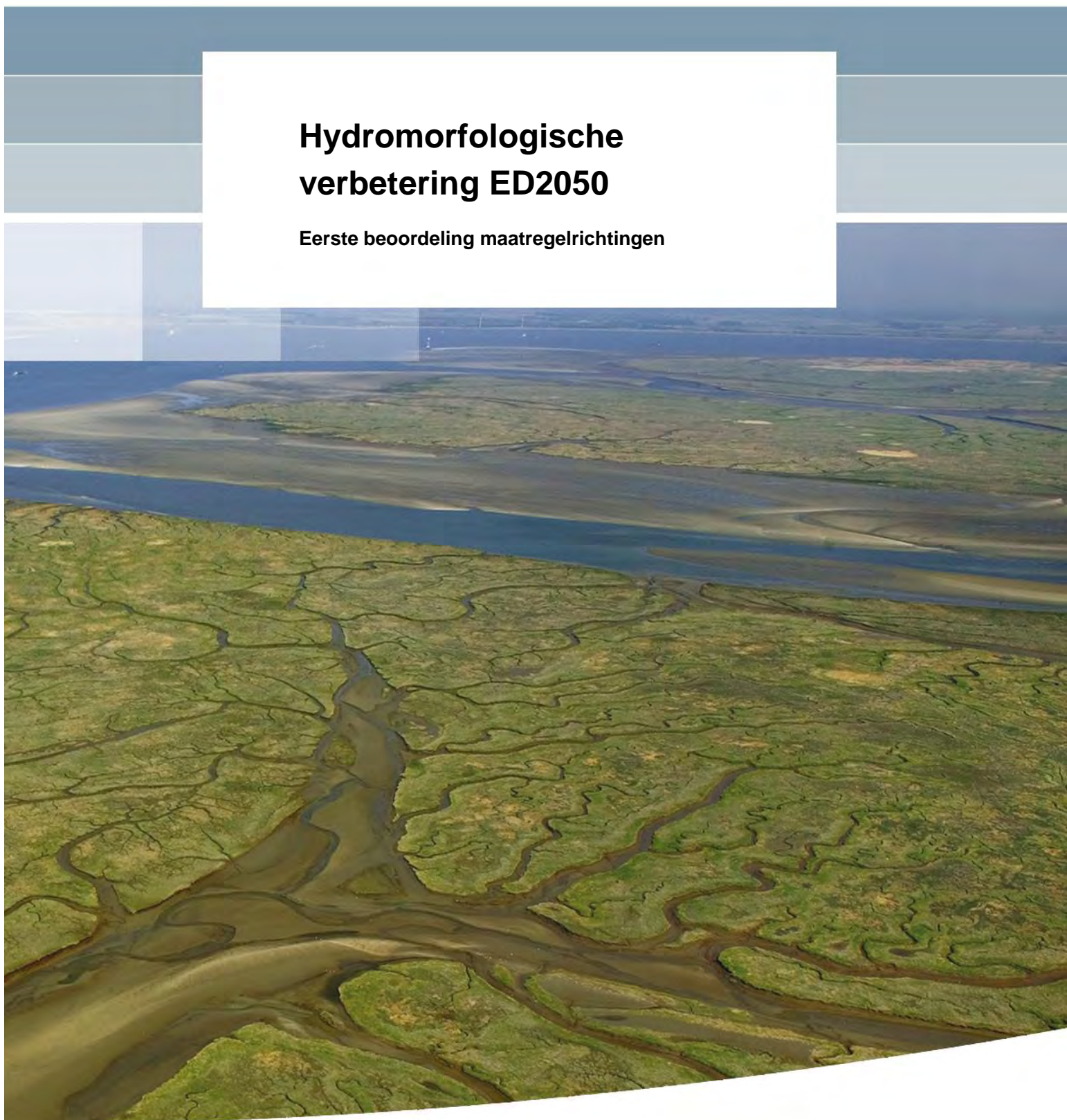


Hydromorfologische verbetering ED2050

Eerste beoordeling maatregelrichtingen



Hydromorfologische verbetering ED2050

Eerste beoordeling maatregelrichtingen

Bas van Maren
Reinier Schrijvershof
Bob Smits
Katherine Cronin
Mick van der Wegen

11200116-000

Titel

Hydromorfologische verbetering ED2050

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	11200116-000	11200116-000-ZKS-0004	98

Trefwoorden

Eems-Dollard estuarium, vertroebeling, maatregelstudie

Samenvatting

De doelstelling binnen het spoor Hydromorfologische Verbetering (onderdeel van het Meerjarig Adaptief Programma Eems-Dollard) is het ontwikkelen van maatregelen die een gewenst effect hebben op de morfologische ontwikkeling en op de ontwikkeling van de slibconcentraties in de waterfase. Om een kwantitatief inzicht te krijgen in het effect van deze maatregelen worden diverse modelinstrumenten ontwikkeld. Hiervoor is een ontwikkeltraject uitgezet waarbij de modelinstrumenten afwisselend worden (verder) ontwikkeld en toegepast. Voorliggend rapport beschrijft het effect van maatregelen berekend met een eerste opzet van het modelinstrumentarium. Op basis van deze resultaten zijn verdere ontwikkelpunten voor het model vastgesteld.

De gebruikte modellen suggereren dat de meest effectieve maatregel voor het reduceren van de slibconcentratie het onttrekken van slib uit de havens is. Het creëren van accommodatieruimte voor slib via een verlengde punt van Reide of het creëren van een overstromingsgebied lijkt vooral initieel tot een sterke verlaging van de slibconcentratie te leiden, maar op de langere termijn neemt de effectiviteit af. Maatregelrichtingen waarbij zandig materiaal (gebaggerd uit vaargeulen) onttrokken wordt lijken te leiden tot een getijamplificatie en toename van de slibconcentraties in het Eems estuarium ten zuiden van Delfzijl. Het aanleggen van een meander in de Dollard lijkt te leiden tot een afname van de getijamplitude en een afname in de slibconcentratie. De onzekerheid over de effecten van deze maatregelrichting is echter groot vanwege de benodigde aannames voor en tekortkomingen van het model.

De belangrijkste benodigde modelaanpassingen zijn de zeewaartse randvoorwaarden, het beter modelleren van golven, en een verbeterde parameterisatie van slib in het morfodynamische model.

Referenties

KPP code WR09

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
V 1.0	Juni 2017	Bas van Maren		Zheng Bing Wang		Frank Hoozemans	
V2.0	Sep 2017	Bas van Maren		Zheng Bing Wang		Frank Hoozemans	
V3.0	Dec 2017	Bas van Maren	<i>BM</i>	Zheng Bing Wang	<i>W</i>	Frank Hoozemans	<i>b.a.</i>

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Projectdoelstelling	1
1.2 Kwantificeren van maatregelrichtingen	2
1.3 Aanpak	3
2 Modelleren maatregelen	5
2.1 Algemene opzet	5
2.2 Autonome ontwikkeling (M0)	7
2.3 Onttrekken slib (M1)	9
2.4 Bagger- en stortstrategieën (M2)	10
2.5 Vergroten plaatareaal (M3)	11
2.6 Bevorderen sedimentatie (M4)	13
2.7 Toevoegen binnendijks intergetijdengebied (M5)	14
2.8 Dynamiek Eems Rivier (M6)	17
2.9 Presentatie van modelresultaten	18
3 Resultaten	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Autonome ontwikkeling (M0)	21
3.2.1 Effect op morfologie	21
3.2.2 Effect op slibconcentraties	24
3.2.3 Waterbeweging en slibtransport	25
3.3 Onttrekken slib (M1)	28
3.3.1 Effect op morfologie	28
3.3.2 Effect op slibconcentraties	29
3.3.3 Waterbeweging en slibtransport	31
3.4 Bagger- en stortstrategieën (M2)	31
3.4.1 Effect op morfologie	31
3.4.2 Effect op slibconcentraties	33
3.4.3 Waterbeweging en slibtransport	35
3.5 Vergroten plaatareaal (M3)	37
3.5.1 Effect op morfologie	37
3.5.2 Effect op slibconcentraties	40
3.5.3 Waterbeweging en slibtransport	40
3.6 Bevorderen sedimentatie (M4)	42
3.6.1 Effect op morfologie	42
3.6.2 Effect op slibconcentraties	46
3.6.3 Waterbeweging en slibtransport	47
3.7 Toevoegen binnendijks intergetijdengebied (M5)	51
3.7.1 Effect op morfologie	51
3.7.2 Effect op slibconcentraties	56
3.7.3 Waterbeweging en slibtransport	58
3.8 Dynamiek Eems Rivier (M6)	59
3.8.1 Effect op morfologie	59
3.8.2 Effect op slibconcentraties	61
3.8.3 Waterbeweging en slibtransport	63
3.9 Effect maatregelen op ecotopen	64

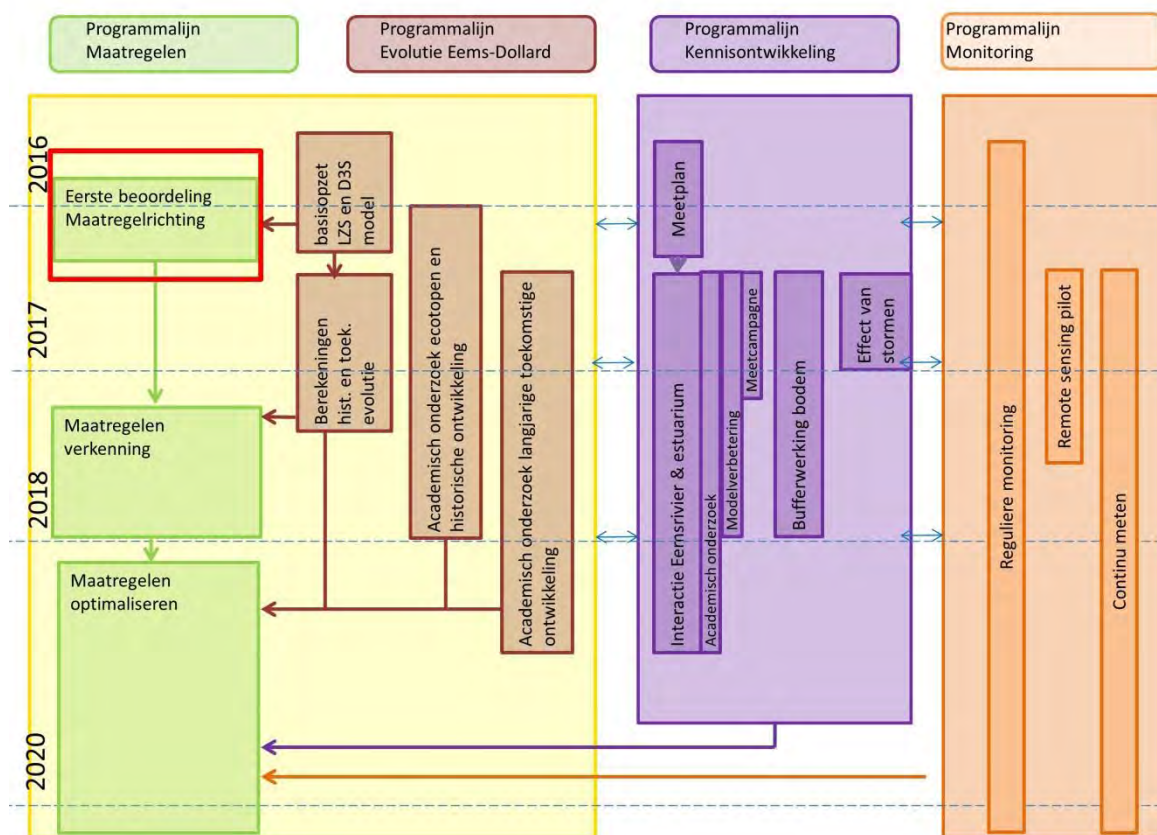
3.9.1	Aanpak	64
3.9.2	Autonome ontwikkeling	66
3.9.3	Effect van maatregelen	68
3.10	Effect maatregelen op baggerbezwaar	70
4	Interpretatie effect maatregelen	73
4.1	Geschiktheid modelinstrumentarium	73
4.1.1	Autonome ontwikkeling	73
4.1.2	Maatregelrichting 'Onttrekken slib'	74
4.1.3	Maatregelrichting 'Bagger- en stortstrategieën'	75
4.1.4	Maatregelrichting 'Vergroten Plaatareaal'	75
4.1.5	Maatregelrichting 'Bevorderen sedimentatie'	75
4.1.6	Maatregelrichting 'Toevoegen binnendijs intergetijdengebied'	76
4.1.7	Maatregelrichting 'Dynamiek Eems Rivier'	77
4.2	Synthese maatregelen en transportprocessen	77
4.2.1	Getijdynamiek	79
4.2.2	Estuariene circulatie	79
4.2.3	Sediment onttrekken en bevorderen sedimentatie	80
4.2.4	Ecotopen	81
4.3	Synthese en aanpassing maatregelrichtingen	81
5	Conclusies en aanbevelingen	83
5.1	Conclusies	83
5.2	Aanbevelingen	85
6	Referenties	89
 Bijlage(n)		
A	Parameterisatie zeespiegelstijging	A-1
B	Ecotopenverdeling maatregelrichtingen	B-1

1 Inleiding

1.1 Projectdoelstelling

De ambitie van het Rijk en de Regio is dat de Eems-Dollard in 2050 voldoet aan het ecologisch streefbeeld, door stapsgewijs te werken en adaptief in te spelen op nieuwe ontwikkelingen en inzichten. Maatregelen voor ecologische verbetering worden zoveel mogelijk gecombineerd met andere ontwikkelingen in het gebied binnen een Meerjarig Adaptief Programma (MAP) Eems-Dollard (ED2050, 2016). Een onderdeel binnen dit MAP is het spoor Hydromorfologische Verbetering (HV).

De leidende doelstelling binnen dit spoor is het ontwikkelen van maatregelen die een gewenst effect hebben op de morfologische ontwikkeling en op de ontwikkeling van de slibconcentraties in de waterfase. Hiervoor is het nodig een kwantitatief inzicht te krijgen in het effect van maatregelen op de morfologie en slibverspreiding in het Eems-Dollard-gebied. Om dit doel te bereiken is een meerjarig programma opgesteld dat loopt tot en met 2020 – zie Dankers et al. (2016) en Figuur 1.1. Dit programma kent 4 hoofdlijnen: Maatregelen, Evolutie Eems Dollard, Kennisontwikkeling en Monitoring.



Figuur 1.1 Opzet HV spoor binnen MAP 2050, met onderscheid in verschillende programmalijnen, gebaseerd op Dankers et al. (2016). De voorliggende rapportage richt zich op het rode kader.

Een onderdeel van dit plan van aanpak is het opzetten van een lange-termijn morfodynamisch zand-slib (LZS) model en een slib (D3S) model. Het LZS-model berekent de

autonome morfologische evolutie van het Eems Estuarium tot aan 2100, en het effect van maatregelen hierop. Het D3S-model berekent de invloed van maatregelen op de slibverdeling, gebruik makend van bodems berekend met het LZS-model.

In de huidige projectfase wordt een basisversie van het LZS-model opgesteld, waarmee het effect van maatregelen indicatief wordt doorgerekend ('eerste beoordeling maatregelen', rood omkaderd in Figuur 1.1). Parallel hieraan

- wordt een geomorfologische kartering en studie naar de ontwikkeling van de Eems-Dollard uitgevoerd (Universiteit Utrecht, binnen de programmalijs 'Evolutie Eems-Dollard'), en
- worden metingen uitgevoerd naar de interactie tussen de Eems Rivier en het Eems Estuarium (programmalijs 'Kennisontwikkeling').

De modellen zullen gedurende de looptijd van het spoor Hydromorfologische Verbetering verbeterd worden, waarmee vervolgens het effect van maatregelen nauwkeuriger kan worden doorgerekend (zie Figuur 1.1). De resultaten van de deze studie worden elke twee maanden besproken binnen de projectgroep HV. Deze projectgroep bestaat uit projectmedewerkers vanuit Deltares, Rijkswaterstaat, Universiteit Utrecht, Universiteit Delft, Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, en RHDHV. Tijdens deze bijeenkomsten worden resultaten gepresenteerd en onderling bediscussieerd, en worden vervolgstappen vastgesteld.

Voorliggend rapport voert een verkenning op hoofdlijnen uit naar het effect van een 6-tal maatregelrichtingen op de morfologie en het slibgehalte van het Eems Estuarium, voor de huidige situatie en in 2050. Een korte inleiding tot het kwantificeren van maatregelen wordt gegeven in §1.2, gevolgd door de algemene aanpak gevolgd voor deze studie in §1.3. De scenario's worden toegelicht in Hoofdstuk 2. Resultaten worden beschreven in Hoofdstuk 3, en geïnterpreteerd in Hoofdstuk 4. Conclusies en aanbevelingen volgen in Hoofdstuk 5.

1.2 Kwantificeren van maatregelrichtingen

In deze studie wordt het effect van een 6-tal maatregelrichtingen doorgerekend. Deze maatregelrichtingen zijn gebaseerd op het eerder uitgevoerde KRW onderzoek (samengevat in Taal et al., 2015) en het MIRT onderzoek (E&E, 2015). Deze maatregelen richten zich op een aanpassing van het bagger- en stortbeleid (onttrekken van slib, storten in luwe gebieden), het bevorderen van sedimentatie (door creëren van luwe gebieden of overstromingsgebieden) of het beïnvloeden van het getij (via het verlengen van de Eems Rivier of het vergroten van plaatareaal). Gedurende de looptijd van de studie zijn deze maatregelen in meer detail ingevuld, in overleg met betrokkenen (projectteam ED2050). De maatregelen zelf worden in meer detail besproken in Hoofdstuk 2.

De invloeden van menselijk ingrijpen op vertroebeling (zoals vaargeulverdiepingen, ingrepen op plaatareaal, effecten baggeren en storten) worden nog niet goed begrepen. De redenen hiervoor zijn dat (1) lange, continue meetreeksen van slibconcentraties zeldzaam zijn (o.a. Fabricius et al., 2013), (2) meerdere menselijke ingrepen simultaan plaatsvinden, en daarom op basis van meetreeksen niet gekwantificeerd kan worden welke consequenties individuele ingrepen hebben gehad, (3) de slibconcentratie zich niet instantaan maar langzaam aanpast (waarbij complexe terugkoppelingsmechanismen een rol kunnen spelen; zie Winterwerp et al., 2013), en (4) estuarien sedimenttransport erg complex is (gedreven door ruimtelijke variaties en de asymmetrie in het getij, estuariene circulatie, en lag effecten). Het effect van individuele maatregelen kan wel worden gekwantificeerd met een numeriek model. In het verleden zijn modellen vooral gebruikt om het effect van historische menselijke ingrepen op sedimenttransport door te rekenen (zoals verdiepingen en wijzigingen in het bagger- en

stortbeleid (o.a. de Jonge et al., 2014; van Maren et al., 2015, van Maren en van Kessel, 2016).

Het is lang bekend dat in estuaria zout-gedreven stromingen sediment landwaarts transporteren door estuariene circulatie (Meade, 1969), en dat deze estuariene circulatie sterk toeneemt met waterdiepte h (met h^3 ; Hansen en Rattray, 1965). Zowel verdieping als zeespiegelstijging zal daarom leiden tot een toename in de estuariene circulatie en daardoor in landwaarts transport, wat onderbouwd wordt door recente numerieke studies (Chua en Xu, 2014; Prandle en Lane, 2015; Achete et al., 2017).

Studies naar het lange-termijn effect van toekomstige maatregelen op morfologie en sedimenttransport zijn beperkt. Morfologische studies zijn meestal beperkt tot het korte-termijn (enkele jaren) doorrekenen van het effect van constructies (bijvoorbeeld Prumm en Iglesias, 2016; Kuang et al., 2017) of veranderen van bagger- en stortbeleid (Paarlberg et al., 2016). Over langere tijdschalen worden maatregelen vooral morfostatisch (i.e. zonder bodemaanpassing) doorgerekend (Achete et al., 2017; van Maren en Cronin, 2016; van Maren en van Kessel, 2016) of wordt een geïdealiseerde bodemgeometrie opgelegd (Hibma et al., 2003; van der Wegen et al., 2008). Numerieke modellen met dergelijke geïdealiseerde bodems suggereren dat estuaria niet in staat zijn zeespiegelstijging bij te houden (o.a. Dissanayake et al., 2012; van der Wegen, 2013).

Effectstudies naar klimaatveranderingen in combinatie met menselijke ingrepen op morfologie en sedimenttransport zijn nog niet eerder doorgerekend met een realistische bodemligging. Omdat het gaat om voorspellingen (met zowel zand als slib) in een realistische bodemgeometrie van het Eems Estuarium (waar nog relatief weinig ervaring mee is) worden de maatregelrichtingen vooralsnog tot 2050 doorgerekend (in een latere projectfase worden voorspellingen tot 2100 gedaan). De aanpak wordt in de volgende paragraaf toegelicht.

1.3 Aanpak

Het doel van dit project is om het effect van uiteenlopende maatregelrichtingen op de toekomstige (2050) morfologie, slibverdeling en ecopenverdeling uit te rekenen - de invloed van maatregelen op terrestrische en aquatische ecologie wordt in een vervolgstadium van het project behandeld. De door te rekenen maatregelen hebben een effect op de morfologie, maar de morfologie zelf is autonoom ook aan veranderingen onderhevig. Daarom is het noodzakelijk een model te ontwikkelen dat zowel de lange-termijn morfologische veranderingen kan voorspellen, als de slibverdeling nauwkeurig kan berekenen.

Bodemveranderingen door zandtransport (op lange en korte termijn) worden sterk bepaald door een lokale herverdeling van sediment. Dit kan worden gemodelleerd met een model waarin morfologische versnellingstechnieken worden toegepast. Deze aanpak is minder geschikt voor slibtransport omdat morfologische versnellingstechnieken beperkt toepasbaar zijn voor slibdynamica. Om het effect van bodemveranderingen op de slibverdeling nauwkeurig uit te rekenen (wat de doelstelling is van deze studie) is een 3D model met zout-gedreven stromingen en een realistische golfforcering noodzakelijk. En wordt daarom gebruik gemaakt van twee modellen: een model om bodemveranderingen te berekenen (LZS), en een model om het slibtransport te berekenen (D3S). Het LZS-model berekent bodemveranderingen door zand- en door slibtransport. De berekende veranderingen zijn vooral betrouwbaar als deze worden bepaald door zandtransport: bodemveranderingen door sedimentatie van slib zijn in de huidige fase van de modelontwikkeling nog onvoldoende betrouwbaar. De met het LZS-model berekende bodems zijn invoer voor berekeningen met het D3S-model.

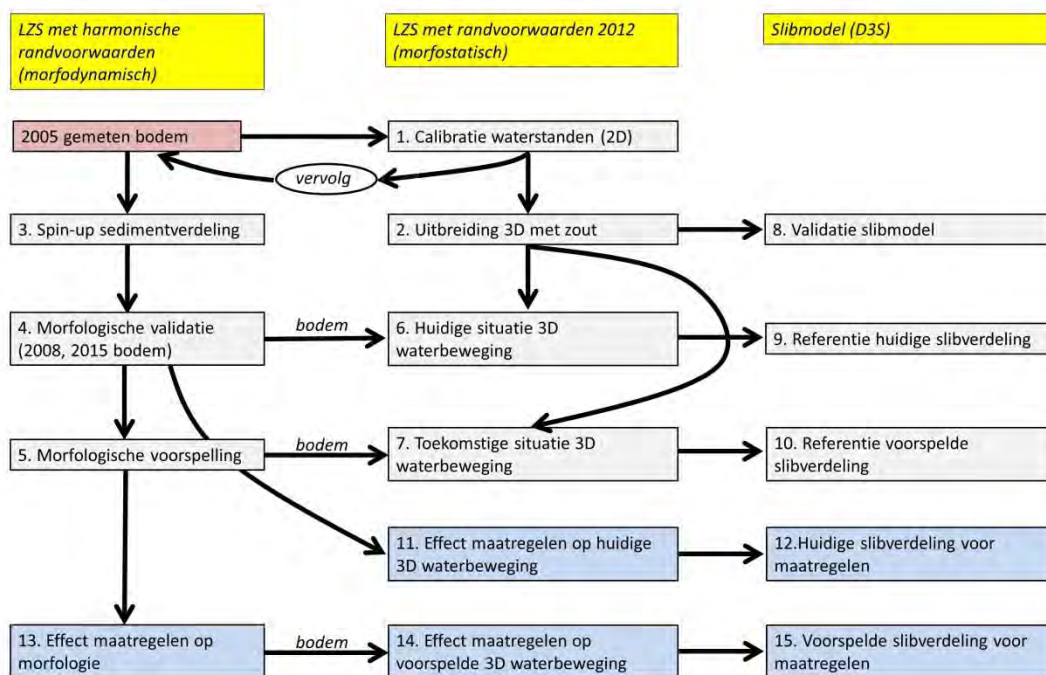
Naast de voorspelling van de autonome ontwikkeling tot 2050 worden ook maatregelrichtingen gesimuleerd met het LZS-model en het D3S-model. Maatregelen worden extreem gedimensioneerd om maximale impacts te kunnen kwantificeren. Wanneer maatregelen minimaal zouden worden gedimensioneerd, valt de uitkomst weg in de ruis gegenereerd door onnauwkeurigheden van de modelvoorspelling. Het gaat in deze verkennende fase bij de berekeningen vooral om de richting en de orde-grootte van het effect van de verschillende maatregelen.

2 Modelling maatregelen

2.1 Algemene opzet

Het effect van maatregelen wordt doorgerekend met het LZS-model en het D3S-model. Deze modellen zijn gekalibreerd volgens het stappenplan beschreven in Figuur 2.1. Stappen 1 t/m 7 zijn in detail besproken in het rapport over de opzet van het LZS-model (Deltares, 2017a), stappen 8 t/m 10 in het rapport over de opzet van het D3S-model (Deltares, 2017b). Belangrijk in deze opzet voor de berekening van maatregelen is het volgende:

- Het LZS-model voorspelt de bodemligging in 2050 met behulp van astronomisch getij als randvoorwaarde (M_2 , S_2 en M_4 forcering). Het huidige LZS-model is een dieptegemiddeld model waarmee bodemveranderingen door zand redelijk goed worden beschreven, maar het slibtransport wordt onderschat. Hierdoor worden vooral de bodemveranderingen t.g.v. zandtransport door het model gesimuleerd.
- Het D3S-model is een 3D model waarmee het slibtransport wordt berekend. Dit model maakt gebruik van realistische randvoorwaarden; hiervoor wordt het jaar 2012 gebruikt. Het model is morfostatistisch (geen morfologische veranderingen), en de berekening van de waterbeweging is losgekoppeld van de slibberekening.



Figuur 2.1 Samenhang diverse onderdelen van de modellering huidige situatie (tijdsafhankelijke randvoorwaarden) de voorspelling (harmonische randvoorwaarden), in combinatie met simulaties met het slibmodel (D3S). Het effect van maatregelen is aangegeven in blauw.

