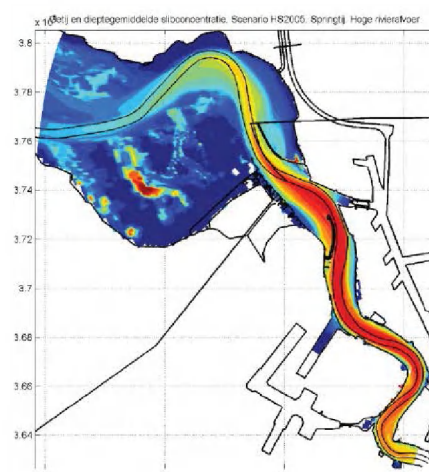


Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid

Morfologische lange termijn simulaties

Basisrapport grootschalige ontwikkeling G-11

01 oktober 2013

Colofon

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

Telefoon: + 32 3 270 92 95

Fax: + 32 3 235 67 11

Email: info@imdc.be

Website: www.imdc.be

Deltares

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

Telefoon: + 31 (0)88 335 8273

Fax: +31 (0)88 335 8582

Email: info@deltares.nl

Website: www.deltares.nl

Svašek Hydraulics BV

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

Telefoon: +31 10 467 13 61

Fax: +31 10 467 45 59

Email: info@svasek.com

Website: www.svasek.com

ARCADIS Nederland BV

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Amhem, Nederland

Telefoon: +31 (0)26 377 89 11

Fax: +31 (0)26 377 85 60

Email: info@arcadis.nl

Website: www.arcadis.nl

Document Identificatie

Titel	Morfologische lange termijn simulaties
Project	Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie
Opdrachtgever	Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen
Bestek nummer	16EF/2010/14
Documentref	I/RA/11387/12.179/GVH
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.03.31\G-11 - Morfologische lange termijn simulaties_v1.1.docx

Revisies / Goedkeuring

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	31/08/2012	FINAAL	G. Dam S. Poortman	B. Grasmeijer Z. Bing Wang M. Taal	
1.1	31/03/2012	Klaar voor revisie	G. Dam S. Poortman	B. Grasmeijer Z. Bing Wang M. Taal	
2.0	01/10/2013	FINAAL	G. Dam S. Poortman	B. Grasmeijer Z. Bing Wang M. Taal	

Verdeellijst

1	Analoog	Youri Meersschaut
1	Digitaal	Youri Meersschaut

Morfologische lange termijn simulaties

Ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en
Toegankelijkheid

Eindrapport

Schiehaven 13G

3024 EC Rotterdam

Nederland

T +31 - 10 - 467 13 61

F +31 - 10 - 467 45 59

E info@svasek.com

I www.svasek.com

Document titel	Morfologische lange termijn simulaties Ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde- estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid
Verkorte Titel	Morfologische lange termijn simulaties
Status	Eindrapport
Datum	23 juli 2013
Project naam	Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid
Project nummer	1630
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Waterdienst, Vlaamse Overheid, Afdeling Maritieme Toegang
Referentie	G11; 1630/U13054/D/SPo

Auteur	Gerard Dam, Sanne Poortman
Gecontroleerd door	Bart Grasmeijer, Zheng Bing Wang, Marcel Taal

INHOUDSOPGAVE

	Pag.
1 INLEIDING	3
1.1 Algemeen	3
1.2 Leeswijzer	3
2 MODELINSTELLINGEN EN AANNAMES	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Modelbodem	5
2.2.1 Forecast	5
2.2.2 Hindcast	5
2.3 Baggeren en storten	6
2.3.1 Forecast	6
2.3.2 Hindcast	8
2.4 Zandwinning	8
2.4.1 Forecast	8
2.4.2 Hindcast	9
2.5 Overige modelinvoer	9
3 RESULTATEN FORECAST: ZANDWINSCEANARIO'S	10
3.1 Inleiding	10
3.2 Probleemstelling	10
3.3 Scenario definitie	11
3.4 Morfologische ontwikkelingen	11
3.5 Berekende baggervolumes	17
3.6 Getijdoordringing	19
3.7 Import/export van sediment en volumeveranderingen	22
3.8 Areaalontwikkeling	25
3.9 Betrouwbaarheid van de resultaten	26
3.10 Conclusies	28
4 RESULTATEN FORECAST: OOSTELIJK STORTSTRATEGIE	29
4.1 Inleiding	29
4.2 Morfologische ontwikkelingen	29
4.3 Berekende baggervolumes	31
4.4 Getijdoordringing	31
4.5 Volumeveranderingen	33
4.6 Conclusies	34
5 RESULTATEN FORECAST: EFFECT NIET-ERODEERBARE LAGEN	36
6 RESULTATEN FORECAST: EFFECT FIJNER ROOSTER	38
6.1 Inleiding	38
6.2 Resultaten	39
6.3 Conclusie	41
7 RESULTATEN SCENARIO'S 1965-2002, MET FOCUS OP ONTWIKKELING MIDDELGAT	42
7.1 Inleiding	42
7.2 Morfologische ontwikkeling Westerschelde	42

7.3	Morfologische ontwikkeling Middelgat	48
7.4	Depositie Middelgat	53
7.5	Hypsometrie	59
7.6	Conclusies	60
8	CONCLUSIES	61
	LITERATUUR	63

1 INLEIDING

1.1 Algemeen

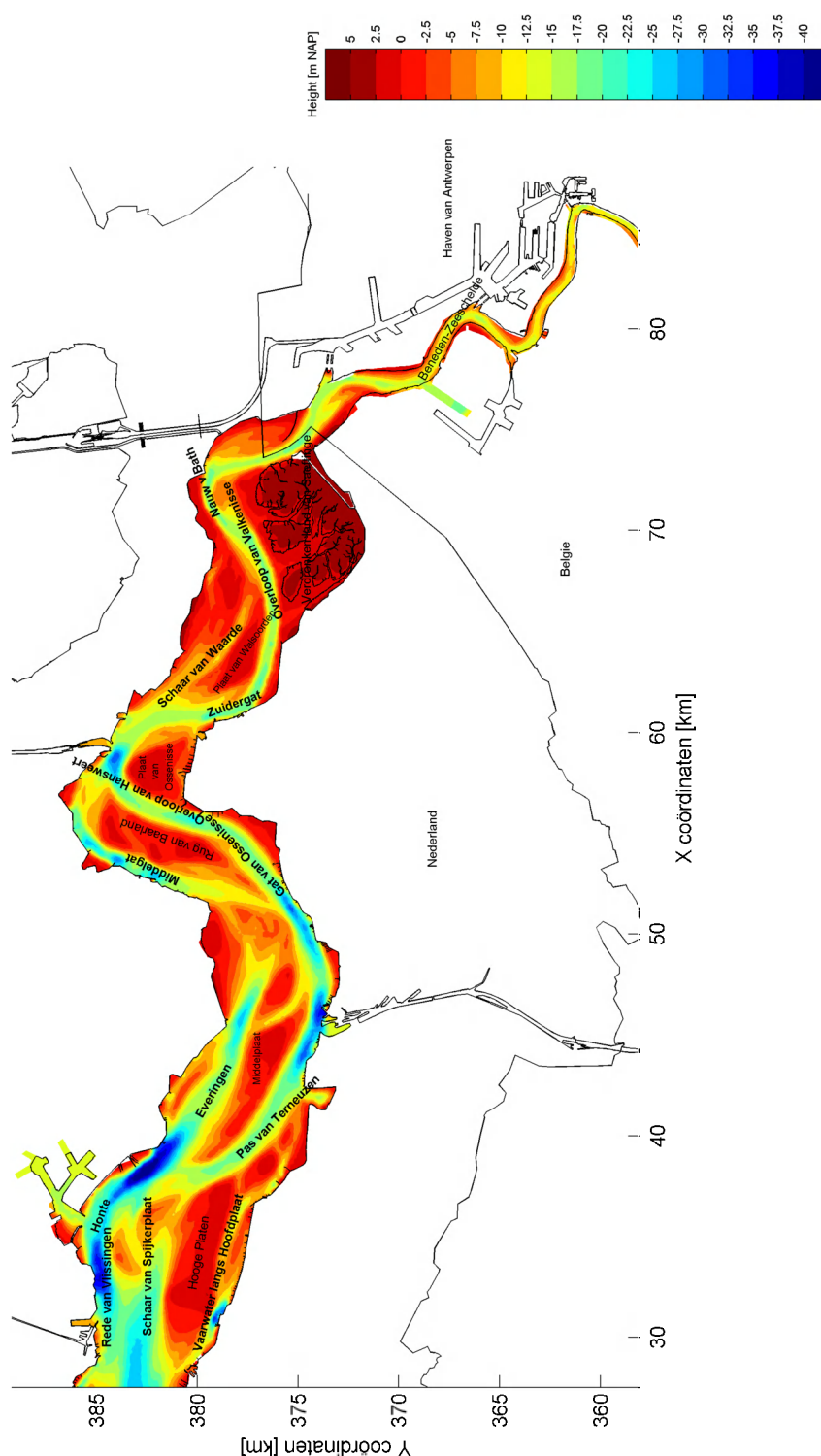
Binnen het Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis project zijn een aantal onderzoeksvragen gesteld over het morfologisch en hydraulisch effect van zandwinning en stortbeleid in de Westerschelde. De onderzoeksvragen hebben betrekking op grote tijd- en ruimteschalen van de dynamiek van het estuarium enerzijds en de relatief kleine tijd- en ruimte schaal van zandwinning en sedimentstrategie anderzijds. Het volume zandwinning en het baggerbezwaar van een individueel jaar is te klein om een direct merkbaar effect op de grootschalige waterbeweging en morfologie te hebben. Alleen op een langere tijdschaal zou er een cumulatief effect kunnen worden geïdentificeerd. Het causale verband tussen bijvoorbeeld zandtekort en zandwinning is in de praktijk op basis van de beschikbare meetdata niet of nauwelijks hard te maken. De meest geschikte methode om een eventueel effect te onderzoeken is door middel van een proces gebaseerd morfologisch model. Door het systematisch “aan en uitzetten” van zandwinning in het model ontstaat inzicht in het relatieve effect van zandwinning. Vanwege de verwachte lange termijn effecten van zandwinning wordt honderd jaar gezien als een acceptabele periode om deze lange termijn effecten met het model in beeld te brengen.

Met het FINEL2d model van de Westerschelde wordt het effect van verschillende langdurige lokale ingrepen (waaronder zandwinning en baggeren/storten) op de megaschaal onderzocht om zodoende de onderzoeksvragen te beantwoorden.

Dit rapport beschrijft de uitkomsten van een aantal lange termijn morfologische model simulaties waarmee het effect van zandwinning, bagger- en stortstrategieën, en niet-erodeerbare lagen inzichtelijk gemaakt kan worden. De simulaties betreffen zowel een hindcast periode van 38 jaar (1965-2002) als een forecast periode van 100 jaar (2011-2111).

1.2 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd. De modelinstellingen behorende bij de scenario's worden in hoofdstuk 2 behandeld. De resultaten van de forecast scenario's met betrekking tot zandwinning worden behandeld in hoofdstuk 3, de scenario's met betrekking tot de harde lagen in de Westerschelde in hoofdstuk 5 en de scenario's met betrekking tot het stortbeleid in hoofdstuk 4. De hindcast scenario's aangaande de verzanding van het Middelgat zijn in hoofdstuk 6 terug te vinden. In Figuur 1.1 is ter verduidelijking van de tekst een overzicht gegeven van de gebruikte naamgeving van de geulen, platen en baggergebieden in het Schelde estuarium.



Figuur 1.1: Overzicht naamgeving geulen en platen in de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde

2 MODELINSTELLINGEN EN AANNAMES

2.1 Inleiding

De scenario's worden uitgevoerd met het proces gebaseerde morfologische model FINEL2d. Met dit model is een schematisatie voor de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde ontwikkeld in 2006 (Svašek Hydraulics, 2006) en geactualiseerd in 2012 (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis2013a).

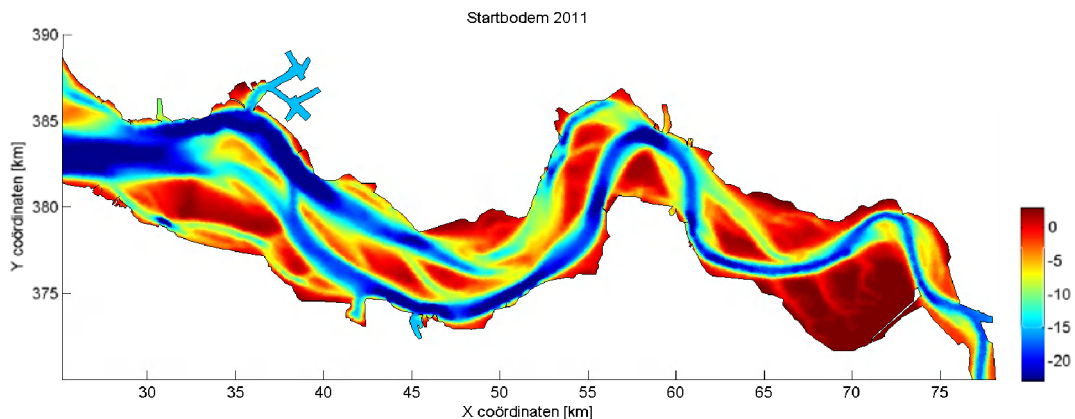
Dit model heeft bewezen een realistische eindbodem te voorspellen bij een hindcast van decennia met baggeren, storten en zandwinning. Het model rekent relatief snel, waardoor eenvoudig gevoeligheidsanalyses uitgevoerd kunnen worden.

In dit hoofdstuk worden modelinvoer en aannames beschreven, i.e. de modelbodem (paragraaf 2.2), het baggeren en storten in het model (paragraaf 2.3), de zandwinning (paragraaf 2.4) en de overige invoer (paragraaf 2.5). Zowel de modelinstellingen met betrekking tot de forecasts als de hindcasts worden behandeld.

2.2 Modelbodem

2.2.1 Forecast

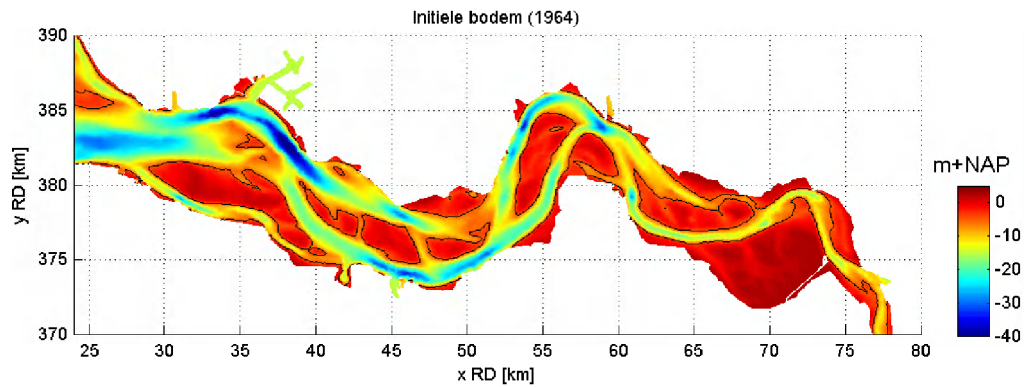
Alle forecast scenario's starten met de bodemopname van de Westerschelde uit 2011, zie Figuur 2.1. Deze bodem is inclusief een volledig afgeronde derde verdieping van de vaargeul (-14.5 m LAT). De bodem van de monding is ook uit 2011. De bodemgegevens van de Beneden- en Zeeschelde zijn uit 2010. De rest van de bodemgegevens (rest monding en Vlaamse rivieren) zijn overgenomen uit het NEVLA model met een bodemschematisatie uit 2006.



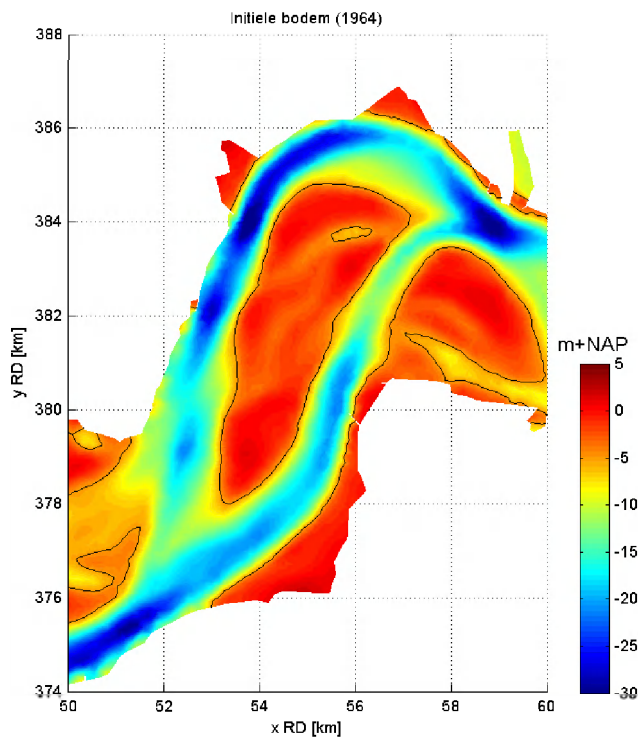
Figuur 2.1: Gebruikte startbodem van de forecast scenario's (2011 opname); diepte in m NAP.

2.2.2 Hindcast

De hindcast scenario's starten met de bodemopname van de Westerschelde uit 1964, aangevuld met een bodemopname van de Westerschelde uit 1963, en een bathymetrie van de Zeeschelde uit 1960. De initiële modelbodem is weergegeven in Figuur 2.2. Figuur 2.3 zoomt in op de bodem ter plaatse van het Middelgat. In beide figuren is de NAP -5 m contourlijn opgenomen.



Figuur 2.2: Modelbodem van de Westerschelde in 1964 ten behoeve van de hindcasts. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn opgenomen.



Figuur 2.3: Modelbodem van de Westerschelde ter plaatse van het Middelgat in 1964 ten behoeve van de hindcasts. In de figuur is de NAP -5 m contourlijn opgenomen.

2.3 Baggeren en storten

2.3.1 Forecast

Een belangrijk onderdeel van de modelinvoer betreft het baggeren en storten. In het model is de vergunde vaargeul ingebracht als polygoon die per drempelgebied onderhouden wordt op -14.5m LAT. Met behulp van de LAT reductiekaart is een vertaling gemaakt naar NAP dieptes per drempel. Het model rekent zelf uit of er gebaggerd moet worden in de vaargeul. Hierbij wordt de gehele

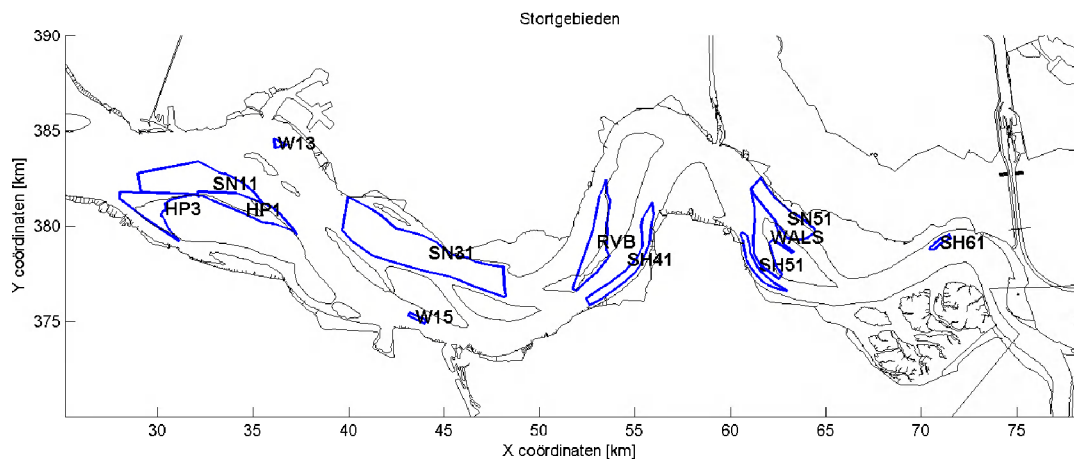
vaargeul opgegeven als potentieel baggergebied. Alleen die gridcellen die met de bodem boven de interventiediepte komen worden verdiept in het model.

Uit de actualisatie van het model blijkt dat de berekende baggervolumes in dezelfde orde grootte zitten als de werkelijke gebaggerde volumes. Ook toont het model aan dat de baggerlocaties goed overeenkomen met de werkelijke baggergebieden (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013a). Per drempelgebied moet opgegeven worden over welke stortgebieden het sediment verspreid moet worden. Recentelijk is het stortbeleid overgegaan op “flexibel storten”, waarbij onder andere gebruik gemaakt wordt van plaatrandstortingen (Sas et al., 2011). Verder is het beleid dat er zoveel mogelijk teruggestort wordt in dezelfde macrocel mits er genoeg ruimte is. Gekozen is om de 2011 stortverdeling in de Westerschelde toe te passen. Het is echter zeer waarschijnlijk dat het bagger- en stortbeleid in de toekomst niet hetzelfde blijft. Hiermee moet rekening gehouden worden bij de interpretatie van de uitkomsten. De procentuele verdeling van baggervolumes per drempelgebied over de stortvakken is te zien in Tabel 2.1.

Tabel 2.1: Procentuele verdeling baggeronderhoud van vaargeul over de stortvakken (Bron: gegevens AMT); 2011 scenario

Drempelgebied / Stortzone ->	Grand Total	Vaanwater boven Bath B7- B76	Vaanwater boven Bath (Zandvlei)	Put van Terneuzen	Pas van Terneuzen B8-B10	Pas van Terneuzen B10-B12A	Overloop van Valkenisse B58-B64	Overloop van Valkenisse B54-B58	Overloop van Valkenisse B48-B54	Overloop Hansweert B41-B47	Nauw van Bath B73	Gat van Ossenisse B32-B38	Gat van Ossenisse B28A-B32	Gat van Ossenisse B24-B28A	Drempel van Walsorden	Drempel van Valkenisse	Drempel van Hansweert	Drempel van Borsselle	Drempel van Bath
HP1	6%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	20%	30%	0%	0%	0%	24%	0%
HP3	6%	0%	0%	0%	0%	68%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	26%	0%
Opspuiten Doeldok	3%	87%	0%	0%	0%	0%	3%	37%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RVB	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	29%	0%	28%	20%	25%	0%	2%	3%	9%	0%	11%
SH41	35%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	40%	64%	100%	0%	68%	56%	0%	56%	56%	37%	0%	19%
SH51	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	15%	0%	0%	22%	0%	0%	0%	34%	1%	12%	0%	7%
SH61	6%	1%	48%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	31%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	50%
SN11	7%	0%	0%	0%	0%	32%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
SN31	7%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	12%	0%	70%	0%	0%	0%	3%	0%
SN51	10%	12%	33%	0%	0%	0%	16%	2%	7%	0%	19%	0%	0%	0%	8%	17%	23%	0%	11%
WALS	8%	0%	0%	0%	0%	0%	17%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	23%	19%	0%	1%
Grand Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

In Figuur 2.4 zijn de locaties van de stortgebieden te zien. De locaties WALS (Walsoorden), RVB (Rug van Baarland), HP1 (Hoge Platen) en HP2 zijn plaatrandstortingen. De stortlocaties W13 en W15 in Figuur 2.4 zijn stortlocaties van het onderhoud in de Sloehaven en havens van Terneuzen respectievelijk. De diepte van deze havens wordt ook in het model onderhouden om te voorkomen dat deze havens verzanden. Het stortvolume van alle stortvakken wordt evenredig verdeeld over de gehele stortpolygoon. Alhoewel er nu wordt gedacht deze havenstortplaatsen te verplaatsen is de hoeveelheid zand dat hier in het model gestort wordt niet dusdanig groot dat dit veel uitmaakt voor het eindresultaat. In werkelijkheid wordt ook meer slib dan zand uit de havens gebaggerd.



Figuur 2.4: Definitie stortgebieden voor 2011 scenario

2.3.2 Hindcast

In de hindcast scenario's wordt in de modellering zoveel mogelijk het werkelijk toegepaste bagger- en stortbeleid toegepast. De vergunde vaargeul is ook hier ingebracht als polygoon die per drempelgebied op de diepte gehouden wordt. De locatie van de vergunde vaargeul verschilt door de jaren heen, evenals de te onderhouden diepte, zie daarvoor Svašek Hydraulics (2006). Per drempelgebied moet ook hier opgegeven worden over welke stortgebieden het sediment verspreid moet worden. De werkelijke toegepaste stortverdeling wordt in de modellering toegepast. De procentuele verdeling per drempelgebied over de stortvakken is ook terug te vinden in Svašek Hydraulics (2006).

2.4 Zandwinning

2.4.1 Forecast

In de simulatiescenario's waarbij zand gewonnen wordt in het model, is er voor gekozen de zandwinning zoals die in 2009 heeft plaatsgevonden toe te passen in het model, gedurende de gehele simulatie van 100 jaar. De zandwinning vindt al enkele jaren op dezelfde locaties plaats. Het zandwinvolume is $1,61 \text{ Mm}^3$ per jaar, verdeeld over de locaties zoals aangegeven in Figuur 2.5. Er zijn twee locaties in nevengeulen: de Everingen en de Schaar van Waarde. Daarnaast wordt er zand gewonnen ten westen van de Plaat van Ossensisse en ten zuiden van de Plaat van Valkenisse. Deze locaties bevinden zich langs de hoofdvaargeul, maar buiten de boeienlijn.

Verder is aangenomen dat het vaargeulonderhoud in de Zeeschelde in zijn geheel als zandwinning uit het systeem gehaald wordt in het model. In werkelijkheid wordt het zand eerst gestort bij de Schaar van Ouden Doel, om vervolgens gewonnen te worden. Er wordt hier alleen zand gewonnen om het stortgebied op diepte te houden (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013c). In het model wordt het zand direct gewonnen uit het vaargeulonderhoud. In de simulaties is dit gemiddeld $0,75 \text{ Mm}^3$ per jaar. In werkelijkheid wordt er jaarlijks ongeveer $1,5 \text{ Mm}^3$ per jaar uit Schaar van Ouden Doel gewonnen (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013c). Of dit getal ook de daadwerkelijke aanzanding in de Beneden Zeeschelde is, wordt in een ander deel van 'Veiligheid en Toegankelijkheid' onderzocht.

Bij alle scenario's (ook zonder zandwinning in de Westerschelde) is deze zandwinning in de Zeeschelde in de simulatie gehouden.



Figuur 2.5: Zandwinningslocaties 2009

2.4.2 Hindcast

Evenals de bagger- en stortstrategie zijn de zandwinlocaties en het zandwinvolume in de periode 1964-2002 ook aan veranderingen onderhevig geweest. Voor het toegepaste zandwinbeleid in de modelsimulaties wordt verwezen naar Svašek Hydraulics (2006).

2.5 Overige modelinvoer

De schematisatie omvat een niet-erodeerbare laag, opgegeven per gridcel. Deze niet-erodeerbare laag is overgenomen volgens Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013b). De modelbodem kan niet onder deze laag komen. In de scenario's waar geen niet-erodeerbare laag is opgegeven heeft de modelbodem 'vrij spel'.

Zeespiegelstijging is gedefinieerd als een toename van de waterstand op de zeerandvoorwaarde. Deze zeespiegelstijging neemt lineair toe over de simulatieperiode en bedraagt 0 op $t=0$ jaar en 60cm op $t=100$ jaar. De zeespiegelstijging is alleen toegepast op twee scenario's met en zonder zandwinning. In de andere scenario's treedt gedurende de simulatie geen zeespiegelstijging op.

3 RESULTATEN FORECAST: ZANDWINSCEANARIO'S

3.1 Inleiding

In de Westerschelde (zie Figuur 1.1) wordt zand gewonnen. De omvang daarvan is ongeveer 2 miljoen m³ per jaar geweest de afgelopen decennia. De laatste jaren is dit ongeveer 1,6 Mm³ geweest en met dit zandwinvolume is ook gerekend in de berekeningen. De zandwinning vindt momenteel verspreid over het estuarium plaats, met het zwaartepunt in het oostelijke deel. Daarnaast wordt op commerciële basis zand gewonnen in de Zeeschelde gewonnen (gemiddeld 1.5 miljoen m³/jaar) en vinden er extra onttrekkingen plaats in Vlaanderen voor ophogingen van terreinen (met na 1990 een omvang van 0,5 tot 1 miljoen m³/jaar). De som van beiden is voor de periode na 1990 gemiddeld 2 miljoen m³/jaar (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013c).

Er zijn vragen bij de Nederlandse en Vlaamse beheerders van het estuarium over voortzetting van de zandwinning. Voor de Westerschelde geldt de beleidsregel ontgrondingen, die monofunctionele zandwinning uitsluit op basis van het beleid dat is gericht op behoud van de zandvoorraden van het kustfundament. Naast deze beleidsregel speelt voor besluiten aangaande zandwinning de langjarige ontwikkeling van het estuarium. Zowel verdrinking (als er te weinig sediment beschikbaar is) als 'verlanding' en het te ondiep worden van nevengeulen wil men op lange termijn voorkomen. Voor de Zeeschelde is het openhouden van stortplaatsen vanuit het vaarwegbeheer een belangrijk aspect. Dit is allemaal beschreven in de probleemanalyse zandwinning (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013c).

