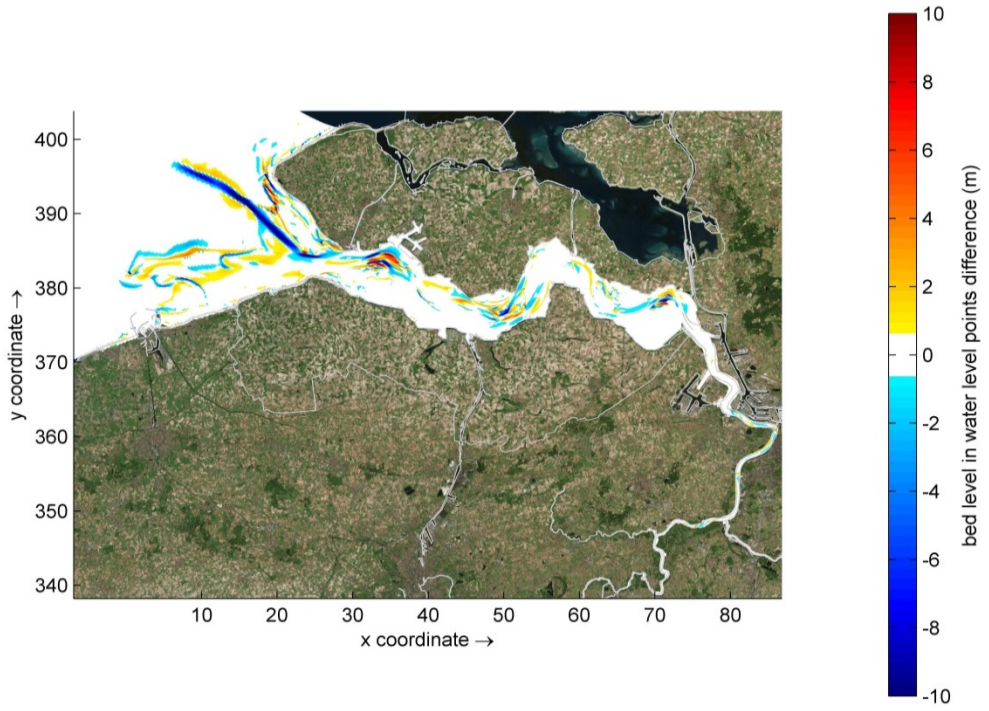
Figuur 43 - Berekende bodemligging in 2042 waarbij de Geul van de Walvischstaart vaargeul onderhouden wordt (Scenario GvdW1).



Figuur 44 - Berekende cumulatieve sedimentatie (rood) en erosie (blauw) tussen 2012 en 2042 voor Scenario GvdW1.



Figuur 45 - Verschil tussen de berekende bodems in 2042 volgens Scenario GvdW1 met de Geul van de Walvischstaart vaargeul en de referentieberekening zonder vaargeul.



Rood: bodem volgens de referentieberekening ligt lager; blauw: bodem volgens Scenario GvdW1 ligt lager.

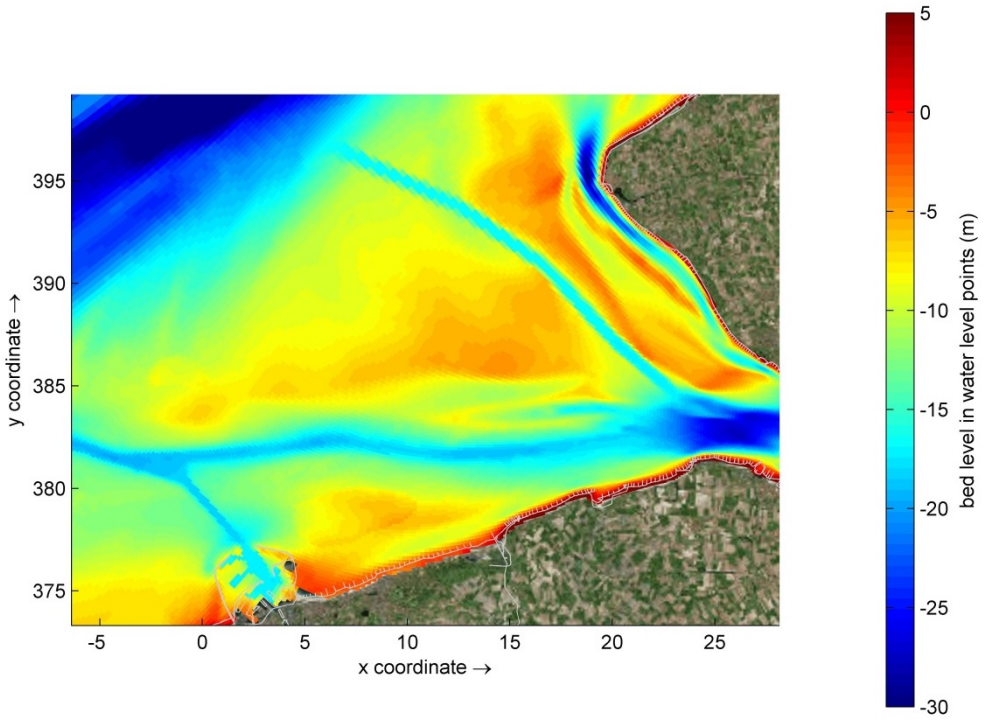
3.3.2 Morfologische ontwikkeling Geul van de Walvischstaart (Delft3D-NeVla model)

Figuur 46-Figuur 48 laten zien dat grote delen van de Geul van de Walvischstaart verdiepen (met 3 m of meer) en verbreden (tot 200 m); de verbreding treedt met name op in oostelijke richting. De verdieping va, de Geul van de Walvischstaart is gerelateerd aan de toename in getijdebieten, zie §3.1.3. Zonder vaargeulonderhoud (Scenario GvdW2) vindt de grootste aanzanding (meer dan 2 m) plaats in het zuidoostelijke gedeelte van de Geul van de Walvischstaart waar een onderwater zandspit ontstaat (Figuur 49). Deze figuur laat ook aanzanding zien in het noordwestelijke deel van de vaargeul, maar deze is met ~1 m duidelijk minder sterk. Met uitzondering van deze gebieden is de Geul van de Walvischstaart min of meer stabiel. Vaargeulonderhoud wordt vooral voorspeld aan beide uiteinden van de Geul van de Walvischstaart.

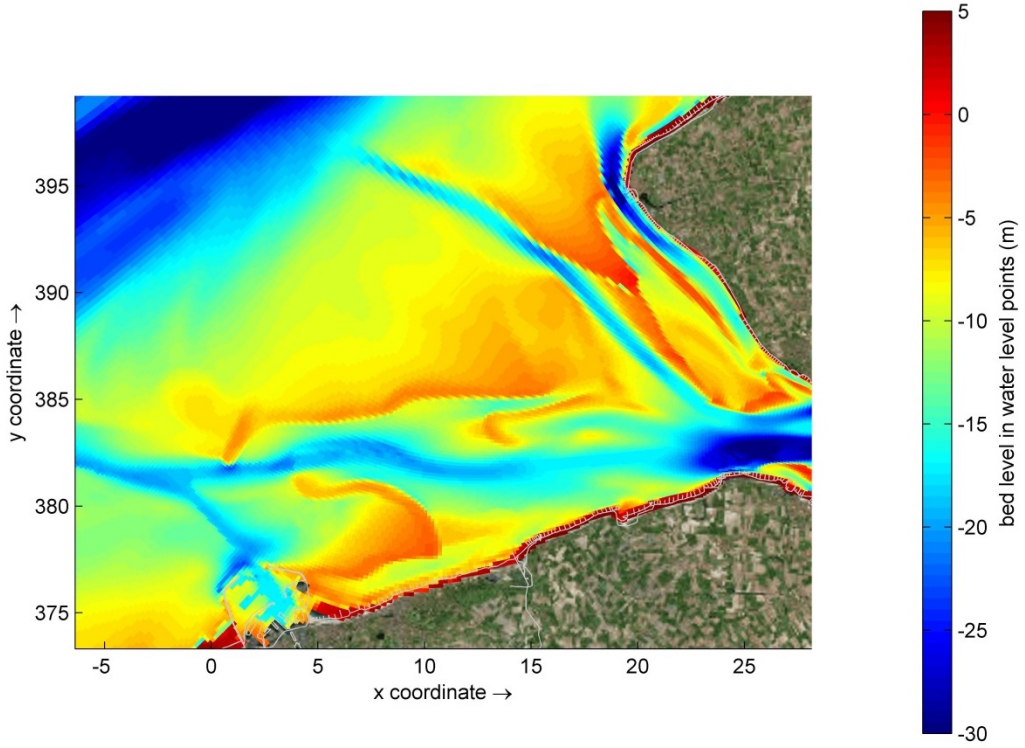
De aanzanding van de Geul van de Walvischstaart wordt meer bepaald door het getij dan door golfwerking; de orbtiaalsnelheden bij de bodem van de Geul van de Walvischstaart zijn kleiner dan 0.2 m/s wat een stuk kleiner is dan de getijstroming. Dit blijkt ook uit het westwaarts netto zandtransport in het zuidoostelijke deel van de Geul van de Walvischstaart; deze richting is tegengesteld aan de dominante golfrichting. De sedimentatie alhier wordt met name veroorzaakt door de westwaartse migratie van ondieptes door het getij dat de Westerschelde uitstroomt. Het onderhoudsvolume is 49 miljoen m^3 in de periode 2012-2042 (Figuur 51), wat correspondeert met 1,6 miljoen m^3/jaar oftewel 2,6 miljoen TDS/jaar met een (droge) bulkdichtheid van 1,6 TDS/m^3.

In het noordwesten is de nieuwe vaargeul in NNW-richting doorgetrokken, daar waar de getijstroming meer naar het noorden afbuigt, in de richting van de Deurloo-West, zie Figuur 50 op p. 44). Hierdoor is de getijstroming hier gedurende grote delen van de eb en vloed relatief laag, wat tot significante sedimentatie leidt. Deze observatie heeft geleid tot een ander scenario met een aangepaste ligging van de vaargeul meer in lijn met het verloop van de Geul van de Walvischstaart (Scenario GvdW3), wat beter aansluit bij de richting van de getijstroming (Figuur 50). Deze aanpassing zorgt voor een ~25% afname van de baggervolumes in vergelijking met het oorspronkelijke tracé. In het huidige onderzoek is niet onderzocht welke nautische impact deze wijziging van het tracé zou hebben.

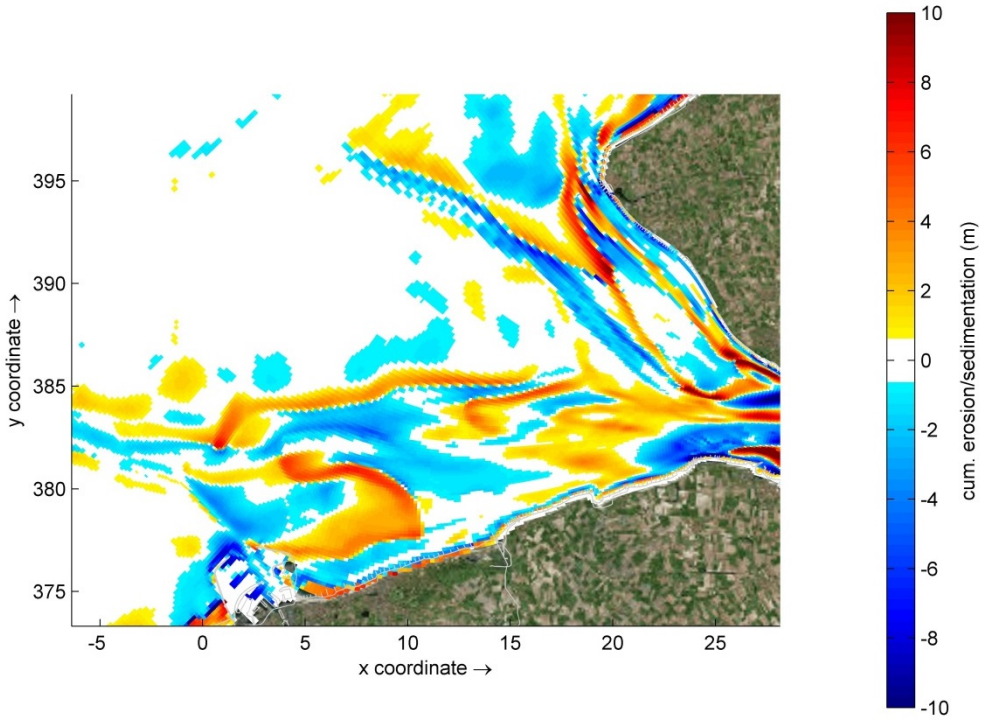
Figuur 46 - Initiële bodemligging gebaseerd op de 2012 metingen en inclusief de Verdieping van de Geul van de Walvischstaart (Scenario GvdW1)



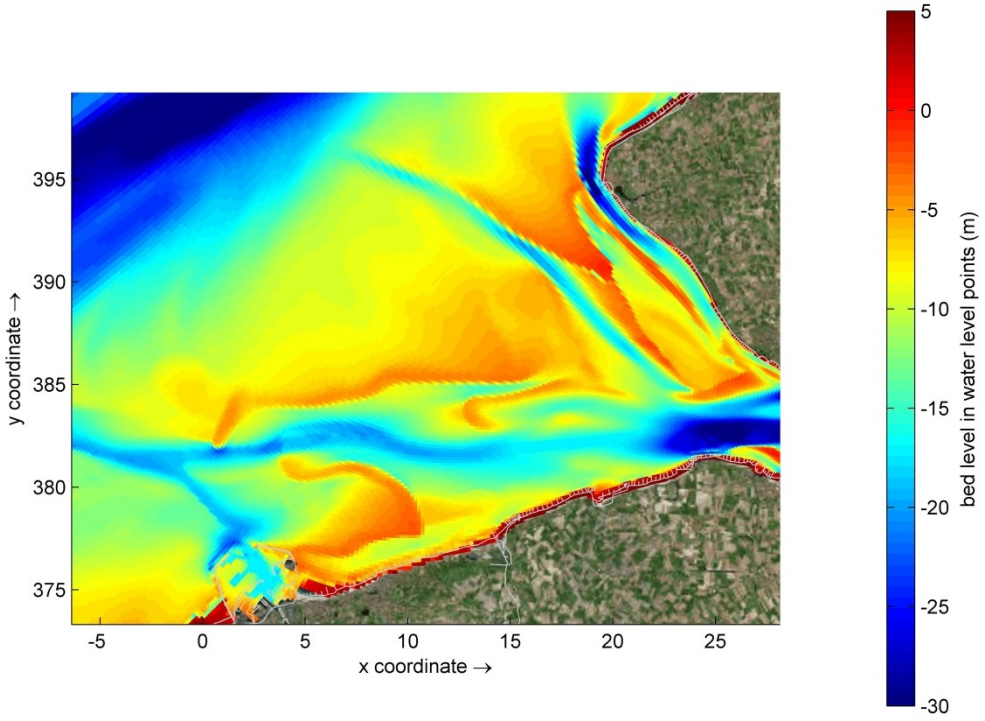
Figuur 47 - Berekende bodemligging in 2042 waarbij de Geul van de Walvischstaart vaargeul onderhouden wordt (Scenario GvdW1).



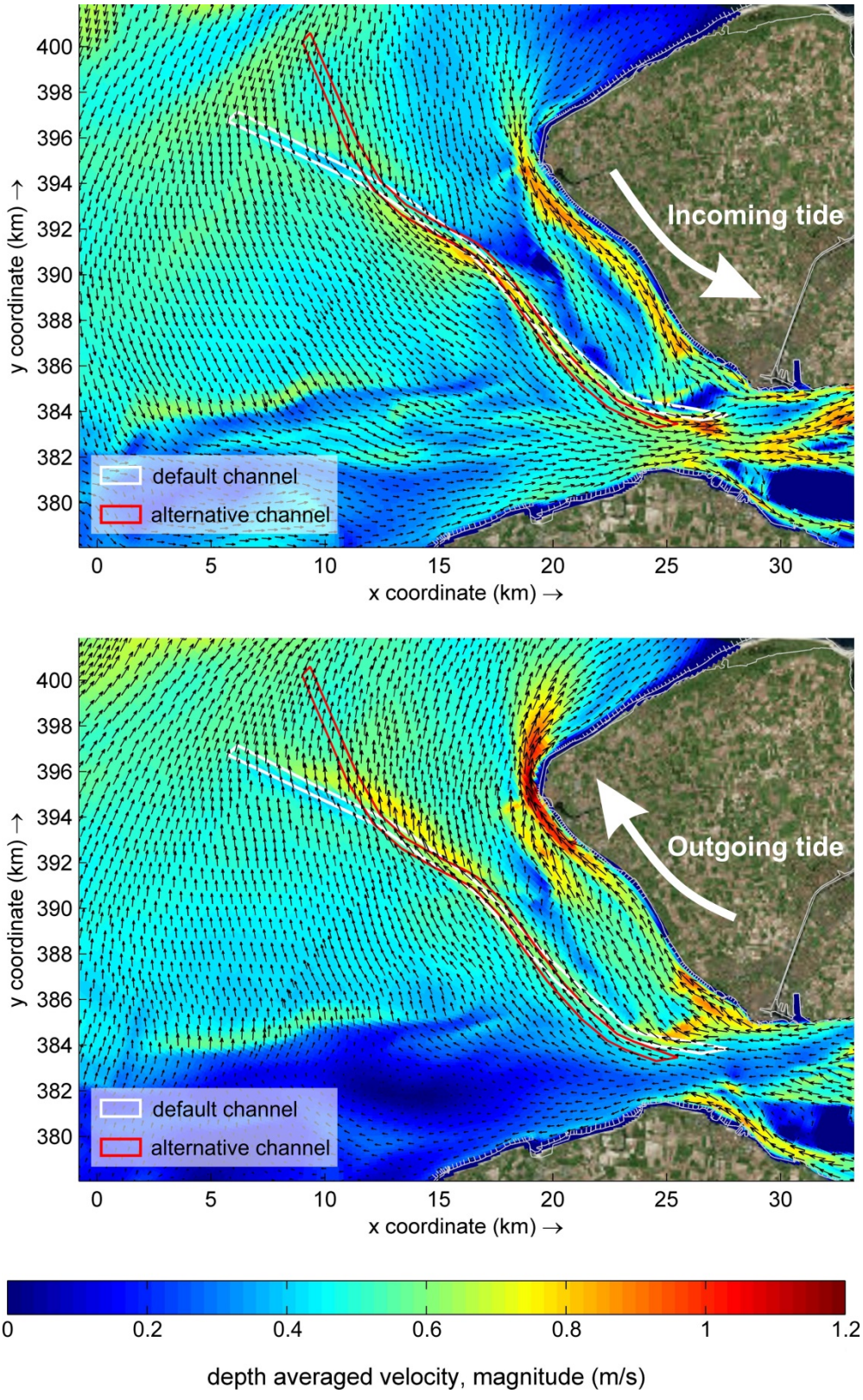
Figuur 48 - Berekende cumulatieve sedimentatie (rood) en erosie (blauw) tussen 2012 en 2042 voor Scenario GvdW1.