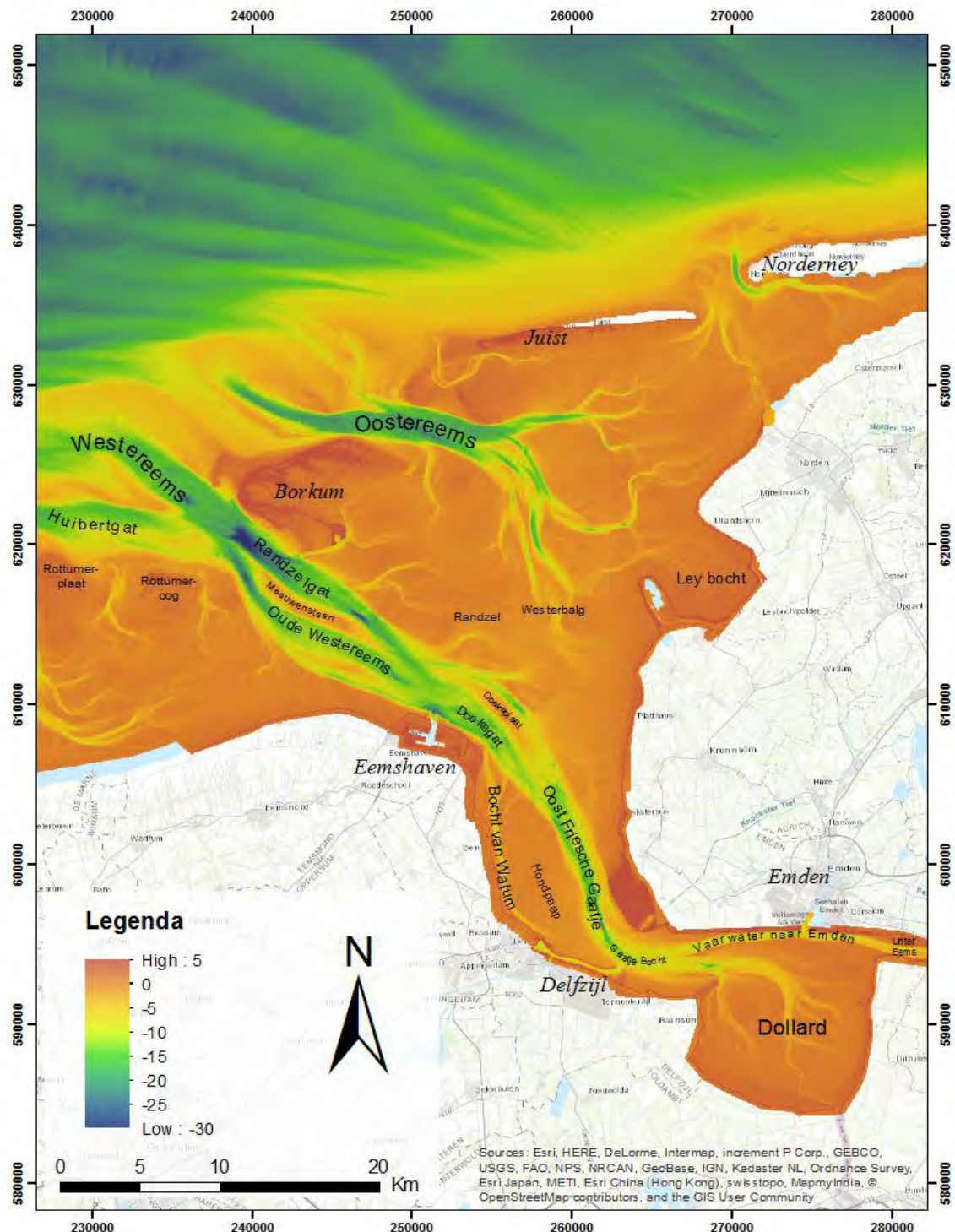
In deze rapportage worden stappen 11 t/m 15 behandeld. Hierbij worden 6 maatregelrichtingen ingebouwd in het LZS-model, en doorgerekend tot aan 2050 (stap 13). Voor zowel de huidige situatie (stap 11) als de voorspelde bodem in 2050 (stap 14) wordt per maatregel de 3D waterbeweging doorgerekend. Op basis van deze waterbeweging worden per maatregelrichting slibberekeningen uitgevoerd voor de huidige situatie (stap 12) en de

voorspelde bodem in 2050 (stap 15). Deze modeluitkomsten worden als volgt geïnterpreteerd:

- Het effect van maatregelen op de morfologische ontwikkelingen wordt gekwantificeerd door de voorspelling van de autonome morfologische ontwikkeling in 2050 (stap 5) te vergelijken met de voorspelling van het morfologische effect van de maatregelen in 2050 (stap 11).
- Het korte-termijn-effect van maatregelen op de slibverdeling wordt gekwantificeerd door per maatregel de berekende slibverdeling in 2014 (stap 12) te vergelijken met de referentie slibverdeling (stap 9) in 2014.
- Het effect van maatregelen op de toekomstige slibverdeling wordt gekwantificeerd door per maatregel de berekende slibverdeling in 2050 (stap 15) te vergelijken met de voorspelde referentie slibverdeling in 2050 (stap 10).

In dit rapport wordt veelvuldig verwezen naar namen van geulen, platen en havens. De naamgeving hiervan is terug te vinden in de morfologische kaart hieronder (Figuur 2.2).

In de volgende paragrafen van dit hoofdstuk wordt beschreven hoe deze maatregelen zijn geïmplementeerd in het LZS-model en in het D3S-model. Eerst wordt de referentie (de autonome ontwikkeling) besproken (§2.2), gevolgd door de maatregelen (§2.3 - 2.8). De maatregelen worden gevisualiseerd op een zo uniform mogelijke manier, toegelicht in §2.9.



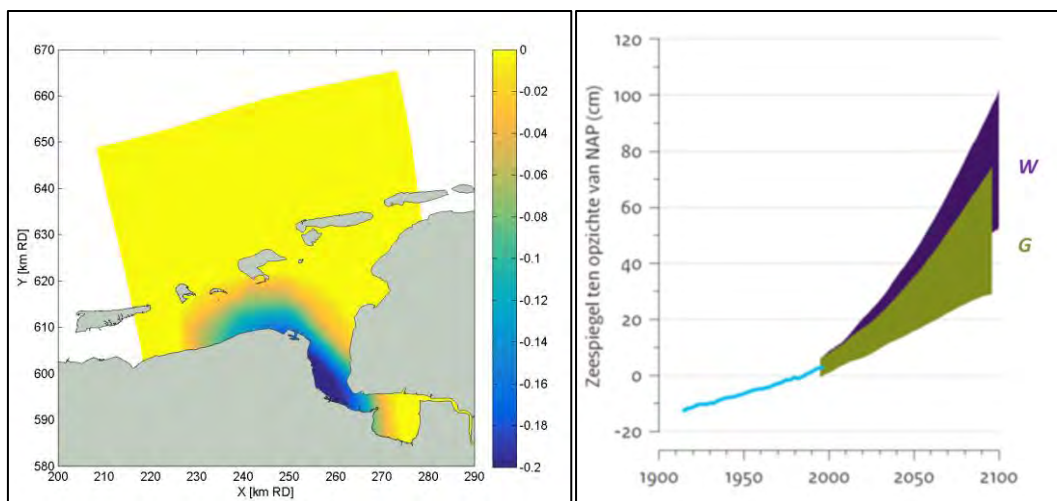
Figuur 2.2 Huidige bodemligging van het Eems estuarium met naamgeving van de belangrijkste morfologische geulen en platen.

2.2 Autonome ontwikkeling (M0)

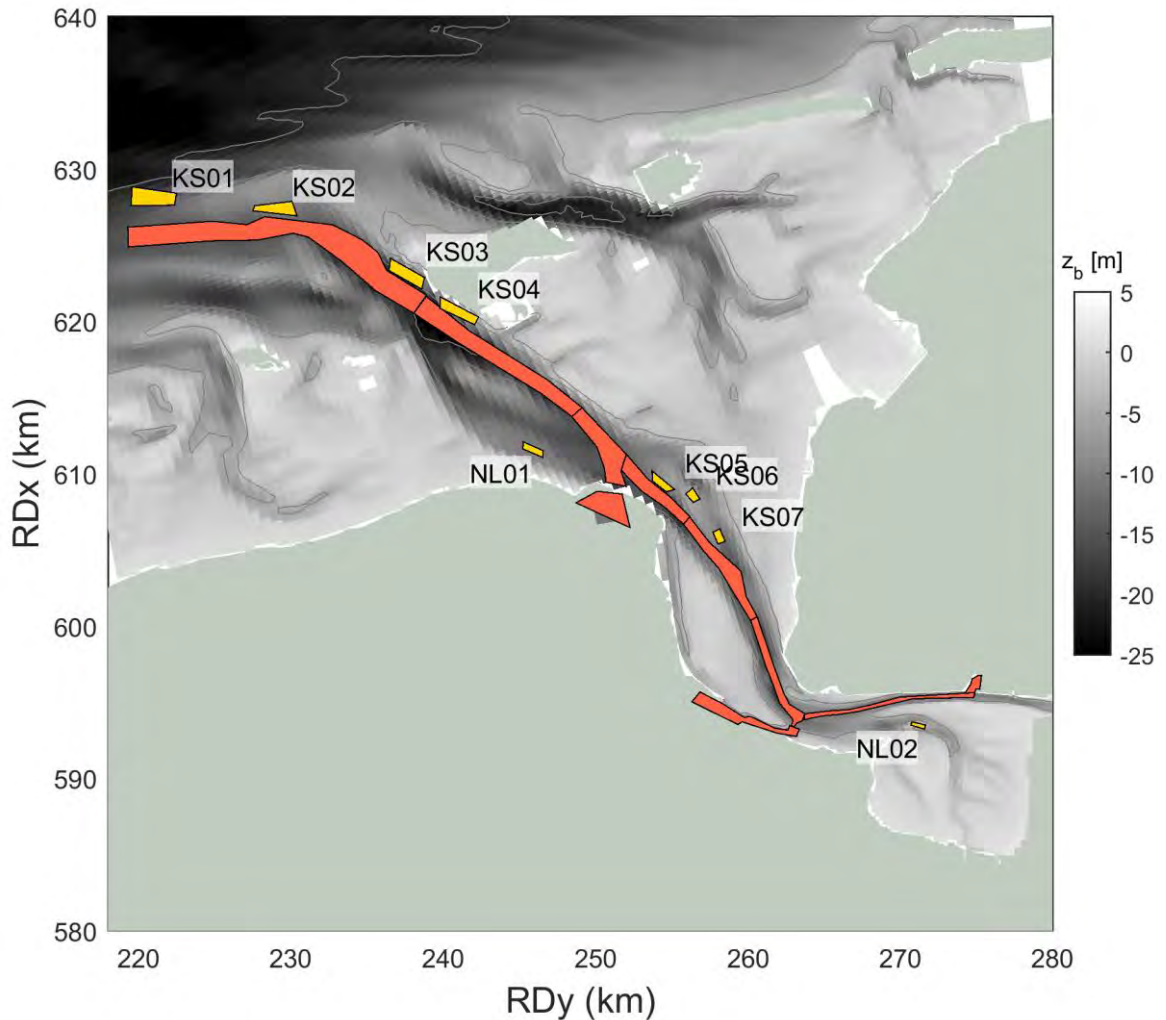
De autonome ontwikkeling is in detail besproken in de rapportage van het LZS-model (Deltares 2017a) en het D3S-model (Deltares 2017b) en wordt hier samengevat. Bij de

autonome ontwikkeling wordt gerekend met bodemdaling, zeespiegelstijging en onderhoudsbaggerwerk van havens en vaarwegen. Deze kunnen mogelijk in de toekomst veranderen. De instellingen hiervoor zijn nu als volgt:

- Voor bodemdaling wordt de voorspelling van NAM (2014) aangehouden (zie Figuur 2.3 links). Volgens deze voorspelling daalt de bodem nabij Delfzijl nog maximaal 16 cm tot 2080. Er wordt in deze studie uitgegaan van een lineaire daling, wat neerkomt op 9 cm in 2050. Zie Appendix A voor details en motivatie voor deze keuze.
- Voor zeespiegelstijging wordt de voorspelling van het KNMI (2015) aangehouden (Figuur 2.3 rechts). Hierbij stijgt de zeespiegel met 0,67 cm/jaar van 1985 tot aan 2050, gevolgd door 1,2 cm/jaar tot aan 2100. Zie Appendix A voor details en motivatie voor deze keuze.
- Vaarwegen en havens worden in het model gebaggerd, waarna het sediment gestort wordt op locaties horend bij die baggerlocaties. Hiervoor worden de bagger- en stortlocaties gevolgd zoals gedefinieerd door Mulder (2012) - zie Figuur 2.4. In het LZS-model wordt sediment gebaggerd wanneer een kritische bodemhoogte wordt overschreden; in het D3S-model wordt al het afgezette materiaal op een vast tijdsinterval verwijderd. Het meeste slibrijke materiaal wordt jaarlijks gebaggerd in het Duitse deel van de vaarweg bovenstrooms van Knock, en gestort op de locaties 5-7. Vanuit de Nederlandse havens wordt ruim een miljoen ton slib gebaggerd: dit werd vroeger verspreid op stortlocaties NL01 en NL02. Tegenwoordig wordt sediment vanuit Delfzijl vooral via opwoeling verplaatst, en niet meer door baggeren en storten - dit is echter nog niet in het model geïmplementeerd. Sediment in de vaargeulen zeewaarts van Knock is vooral zandig – baggeren en storten hier wordt alleen door het LZS model gemodelleerd. De hoeveelheden gebaggerd zand zijn echter veel kleiner dan de hoeveelheden gebaggerd slib.



Figuur 2.3 Links: de verwachte bodemdaling (2013-2080) veroorzaakt door de gasproductie uit het Groningen veld (in m/eeuw), geprojecteerd op het modelrooster (NAM, 2014). Rechts: gemeten en voorspelde zeespiegelstijging volgens KNMI (2015). Hierbij wordt voor deze studie de bovengrens van het W –scenario aangehouden (zie bijlage A).

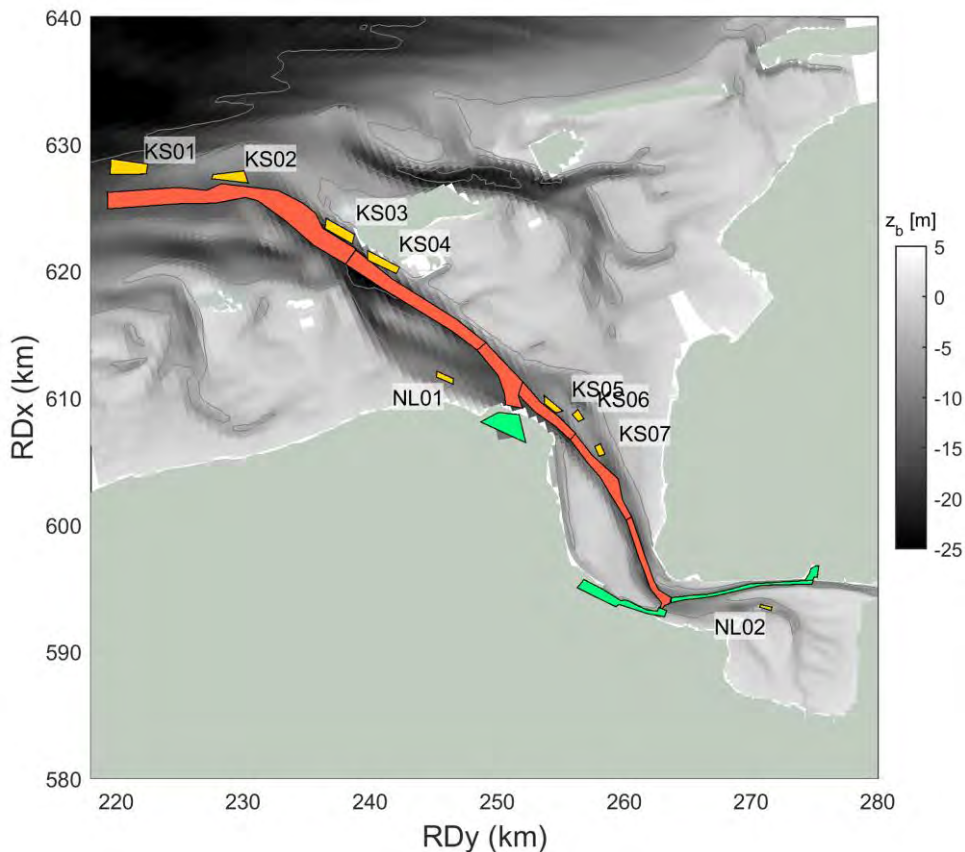


Figuur 2.4 Polygonen met vaarwegonderhoudsvakken (rood) en stortlocaties (oranje). Het vaarwater naar Emden en de havens worden op een diepte van 10 meter onderhouden. De vaargeul van Delfzijl tot aan Eemshaven wordt gebaggerd tot 11 meter diepte; zeewaarts van Eemshaven tot 12 meter. Vanwege de gridresolutie zijn de onderhoudspolygonen breder dan de daadwerkelijke geul.

2.3 Onttrekken slib (M1)

Slib wat in havens bezinkt wordt normaal gesproken gebaggerd en teruggestort in het estuarium. Eerdere studies (o.a. Van Maren et al., 2015) hebben uitgewezen dat een dergelijke onttrekking leidt tot een afname in de slibconcentratie. Deze maatregel is eerder doorgerekend met het WED model (Deltares, 2015). Deze maatregel wordt nogmaals doorgerekend binnen de huidige studie om (1) met het LZS model het effect van onttrekking van de zandfractie uit de havens op de morfologie van het Eems estuarium te bepalen (hoewel dit naar verwachting beperkt zal zijn) maar vooral om (2) met het D3S model het effect van onttrekken van slib voor de bodemligging van 2050 te kwantificeren (welke meer door autonome ontwikkeling beïnvloed zal zijn dan door onttrekkingen). Naar verwachting zal deze maatregel niet of nauwelijks effect op de waterbeweging hebben.

Dit scenario wordt geïmplementeerd door al het sediment dat bezinkt in slibrijke gebieden niet terug te storten binnen het estuarium maar te onttrekken aan het systeem (groene vakken in Figuur 2.5). Dit geldt voor de havens (Eemshaven, Delfzijl, Emden) en het vaarwater naar Emden, in zowel het LZS-model als het D3S-model.

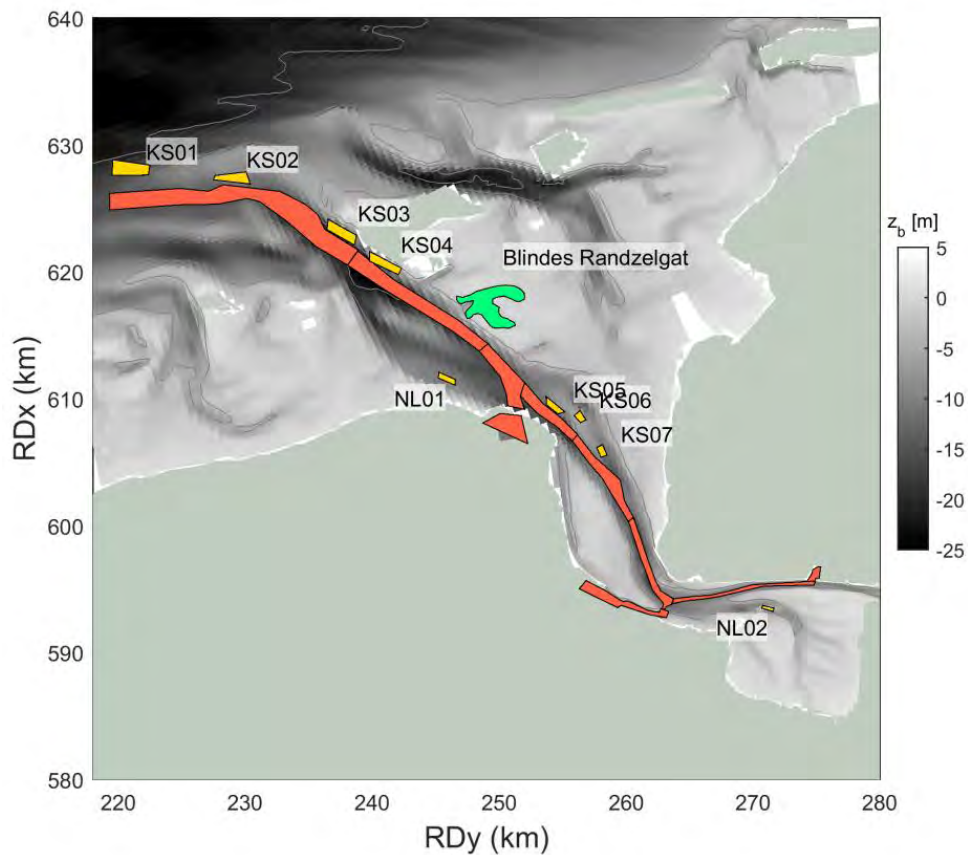


Figuur 2.5 Polygonen met baggerlocaties: Rode baggerlocaties worden teruggestort op reguliere stortlocaties (oranje) terwijl slib gebaggerd uit groene polygoenen wordt onttrokken.

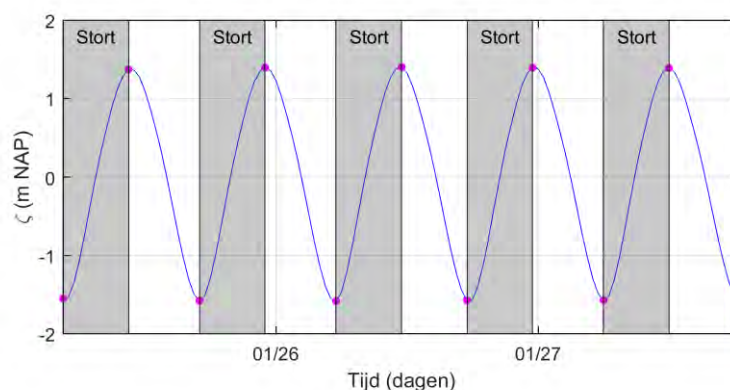
2.4 Bagger- en stortstrategieën (M2)

Wanneer gebaggerd sediment wordt gestort in relatief luwe gebieden waar het materiaal niet meer in suspensie wordt gebracht, wordt het materiaal feitelijk onttrokken. Een aanpassing van de huidige bagger- en stortstrategie kan daarom mogelijk leiden tot een afname van slibconcentraties wanneer gebaggerd sediment wordt gestort op een locatie waar geen of minder resuspensie kan optreden. Daarom is gezocht naar een locatie welke relatief luw is, maar nog niet verzandt of dichtslibt. Hierdoor valt bijvoorbeeld de Bocht van Watum af: dit is een zeer luw gebied welke al door natuurlijke processen wordt opgevuld.

Een relatief groot en luw gebied is het Blindes Randzelgat (groene polygoon Figuur 2.6). Een deel van het gestorte sediment zal mogelijk wegstromen naar de Oostereems en daarmee uit het systeem worden onttrokken zonder dat het luwtegebied opvult. Om deze afvloeiing te maximaliseren wordt het sediment alleen gestort tijdens de vloedfase (schematisch weergegeven in Figuur 2.7). Het storten binnen de polygoon wordt zo gemodelleerd dat er over de hele stortpolygoon een gelijke sedimentlaagdikte wordt aangebracht tijdens elk stortinterval.



Figuur 2.6 Polygonen met baggerlocaties (rood), reguliere stortlocaties (oranje) en de polygoon toegevoegd voor stortingen ter hoogte van het Blindes Randzelgat (groen).



Figuur 2.7 Schematische weergave van het stortregime voor het Blindes Randzelgat, de bagger- en stortmodule is alleen actief tijdens de perioden aangegeven in het grijs.

2.5 Vergroten plaatareaal (M3)

Het vergroten van plaatareaal (en daarmee het kombergingsvolume van het intergetijdengebied (V_s)) ten koste van het areaal diep water zorgt voor een relatief grotere eb-dominantie (zie kader). Het doel van deze maatregel is om te onderzoeken of de eb-dominantie via het plaatareaal substantieel toeneemt, en (indien ja) of dit een positief effect

heeft op het slibtransport. Met deze maatregel kan in theorie de import van slib verminderd worden.

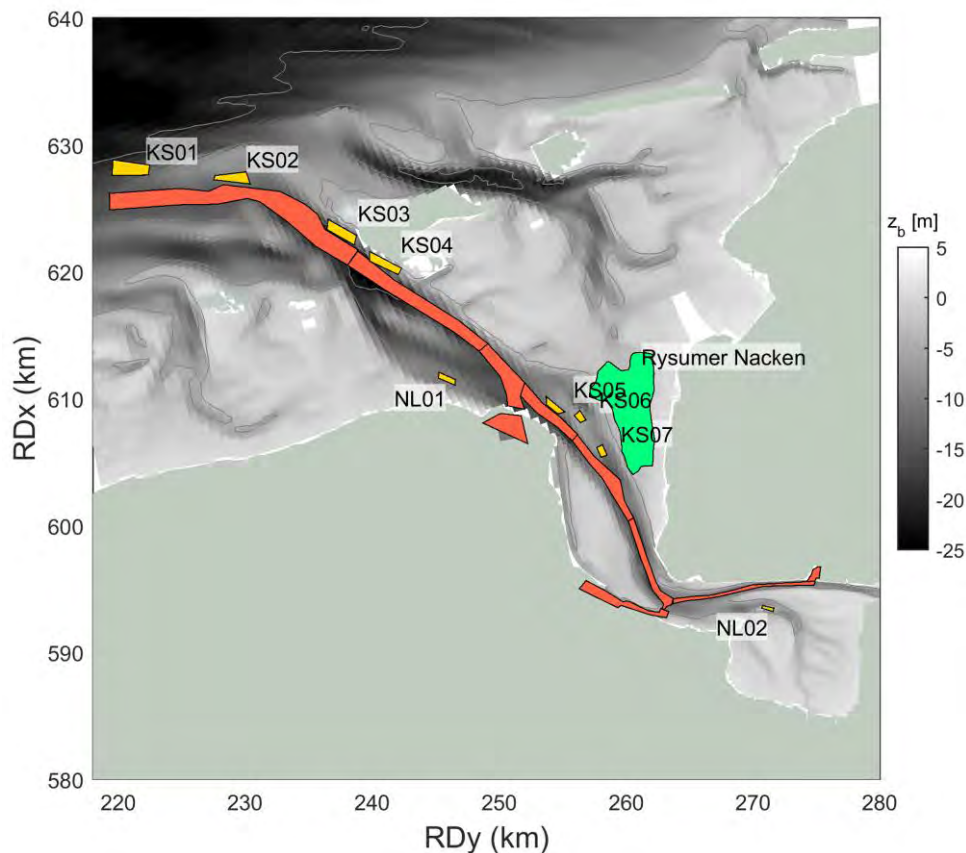
Het scenario 'vergroten plaatareaal' wordt gemodelleerd door het gebaggerde sediment (zand en slib) uit de geulen niet op de reguliere stortlocaties maar op één enkele locatie te storten. De baggerspecie uit de havens en het Emders vaarwater (groen in fig. 5) wordt wel op de reguliere locaties gestort. Dit wordt gemodelleerd door te storten binnen een polygoon dat ter plaatse van de Rysumer Nacken is gedefinieerd (Figuur 2.8). Voor de locatie Rysumer Nacken gekozen omdat

- Dit een relatief luw gebied is, en het materiaal dus blijft liggen.
- De bestaande diepte dusdanig is dat met een beperkte hoeveelheid sediment een maximaal areaal omgezet kan worden in intergetijdengebied
- Dit gebied niet eb-dominant is. Ook de Dollard zou geschikt zijn als stortplaats, maar hier is het getij al eb-dominant.

In het model worden de diepe delen van het stortgebied als eerste opgevuld. Het stortgebied wordt dus eerst geëgaliseerd voordat het verder toeneemt in hoogte.

Toelichting: effect plaatareaal op getijsymmetrie

De asymmetrie van het getij in een estuarium wordt beïnvloed door de wisselwerking van de wrijving die de getijgolf ondervindt in de geulen en het kombergingsvolume van het intergetijdengebied. Ondiepe geulen vertragen de voortplanting van het laagwater door het estuarium, waarmee de vloedperiode wordt verkort (vloeddominantie). Een groot bergingsvolume van het intergetijdengebied vertraagt de propagatie van het hoogwater, waarmee de eb periode wordt verkort (eb dominantie) (Friedrichs and Aubrey, 1988). De import van slib in het estuarium is afhankelijk van de eb-/vloeddominantie en daarom van de ratio van het volume van de geulen (V_c) en het kombergingsvolume van het intergetijdengebied (V_s).