Voor de beheervragen is de zeespiegelstijging een belangrijke factor. Een stijging van 60 cm/eeuw zou in de gehele Westerschelde een vergroting van het watervolume van ongeveer (300km² x 0.6m / 100jaar =) 1,8 Mm³ per jaar tot gevolg hebben als het 'bakmodel' van het kustfundament en de Waddenzee wordt toegepast. Zo beschouwd is het effect van zeespiegelstijging van dezelfde orde grootte als de zandwinning in de Westerschelde van de afgelopen jaren. Overigens is te beredeneren dat een relatief lang estuarium anders reageert op zeespiegelstijging dan Waddenzee of kustfundament (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013d). Dit motiveert waarom in het kader van het LTV V&T project wordt gekeken naar de effecten van zandwinning in de Westerschelde op morfologie en getij en dat dit in samenhang met de scenario's voor zeespiegelstijging moet gebeuren.

3.2 Probleemstelling

Over het effect van zandwinning zijn belangrijke vragen nog niet beantwoord. Enerzijds is er onzekerheid over nut, noodzaak en urgentie van sedimentbehoud, want het behoud van zandvoorraden lijkt vooral relevant voor het westelijke deel. Anderzijds speelt het voorkomen van veelal lokale zandoverschotten (verlanding, bedreiging nevengeulen, het kwijt kunnen van baggerspecie), vooral in het oostelijk deel van Westerschelde en de Zeeschelde.

De extra kennis die nodig is m.b.t. het systeemgedrag betreft de volgende vragen (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013c):

- In welke mate is meer zand of juist meer ruimte 'gewenst' in oostelijk deel, oftewel hoe reageert dit deel op de lange termijn op verschillende sedimentstrategieën?
- Wat is de invloed van de sedimentstrategie in het westelijk deel op zandhuishouding en kustveiligheid van monding en aangrenzende Noordzeekust, op de lange termijn?
- Wat is de gevoeligheid van de vorige twee punten voor zeespiegelstijging op lange termijn?
- Hoe beïnvloedt zandwinning in het oostelijk deel de zandbalans van het westelijk deel, op langere tijdschalen? Hierin besloten ligt de vraag welke rol de ontwikkeling van macrocel 4 (Middelgat – Gat van Ossensisse) speelt in de samenhang tussen de zandhuishouding van het oosten met het westen.

3.3 Scenario definitie

Met de invoer en aannames zoals beschreven in het voorgaande hoofdstuk zijn scenario's uitgevoerd voor een morfologische periode van 100 jaar met betrekking tot zandwinning. De overige instellingen zijn gelijk aan Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013a). De modeluitkomsten met betrekking tot morfologische ontwikkelingen, baggervolumes, getijdoordringing, import en export van sediment en areaalontwikkeling in de Westerschelde worden in de hierna volgende paragrafen besproken. Ook wordt aandacht besteed aan de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten en hoe deze te interpreteren.

De scenario's die worden besproken zijn:

- Run 1: T0 scenario met zandwinning in de Westerschelde, geen zeespiegelstijging.
- Run 2: T1 scenario zonder zandwinning in de Westerschelde, geen zeespiegelstijging.
- Run 3: T0 scenario met zandwinning in de Westerschelde en zeespiegelstijging (60 cm/eeuw).
- Run 4: T1 scenario zonder zandwinning in de Westerschelde en zeespiegelstijging (60 cm/eeuw).

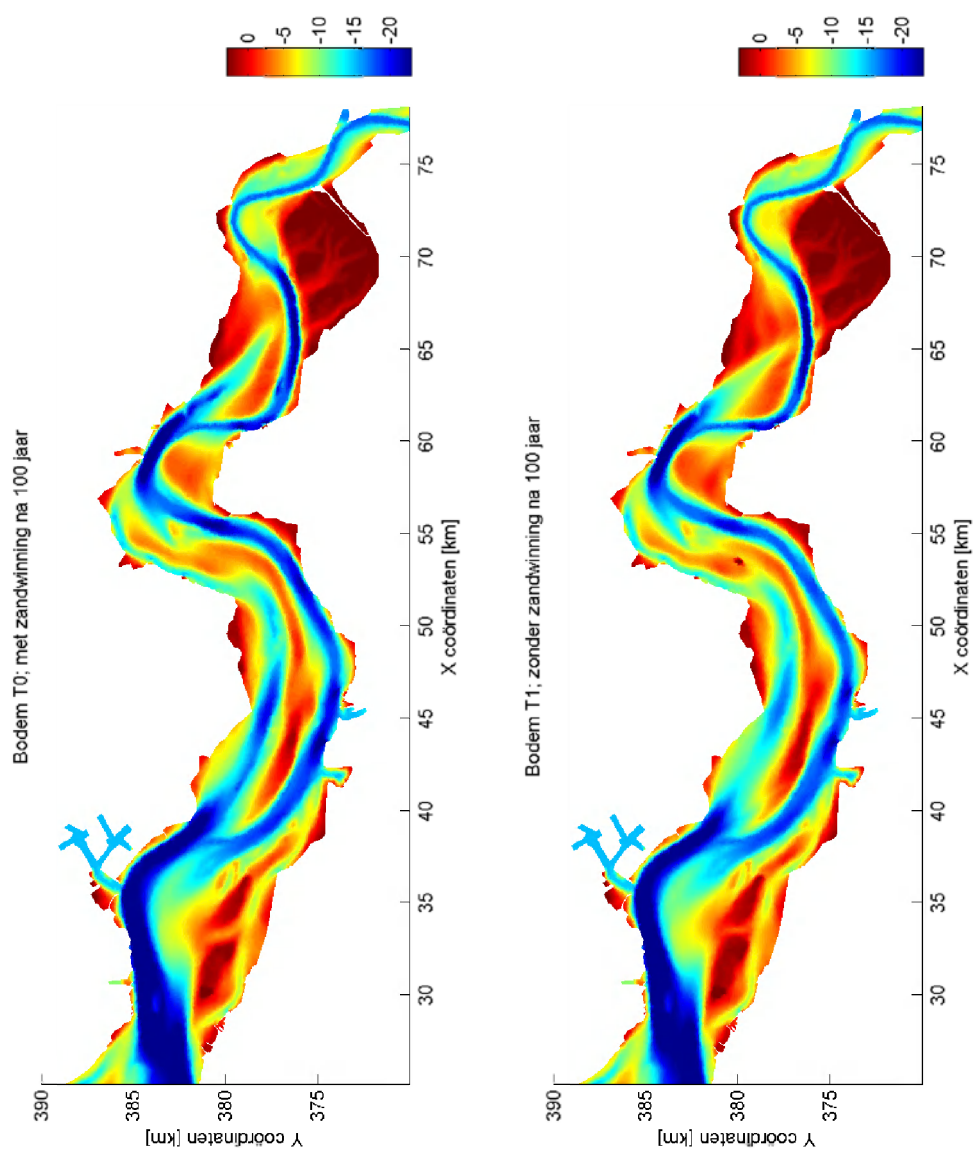
3.4 Morfologische ontwikkelingen

Deze paragraaf beschrijft de eindresultaten van 100 jaar simuleren met startjaar 2011.

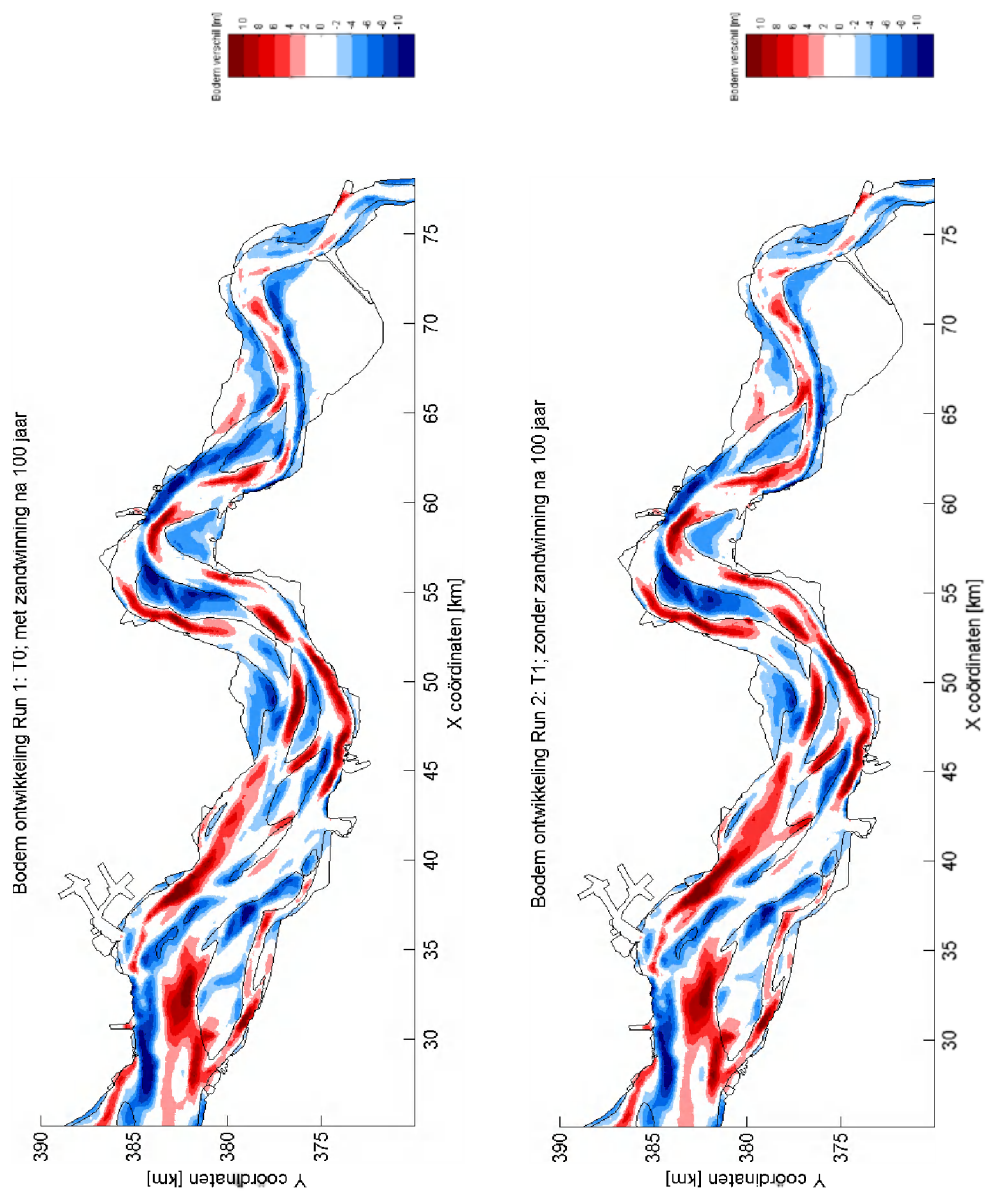
De berekende eindbodems van Runs 1 en 2 zijn getoond in Figuur 3.1. Ten opzichte van de startbodem (Figuur 2.1) vallen veel ontwikkelingen op, waaronder de verdere sedimentatie van het Middelgat, de aaneenschakeling van de Middelplaat met de Rug van Baarland en de doorbraak van de Hooge Platen (zie Figuur 1.1 voor naamgevingen). Hier ligt de focus vooral op de verschillen tussen de runs om inzicht te krijgen in het effect van zandwinning (Run 1 is *met* zandwinning; Run 2 is *zonder* zandwinning).

Op het eerste gezicht verschillen de eindbodems van Figuur 3.1 niet veel. Er is wel een duidelijk verschil bij zandwinlocaties. De nevengeulen Everingen en Schaar van Waarde zijn bijvoorbeeld duidelijk dieper wanneer er 100 jaar lang zandwinning plaatsvindt (Run 1 versus run 2).

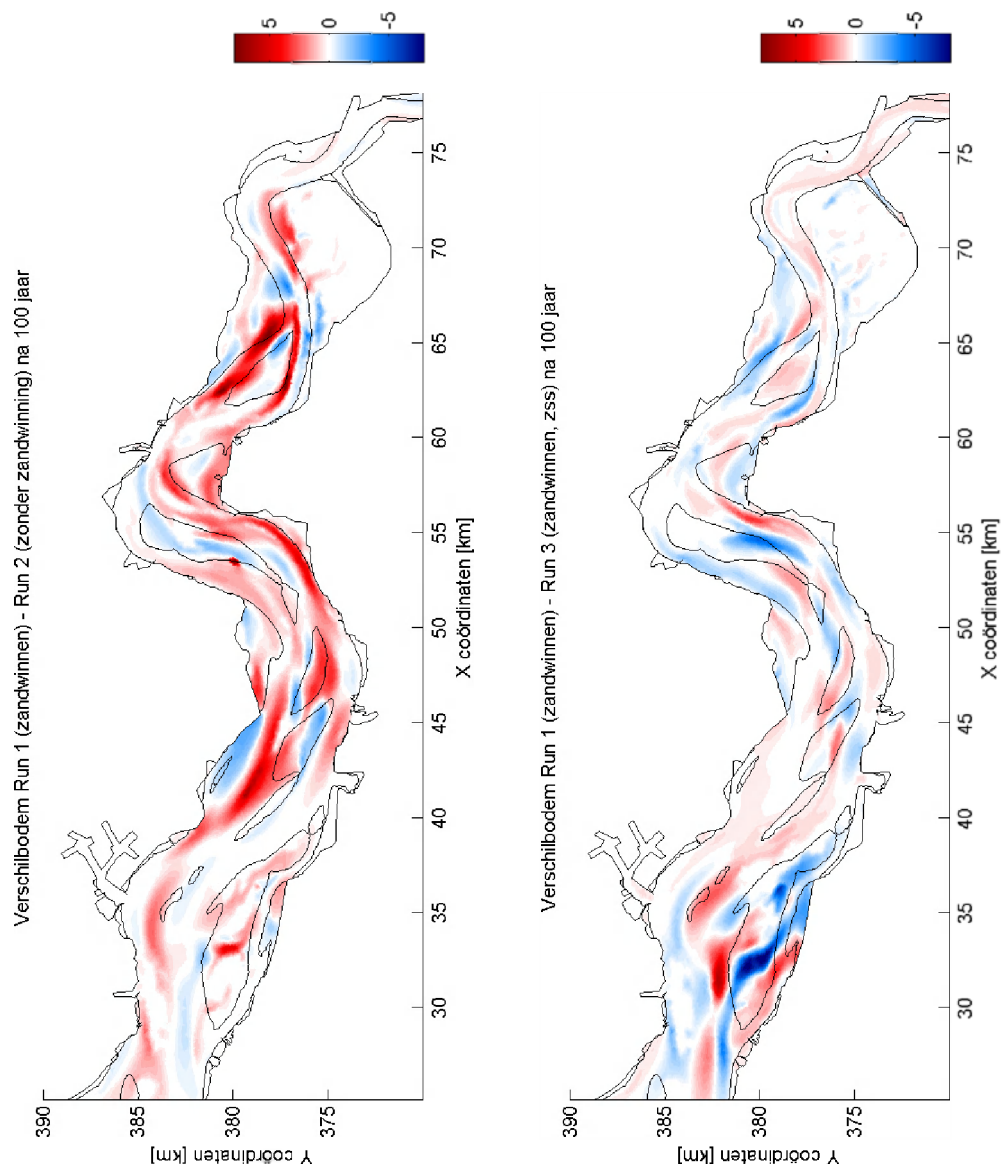
De berekende bodemveranderingen van beide runs ten opzichte van de startbodem zijn te zien in Figuur 3.2. Het verschil tussen Run 1 en Run 2 is te zien in de linker figuur van Figuur 3.3. Die figuur verduidelijkt het morfologisch effect van zandwinning. Het model berekent dat zandwinning een direct morfologisch effect heeft bij de zandwinlocaties van enkele meters over honderd jaar. De zandwinning heeft (zie volgende paragraaf) ook effect op de baggervolumes. Het stoppen met zand winnen betekent meer baggeren op de drempels. Dit is vooral terug te zien bij het grootste stortgebied SH41 in het Gat van Ossensisse (zie Figuur 2.4), waar 35% van het totale baggervolume gestort wordt. Rond de zandwin- en stortgebieden is sprake van een uitsmerend effect van enkele meters in de eb- en vloedstroomrichtingen. Het linkerdeel van Figuur 3.3 is grotendeels rood, dat betekent dat hier het volume zit dat gewonnen is ($1.61 \times 100 = 161 \text{ Mm}^3$). In vergelijking met de morfologische veranderingen (Figuur 3.2) zijn de effecten van zandwinning klein, maar niet verwaarloosbaar. Er zijn ook gebieden die zonder zandwinning lager komen te liggen. Dit kan grotendeels verklaard worden door een (kleine) verschuiving van de geuligging als gevolg van menselijk ingrijpen (zandwinning of storten) elders in de omgeving.



Figuur 3.1: Berekende eindbodembodem scenario's Run 1 (met zandwinning) en Run 2 (zonder zandwinning); diepte in m NAP



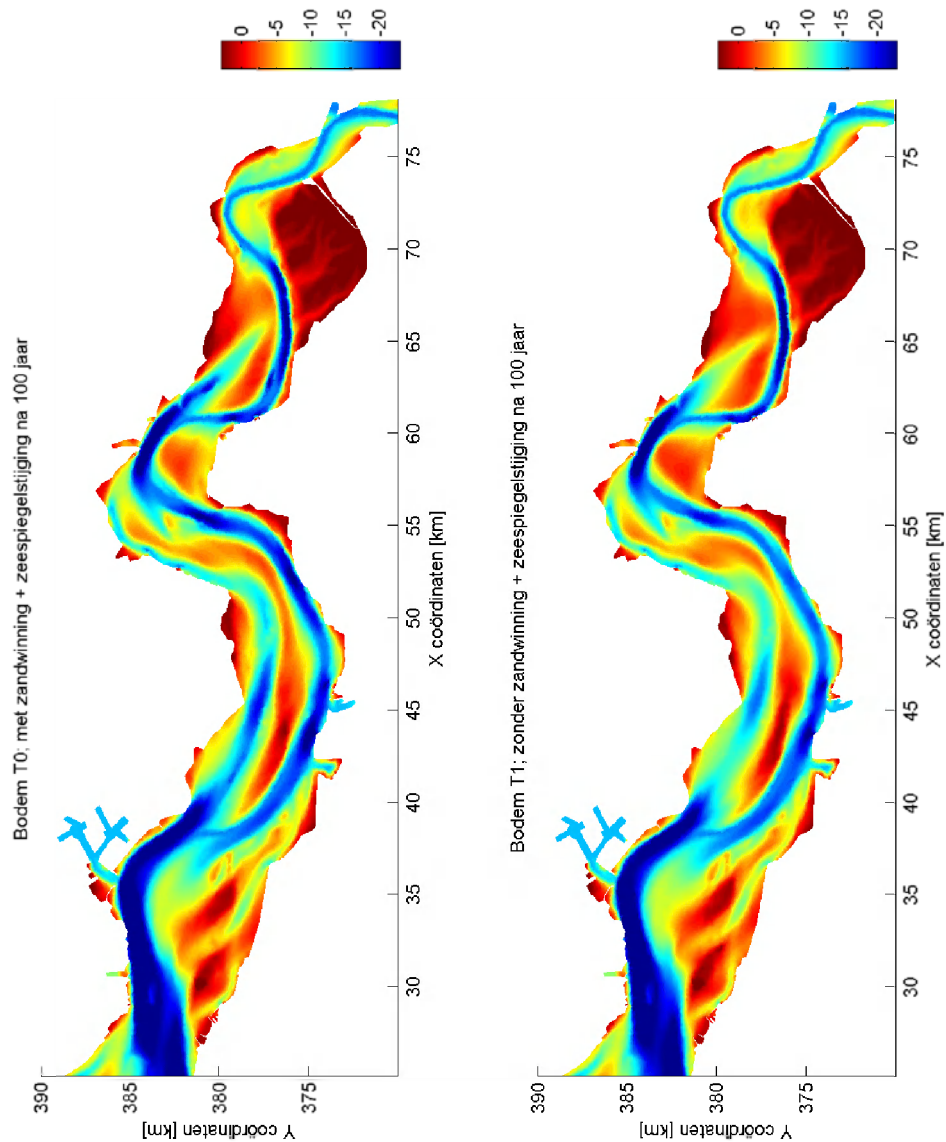
Figuur 3.2: Berekende bodemontwikkeling Run 1 (met zandwinning) en Run 2 (zonder zandwinning)



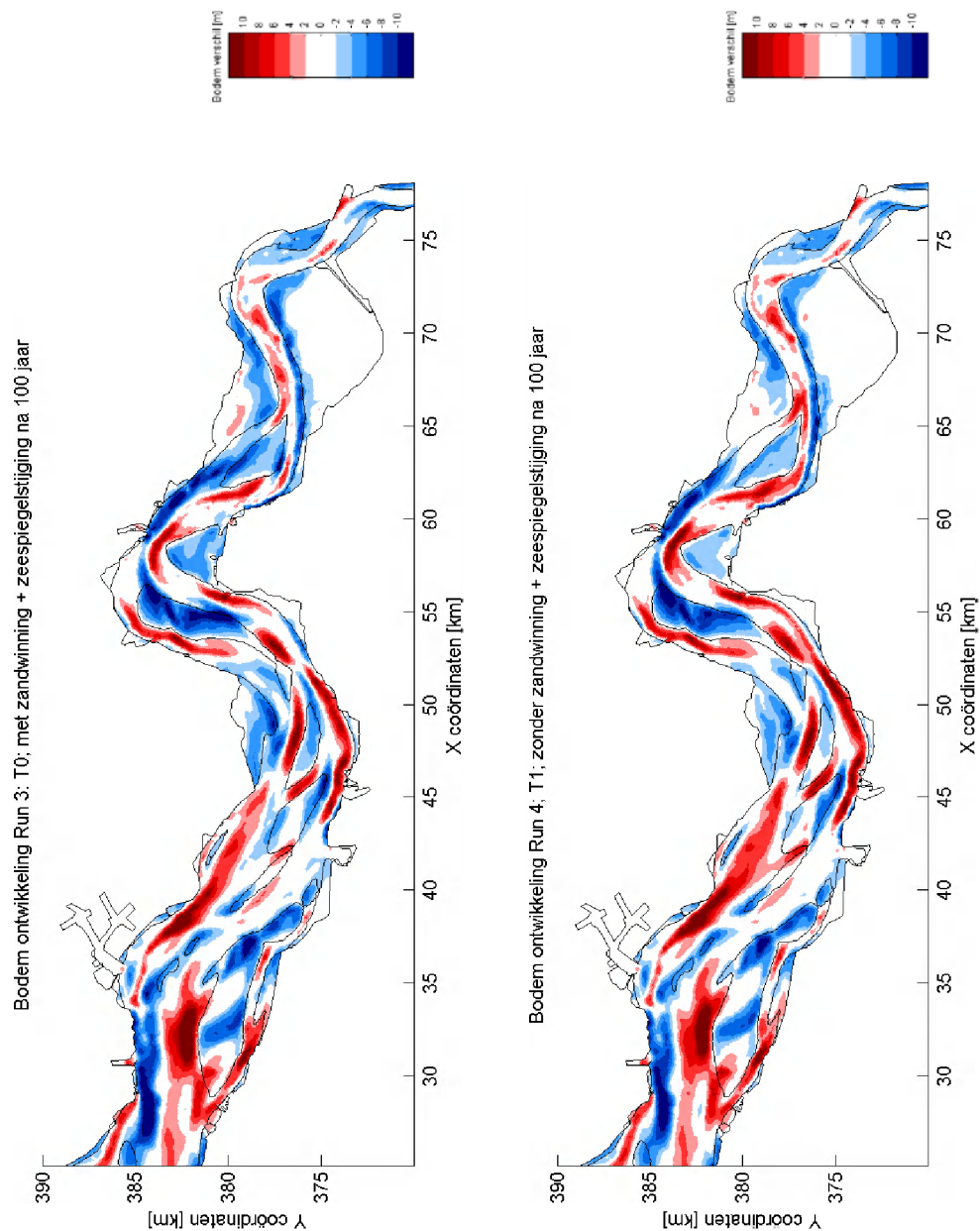
Figuur 3.3: Bodemverschil na 100 jaar tussen Run 1 en Run 2 (links) en Run 1 en Run 3 (rechts); LINKS: positief verschil betekent dat geen zandwinning een hogere bodemligging geeft; RECHTS: positief verschil betekent dat zeespiegelstijging een hogere bodemligging geeft.

In Run 3 en Run 4 is de exercitie van Run 1 en 2 herhaald, maar nu met een zeespiegelstijging van 60cm/eeuw. De berekende eindbodems van Run 3 (met zandwinning) en 4 (zonder zandwinning) zijn te zien in Figuur 3.4. Ten opzichte van Figuur 3.1 zijn dezelfde verschillen als gevolg van zand winnen te zien: een verschil in bodemligging in de nevengeulen de Everingen en de Schaar van Waarde. De bodemverandering ten opzichte van de startbodem is getoond in Figuur 3.5. Het rechter figuur van Figuur 3.3 toont het bodemverschil tussen Run 1 en Run 3, oftewel het morfologisch effect van zeespiegelstijging. De verschillen zijn klein in vergelijking met het effect van zand winnen (linker figuur van Figuur 3.3) en zeker ten opzichte van de bodemverandering. Het effect is vooral zichtbaar rond de Hooge Platen. In alle scenario's wordt berekend dat de Hooge Platen zullen doorbreken. Wat hiervan de oorzaak is is niet geheel duidelijk. Blijkbaar is het verhang over de Hooge Platen in de toekomstige situatie dusdanig verhoogd dat dit voldoende is om een kortsluitgeul te genereren. Bij zeespiegelstijging vindt deze doorbraak eerder plaats en zijn de ontwikkelingen verder dan de runs

zonder zeespiegelstijging. Of een dergelijke doorbraak daadwerkelijk optreedt is zeer onzeker. Dit moet meegenomen worden bij interpretatie van deze uitkomsten.

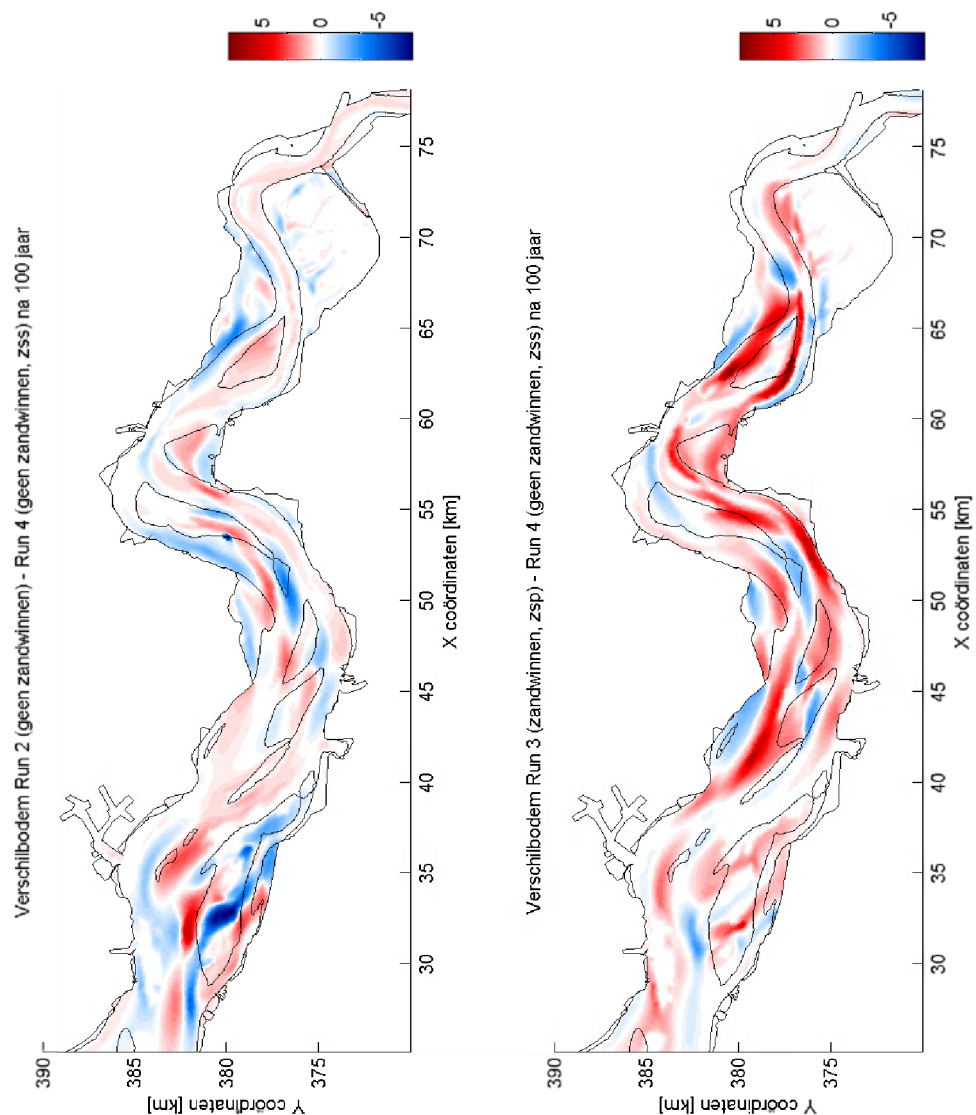


Figuur 3.4: Berekende eindbodem Run 3 (met zandwinning + zeespiegelstijging) en Run 4 (zonder zandwinning + zeespiegelstijging); diepte in m NAP



Figuur 3.5: bodemontwikkeling Run 3 (met zandwinning + zeespiegelstijging) en Run 4 (zonder zandwinning + zeespiegelstijging)

In Figuur 3.6 zijn de verschillen tussen Runs 2 en 4 (links) en Runs 3 en 4 (rechts) getoond. Deze verschillen tonen opnieuw het morfologisch effect van zeespiegelstijging en zand winnen, maar nu met andere runs. De verschillen zijn grotendeels gelijk aan Figuur 3.3 en zijn als controle toegevoegd.