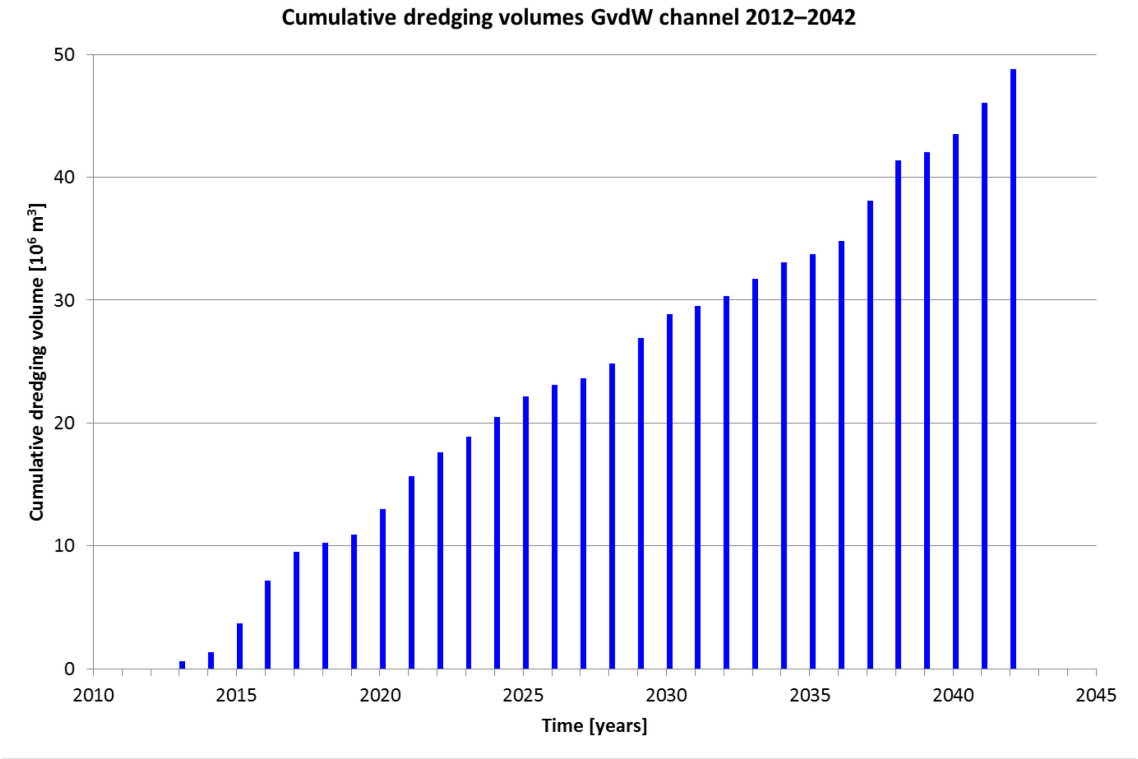
Figuur 49 - Berekende bodemligging in 2042 waarbij de Geul van de Walvischstaart vaargeul niet onderhouden wordt (Scenario GvdW2).



Figuur 50 - Berekende diepte-gemiddelde stroomsnelheden in de Schelde-monding gedurende inkomend (boven) en uitgaand getij (onder).



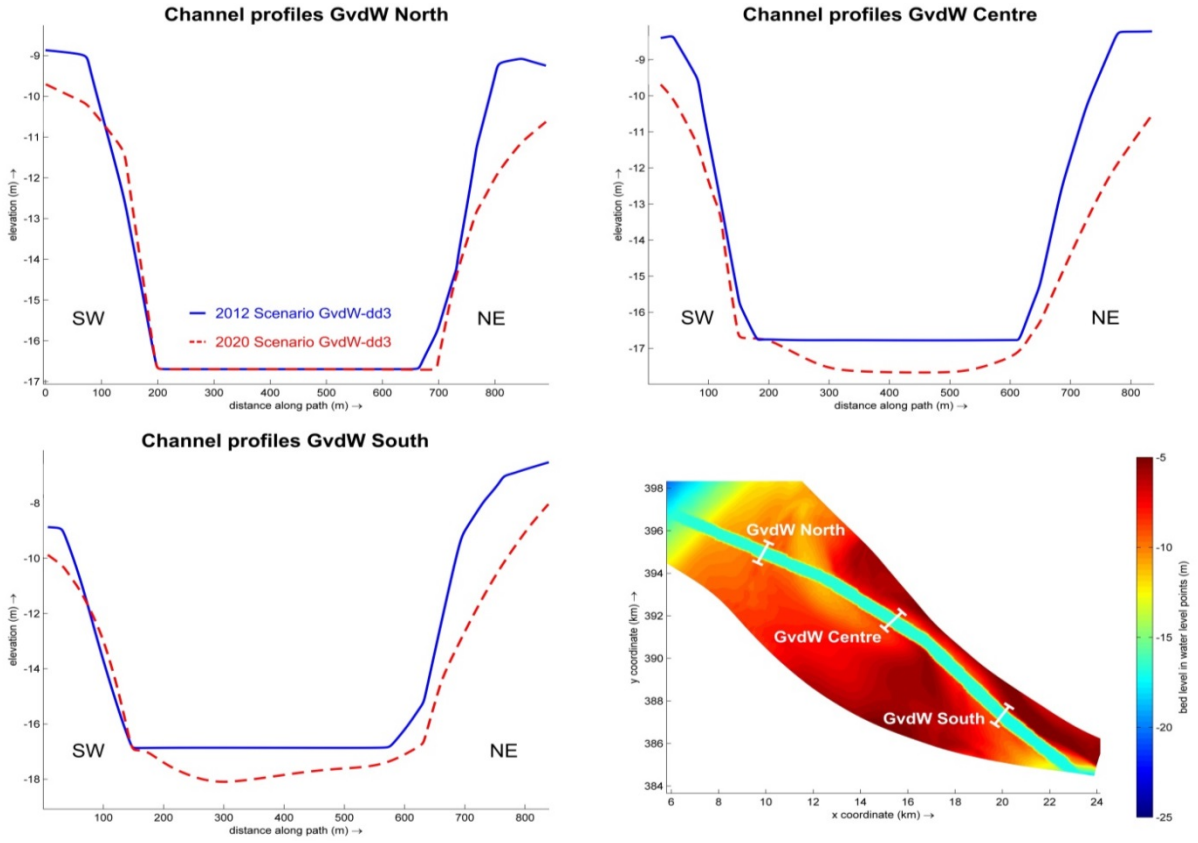
Figuur 51 - Cumulatieve onderhoudsvolumes voor het oorspronkelijke (Scenario GvdW1) en aangepaste Geul van de Walvischstaart vaargeul tracé (Scenario GvdW3) zoals berekend met het Delft3D-NeVla model.



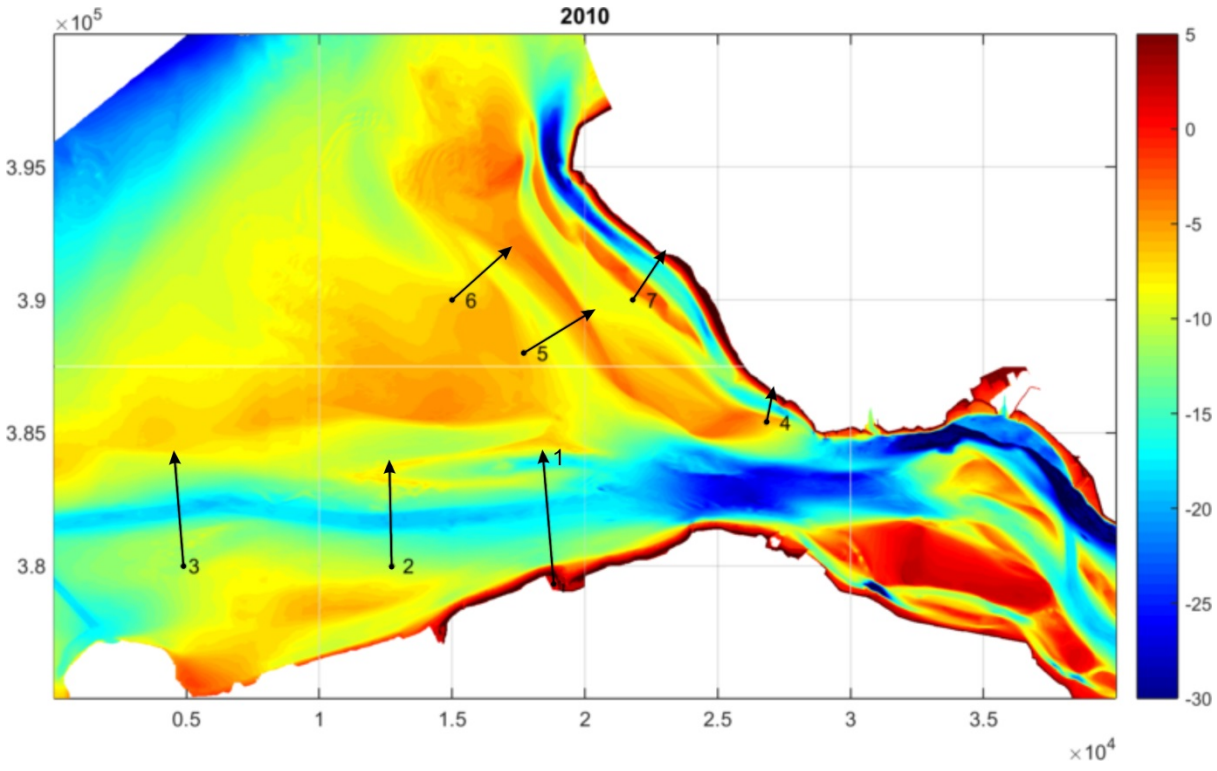
3.3.3 Taludontwikkeling Geul van de Walvischstaart (ZWeM-DD model)

De resolutie van het Delft3D-NeVla model is te laag om de taludontwikkeling van de Geul van de Walvischstaart vaargeul goed te kunnen berekenen. Daarom is hiervoor het ZWeM-DD zand model ingezet dat een veel hogere ruimtelijke resolutie heeft. Figuur 52 laat de met dit model berekende ontwikkeling van Geul van de Walvischstaart dwarsprofielen zien tussen 2012 en 2020. Volgens deze berekeningen verflauwt het talud van initieel 1:10 tot ongeveer 1:20-1:30 na 8 jaar. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat Delft3D op dit vlak zeer gevoelig is voor numerieke instellingen, dus dat voorzichtigheid met deze uitkomsten is geboden. Tegelijkertijd is een verdieping waarneembaar in het centrale en zuidelijke dwarsprofiel in lijn met de Delft3D-NeVla modelberekeningen. Deze verdieping is waarschijnlijk gerelateerd aan de toegenomen getijvolumes door de Geul van de Walvischstaart (zie ook Sectie 4.1.2). De verflauwing van de Geul van de Walvischstaart strookt met typische hellingen van vaargeulen in de Schelde-monding, zie Figuur 53 tot Figuur 55. De verflauwing zal zeker de eerste jaren bijdragen aan het baggerbezwaar van de Geul van de Walvischstaart vaargeul. Het baggerbezwaar berekend met het ZWeM-DD model is van dezelfde orde van grootte als de waarden berekend met het Delft3D-NeVla model.

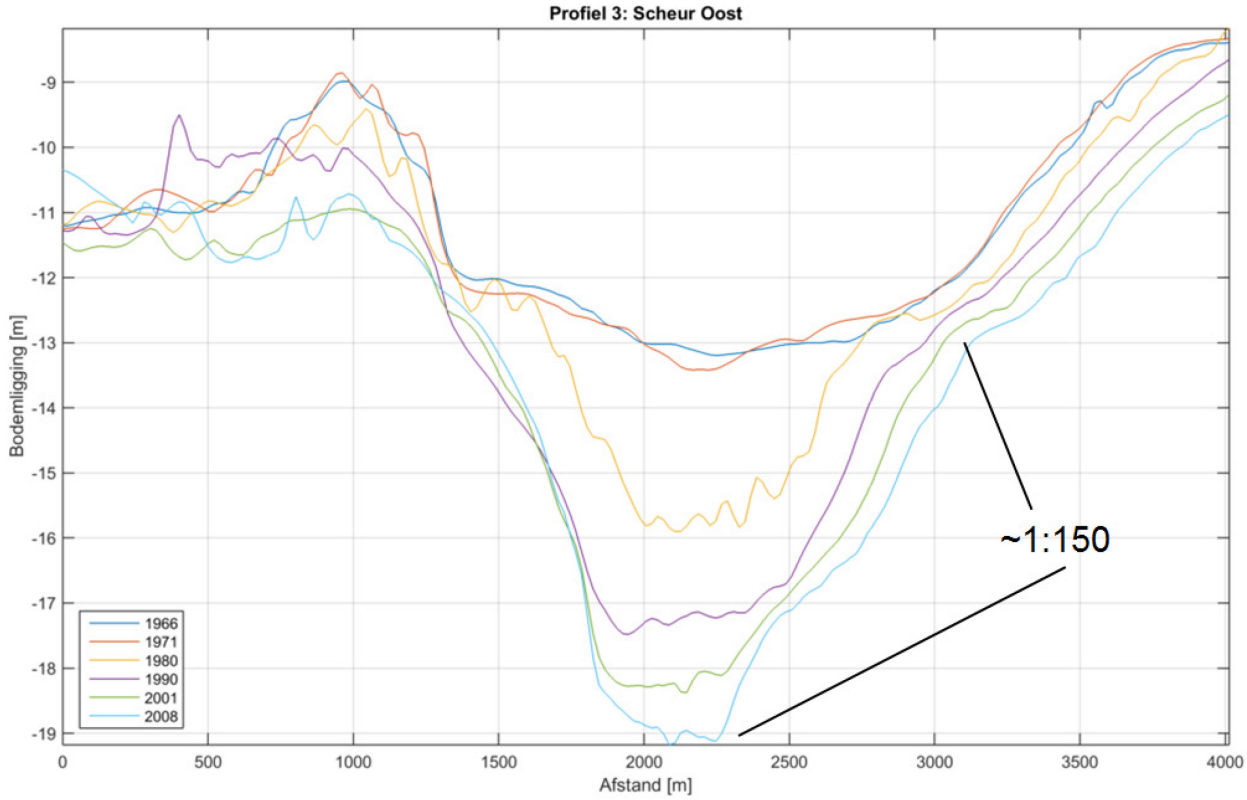
Figuur 52 - Ontwikkeling van profielen dwars op de Geul van de Walvischstaart vaargeul tussen 2012 en 2020 zoals berekend met het 2DH ZWeM-DD model (Scenario GvdW-DD3).



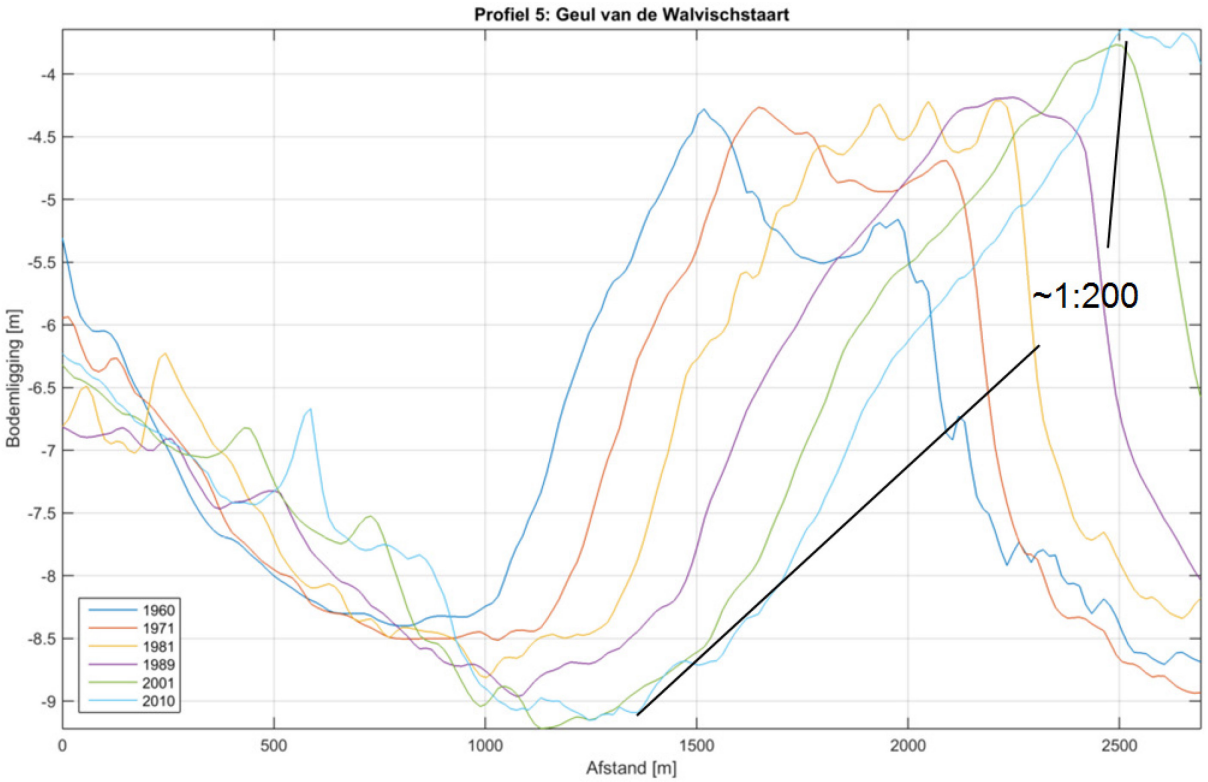
Figuur 53 - Ligging dwarsraaien t.b.v. analyse geulhellingen. Diepte in m NAP. Profiel 3 en 5 zijn weergeven in onderstaande figuren, de overige profielen zijn opgenomen in Appendix B.