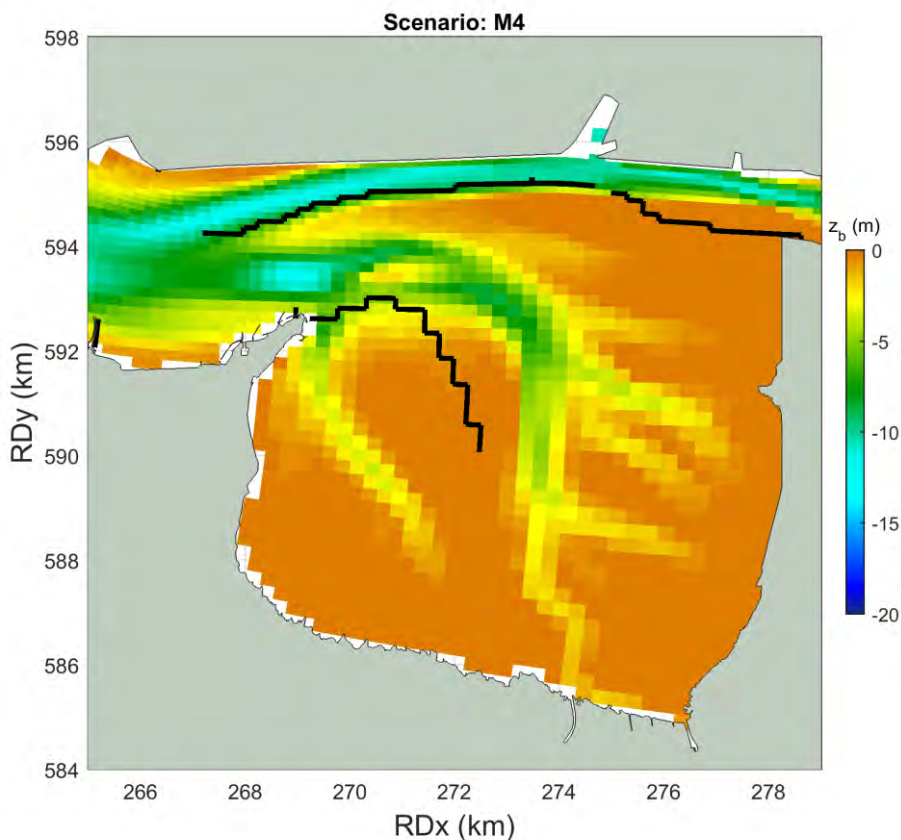


Figuur 2.8 Polygonen met baggerlocaties (rood), reguliere stortlocaties (oranje) en de polygoon toegevoegd voor stortingen ter hoogte van de Rysumer Nacken (groen).

2.6 Bevorderen sedimentatie (M4)

Wanneer sediment bezinkt op een rustige plaats, en niet meer in suspensie wordt gebracht, wordt het sediment uit het systeem onttrokken. Door netto sedimentatie te bevorderen wordt daarom sediment uit het systeem onttrokken, en neemt de vertroebeling af. Hierbij moet men zich realiseren dat alleen het bevorderen van sedimentatie tot een tijdelijke verlaging leidt (na verloop van tijd is het gebied waar sedimentatie wordt bevorderd opgevuld, en neemt de slibconcentratie weer toe tot aan het oude niveau). Een permanente verlaging van de vertroebeling kan alleen worden gerealiseerd door niet alleen sedimentatie te bevorderen, maar ook om het afgezette materiaal regelmatig te verwijderen.

Het bevorderen van sedimentatie in het intergetijdengebied wordt gestimuleerd door het creëren van een voor wind en golven luwe zone ten zuiden van de Punt van Reide door deze te verlengen met een strekdam (Figuur 2.9). Het stromingspatroon in de gehele Dollard wordt door de verlenging beïnvloed. In het LZS-model wordt dit numeriek geïmplementeerd door een gebogen strekdam van ongeveer 5 km lengte aan te leggen. De uitloper van de dam ligt ongeveer 2-3 km oostelijk van de westelijke kustlijn van de Dollard.



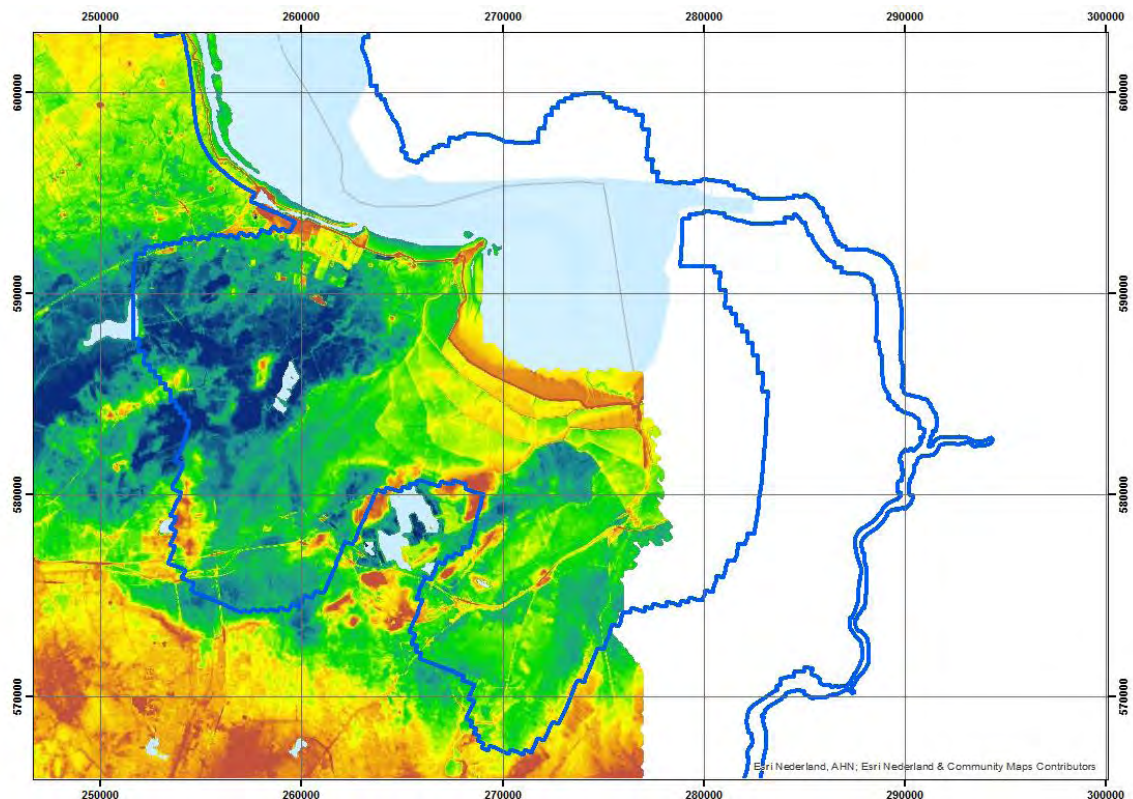
Figuur 2.9 Vijf km lange strekdam bij Punt van Reide.

2.7 Toevoegen binnendijs intergetijdengebied (M5)

Een nog efficiëntere manier om een luwtezone te creëren is het aanleggen van een binnendijs overstromingsgebied. Een dergelijk overstromingsgebied zal snel opvullen waardoor er (1) meer intergetijdengebied met waardevolle natuurwaarden ontstaat, en (2) de slibconcentratie in het Eems Estuarium zal afnemen.

Een dergelijk intergetijdengebied dient bij voorkeur aangelegd te worden in een relatief diepliggend gebied, omdat hier meer sediment afgezet kan worden. De meest diepliggende gebieden zijn de ingeklonken veengebieden ten zuiden van Delfzijl (blauw in Figuur 2.10). Een bijkomend voordeel van deze strategie is dat het aanslibben van diepliggende gebieden op termijn een zeer duurzame manier is om mee te groeien met de zeespiegelstijging; een dergelijke ingreep kan daarom ook bijdragen aan de bescherming tegen zeespiegelstijging. In overleg met de provincie Groningen is een gebied gekozen in dit diepliggend land met een opening tussen Delfzijl en Termunterzijl (Figuur 2.11).

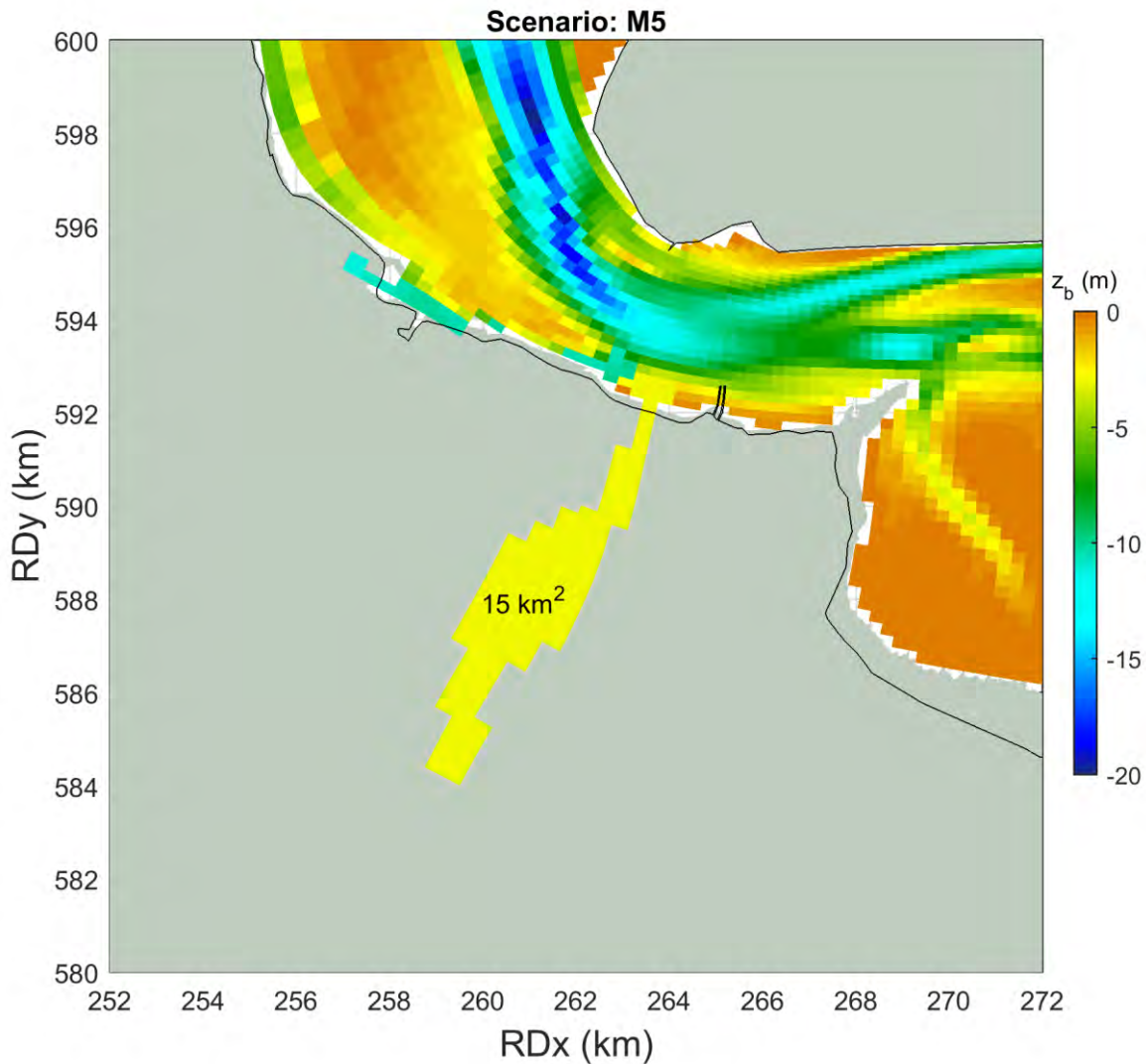
De grootte van het gebied is 15 km^2 , een gebiedsgrootte waarvoor wordt ingeschat dat 1 miljoen ton/jaar zal bezinken. Aannames hierbij zijn dat de gemiddelde getijslag in het gebied 1.3 meter zal zijn (gemiddeld lager dan in het estuarium), de depositie efficiëntie 0.5 is (50% van al het sediment wat binnenstroomt bezinkt), en de slibconcentratie van het binnenstromende water 150 mg/l is. Per getij bezinkt dan $15 \cdot 10^6 \times 1.3 \times 0.15 \times 0.5 = 1.46 \cdot 10^6$ kg sediment. Per jaar is dit 1.03 miljoen ton, wat neerkomt op ongeveer 7 cm per jaar gemiddeld over het gebied (onder aanname van een droge dichtheid van 1000 kg/m^3).



Figuur 2.10 Omlijning van het rekenrooster geprojecteerd op het AHN2

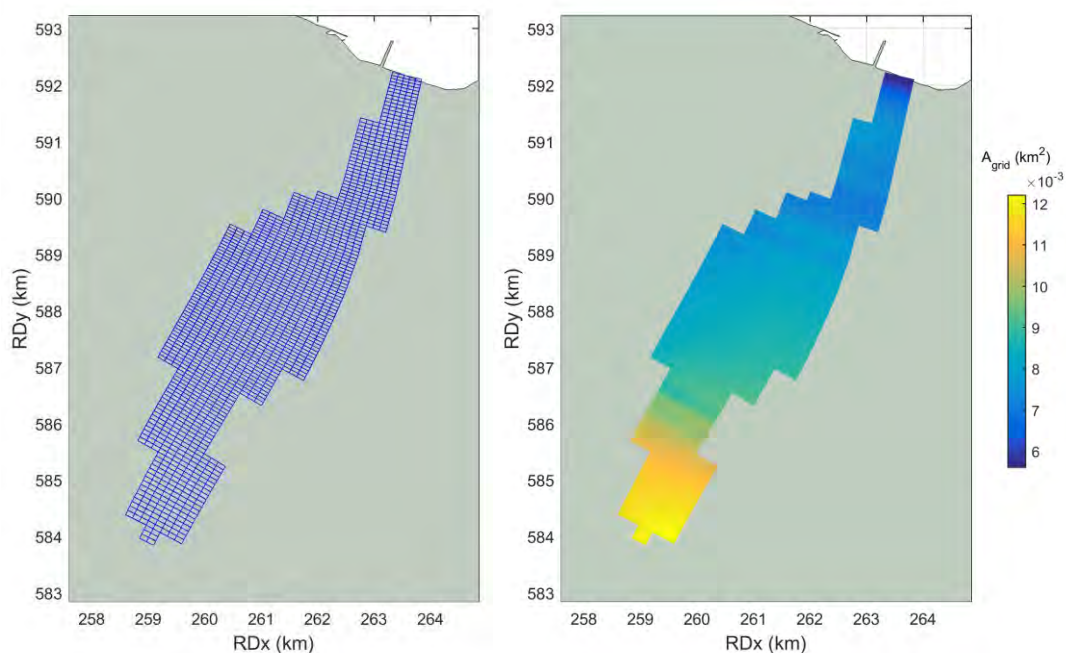
De modelmatige aanpak van de maatregelrichting 'toevoegen binnendijs intergetijdengebied' wijkt iets af van de overige scenario's. De sedimentatie in het overstromingsgebied wordt met een apart losstaand model uitgerekend om twee redenen: (1) het LZS heeft een te lage resolutie om de opvulling in het overstromingsgebied goed uit te rekenen, en (2) de opvulling gebeurt met slibrijk materiaal, waarvan de hoeveelheid in het LZS model wordt onderschat.

Het kleine losstaande model heeft een roosterresolutie dat drie keer fijner is dan van het LZS-model (Figuur 2.12). Het model wordt aangestuurd met randvoorwaarden die verkregen zijn uit het LZS-model. De initiële hoogte van de bathymetrie van het binnendijs intergetijdengebied is -3 m NAP. Net zoals het LZS-model bestaat het sediment uit zand met een mediane korrelgrootte van 200 μm . Het slib in het model bestaat uit drie slibfracties welke alleen verschillen in kritische schuifspanning voor erosie ($\tau_{cr} = 0,05; 0,2; 0,5 \text{ Pa}$). De slibconcentratie van de drie slibfracties aan de zeewaartse opening van dit lokale model zijn 50 mg/l (per fractie), gebaseerd op de gemeten slibconcentratie bij nabijgelegen meetstations Groote Gat Noord en Bocht van Watum. Zandtransport is meestal in evenwicht met de lokale stroomsnelheden (en niet afhankelijk van het aanbod, zoals voor slibtransport). Daarom wordt voor zand een evenwichtsconditie voorgeschreven op de modelrand, waarbij het zandtransport op de rand berekend wordt met behulp van de lokale stroomsnelheid.



Figuur 2.11 Toegevoegd binnendijks intergetijdengebied in het LZS-model

De aldus berekende bodem in 2050 wordt vervolgens overgezet naar het rekenrooster van het LZS en D3S-model (waarbij een ruimtelijke middeling nodig is omdat het rekenrooster grover is). Het LZS-model en het D3S-model voeren vervolgens de berekeningen uit aan de hand van deze samengevoegde bodemschematisatie. De bodem in 2014 heeft een uniforme diepte van -3 meter NAP, in 2050 een berekende diepte op het niveau van een intergetijdengebied.



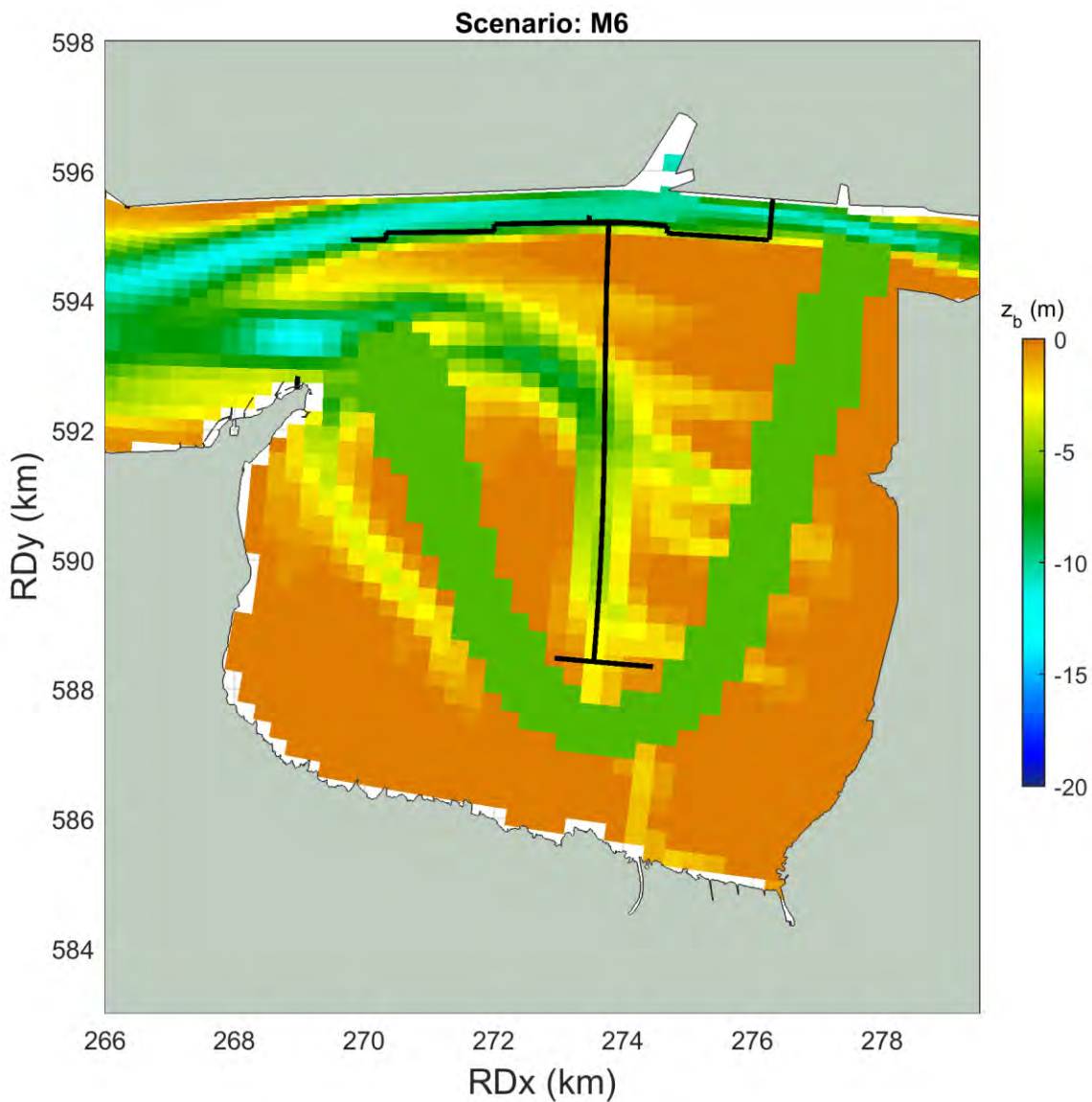
Figuur 2.12 Rekenrooster (links) en grootte van de rekencellen (in km², rechts) van het kleinschalige model dat de bodemontwikkeling van het binnendijks intergetijdengebied simuleert.

2.8 Dynamiek Eems Rivier (M6)

Er zijn aanwijzingen dat de hoge vertroebeling in de Eems Rivier mogelijk deels het gevolg is van resonantie van de getijgolf door de aanwezigheid van de overlaat bij Herbrum (Schuttelaars et al., 2013). Het verlengen van de effectieve lengte vermindert resonantie maar leidt ook tot een verhoging van de bodemweerstand. Beide hebben naar verwachting tot gevolg dat de getijslag afneemt. Met een lagere getijslag neemt het slibtransport richting de Eems Rivier af, waardoor mogelijk de concentratie in de beneden Eems Rivier afneemt. Ook wordt het getij mogelijk minder vloed-dominant, wat tot een verdere afname van sediment import leidt. Een verlaging van de slibconcentratie in de beneden Eems Rivier kan vervolgens leiden tot een verlaging van de slibconcentratie in het Eems Estuarium.

Eén van de manieren om de effectieve lengte te vergroten is het aanbrengen van een meander in de Dollard. Door de Eems Rivier naar de Dollard te verleggen, kan de vaargeul richting de haven van Emden functioneren als een doodlopende vaargeul zonder verbinding met de Eems Rivier (scheepvaart richting de Eems Rivier krijgt doorgang via een sluizencomplex). Door de afname van het watervolume dat door het vaarwater naar Emden stroomt, neemt mogelijk het baggeronderhoudswerk af. De afname van baggeronderhoudswerk kan aanvullende positieve effecten op de vertroebeling in het Eems Estuarium hebben (hoewel eerdere studies suggereren dat dit vooral zal leiden tot een herverdeling van slib, en minder tot een afname van het totale slibgehalte – zie van Maren et al., 2015).

Eerdere modeltesten (niet opgenomen in de rapportage) hebben uitgewezen dat een meander in de Dollard zich alleen ontwikkelt als een initiële geul met een diepte van 6 meter wordt aangebracht. De 7 kilometer lange T-dam (inclusief dwarsstukje) wordt vanaf de Geiseleitdam aangelegd en is nodig om de geul op de gewenste locatie te houden (Figuur 2.13).



Figuur 2.13 Initieel aangelegde meanderbocht tot een diepte van -6 m NAP en de 7 kilometer lange strekdam.

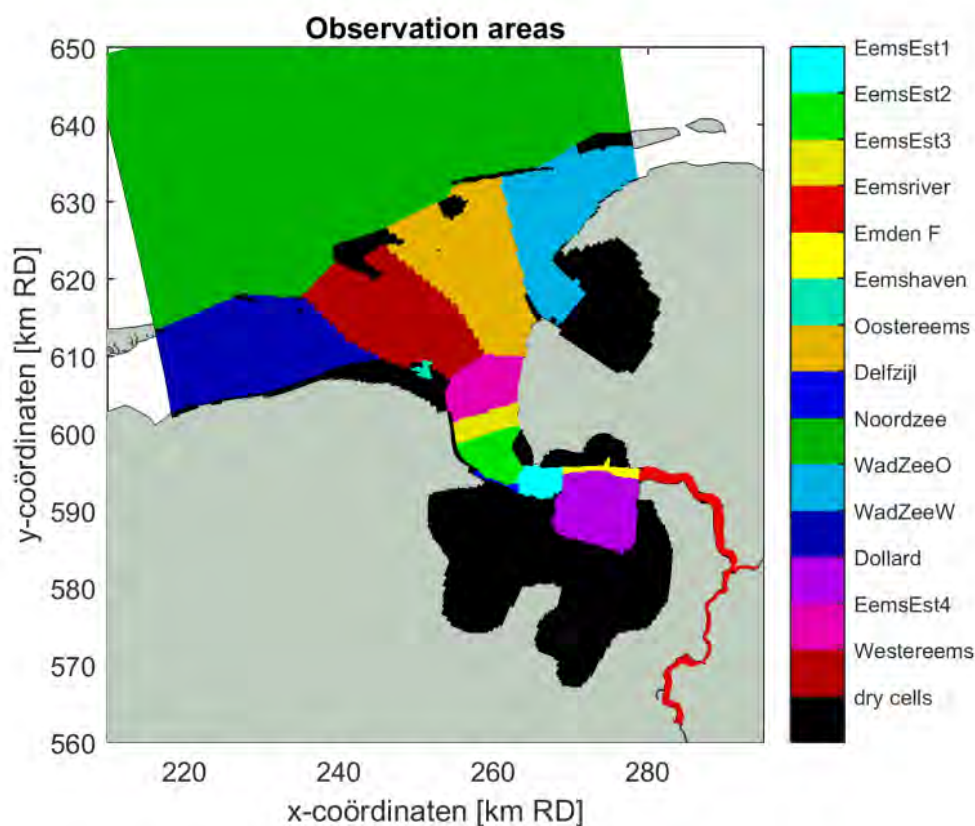
2.9 Presentatie van modelresultaten

Het effect van de maatregelen wordt op een onderling uniforme wijze gevisualiseerd. Hierbij wordt consequent de berekende waarde (bodem of slibgehalte) vergeleken met de initiële conditie maar ook met de autonome ontwikkeling.

Morfologie

De morfologische veranderingen per maatregel worden gevisualiseerd door kaarten van

- De berekende bodem in 2050
- De bodemverandering (in m) tussen 2050 en 2014,
- De bodemverandering ten opzichte van de referentie voorspelling



Figuur 2.14 Locatie gebiedspolygonen gebruikt voor visualisatie van het effect van maatregelen op jaarlijks gemiddelde slibconcentraties per deelgebied.