Figuur 3.6: Bodemverschil na 100 jaar tussen Run 2 en Run 4 (links) en Run 3 en Run 4 (recht)s; LINKS: positief verschil betekent dat zeespiegelstijging een hogere bodemligging geeft; RECHTS: positief verschil betekent dat geen zandwinning een hogere bodemligging geeft.

3.5 Berekende baggervolumes

Het FINEL2d model houdt de vaargeul op de gewenste diepte met behulp van een bagger- en stortroutine. Het model rekent zelf de baggervolumes uit en stort volgens een procentuele verdeling het gebaggerde materiaal in stortgebieden. In paragraaf 2.3.1 is ingegaan op de invoer van deze simulaties.

Figuur 3.7 laat de berekende baggervolumes per jaar zien voor de 4 scenario's. In rood zijn de verschillen tussen Run 1 en Run 2 (doorgetrokken rode lijn) en Run 3 en Run 4 (gestreepte rode lijn) te zien. De zwarte dikke lijn geeft de hoeveelheid zandwinning per jaar aan (1.61 Mm^3).

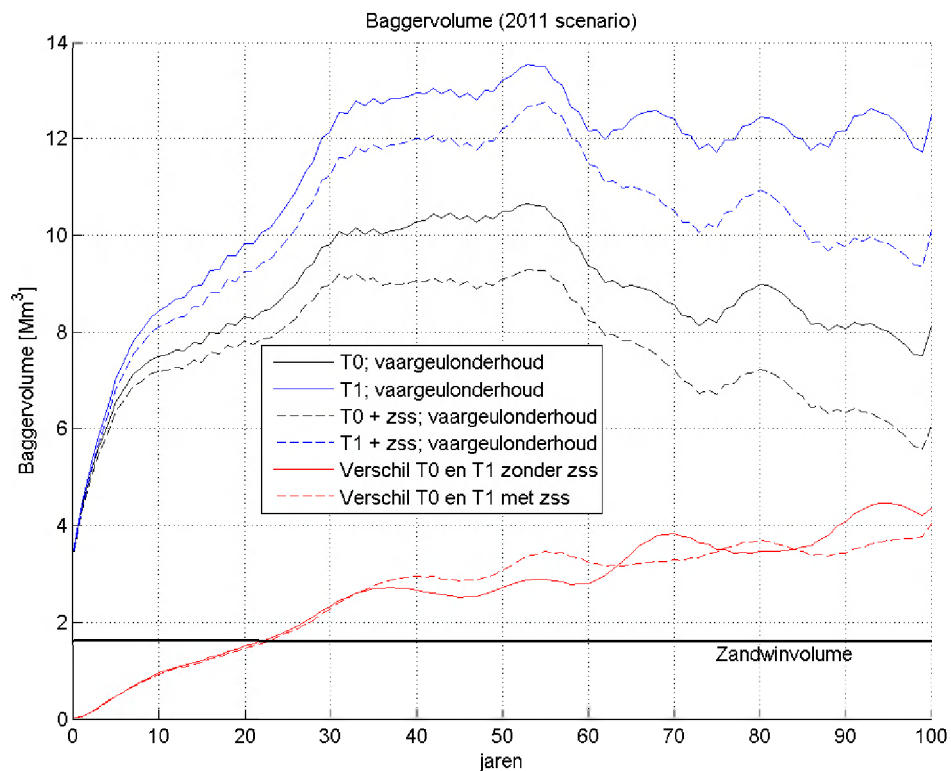
Uit de figuur kunnen een aantal conclusies getrokken worden.

Ten eerste valt op dat zandwinning zorgt voor een vermindering van het totale baggervolume, dat steeds groter wordt naarmate de tijd vordert. Na ongeveer 25 jaar is het jaarlijks verschil tussen T0

(wel zandwinning) en T1 (geen zandwinning) groter dan het zandwinvolume zelf (1.61 Mm^3). Blijkbaar zorgt zandwinning voor een dusdanige cumulatieve onttrekking van sediment dat er minder sediment in beweging en op de drempels terecht komt. Dit verschil blijft oplopen naarmate de simulatie vordert. Door de voortdurende zandwinning wordt er minder sediment 'rondgepompt'. Dit zal later blijken uit de sedimentstromen tussen het westelijk, midden en oostelijk deel van de Westerschelde, zie paragraaf 3.7. Het is niet alleen een deel van het gewonnen zand van een jaar dat niet meer gebaggerd hoeft te worden, maar ook zand dat voorafgaande jaren was gewonnen (want dat is ook niet meer in beweging). Na 100 jaar is het jaarlijks verschil opgelopen tot 4 Mm^3 per jaar.

Ten tweede zorgt zeespiegelstijging er voor dat de baggervolumes afnemen. In het model is ingevoerd dat de te onderhouden drempelhoogte meestijgt met de zeespiegelstijging (60 cm na 100 jaar).

Ten derde zijn de baggervolumes niet constant over de tijd. Het model lijkt eerst een aantal jaren nodig te hebben om een soort evenwicht te bereiken (± 10 jaar). Daarna nemen de baggervolumes verder toe (30 jaar), om vervolgens te stabiliseren (tot 55 jaar) en vervolgens weer af te nemen. Waarschijnlijk is de oorzaak van de toe- en afname van het volume de migratie van ondiepe gebieden, waarbij het volume toeneemt als deze gebieden in de vaargeul terecht komen en waarbij de vaargeul niet meebeweegt met morfologische veranderingen. Overigens zijn de belangrijkste uitkomsten voor het doel van deze studie de verschillen tussen de runs en niet zozeer de absolute getallen.

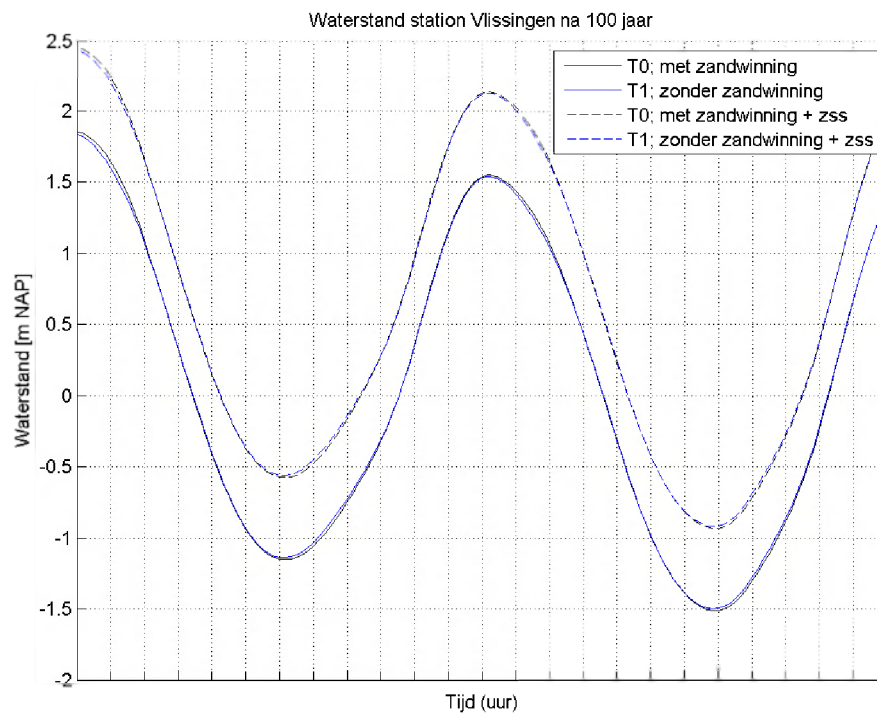


Figuur 3.7: Berekende totale baggervolume per jaar (T0: met zandwinning; T1: zonder zandwinning)

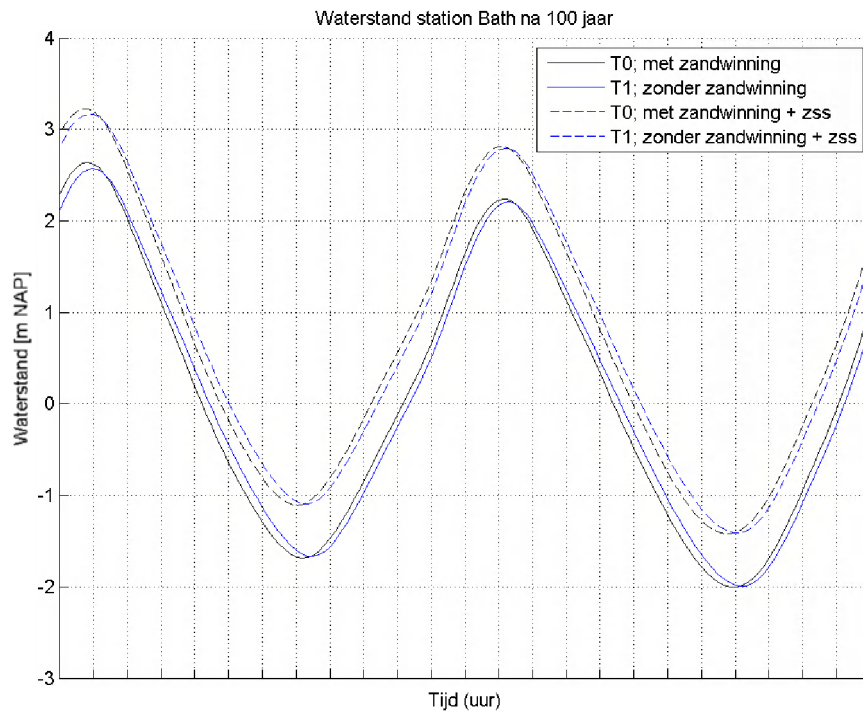
3.6 Getijdoordringing

De morfologie van het estuarium bepaalt de getijdoordringing. In deze paragraaf wordt gekeken hoe de waterstanden bij de stations Vlissingen, Bath en Antwerpen veranderen als gevolg van zandwinning en zeespiegelstijging. Het laatste getij dat het model uitrekent na 100 jaar is te zien in Figuur 3.8, Figuur 3.9 en Figuur 3.10, voor deze stations.

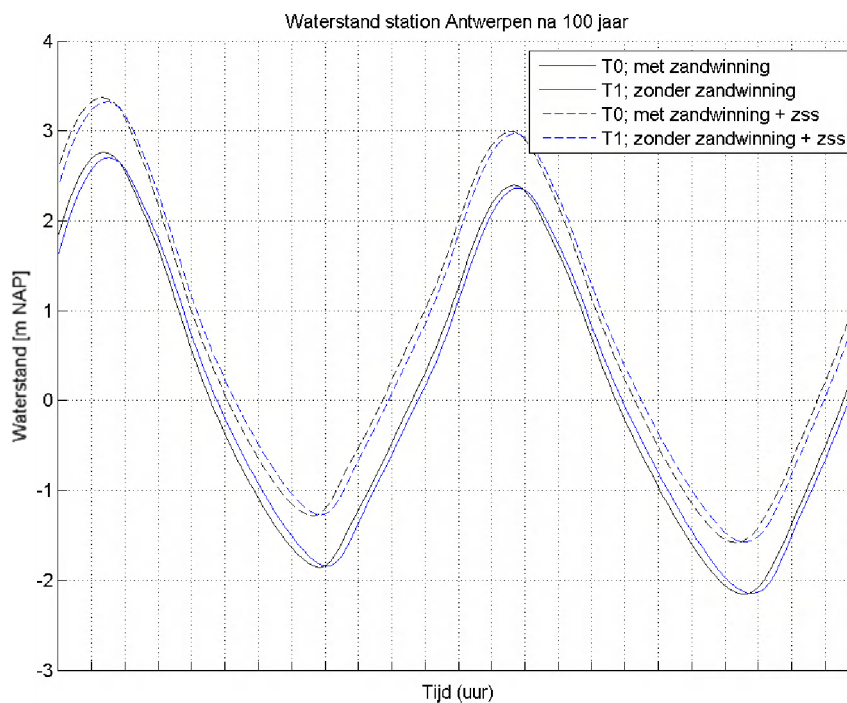
Bij station Vlissingen is een klein verschil merkbaar als gevolg van zandwinning (Figuur 3.8). Dit verschil wordt groter bij Bath (Figuur 3.9) en Antwerpen (Figuur 3.10). Door zandwinning vindt er een versnelling plaats van het getij en een opslingering van het getij. De versnelling is ongeveer 10 minuten bij Antwerpen. De opslingering van het getij bedraagt enkele centimeters.



Figuur 3.8: Waterstand bij Vlissingen na 100 jaar

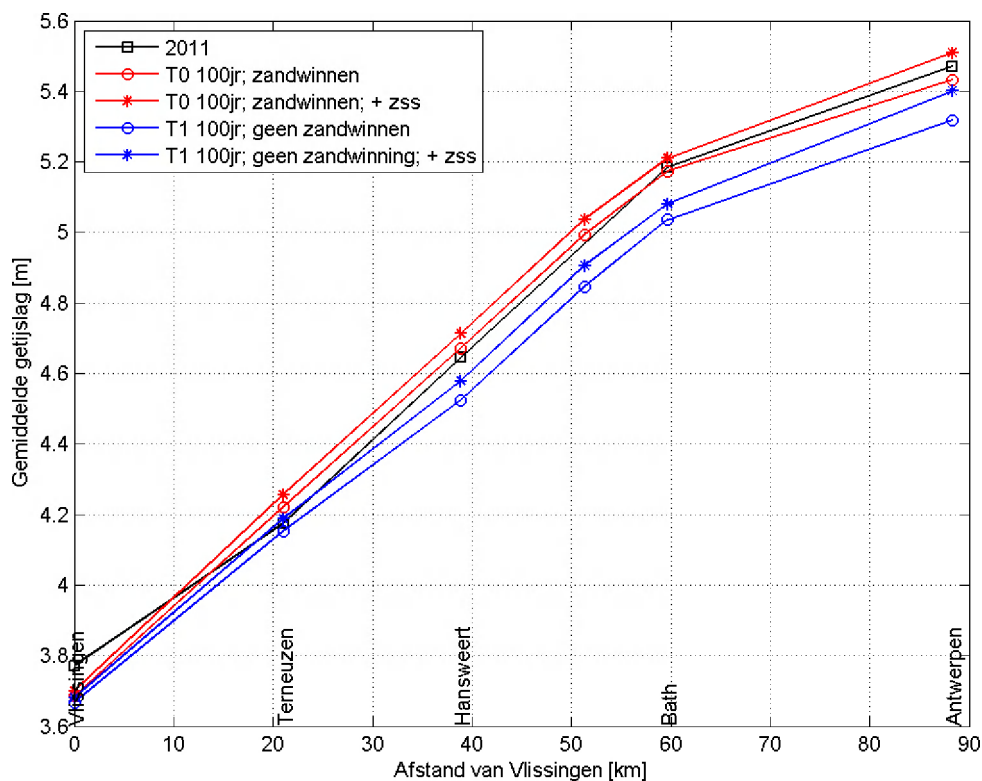


Figuur 3.9: Waterstand bij Bath na 100 jaar

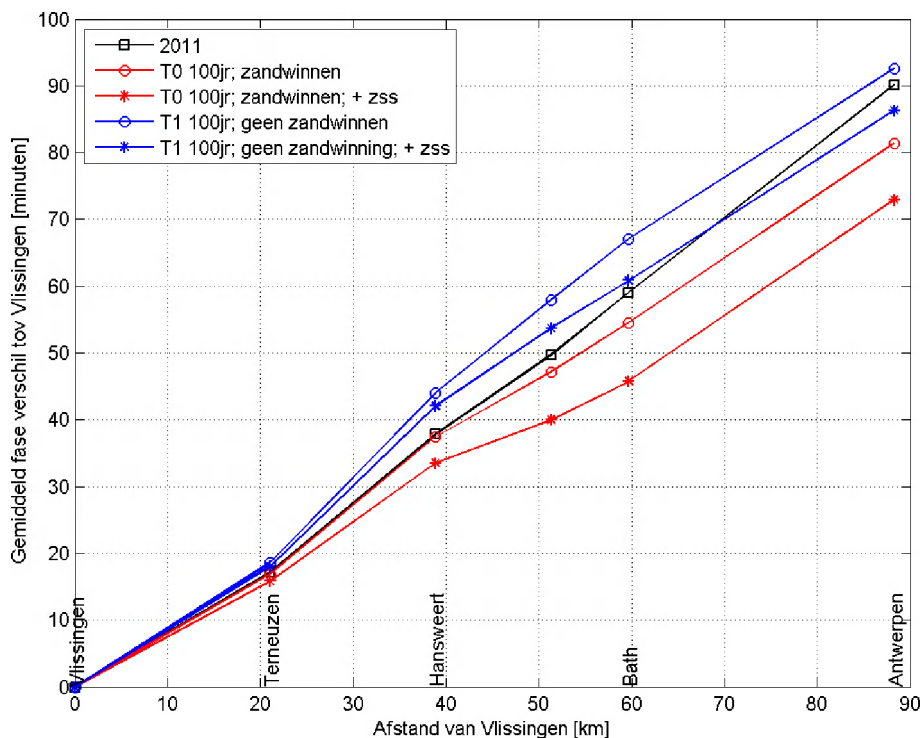


Figuur 3.10: Waterstand bij Antwerpen na 100 jaar

De waterstanden zijn verder geanalyseerd op de getijslag (Figuur 3.11) en de fase (Figuur 3.12). In deze figuren zijn de getijslag en de fase uitgezet langs de as van de Westerschelde. Uit de figuren komt een consistent beeld naar voren: zandwinning zorgt voor een relatief diepere bodemligging, wat een afname van de bodemwrijving veroorzaakt, met als gevolg een betere getijdopdringing: een verhoging van de getijslag en een versnelling van de getijdegolf. Zeespiegelstijging heeft eenzelfde effect, immers de getijgolf voelt minder wrijving doordat de waterstand toegenomen is, hetgeen ook een verhoging van de getijslag en een versnelling van de getijdegolf veroorzaakt. Bij Vlissingen is de relatieve toename van de getijslag na 100 jaar ongeveer 1,5 cm als gevolg van zand winnen en 1cm voor zeespiegelstijging. In absolute zin neemt de getijslag in Vlissingen bij alle scenario's licht af ten opzichte van de 2011 situatie. Bij Bath is de relatieve toename van de getijslag ongeveer 14 cm als gevolg van zand winnen en 4 cm voor zeespiegelstijging. Hier is duidelijk te zien dat er een versnelling van de getijgolf optreedt als gevolg van zandwinnen en zeespiegelstijging (Figuur 3.12). Zandwinnen over 100 jaar geeft volgens het model een versnelling van het getij van 13 minuten op. Zeespiegelstijging geeft een versnelling van 6 minuten. Zeespiegelstijging en zandwinnen gecombineerd levert een nog verdere versnelling op. Bij Antwerpen is het effect op de getijslag 11cm als gevolg van zandwinnen en 8 cm als gevolg van zeespiegelstijging. De faseverschillen die bij Bath geconstateerd waren blijven in stand. Het effect van zandwinning neemt dus eerst toe van Vlissingen richting Bath om vervolgens af te nemen richting Antwerpen. Alhoewel er ter hoogte van Vlissingen niet meer zand gewonnen wordt is het effect van zand winnen nog wel merkbaar op de waterstand. Tussen Bath en Antwerpen wordt in alle runs zand gewonnen uit het vaargeulonderhoud en is er geen verschil tussen de runs. Het effect van zeespiegelstijging neemt toe verder stroomopwaarts in het estuarium.



Figuur 3.11: Initiële getijslag (2011) en getijslag van de diverse scenario's na 100 jaar

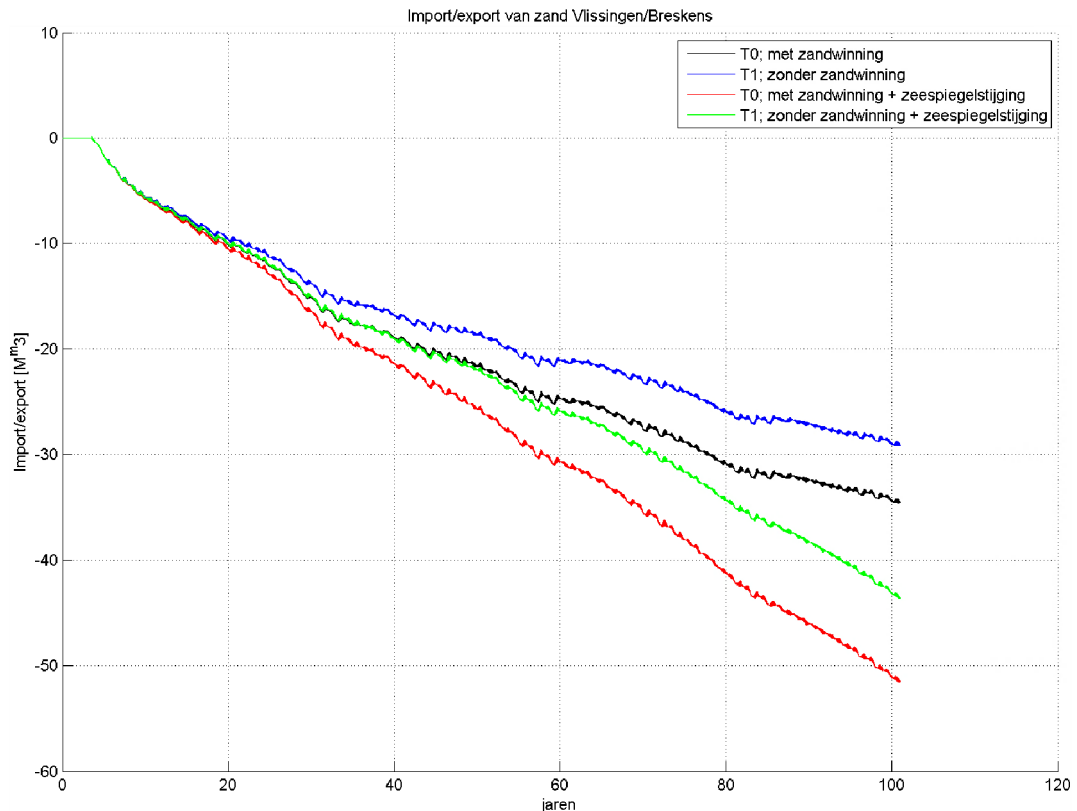


Figuur 3.12: Initieel faseverschil tov Vlissingen (2011) en faseverschil van de diverse scenario's na 100 jaar

3.7 Import/export van sediment en volumeveranderingen

Een belangrijke reden om zandwinning af te bouwen is dat de Westerschelde zanddelend is met het kustfundament. Ook op de Zeeuwse kust wordt gesuppleerd om tegelijkertijd lokaal kusterosie tegen te gaan en het kustfundament mee te laten groeien met de zeespiegel. In dat licht lijkt het op het eerste gezicht niet effectief elders, in een zanddelend systeem, zand te onttrekken. In Figuur 3.13 is de berekende export over de raai Vlissingen-Breskens getoond. Het model rekent in alle gevallen een export van sediment uit. Uit de meest recente sedimentbalansstudie volgt inderdaad dat het waarschijnlijk is dat er in werkelijkheid een export van zand plaatsvindt (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013e en 2013f). De export als gevolg van zand winnen neemt volgens het model toe met ongeveer 5 Mm^3 , cumulatief over 100 jaar (blauwe lijn versus zwarte lijn). Deze hoeveelheid is klein in vergelijking met het totale gewonnen volume van 161 Mm^3 zand. Het is contra-intuïtief dat door zand winnen nog meer zand het systeem verlaat, maar andere modelstudies hebben een dergelijk verband ook aangetoond door zeespiegelstijging (zie volgende paragraaf) en verdiepen van de vaargeul in de Westerschelde (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013g), hetgeen een vergelijkbare 'verruimende' situatie is. Dus aan de conclusie dat zandwinnen leidt tot meer zandexport mag enige waarheid toegedicht worden, alhoewel de kleine omvang van het berekende verschil er voor pleit om hier geen verdere aandacht aan te geven.

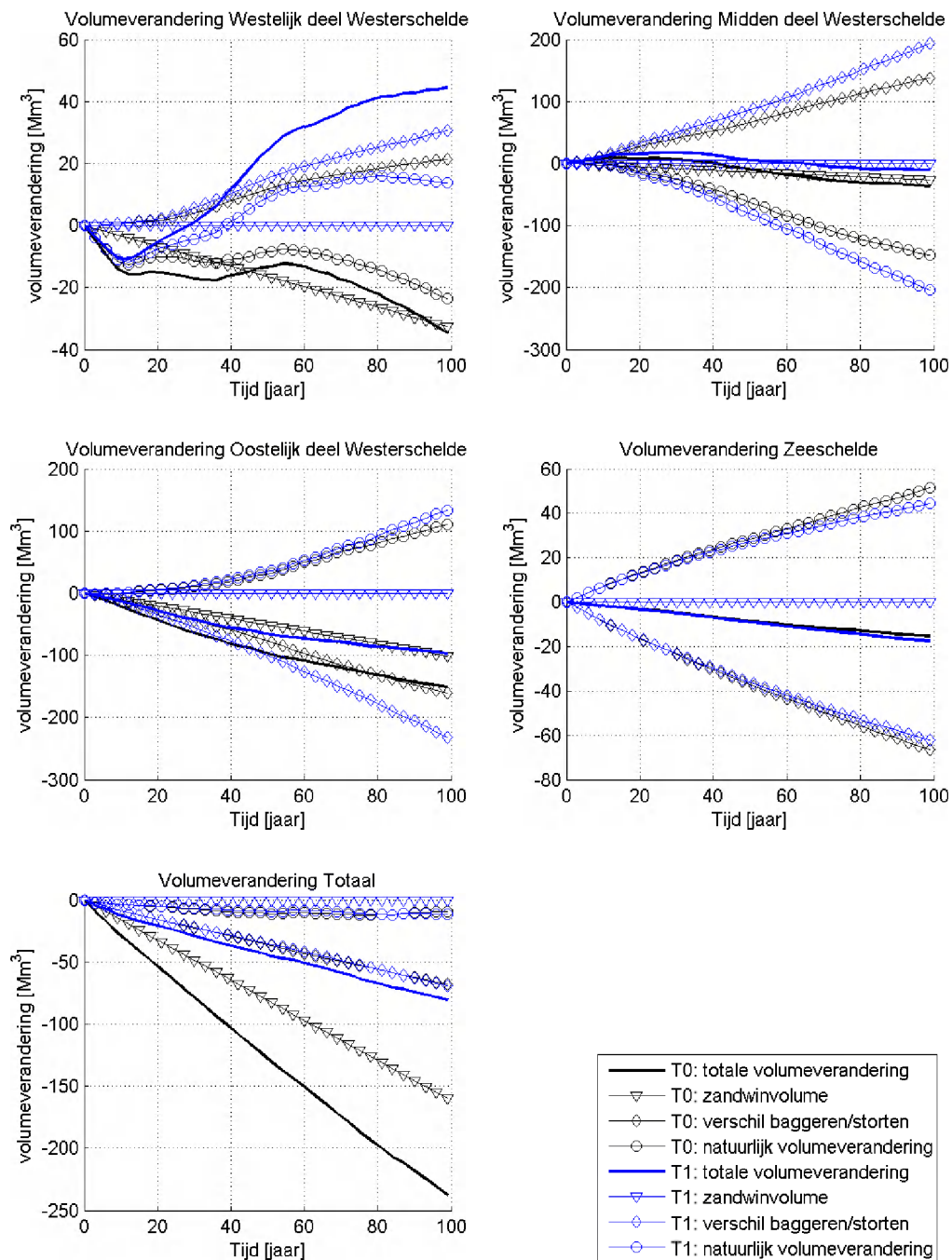
Opvallend is verder dat door zeespiegelstijging de export toeneemt met ongeveer 15 Mm^3 cumulatief na 100 jaar. In Jeuken et al., (2002) is dit effect ook gevonden met het ESTMORF model. De verklaring hiervoor is dat bij zeespiegelstijging het aangrenzende systeem (de monding) ook moet meegroeien en dat de veel grotere oppervlakte daarvan er toe leidt dat er netto sediment uit het estuarium richting de mond gaat. Overigens is aanvulling van de zandvoorraden van de monding door bijvoorbeeld kustsuppleties geen deel van de simulatie.