Figuur 54 - Morfologische ontwikkeling Profiel 3: Scheur Oost en ruwe inschatting van de helling. Links=Zuid, rechts=Noord.



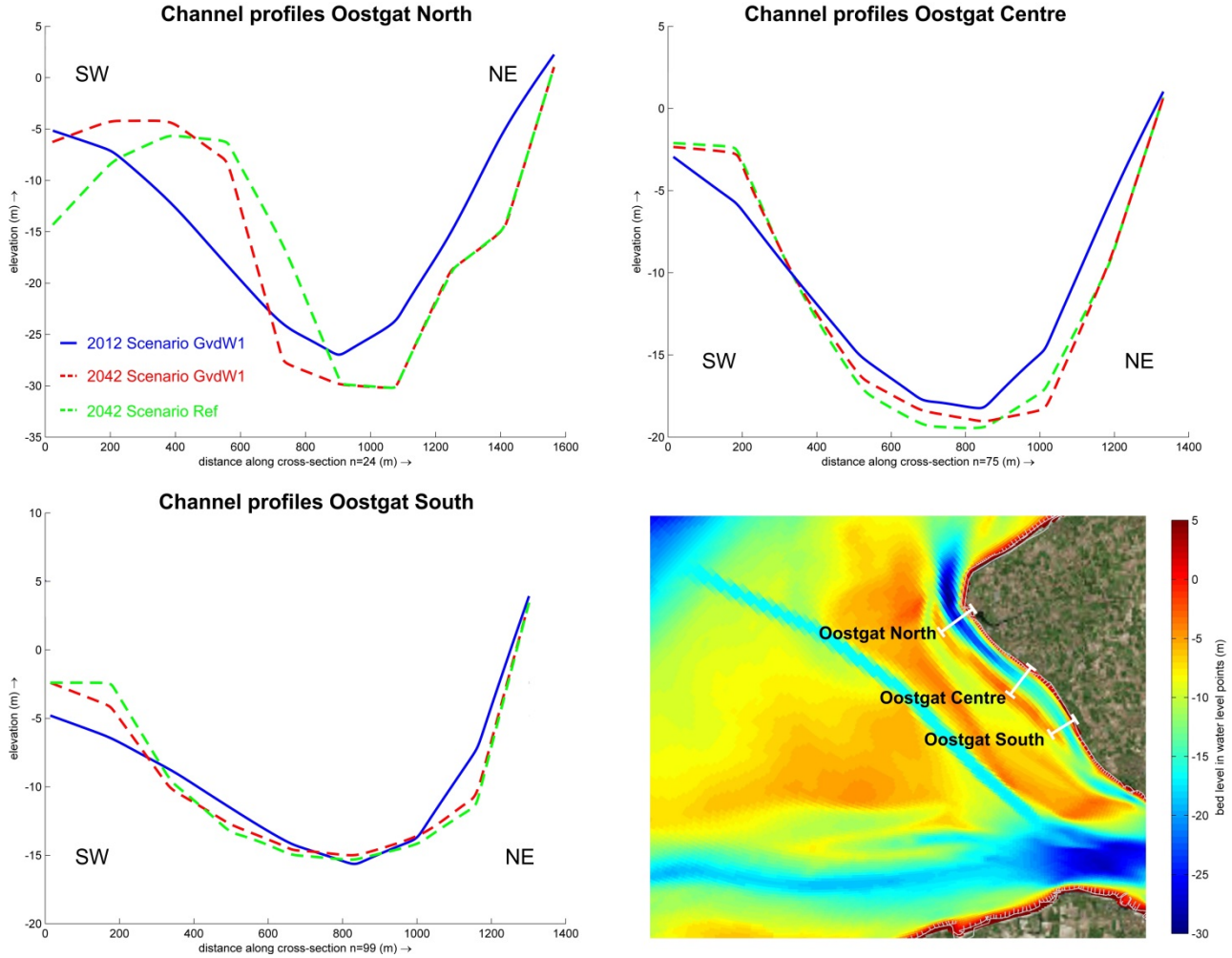
Figuur 55 - Morfologische ontwikkeling Profiel 5: Geul van de Walvischstaart (huidige) en ruwe inschatting van de helling. Links=Zuid, rechts=Noord.



3.3.4 Morfologische ontwikkeling Oostgat (Delft3D-NeVla model)

Het Delft3D-NeVla model berekent significante morfologische veranderingen in het Oostgat tussen 2012 en 2042 (Figuur 46-Figuur 48 en Figuur 56). Onafhankelijk van de Geul van de Walvischstaart vaargeul, migreert het Oostgat in landwaartse richting en verdiept met enkele meters. Deze veranderingen zijn het sterkste in het noordelijke deel van het Oostgat. Uit Figuur 56 blijkt dat de verdieping van de Geul van de Walvischstaart een beperkt effect heeft op de morfologische ontwikkeling van het Oostgat. De verdieping zorgt wel voor een bredere Oostgat geul in het noorden, waarbij de uitbreiding in westelijke richting plaatsvindt. De sterkere morfologische verandering in het noordelijk deel van het Oostgat zijn in lijn met de relatief hoge snelheden door convergentie (Figuur 50).

Figuur 56 - Dwarsprofielen van het Oostgat in 2012 en in 2042 berekend met het Delft3D-NeVla model met (Scenario GvdW1) en zonder (Ref) Geul van de Walvischstaart vaargeul.

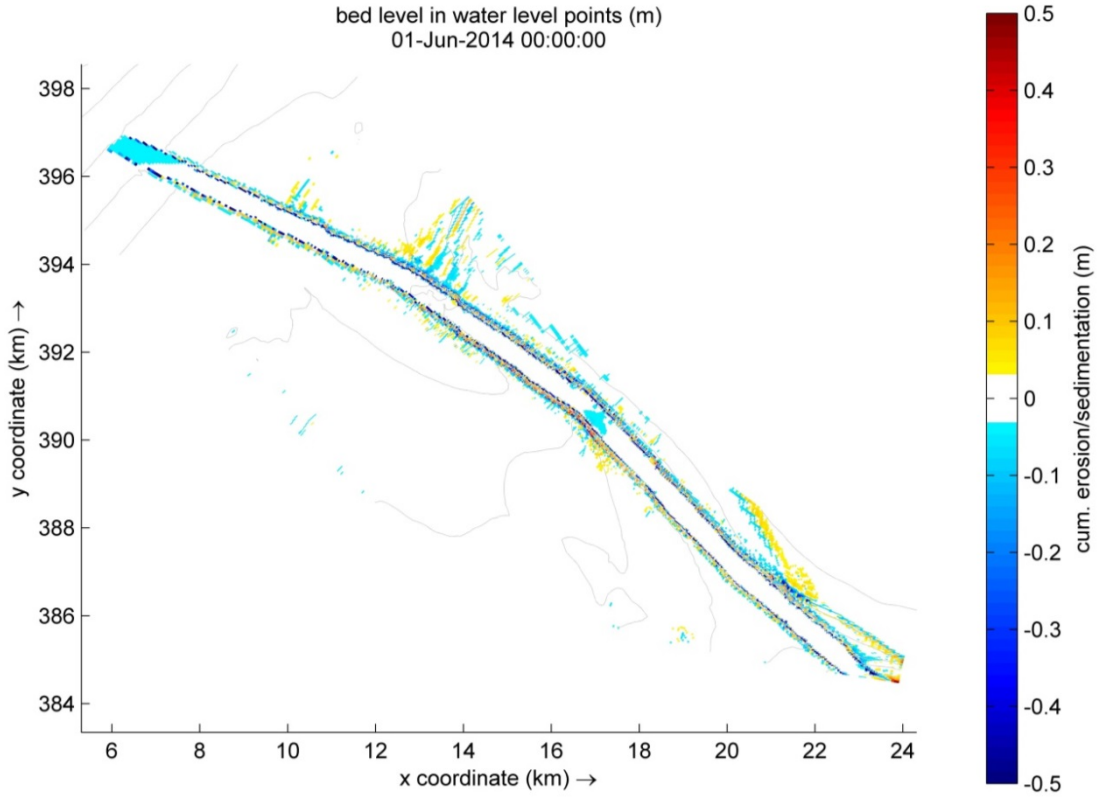


3.3.5 Stormeffect (2DH ZWeM-DD model)

Het effect van stormen op de morfologische ontwikkeling en de baggervolumes in de Geul van de Walvischstaart is bepaald aan de hand van twee simulaties met het 2DH ZWeM-DD model. In beide simulaties wordt 1 maand doorgerekend met een morfologische factor van 1. Scenario ZWeM-DD1 betreft de periode mei 2014 die representatief cq. “gemiddeld” is qua sedimentdynamiek, en Scenario ZWeM-DD2 betreft de periode december 2013 waarin de zware Sinterklaasstorm optrad.

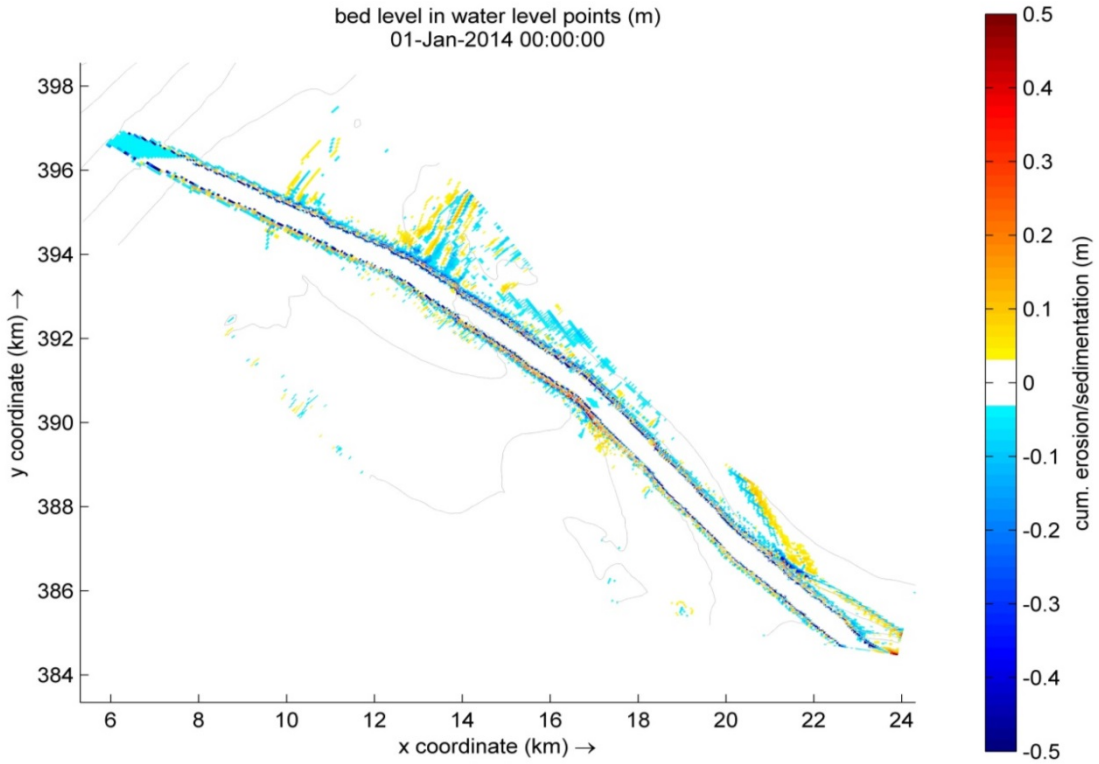
Figuur 57 tot Figuur 59 laten zien dat het feit dat de maand december 2013 een zwaardere storm bevatte dan de maand mei 2014 een beperkte invloed heeft op de morfologische ontwikkeling van het gebied rondom de Geul van de Walvischstaart. De morfologische veranderingen gedurende december 2013 en de verflauwing van het bovenste gedeelte van het talud zijn iets sterker. De baggervolumes voor december 2013 zijn ~10% hoger dan voor mei 2014, wat gezien de kans van voorkomen van een storm als de Sinterklaaststorm betekent dat het effect van stormen op het Geul van de Walvischstaart baggerbezwaar beperkt is.

Figuur 57 - Berekende sedimentatie/erosie voor de periode mei 2014 (Scenario GvdW-DD1).



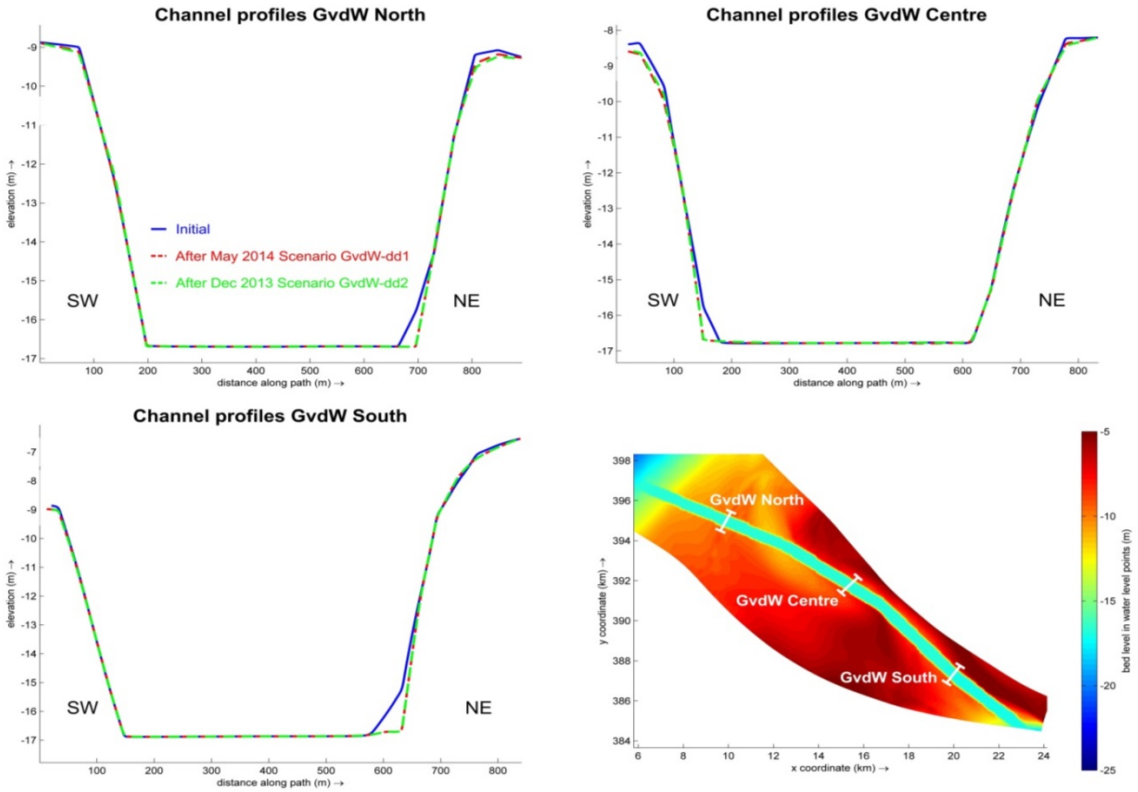
Enkel modelresultaten van het domein rondom de Geul van de Walvischstaart zijn geplot.

Figuur 58 - Berekende sedimentatie/erosie voor de periode december 2013 (Scenario GvdW-DD2).



Enkel modelresultaten van het domein rondom de Geul van de Walvischstaart zijn geplot.

Figuur 59 - Dwarsprofielen van de Geul van de Walvischstaart; initieel en berekend met het ZWeM-DD model voor de maand mei 2014 (Scenario GvdW-DD1) en de maand december 2013 (Scenario GvdW-DD2).



3.4 Lange-termijn effecten: WL-geïdealiseerd model

3.4.1 Morfodynamische evolutie nieuwe geul

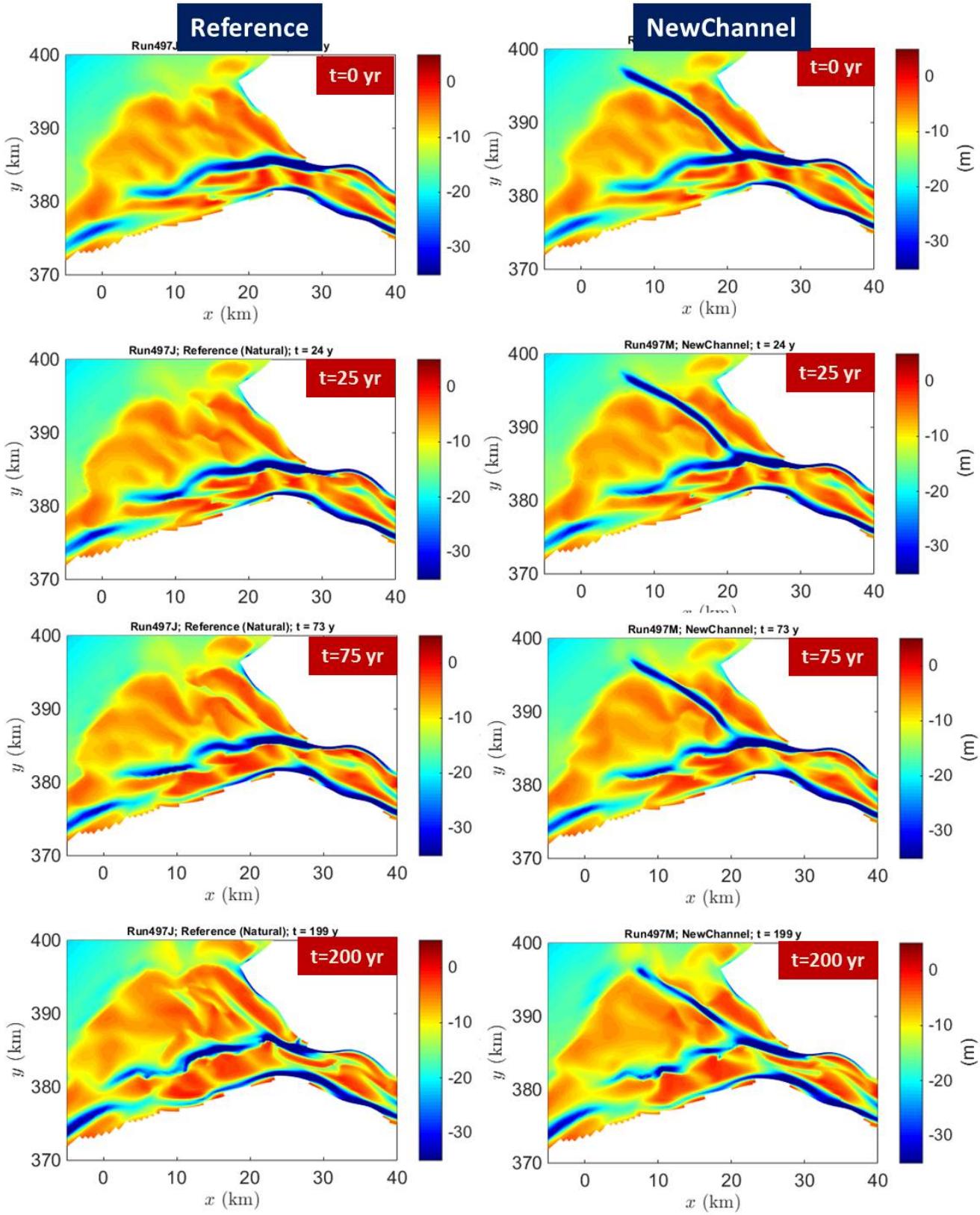
Zonder baggeronderhoud

Figuur 60 laat zien dat de nieuwe geul na 200 jaar nog steeds aanwezig is in de monding. Figuur 61 laten zien dat er in de eerste jaren er sedimentatie optreedt in de landwaartse en zeewaartse delen van de nieuwe geul op tijdschalen van tientallen jaren. Verder laat de onderste panel in deze figuur zien dat de nieuwe geul de neiging heeft linksom te roteren. De aanzanding van de landwaartse en zeewaartse gedeelten van de nieuwe geul vindt ook plaats in geval van andere diepten van de geul Figuur 62. Ook vindt bij deze diepten een linksom rotatie van de geul plaats op lange termijn.