Slibconcentratie

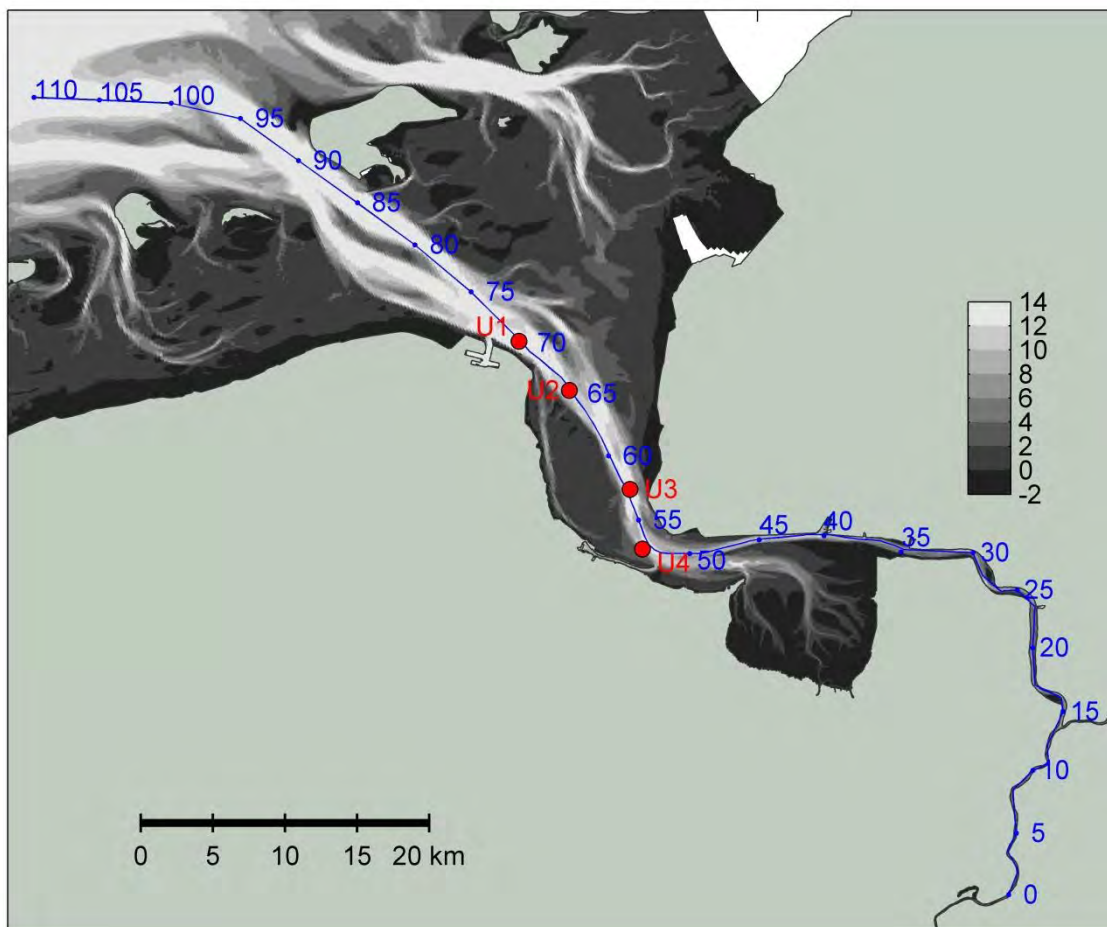
De veranderingen in de slibconcentratie worden gevisualiseerd door middel van

- Kaarten van de verandering in jaarlijks gemiddelde slibconcentratie t.o.v. de referentieverdeling (in 2014 en in 2050). In 2014 wordt deze verandering relatief (%) en absoluut (in g/l) getoond; in 2050 alleen relatief.
- Een langsverdeling van de jaargemiddelde slibconcentratie berekend op basis van de deelgebieden zoals aangegeven in Figuur 2.14.
- De berekende havenaanslibbing wordt voor alle scenario's samengevat in een eindtabel.

Waterbeweging en slibtransport

De veranderingen in slibconcentratie worden geanalyseerd door veranderingen in de waterbeweging via een aantal basisparameters weer te geven, en door de berekende netto slibtransporten te visualiseren. Hiervoor worden de volgende parameters gevisualiseerd:

- Jaargemiddelde sedimentfluxen tussen de vakken gedefinieerd in Figuur 2.14, in 2014 en 2050.
- De verticale verdeling van getij-gemiddelde stroomsnelheden (locaties U1-U4 in Figuur 2.15)
- De getijamplitudes en fases (op Eems kilometers 0 – 110, zie Figuur 2.15).



Figuur 2.15 Kaart met locaties van gebruikte uitvoerpunten voor het hydrodynamisch model. Veranderingen in de getijbeweging worden uitgevoerd op de rode locaties, en veranderingen in de (verticale verdeling van) stroomsnelheid op blauwe locaties.

3 Resultaten

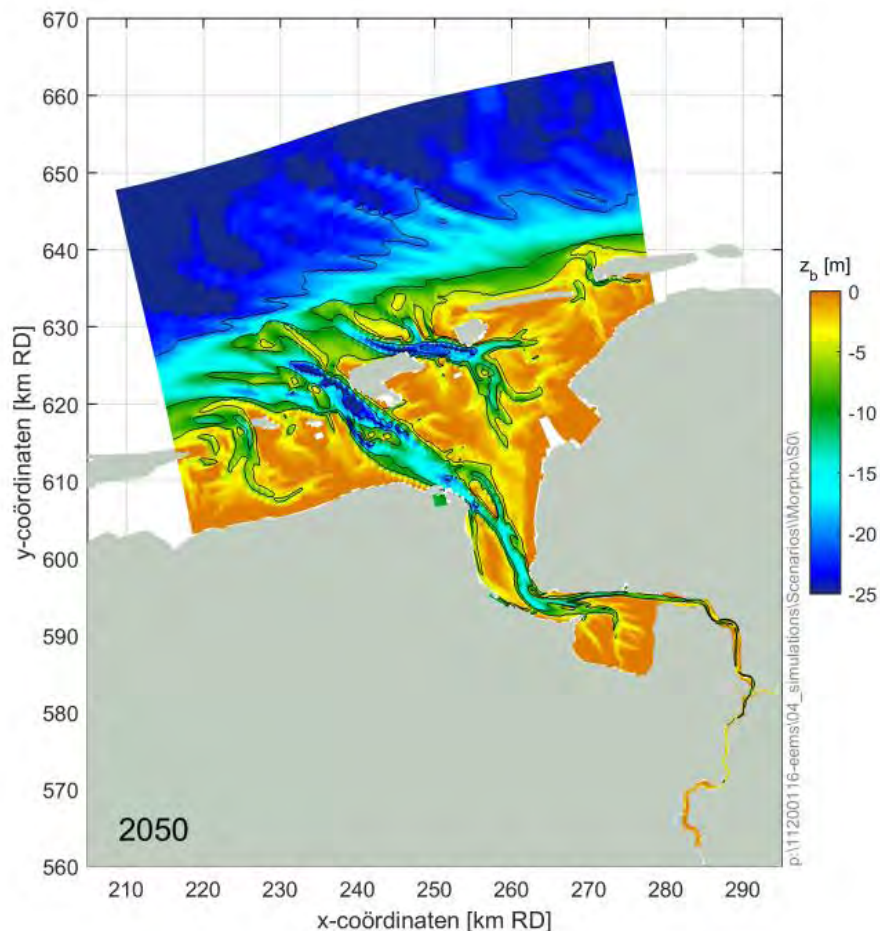
3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de modelberekeningen besproken. Hierbij worden voor zowel de autonome ontwikkeling als de 6 maatregelrichtingen de veranderingen in de morfologie, de slibconcentratie, en in slibtransportprocessen besproken. Vervolgens worden in twee afzonderlijke paragrafen de veranderingen in ecotopen en in het baggerbezwaar gepresenteerd. In dit hoofdstuk wordt zeer beperkt ingegaan op de betrouwbaarheid van de modeluitkomsten, dit is onderdeel van Hoofdstuk 4.

3.2 Autonome ontwikkeling (M0)

3.2.1 Effect op morfologie

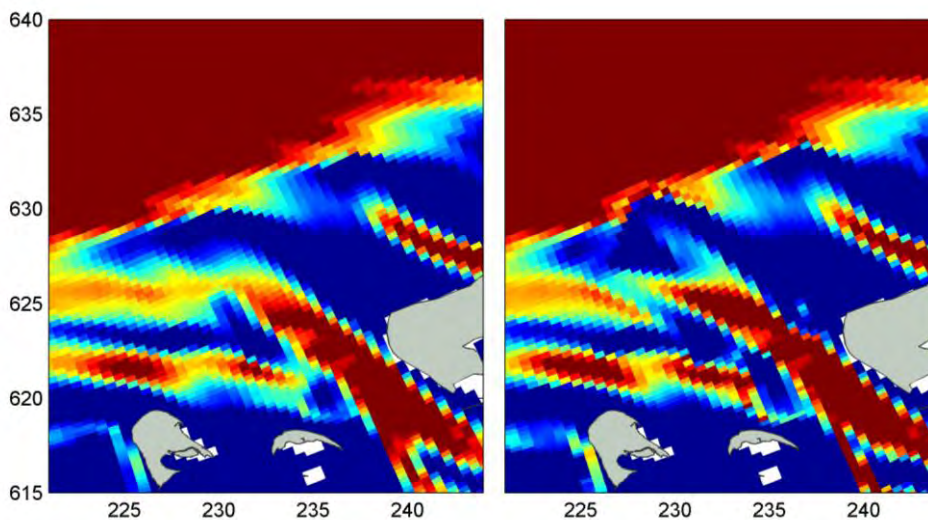
De autonome ontwikkeling is de morfologische ontwikkeling van het estuarium bij voortzetting van huidig beleid (baggeren en storten, diepte vaargeulen, gaswinning) en huidige zeespiegelstijging (stap 5 in Figuur 2.1). Deze autonome ontwikkeling is de referentie-ontwikkeling waarmee het effect van maatregelen wordt vergeleken.



Figuur 3.1 Bodemligging in 2050 voor de autonome ontwikkeling

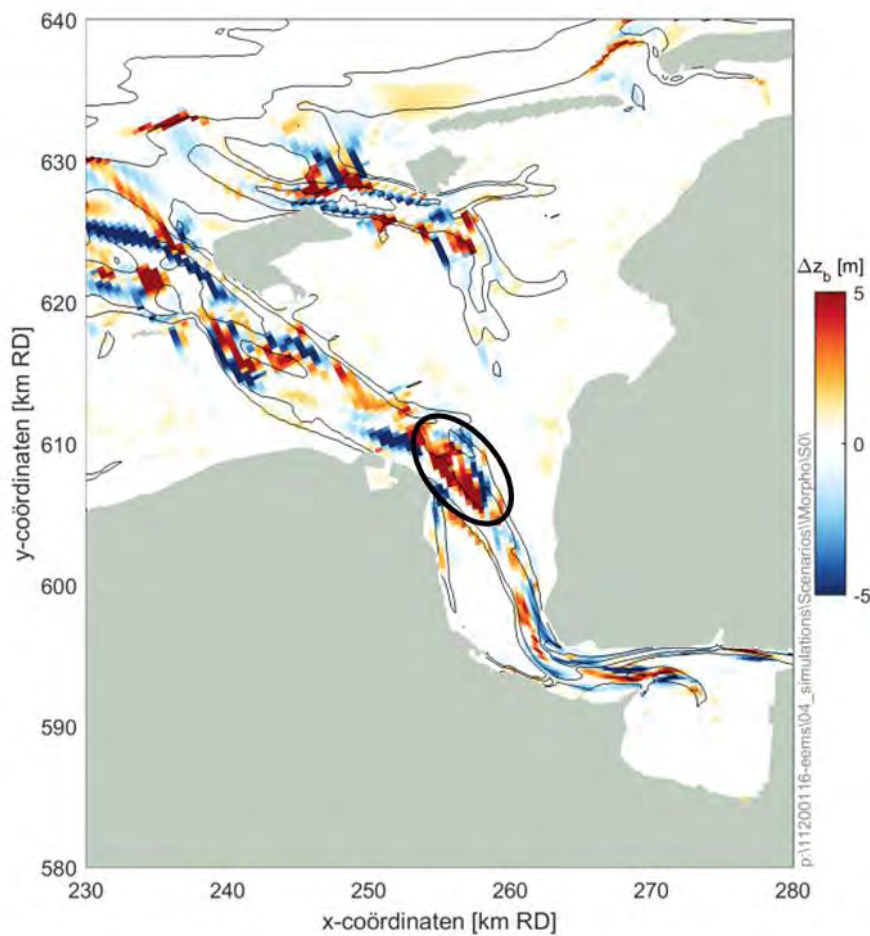
De belangrijkste morfologische ontwikkelingen volgens het model zijn (van Noord naar Zuid):

- Delen van de toegangseulen naar het Eems Estuarium (het Huibertgat en de Westereems) verondiepen (Figuur 3.2). De Westereems wordt ondieper, en de drempel tussen de Westereems en het Huibertgat groeit aanzienlijk. Deze morfologische veranderingen hebben belangrijke consequenties voor de slibmodellering, zoals hieronder wordt besproken.
- De vergroting van de Doekeplaat (ten noorden van het eiland Hond-Paap en ten oosten van Eemshaven) – zie Figuur 3.3
- Verdiepingen in het Oostfriesche Gaatje nabij Knock (Figuur 3.5).
- De platen aan de rand van de Dollard verhogen zich met 0.2 tot 0.6 meter (Figuur 3.4), de meer centraal gelegen platen veranderen veel minder. Het is wel de vraag hoe nauwkeurig deze aanslibbing wordt uitgerekend (Deltares, 2017a) – hier wordt in Hoofdstuk 4 verder op ingegaan.

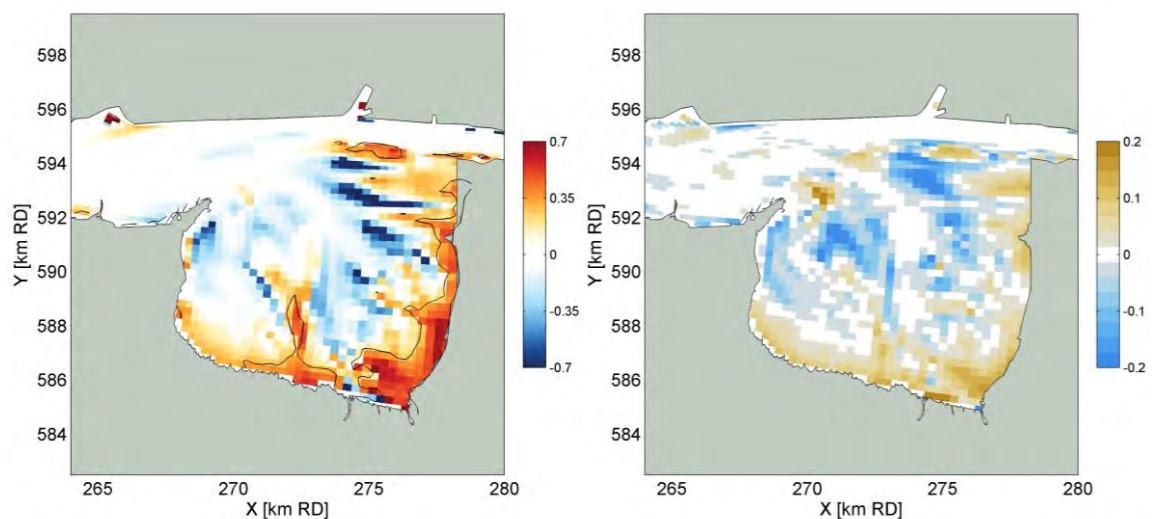


Figuur 3.2 Detail van de bodemligging rond het Huibertgat in 2014 (links) en 2050 (rechts). Weergegeven dieptes variëren van 12 (blauw) tot 18 meter (rood) om bodemveranderingen goed weer te geven. Alleen de Westereems wordt op diepte gehouden (12 meter) door baggerwerkzaamheden.

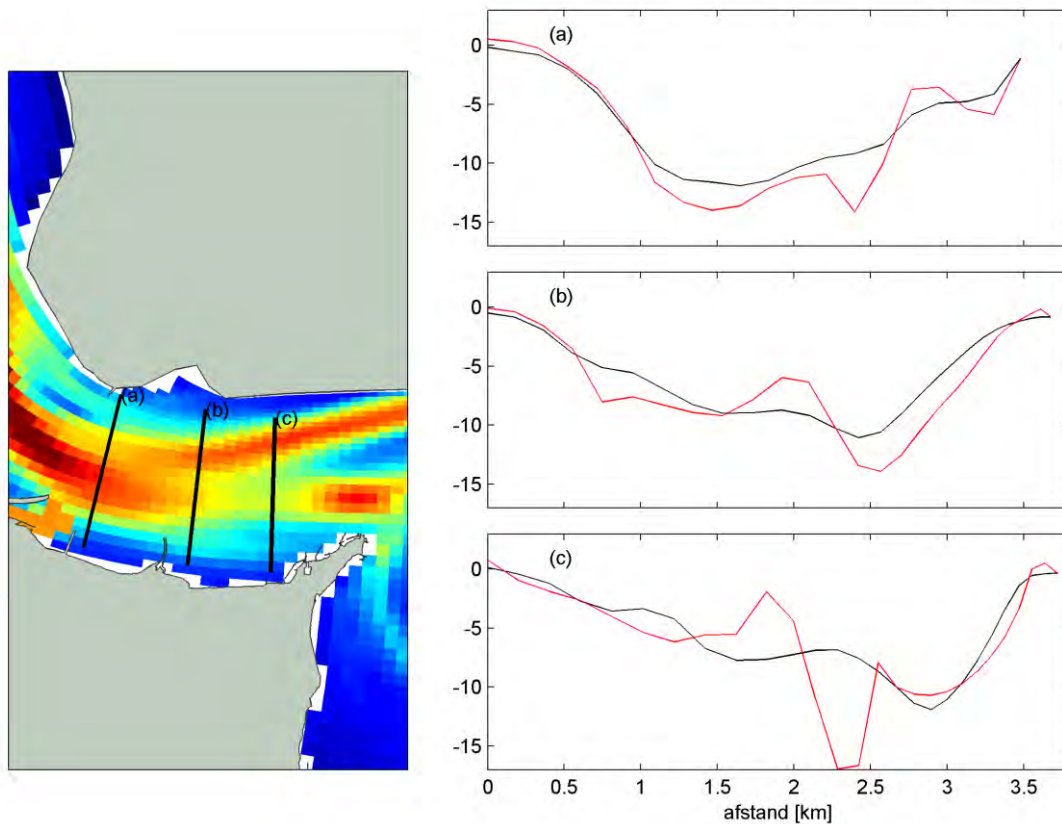
Deze verhoging van de platen treedt op bij simulaties met en zonder zeespiegelstijging. Hierbij is de bijdrage van zeespiegelstijging slechts 0.1 – 0.2 meter (zie rechterpaneel in Figuur 3.4), terwijl de zeespiegelstijging zelf 0.3 meter is. De bijdrage van bodemdaling is nog veel beperkter (Deltares, 2017a). In het model wordt de morfologie dus slechts beperkt door zeespiegelstijging en bodemdaling beïnvloed.



Figuur 3.3 Erosie-sedimentatiepatroon over de periode 2014-2050 voor de autonome ontwikkeling (M0). De ligging van het sedimentatiegebied nabij de Doekeplaat is met een zwarte ellips aangeven



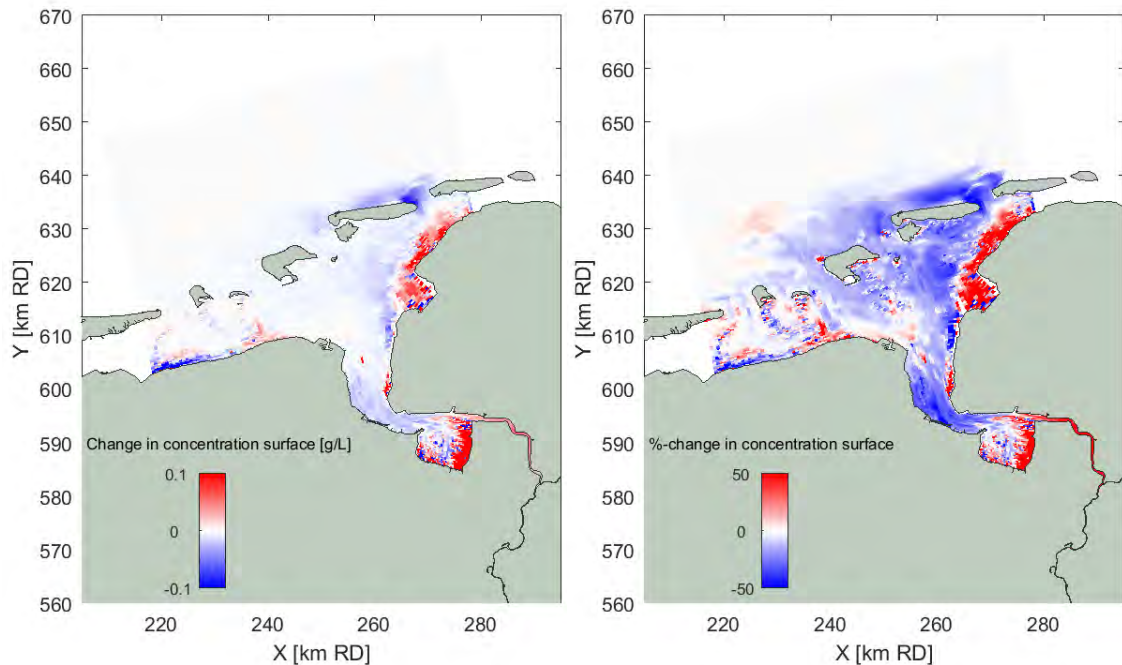
Figuur 3.4 Links: aanslibbing in de Dollard (bodemverandering door de slibfractie, in meter) over de periode 2014 – 2050 voor de autonome ontwikkeling (M0), met rechts het aandeel van zeespiegelstijging hierin (in meter).



Figuur 3.5 Bodemligging in 2014 (zwart) en 2050 (rood) op drie dwarsprofielen op de overgang tussen het Eems estuarium en de Dollard. De Groningse kust vormt het 0-punt van de dwarsraaien.

3.2.2 Effect op slibconcentraties

De berekende verandering in slibgehalte van 2014 naar 2050 is weergegeven in Figuur 3.6. De modeluitkomsten laten een afname in de slibconcentratie zien over een groot gedeelte van het domein, terwijl de slibconcentratie in ondiepe gebieden toeneemt. In *relatieve* zin (rechterpaneel) lijkt de afname sterker dan de toename. Echter, de afname treedt vooral op in gebieden met lage slibconcentraties terwijl de toename voorkomt in gebieden met hoge concentraties. Daarom is de *absolute* toename (linkerpaneel) sterker dan de absolute afname. Deze veranderingen zijn uitgebreid geanalyseerd in Deltares (2017b). De afname van de slibconcentratie is het gevolg van een afname in de dwarsdoorsnede van de getijgeul in de monding van het estuarium. De toename boven de platen is het gevolg van een relatieve verondieping van de platen (de aanslibbing is daar hoger dan de zeespiegelstijging – zie het linkerpaneel in Figuur 3.4).

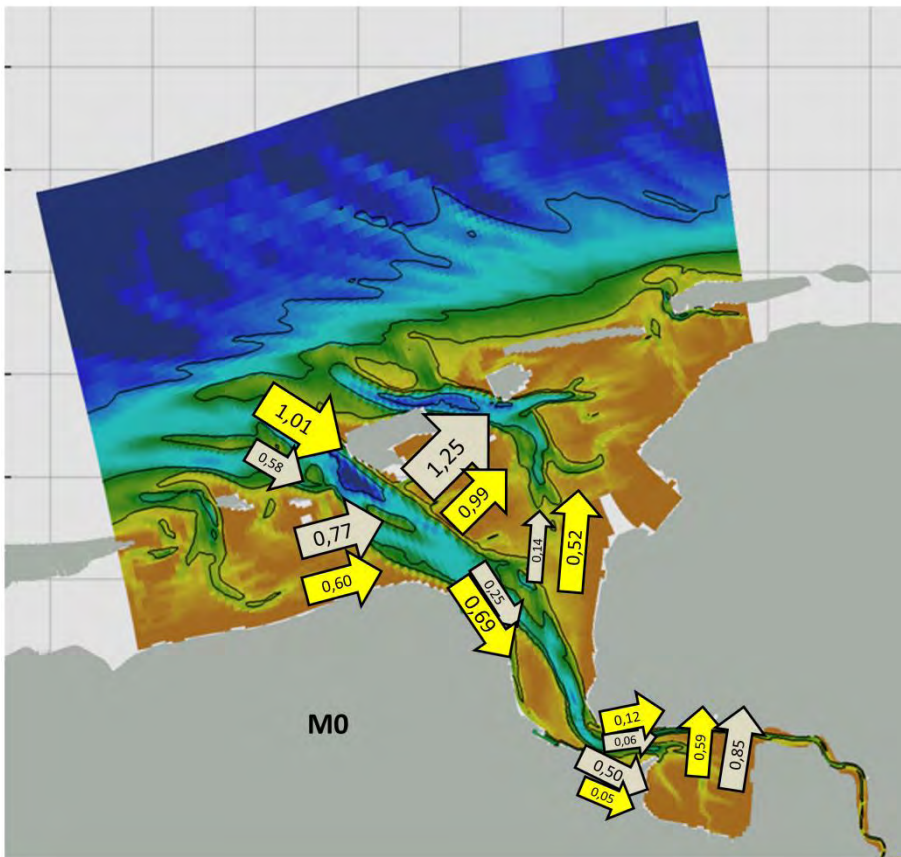


Figuur 3.6 Jaargemiddelde verandering in slibconcentratie van 2014 naar 2050, in kg/m^3 (links) en % (rechts), voor de autonome ontwikkeling (M_0). Een positieve verandering is een toename in concentratie

3.2.3 Waterbeweging en slibtransport

De slibconcentratie neemt af in de diepere delen van het estuarium (vooral in het middendeel van het estuarium). Deze verandering kan geanalyseerd worden met behulp van de sedimenttransporten (Figuur 3.7), ondersteund door veranderingen in de waterbeweging. Veranderingen in de waterbeweging worden gekwantificeerd door getijparameters en door residuele stroomsnelheidsprofielen. Gekwantificeerde getijparameters zijn de amplitude van de hoofdcomponent M_2 (maat voor het getijvolume) de amplitude van M_4 en het faseverschil tussen M_2 en M_4 (een maat voor het type getijasymmetrie).

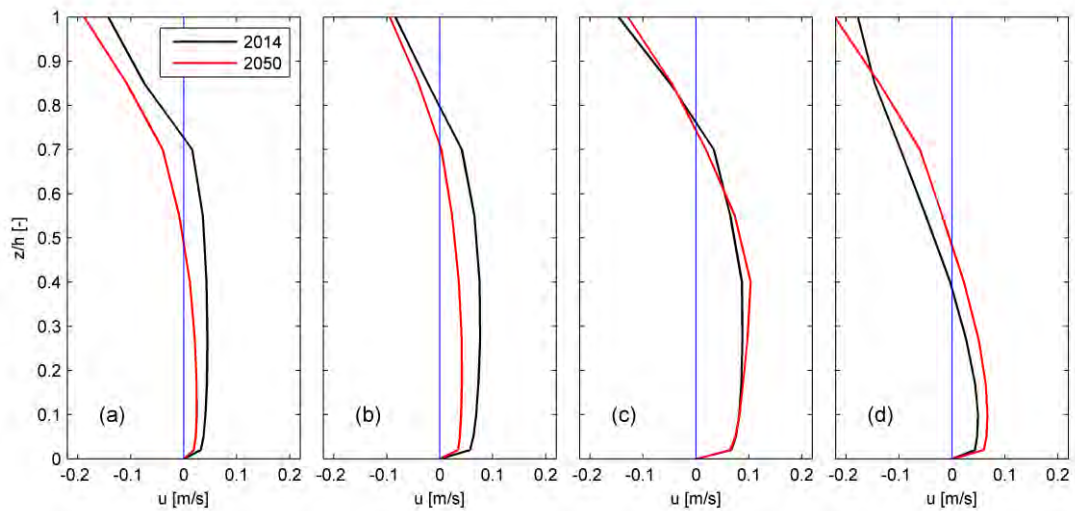
Getij-gemiddelde stroomsnelheidspatronen gegenereerd door horizontale zoutgradiënten worden typisch gekenmerkt door een stroming aan de bodem welke landwaarts is gericht, en de stroming aan het oppervlak welke zeewaarts is gericht. Aangezien de slibconcentratie nabij de bodem hoger is dan nabij het wateroppervlak, leidt dit tot een sedimenttransport in landwaartse richting. Deze zout-gedreven circulatie neemt niet-lineair toe met de waterdiepte, en is gevoelig voor menselijk ingrepen zoals verdiepingen. Een verandering in deze stroomsnelheidsprofielen is daarom belangrijk voor het verklaren van berekende veranderingen in de slibconcentratie.