Figuur 3.13: Import/export van sediment over de raai Vlissingen/Breskens

In Figuur 3.14 zijn de cumulatieve volumeveranderingen getoond voor het westelijk deel van de Westerschelde (Vlissingen tot Ellewoutsdijk (x-coördinaat: 52540), het middendeel (Ellewoutsdijk tot Hansweert), het oostelijk deel van de Westerschelde (Hansweert tot de Nederlands/Belgische grens), de Zeeschelde en het totaal van deze drie gebieden. De reden om de knip tussen West en Midden op x-coördinaat 52540 (ongeveer ter hoogte van Ellewoutsdijk) te leggen is omdat in het verleden de bodemopnames afwisselend jaarlijks oostelijk en westelijk van dit punt plaatsvonden. Dit komt overeen met de indeling zoals gevolgd in de sedimentbalansstudie (Consortium Deltares, IMDC, Svasek, Arcadis, 2013e). Verder is het relatief kleine middengebied gedefinieerd omdat zo de sedimentstromen rond het grote stortvak in het Gat van Ossensisse inzichtelijk gemaakt kunnen worden. In 2011 is hier ongeveer $3 Mm^3$ zand gestort.

Onderscheid is gemaakt tussen de werkelijke volumeverandering, het zandwinvolume en het verschilvolume tussen het baggervolume en het stortvolume. Deze drie volumeverandering samen geven de natuurlijke volumeverandering die ook in de figuur gegeven is. In de figuur zijn de eerste twee scenario's getoond: T0 met zandwinning en T1 zonder zandwinning.



Figuur 3.14: Cumulatieve volumeveranderingen west, midden, oost, Zeeschelde en totaal; negatief = erosie van zand; T0: met zandwinnen; T1: zonder zandwinnen.

Uit Figuur 3.14 volgt dat het westelijk en midden gebied gekenmerkt wordt door een groter stortvolume dan baggervolume. Het oostelijk deel heeft dit juist andersom: er wordt meer gebaggerd dan gestort. De verklaring is dat de procentuele verdeling van het baggerwerk over de stortgebieden er voor zorgt dat er materiaal van oost naar vooral het middengebied gebracht wordt (het grote stortvak in het Gat van Ossensisse). In principe is het idee van flexibel storten dat het sediment in dezelfde macrocel teruggestort wordt, maar mocht er geen ruimte zijn dan wordt het sediment naar een andere stroomafwaarts gelegen locatie gebracht. De opgelegde procentuele stortverdeling van 2011 zorgt er dus voor dat er ruim 150 Mm^3 voor het T0 scenario en 230 Mm^3

voor het T1 scenario van oost naar het middengebied en westen gebracht wordt over 100 jaar. De verschillen in baggervolumes tussen de T0 en de T1 berekening komen ook hier weer terug.

In het T0 scenario wordt zowel in het oostelijke, midden, als het westelijke deel zand gewonnen. Bij het T1 scenario uiteraard niet.

De totale volumeverandering in het oostelijk deel (Figuur 3.14) is negatief voor beide scenario's, maar voor het T0 scenario is dit groter dan voor het T1 scenario vanwege de zandwinning. Verder blijkt dat als gecompenseerd wordt voor de menselijke ingrepen de natuurlijke volumeverandering positief is voor beide scenario's. Er wordt sediment ten oosten van Hansweert gebracht door de getijstrooming, zoals ook al eerder geconstateerd. Waarschijnlijk is dit voor een belangrijk deel bepaald door het storten, zie ook het volgende hoofdstuk waar een andere stortstrategie is doorgerekend. Gestort materiaal herverdeelt zich over het estuarium en wordt dus ook deels oostwaarts verplaatst. Deze veronderstelling wordt ondersteund door het verschil in oostelijk transport tussen simulaties T1 en T0, die verschillende baggervolumes (en dus ook stortvolumes) kennen. Het is met het herverdelen vanuit het stortgebied in het Gat van Ossensisse dat zichtbaar is in de resultaten. Zie ook paragraaf 4.5.

Het middendeel wordt grotendeels gekenmerkt door het grote stortvak in het Gat van Ossensisse. Netto (baggeren- storten) komt er 130 Mm^3 voor het T0 scenario en 200 Mm^3 voor het T1 scenario bij over 100 jaar. Dit wordt voor het grootste gedeelte weer verspreid (natuurlijke export) richting het oosten en het westen.

De totale volumeverandering in het westelijk deel (Figuur 3.14) wordt sterk bepaald door de menselijke ingrepen. Voor het T0 scenario is de totale volumeverandering negatief na 100 jaar, maar voor het T1 scenario is dit positief. De combinatie van 'niet zandwinnen' en een hoger stortvolume zorgt ervoor dat de balans positief doorslaat en er vindt een accumulatie van zand plaats bij het T1 scenario. De natuurlijke volumeveranderingen is voor het T0 scenario negatief, maar voor het T1 scenario positief, door de grotere sedimentstroom vanuit het middendeel.

In de Zeeschelde wordt het gebaggerd materiaal in de simulatie direct verwijderd (Figuur 3.14). Dit is te zien in de negatieve verschillen voor baggeren/storten. De natuurlijke trendlijn is dat er sediment in de Zeeschelde terecht komt (dat vervolgens weer gebaggerd moet worden). In het model wordt bovenstrooms van de stad Antwerpen de bodem in het model vastgehouden. Hier wordt een evenwichtsconcentratie voor de zandfractie uitgerekend en opgelegd. Deze concentratie kan zich vervolgens verspreiden in stroomrichting en komt stroomafwaarts van Antwerpen het morfologische actieve gebied binnen. Over 100 jaar is dit ongeveer 20 Mm^3 . Dus zowel van de Nederlandse grens als van de bovenrivieren komt zand terecht in de Beneden-Zeeschelde.

De volumeveranderingen in het gehele estuarium (Figuur 3.14) laten zien dat de totale volumeveranderingen voor zowel het T0 als het T1 scenario grotendeels afhangen van de menselijke onttrekkingen. Het verschil tussen baggeren en storten staat gelijk aan het volume dat gewonnen is in de Zeeschelde. Het zandwinvolume in dit figuur is de 161 Mm^3 dat over 100 jaar gewonnen is. De natuurlijke volumeverandering ligt voor beide scenario's nagenoeg op elkaar en betreft initieel een lichte export, maar dit blijft na enkele tientallen jaren min of meer constant op ongeveer -10 Mm^3 . In vergelijking met Figuur 3.13 is dit een stuk minder (orde 30 Mm^3). Dit komt omdat er een aanvoer van zand is via de bovenrivieren in het model van ongeveer 20 Mm^3 over 100 jaar.

3.8

Areaalontwikkeling

Een andere belangrijke parameter om het effect te begrijpen van zandwinning en zeespiegelstijging is het areaal diep water, ondiep water en intergetijdengebied. Hier is de volgende definitie gehanteerd:

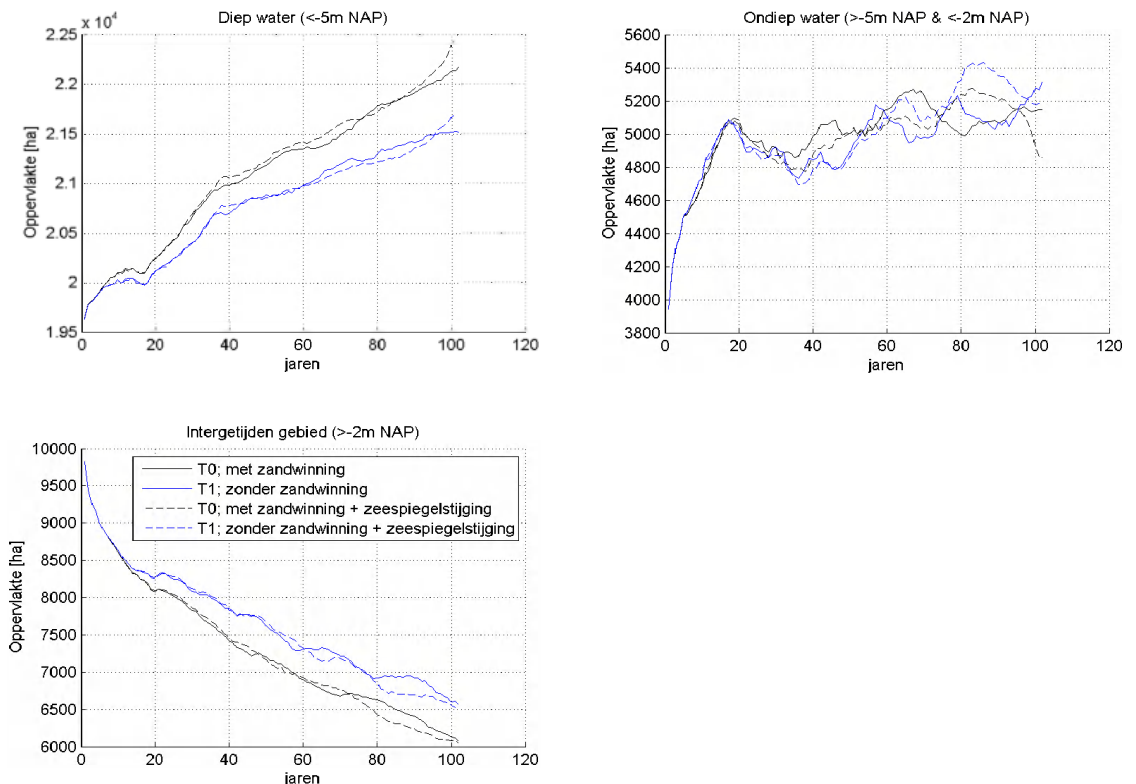
- Diep water (diepte > -5m NAP)
- Ondiep water (diepte > -2m NAP en <= -5m NAP)

- Intergetijdegebied (diepte ≤ -2 m NAP)

Deze definitie (met vaste referentie) is betwistbaar omdat het gemiddeld laag water verandert en er stijging van de zeespiegel is in runs 3 en 4. Hier gaat het echter ook vooral om het inzichtelijk maken van het relatieve effect van zand winnen en zeespiegelstijging, daarom is deze vaste definities van de hoogtes gehanteerd.

In Figuur 3.15 is het verloop van de areaal ontwikkeling te zien voor de 4 scenario's. Benadrukt wordt dat het alleen om het relatieve effect tussen de runs gaat en niet om de absolute trends. Zie ook de volgende paragraaf over de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten.

Uit Figuur 3.15 komt naar voren dat het areaal diep water relatief toeneemt als gevolg van zand winnen (500 ha over 100 jaar). De toename van het areaal diep water gaat ten koste van het intergetijdegebied. Het areaal ondiep water blijft ongeveer gelijk in alle scenario's. Het effect van zeespiegelstijging is nauwelijks zichtbaar in de areaalontwikkeling. Er zijn twee mogelijke oorzaken. Ten eerste worden de zandwingebieden aangevuld met zand uit de omgeving. Ten tweede neemt het baggervolume af bij zandwinning. Hierdoor wordt ook minder gestort bij (onder andere) de plaatrandstortingen, wat het areaal intergetijdegebied ook kan beïnvloeden. Waarschijnlijk berekent het model een gecombineerd effect van beide oorzaken. Het is niet te achterhalen met de huidige resultaten wat de bijdrage is van beide oorzaken, hiervoor zouden nieuwe modelsimulaties gedaan moeten worden.



Figuur 3.15: Areaalontwikkeling diep water, ondiep water en intergetijdegebied in de Westerschelde

3.9

Betrouwbaarheid van de resultaten

In dit hoofdstuk zijn de resultaten gepresenteerd van de morfologische modeluitkomsten van het FINEL2d model met een simulatietijd van 100 jaar. Die periode is nodig om cumulatieve effecten van zandwinning zichtbaar te krijgen. Pas dan worden effecten van een voortdurende strategie zichtbaar.

Een belangrijke vraag is hoe betrouwbaar resultaten over zo'n lange periode zijn en welke waarde aan de uitkomsten kan worden gehecht.

Tijdens de calibratie en validatie (Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013a) is gebleken dat voor lange termijn simulaties de grote patronen en geul/plaatmigraties redelijk goed door het model voorspeld kunnen worden over een tijdsperiode van 110 jaar tijdens een hindcast van de periode 1860-1970. Hierbij neemt de voorspelkracht toe over lange termijn doordat het model vooral geschikt is om grootschalige patronen te berekenen en deze patronen steeds groter worden over lange termijn. Op kleinschalige patronen mag dit model niet bevroegd worden gezien de modelresolutie van 100m of meer.

De voorspellingen (eindbodems) van 100 jaar morfologisch rekenen met een proces gebaseerd model geven een kwalitatief beeld en geen absolute voorspellingen. De resultaten zijn een nuttig hulpmiddel bij beleidskeuzes. De waarde van de berekeningen zit vooral in de relatieve verschillen met en zonder zandwinning en zeespiegelstijging. Door de modelresultaten relatief te vergelijken worden 'fouten' van het model in de 'autonome ontwikkeling' zoveel mogelijk tegen elkaar weggestrept. Het grootschalige relatieve effect op de baggervolumes, de getijvoortplanting, het kleine effect op de import/export en het globale morfologische beeld van zand winnen worden betrouwbaar geacht. Deze effecten zijn logisch te verklaren en zijn te duidelijk om te negeren.

De berekende eindbodem na 100 jaar laat een aantal morfologische ontwikkelingen zien die nu al aan de gang zijn zoals het sedimenteren van het Middelgat, het uitbochten van de Overloop van Hansweert richting de Rug van Baarland, de aaneenschakeling van de Rug van Baarland met de Middelpaats en de sedimentatie van het Vaarwater langs Hoofdpaats. Op deze schaal heeft de voorspelling een realistisch karakter. Ook de consistentie in de modeluitkomsten tussen de diverse scenario's geeft vertrouwen in de waarde van de resultaten.

Er blijven ook vraagpunten over, zoals het voorspelde doorbreken van de Hooge Platen. Er zijn ook twijfels over de betrouwbaarheid van de niet-erodeerbare laag zoals die ingevoerd is. In de eindbodem komen een aantal locaties naar voren die tot op de harde laag geërodeerd zijn (waaronder de uitbocht van de Overloop van Hansweert op de Rug van Baarland). Het is niet zeker dat hier ook daadwerkelijk een laag aanwezig die niet kan eroderen. In Hoofdstuk 5 wordt dit effect onderzocht in een gevoeligheidsberekening.

Verder is al bij de actualisatie van het model gebleken dat het lastig is om het areaal intergetijdgebied te reproduceren. Het model laat erosie zien in deze gebieden, terwijl in werkelijkheid er sedimentatie plaats vindt op de meeste platen. Dit is ook te zien in dit onderzoek. Figuur 3.15 geeft voor alle scenario's een afname van het areaal intergetijdgebied. Aan deze afname wordt geen betekenis gegeven. Een mogelijke verklaring voor de slechte reproductie van de ontwikkeling van intergetijdgebieden kan zijn dat in het model de aanwezigheid van slib en daarmee cohesief gedrag van de bodem niet meegenomen worden. Dit heeft naar verwachting een significante invloed op de ontwikkeling van de intergetijdgebieden in de Westerschelde. Golfwerking wordt ook niet meegenomen en heeft naar verwachting een (nog) verder eroderende werking op intergetijdgebieden.

Naast de modelonzekerheid is er ook onzekerheid over hoe baggeren en storten in de toekomst gaat plaatsvinden. Nu is de 2011 bagger- en stortstrategie over 100 jaar vastgehouden, evenals de zandwinlocaties en volumes van 2011. In de werkelijkheid zullen beiden in de loop van de tijd aangepast worden, dat is immers het principe van de flexibele stortstrategie, al naar gelang de bodemligging en de inzichten van de beheerder zich ontwikkelen. Desondanks laten de resultaten na 100 jaar zien dat er geen bodemontwikkelingen plaatsvinden die niet realistisch zijn (bijvoorbeeld stortgebieden komen niet boven water). Met een aangepaste stortstrategie in de tijd zullen de resultaten zeker anders zijn en gunstiger voor de beoogde doelen van beheer en beleid. Het berekende effect van zandwinning heeft daardoor het karakter van een bovengrens.

3.10 Conclusies

Met het FINEL2d model zijn simulaties gedaan voor een morfologische tijdsperiode van 100 jaar. De scenarioberekeningen laten het cumulatief effect zien van zandwinning in de Westerschelde op de lange termijn.

De berekende effecten van een jaarlijkse zandwinning van $1,61\text{Mm}^3$ in vaste gebieden over een periode van 100 jaar zijn:

- een lagere bodemligging van enkele meters in en rond de zandwingebieden en ook rond de grootste stortgebieden, met een uitsmerend effect in de stroomrichting. In de nevengeulen waar zand gewonnen wordt (Schaar van Waarde en Everingen) wordt de geul dieper als gevolg van zand winnen. De verschillen in bodemligging als gevolg van zandwinning zijn klein in vergelijking met de totale morfologische veranderingen van 100 jaar;
- een lager baggervolume voor het onderhoudsbaggerwerk van de vaargeul in de Westerschelde. Dit verschil bouwt cumulatief op en is op lange termijn per jaar groter dan het jaarlijks zandwinvolume; na 100 jaar meer dan twee keer zo groot. Een lager baggervolume heeft weer een effect op de storthoeveelheid en dit verklaart de lagere bodemligging rond de stortgebieden (zie vorige conclusie);
- een snellere getijvoortplanting en relatief een grotere getijslag. Er vindt een relatieve versnelling van het getij plaats van ongeveer 13 minuten bij Bath en Antwerpen na 100 jaar. De getijslag neemt relatief gezien toe met een aantal centimeters bij deze stations. In absolute zin neemt de getijslag niet toe. Bij Vlissingen is het effect op de waterstanden beperkt;
- een kleine toename van de export van sediment. Deze toename van 5Mm^3 na 100 jaar is beperkt gezien het totale zandwinvolume van 161Mm^3 ;

De effecten van een geleidelijke zeespiegelstijging van 60cm over 100 jaar zijn:

- een gering morfologisch effect op de bodemligging in de monding. De verschillen zijn verwaarloosbaar ten opzichte van de totale morfologische veranderingen van 100 jaar;
- een afname van het onderhoudsbaggerwerk in de vaargeul. Hierbij is aangenomen dat de interventiediepte meestijgt met de zeespiegel;
- een relatieve verhoging van de getijslag die groter wordt verder landinwaarts. Ook hier geldt dat de getijslag in absolute zin niet toeneemt;
- een verhoging van de zandexport uit de Westerschelde naar de monding die na 100 jaar oploopt tot een verdubbeling;
- geen merkbaar verschil op de areaalontwikkeling.

4 RESULTATEN FORECAST: OOSTELIJK STORTSTRATEGIE

4.1 Inleiding

In de Westerschelde worden ten behoeve van het vaargeulonderhoud bagger- en stortwerkzaamheden uitgevoerd. Het baggerbezwaar in de Westerschelde jaar bedraagt ongeveer 10 miljoen m³ per jaar (waarde 2012). Dit wordt op diverse stortlocaties terug in het systeem gebracht.

Met het toepassen van de flexibele bagger- en stortstrategie wordt het sediment in de Westerschelde continu herverdeeld over het estuarium. Hiermee wordt de morfologie en de ontwikkeling van de morfologie in de Westerschelde beïnvloed. In het kader van het onderzoek 'Veiligheid en Toegankelijkheid' wordt daarom eveneens gekeken naar het effect van de toegepaste stortstrategie op de morfologie en het getij van de Westerschelde. In de referentie situatie is sprake van een netto westwaarts menselijk transport van gebaggerd materiaal. Gebaggerd materiaal in het oosten wordt voor een (groot) gedeelte westelijk van Hansweert gebracht. Hierbij wordt veel materiaal in locatie SH41 (Gat van Ossensisse) gestort. Daarnaast wordt er gebaggerd materiaal uit het oosten aangebracht op de plaatrandstortlocatie RVB (Rug van Baarland), dit zijn overigens marginale hoeveelheden t.o.v. de totale baggerhoeveelheid. Het oostelijk deel van de Westerschelde ruimt o.a. hierdoor nog steeds uit, met verdere amplificatie van de getijslag tot gevolg, terwijl men juist onderzoekt hoe verdere opslinging van het getij voorkomen kan worden. De probleemstelling van dit hoofdstuk is dan ook:

- Kan verdere opslinging van het getij voorkomen worden door het materiaal dat in het oostelijk deel van de Westerschelde wordt gebaggerd ook in het oostelijk deel te storten (in plaats van het naar het westen te brengen)?

Met behulp van het FINEL2d model is een forecast berekening gemaakt met een oostelijke stortstrategie en vergeleken met de referentie berekening met de 2011 bagger- en stortstrategie. Bij het nieuwe stortscenario is dus als uitgangspunt gehanteerd dat er geen gebaggerd materiaal van het oosten naar het westen gebracht en gestort wordt. Gekozen is om dit materiaal te storten bij Baalhoek in stortvak SH51, zie Figuur 2.4. Alhoewel dit scenario vrij onrealistisch is (al het oostelijk materiaal in SH51 en geen maxima aan deze stortingen) kan het toch inzicht geven in een andere stortstrategie en de consequenties daarvan. De forecast berekeningen starten met de 2011 bodem en worden 100 jaar doorgerekend. De scenario's bestaan uit:

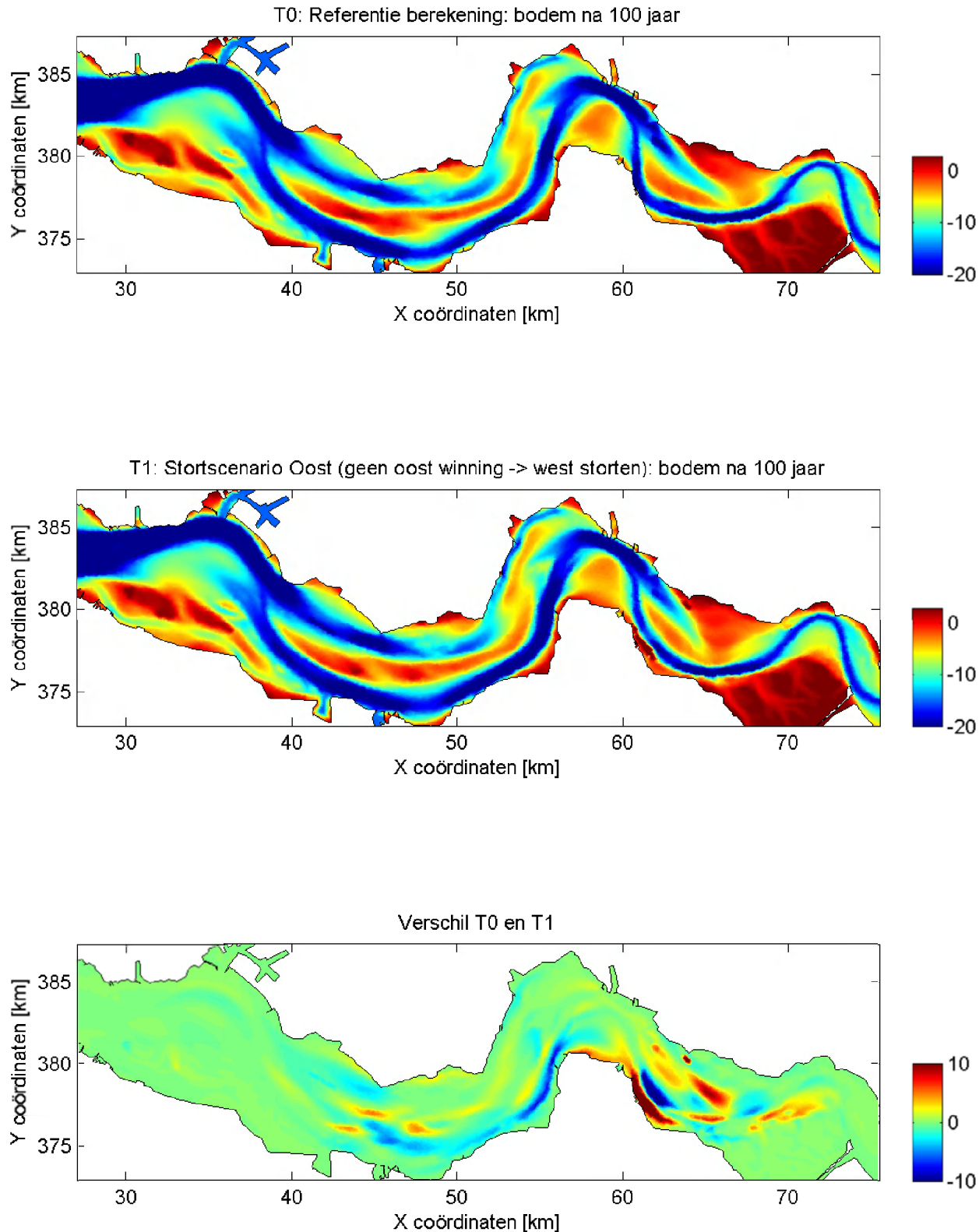
- T0 scenario: 2011 bodem; 2011 bagger- en stortscenario en zandwinning; 100 jaar morfologie (zie Hoofdstuk 2)
- T1 scenario: 2011 bodem; stortscenario Oost; 2011 zandwinning scenario; 100 jaar morfologie.

Opgemerkt dient te worden dat in het T1 scenario ook zandwinning plaatsvindt. In principe bevordert zandwinning verdere opslinging van het getij en zou het dus vanuit dat perspectief niet logisch zijn om zandwinning ook mee te simuleren. Het gaat hier echter puur om het effect van een ander stortbeleid en vanuit modeltechnische overwegingen is gekozen om aan te sluiten bij het T0 scenario dat ook in eerdere hoofdstukken gebruikt is.

4.2 Morfologische ontwikkelingen

De eindbodem van beide runs is te zien in Figuur 4.1. De verschilbodem is te zien in het onderste paneel van Figuur 4.1. De grootste verschillen treden op bij de stortlocatie Baalhoek (SH51). Door hier veel zand te storten wordt het intergetijdengebied hier sterk opgehoogd, met als consequentie dat de geul het Zuidergat zich van de dijk af verplaatst. Verder blijkt dat in het T1 scenario veel zand geborgen wordt in de Schaar van Waarde, die sterk verondiept. Verder wordt er zand geborgen rond de Schaar van de Noord en het intergetijdengebied voor het Land van Saeftinge (en wellicht in de

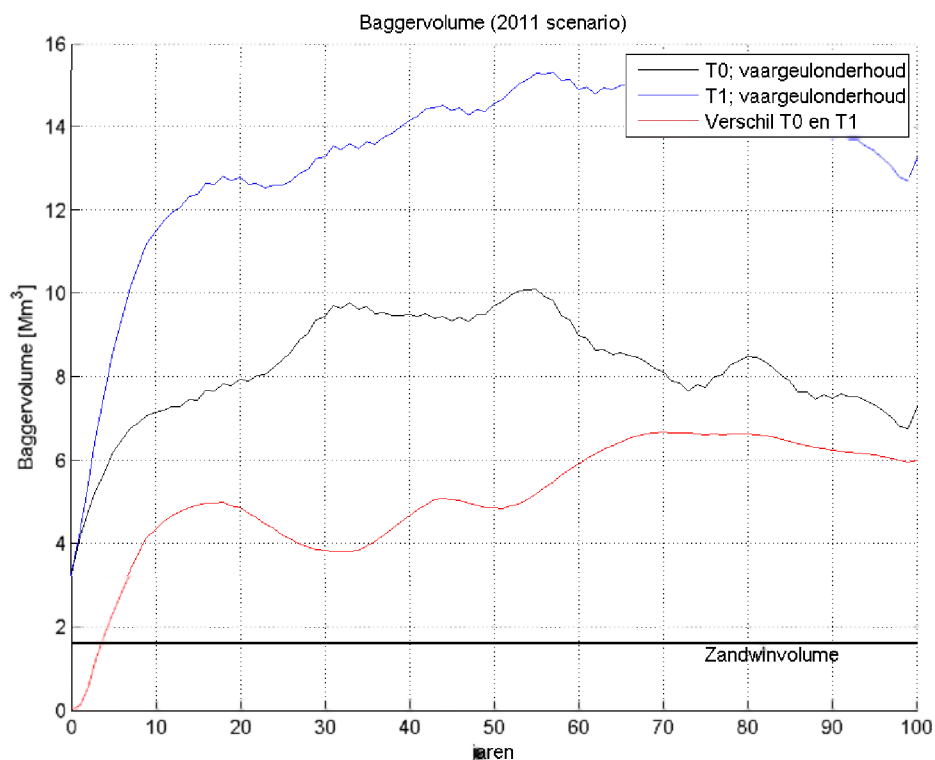
geulen in Saeftinge zelf). Door materiaal te storten in het oosten in plaats van het westen, wordt het westen ruimer. Dit is te zien rond stortgebied SH41 in de verschilbodem en verder westwaarts richting de Pas van Terneuzen. Ook in de Everingen is er nog een relatieve erosie te zien van enkele meters.