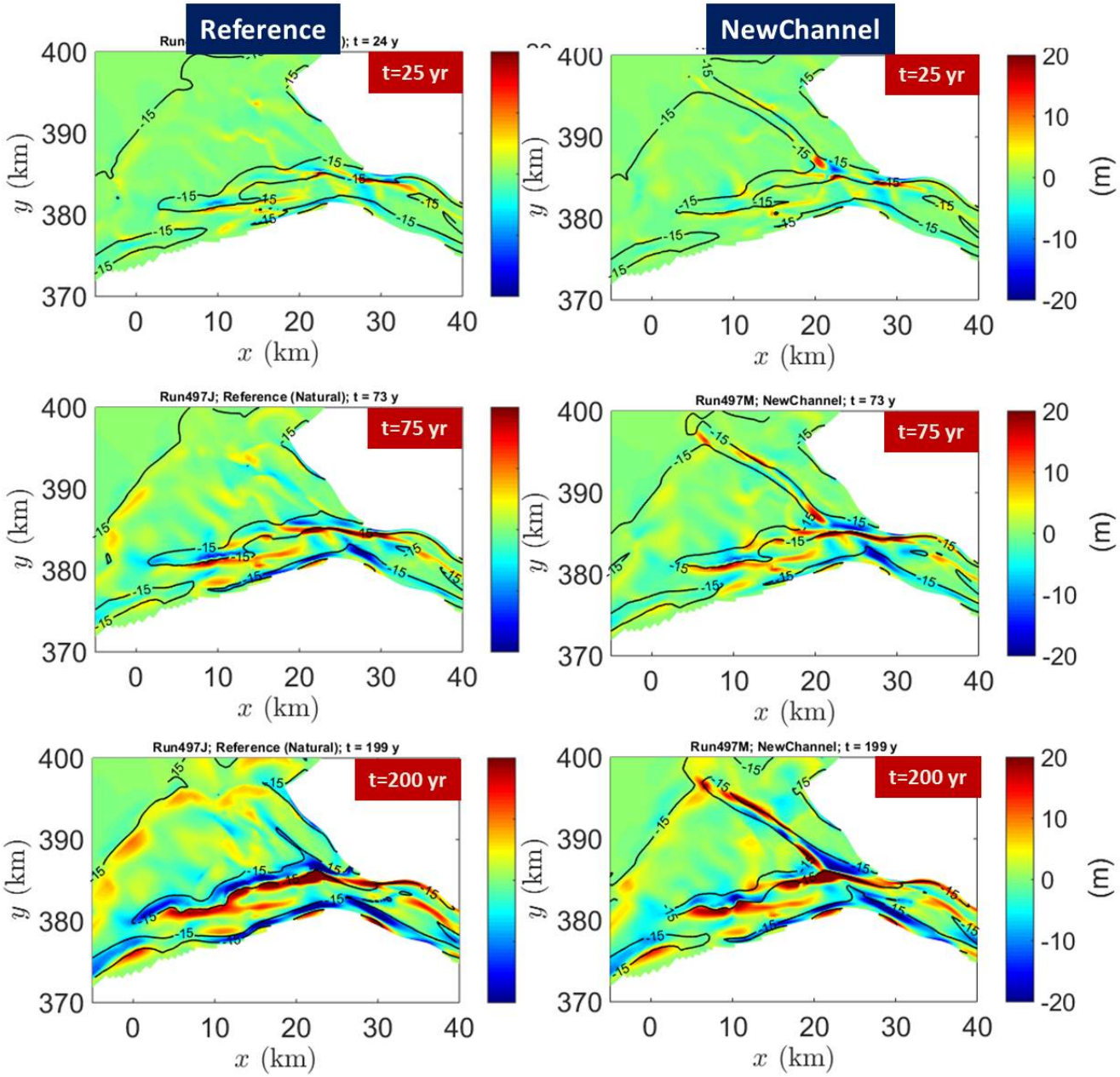
Met baggeronderhoud

Figuur 63 laat zien dat de hoeveelheid zand dat gebaggared moeten worden op de nieuwe geul op zijn streefdiepte te houden (in dit geval 40m) afneemt van ~ 2 x 10^6 m^3 tot 1.25 x 10^6 m^3 in de eerste 50 jaar, waarna deze hoeveelheid redelijk stabiel blijft. Echter, op lange termijn lijkt deze hoeveelheid toe te nemen.

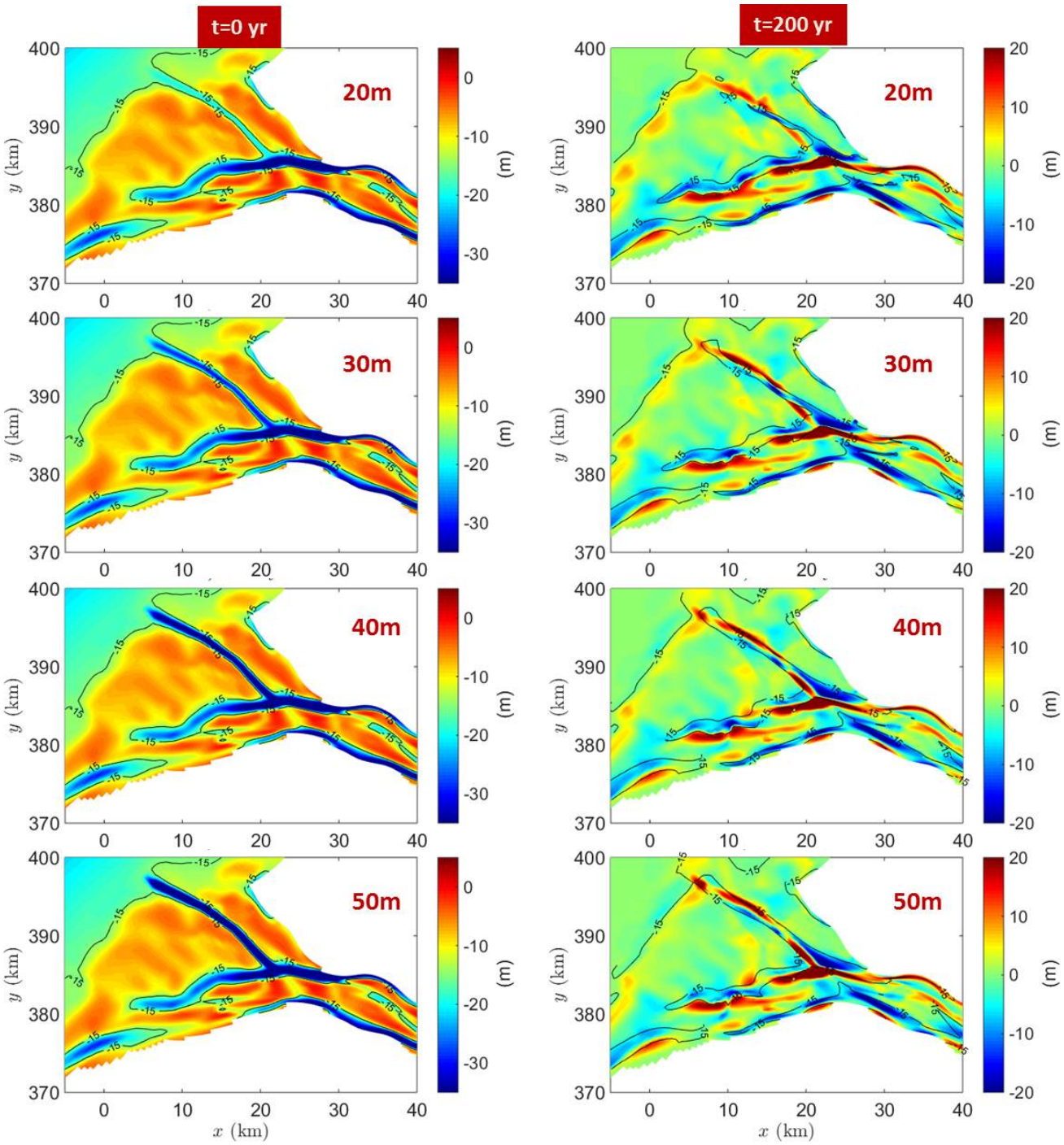
Figuur 60 - Bodem evolutie zonder baggeronderhoud van het mondingsgebied in het geval van geen (links) en een nieuwe geul (rechts).



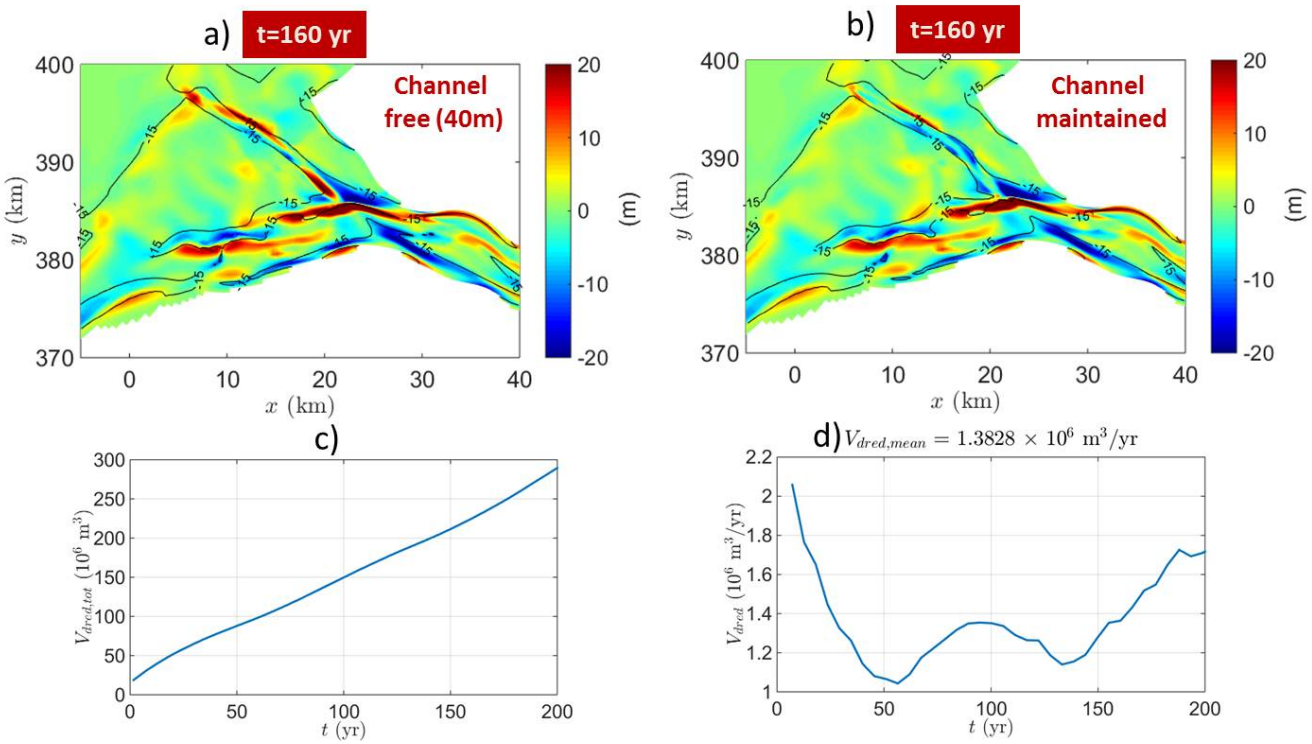
Figuur 61 - Sedimentatie/erosie plots in het geval van geen (links) en een nieuwe geul (rechts) en in het geval zonder baggeronderhoud. Contour levels representeren een diepte van 15 m.



Figuur 62 - Sedimentatie/erosie plots zonder baggeronderhoud (rechts) na 200 jaar in het geval van andere diepten van de nieuwe geul (20m, 30m, 40 en 50m). Linker panelen geven de bodem weer op t=0.



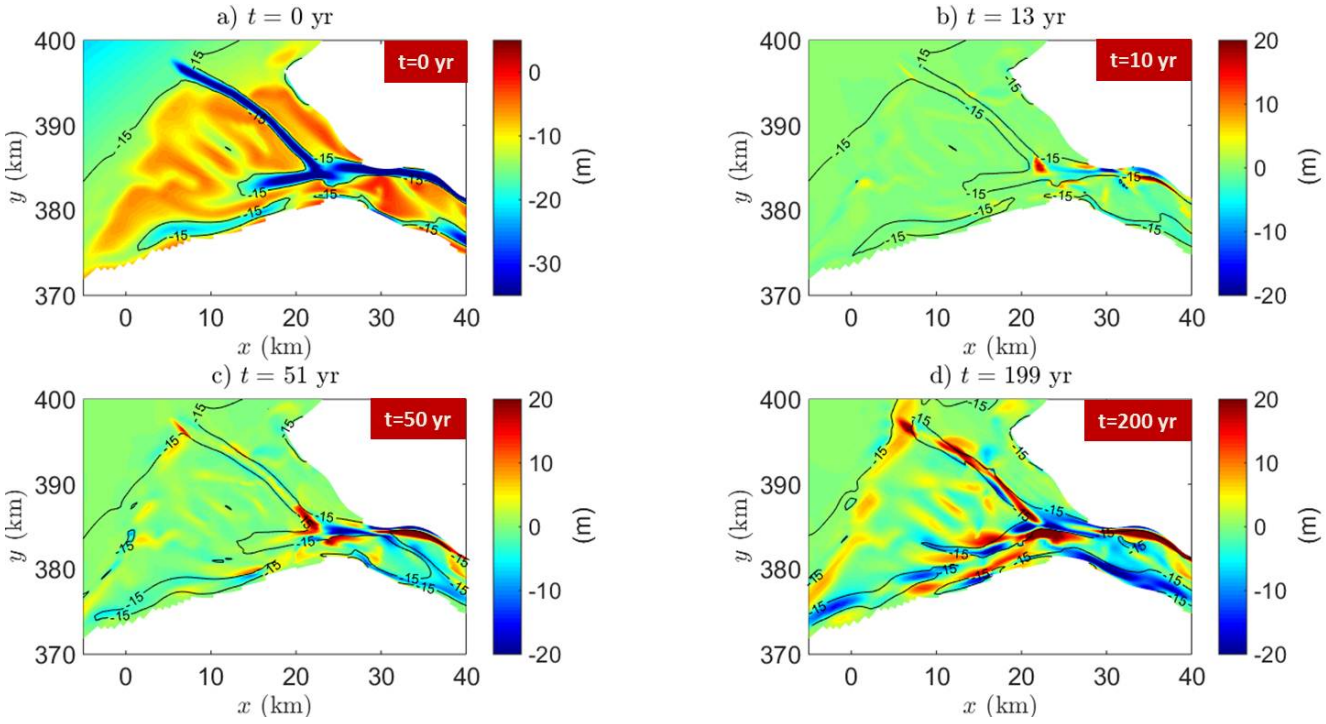
Figuur 63 - (a-b) Sedimentatie/erosie plots in de gevallen zonder (a) en met baggeronderhoud (b). (c-d) Cumulatieve (c) en jaarlijkse (d) baggervolume van zand dat nodig is om de nieuwe geul op de initiële streefdiepte te houden (in dit geval 40m) .