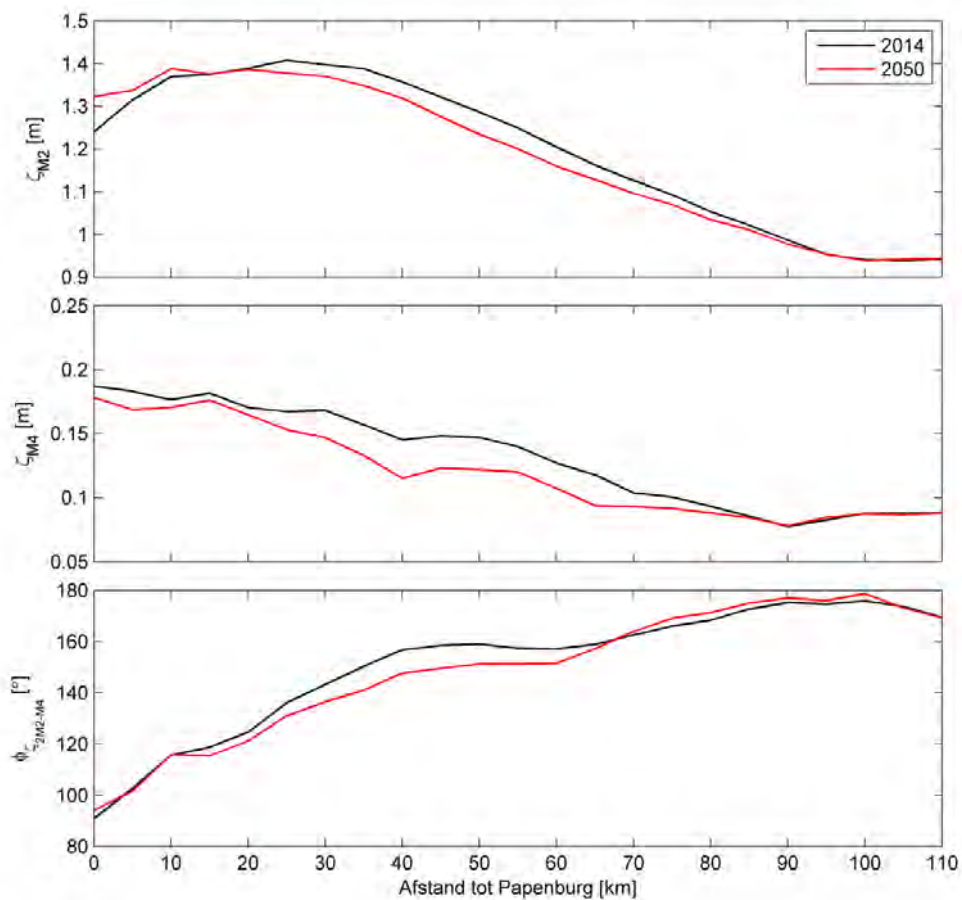
Figuur 3.7 Netto sedimenttransport (in miljoen ton/jaar) in 2014 (geel) en 2050 (grijs) voor de autonome ontwikkeling (M0). De sedimentfluxen zijn gebaseerd op de polygonen gedefinieerd in Figuur 2.14. De fluxen zijn ter visualisatie op een andere locatie geplot voor de beide jaren maar gebaseerd op dezelfde polygonen. De grootte van de pijlen is indicatief, om de relatieve grootte en de richting te illustreren. De massabalansen van deelgebieden hoeven niet sluitend te zijn vanwege het effect van baggeren en storten.

Belangrijke veranderingen in de sedimenttransporten in de autonome ontwikkeling zijn de volgende:

- In 2050 komt minder sediment het Eems Estuarium binnen via de Westereems (0.58 in plaats van 1.01 miljoen ton, zie Figuur 3.7). Dit is het gevolg van een verminderde stroomvoerende doorsnede in de Westereems en het Huibertgat en de uitbouw van de Doekeplaat (zie hierboven) wat tot een afname van de residuele circulatie (locatie u1 en u2 in Figuur 3.8) en van de getijamplitude (Figuur 3.9) leidt.
- Meer sediment wordt richting de Dollard getransporteerd (0.5 miljoen ton in 2050 tegen 0.05 miljoen ton in 2014). Dit is het gevolg van een toename van de waterdiepte in het Oostfriesche Gaatje en het Groote gat (van 10 naar 15 meter in het Groote Gat, zie Deltares 2017b). Dit leidt tot een efficiënter transport van sediment richting Dollard (en vervolgens richting het vaarwater naar Emden en de Eems Rivier), onder andere door een sterkere estuariene circulatie (locatie u4 in Figuur 3.8).
- De veranderingen in getijvoortplanting tussen 2014 en 2050 zijn beperkt (Figuur 3.9). De berekende getijslag neemt af in het grootste deel van het estuarium, wat leidt tot lagere bruto slibtransporten.



Figuur 3.8 Getij-gemiddelde stroomsnelheidsprofielen berekend met het model op locaties U1 t/m U4 (a t/m d, resp., zie Figuur 2.15 voor locatie) voor de autonome ontwikkeling (M0) in 2014 en 2050. Getijmiddeling is uitgevoerd over de maand januari.

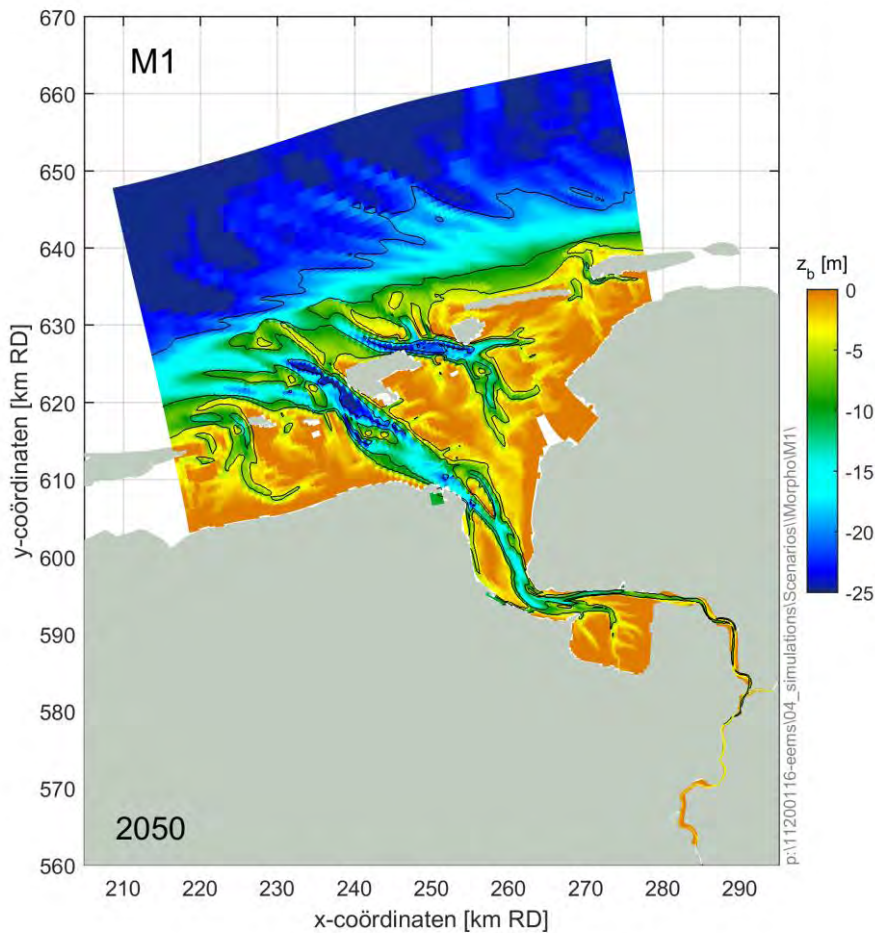


Figuur 3.9 Waterstandsamplitude ζ van de M2 en M4 getijcomponenten, en het faseverschil $\phi_{\zeta_{2M2-M4}}$ tussen M2 en M4, tussen Papenburg (km0) en de monding van de Eems (zie Figuur 2.15 voor locatie), voor de autonome ontwikkeling (M0) in 2014 en 2050.

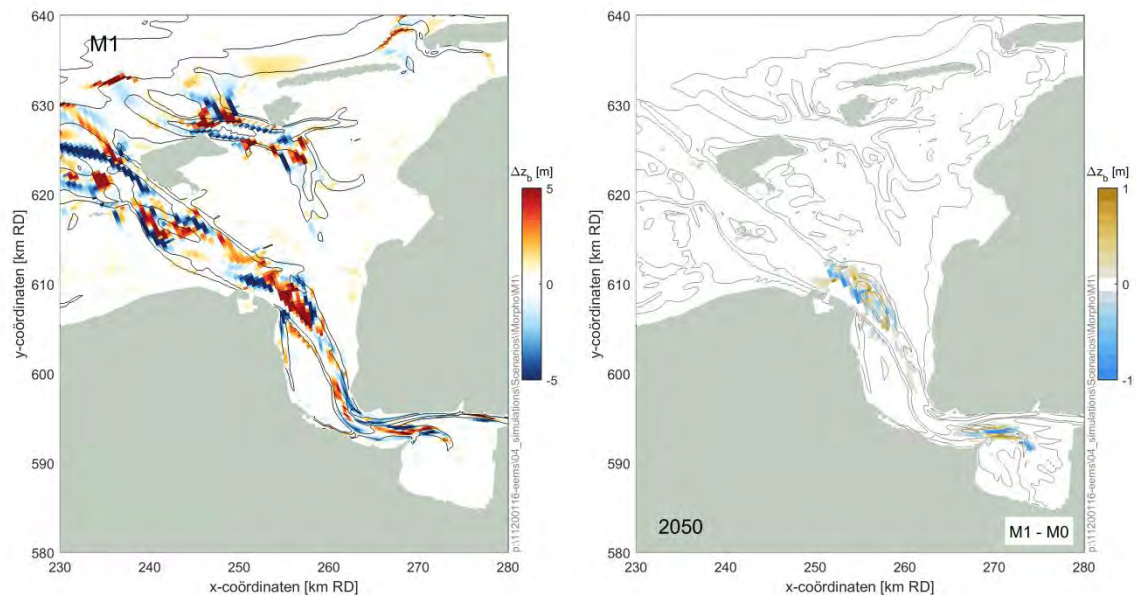
3.3 Onttrekken slib (M1)

3.3.1 Effect op morfologie

Het morfologische beeld voor het scenario 'onttrekken slib' in 2050 is weergegeven in Figuur 3.10. Deze figuur, maar ook de relatieve ontwikkeling (Figuur 3.11) ten opzichte van 2014 (links) en de autonome ontwikkeling (rechts) laten duidelijk zien dat het effect van het onttrekken van slib uit het systeem op de morfologische ontwikkeling zeer beperkt is. De patronen van erosie en sedimentatie wijzigen alleen ter plaatse van de mond van het estuarium (nabij Eemshaven) en het Grootte Gat (in de Dollard). Deze veranderingen in ontwikkeling zijn vooral het gevolg van het stoppen van stortingen die tijdens de autonome ontwikkeling wel doorgezet worden in de stortvakken KS05, KS07 en NL02 (zie Figuur 2.4). Het zeer geringe verschil tussen de resulterende bodemligging in 2050 van het scenario en de referentiesituatie is dan ook nauwelijks waar te nemen in de hypsometrische curven. Deze zijn daarom niet getoond.



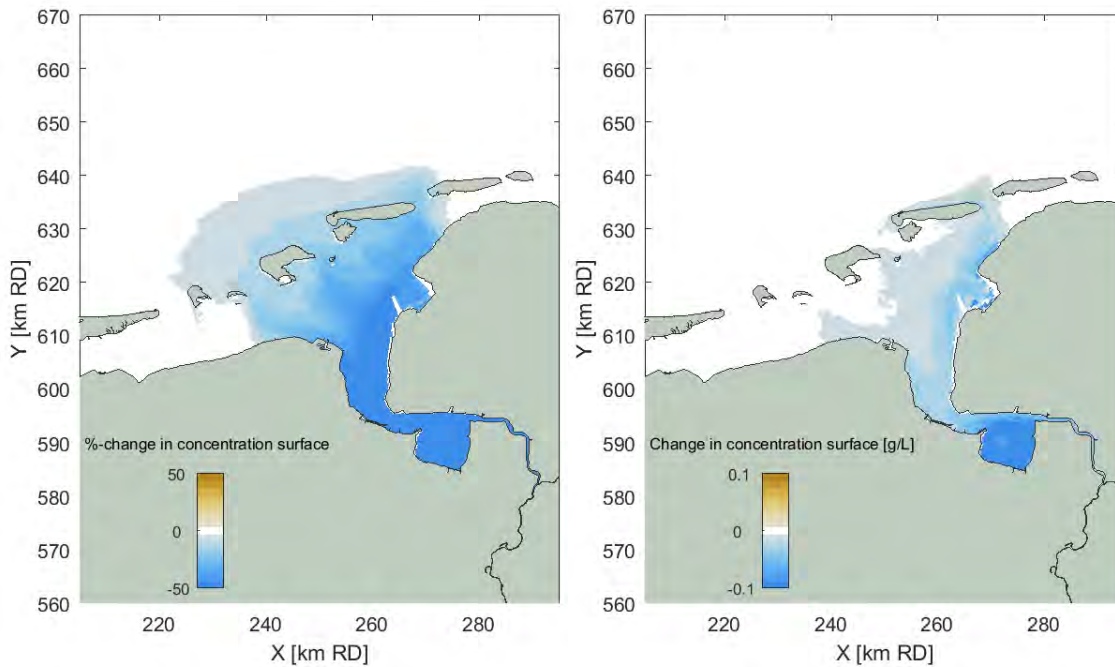
Figuur 3.10 Bodemligging in 2050 voor het scenario 'onttrekken slib' (M1).



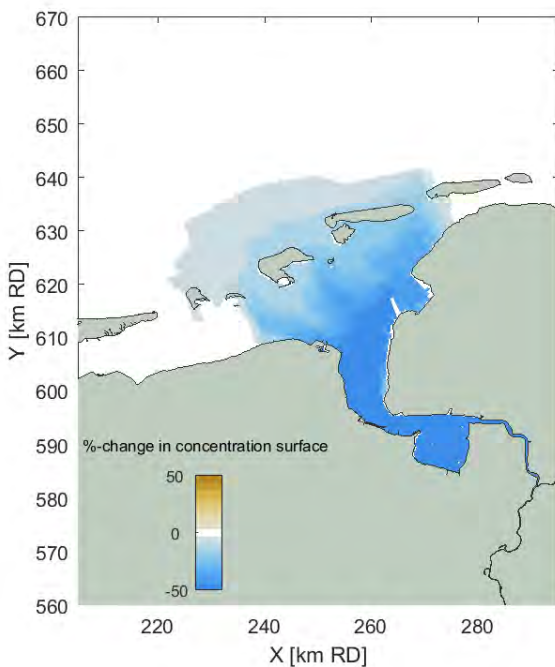
Figuur 3.11 Erosie-sedimentatiepatroon over de periode 2014-2050 (links) en verschil in bodemligging in 2050 (rechts) tussen het scenario 'onttrekken slib' (M1) en de autonome ontwikkeling (M0). Een positieve waarde is een verhoging van de bodemligging t.o.v. 2014 (links) of de autonome ontwikkeling (rechts).

3.3.2 Effect op slibconcentraties

Onttrekken van slib leidt tot een sterke afname in de slibconcentratie, zowel in 2014 als in 2050 (Figuur 3.12 en Figuur 3.13). Initieel wordt in 2014 1.58 miljoen ton onttrokken; in 2050 1.38 miljoen ton. Deze afname wordt niet veroorzaakt door veranderingen in het getij (Figuur 3.22) of stroomsnelheden (Figuur 3.39), maar is gerelateerd aan de sedimentbalans. Wanneer de aanvoersnelheid van sediment vanuit zee eindig is (i.e. een zekere waarde heeft; deze kan klein of groot zijn) zal onttrekken van sediment leiden tot een afname in de slibconcentratie in het estuarium. Aangezien morfologische verschillen als gevolg van dit scenario zeer gering zijn (Figuur 3.11), is het berekende effect van slibonttrekking op de slibconcentratie in 2014 zeer vergelijkbaar met het effect in 2050.



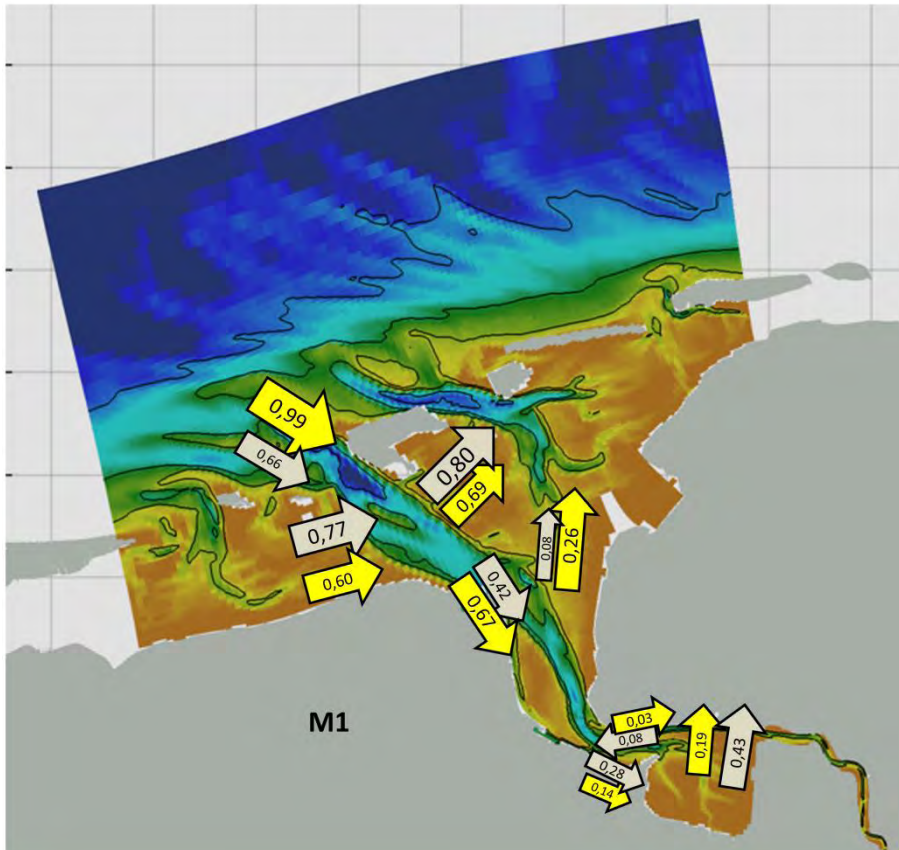
Figuur 3.12 Verandering in slibconcentratie (in %, links en g/l, rechts) in 2014 voor scenario Onttrekken slib (M1). Een blauwe verandering is een afname in de slibconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (S0).



Figuur 3.13 Verandering in slibconcentratie (in %) in 2050 voor scenario Onttrekken slib (M1). Een blauwe verandering is een afname in de slibconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (S0).

3.3.3 Waterbeweging en slibtransport

De verandering in slibfluxen van 2014 naar 2050 is kwalitatief vergelijkbaar met de verandering als gevolg van de autonome ontwikkeling (vergelijk Figuur 3.7 met Figuur 3.14): (1) minder slib komt het estuarium binnen aan de monding, en (2) slib wordt efficiënter richting de Dollard getransporteerd. Voor zowel de autonome ontwikkeling M0 als scenario M1 leiden deze veranderingen tot een afname in de slibconcentraties in het midden en buitendeel van het estuarium (Delfzijl – Huibertgat).



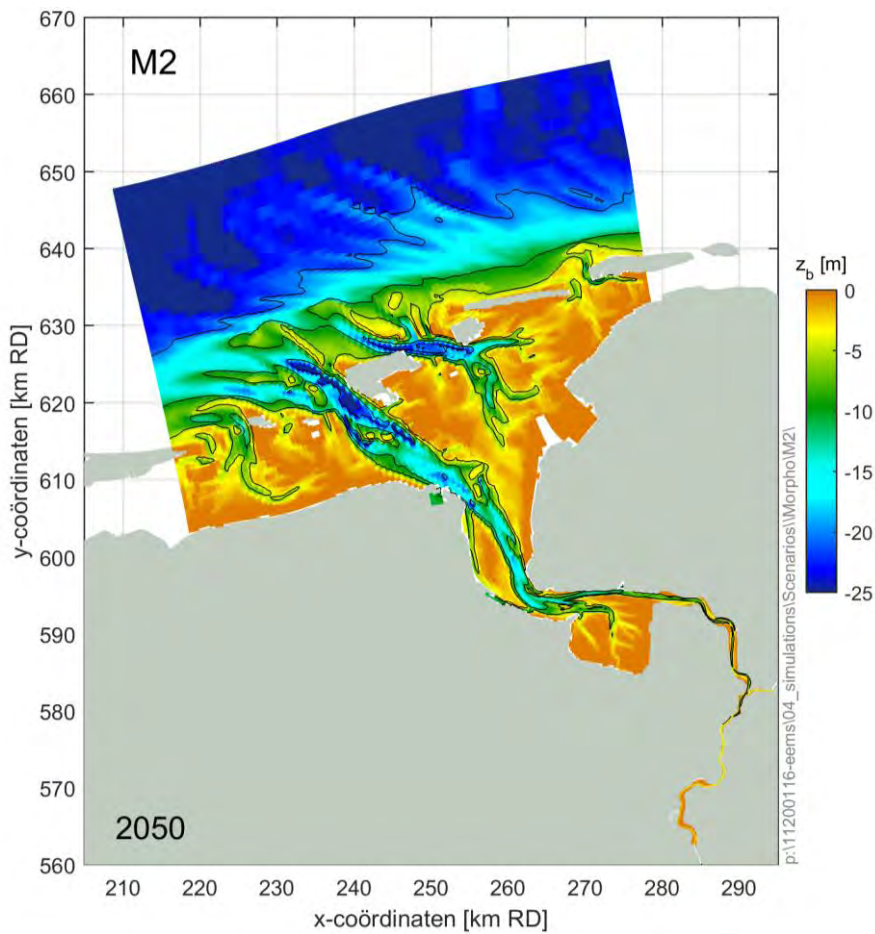
Figuur 3.14 Netto sedimenttransport (in miljoen ton/jaar) in 2014 (geel) en 2050 (grijs) voor scenario 'onttrekken slib' (M1). Zie Figuur 3.7 voor een gedetailleerde beschrijving.

De waterbeweging verandert door het onttrekken nauwelijks t.o.v. de autonome ontwikkeling, en wordt daarom niet verder besproken.

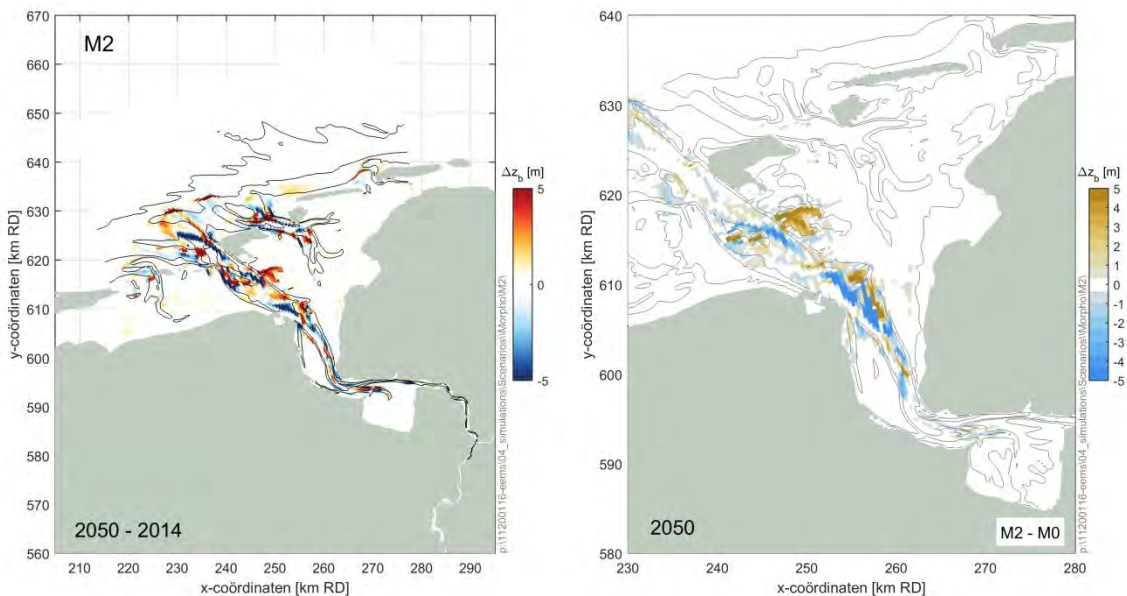
3.4 Bagger- en stortstrategieën (M2)

3.4.1 Effect op morfologie

Het morfologische beeld in 2050 voor de maatregelrichting 'bagger- en stortstrategieën' waarbij al het gebaggerde sediment wordt gestort in het Blindes Randzelgat, is weergegeven in Figuur 3.15. De morfologische veranderingen ten opzichte van de autonome ontwikkeling (Figuur 3.16 rechts) laten zien dat storten in het Blindes Randzelgat leidt tot een verdieping van het Doekegat en het Randzelgat. Verder stroomopwaarts.

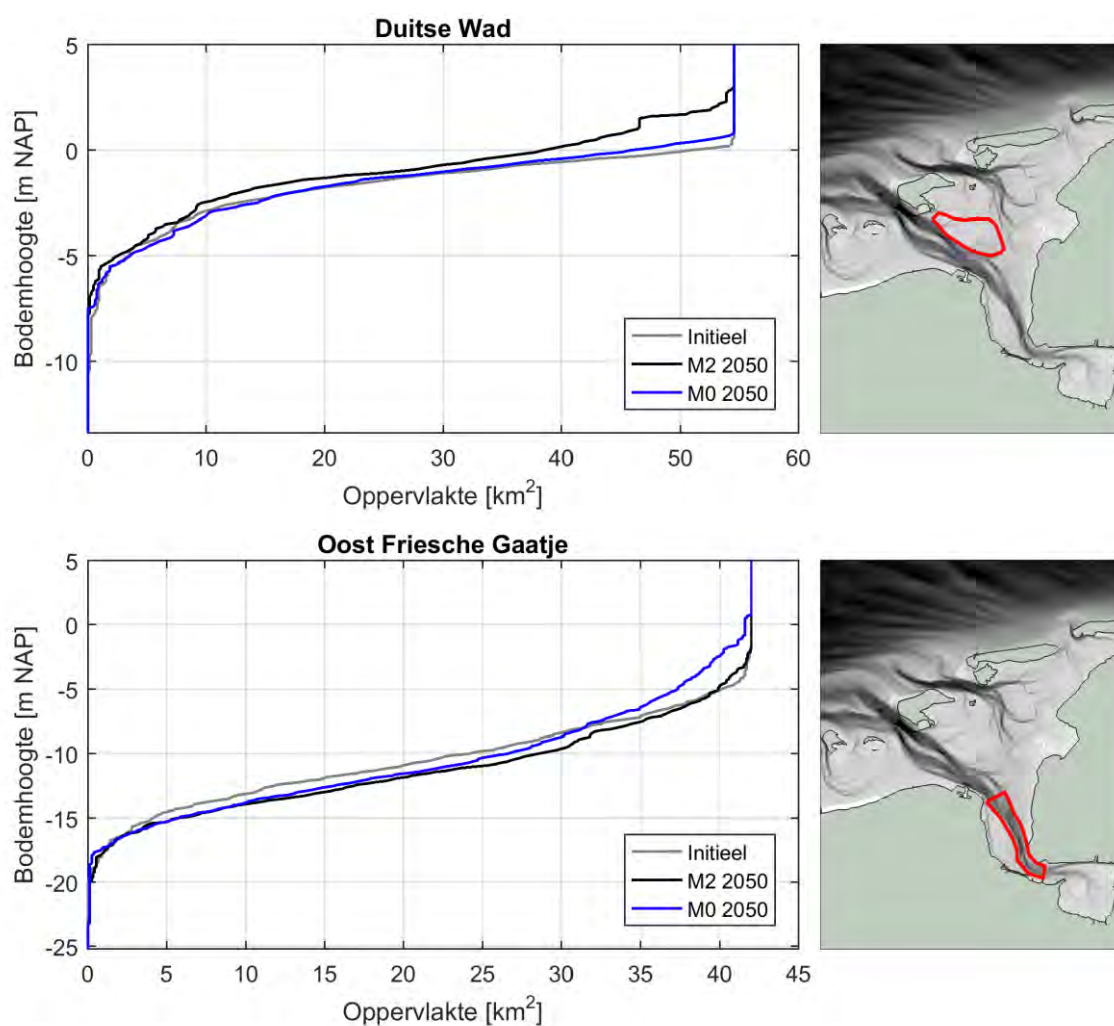


Figuur 3.15 Resulterende bodemligging in 2050 voor het scenario 'bagger- en stortstrategieën' (M2).