Figuur 4.1: Eindbodem T0 (basis run), T1 (stortscenario Oost) en verschil bodem na 100 jaar

4.3 Berekende baggervolumes

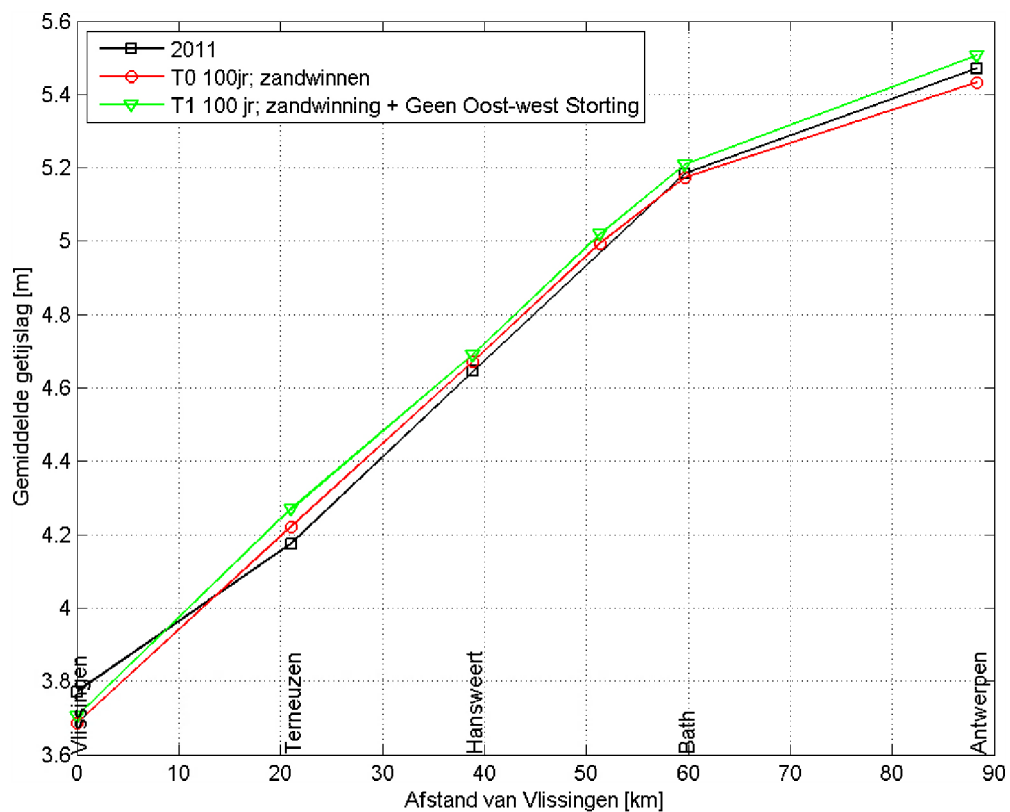
Figuur 5.2 laat de berekende totale baggervolumes zien voor beide runs. Het valt direct op dat in het T1 scenario veel meer gebaggerd moet worden. Dit kan verklaard worden doordat het stortvak SH51 overbelast wordt. Dit stortvak ligt namelijk gedeeltelijk in de vaargeul. Bij een continue overbelasting van het stortvak komt de bodemligging boven de interventiediepte en wordt het weer weggebaggerd door het model. Een gedeelte van het weggebaggerde materiaal wordt ook weer in hetzelfde stortvak SH51 gestort en zakt vervolgens weer uit om weer weggebaggerd te worden door het model. Het resultaat is dat de baggervolumes sterk toenemen en bijna verdubbelen. Er kunnen vraagtekens gezet worden bij het correct berekenen van de hoogte van de berekende baggervolumes van het T1 scenario. Belangrijk is om hier aan te geven dat de baggervolumes (sterk) zullen toenemen.



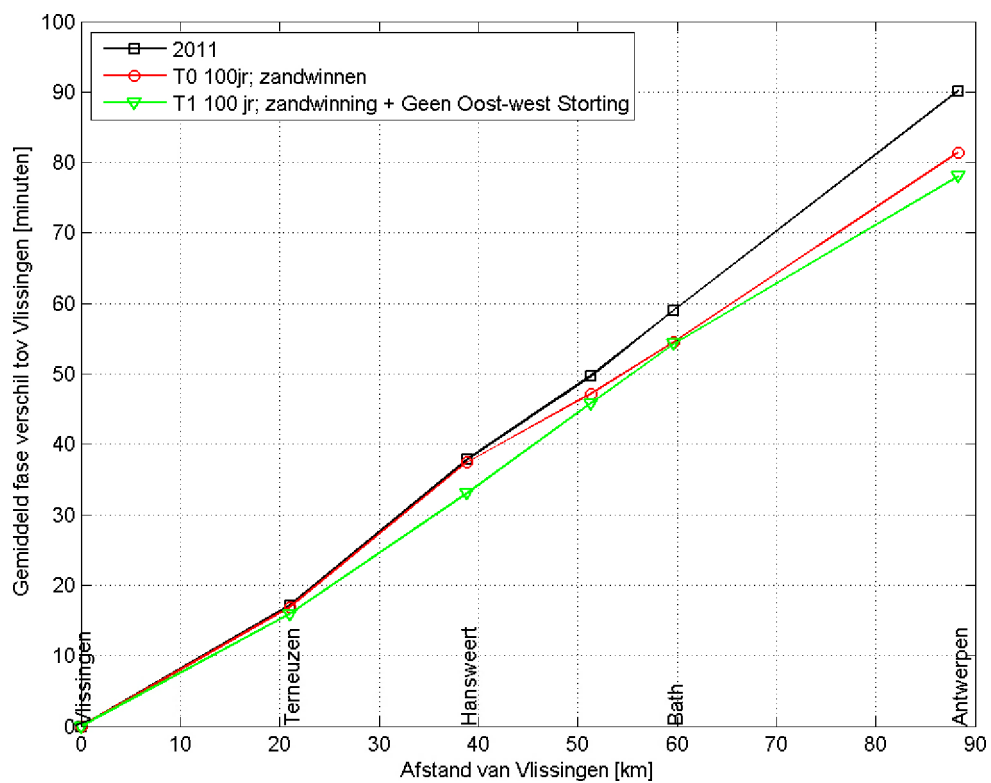
Figuur 4.2: Totale baggervolume T0 (basis run), T1 (stortscenario Oost) en verschil over 100 jaar

4.4 Getijdoordringing

Om het effect op de getijdoordringing in kaart te brengen zijn voor beide scenario's de getijslag en faseverschillen voor de waterstandsstations bepaald: Figuur 4.3 en Figuur 4.4. De verschillen tussen de T0 en de T1 run zijn klein (orde centimeter), maar het T1 scenario geeft, in tegenstelling tot de doelstelling, een iets hogere getijslag. De oorzaak kan liggen in het feit dat een ruimer westelijk deel een groter effect op de getijslag heeft dan een minder ruim oostelijk deel. De verschillen beginnen te ontstaan ter hoogte van Terneuzen. In het faseverschil is het grootste effect te zien ter hoogte van Hansweert. Mogelijk zou de verhoging van de getijslag en versnelling van de getijdegolf ook te maken kunnen hebben met het vollopen van de stortlocatie ter hoogte van Baalhoek. Indien de stortlocatie boven hoogwater komt is dit sediment is niet beschikbaar om de getijgolf af te remmen, hetgeen een verhoging van de getijslag tot gevolg heeft.



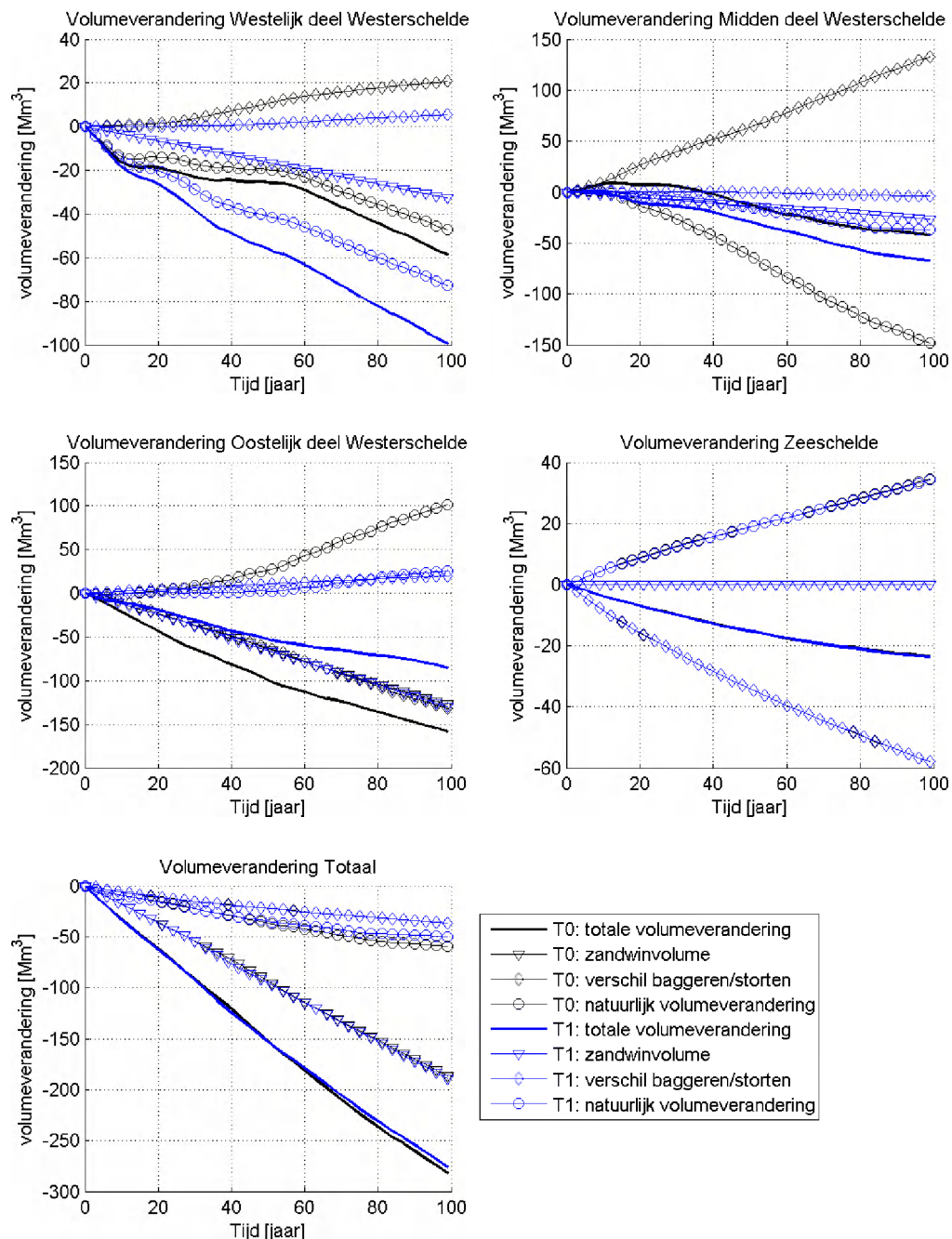
Figuur 4.3: Initiële getijslag (2011) en getijslag van het T0 en T1 scenario na 100 jaar



Figuur 4.4: Initieel faseverschil t.o.v. Vlissingen (2011) en faseverschil van het T0 en T1 scenario na 100 jaar

4.5 Volumeveranderingen

De volumeveranderingen voor de T0 en T1 scenario zijn te zien in Figuur 4.5. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen het westen, midden, oosten van de Westerschelde en de Zeeschelde. Het natte volume van het westelijk en midden deel neemt toe bij Scenario T1 doordat er niet meer gestort wordt bij het Gat van Ossensisse (en Rug van Baarland). In het oostelijk deel wordt bij Scenario T1 het aldaar gebaggerde zand ook daar weer gestort, in tegenstelling tot Scenario T0, waar het naar het middendeel gebracht werd. De verruiming in het oostelijk deel bij Scenario T1 valt nu geheel toe te schrijven aan de zandwinning. Ook te zien is dat natuurlijke import van zand in het oostelijk deel voor een groot gedeelte toe te schrijven is aan het storten in het middendeel (Gat van Ossensisse), dit is ongeveer 1 miljoen m³/jaar (100 miljoen over 100 jaar). Valt deze 'bron' van zand weg dan is de natuurlijke import van zand naar het oosten veel minder en bedraagt nog maar een kwart ervan: 0.25 miljoen m³/jaar (25 miljoen m³ over 100 jaar).



Figuur 4.5: Volumetonwikkelingen Westerschelde, West, Midden Oost en Totaal voor T0 (basis run), T1 (stortscenario Oost)

4.6 Conclusies

In dit hoofdstuk zijn twee scenario's doorgerekend:

- Een T0 scenario waarbij het sediment van het oostelijk vaargeulonderhoud naar het westen gebracht wordt (2011 situatie).
- Een T1 scenario waarbij het sediment van het oostelijk vaargeulonderhoud ook in het oosten gestort wordt.

Het T1 scenario laat zien dat het oostelijk deel van de Westerschelde sterk verondiept in vergelijking met het T0 scenario. Het extra zand komt uiteindelijk terecht in de nevengeul Schaar van Waarde en

Schaar van de Noord en mogelijk in de hoofdgeulen van het Land van Saeftinge. Ondanks dat het oostelijk stortvak vol is na 100 jaar en er dan rond het stortvak onrealistische patronen berekend worden laat dit scenario wel zien dat de gebieden buiten de hoofdgeul sterk verondiepen. Hieraan mag enige waarde gehecht worden omdat dit de enige locaties zijn waar het extra zand terecht kan komen in het oostelijk deel van de Westerschelde. Het oostelijk gedeelte raakt dus vol, met mogelijk (verdere) toename van het verschil tussen de (gemiddelde) bodemligging in (hoofd)geul en intergetijdegebieden (verdere 'versteiling') tot gevolg.

Verder blijkt dat de getijslag bij het T1 scenario iets toeneemt. Dit kan een modelartefact zijn doordat het stortgebied boven water komt (en feitelijk verwijderd wordt), maar dit kan ook betekenen dat het westelijk deel (dat in dit oostelijk stort scenario ruimer geworden is) belangrijker is voor de getijdoordringing dan het oostelijk deel. Geconcludeerd kan worden dat dit oostelijk stortscenario geen gewenste reductie op de getijslag kan bewerkstelligen.

RESULTATEN FORECAST: EFFECT NIET-ERODEERBARE LAGEN

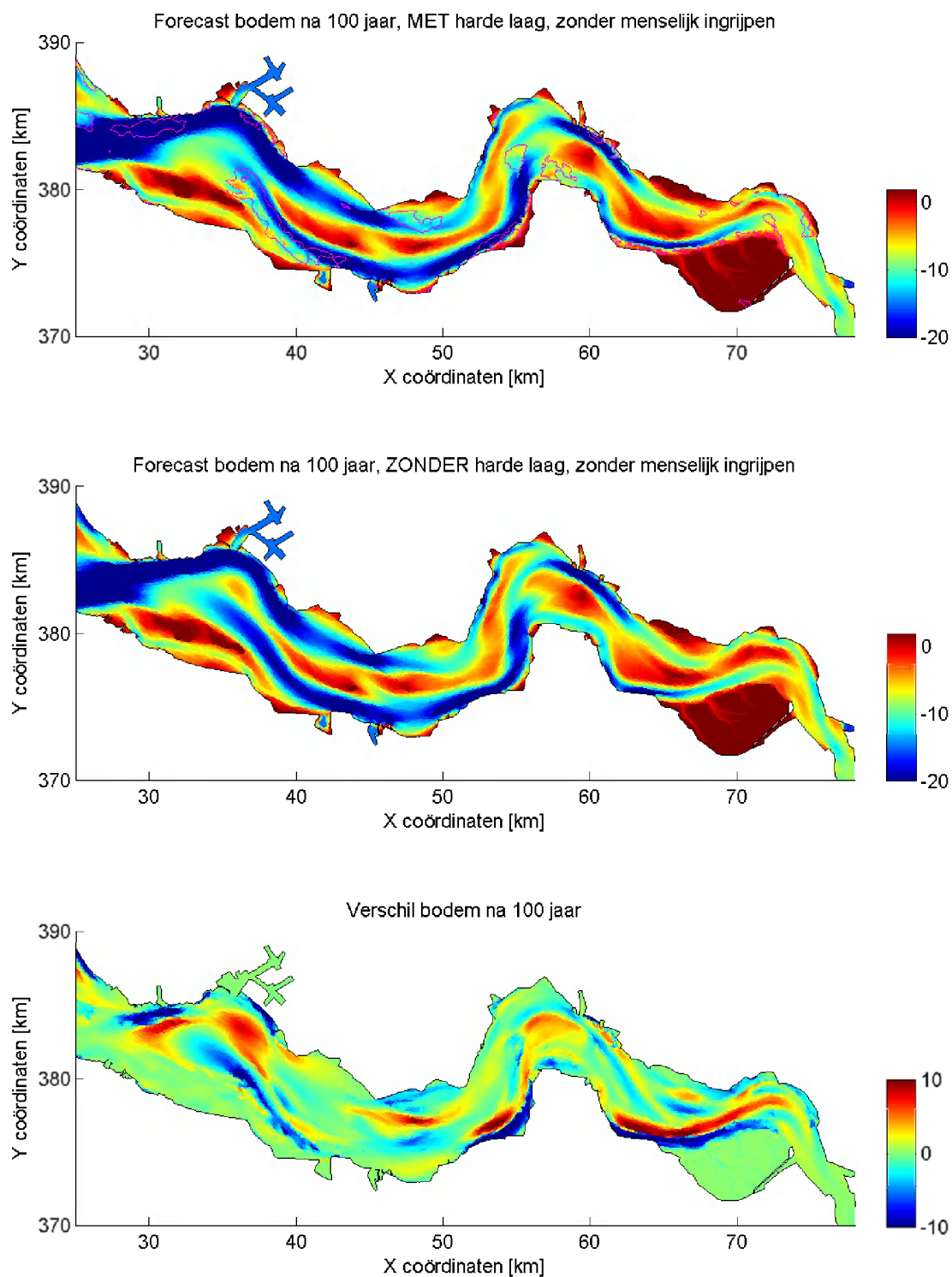
Om inzicht te krijgen in het morfologisch effect van de niet-erodeerbare laag zoals die in het model geïmplementeerd is (Zie Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis2013a, 2013b) is een forecast run gedaan met en zonder deze laag in het model. Gebleken is namelijk dat er nog veel onzekerheid zit in deze niet-erodeerbare kartering (zie Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis2013b). De basisrun is een 100 jaar forecast run zonder menselijke ingrepen (geen baggeren/storten en zandwinnen).

De bodem van de basisrun na 100 jaar met harde laag (en zonder menselijke ingrijpen) is te zien in het bovenste paneel van Figuur 5.1. Omdat geen vaargeulonderhoud wordt toegepast is te zien dat de drempels aanzanden. De contour in de figuur geeft aan waar de niet-erodeerbare laag aan het oppervlak gekomen is. Dit geldt met name voor de Pas van Terneuzen, de Rede van Vlissingen en de Plaat van Ossensisse (oost en west). Het middelste paneel van Figuur 5.1 toont dezelfde run, maar nu zonder de niet-erodeerbare laag in de bodem. Het onderste figuur laat de verschilbodem zien tussen beide runs.

Op het eerste gezicht scheelt de eindbodem van beide runs niet veel van elkaar. Het geulpatroon is na 100 jaar niet sterk gewijzigd door de invloed van de niet-erodeerbare laag. Toch zijn er een aantal verschillen die duidelijker naar voren komen in de verschilbodem. Ten eerste kunnen door het verwijderen van de niet-erodeerbare laag de hoofdgeulen meer uitbochten richting de dijk. Dit is vooral goed te zien bij het Gat van Ossensisse en het Zuidergat. In werkelijkheid zit hier overigens een geulwandbestorting. Verder valt op dat de Pas van Terneuzen doorbreekt over de Schaar van Spijkerplaat. De huidige niet-erodeerbare laag zit hier vlak onder het bodemniveau bij de Schaar van de Spijkerplaat en houdt dus in de basisrun de doorbraak van deze geul tegen. Verder valt op dat er een verschil in opbouw van de Spijkerplaat zelf is. Bij het verwijderen van de harde laag wordt de plaat net ten noorden van deze ebgeul hoger is.

Een andere locatie waar de huidige niet-erodeerbare laag vlak onder het huidige bodemniveau aanwezig is, is rond het gebied van de Molenplaat. In de eindbodem van de basisrun (met harde laag) is ook te zien dat deze harde laag aan het oppervlak gekomen is. Door het verwijderen van de niet-erodeerbare laag wijzigt de morfologie van het gebied niet drastisch. Van tevoren werd gedacht dat de harde laag een mogelijke doorbraak van een nieuwe geul van de Overloop van Hansweert richting het Middelgat zou verhinderen, maar ook zonder harde laag vindt de doorbraak niet binnen 100 jaar plaats. Ook hier is weer een verschil in de opbouw van het intergetijdengebied te zien. De Plaat van Ossensisse wordt aan de westkant uitgebouwd door het niet meenemen van de niet-erodeerbare laag.

Concluderend kan gezegd worden dat het verschil in morfologie met en zonder niet-erodeerbare laag na een morfologische periode van 100 jaar niet erg groot zijn op de grote schaal. Er zijn wel lokale bodemverschillen te zien. Het meest opvallende is de doorbraak van de ebgeul door de Schaar van de Spijkerplaat indien geen harde laag aanwezig is. Door het verleggen van geulen als gevolg van het wel of niet meenemen van de niet-erodeerbare laag verschuiven ook de intergetijdengebieden iets (bijvoorbeeld de Spijkerplaat en de Plaat van Ossensisse). Gezien de verwachte onnauwkeurigheid van deze niet-erodeerbare laag is het vermoeden dat de echte ontwikkeling zich ergens tussen deze twee uiterste scenario's gaat bevinden. Uitzonderingen hierop zijn het Gat van Ossensisse en het Zuidergat, waar de geul wel vastligt door middel van geulwandbestortingen.

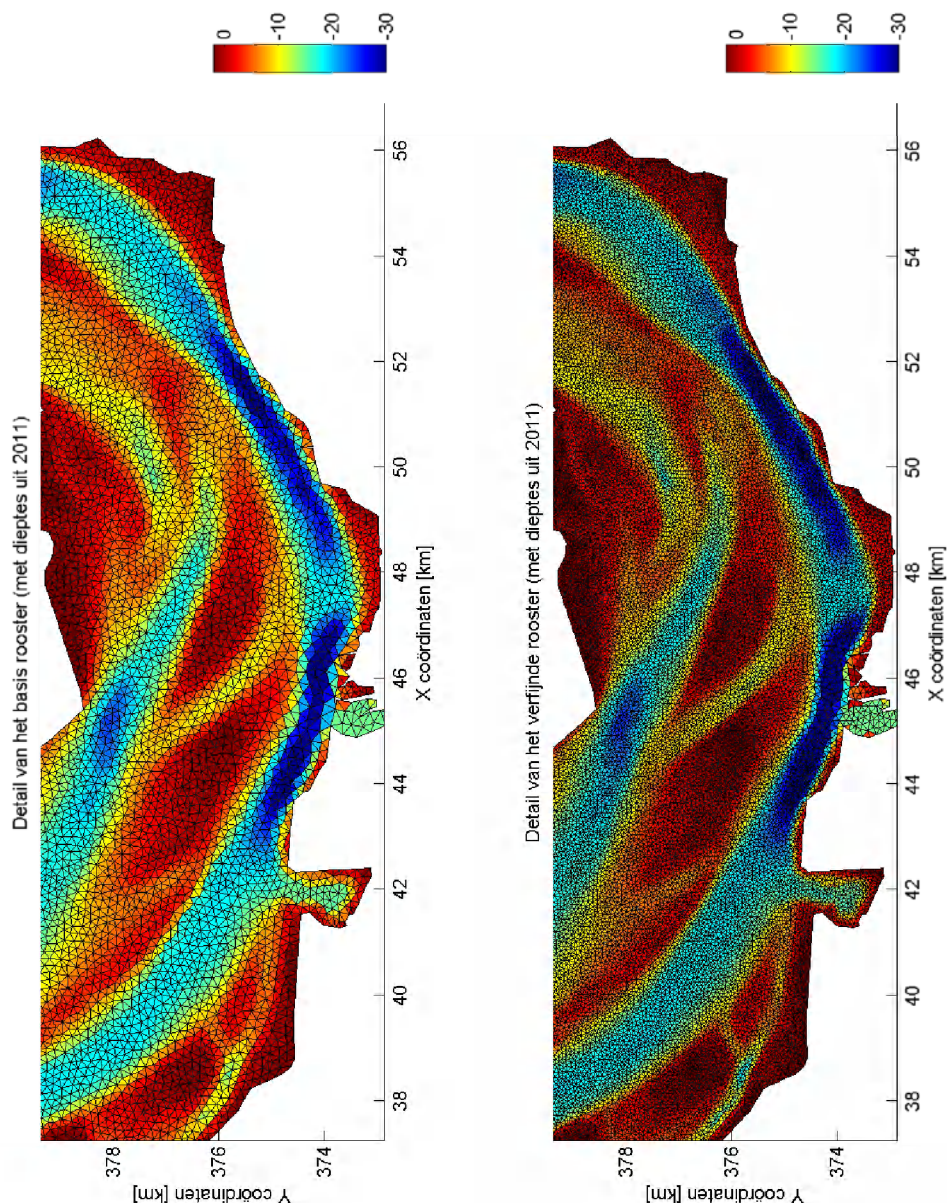


Figuur 5.1: Bodemeffect na 100 jaar met en zonder niet-erodeerbare laag (Contour in bovenste figuur laat de locaties zien waar de niet-erodeerbare laag aan het oppervlak ligt na 100 jaar)

6 RESULTATEN FORECAST: EFFECT FIJNER ROOSTER

6.1 Inleiding

De scenario's zoals die uitgevoerd zijn in dit rapport gebruiken het standaard rooster zoals dat beschreven is in Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis2013a2012a. Dit rooster is ontwikkeld met het idee om de grootschalige morfologische ontwikkelingen te simuleren. Met een sterk verfijnd rooster is een controle berekening gedaan om te testen of de berekende morfologie niet sterk verandert door het gebruik van dit rooster en om te kijken of er locaties zijn die gevoelig zijn voor de gebruikte roostermaat. Een detail van beide roosters rond Terneuzen is te zien in Figuur 6.1. De controle berekening bestaat uit een forecast van 30 jaar in plaats van de 100 jaar, vanwege de sterk toegenomen rekentijd van het fijne rooster.