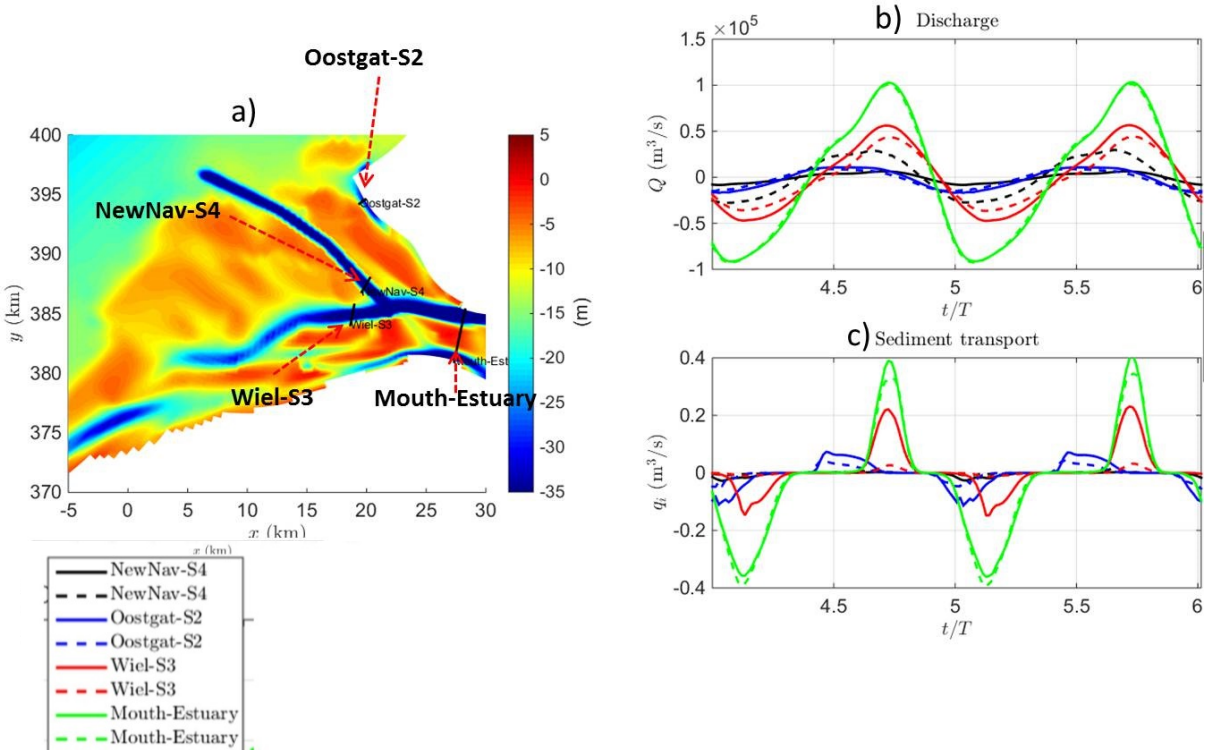
Golven uit het noordwesten

Figuur 64 laat zien dat in het geval van golven uit het noordwesten er sedimentatie plaats vindt in voornamelijk het landwaartse gedeelte van de nieuwe geul gedurende de eerste 100 jaar. Op lange termijn lijkt het middelste gedeelte van de geul meer te sedimenteren dan in het geval van golven uit het zuidwesten.

Figuur 64 - a) Gebruikte initiële bodempatroon verkregen uit het spin-up experiment in het geval van golven uit het noordwesten. b-d) Sedimentatie/erosie plots tot 200 jaar.



Figuur 65 - Debiet Q (panel b) en zandtransport q (panel c) door de 3 hoofdgeulen (Secties Wiel-S3, NewNav-S3 en Oostgat-S2 in panel a).

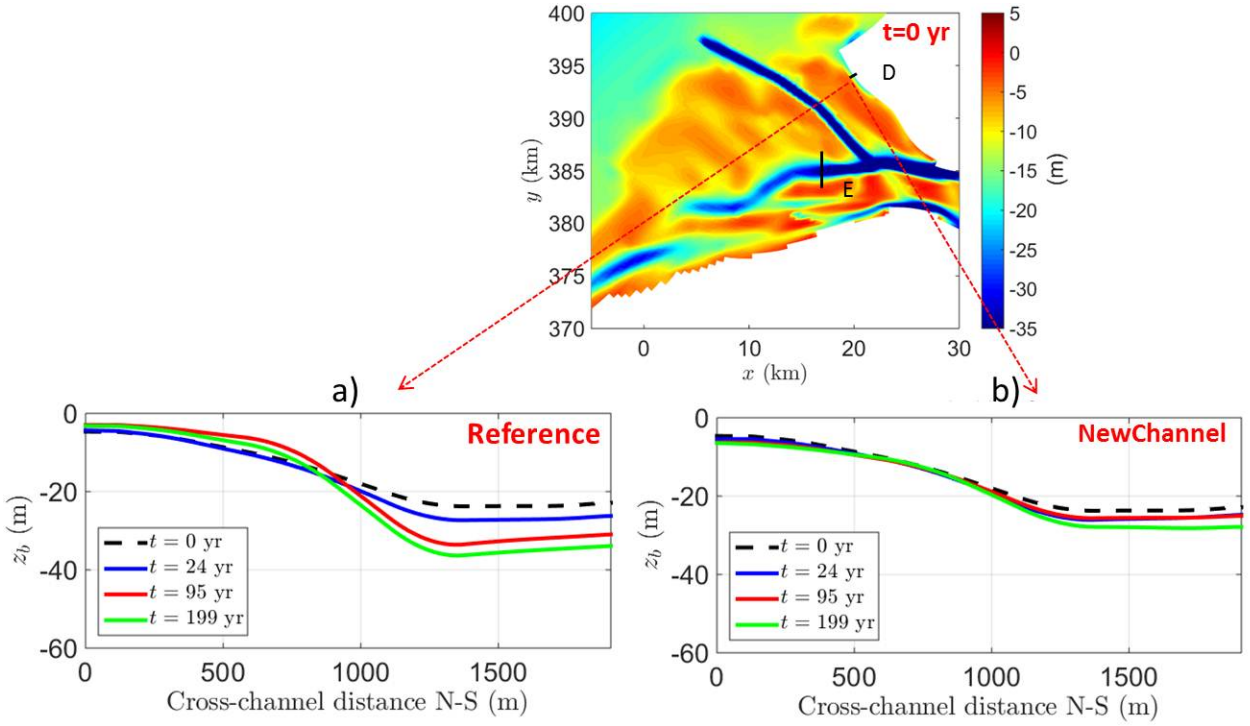


Doorgetrokken en stippellijnen representeren de situaties zonder en met de nieuwe geul, respectievelijk. Negatieve waarden geven export aan. De uitwisseling van debiet en zandtransport met het estuarium is ook weergegeven (groene lijnen)

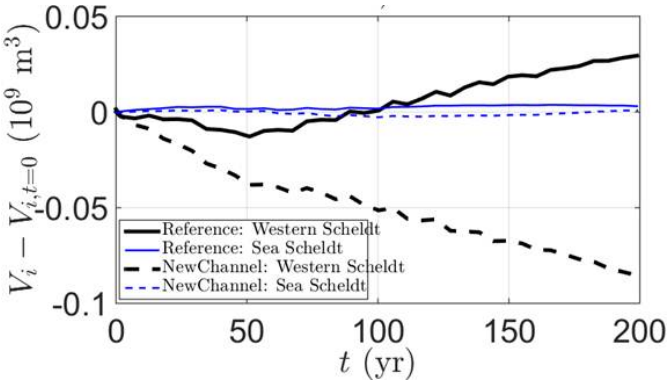
3.4.2 Effecten op de morfologische evolutie monding en estuarium

Figuur 61 laat zien dat de aanleg van de nieuwe geul op lange termijn gevolgen heeft op de hoofdgeul Wielingen. Deze geul lijkt te sedimenteren waardoor deze minder uitgesproken is op lange termijn dan in het referentie geval. Een nadere kijk op de morfologische ontwikkeling van de noordelijke geul (Oostgat, zie Figuur 66) laat zien dat de natuurlijke uitdieping van deze geul (ongeveer 6 cm/jaar, panel a) lijkt met de aanleg van de nieuwe geul sterk af te nemen (ongeveer 2.5 cm/jaar, panel b). Merk op dat het geïdealiseerde model de parallelle geul Deurloo echter niet bevat. Resultaten laten verder zien dat in het geval van de nieuwe geul een sterke afname in het zandvolume van het estuarium plaatsvindt als gevolg van zand verlies naar de monding toe (Figuur 67), ongeacht of de nieuwe geul wel of niet onderhouden wordt. Deze afname in volume vindt voornamelijk plaats in de Westerschelde, hetgeen betekent dat de hoofdgeul in de Westerschelde dieper wordt.

Figuur 66 - Bodem evolutie langs de cross-sectie D (~Oostgat) in het geval zonder (panel a) en met de nieuwe geul (panel b).



Figuur 67 - Verandering van zandvolume (tov t=0) van de Westerschelde (zwarte lijnen) en de Zeeschelde (blauwe lijnen) in de situaties zonder (doorgetrokken) en met de nieuwe geul (gestippeld). Negatief betekent export van zand.



3.4.3 Gevoeligheid voor bedslope parameter α_{BN}

Een van de onzekere factoren in de model parameters is de waarde van bedslope parameter α_{BN}, waarvoor wij in de bovenstaande experimenten een waarde van 15 gebruikt hebben. Om het effect van deze keuze op de modelresultaten nader te onderzoeken zijn er twee experimenten gedaan met een lagere en een hogere bedslope parameter (α_{BN}=1.5 en α_{BN}=25, respectievelijk). De resultaten uit deze twee experimenten (Figuur 68) laten zien dat bij een andere keuze van dit parameter de resultaten niet fundamenteel anders worden. Namelijk, ook bij deze parameters vindt sedimentatie plaats aan beide uiteinden van de nieuwe geul, Wielingen wordt minder uitgesproken en Oostgat wordt minder diep na verloop van tijd vergeleken met het Reference geval (zonder nieuwe geul). Een significant verschil is dat voor een hogere waarde van α_{BN} (=25) het middelste deel van de nieuwe geul ook lijkt te sedimenteren op lange termijn als gevolg van een hogere diffusie.

4 Verslag expert meeting 22 september 2016

OP 22 september 2016 werden de resultaten zoals deze op dat moment op basis van de modelresultaten bekend waren, voorgelegd aan een Vlaamse – Nederlandse commissie van experten. Concreet werden er een aantal beheersvragen aan de experten voorgelegd. In Bijlage A worden de vragen en de antwoorden die de onderzoekers formuleerden op basis van hun onderzoeksresultaten zoals op 22/9/2016 bekend, opgelijst. Een samenvatting van de discussieronde wordt gegeven in hoofdstuk 4.1. De baggerhoeveelheden zoals hieronder vermeld zijn de baggerhoeveelheden zoals op dat moment gekend. Op basis van de aanbevelingen van de experts zijn een aantal bijkomende simulaties uitgevoerd. Het baggerbezwaar zoals genoemd in bovenstaande hoofdstukken en samenvatting zijn de meest recente schattingen.

Aanwezigen op de expert meeting:

- Experten: Tom De Mulder, Zheng Bing Wang, Huib de Vriend
- WL: Frank Mostaert, Tomas van Oyen, Bart De Maerschalck, Abdel Nnafie, Yves Plancke, Dieter Meire, Toon Verwaest
- Deltares: Marcel Taal, Julia Vroom, Björn Röbke, Mick van der Wegen
- aMT: Youri Meersschaut, Eline Damman, Kirsten Beirinckx
- afdeling Beleid: Eline Damman
- GHA: Stefaan Ides
- RWS: Gert-Jan Liek

4.1 Discussieronde

Het onderzoek tot dusver focust op de haalbaarheid van de aanleg en op diepte houden van de geul. De beheersvragen met betrekking tot de impact op het mondingsgebied en estuarium zullen afhangen van de stortlocaties van de specie die gebaggerd wordt bij de aanleg en de stortstrategie voor het onderhoud. In de huidige scenario's wordt de gebaggerde specie verwijderd uit het systeem. Het scenario kan in die zin met betrekking tot de impact op de waterbeweging in het estuarium, als worst case scenario beschouwd worden.

Op basis van de resultaten kan men stellen dat de impact op het mondingsgebied eerder beperkt is. De gevolgen op korte en lange termijn van de veranderingen in het netto sedimenttransport in en uit het estuarium verdienen zeker nog verder onderzoek. Als er een effect is op het Oostgat zal dit eerder positief zijn.

De geschatte baggervolumes variëren tussen de 1,5 en 7 miljoen m^3 per jaar. Wat betreft de fractie te baggeren zand voorspellen de verschillende modellen –met uitzondering van de ZweM Holocene bron variant- vergelijkbare hoeveelheden, tussen de 1,5 en 2 Mm^3. Het is aannemelijk dat de maximale hoeveelheid bepaald wordt door de maximale hoeveelheid zand die kan worden aangevoerd door de aanwezige transportprocessen. De grootste onzekerheid ligt in de fractie slib. Extra onderzoek is hier nodig.

> *→ Dit zijn de getallen zoals gepresenteerd in de memo voorafgaand aan de expert meeting. Zie de samenvatting van het bovenstaande rapport voor een overzicht van de meest recente modelresultaten.*

Er wordt opgemerkt dat geen van de modellen extreme condities bevatten. Het is daarom noodzakelijk op korte termijn bijkomende simulaties van stormen, inclusief windgedreven stroming, aan de modellen toe te voegen. Indien zou blijken dat wanneer er tijdens stormcondities significante hoeveelheden sediment in de geul terechtkomt zou dit een significant effect op het gemiddelde jaarlijks baggerbezwaar kunnen hebben.

Hierbij wordt vooral gedacht aan een tijdelijke toename van het zandtransport. Het is mogelijk om op korte termijn een aantal bijkomende simulaties uit te voeren om dit te onderzoeken.

→ In navolging van de expertmeeting zijn stormcondities toegevoegd aan het ZWeM en het geïdealiseerde model. Het geschatte effect van stormen is verrekend in het baggerbezwaar.

Er worden vragen gesteld bij de stabiliteit van de geulwanden bij hellingen van 1/10. Er wordt opgemerkt dat geen van de modellen hier uitsluitsel over kunnen geven. Hellingseffecten in de modellen zijn sterk afhankelijk van modelsettings. Voorafgaandelijk aan de modelsimulaties heeft een expert in zettingsvloeiingen van Deltares een inschatting gemaakt van de stabiliteit van de hellingen op basis van de beschikbare geologische gegevens (Mastbergen, D., 2016). Het rapport stelt dat er bij een helling van 1/10 geen zettingsvloeiing zal optreden. Hij beschouwt de helling 1/10 zelfs als een conservatief ontwerp. In het rapport wordt aangenomen dat het effect van golven op de morfologie van de bodem beperkt zal zijn. Tom De Mulder merkt op dat er in dit gebied ook zeer ondiepe zones zijn.

→ Het rapport van Masterbergen beperkt zich echter enkel tot verflauwing van de hellingen door toedoen van zettingsvloeiing. De verflauwing van de hellingen als gevolg van erosie door getij en golfwerking wordt in het rapport buiten beschouwing gelaten. Vergelijking met de huidige natuurlijke en aangelegde geulen toont aan dat de eerste decennia verflauwing van de taluds te verwachten valt. Op basis van ervaringen door de baggeraars, lijkt een initiële helling bij aanleg van 1/30 een meer realistische helling.

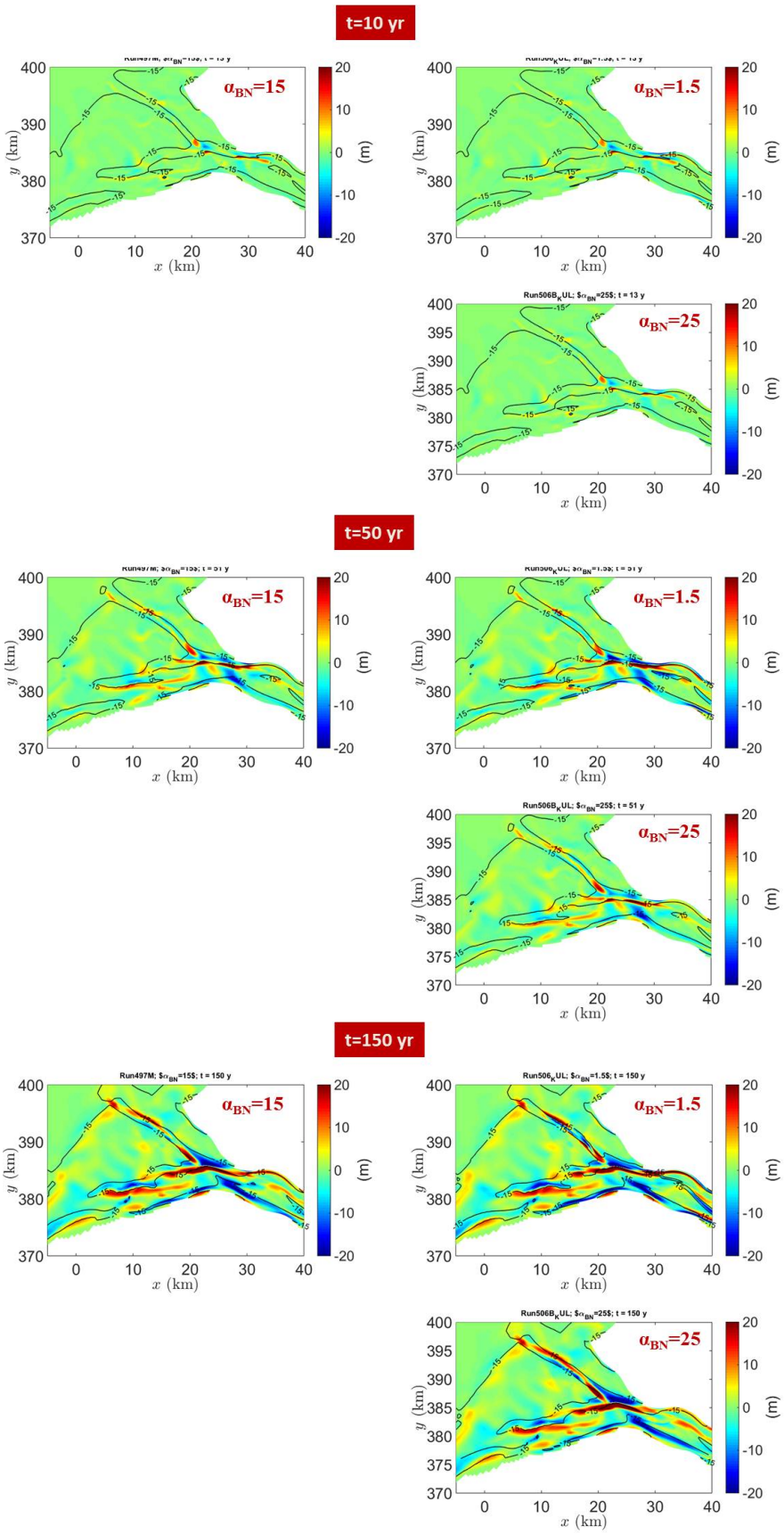
Er wordt door de experts de opmerking gemaakt dat gezien de resolutie van de modellen de geulhelling niet overal even nauwkeurig weergegeven wordt. De beperkte gridresolutie van de modellen ter hoogte van de nieuwe Geul van de Walvischstaart houdt ook het risico in dat de berekende baggervolumes niet nauwkeurig zijn (door numerieke “discretisatiefouten” bij de kubering). Daar bovenop, lijkt het dat in de modellen vooral aandacht is gegaan naar het behouden van de streefdiepte van de nieuwe geul en niet zozeer naar het (op elk ogenblik en overal) garanderen van een voldoende bodembreedte. Dit laatste is absoluut noodzakelijk wil de geul bruikbaar zijn voor nautische doeleinden. In welke mate de geraamde baggerhoeveelheden hierdoor toenemen, dient nagegaan te worden.