Figuur 3.16 Erosie-sedimentatiepatroon over de periode 2014-2050 (links) en verschil in bodemligging in 2050 (rechts) tussen het scenario 'bagger- en stortstrategieën' (M2) en de autonome ontwikkeling (M0). Een positieve waarde is een verhoging van de bodemligging t.o.v. 2014 (links) of de autonome ontwikkeling (rechts).

In het estuarium zijn de veranderingen in morfologische ontwikkeling beperkt. Het stortgebied hoogt lokaal op tot maximaal 2 m boven NAP: dit is goed zichtbaar in de hypsometrische curves ('Duitse Wad' in Figuur 3.17). De hypsometrische curve 'Oostfriesche Gaatje' laat zien dat de bodem in het Oostfriesche Gaatje minder verandert t.o.v. de huidige situatie dan bij autonome ontwikkeling.

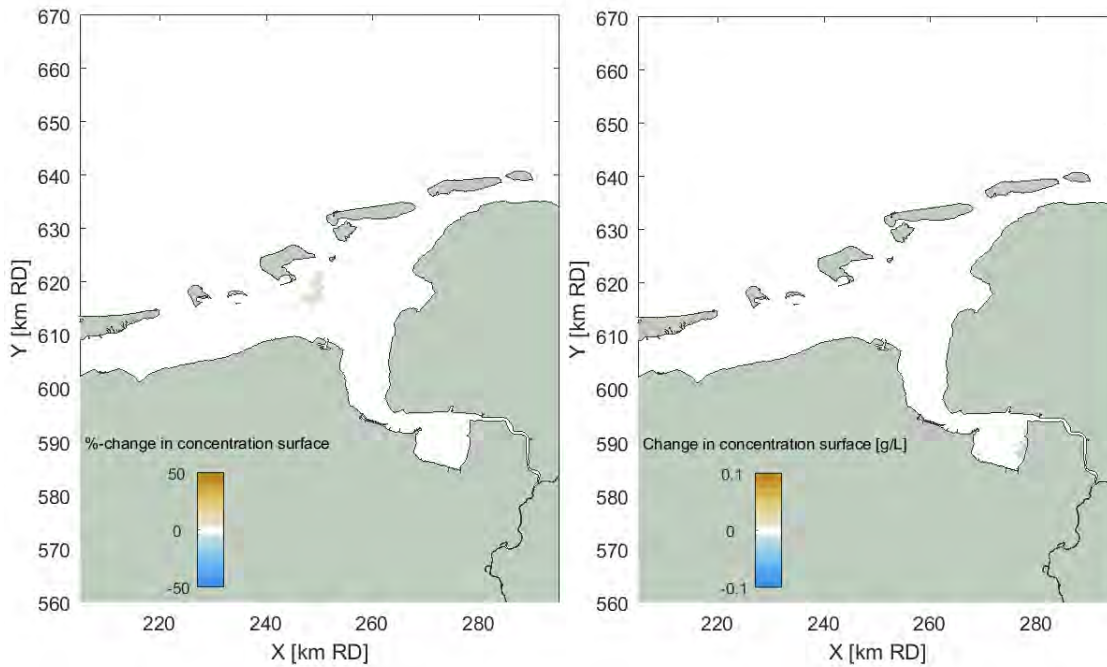


Figuur 3.17 Hypsometrische curven voor het Duitse Wad en het Oost Friesche Gaatje.

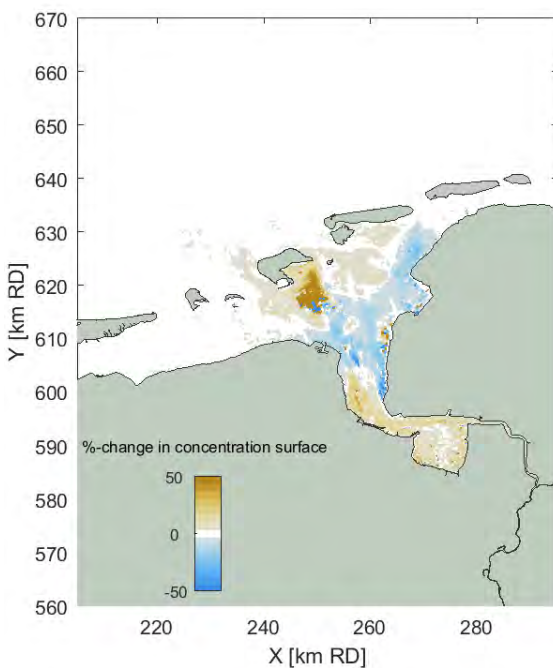
3.4.2 Effect op slibconcentraties

In 2014 leidt het storten van zand en slib uit de havens en het Emders vaarwater in het Blindes Randzelgat vooral tot een lichte herverdeling van sediment: doordat slib verder zeewaarts wordt gestort neemt de slibconcentratie in het binnendeel van het estuarium af, maar de concentratie verder zeewaarts neemt toe (Figuur 3.18).

De veranderingen in 2050 zijn sterker (Figuur 3.19), met andere patronen dan in 2014. Opnieuw neemt de concentratie toe rond de stortlocatie. Echter, nu neemt ook de concentratie in de Dollard sterk toe. Dit is waarschijnlijk het gevolg van morfologische veranderingen als gevolg van de maatregel. De onderliggende processen verantwoordelijk voor deze berekende verandering worden in de volgende sectie behandeld.



Figuur 3.18 Verandering in slibconcentratie (in %, links en g/l, rechts) in 2014 voor scenario 'bagger en stortstrategie' (M2). Een blauwe verandering is een afname in de slibconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (M0).

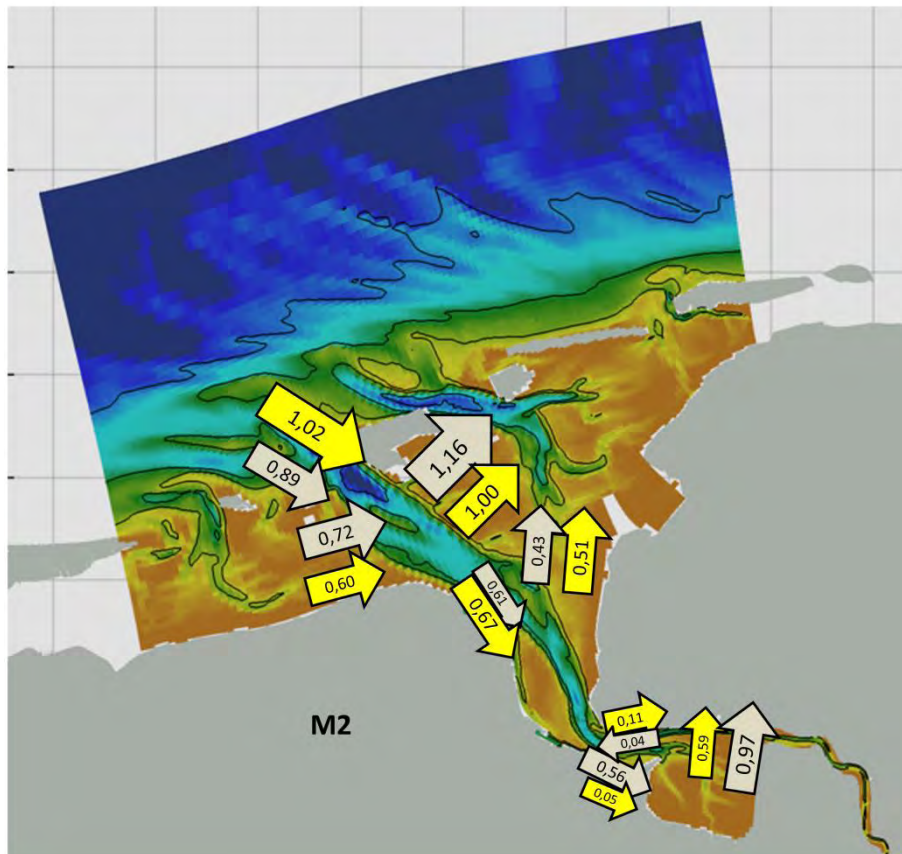


Figuur 3.19 Verandering in slibconcentratie (in %) in 2050 voor scenario 'bagger en stortstrategie' (M2). Een blauwe verandering is een afname in de slibconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (M0).

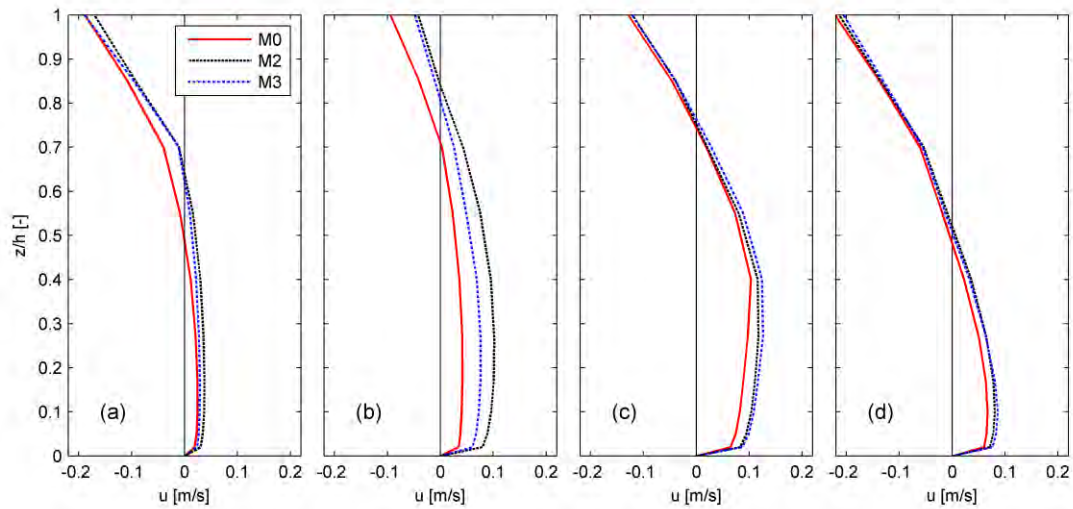
3.4.3 Waterbeweging en slibtransport

De veranderingen in de sedimentfluxen zijn relatief beperkt (typisch binnen 20% meer of minder dan de autonome ontwikkeling) - Figuur 3.20. Deze netto fluxen geven dan ook geen verklaring voor de verhoging van de slibconcentratie in de Dollard in 2050 (zoals in Figuur 3.19 weergegeven).

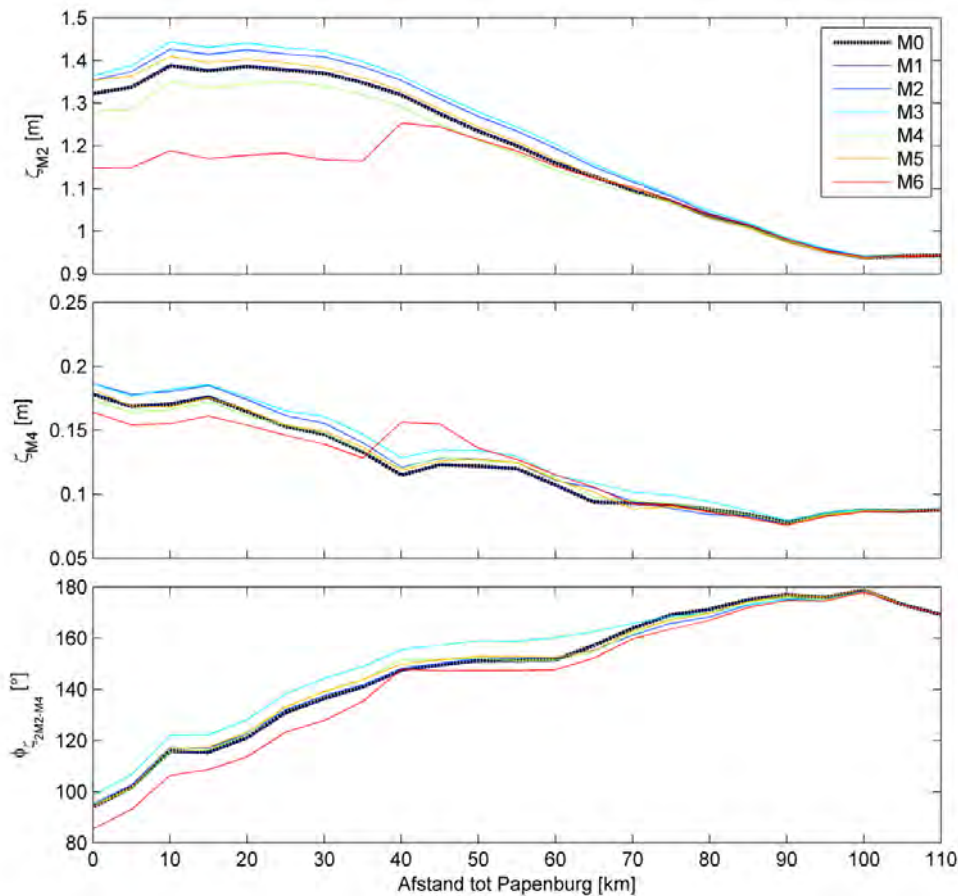
De toename in de slibconcentratie kan wel een gevolg zijn van een toename in de bruto fluxen: bij gelijkblijvende netto transporten maar toenemende bruto transporten kan de slibconcentratie alsnog toenemen. Deze toename in bruto transporten kan het gevolg zijn van een toename in de estuariene circulatie (~10% in het Oostfriesche Gaatje; een verdubbeling nabij het Doekegat, zie Figuur 3.21) en een toename in de getijslag (M_2 in Figuur 3.22). De amplitude van de dominantie getijdcomponent M_2 is ruim 5 cm toegenomen. Door de hogere getijslag neemt ook de accommodatieruimte (en dus het getijprisma) toe, wat tot een verdere vergroting van het getijdebiet leidt.



Figuur 3.20 Netto sedimenttransport (in miljoen ton/jaar) in 2014 (geel) en 2050 (grijs) voor scenario 'bagger en stortstrategieën' (M_2). Zie Figuur 3.7 voor een gedetailleerde beschrijving.



Figuur 3.21 Getij-gemiddelde stroomsnelheidsprofielen berekend met het model op locaties U1 t/m U4 (a t/m d, resp., zie Figuur 2.15 voor locatie) voor scenario's M0 (referentie) en M2 en M3, in 2050. Getijmiddeling is uitgevoerd over de maand januari.

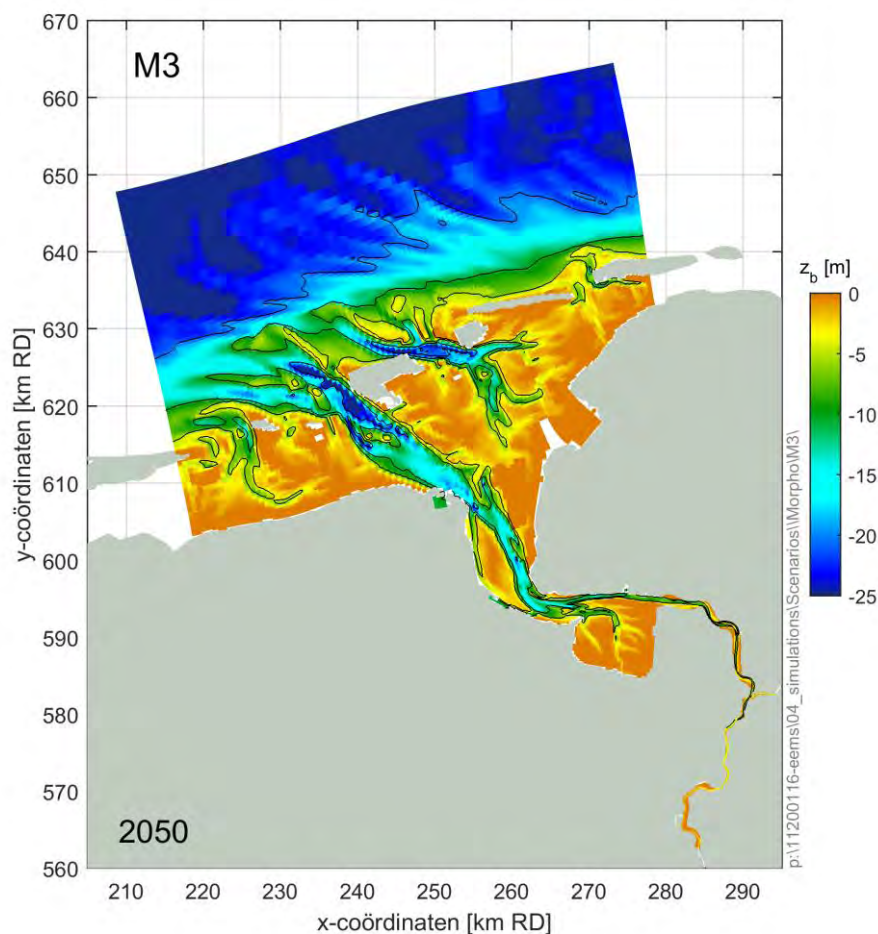


Figuur 3.22 Waterstandsamplitude ζ van de M2 en M4 getijcomponenten, en het faseverschil $\phi_{\zeta_{M2-M4}}$ tussen M2 en M4, voor alle scenario's tussen Papenburg (km0) en de monding van de Eems (zie Figuur 2.15 voor locatie), in 2050. De resultaten voor scenario M1 zijn identiek aan scenario M0 en daarom niet zichtbaar.

3.5 Vergroten plaatareaal (M3)

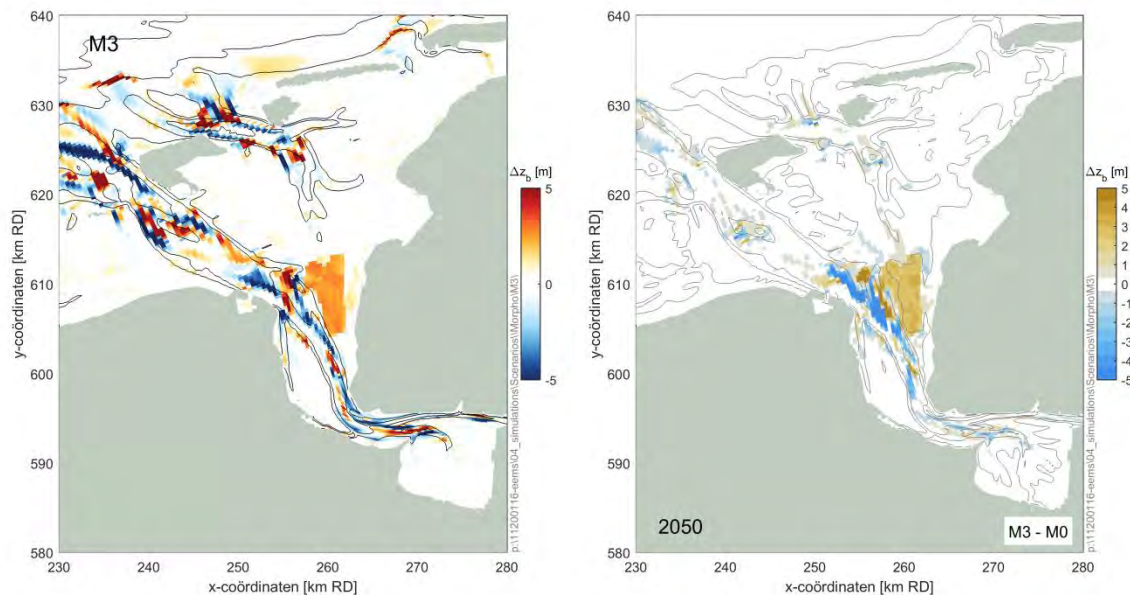
3.5.1 Effect op morfologie

Het storten van het zand (gebaggerd uit de in Figuur 2.8 aangegeven vakken) ter plaatse van de Rysumer Nacken zorgt ervoor dat de bodem in het gehele gebied van de stortpolygoon ongeveer twee tot drie meter toeneemt in hoogte in de periode tot 2050. Het morfologisch eindbeeld in 2050 voor het scenario 'vergroten plaatareaal' is weergegeven in Figuur 3.23. Figuur 3.24 geeft de verandering van de bodemhoogte in 2015 ten opzichte van 2014 (links) en ten opzichte van de autonome ontwikkeling (rechts).



Figuur 3.23 Resulterende bodemligging in 2050 voor het scenario 'vergroten plaatareaal' (M3).

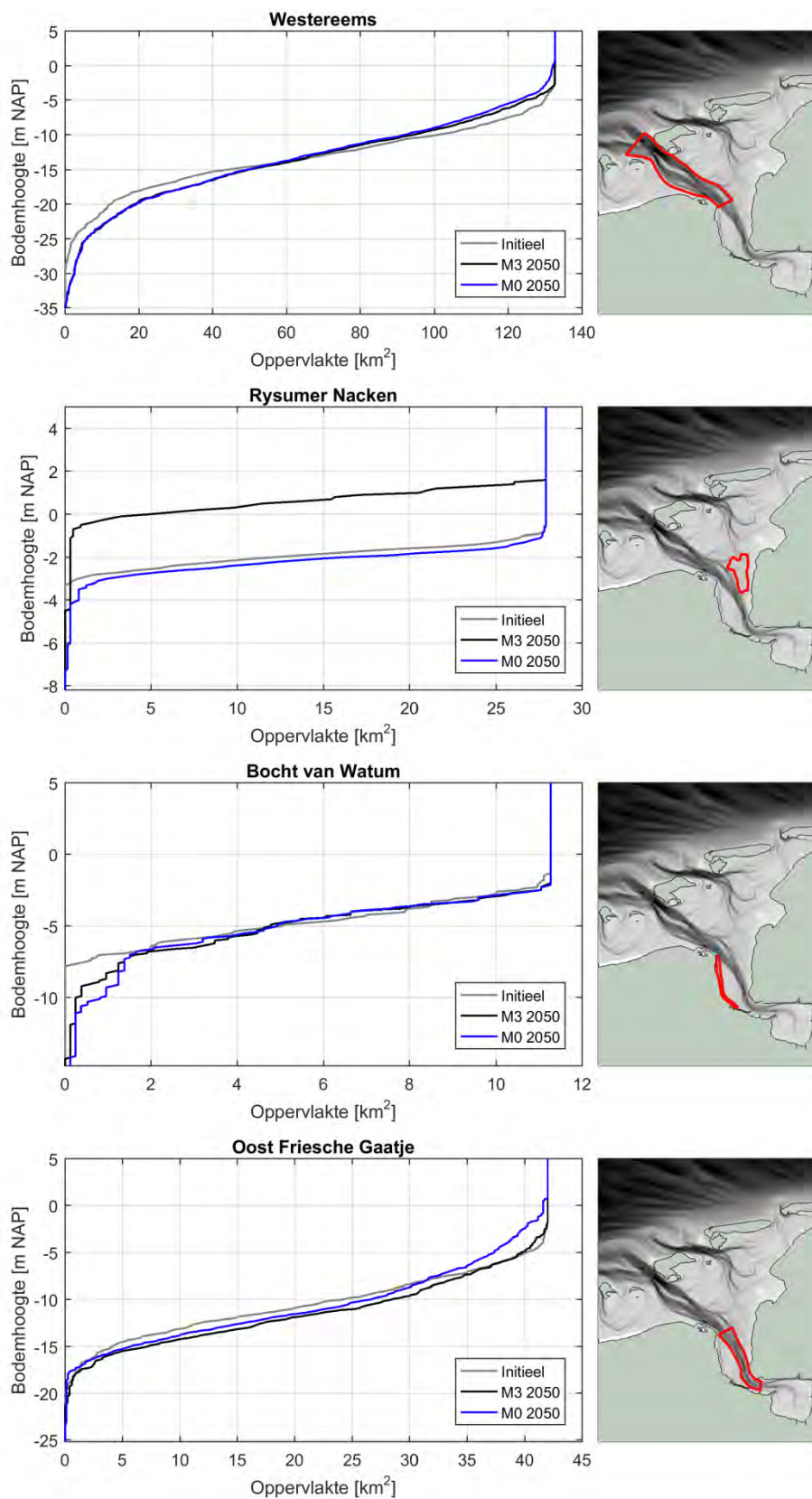
Het gestorte sediment verspreidt zich nauwelijks, en voornamelijk aan de oostkant van de stortlocatie is een scherpe overgang te zien tussen de stortlocatie en het gebied waar geen sediment wordt gestort. Dit is mogelijk een gevolg van de relatief simpele parameterisatie van golven – zie Hoofdstuk 4 voor details. Als gevolg van de stortingen verdwijnt de Doekeplaat grotendeels en wordt de geul Doekegat breder dan bij autonome ontwikkeling.



Figuur 3.24 Erosie-sedimentatiepatroon over de periode 2014-2050 (links) en verschil in bodemligging in 2050 (rechts) tussen het scenario 'vergroten plaatareaal' (M3) en de autonome ontwikkeling (M0). Een positieve waarde is een verhoging van de bodemligging t.o.v.2014 (links) of de autonome ontwikkeling (rechts).

De hypsometrische curve (Figuur 3.25) van de Rysumer Nacken geeft duidelijk aan dat de bodem binnen de polygoon uniform is opgehoogd: de curve is in zijn geheel omhoog verplaatst. Gedurende de autonome ontwikkeling in het LZS-model vindt er erosie plaats van dit gebied, deze trend wordt tegengegaan door de stortingen. De hypsometrische curves voor de Bocht van Watum en de Westereems worden beperkt beïnvloed door de storting. De hypsometrische curve voor het Oostfriesche Gaatje verandert (net als bij het storten in het Blindes Randzelgat) minder dan de autonome ontwikkeling. De autonome ontwikkeling laat een afname van de gemiddelde waterdiepte zien in gebieden met een diepte tussen 0 en 10 meter, terwijl de gemiddelde waterdiepte juist weinig verandert door het storten bij de Rysumer Nacken.

De veranderingen in morfologische ontwikkeling ter plaatse van het Doekegat (nabij Eemshaven) zijn erg vergelijkbaar met het storten in het Blindes Randzelgat,. De morfologische ontwikkelingen in dit gebied hebben waarschijnlijk dan ook niet te maken met het ontbreken van stortingen op de stortlocaties KS05 en KS07 (zie ook Figuur 2.4).