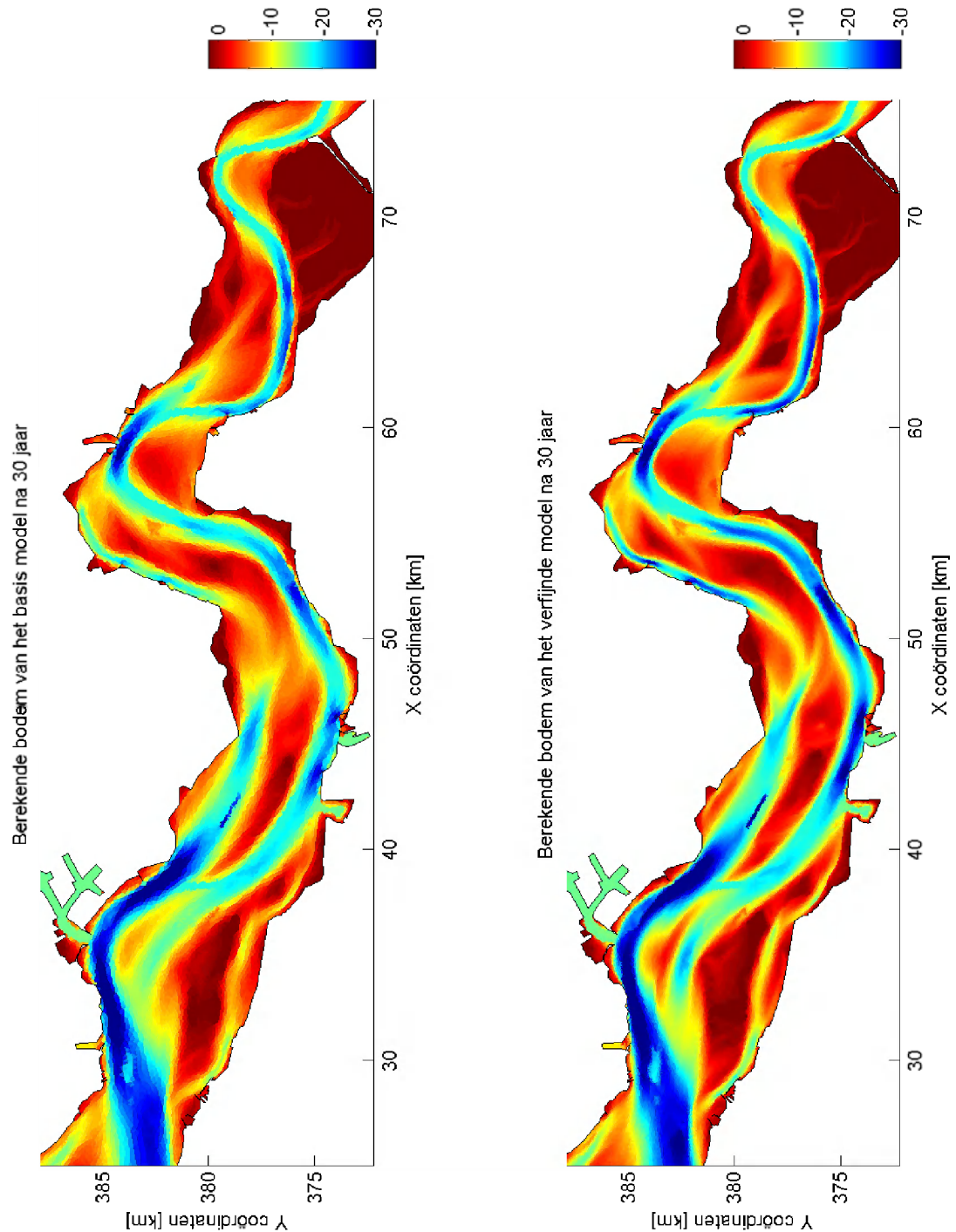


Figuur 6.1: Detail van het basis rooster en het fijne rooster rond Terneuzen (met geïnterpoleerde 2011 dieptes)

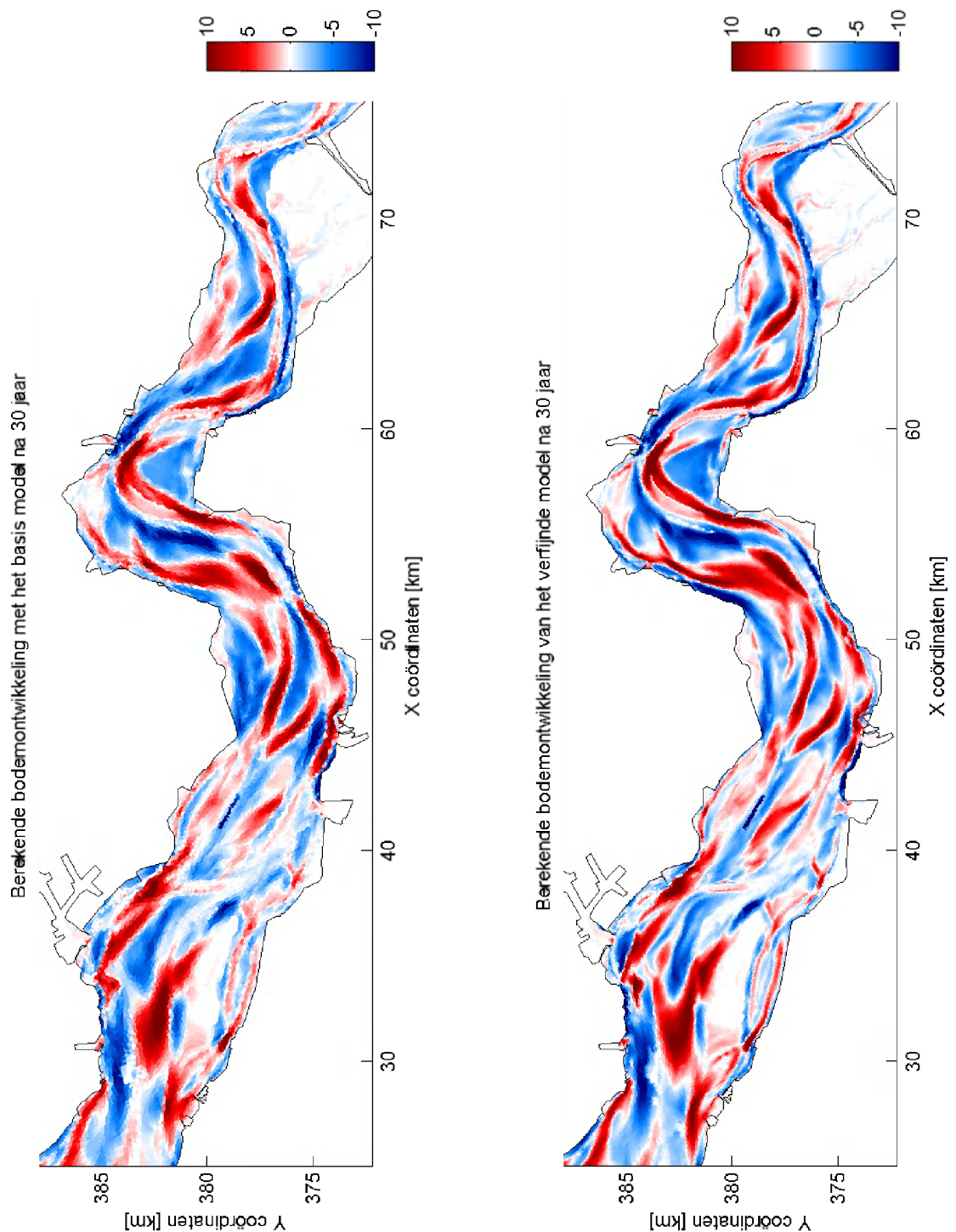
6.2

Resultaten

De berekende bodem na 30 jaar is voor beide simulaties getoond in Figuur 6.2. De erosie/sedimentatiepatronen voor beide runs zijn te zien in Figuur 6.3.



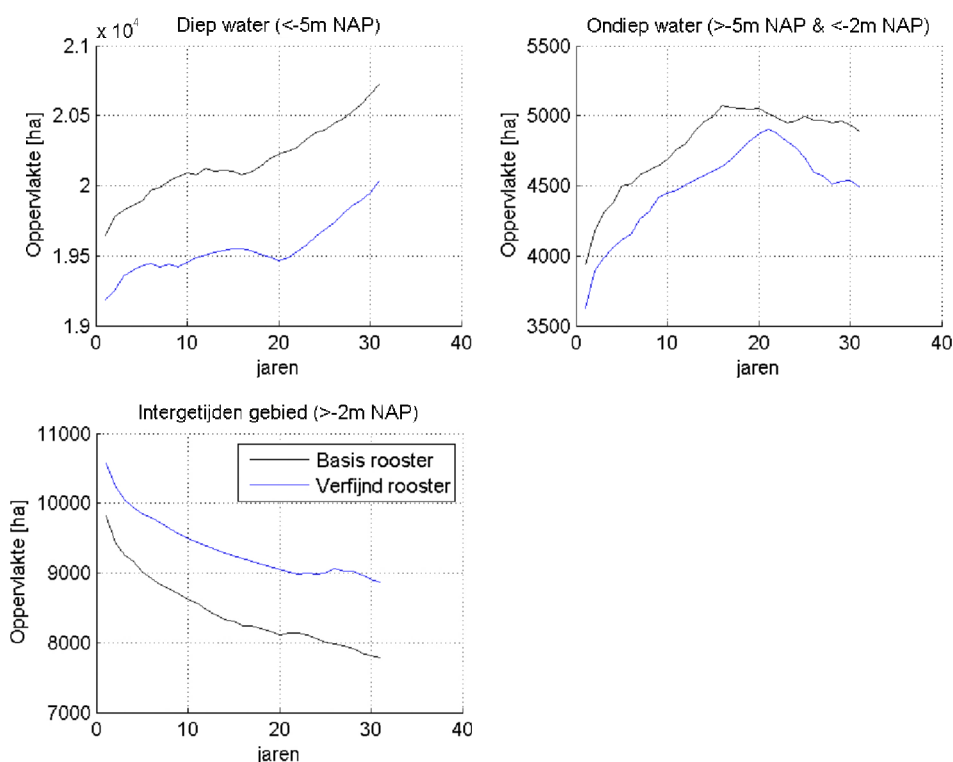
Figuur 6.2: Eindbodem na 30 jaar; Basisrooster en verfijnd rooster



Figuur 6.3: Erosie/ sedimentatie patroon na 30 jaar (met start in 2011). Basisrooster en verfijnd rooster

Uit Figuur 6.2. blijkt dat de twee bodems sterk op elkaar lijken. Ook de bodemontwikkeling in Figuur 6.3 lijkt sterk op elkaar. Op detailniveau zijn er verschillen te zien. Zo zijn de kleinere kortsluitgeulen meer geprononceerd in het fijne rooster. Met name de Geul door de Molenplaat, Schaar van Valkenisse en de geul door de Spijkerplaat is beter te zien in het fijne rooster. Op de Platen van Valkenisse is een verschil in intergetijdengebied te zien. Verder zijn de diepere delen van de hoofdgeul dieper bij toepassing van het fijne rooster (Gat van Ossenis, Pas van Terneuzen, Zuidergat).

In Figuur 6.4 is de areaalontwikkeling getoond voor het basis en verfijnd rooster. Opvallend is dat bij de start van de berekening direct een verschil ontstaat (let op dat de assen wel sterk ingezoomd staan). Dit heeft te maken met de interpolatie van de bodemgegevens naar het basis en fijne rooster. Bij het basisrooster worden meer sterke bodemovergangen weg geïnterpoleerd dan het fijne rooster. Het verschil tussen beide berekeningen blijft min of meer in stand tijdens de 30 jaar. Belangrijk is hier om te constateren dat beide berekeningen dezelfde trend vertonen, net zoals geconstateerd is bij de bodemontwikkeling.



Figuur 6.4: Areaalontwikkeling (start in 2011). Basisrooster en verfijnd rooster

6.3 Conclusie

Geconcludeerd kan worden dat de grootschalige patronen door toepassing van een verfijnd rooster niet drastisch veranderen. Gebieden die met name gevoelig zijn, zijn de kortsluitgeulen die met een fijn rooster beter beschreven worden (en in stand blijven). Daarnaast zijn de diepere delen van de hoofdgeul dieper door toepassing van het fijnere rooster. Voor het toepassingsgebied van het model, namelijk de grootschalige morfologische veranderingen, volstaat het om te rekenen met het standaard rooster. Voor vragen op detailgebied moet rekening gehouden worden met afhankelijkheid van de resultaten voor roostergrootte.

7 RESULTATEN SCENARIO'S 1965-2002, MET FOCUS OP ONTWIKKELING MIDDELGAT

7.1 Inleiding

In het Middelgat heeft in het recente verleden een redelijk stabiele trend in sedimentatie plaatsgevonden. Er is in de geul veel zand gestort van het vaargeulonderhoud. De onderzoeksvraag voor dit hoofdstuk is:

- Heeft de sterke verzanding van het Middelgat in het recente verleden een natuurlijke oorzaak, of werd dit voor een belangrijk deel veroorzaakt door het gevoerde bagger- en stortbeleid?

Met de invoer en aannames zoals beschreven in het hoofdstuk 2 zijn scenario's uitgevoerd voor een morfologische periode van 38 jaar (1965 - 2002) om de invloed van menselijk ingrijpen op de morfologie van de Westerschelde, en met name het Middelgat te bepalen. De overige instellingen zijn gelijk aan Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013a), waar deze periode ook als hindcast uitgevoerd is.

De modeluitkomsten met betrekking tot morfologische ontwikkelingen van de Westerschelde en meer specifiek het Middelgat, en de hypsometrie van de Westerschelde worden in de hierna volgende paragrafen besproken.

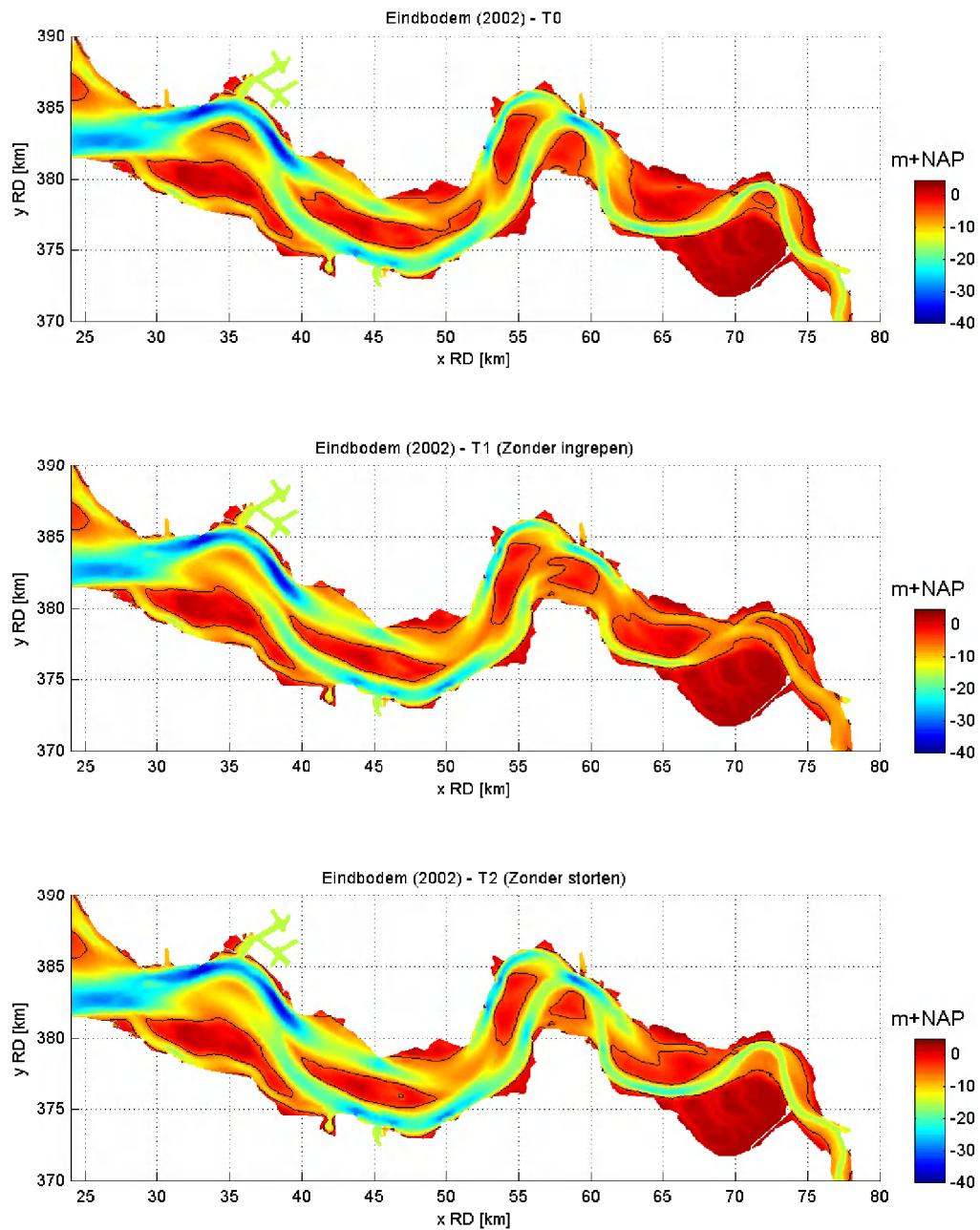
De volgende scenario's worden behandeld:

- T0 scenario waarin het werkelijk uitgevoerde zandwinning en bagger- en stortbeleid in de Westerschelde wordt toegepast (dit scenario is gelijk aan het hindcast scenario beschreven in Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis, 2013a).
- T1 scenario zonder menselijke ingrepen in de Westerschelde. Zandwinning en het bagger- en stortbeleid worden niet meegenomen.
- T2 scenario zonder storten. De baggerwerkzaamheden ten behoeve van vaargeulonderhoud en zandwinning worden wel meegenomen. Het terugstorten van het gebaggerde materiaal vindt niet plaats.

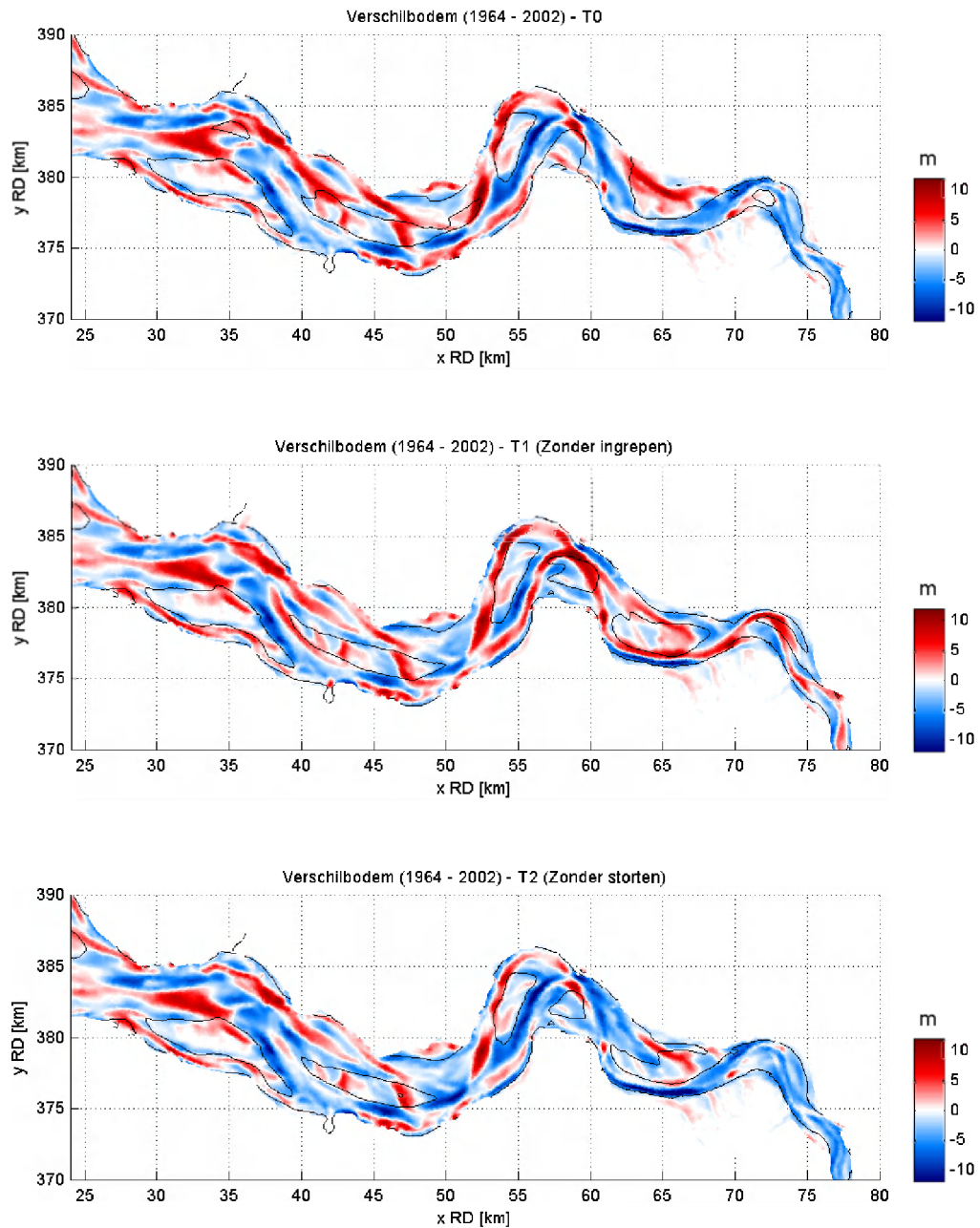
7.2 Morfologische ontwikkeling Westerschelde

De bodem aan het einde van de berekeningen is voor de drie scenario's weergegeven in Figuur 7.1. Het verschil tussen de beginbodem en de eindbodem is voor elk van de scenario's afgebeeld in Figuur 7.2. Het bovenste paneel geeft de eindbodem van het T0 scenario, dat uitgaat van de menselijke ingrepen die in de periode 1964 – 2002 daadwerkelijk zijn uitgevoerd. Het middelste paneel geeft de eindbodem voor scenario T1, waarbij de morfologie niet is beïnvloed door menselijke ingrepen als baggerwerkzaamheden, storten en zandwinning. De eindbodem voor scenario T2, waarbij wel wordt gebaggerd en zandwinning plaatsvindt, maar geen materiaal wordt gestort, is gepresenteerd in het derde paneel van Figuur 7.2.

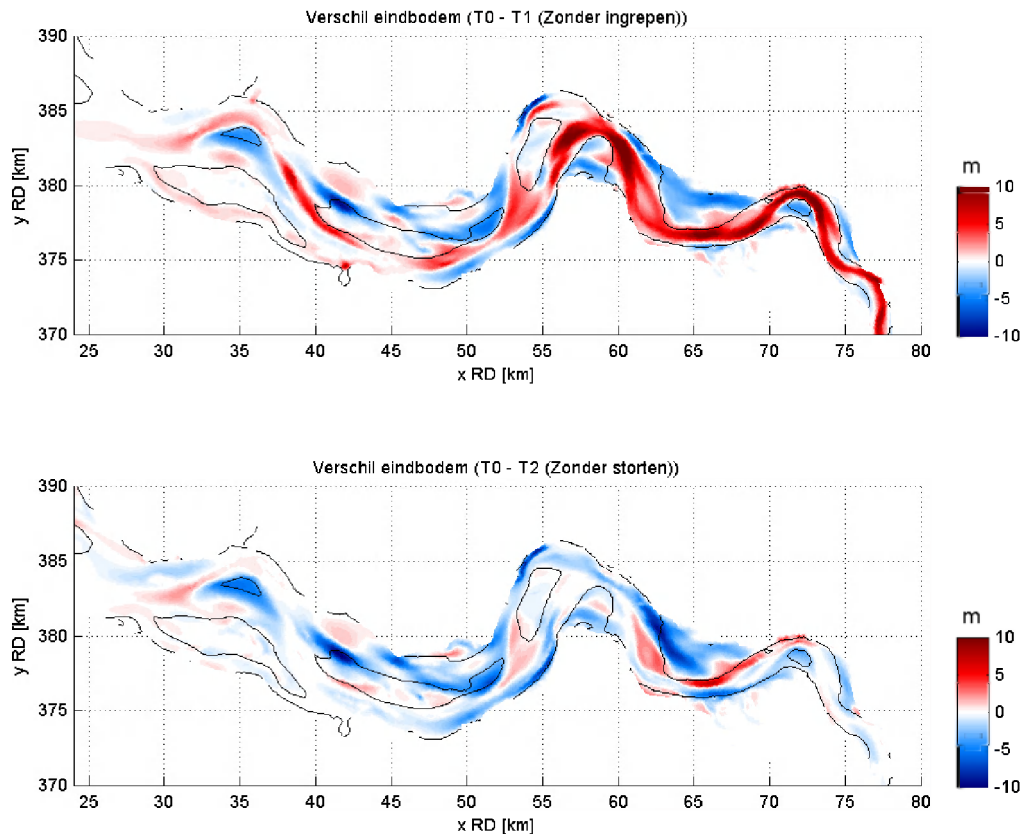
Inzicht in de verschillen tussen de scenario's kan worden verkregen door het verschil tussen de eindbodems van de verschillende scenario's te bekijken. Het verschil tussen de eindbodem van scenario's T0 en T1 is gegeven in het eerste paneel van Figuur 7.3. Sedimentatie van de vaargeul, die in scenario T0 wordt onderhouden en in scenario T1 niet, is duidelijk zichtbaar, evenals de erosie van enkele platen. Het verschil tussen scenario's T0 en T2 in het tweede paneel van Figuur 7.3. Doordat in scenario T2 meer materiaal uit het systeem wordt verwijderd dan bij scenario T0, treedt beduidend meer erosie en nauwelijks sedimentatie op. Deze erosie vindt plaats op enkele platen, maar ook in bepaalde delen van de vaargeul zelf.



Figuur 7.1: De modelbodem aan het eind van de berekeningen (2002) voor de drie scenario's. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



Figuur 7.2: Het verschil tussen de initiële bodem en de uiteindelijke bodem voor de drie scenario's (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.

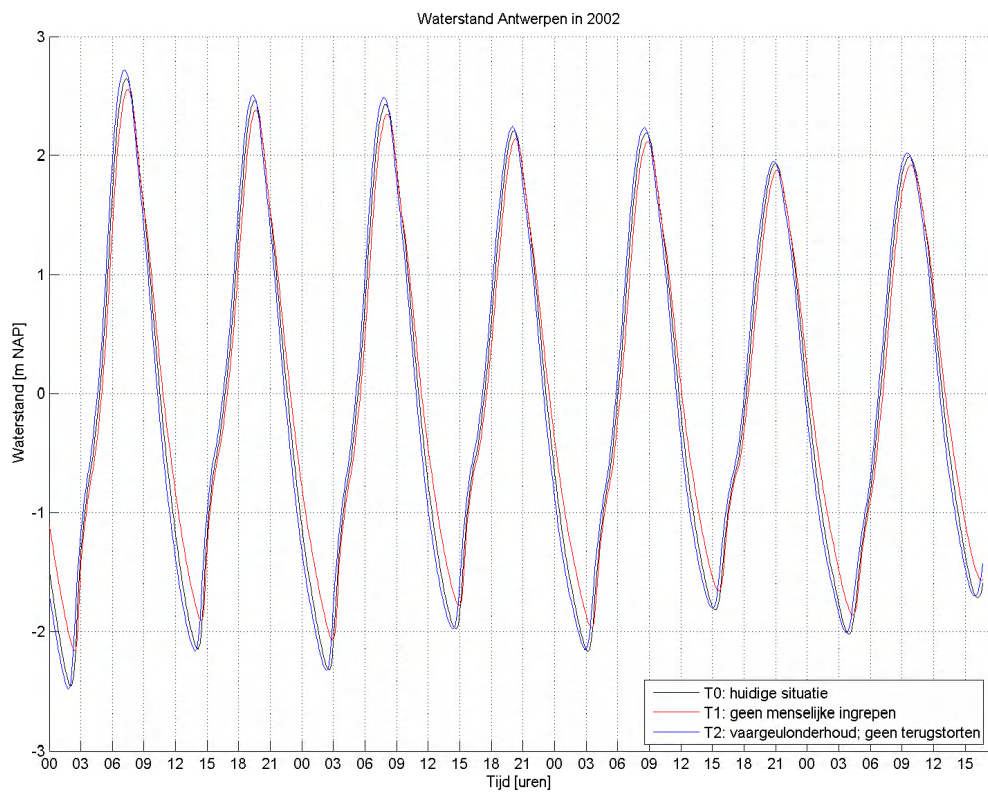


Figuur 7.3: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en de scenario's T1 en T2 (1964-2002). Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T1 respectievelijk T2, dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.

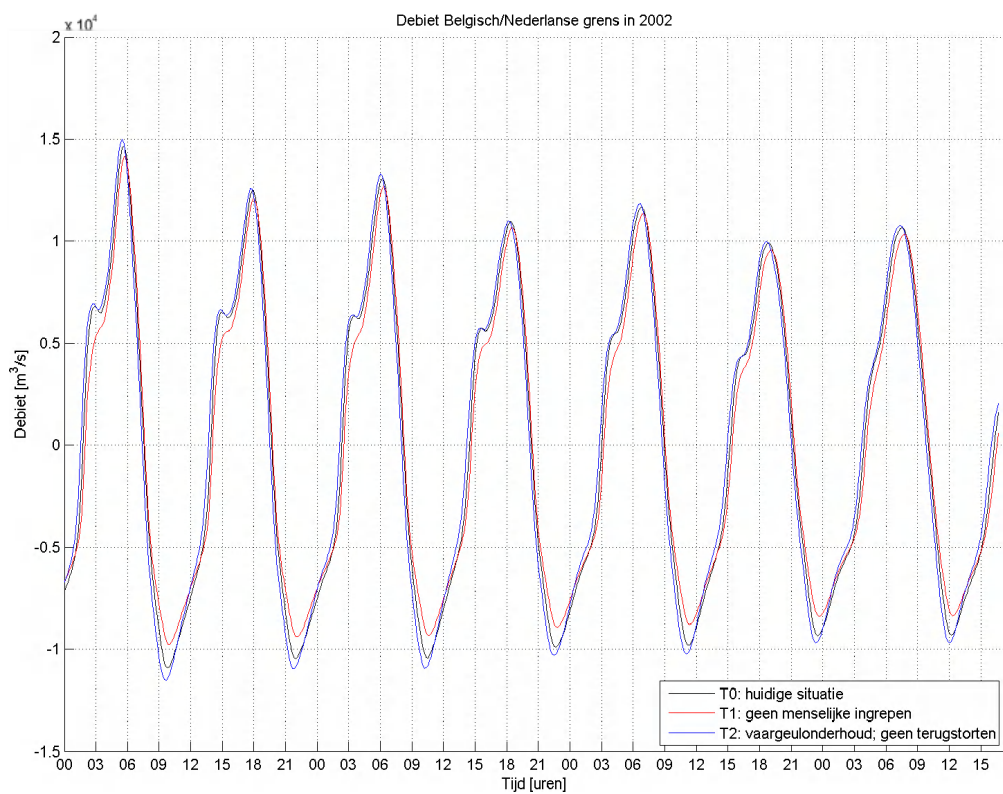
Het verschil in morfologische ontwikkeling uit zich ook in de getijslag. In Figuur 7.4, waar de waterstand bij Antwerpen voor de drie scenario's is weergegeven, is te zien dat getijslag in scenario T1 afneemt ten opzichte van de getijslag in scenario T0. Daarnaast treedt in scenario T1, waarbij geen menselijke ingrepen worden uitgevoerd, een vertraging van het getij van ongeveer een kwartier op, wat overeenkomt met de vervroeging van de looptijd van de getijgolf die men in Antwerpen de laatste decennia heeft waargenomen. Bij scenario T2 zijn zowel de vervroeging van het getij bij Antwerpen als de grootte van de getijslag hoger dan bij scenario T0.