→ In navolging van de expert meeting werd de baggerpolygoon verfijnd en beter afgestemd op het grid (NeVla model).

Door de experts worden de volgende stappen in volgorde van prioriteit aangeraden:

1) Impact ruwe condities (zowel golven als wind meenemen in de modellen)
2) Onzekerheden met betrekking tot slibmodellering
3) Effecten van zeespiegelstijging meenemen
4) Gevoeligheid van de modellen naar verschillende zandfracties
5) Gridresoluties verbeteren
6) Implementeren van reële bagger- en stortstrategieën.
7) Gevoeligheidsonderzoek geulwandhellingen, zowel modelmatige sensitiviteitsstudie als analyse van de evolutie van de bestaande geulen

Figuur 68 - Snapshots sedimentatie/erosie op tijdstippen t=10, 50, 150 jaar voor bedslope parameters α_{BN}=15, 1.5 en 25. De contourlijnen geven de bathymetrie weer (-15 m NAP). Er wordt niet gebaggerd in het model



5 Conclusies

5.1 Is de nieuwe geul voldoende stabiel? Wat is de geschatte omvang van de onderhoudsbaggerwerken?

De verschillende modellen voorspellen een jaarlijks baggerbezwaar tussen de 1,6 en 4,4 miljoen m³, of tussen de 2,5 en 6,4 miljoen ton droge stof (TDS) per jaar. Hiervan is tussen de 1,6 en 3,6 Mm³ (2,5 – 5,7 miljoen TDS) zandige specie, de overige hoeveelheid is eerder slibrijk materiaal. De resultaten van de verschillende modellen liggen in lijn wat betreft de jaarlijkse hoeveelheid zand, met uitzondering van het ZWeM model met Holocene bron waar sedimentatie van de zandfractie overschat lijkt te worden. Dit heeft te maken met de initiële bodemsamenstelling en inspeeleffecten van het model.

De grootste onzekerheid betreft de jaarlijkse hoeveelheid slib die zou kunnen sedimenteren in de geul. Dit heeft te maken met de onzekerheid die er bestaat met betrekking tot de sedimentbeschikbaarheid, d.w.z. de omvang en de erodeerbaarheid van de Holocene laag sediment in de omgeving van Zeebrugge. Voor zand lijkt de transportcapaciteit eerder de beperkende factor te zijn. Op basis van de huidige beschikbare meetgegevens en systeemkennis is het moeilijk om de rol van de Holocene sliblaag beter te bepalen. Bij het inschatten van de onderhoudsvolumes is rekening gehouden met het voorkomen van stormen, dit was één van de adviezen van een commissie van Vlaamse en Nederlandse experten die samengekomen is op 22/9/2016.

Centraal en in het zuidoostelijke deel van de geul zijn de stromingscondities vergelijkbaar met deze in de Wielingen: sterke stromingen in de geulrichting. In het noordwesten van de geul zijn de stromingscondities vergelijkbaar met Scheur West: de hoofdstroom gaat nog wel door de geul, maar tijdens kentering is er toch nog een aanzienlijke dwarsstroming waarneembaar. Het is te verwachten dat de baggerinspanningen niet zo hoog zullen zijn als voor Pas van het Zand. Bij de Pas van het Zand staat de stroming tijdens maximale eb en vloed nagenoeg loodrecht op de geul. Let wel: de Geul van de Walvischstaart heeft een aanzienlijke lengte (±22 km).

Alle modellen voorspellen sedimentatie aan de geuluiteinden (zowel de westelijke als de oostelijke) en een verruiming van het centrale deel. Door in het westen het tracé van de geul beter af te stemmen op de richting van de stroming, i.e. in de richting van de geul Deurloo-West, kunnen de baggerinspanningen waarschijnlijk nog verminderd worden. Op basis van geologisch onderzoek werd geconcludeerd dat een geulwandhelling van 1/10 nog stabiel is met betrekking tot zettingsvloeiing. In relatie tot de bestaande natuurlijke en aangelegde/verdiepte geulen is een helling van 1/10 echter steil te noemen. Te verwachten valt dat de geulwanden in de eerste decennia nog zullen verflauwen. Naar aanleg van de geul toe wordt door de baggersector op basis van hun ervaring een minimale geulwandhelling van 1/30 aanbevolen.

Op basis van de huidige modelresultaten lijkt de aanleg van de Geul van de Walvischstaart beperkte invloed te hebben op de natuurlijke ontwikkeling van het mondingsgebied. De debieten in de Wielingen en Oostgat verminderen onder invloed van de nieuwe geul met ongeveer 10%, respectievelijk 3%. Op de lange termijn is er een licht effect waarneembaar ter hoogte van het Oostgat. Het uitschurend effect en de landwaartse migratie van het Oostgat worden licht getemperd. Dit wordt als positief ingeschat.

5.2 Wat zijn de gevolgen voor de rest van het estuarium, vooral op de lange termijn ontwikkeling van de morfologie?

De modellen voorspellen belangrijke veranderingen binnen in het estuarium, waarbij het feit dat in de onderzochte scenario's de specie (van zowel de aanleg- als onderhoudsbaggerwerken) uit het systeem onttrokken wordt zeer waarschijnlijk de sturende factor is. Afhankelijk van de stortstrategie zullen de werkelijke langetermijneffecten in het estuarium anders zijn. Dit is nog niet onderzocht en dat maakt het op dit moment niet mogelijk om uitspraken te doen over te verwachten morfologische effecten van de verdieping van de Geul van de Walvischstaart op het estuarium. Andere invloeden die door experts naar voren zijn gebracht, maar (vanwege rekentijden en doorlooptijd project) nog niet onderzocht zijn, zijn de impact van zeespiegelstijging en de gevoeligheid van de modeluitkomsten voor het rekenen met verschillende zandfracties en nog fijnere gridresoluties.

Referenties

Mastbergen, D. (2016). Tracé Wlvischstaart, Deltares memo 1210301-010-ZKS-0002.

Nnafie, A.; Van Oyen, T.; De Maerschalck, B.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Morphodynamic modeling of the Scheldt mouth: Effects of waves. Version 2.0. WL Rapporten, 14_094. Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Vroom, J., van Maren, B., van Rooijen, A., van der Werf, J. (2016) Zand-slib modellering voor het mondingsgebied van het Schelde-estuarium. Deltares rapport 1210301-002-ZKS-0002. 142 pp.

Van der Wegen, M., van der Werf, J., de Vet, L., Röbke, R. (2016) Hindcasting Westerschelde morphodynamics (1963-2011).

Appendix A: Memo ter voorbereiding van de expertmeeting van 22/09/2016

Onderstaande tekst is overgenomen uit de memo van 16/09/2016 (WL2016M15_068_11) die ter voorbereiding van de expertmeeting van 22/09/2016 werd opgesteld. Na de workshop zijn de modellen op basis van de aanbevelingen van de experten verder verfijnd en zijn bijkomende simulaties uitgevoerd. De getallen in bovenstaande rapport wijken dus in een aantal gevallen af van de cijfers zoals in onderstaande tekst opgenomen.

Onderzoeksvragen en voorlopige[3] antwoorden

Om te komen tot besluiten of een verdiepte Geul van de Walvischstaart een verder te ontwikkelen project kan zijn, is inzicht nodig in het gedrag van de monding in het algemeen en de reactie op een verdieping tot -16.7 m NAP in de Geul van de Walvischstaart.

Het gaat om 2 (clusters van) vragen:

A. Is de nieuwe geul voldoende stabiel? Wat is de geschatte omvang van de onderhouds-baggerwerken?
B. Wat zijn de gevolgen voor de rest van het estuarium, vooral op de lange termijn ontwikkeling van de morfologie?

Onderstaand worden de antwoorden op deze vragen gegeven (blauwe tekst).

A: Is de nieuwe geul voldoende stabiel? Zal het te plegen onderhoud niet te omvangrijk zijn?

Het middendeel van de nieuwe geul verruimt in de loop van de tijd maar de beide uiteinden vertonen substantiële sedimentatie. De baggervolumes zijn groot: 2.3-9.9 miljoen ton per jaar –een veelvoud van de baggervolumes in de huidige toegangsgeulen Scheur/Wielingen en Oostgat.

1. Welke baggervolumes kunnen we verwachten in de verdiepte Geul van de Walvischstaart?

Het totale baggervolume dat in de Geul van de Walvischstaart gebaggerd zal moeten worden varieert op basis van de verschillende modeluitkomsten van 1.4 tot 7.1 miljoen m³ per jaar, equivalent met 2.3 tot 9.9 miljoen ton droge stof per jaar (uitgaande van een dichtheid van zand van 1600 kg/m^3 en een dichtheid van slib van 500 kg/m^3), zie Figuur 69. Deze inschatting betreft voor het ZWeM-model de totale hoeveelheid van zand en slib samen, opgeschaald naar de periode van 1 jaar. Voor het NeVla model betreft de inschatting het jaarlijks gemiddelde van de simulatieperiode van 30 jaar. Voor het WL-geïdealiseerd model betreft de inschatting het jaarlijks gemiddelde van de simulatieperiode van 160 jaar.

Voor de modelvarianten 'ZWeM met verminderde depositie' en de beide Zand-modellen (NeVla en geïdealiseerd model) is het baggervolume zeer vergelijkbaar en voornamelijk zandig (ongeveer 2 Mm³/jaar). Voor de modelvariant 'ZWeM met Holocene bron' zijn zowel de zandige volumes als de slibrijke volumes groter. Dit is het gevolg van de veel grotere beschikbaarheid van slib in het modeldomein (in de vorm van de Holocene bron). In de Geul van de Walvischstaart bezinkt het slib in de zandige bodem. De bodemlaag van 30 cm is initieel volledig zandig. Het slib wat hier bezinkt en de bodemhoogte doet toenemen, leidt tot het baggeren van een grote hoeveelheid zand en een kleine hoeveelheid slib, omdat het model veronderstelt dat de bodemlaag volledig gemengd is. Initieel wordt door het baggeren in het model

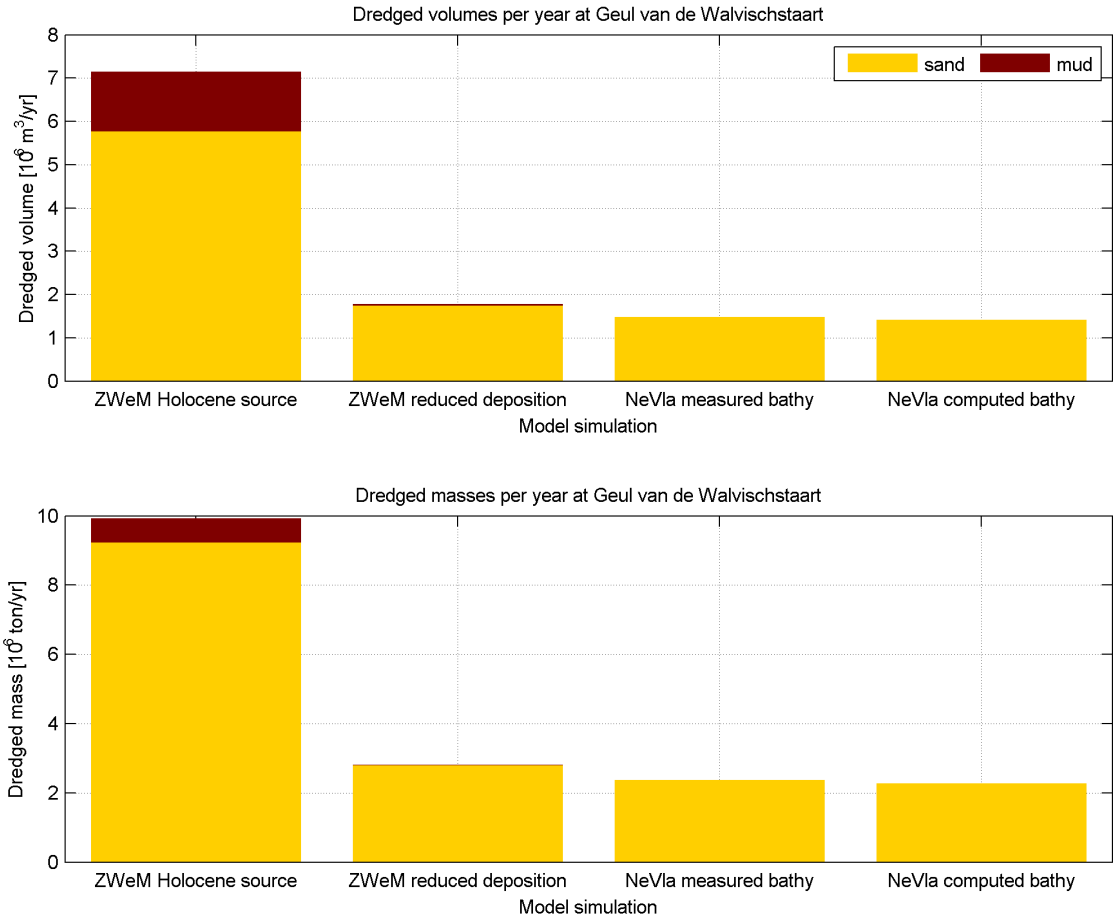
[3] Voorlopige antwoorden op basis van de modelresultaten zoals gekend op 16/09/2016

dus het zand in de geul verwijderd en vervangen door slib. Dit is vooral een tijdelijk effect, omdat er na verloop van tijd weinig zand meer beschikbaar zal zijn in de Geul van de Walvischstaart en er vooral veel slib aanwezig zal zijn. Dit blijkt ook uit de verandering van de slibmassa in de bodem, zie Figuur 38. Omdat de baggervolumes van het ZWeM-model zijn opgeschaald van een maand naar een jaar, betekent dit dat de ~6 miljoen m^3 zand die gebaggerd zou worden in de variant met Holocene bron, ook groter is dan de hoeveelheid zand die momenteel in het model in de Geul van de Walvischstaart aanwezig is.

Uit een extra simulatie waarin in het begin geen zand in de geul aanwezig is (en dus ook niet weggebaggerd kan worden) blijkt dat de massa zand die in de geul terechtkomt vergelijkbaar is met de andere model variant ('ZWeM met verminderde depositie' en de beide zand-modellen. De massa slib is daarin wel groter omdat deze niet meer in de bodem mengt, waardoor het totale baggervolume groter uitvalt. Gezien het grote verschil in baggervolumes tussen de twee ZWeM varianten is het belangrijk om meer zekerheid te krijgen over de daadwerkelijke omvang van de Holocene slibbron.

Om de baggervolumes op langere termijn en met minder initieel effect te kunnen inschatten, zijn modelsimulaties met een langere simulatieperiode gestart die tijdens de workshop worden gepresenteerd.

Figuur 69 - Jaarlijkse baggervolumes[4] van zand en slib uitgedrukt in volume (bovenste figuur) en uitgedrukt in massa (onderste figuur) voor de verschillende modelsimulaties.



[4] Dit zijn de baggerbezwaren zoals deze begroot werden op het moment van de workshop. Deze wijken enigsinds af van de cijfers zoals genoemd in bovenstaand rapport. De cijfers zoals gegeven in het rapport zijn recenter. Mede op basis van de adviezen van de experten zijn de modellen verder verfijnd.

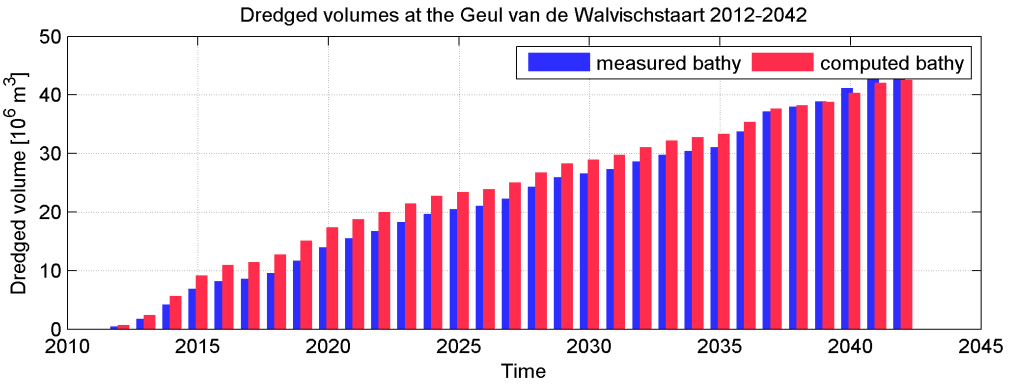
1.1 Zijn deze volumes vooral zandig of slibrijk?

De baggervolumes zijn vooral zandig. In de modelvariant waarin veel slib aanwezig is (ZWeM met Holocene bron) is van het totaal volume ongeveer 7% slib op basis van massaverhouding, en 19% op basis van volumeverhouding. Omdat er initieel relatief veel zand in de Geul van de Walvischstaart aanwezig is, zal de hoeveelheid gebaggerd slib nog toenemen als het model verder is ingespeeld. Dit laat de variant zonder zand in de beginbodem ook zien: er mengt dan geen slib in de bodem, waardoor juist veel slib (65% op basis van massaverhouding) gebaggerd wordt. De modelvariant met verminderde depositie voorspelt nu nog een verwaarloosbare hoeveelheid slib. N.B. de 2DH Zand-NeVla en geïdealiseerde simulaties bevatten geen slib.

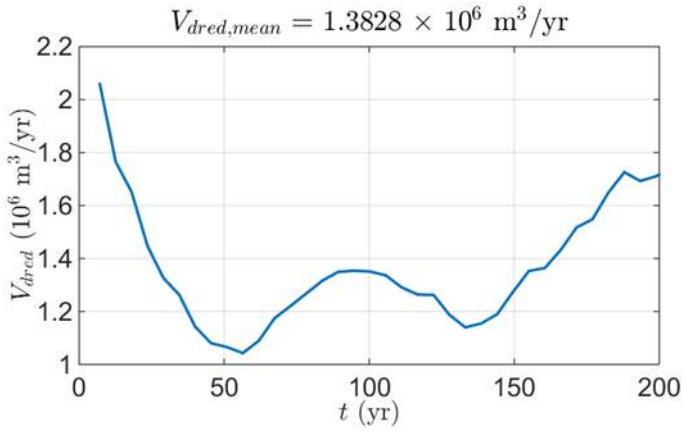
1.2 Hoe veranderen de baggervolumes op de lange termijn?