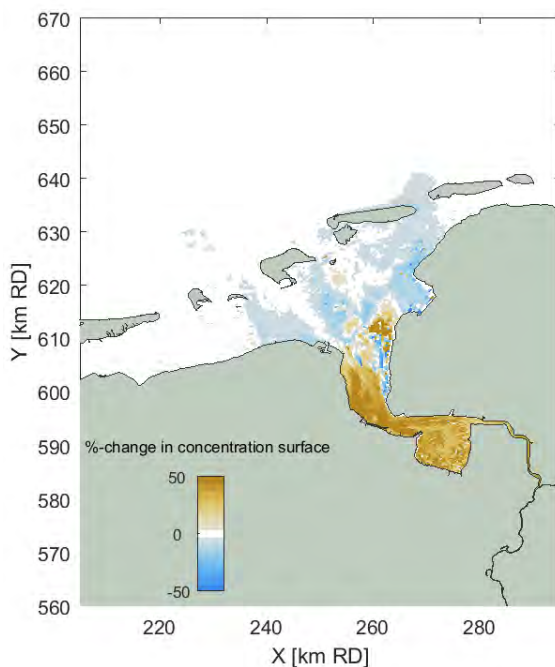


Figuur 3.25 Hypsometrische curven van de Westereems, stortpolygoon Rysumer Nacken, Bocht van Watum en het Oost Friesche Gaatje.

3.5.2 Effect op slibconcentraties

Het doel van deze maatregelrichting is om de morfologie dusdanig te beïnvloeden dat een verandering in de waterbeweging ontstaat waardoor de sedimentconcentratie afneemt. De morfologie wordt beïnvloed door zandig sediment gebaggerd uit de vaargeulen (zie Figuur 2.8) te storten op de Rysumer Nacken. Deze storting begint in 2014, en daarom is voor 2014 geen effect op de slibconcentratie doorgerekend.

De slibconcentratie neemt toe in een groot deel van het estuarium (zie Figuur 3.26). De toename is iets sterker dan de toename bij de maatregelrichting waarbij slib wordt gestort in het Blindes Randzelgat.



Figuur 3.26 Verandering in sedimentconcentratie (in %) in 2050 voor scenario vergroten plaatareaal (M3). Een blauwe verandering is een afname in de sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (M0).

3.5.3 Waterbeweging en slibtransport

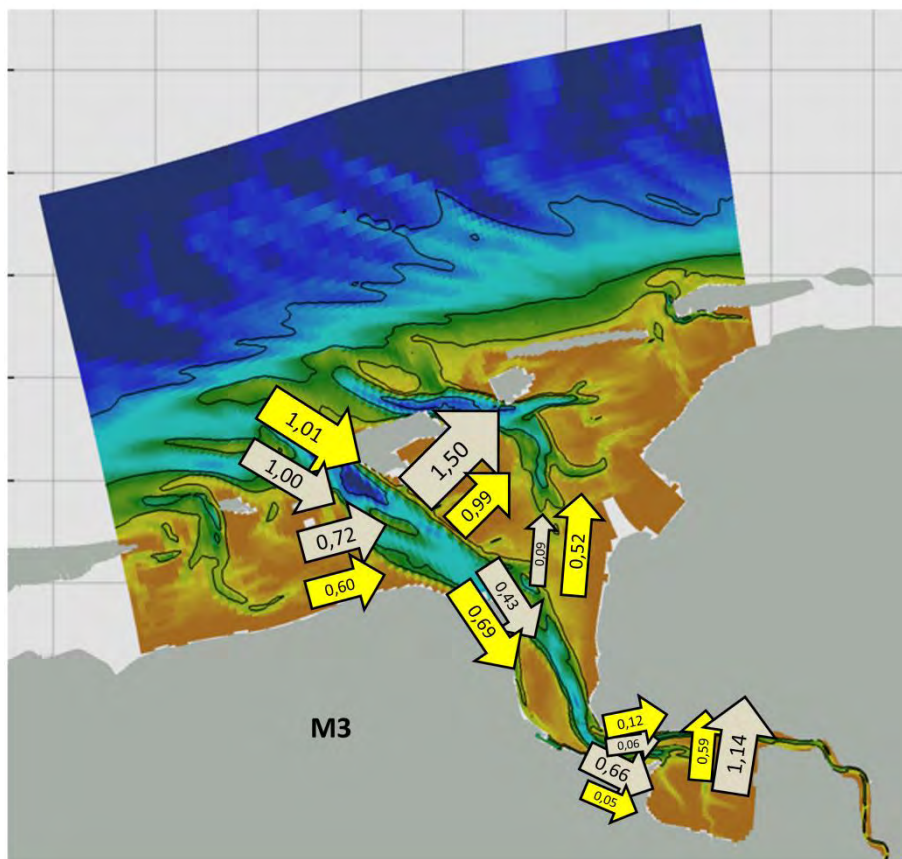
De verandering van de netto sedimentfluxen is sterker bij deze maatregel (M3; Figuur 3.27) dan bij de vorige (M2; Figuur 3.20). Net als bij maatregel M2 en de autonome ontwikkeling neemt de sedimentflux richting de Dollard toe.

De berekende toename in de slibconcentratie in 2050 (Figuur 3.26) kan het gevolg zijn van een toename in de getijslag of van een toename in de zout-gedreven dichtheidsstroming. De getijamplituden van M_2 en M_4 nemen beide met 5 tot 10% toe in het gehele estuarium (Figuur 3.22) als gevolg van de verdieping en verbreding van de toegangsgeulen. De motivatie van deze maatregel was het reduceren van de vloeddominantie (gekenmerkt door het faseverschil $\phi_{\zeta_{2M_2-M_4}}$) in het estuarium. De vloedstroomsnelheden zijn maximaal ten opzichte van de ebstroomsnelheden wanneer $\phi_{\zeta_{2M_2-M_4}} = 90^\circ$. Dit faseverschil neemt 5 tot 10° toe, en aangezien $\phi_{\zeta_{2M_2-M_4}} > 90^\circ$ betekent dit dat de vloeddominantie relatief iets afneemt. Dit zal

echter de toename van 10% in de getijslag niet compenseren. Het netto resultaat is dat bij dit scenario het getij-gedreven slibtransport in 2050 groter is dan bij de autonome ontwikkeling.

De toename van de diepte van het Doekegat (Figuur 3.24) leidt ook tot een toename in het relatieve belang van zout-gedreven dichtheidsstroming (locatie U2 in Figuur 3.21). Het relatieve belang van een verandering in de getijslag en dichtheidsstroming kan verkregen worden door scenario M2 en M3 te vergelijken.

Een belangrijke overeenkomst tussen scenario M2 en M3 is dat in beide scenario's via baggeren zand uit de toegangsgewen van het Eems Estuarium wordt verwijderd, wat leidt tot verdieping van het Doekegat en Oostfriesche Gaatje. Dit heeft een toename in de dichtheidsstroming (Figuur 3.21) en van de getijslag (Figuur 3.22) tot gevolg. Een opvallend verschil tussen beide maatregelen is echter dat bij maatregel M2 de estuariene circulatie sterker toeneemt en dat bij M3 de getijslag sterker toeneemt (dan M2). De sedimentconcentratie neemt sterker toe bij M3 dan bij M2. Dit suggereert dat de toename in getijslag een belangrijke bijdrage kan leveren aan een toename van de vertroebeling.



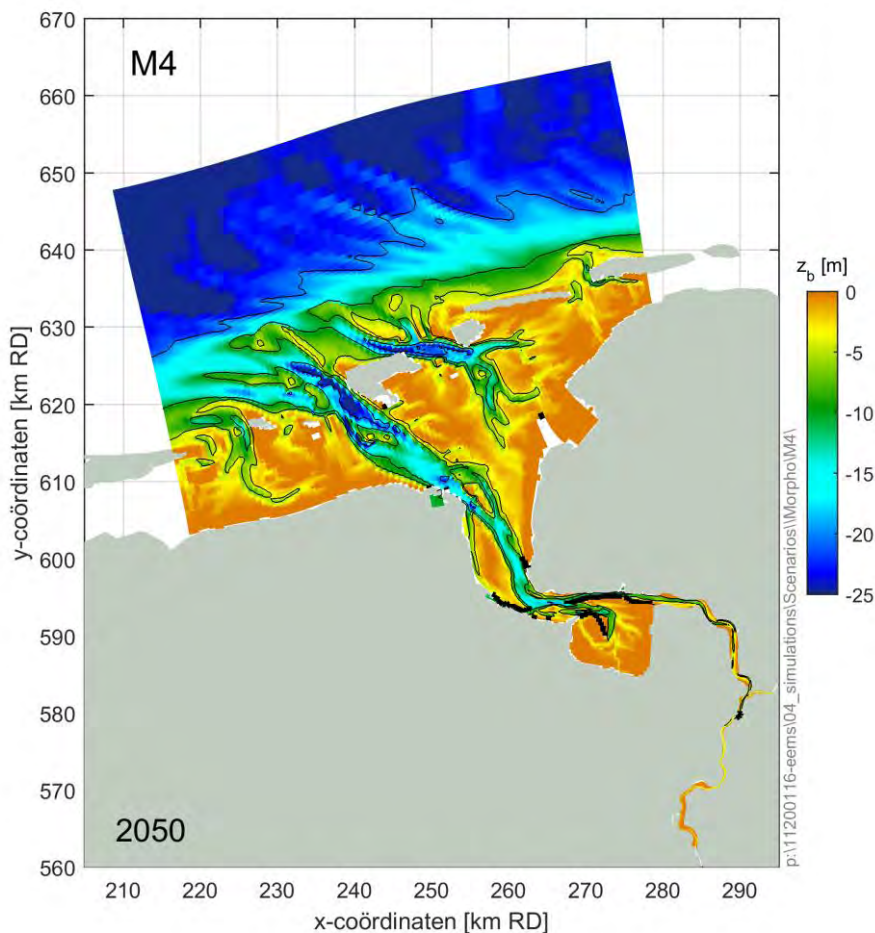
Figuur 3.27 Netto sedimenttransport (in miljoen ton/jaar) in 2014 (geel) en 2050 (grijs) voor scenario 'plaatareaal' (M3). Zie Figuur 3.7 voor een gedetailleerde beschrijving.

3.6 Bevorderen sedimentatie (M4)

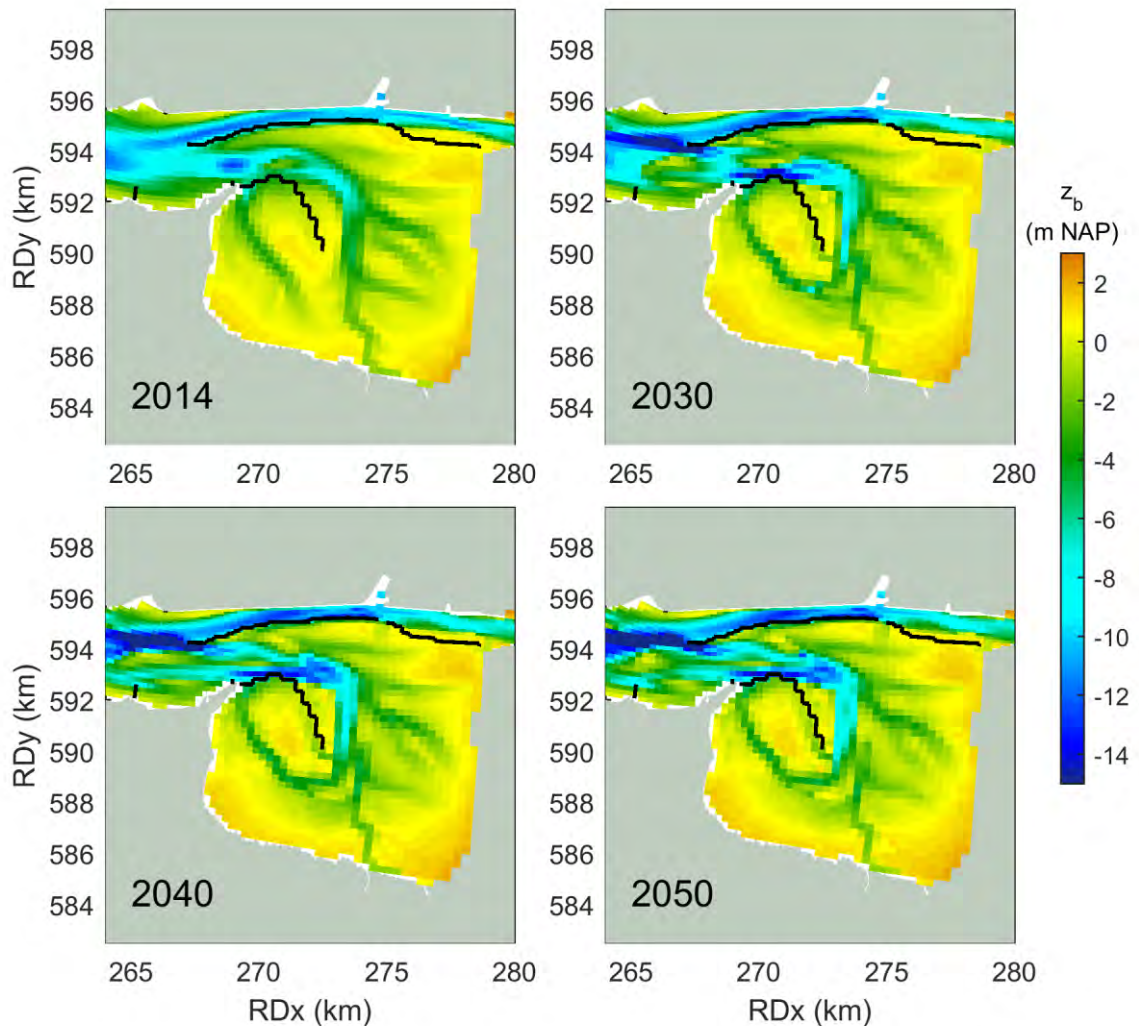
3.6.1 Effect op morfologie

Water stroomt in de huidige situatie in en uit de Dollard via twee hoofdgeulen: de dominante geul Groote Gat en de kleinere geul het Kerkeriet. Door het aanleggen van een dam wordt niet alleen een luw gebied gecreëerd, maar wordt ook de verbinding tussen het Kerkeriet en de Eems afgesloten, waardoor het Kerkeriet verzandt.

Het berekende morfologische eindbeeld in 2050 is voor het hele Eems Estuarium weergegeven in Figuur 3.28; de bodemliggingen op een aantal tijdstippen tussen 2014 en 2050 in alleen de Dollard in Figuur 3.29. De bodemveranderingen in 2050 ten opzichte van 2014 en ten opzichte van de autonome ontwikkeling zijn gevisualiseerd in Figuur 3.32.



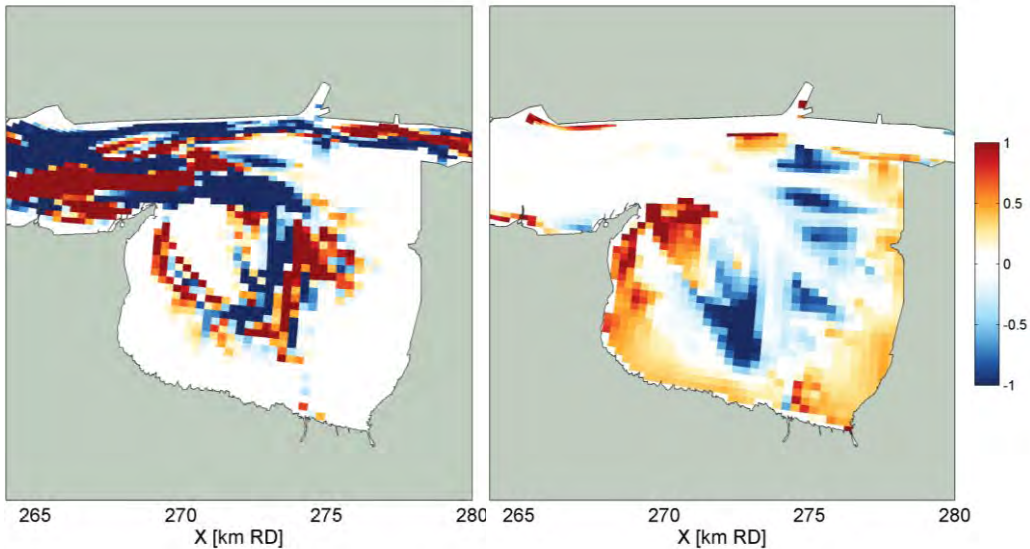
Figuur 3.28 Bodemligging in 2050 voor het scenario 'bevorderen sedimentatie' (M4).



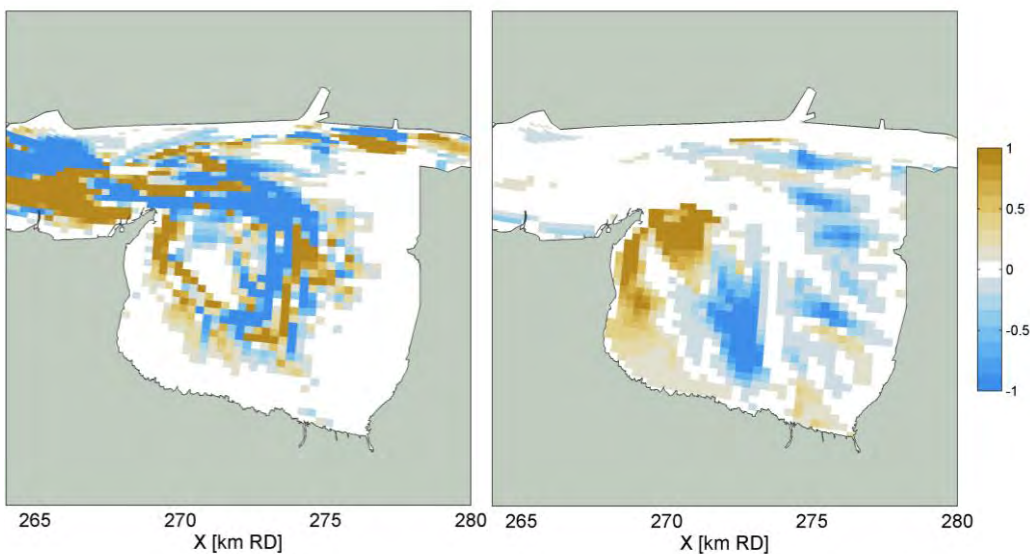
Figuur 3.29 Ontwikkeling van de bodemligging in de Dollard voor scenario Bevorderen sedimentatie (M4)

In het Kerkeriet wordt 2 m zand afgezet en op de ondiepere platen wordt slib afgezet (tot 1.5 m, zie Figuur 3.30). De met de huidige versie van het model berekende aanslibbing is waarschijnlijk een onderschatting (zie Hoofdstuk 4 voor details). Deze bodemveranderingen zijn grotendeels het gevolg van het verlengen van de Punt van Reide, wat blijkt uit een vergelijking met de autonome ontwikkeling (Figuur 3.31).

Het Grootte Gat verdiept zich over de gehele lengte, maar migreert niet. Kennelijk is de Heeringsplaat (de ondiepte tussen het Grootte Gat en Kerkeriet) te hoog gelegen om door het Grootte Gat te eroderen. Daarnaast is de geul opvallend recht, wat mogelijk een gevolg is van de beperkte roosterresolutie. Het Grootte Gat ten zuiden van de Heeringsplaat buigt naar het westen af om het gebied ten zuiden van de dam te draineren. Het Grootte Gat neemt hierbij de functie van het Kerkeriet over.



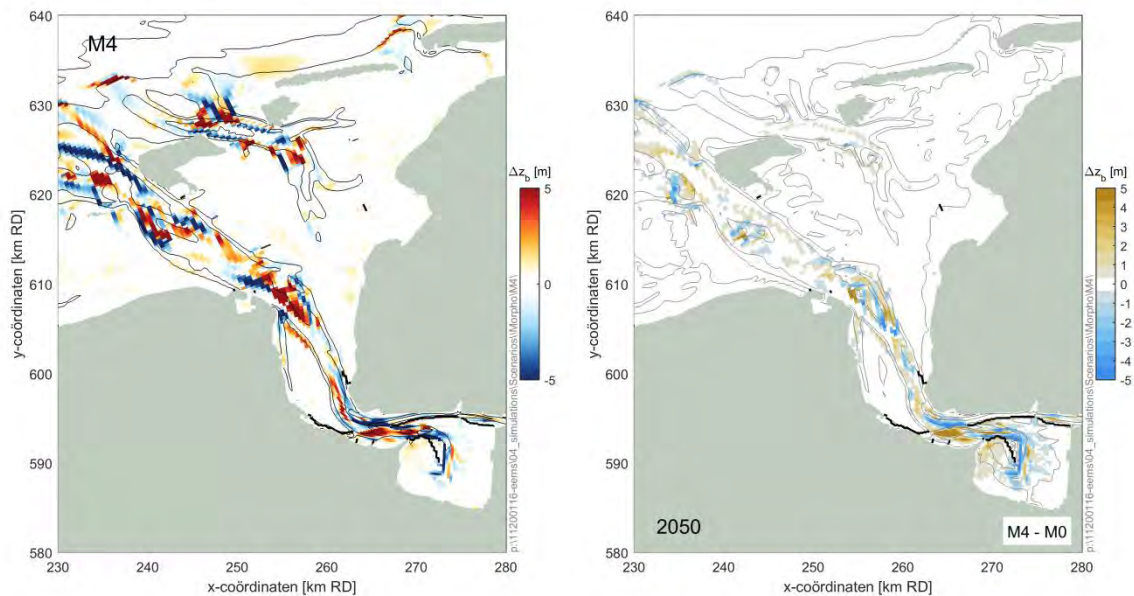
Figuur 3.30 Bodemverandering tussen 2014 en 2050, uitgesplitst naar sedimentfractie zand (links) en klei (rechts), voor maatregel 'bevorderen sedimentatie'. Een positieve waarde is een verhoging van de bodemligging (in meter) t.o.v. 2014.



Figuur 3.31 Verschil in bodemligging voor maatregel 'bevorderen sedimentatie' ten opzichte van de autonome ontwikkeling (in meter), uitgesplitst naar sedimentfractie zand (links) en klei (rechts). Een positieve waarde is een verhoging van de bodemligging t.o.v. de autonome ontwikkeling.

De aanleg van de dam wijzigt de patronen waarmee de getijstrooming in de Dollard en beïnvloedt daarmee niet alleen de morfologie in de Dollard maar ook noordelijker gelegen delen van het estuarium (Figuur 3.32). Een markante ontwikkeling is de toegenomen sedimentatie tussen het havenhoofd van Delfzijl en de Punt van Reide. De ontwikkeling van intergetijdengebied op deze locatie drukt de Mond van de Dollard noordwaarts waardoor de toegangseul in 2050 minder breed maar wel dieper is dan bij de autonome ontwikkeling. In de monding van het estuarium zijn ook verschillen op te merken maar deze zijn over het

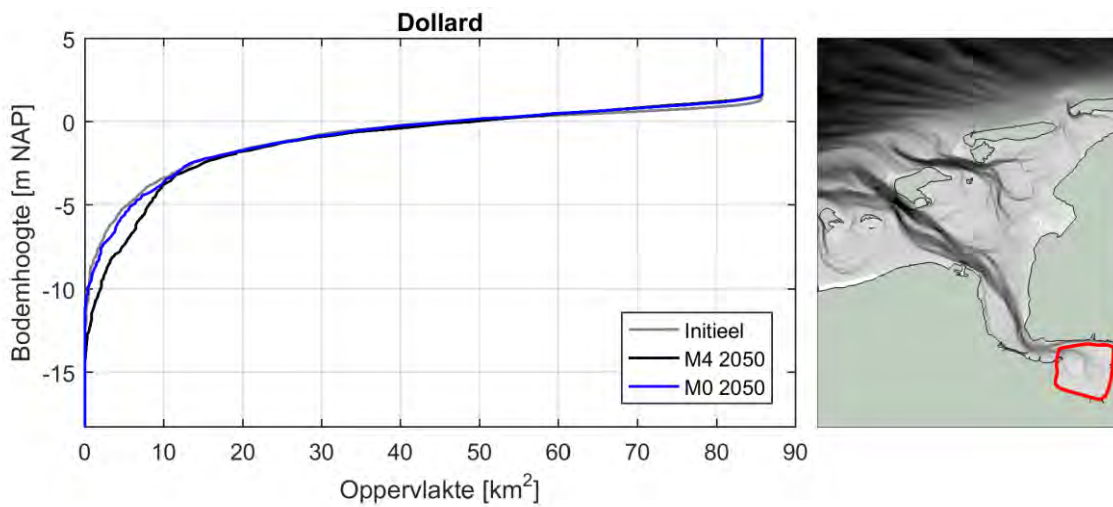
algemeen klein en zijn op de randen van geulen gelegen. De patronen duiden daarom op een kleine wijziging van de migratie van de geulen.



Figuur 3.32 Erosie-sedimentatiepatroon over de periode 2014-2050 (links) en verschil in bodemligging in 2050 (rechts) tussen het scenario 'bevorderen sedimentatie' (M4) en de autonome ontwikkeling (M0). Een positieve waarde is een verhoging van de bodemligging t.o.v.2014 (links) of de autonome ontwikkeling (rechts).

Figuur 3.33 laat zien dat de hypsometrie van de Dollard tijdens de autonome ontwikkeling tot 2050 niet veel verandert (zie ook Deltares, 2017a). De aanleg van de dam heeft als gevolg dat het Grootte Gat verdiept, en dit is te zien doordat de waterdiepte in het areaal ≈ -4 m NAP toeneemt ten opzichte van de autonome ontwikkeling S0. Zoals verder besproken in Hoofdstuk 4, zal deze geulerosie in werkelijkheid waarschijnlijk niet of slechts beperkt optreden omdat de bodem van de Dollard uit harde lagen bestaat. Hierdoor zullen de geulen in werkelijkheid relatief breder en ondieper zijn. Diepe, smalle geulen zullen waarschijnlijk leiden tot meer landwaarts sedimenttransport vanwege een sterkere vloeddominantie, en door een sterkere bijdrage van estuariene circulatie.

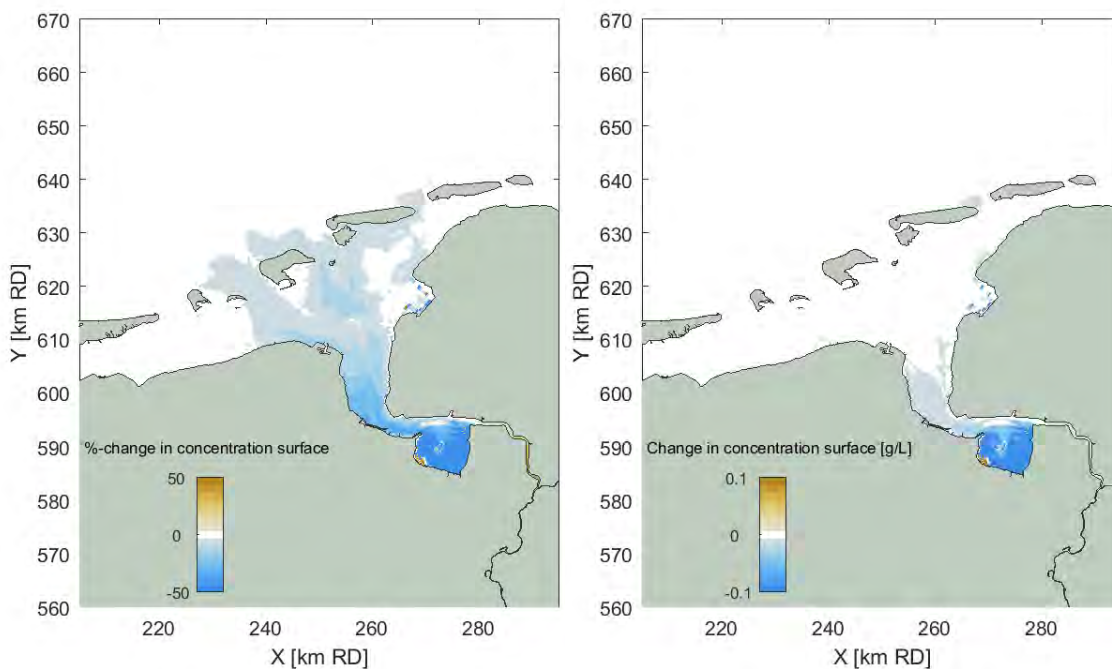
De toegenomen aanslibbing in het luwe gedeelte is niet goed waarneembaar aan de hand van de hypsometrische curven doordat de toename in bodemhoogte te gering is. Aan de hand van de curven kan geconcludeerd worden dat de aanleg van de dam als gevolg heeft dat er een netto export van sediment uit de Dollard heeft plaatsgevonden in de periode 2014 – 2050. Vooral zandig sediment wordt vanuit de geulen geërodeerd, terwijl de platen aanslibben (zie Figuur 3.30). Dit aanbod van zandig sediment is waarschijnlijk verantwoordelijk voor de berekende toegenomen sedimentatie tussen het havenhoofd van Delfzijl en de Punt van Reide (zoals hierboven beschreven).