Het debiet ter plaatse van de Nederlands-Belgische grens, zie Figuur 7.5, en het debiet ter plaatse van Vlissingen/Breskens, zie Figuur 7.6, vertoont hetzelfde patroon. Scenario T1 geeft een lager debiet dan scenario T0, en scenario T2 een hoger debiet. Ook de faseverschuivingen die in de waterstand zijn waargenomen, zijn zichtbaar in het debietverloop.

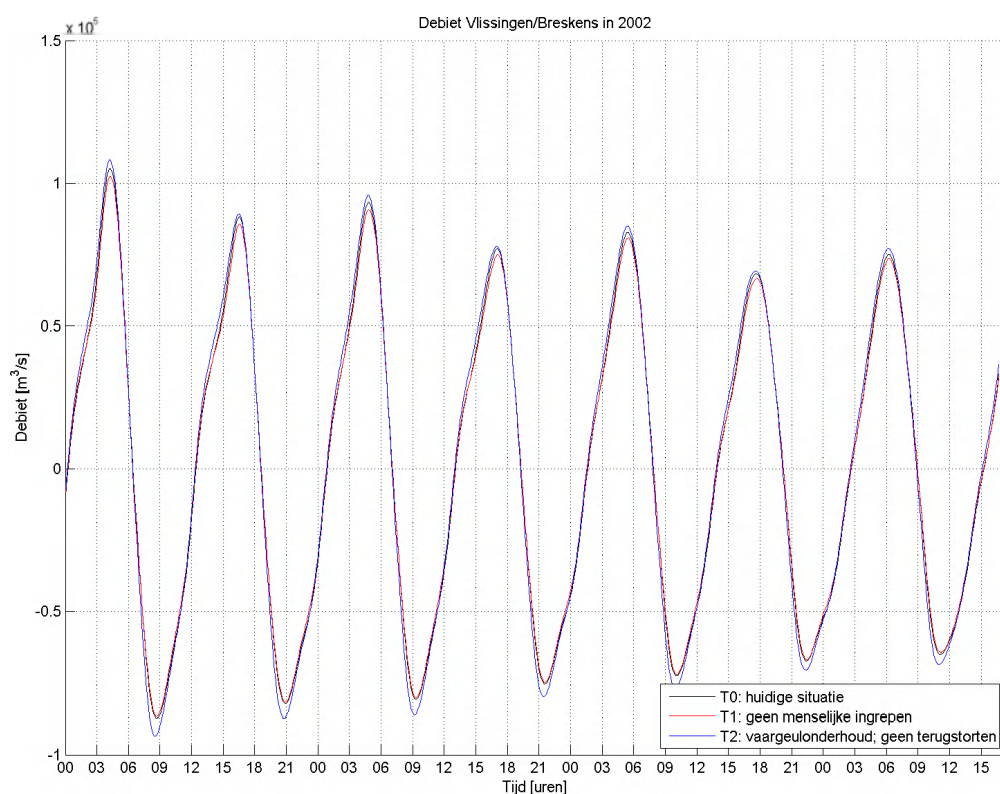
In Figuur 7.7 is de getijslag voor de drie scenario's bepaald per station en uitgezet langs de as van de vaargeul. Het scenario met de laagste getijslag is logischerwijs het T1 scenario waarbij geen menselijke ingrepen plaatsvinden. Het (werkelijke) T0 scenario geeft een iets hogere getijslag en bij het T2 scenario (al het baggeronderhoud winnen) neemt de getijslag nog verder toe. De drie scenario's geven als het ware een bandbreedte aan waarbinnen het sedimentbeheer (de combinatie van vaargeulonderhoud en zandwinning) invloed had op de getijslag.



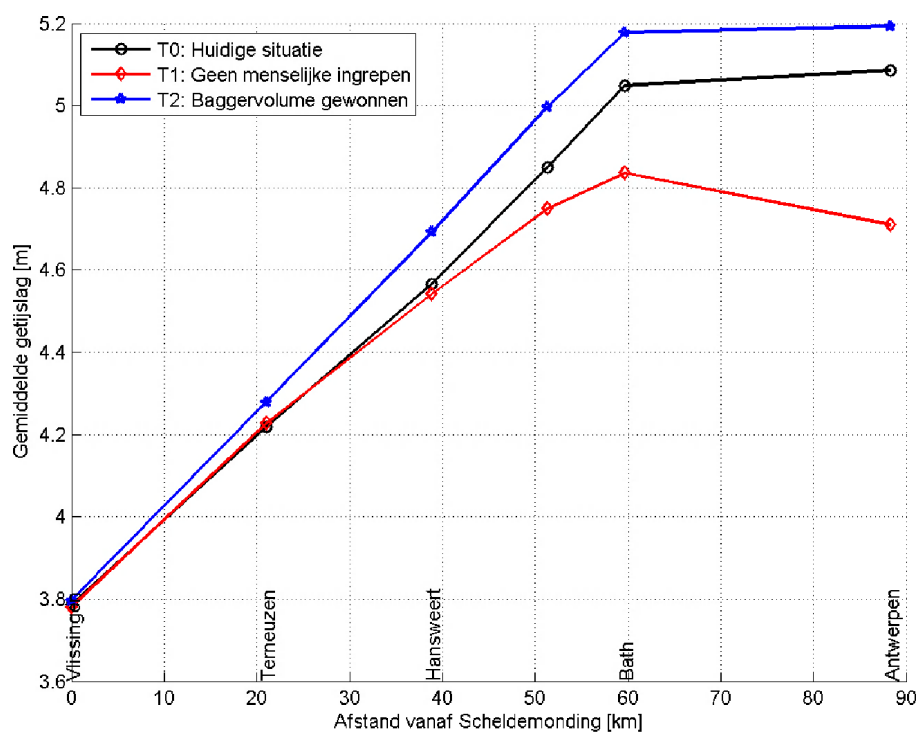
Figuur 7.4: Waterstand in Antwerpen voor de drie verschillende scenario's.



Figuur 7.5: Debiet ter plaatse van de Nederlands-Belgische grens voor de drie scenario's.



Figuur 7.6: Debiet ter plaatse van Vliissingen/Breskens voor de drie scenario's.



Figuur 7.7: Gemiddelde getijslag voor de drie scenario's in 2002

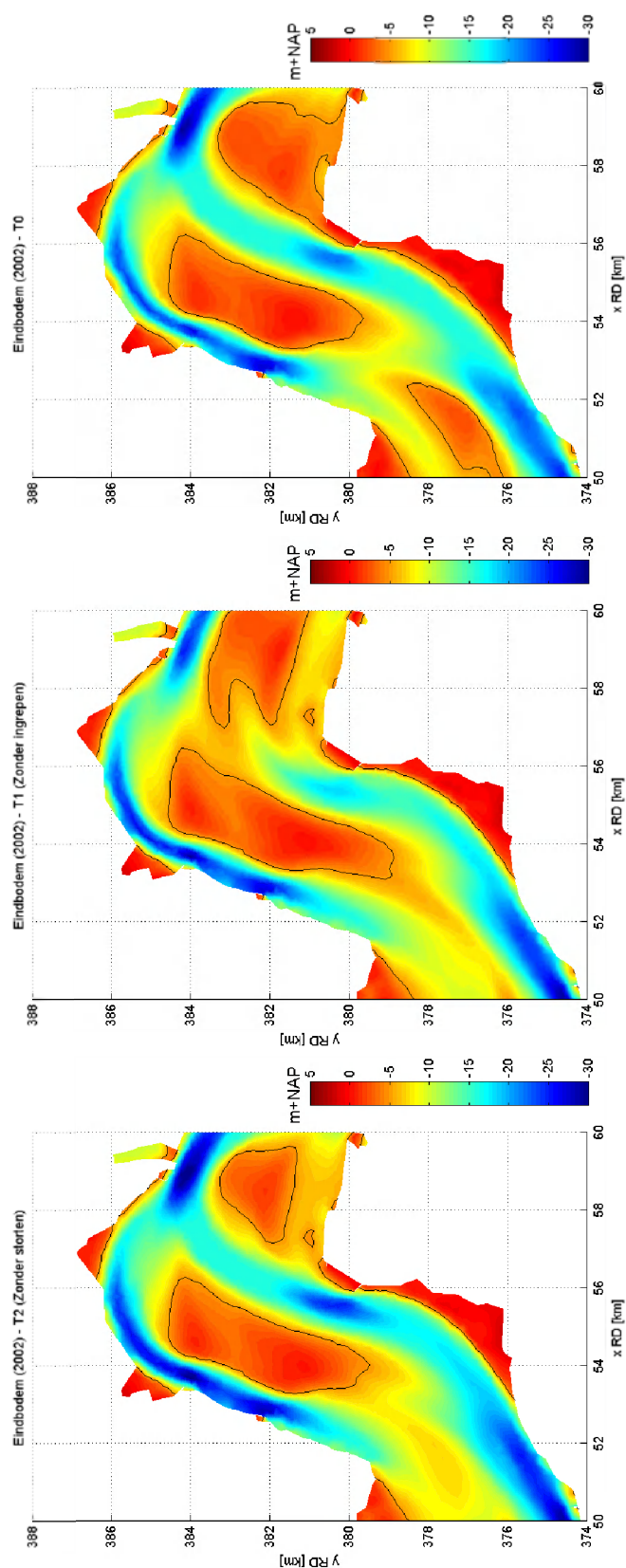
7.3 Morfologische ontwikkeling Middelgat

De bodem ter plaatse van het Middelgat aan het eind van de berekeningen voor de verschillende scenario's is afgebeeld in Figuur 7.8. Het verschil tussen de begin- en eindbodem is gegeven in Figuur 7.9. Voor alle scenario's geldt dat het Middelgat verzandt.

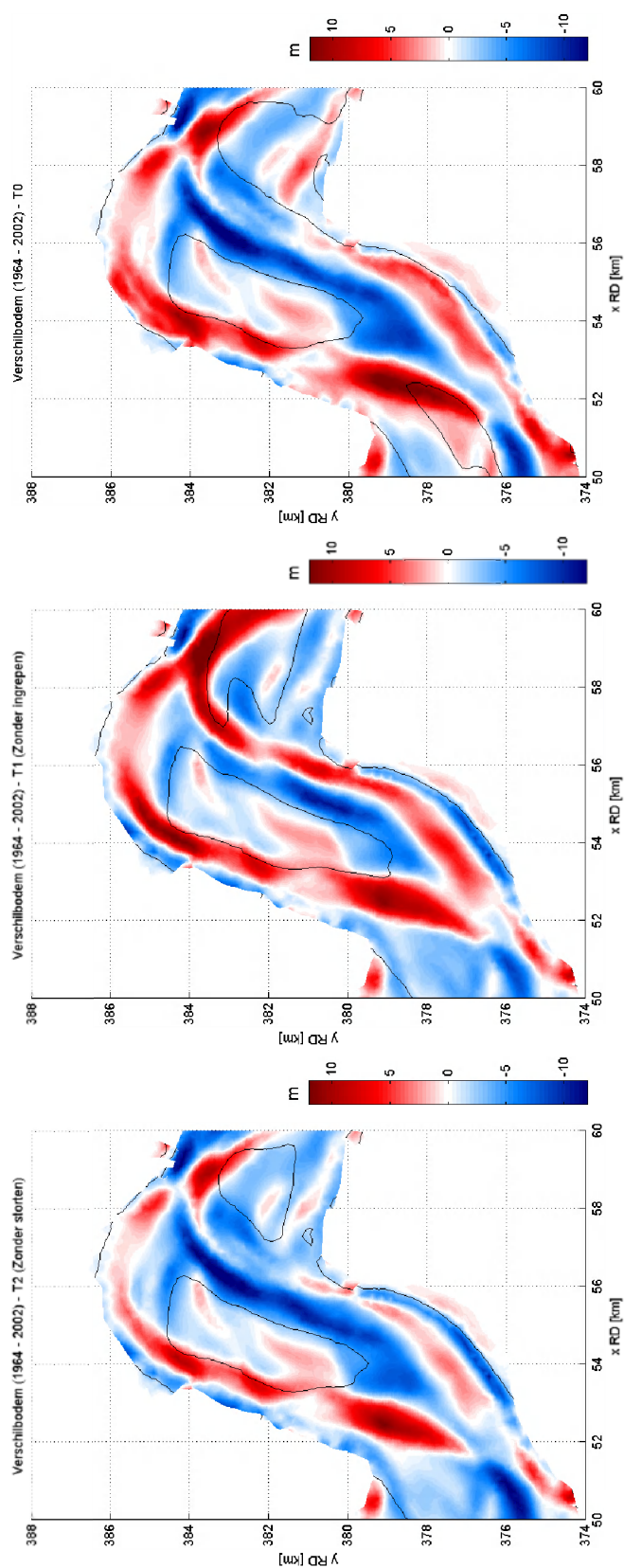
Het verschil tussen de eindbodems ter plaatse van het Middelgat is gegeven in Figuur 7.10. Het bovenste paneel geeft het verschil tussen scenario T0 en scenario T1. In het noordelijk deel van het Middelgat treedt meer sedimentatie op in scenario T1 dan in scenario T0. Dicht tegen de oever treedt echter meer erosie op. Er is in scenario T1 waarschijnlijk sprake van meer bochtwerking dan in scenario T0. Het zuidelijk deel van het Middelgat heeft eveneens meer erosie in scenario T1. Verder verzanden de Overloop van Hansweert en de Plaat van Ossenissee meer, en treedt meer bochtwerking op in het Gat van Ossenissee in scenario T1 dan in scenario T0.

Het tweede paneel van Figuur 7.10 geeft het verschil in morfologische ontwikkeling tussen scenario T0 en scenario T2. In scenario T2 wordt het gebaggerde materiaal niet elders in de Westerschelde gestort zoals in scenario T0, maar uit het systeem verwijderd. In het gehele Middelgat is de sedimentatie voor scenario T2 lager dan voor scenario T0. Het storten van het gebaggerde materiaal draagt dus bij aan de sedimentatie in het Middelgat.

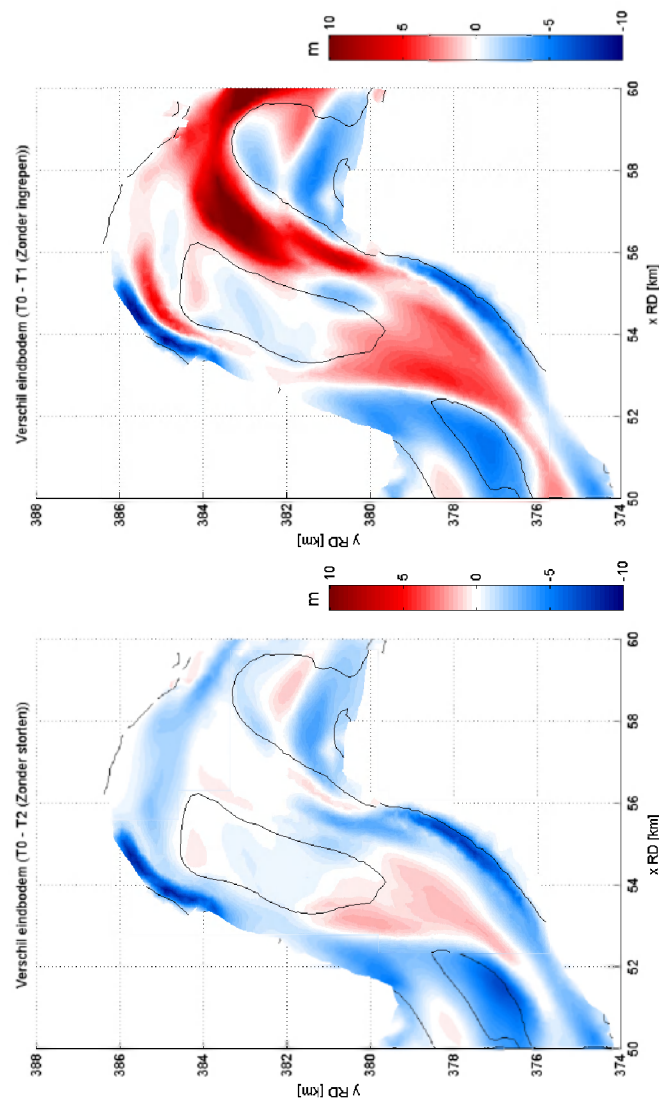
De volumeverandering in het Middelgat is weergegeven in Figuur 7.11. In de figuur staat WERK voor de werkelijke volumeverandering in de loop van de berekening, en NAT voor de natuurlijke volumeverandering. Bij de natuurlijke volumeverandering (NAT) wordt als uitgangspunt de werkelijke volumeverandering genomen (WERK). Vervolgens wordt er gecorrigeerd voor de uitgevoerde bagger- en stortwerkzaamheden en zandwinning, onder andere het baggeren van de Drempel van Baarland in de jaren '60 en begin jaren '70. De polygoon waarbinnen de volumeverandering bepaald is, is weergegeven in Figuur 7.12.



Figuur 7.8: De modelbodem ter plaatse van het Middelgat aan het eind van de berekeningen voor de drie scenario's (1964-2002). In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



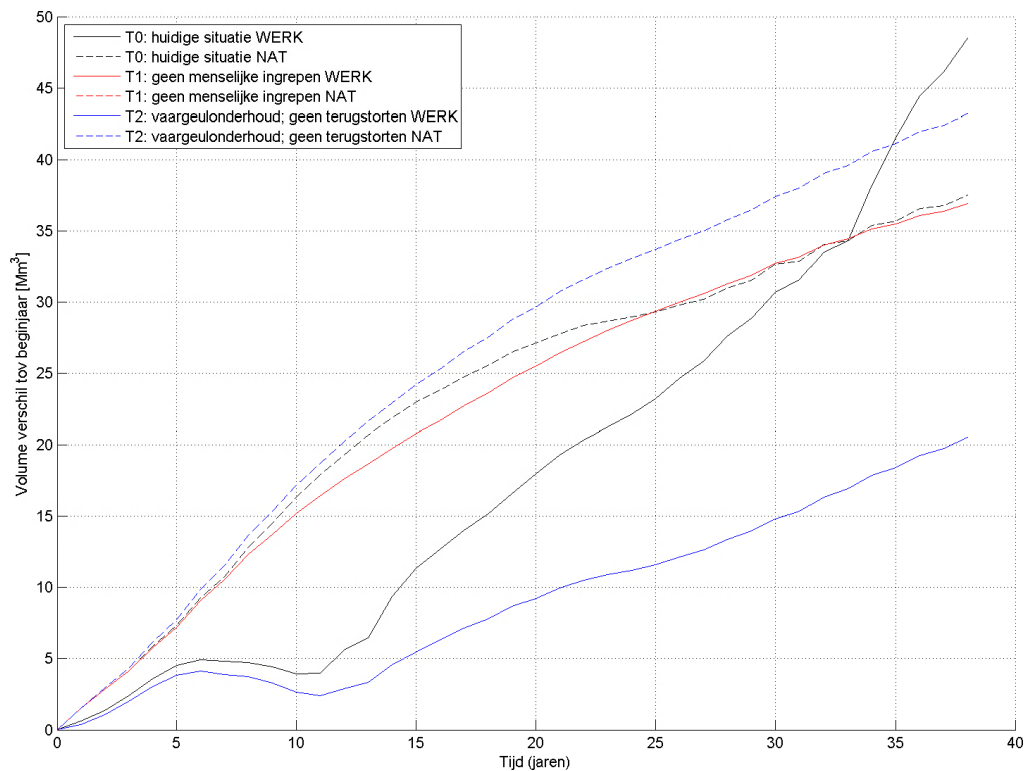
Figuur 7.9: Het verschil tussen de initiële bodem en de uiteindelijke bodem voor de drie scenario's ter plaatse van het Middelgat (1964-2002). Rood staat voor sedimentatie; blauw voor erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de betreffende eindsituatie opgenomen.



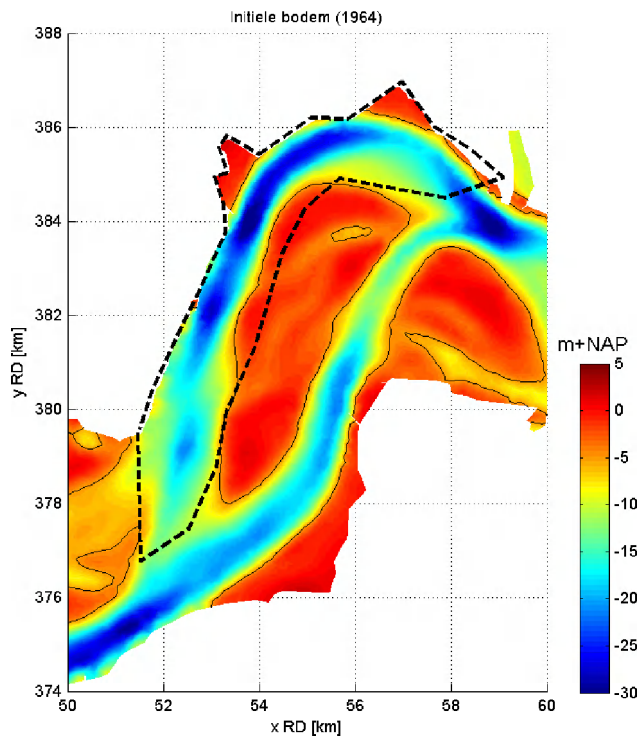
Figuur 7.10: Het verschil tussen de uiteindelijke bodem van scenario T0 en de scenario's T1 en T2 ter plaatse van het Middelgat (1964-2002). Rood staat voor meer sedimentatie bij scenario T1 respectievelijk T2, dan bij scenario T0. Blauw staat voor meer erosie. In de figuren is de NAP -5 m contourlijn voor de T0 eindsituatie opgenomen.

In Figuur 7.11 is te zien dat de natuurlijke volumeveranderingen voor de drie scenario's dicht bij elkaar liggen. In de loop der jaren neemt de snelheid van de veranderingen iets af. Het beeld dat deze figuur schetst komt overeen met wat in Figuur 7.8 tot en met Figuur 7.10 zichtbaar is.

Uit bovenstaande kan worden geconcludeerd dat bij alle scenario's sedimentatie in het Middelgat optreedt. Menselijk ingrijpen beïnvloed vooral de mate van sedimentatie.



Figuur 7.11: Volumeverandering in het Middelgat ten opzicht van de start van de modelberekening. WERK is de werkelijke volumeverandering in de polygoon. NAT is de volumeverandering gecorrigeerd voor de uitgevoerde bagger- en stort werkzaamheden en de zandwinning. De gebruikte polygoon is weergegeven in Figuur 7.12. Let op dat beide T1 lijnen (WERK en NAT) over elkaar liggen aangezien er geen menselijke ingrepen plaatsvinden in dit scenario.



Figuur 7.12: De initiële modelbodem, met daarin de polygoon (zwart gestreept) die is gebruikt voor de bepaling van de volumeverandering in het Middelgat, zie Figuur 7.11.

7.4 Depositie Middelgat

De bodemontwikkeling van enkele locaties (M2-M6) in het Middelgat is weergegeven in Figuur 7.13. In de vorige paragraaf is al opgemerkt dat het Middelgat in alle drie de scenario's sedimentatie plaats vindt. Figuur 7.13 bevestigt deze trend. Afwijkend daarin is de morfologische ontwikkeling van locatie M3. Hier vindt in eerste instantie sedimentatie plaats, later echter is sprake van erosie. Vermoedelijk is op deze locatie sprake van uitbochting van de geul.

Figuur 7.13 toont dat de Westerschelde bodem op alle weergegeven locaties bij scenario T0 hoger gelegen is dan bij scenario T2. Aangezien bij scenario T2 geen baggerstortingen plaatsvindt, is dit een logische trend. Bij scenario T1 zijn de menselijke ingrepen in de Westerschelde achterwege gelaten. De bodems van de gekozen punten liggen bij scenario T1 vaak hoger dan scenario T0. Alhoewel er baggerspecie gestort wordt in scenario T0, wordt er ook zand gewonnen en in de beginjaren gebaggerd. Deze laatste twee ingrepen lijken de overhand te hebben bij de meeste punten. De keuze van de locaties van de punten zal hier vooral debet aan zijn, want richting de dijk is er wel sprake van relatieve erosie tussen T0 en T1 (zie Figuur 7.10).

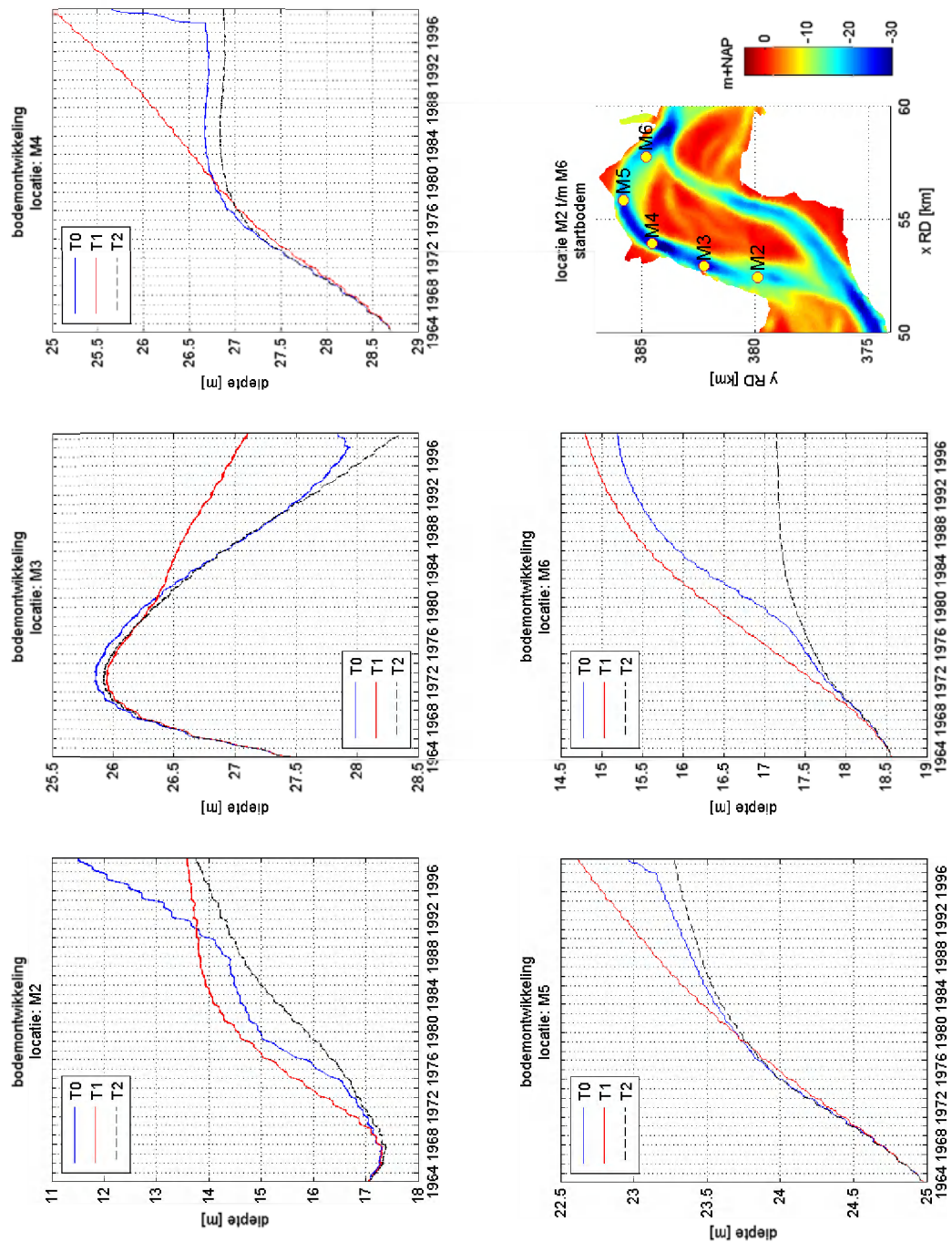
Figuur 7.14 geeft de bodemontwikkeling ten opzichte van de tijd voor locatie M2 t/m M6 voor scenario T0. Er is ingezoomd op een korte periode, waardoor de erosie en sedimentatie in dit domein zich tot enkele centimeters beperkt. De figuur is een momentopname; zowel grotere als kleinere sprongen in de bodem kunnen op andere momenten in de berekening voorkomen.