De baggervolumes verkregen uit het 2DH Zand-NeVla-model vertonen geen duidelijke trend. Het cumulatieve volume neemt vrijwel lineair toe, zie Figuur 70. Deze inschatting beslaat enkel het baggervolume van zand tussen 2012 en 2042. De fluctuaties in de baggervolumes tussen de jaren zijn het gevolg van de gebruikte tijdserie van verschillende springtij-doodtijcycli in combinatie met de morfologische versnellingsfactor van 104 (één springtij-doodtij cyclus is equivalent met morfologische veranderingen die optreden tijdens ~4 jaar). De simulatie met de gemeten initiële bodemligging kent iets lagere baggervolumes in de eerste jaren en juist hogere volumes na 2030 dan voor de berekende initiële bodemligging (op basis van de hindcast over de periode 1965-2012). Dit oplopende verschil lijkt veroorzaakt te worden door de vorming van een onderwaterspit aan de zuidwestelijke ingang van de Geul van de Walvischstaart in de versie met de gemeten bathymetrie.

Figuur 70 - Cumulatieve baggervolumes van zand in de Geul van de Walvischstaart voor de periode 2012-2042 voor de simulatie met de gemeten initiële bodemligging (blauw) en de berekende initiële bodemligging (rood).



Figuur 71 - Jaarlijkse baggervolume van zand verkregen met het geïdealiseerd model.

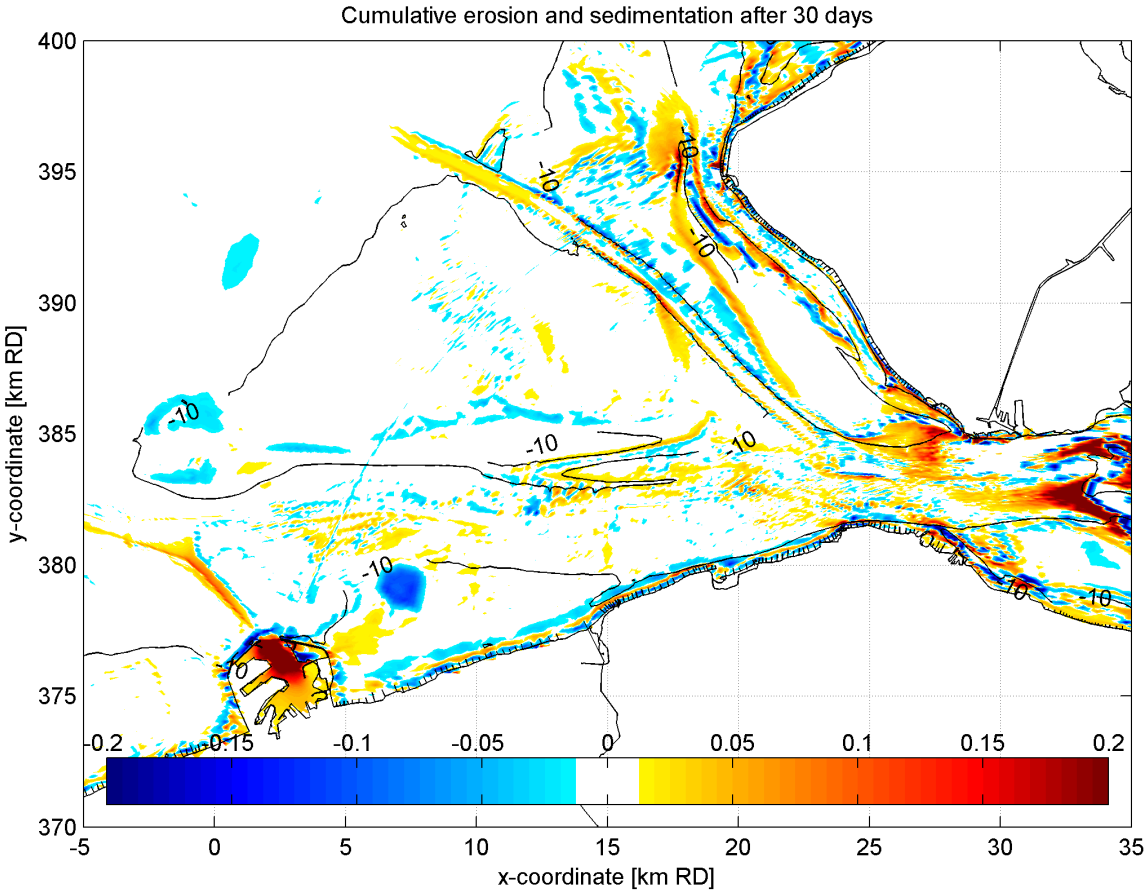


Het baggervolume volgens het geïdealiseerd model vertoont ook geen duidelijk trend op lange termijn (Figuur 71). Dit volume neemt in de eerste 50 jaar af, waarna het op en neer schommelt. Op lange termijn (na 150 jaar) lijkt dit volume toe te nemen. Volgens dit model bedraagt het jaarlijkse baggervolume van zand (gemiddeld over 200 jaar) ongeveer 1.4 x 10^6 m^3, vergelijkbar met de jaarlijkse hoeveelheid volgens het NeVla-model (~1.5 x 10^6 m^3).

1.3 Waar binnen de Geul van de Walvischstaart vindt de meeste sedimentatie plaats?

De meeste sedimentatie treedt op bij het zeewaartse en het landwaartse uiteinde van de Geul van de Walvischstaart, zie Figuur 71. Het middelste gedeelte wordt zelfs wat dieper, wat erop wijst dat dit gedeelte van de geul voldoende stroom trekt om zichzelf in stand te houden. De resultaten van het ZWeM-model, het NeVla-model en het WL-geïdealiseerd model zonder baggeren tonen beiden dit erosie/sedimentatiepatroon. Ook in de scenario's waarin wel wordt gebaggerd verdiept de geul in het middendeel. De modelresulaten verschillen over het meest landwaartse uiteinde: in ZWeM sedimenteert of erodeert dit op deze korte termijn nauwelijks terwijl in NeVla duidelijke sedimentatie optreedt door zeewaartse migratie van de zuidzijde van de Nolleplaat (Figuur 49, tevens zie Figuur 1 voor de exacte locatie). Behalve sedimentatie van het landwaartse deel van deze geul, lijkt deze geul ook linksom te roteren op lange termijn (na 100 jaar) volgens het WL-geïdealiseerd model (Figuur 61). Ook in het noordwestelijke uiteinde van de geul vindt significante sedimentatie plaats. Men kan hierbij opmerken dat het tracé van de nieuwe geul hier gericht is naar een nieuw loodsstation de Westpit, terwijl de natuurlijke geul, hier Deurloo-West, meer noordelijk afbuigt.

Figuur 72 - Cumulatieve erosie en sedimentatie voor een simulatie met het ZWeM-model zonder baggeren en storten na 30 dagen.



1.4 Hoe stabiel is de Geul van de Walvischstaart in het geval van een extreem event (hele hoge golven)?

Hier kan het huidige instrumentarium niet direct een antwoord op geven omdat de modellen niet ontwikkeld zijn om korte-termijn gedrag tijdens extreme condities te beschrijven. Wel kan er met de bestaande modellen een eerste inschatting gemaakt worden als vastgesteld is wat deze extreme condities zouden moeten zijn.

1.5 Hoe kan de verdeling van gebaggerde specie bovenstaande bevindingen beïnvloeden?

Ook hier kan niet direct modelmatig een antwoord op worden gegeven omdat dat sterk afhankelijk is van waar, hoeveel en welk materiaal gestort wordt. Wel biedt de voorliggende studie aanknopingspunten voor een expertoordeel en het vaststellen van mogelijke stortscenario's die onderzocht kunnen worden.

2.1 Welk effect heeft de verdieping van de Geul van de Walvischstaart op de debietverdeling van de 3 grote geulen (Geul van de Walvischstaart, Oostgat, Wielingen) in het mondingsgebied?

De Geul van de Walvischstaart trekt debiet ten koste van de overige geulen en subgetijdenplaten. Het getijvolume na verdieping van de Geul van de Walvischstaart verdubbelt, en vormt daarmee ongeveer 10% van het totale getijvolume door de monding. Hiermee wordt de Geul van de Walvischstaart qua getijvolume vergelijkbaar met het Oostgat, maar nog altijd ca. 5x kleiner dan de Wielingen. De afname van het getijvolume in het Oostgat en de Wielingen is marginaal, in de orde van 3%.

2.2 In hoeverre is een verdiepte Geul van de Walvischstaart in staat zichzelf in stand te houden?

Het middelste deel van de Geul van de Walvischstaart – waar de stroomsnelheden het hoogst zijn – lijkt van nature goed op diepte te blijven, maar de beide uiteinden – waar de stroomsnelheid afneemt – neigen zonder menselijk ingrijpen tot sluiten.

De maximale stroomsnelheden in de Geul van de Walvischstaart nemen toe als gevolg van de verdieping, terwijl de stroomsnelheden tijdens kentering juist afnemen. Daarnaast wordt het effect van golven in de Geul van de Walvischstaart kleiner door de grotere waterdiepte, die belangrijker is dan de toename in golfhoogte in de Geul van de Walvischstaart. Dit betekent dat de Geul van de Walvischstaart onder de gebruikelijke door stroming gedomineerde condities weinig of niet zal sedimenteren, terwijl er juist veel sedimentatie kan optreden als de condities golf-gedomineerd zijn. De relatief grote baggervolumes in de Geul van de Walvischstaart ten opzichte van de Wielingen en het Oostgat, waar nauwelijks wordt gebaggerd, worden vooral veroorzaakt door sedimentatie van het zeewaartse uiteinde van de geul, waar de stroming minder krachtig is en de golfwerking juist sterker. Dit deel van de geul zal niet uit zichzelf op diepte blijven. Het middelste gedeelte lijkt wel in staat op diepte te blijven of zich zelfs iets te verdiepen, terwijl het meest landwaartse deel in eerste instantie nauwelijks veranderingen laat zien. Bij langere simulaties ontstaat daar na verloop van tijd sedimentatie. Op termijn kan het verondiepen van het meest zeewaartse deel ook een effect hebben op de rest van de Geul van de Walvischstaart, hoewel uit het NeVla- en het WL-geïdealiseerd model blijkt dat dit op lange tijdschalen (10-200 jaar) niet leidt tot een sedimentatie van het middelste gedeelte. Merk op dat volgens het WL-geïdealiseerd model de nieuwe geul de tendens heeft om linksom te roteren op lange tijdschalen (na 100 jaar, zie Figuur 61).

B: Wat zijn de gevolgen op het estuarium, vooral op de lange termijn ontwikkeling van de morfologie?

De verdiepte Geul van de Walvischstaart is een relatief klein deel van de monding en leidt op korte tijdschalen (ordegrootte 10 jaar) alleen tot een beperkte reactie in de morfologie in de monding. Het WL-geïdealiseerd model suggereert dat het op langere tijdschalen (orde 100 jaar) leidt tot een minder uitgesproken Wielingen, door extra sedimentatie (Figuur 61) en een afgenomen natuurlijke verdieping van het Oostgat (Figuur 66). Afhankelijk van het sedimentbeheer (stortstrategie) lijkt het mogelijk dat een

toename van de getijslag bovenstrooms van Hansweert optreedt als gevolg van een toename van verdieping van het estuarium (Figuur 67).

3. Wat is het effect van de verdieping van de Geul van de Walvischstaart op de getijvoortplanting in het Schelde-estuarium?

Afhankelijk van het sedimentbeheer (nu is feitelijk zandwinning onderzocht, geen stortstrategie) lijkt een toename van de getijslag mogelijk, vooral bovenstrooms van Hansweert. Alle scenario's laten een significante stijging zien van de M2 en S2 waterstand getij amplitudes voor de periode 2012-2042 (tot 14 cm voor M2 en tot 4 cm voor S2 ter hoogte van Antwerpen), onafhankelijk van een verdieping van de Geul van de Walvischstaart (Figuur 29). De voornaamste reden voor de toename van de getijamplitude is het dieper worden van de hoofdgeul in de Westerschelde (zie Sectie B.3 en B.4) als gevolg van zandexport naar de monding toe. Deze verdieping van de hoofdgeul treedt algemeen op, maar is sterker bij verdieping van de Geul van de Walvischstaart. Volgens het WL-geïdealiseerd model zal de natuurlijke verdieping van de hoofdgeul in de Westerschelde op lange tijdschalen afnemen, terwijl in de situatie met de nieuwe geul de verdieping van deze hoofdgeul zal blijven toenemen (Figuur 67).

Een verdieping van de Geul van de Walvischstaart beïnvloedt de getij amplitude in de huidige situatie niet significant. Ook het scenario met de verdieping laat in 2042 slechts een kleine stijging van amplitude zien tot 4 cm in de meer stroomopwaartse delen van de Westerschelde. De (kleine) toename van de M2 en S2 getij amplitudes is gecorreleerd aan een vergroting van het getijprisma (zie ook onder 'Getijvolumes'). In tegenstelling tot het M2 en S2 getij, laten de M4 amplitudes een kleine afname zien stroomopwaarts van Hansweert in het geval van de verdieping.

*Veranderingen in getijfase zijn veel minder uitgesproken dan de verschillen in amplitude. De fasering van M2 en S2 neemt enigszins af in het geval van de verdieping (Figuur 30), terwijl er een kleine M4 fase toename is. Als gevolg hiervan worden de relatieve fase (2*φM2-φM4) en de getijasymmetrie kleiner in de scenario's met verdieping. Dit verschil ten opzichte van de referentie neemt toe in de tijd (Figuur 31). Door de verdieping wordt de Westerschelde minder vloedgedomineerd, wat zich, zeker in scenario's waarin het gebaggerde sediment niet wordt teruggestort, uit in een toename van sediment export (Figuur 34 en Figuur 67), een sterkere verdieping van de hoofdgeul (Figuur 45) en een toename in de M2 en S2 amplitudes.*

Hier moeten we wel opmerken dat voor alle resultaten de getij forcering aan de zeewaartse rand onveranderd blijft in tijd, en dus dat effecten zoals mogelijke zeespiegelstijging niet worden meegenomen.

4. Wat is het lange-termijn effect op de morfologie?

4.1 Wat is het grootschalig effect in het mondingsgebied en de Westerschelde?

Volgens het NeVla- en het WL-geïdealiseerd model lijkt het mondingsgebied in vergelijking met de Westerschelde relatief stabiel op korte tijdschalen (ordegrootte 10 jaar, Figuur 45 en Figuur 60), waarbij de meeste morfologische elementen in het begin niet sterk migreren. Volgens het NeVla-model heeft de verdieping van de *Geul van de Walvischstaart nauwelijks effect op het mondingsgebied ten zuidwesten van de Geul. Aan de oostkant hogen de Elleboog en het Bankje van Zoutelande iets sterker op dan zonder verdieping en vertoont de Sardijngeul een sterkere dynamiek. Volgens het WL-geïdealiseerd model lijkt Wielingen minder uitgesproken op langere tijdschalen (orde 100 jaar) als gevolg van toename van sedimentatie in deze geul (Figuur 61).*
De hoofdgeul van de Westerschelde wordt dieper (orde 1 meter) en breder in het scenario van de verdieping door een toename van het sediment export uit het estuarium (Figuur 34 en Figuur 67).

4.2 Kleinschalig effect op de geulhelling van de Geul van de Walvischstaart en aangrenzende ondiepe zones?

Het grootste deel van de Geul van de Walvischstaart verdiept en verbreedt zich in noordoostelijke richting. Hierbij worden de geulwanden aan de noordoost zijde iets steiler en aan de zuidwest kant marginaal flauwer (Figuur 52). De Vlakte van de Raan is zeer stabiel, de rand van de ondiepte aan de noordoostkant wordt hoger.

4.3 Heeft verdieping van de Geul van de Walvischstaart een effect op de ontwikkeling van het Oostgat?

Volgens het NeVla-model verplaatst het Oostgat zich van nature landwaarts (dus zonder verdieping van de Geul van de Walvischstaart) en verdiept het Oostgat over de periode 2012-2042 wat gepaard gaat met lokale erosie langs de kust. Ook neemt het debiet door het Oostgat iets toe (Figuur 56). De verdieping van de Geul van de Walvischstaart heeft weinig effect op deze migratie en verdieping. Het grootste effect van de verdieping is zichtbaar aan de noordkant ter hoogte van Westkapelle, waar de westelijke geulwand steiler wordt en de geul breder. Echter, volgens het WL-geïdealiseerd model treedt er wel degelijk een afname van de natuurlijke verdieping van het Oostgat op langere tijdschalen als gevolg van de aanleg van de nieuwe geul (Figuur 66 op p. 58). De natuurlijke uitdieping van deze geul (ongeveer 6 cm/jaar, panel a) zal op deze langere tijdschalen met de aanleg van de nieuwe geul sterk af nemen (ongeveer 2.5 cm/jaar, panel b). het geïdealiseerde model voorspelt wel niet het ontstaan van de Deurloo als paralelle geul, wat mogelijk het verschillend gedrag van dit model verklaart

5. Is er een effect van de verdieping op de (grootschalige) slibhuishouding? En daarbij aansluitend, is er een invloed op de getij-asymmetrie?