In Figuur 7.14 is te zien dat ter plaatse van locatie M2, M3 en M4 depositie plaatsvindt tijdens vloed, en erosie tijdens eb. Voor locatie M5 en M6 geldt het omgekeerde. In het geval van M2, M4, M5 en M6 is de sedimentatie in de ene fase van het getij groter dan de erosie in de andere fase van het getij, waardoor netto sedimentatie optreedt. Ter plaatse van M3 is de erosie sterker dan de sedimentatie, en vindt in absolute zin erosie plaats.

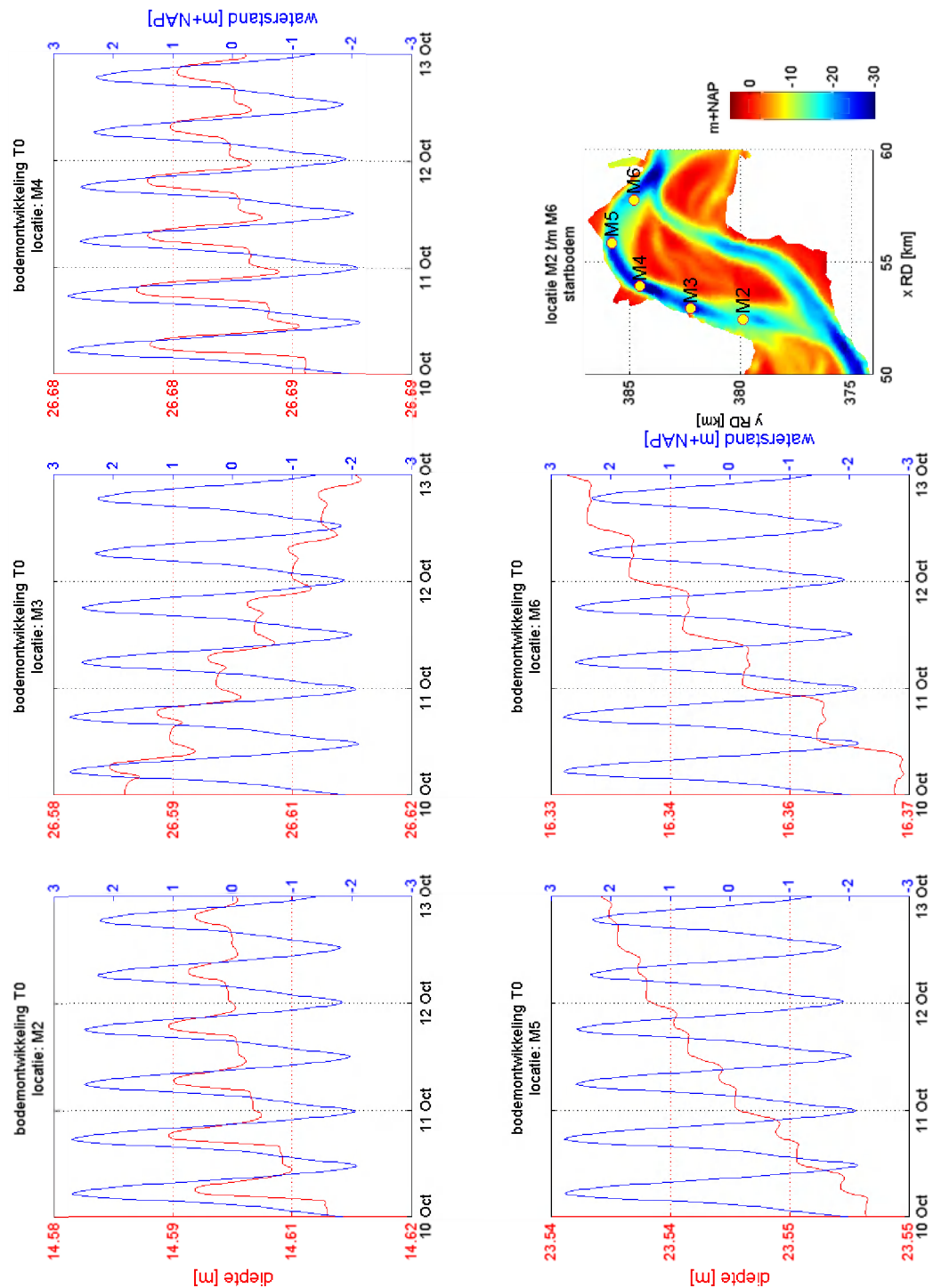
De sedimentconcentratie gedurende dezelfde periode is weergegeven in Figuur 7.15. Te zien is dat, hoe verder de getijgolf het Middelgat in propageert, hoe meer de sedimentconcentraties afnemen. Tijdens vloed is de sedimentconcentratie het hoogst op locatie M2, en neemt geleidelijk aan af tot aan locatie M5, waar vrijwel al het sediment is uitgezakt. Het neerslaan van het sediment tijdens vloed tussen locatie M2 en M5 komt overeen met de sedimentatie die tijdens vloed op deze locaties optreedt, zie Figuur 7.14, en met het afnemen van de stroomsnelheid, zie Figuur 7.16. Op locatie M5 zijn de sedimentconcentraties dusdanig laag dat sedimentatie tijdens vloed helemaal niet meer optreedt. Bij locatie M6 is de stroomsnelheid toegenomen ten opzichte van locatie M5, wat leidt tot opwoeling van het sediment. De sedimentconcentraties nemen toe, en er treedt tijdens vloed lichte erosie op.

Tijdens eb is de stroomrichting van oost naar west, en nemen zowel de sedimentconcentratie als de stroomsnelheid af vanaf locatie M6 naar locatie M5. Op beide locaties vindt tijdens eb sedimentatie plaats. Ter plaatse van locatie M5 is vrijwel al het sediment uitgezakt. Op locatie M2 tot en met M4 zijn de stroomsnelheden ten opzicht van locatie M5 verhoogd, evenals de sedimentconcentratie op deze locaties. Hieruit blijkt dat de verhoogde stroomsnelheid sediment opwoelt, wat overeenkomt met de erosie die tijdens eb optreedt ter plaatse van M2, M3 en M4, zie Figuur 7.13.

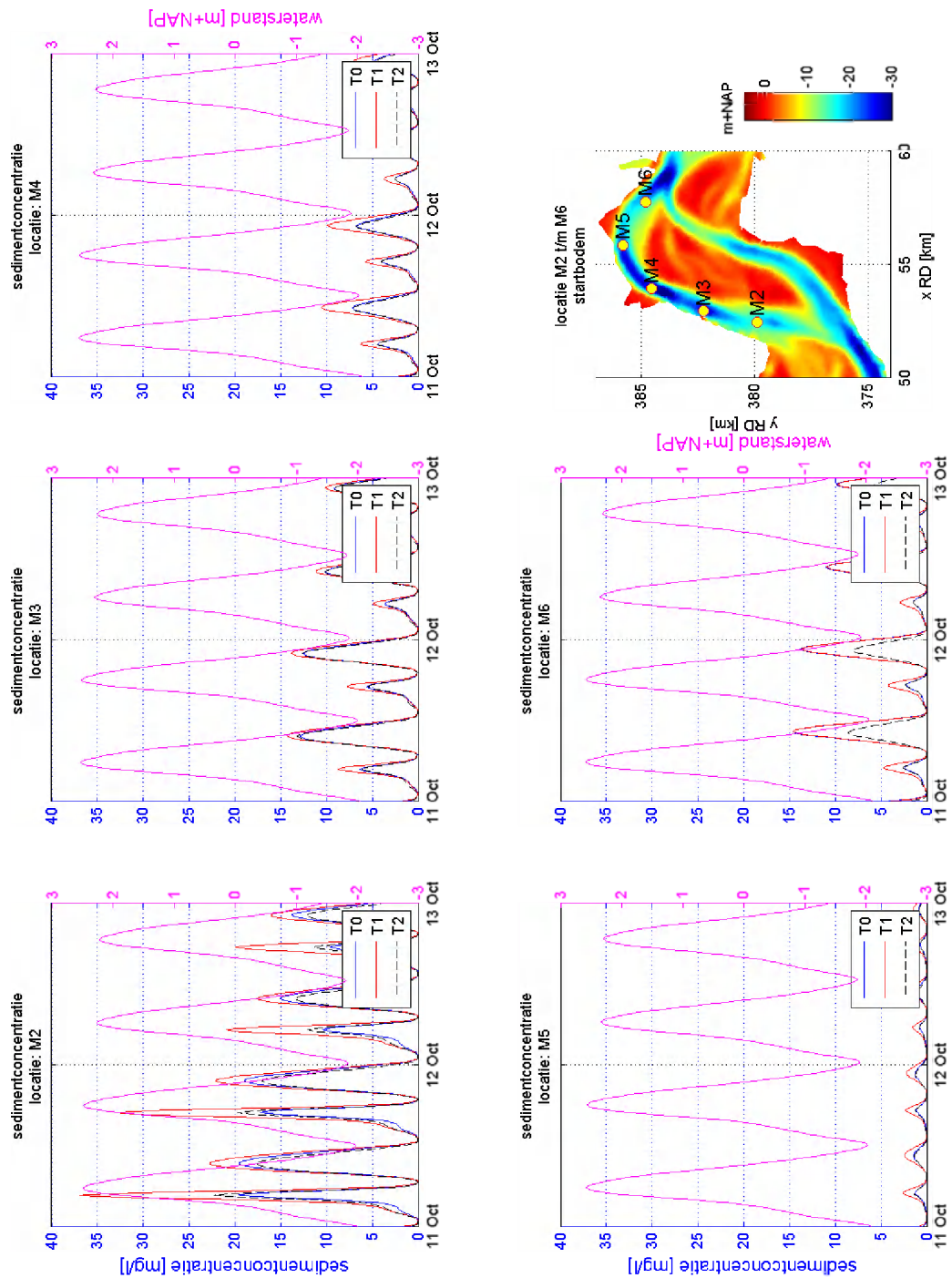
Hierboven beschreven beschouwing gaat op voor alle drie de scenario's. Tussen de drie scenario's treden verschillen op in morfologie, stroomsnelheid en sedimentconcentratie, maar de trend is gelijk.



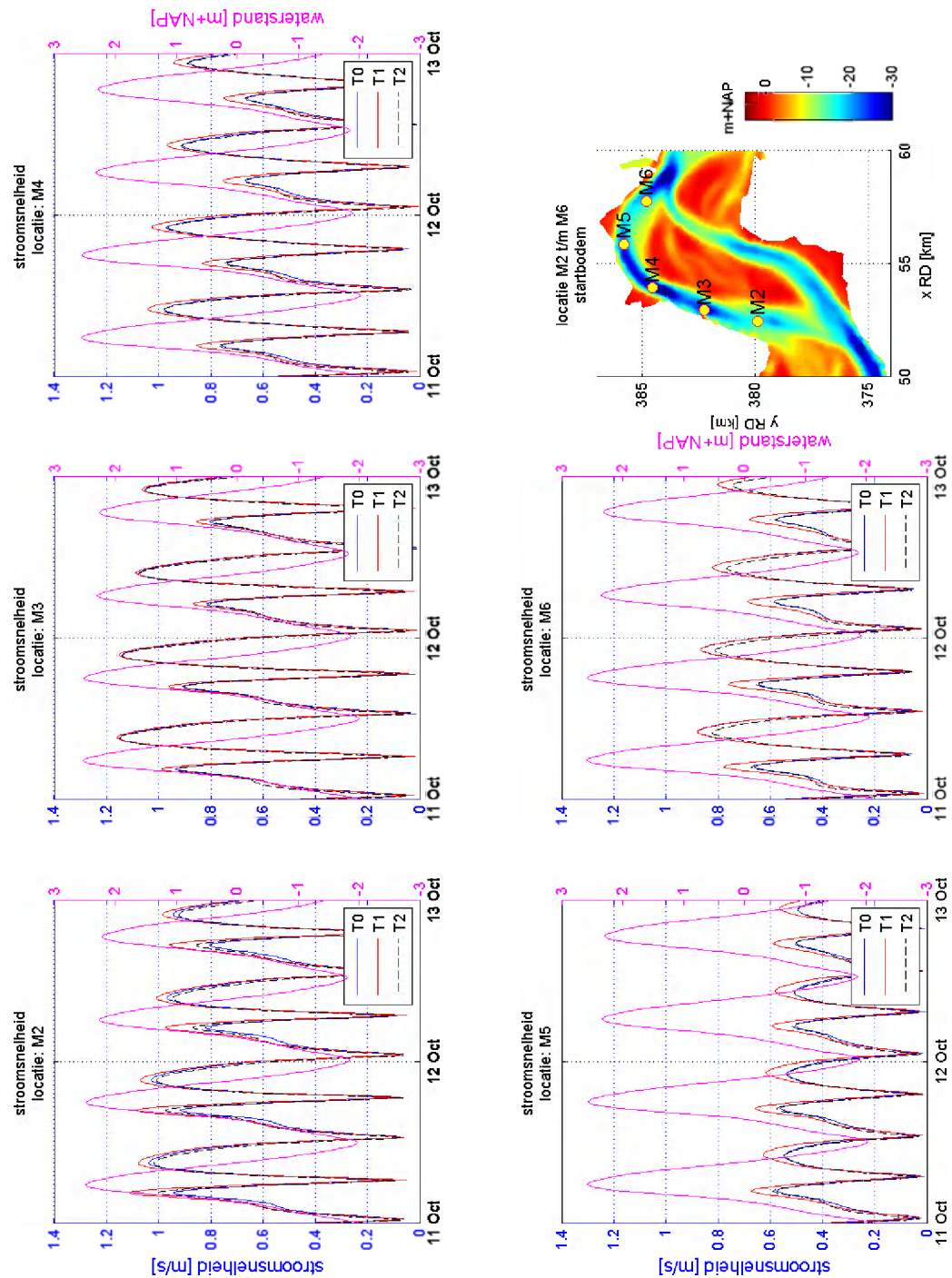
Figuur 7.13: Ontwikkeling van de FINEL2D modelbodem op de locaties M2 tot en met M6, voor de drie verschillende scenario's. De locaties M2 tot en M6 zijn in een aparte subplot opgenomen in de figuur.



Figuur 7.14: Ontwikkeling van de FINEL2D modelbodem op de locaties M2 tot en met M6, voor scenario T0. Er is ingezoomd op een korte periode. De waterstand is eveneens in de figuur weergegeven. Scenario T1 en T2 vertonen dezelfde trend als scenario T0. De locaties M2 tot en M6 zijn in een aparte subplot opgenomen in de figuur.



Figuur 7.15: Sedimentconcentratie op de locaties M2 tot en met M6, voor de drie verschillende scenario's. Er is ingezoomd op een korte periode. De waterstand is eveneens weergegeven. De locaties M2 tot en M6 zijn in een aparte subplot opgenomen in de figuur.

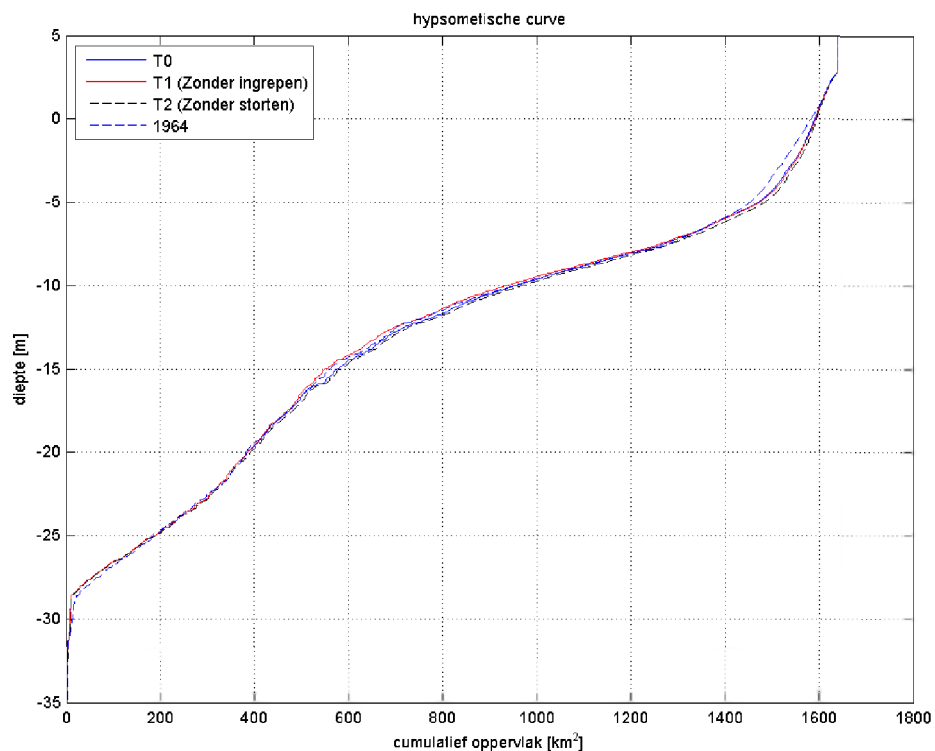


Figuur 7.16: Stroomsnelheid op de locaties M2 tot en met M6, voor de drie verschillende scenario's. Er is ingezoomd op een korte periode. De waterstand is eveneens weergegeven. De locaties M2 tot en M6 zijn in een aparte subplot opgenomen in de figuur.

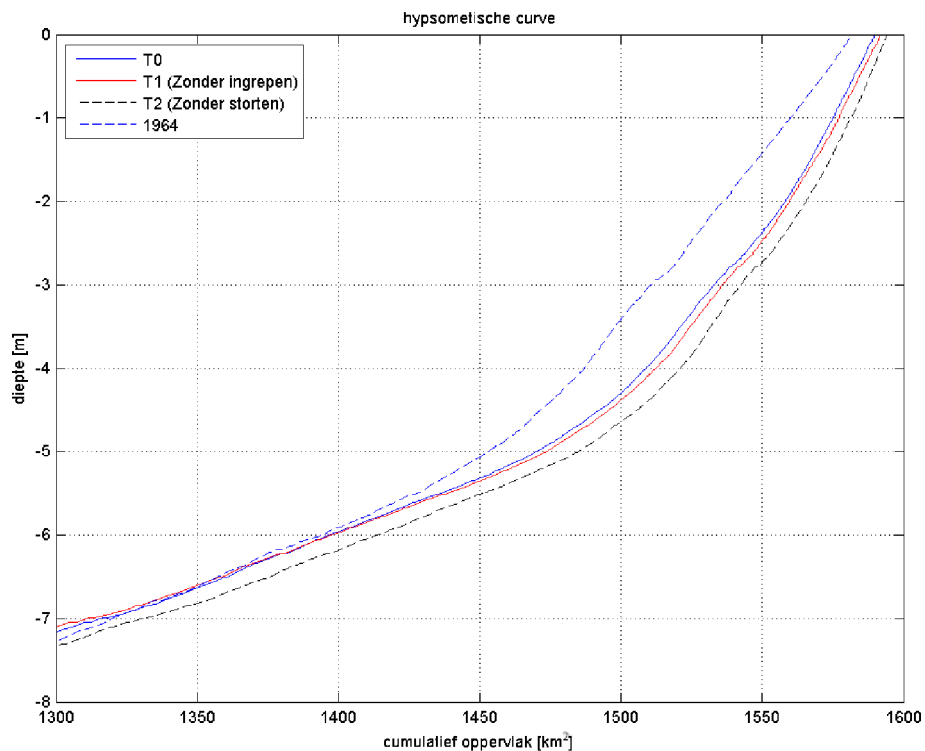
7.5 Hypsometrie

Het effect van menselijk ingrijpen op de hypsometrie van de Westerschelde is ook bekeken. De hypsometrische curve, waarin de diepte tegen het cumulatieve oppervlak uiteengezet is en daarmee als het ware een gemiddeld profiel representeert, is voor de drie scenario's weergegeven in Figuur 7.17. De hypsometrie van de startbodembodem is eveneens weergegeven. De curven liggen dichtbij elkaar, maar zijn niet identiek.

In Figuur 7.18 is ingezoomd op een stuk van de hypsometrische curven. Scenario T2 levert voor de gehele Westerschelde de laagste curve. Dit houdt in dat de gehele Westerschelde aan het eind van scenario T2 dieper is dan aan het eind van scenario T0 en scenario T1. Dit is logisch patroon, aangezien gebaggerd materiaal in scenario T2 niet wordt teruggestort, en er netto meer materiaal uit het systeem wordt onttrokken dan in scenario T0 en scenario T1. Figuur 7.18 laat verder zien dat de curve behorende bij scenario T1 flauwer is dan de curve behorende bij scenario T0. Uit deze berekeningen blijkt dat de Westerschelde steiler wordt al gevolg van menselijk ingrijpen.



Figuur 7.17: Hypsometrische curve van de Westerschelde voor de drie scenario's in 2002. Een detail is weergegeven in Figuur 7.18.



Figuur 7.18: Hypsometrische curve voor de drie scenario's in 2002. Detail van Figuur 7.17.

7.6 Conclusies

Bij alle drie de doorgerekende scenario's treedt sedimentatie in het Middelgat op. Menselijk ingrijpen beïnvloed vooral de mate van sedimentatie, maar niet de sedimenterende trend. Daarbij heeft morfologische beheer invloed op de hypsometrie: de Westerschelde wordt steiler door het morfologische beheer van de laatste decennia, een ontwikkeling die nog sterker was geweest als er meer sediment uit het estuarium zou zijn verwijderd.

CONCLUSIES

In voorliggende studies is aan de hand van een serie modelsimulaties de invloed van zandwinning, het stortbeleid en niet-erodeerbare lagen op de morfologie van de Westerschelde onderzocht. Daarnaast is gekeken wat de invloed van menselijk ingrijpen in de Westerschelde op de ontwikkeling van het Middelgat is geweest. In dit hoofdstuk worden voor elk onderdeel kort de belangrijkste conclusies weergegeven.

Zandwinning

De belangrijkste berekende effecten van een jaarlijkse zandwinning van $1,61\text{Mm}^3$ in vaste gebieden over een periode van 100 jaar zijn:

- een lager baggervolume voor het onderhoudsbaggerwerk van de vaargeul in de Westerschelde;
- een lagere bodemligging van enkele meters in en rond de zandwingebieden en ook rond de grootste stortgebieden, doordat er minder gebaggerd moet worden. Rond de zandwin- en stortgebieden is een uitsmerend effect in de stroomrichtingen te zien. De verschillen in bodemligging als gevolg van zandwinning zijn klein in vergelijking met de totale morfologische veranderingen van 100 jaar;
- een snellere getijvoortplanting en relatief een grotere getijslag.

De effecten van een geleidelijke zeespiegelstijging van 60cm over 100 jaar zijn:

- een gering morfologisch effect op de bodemligging in de monding. De verschillen zijn verwaarloosbaar ten opzichte van de totale morfologische veranderingen van 100 jaar;
- een verhoging van de export van sediment uit de Westerschelde naar de monding die na 100 jaar oploopt tot een verdubbeling.

Stortbeleid

In dit hoofdstuk zijn twee scenario's doorgerekend:

- Een T0 scenario waarbij een deel van het sediment van het oostelijk vaargeulonderhoud naar het westen gebracht wordt (de actuele 2011 situatie).
- Een T1 scenario waarbij al het sediment van het oostelijk vaargeulonderhoud ook in het oosten gestort wordt.

Het T1 scenario laat zien dat het oostelijk deel van de Westerschelde sterk verondiept in vergelijking met het T0 scenario. Het extra zand komt uiteindelijk terecht in de nevengeul Schaar van Waarde en Schaar van de Noord en mogelijk in de hoofdgeulen van het Land van Saeftinghe. Ondanks dat het oostelijk stortvak vol is na 100 jaar en dan rond het stortvak onrealistische patronen berekend worden laat dit scenario wel zien dat de gebieden buiten de hoofdgeul sterk verondiepen. Hieraan mag enige waarde gehecht worden omdat dit de enige locaties zijn waar het extra zand terecht kan komen in het oostelijk deel van de Westerschelde. Het oostelijk gedeelte raakt dus vol met mogelijk (verdere) toename van het verschil tussen de (gemiddelde) bodemligging in (hoofd)geul en intergetijdegebieden (verdere 'versteiling') tot gevolg.

Verder blijkt dat de getijslag bij het T1 scenario iets toeneemt. Dit kan een modelartefact zijn doordat het stortgebied boven water komt (en feitelijk verwijderd wordt), maar dit kan ook betekenen dat het westelijk deel (dat in dit oostelijk stort scenario ruimer geworden is) belangrijker is voor de getijdoordringing dan het oostelijk deel. Geconcludeerd kan worden dat dit oostelijk stortscenario geen gewenste reductie op de getijslag lijkt te bewerkstelligen.

Niet-erodeerbare lagen

Het verschil in morfologie bij simulaties met en zonder niet-erodeerbare laag na een morfologische periode van 100 jaar is relatief klein. Er zijn wel lokale bodem verschillen te zien. Het meest opvallende is de doorbraak van de ebgeul door de Schaar van de Spijkerplaat indien geen harde laag aanwezig is. Het wel of niet meenemen van de niet-erodeerbare laag heeft tot gevolg dat de geulen zich verleggen wat ook een kleine verschuiving in de intergetijdegebieden veroorzaakt. (bijvoorbeeld de Spijkerplaat en de Plaat van Ossensisse). Gezien de verwachte onnauwkeurigheid van deze niet-erodeerbare laag (en het feit dat de lagen eerder moeilijk erodeerbaar zijn dan niet-erodeerbaar waardoor migrerende geulen ze op lange termijn toch zouden kunnen insnijden) is het vermoeden dat in werkelijkheid de ontwikkeling zich ergens tussen deze twee uiterste scenario's zal bevinden.

Verondieping Middelgat

Met betrekking tot de verondieping van het Middelgat kunnen na aanleiding van 3 scenario-berekeningen over een periode van 38 jaar de volgende conclusies getrokken worden:

- Verondieping van het Middelgat treedt ook op wanneer geen menselijke ingrepen plaatsvinden. Het menselijk ingrijpen beïnvloed vooral de mate van sedimentatie.
- Menselijk ingrijpen heeft invloed op de hypsometrie. De Westerschelde wordt 'steiler' door menselijk ingrijpen.
- Menselijk ingrijpen heeft invloed op de getijslag. De getijslag neemt toe door uitgevoerd morfologisch beheer (baggeren/storten en zandwinnen) en zou nog groter zijn geworden als meer sediment aan land zou zijn gebracht.

LITERATUUR

- Svašek Hydraulics (2006). Morfodynamische berekeningen van de Westerschelde met behulp van FINEL2d. Rapport, referentie: GD/06119/1339.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013a). Actualisatie van het FINEL model van de Westerschelde, ten behoeve van Lange Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid, Rapport, referentie: 1630/U11275/GD/D, rapport A26.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013b). Update niet erodeerbare lagen kartering Westerschelde. Memo, referentie: 1630/U12072/GD/A, rapport A28.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013c). Probleemanalyse zandwinning in het Schelde estuarium; ten behoeve van Lange-Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. Rapport, referentie: BvL/U11296/1630/J, rapport G10.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013d). Synthese en conceptueel model; ten behoeve van Lange-Termijn Visie Schelde-estuarium, Veiligheid en Toegankelijkheid. Rapport G13.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013e). Grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde. Rapport G2.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013f). De rol van het slib in de sedimentbalans van de Westerschelde. Rapport G3.
- Consortium Deltares, IMDC, Svašek, Arcadis (2013g). The Influence of morphology on tidal dynamics and sand transport in the Scheldt estuary. Rapport G4.
- Haecon (2006). Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde. Rapport 1249760008/lvp.
- Jeuken, C., Helvert, M. van, Wang, Z. B., (2002). ESTMORF berekeningen naar de invloed van ingrepen en natuurlijke forceringen op de zandhuishouding van Westerschelde en monding, Fase 2, Z3246, WL| Delft Hydraulics
- Sas, M., Sutter R. de, Beirinckx, K., Aerts F., and Liek, G.J. (2011). Dredging works in the Westerschelde to deepen the navigation channel and to create ecologically valuable areas. *CEDA Dredging Days Rotterdam*.