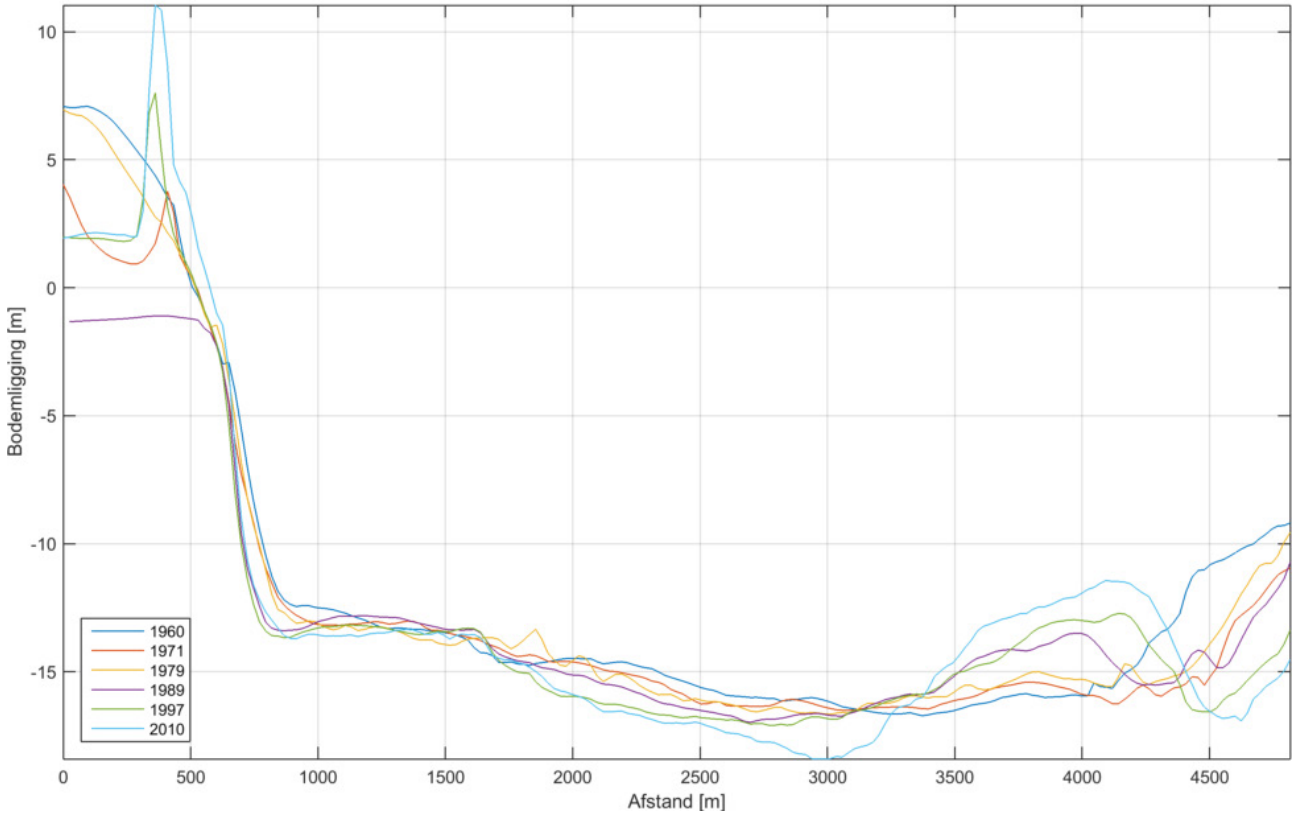
De verdieping leidt tot een herverdeling van slib tussen bodem en waterkolom en tot een andere ruimtelijke verdeling. In de simulaties met verdieping bezinkt slib vanuit de waterkolom naar de bodem. Daarnaast lijkt de hoeveelheid slib in en op de bodem rondom Zeebrugge af te nemen. In de Geul van de Walvischstaart, op de Vlakte van de Raan en in de Wielingen neemt de hoeveelheid slib in de bodem toe. Dit is het gevolg van veranderde resttransporten (afname ebtransport in de Wielingen) en veranderde bodemschuifspanningen (afname bodemschuifspanning in de Geul van de Walvischstaart en in de Wielingen). Omdat het slib in en op de bodem wordt afgezet, blijft het beschikbaar voor resuspensie bij meer energetische omstandigheden. De berekende veranderingen in de slibverdeling zijn verklaarbaar met de veranderde hydrodynamica. Het effect van de verandering in patronen op de lange termijn zal echter onderzocht moeten worden door het model voor een langere periode te draaien, zodat eventuele initiële effecten minder belangrijk worden en er meer verschillende hydrodynamische condities worden doorgerekend.

6. Zijn er effecten op de golfhoogte in de monding en heeft dit gevolgen voor de maatgevende belastingen op de hoogwaterbescherming?

De verdieping leidt tot een verhoging van de golfhoogte in de Geul van de Walvischstaart en een verlaging van de golfhoogte achter de geul. Op grotere afstand van de geul zijn er echter ook veranderingen (toe- en afnames van de orde van 10 cm aan de kust voor golven van 1-2 m op zee) zichtbaar. Of dit relevante veranderingen zijn voor de belastingen op de waterkeringen en het daaraan gerelateerde onderhoud aan de waterkeringen moet nog worden uitgezocht.

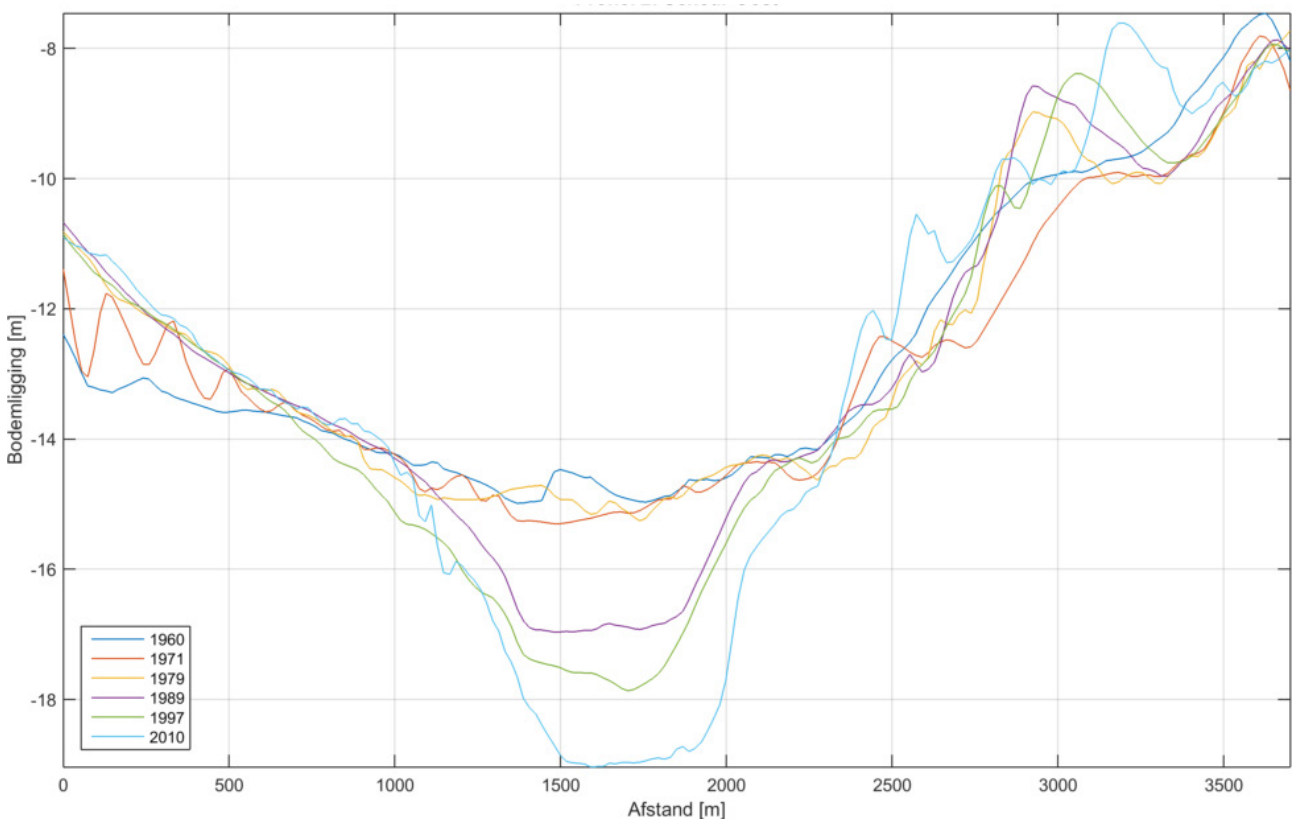
Appendix B: Ontwikkeling van geulprofielen in de Westerscheldemonding

Figuur 73 - Morfologische ontwikkeling Profiel 1:Wielingen.



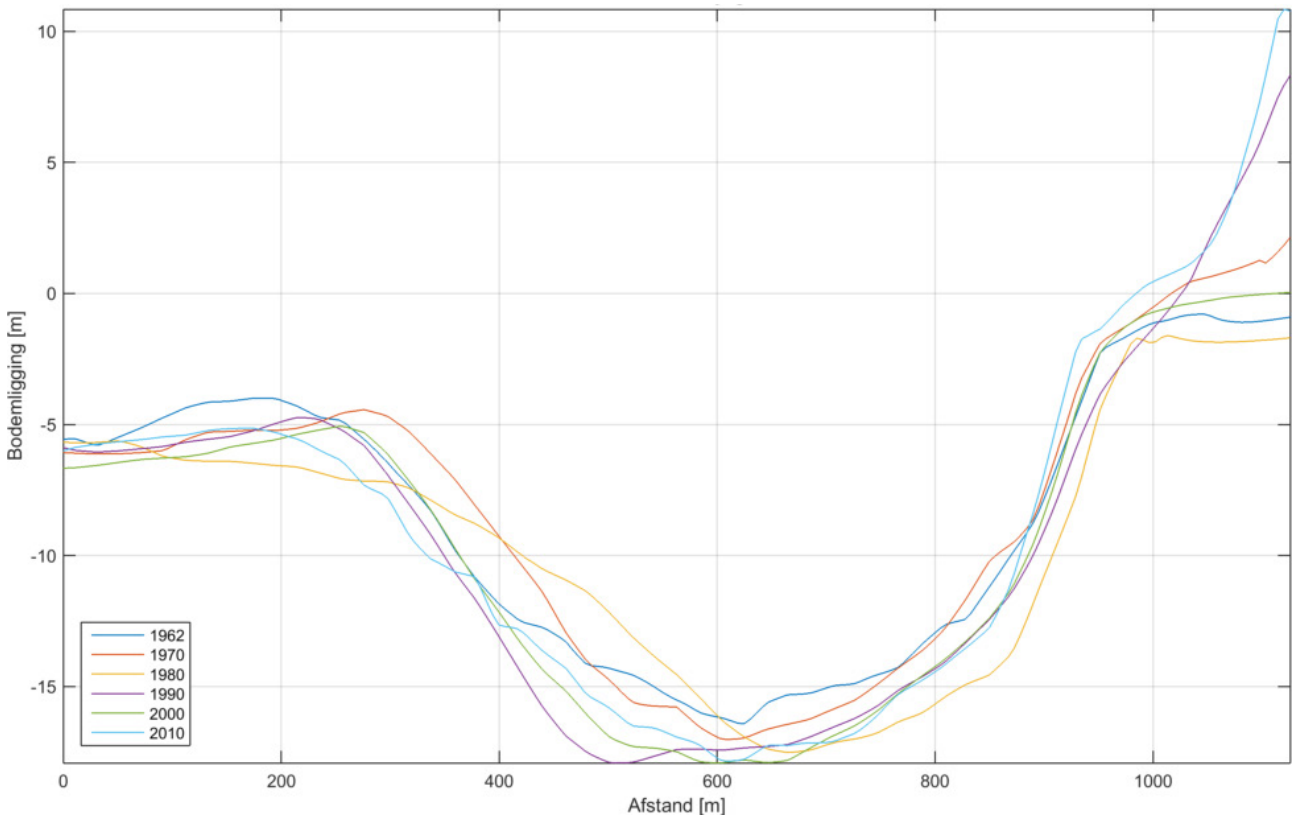
Links=Zuid, rechts=Noord. Voor ligging profielen zie Figuur 52.

Figuur 74 - Morfologische ontwikkeling Profiel 2: Wielingen Belgisch-Nederlandse grens.



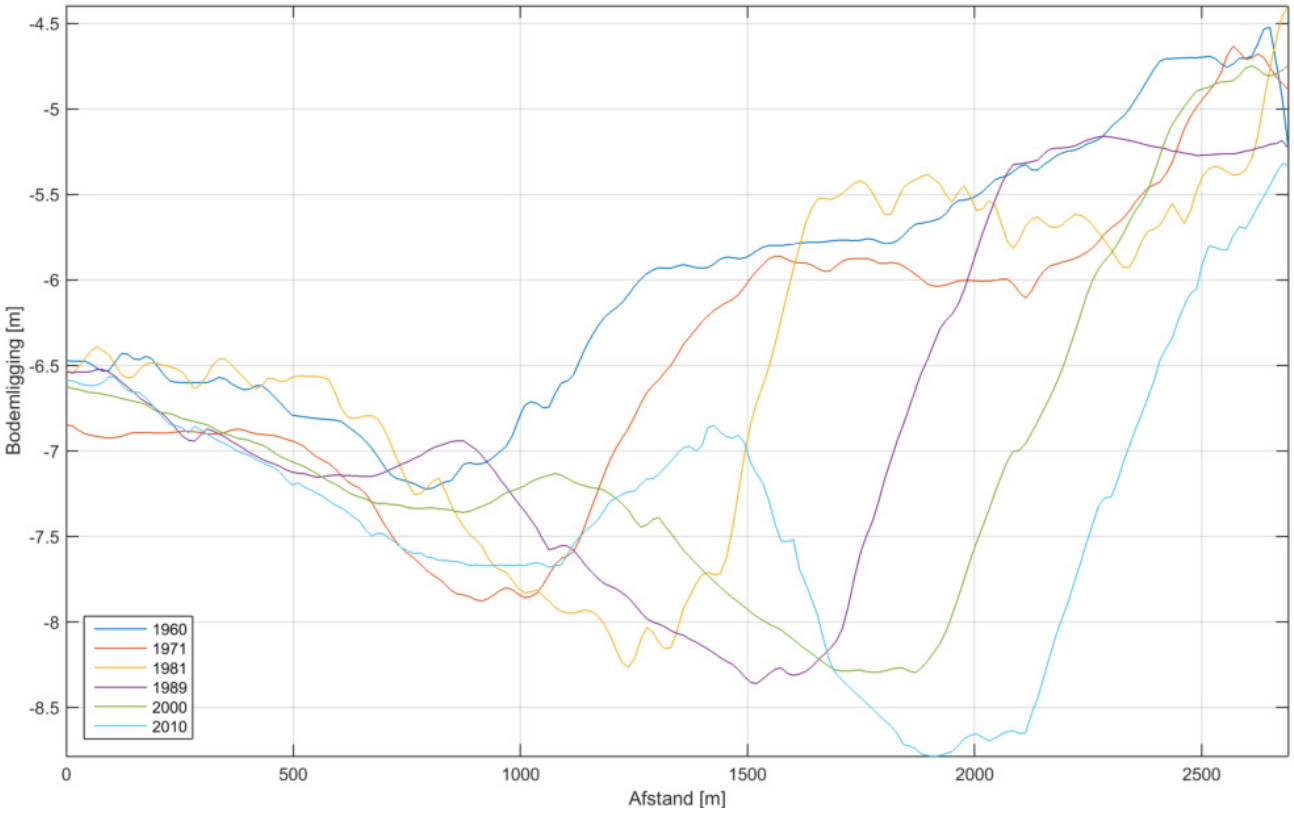
Links=Zuid, rechts=Noord. Voor ligging profielen zie Figuur 52.

Figuur 75 - Morfologische ontwikkeling Profiel 4: Sardijngeul.



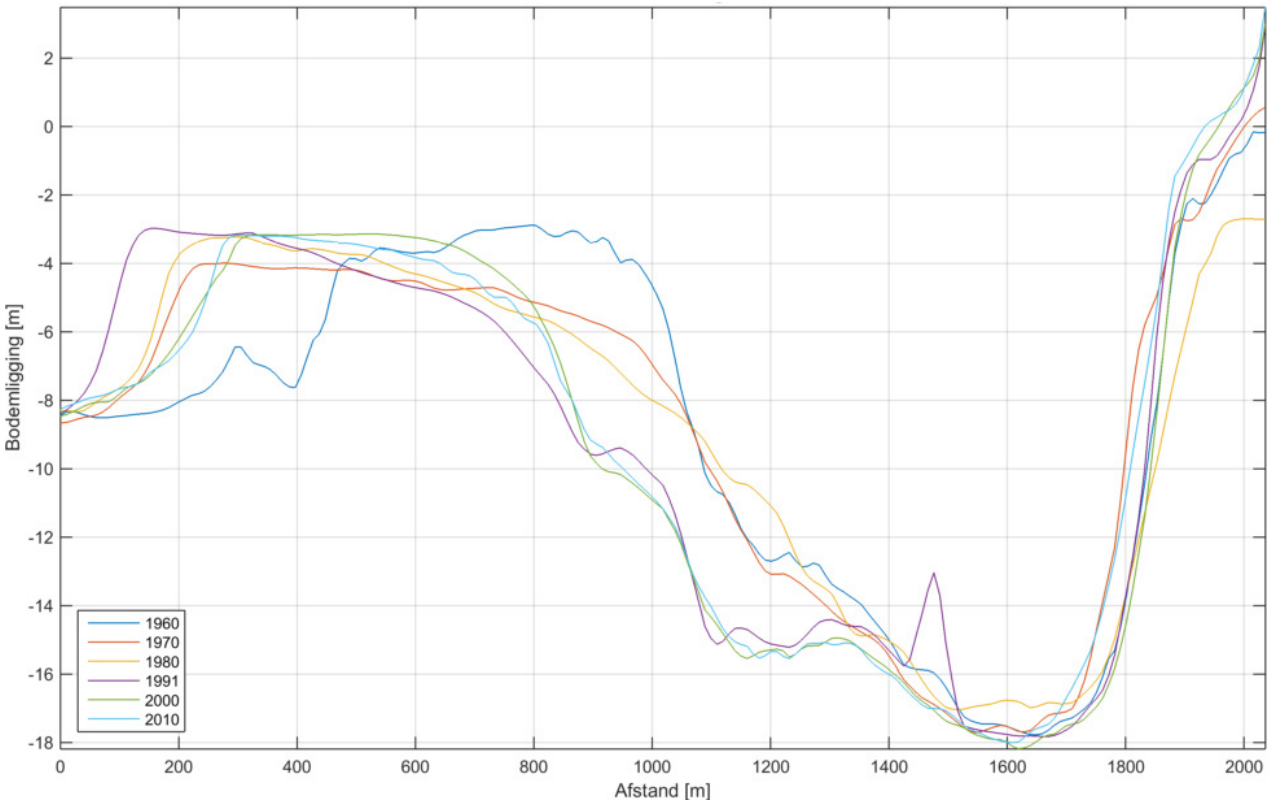
Links=Zuid, rechts=Noord. Voor ligging profielen zie Figuur 52.

Figuur 76 - Morfologische ontwikkeling Profiel 6: Geul van de Walvischstaart.



Links=Zuid, rechts=Noord. Voor ligging profielen zie Figuur 52.

Figuur 77 - Morfologische ontwikkeling Profiel 7: Oostgat.



Links=Zuid, rechts=Noord. Voor ligging profielen zie Figuur 52.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**
Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen
T +32 (0)3 224 60 35
F +32 (0)3 224 60 36
waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be
www.waterbouwkundiglaboratorium.be