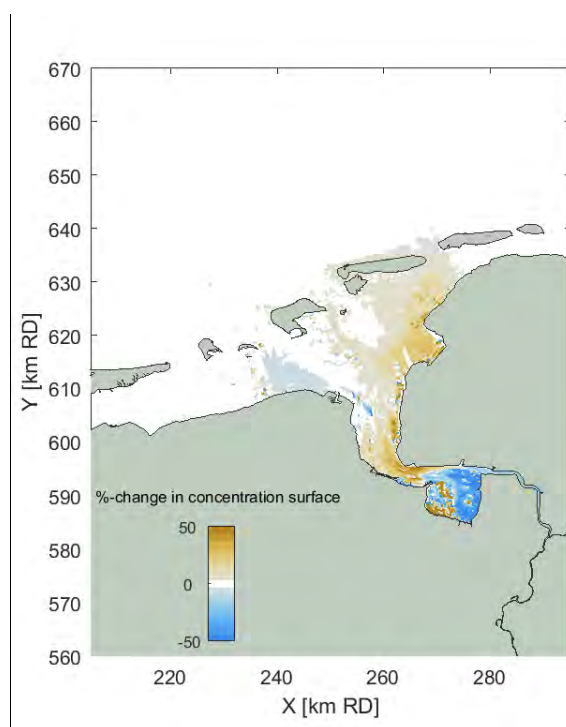
Figuur 3.33 Hypsometrische curven van de Dollard voor het scenario 'bevorderen sedimentatie'.

3.6.2 Effect op slibconcentraties

In 2014 heeft het verlengen van de punt van Reide een grote invloed op de sedimentconcentratie: door het hele estuarium wordt een afname in de sedimentconcentratie voorspeld (Figuur 3.34). In de Dollard halveert de sedimentconcentratie. In 2050 is het voorspelde effect veel minder sterk: de berekende jaarlijks gemiddelde sedimentconcentratie neemt af in de oostelijke Dollard maar neemt toe in het midden van het Eems Estuarium (vooral in het Oosten) en in de westelijke Dollard (Figuur 3.35). Over het gehele estuarium neemt de sedimentconcentratie af, zowel in 2014 als in 2050.



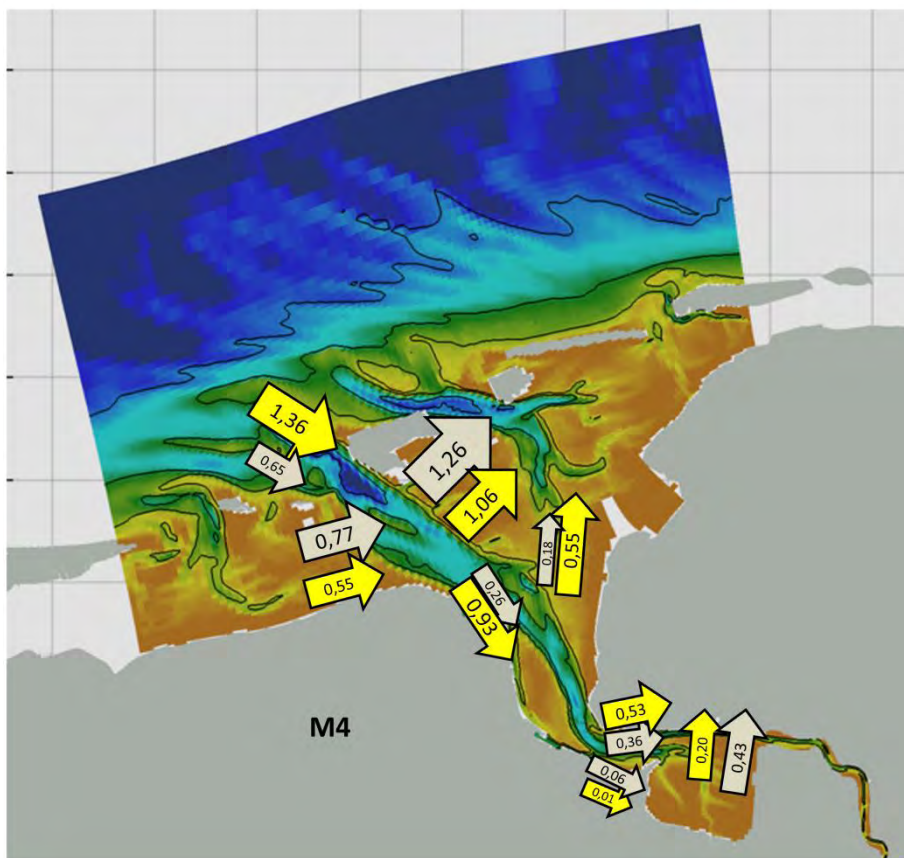
Figuur 3.34 Verandering in sedimentconcentratie (in %, links en g/l, rechts) in 2014 voor scenario 'bevorderen sedimentatie'. Een positieve verandering is een toename in de sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (M0).



Figuur 3.35 Verandering in sedimentconcentratie (in %) in 2050 voor scenario 'bevorderen sedimentatie'. Een positieve verandering is een toename in de sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (M0).

3.6.3 Waterbeweging en slibtransport

Bij de maatregel 'bevorderen sedimentatie' door het verlengen van de Punt van Reide komt netto meer sediment het estuarium binnen (vergelijk Figuur 3.36 met Figuur 3.7), vooral in 2014. Opvallend is dat het meeste van deze extra import richting de Eems Rivier wordt getransporteerd, en niet richting de Dollard. Dit is een logisch gevolg van de verdieping van het Oostfriesche Gaatje en de verzanding van de toegang tot de Dollard (welke weer het gevolg is van de eerder beschreven Noordwaartse verplaatsing van de Mond van de Dollard).

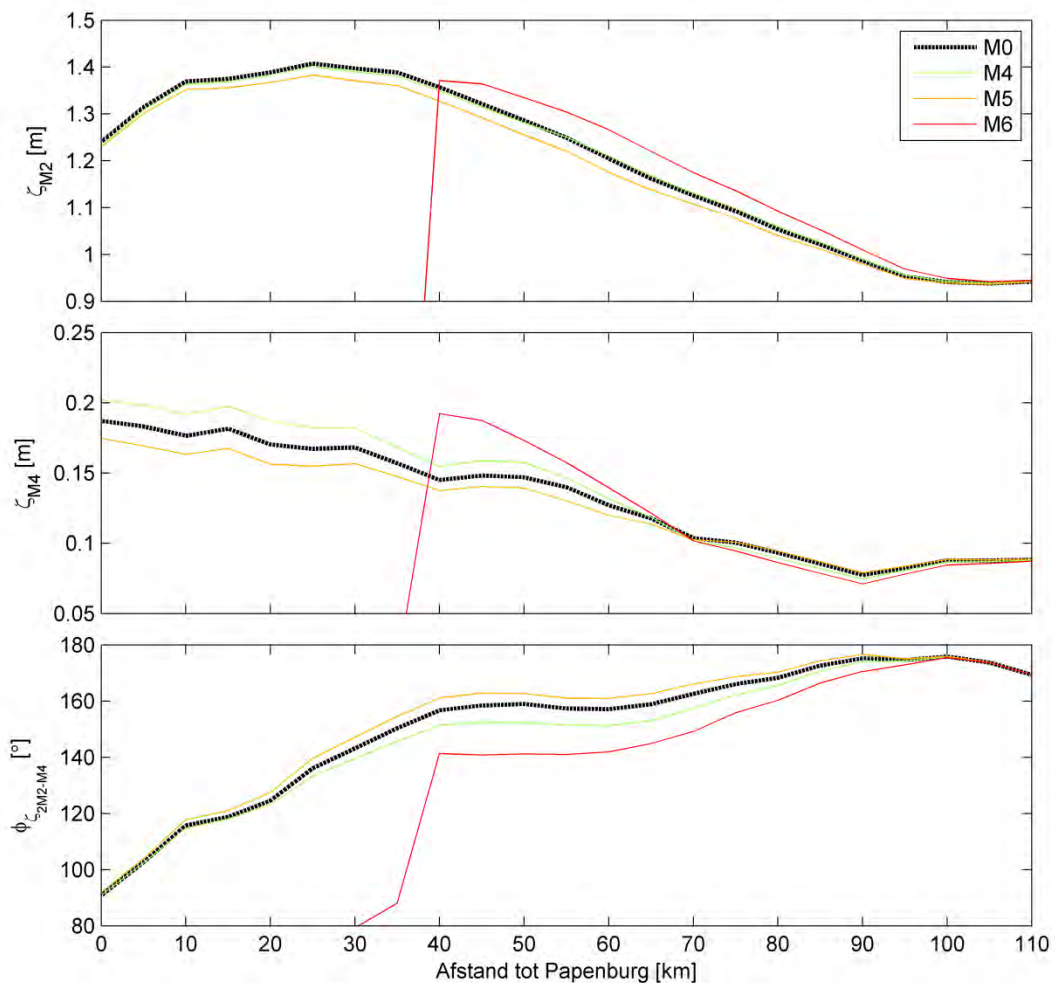


Figuur 3.36 Netto sedimenttransport (in miljoen ton/jaar) in 2014 (geel) en 2050 (grijs) voor scenario 'bevorderen sedimentatie' (M4). Zie Figuur 3.7 voor een gedetailleerde beschrijving.

De getijamplitude van de belangrijkste component M_2 wordt in 2014 slechts beperkt beïnvloed (Figuur 3.37). Echter, in 2050 is de getijamplitude tussen Papenburg en km 70 afgenomen (Figuur 3.22). Hierbij komt km 50 overeen met de mond van de Dollard, en km 70 met Eemshaven (zie Figuur 2.15). Deze afname in 2050 kan een aantal oorzaken hebben:

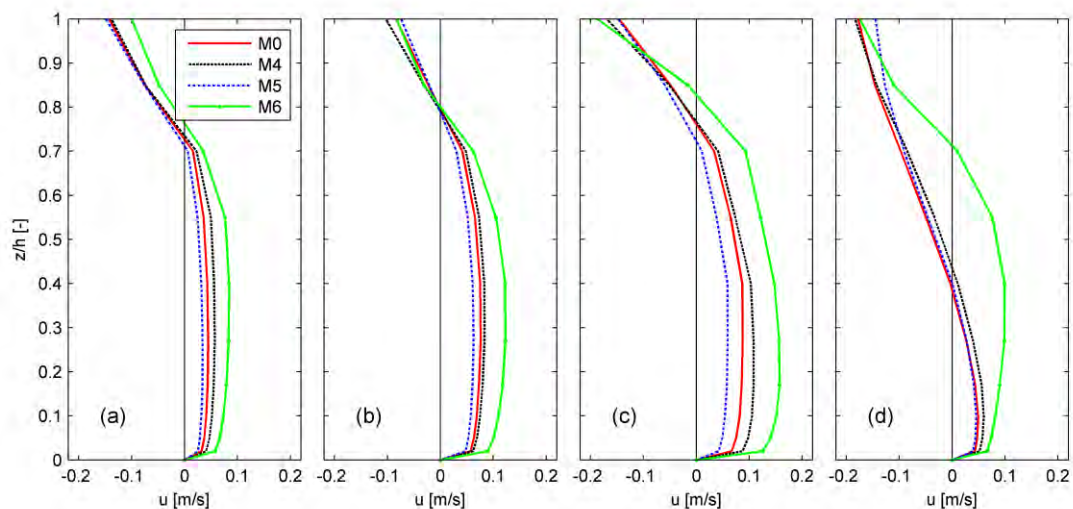
- (1) De fasering van het getij verandert doordat de Dollard gedraineerd wordt door één geul in plaats van twee.
- (2) De aanzanding tussen de punt van Reide en Delfzijl blokkeert getijpropagatie en vermindert daardoor de getijamplitude

Opvallend is dat veranderingen in M_4 juist vooral merkbaar zijn in 2014, waarbij de amplitude van M_4 toeneemt en het getij vloed-dominanter wordt ($\phi_{\zeta_{2M_2-M_4}}$ dichter naar 90°). In 2050 is de verandering van de amplitude van M_4 of van het faseverschil $\phi_{\zeta_{2M_2-M_4}}$ ten opzichte van de autonome ontwikkeling verwaarloosbaar.

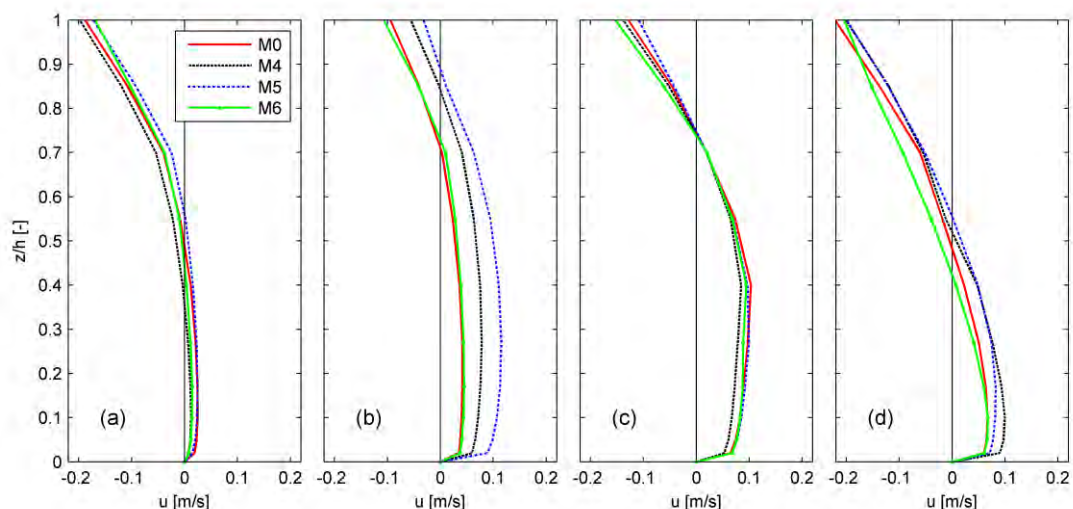


Figuur 3.37 Waterstandsamplitude ζ van de M_2 en M_4 getijcomponenten, en het faseverschil $\phi_{\zeta_{M_2-M_4}}$ tussen M_2 en M_4 , voor scenario's waarin de waterbeweging in 2014 significant verschilt van de autonome ontwikkeling, tussen Papenburg (km0) en de monding van de Eems (zie Figuur 2.15 voor locatie).

Door het verlengen van de Punt van Reide is de estuariene circulatie in 2014 iets sterker dan in de huidige situatie (Figuur 3.38). Daarna treedt vooral een verandering in de dieptegemiddelde stroming op (2050 in Figuur 3.39): een afname op locatie U1 en een toename op locaties U2 en U4 (locaties aangegeven in Figuur 2.15). Dit is het gevolg van een verlegging van de hoofdgeul (door sedimentatie tussen de punt van Reide en Delfzijl, zoals eerder beschreven).



Figuur 3.38 Getij-gemiddelde stroomsnelheidsprofielen in januari berekend met het model op locaties U1 t/m U4 (a t/m d, resp., zie Figuur 2.15 voor locatie) voor de huidige situatie (2014) en bij de maatregelrichtingen Bevorderen sedimentatie (M4), Toevoegen binnendijks sedimentatiegebied (M5) en Dynamiek Eemsrivier (M6), in 2014.



Figuur 3.39 Getij-gemiddelde stroomsnelheidsprofielen in januari berekend met het model op locaties U1 t/m U4 (a t/m d, resp., zie Figuur 2.15 voor locatie) in 2050 bij autonome ontwikkeling en bij de maatregelrichtingen Bevorderen sedimentatie (M4), Toevoegen binnendijks sedimentatiegebied (M5) en Dynamiek Eemsrivier (M6),

In 2014 is het getij en residuele stroming beperkt beïnvloed door de verlengde punt van Reide terwijl de sedimentconcentratie toch sterk verandert. Deze veranderingen zijn het gevolg van het ontstaan van een relatief groot beschut gebied met relatief diep water. In dit gebied kan sediment makkelijk bezinken. Omdat dit gebied functioneert als een bezinkgebied, neemt de sedimentconcentratie in omliggende gebieden af.

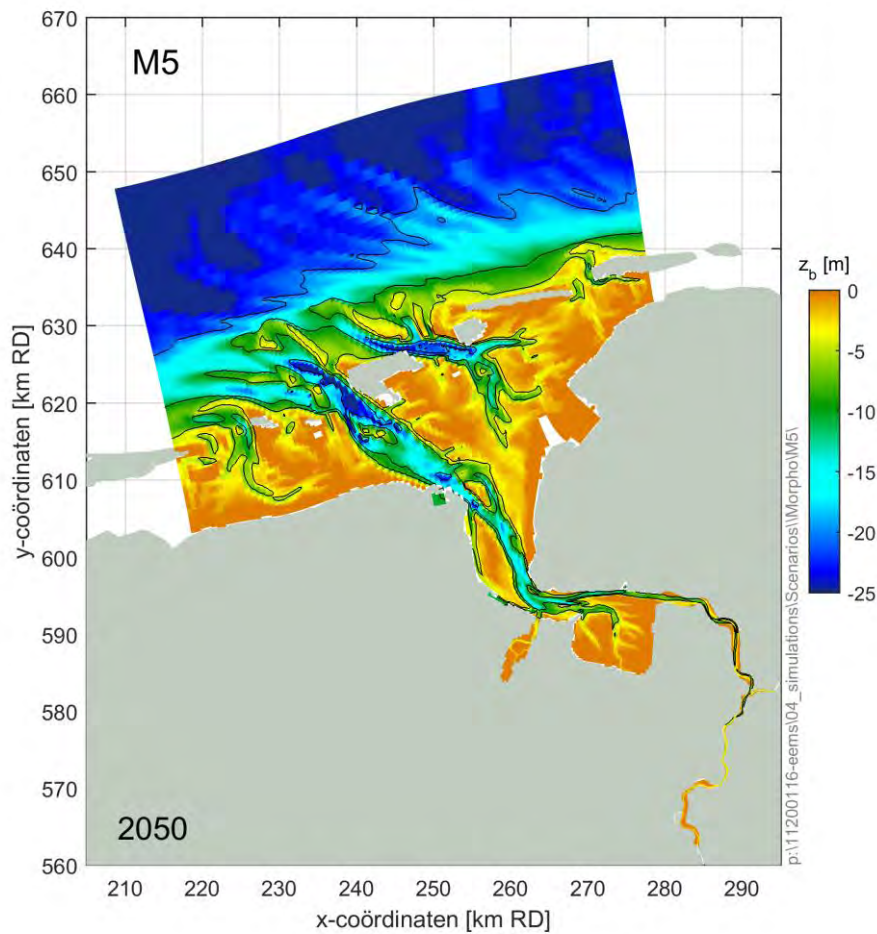
In 2050 is het gebied nog even beschut als in 2014, maar de waterdiepte is sterk afgenomen door sedimentatie. Hierdoor wordt het materiaal in het nu meer slibrijke, beschutte deel van de westelijke Dollard makkelijker opgewoeld, wat leidt tot hogere sedimentconcentraties. Doordat sedimentatiesnelheden zijn afgenomen, leidt de maatregel nog wel tot een afname in

de sedimentconcentratie in de oostelijke Dollard, maar niet meer tot een afname in het hele estuarium. De toename van de sedimentconcentratie in het buitendeel van het estuarium is waarschijnlijk het gevolg van een afname van transport richting Dollard: het landwaarts gerichte transport door het Oost Friesche Gaatje is in 2050 aanzienlijk lager dan in 2014 (Figuur 3.36). Deze afname kan het gevolg zijn van de reductie in het getijvolume. Het getijvolume is op haar beurt afgenomen doordat (1) veel sediment is afgezet in intergetijdengebieden (waardoor het getijprisma is afgenomen) en (2) de getijamplitude is afgenomen (Figuur 3.22). Deze afname in getijprisma heeft echter geen belangrijk effect op vertroebeling (positief dan wel negatief), omdat sedimentatiegebieden evenredig afnemen.

3.7 Toevoegen binnendijs intergetijdengebied (M5)

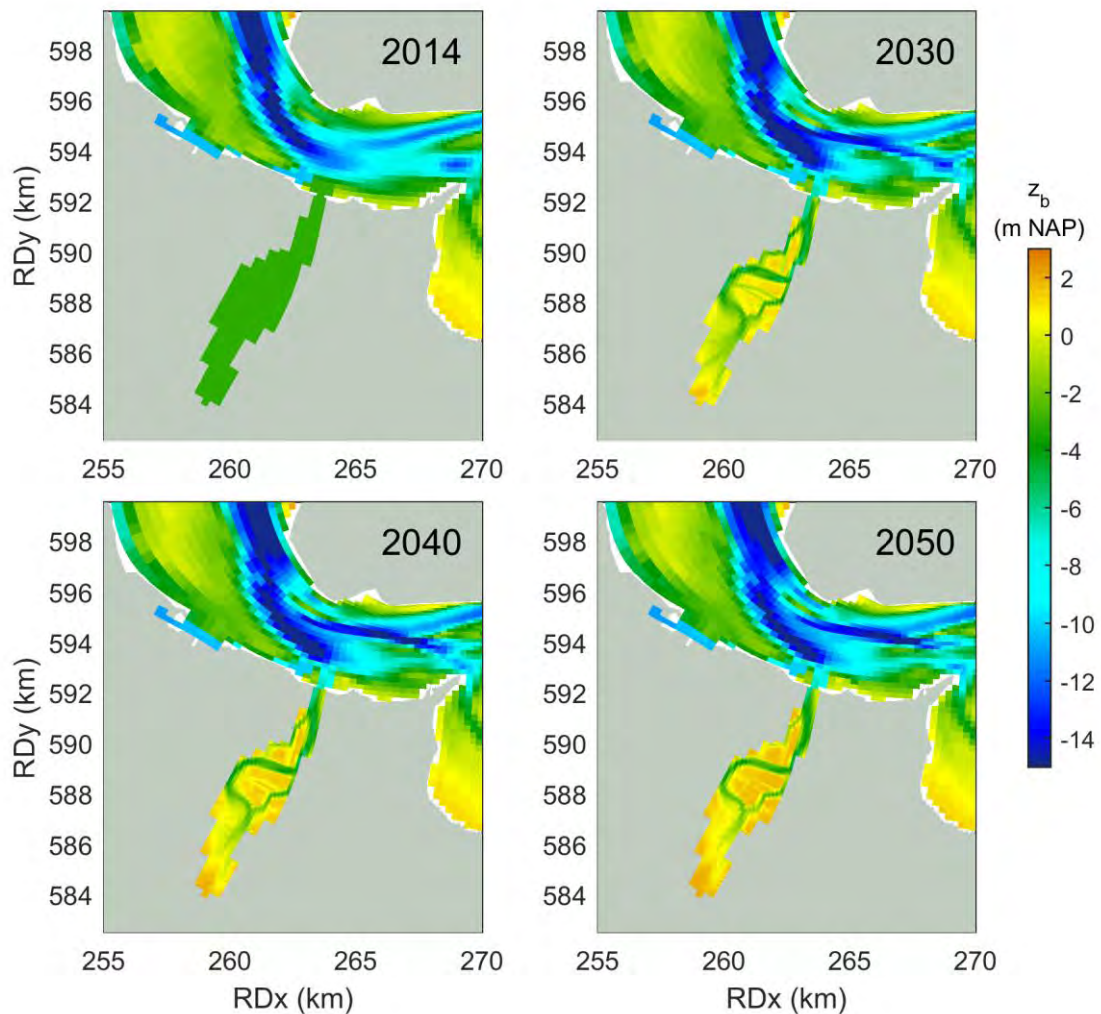
3.7.1 Effect op morfologie

Het morfologische eindbeeld voor het scenario 'toevoegen binnendijs intergetijdengebied' in 2050 (Figuur 3.40) is samengesteld uit de gesimuleerde bodemontwikkeling van de twee modellen (LZS en het gedetailleerde model van het toegevoegde overstromingsgebied) – zie §2.3 voor details. De berekende morfologische veranderingen zijn aanzienlijk (Figuur 3.41); dit is vooral zichtbaar als relatieve morfologische bodemverandering (t.o.v. 2014 en t.o.v. de referentie, zie Figuur 3.42). Vanuit het Oost Friesche Gaatje vormt er een geul richting het overstromingsgebied. Deze geul erodeert de plaat Hondpaap aan zuidoostelijke zijde. Een opvallende ontwikkeling ten opzichte van de autonome ontwikkeling is de verplaatsing van het Oostfriesche Gaatje richting Duitsland. Hierdoor vindt sedimentatie plaats aan de westelijke zijde van het Oostfriesche Gaatje. Er lijkt dus een verondieping te ontstaan tussen de nieuwe geul (richting het overstromingsgebied) en het Oost Friesche Gaatje (zie Figuur 3.42). Op termijn kan dit mogelijk leiden tot een klein lokaal meergeulensysteem.



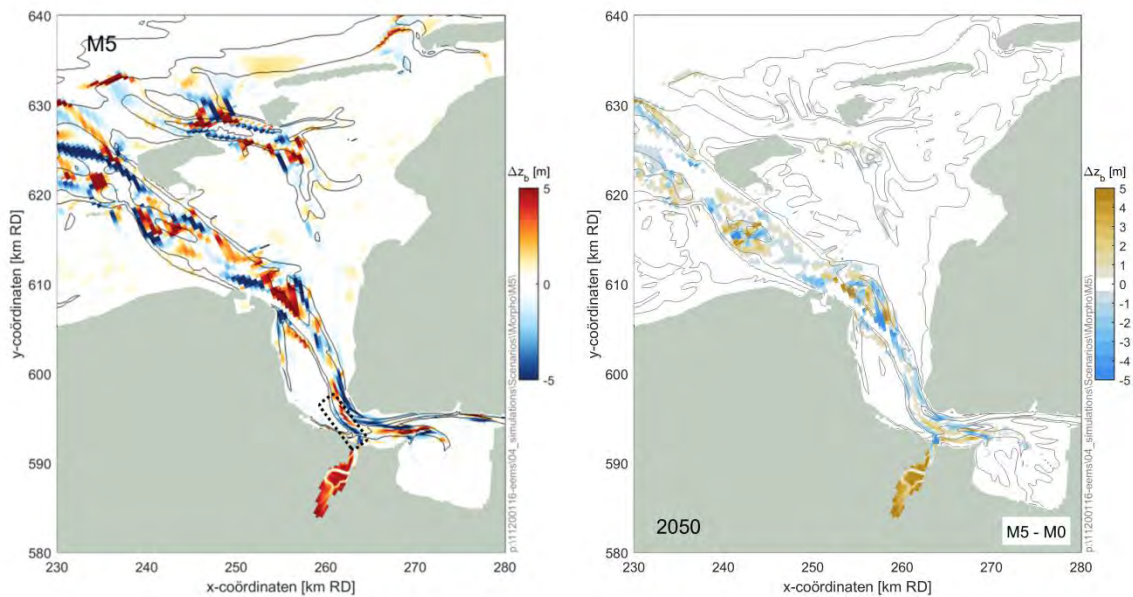
Figuur 3.40 Bodemligging in 2050 voor het scenario 'toevoegen binnendijks intergetijdengebied' (M5).

De veranderingen verder zeewaarts in het estuarium sinds 2014 (linker paneel in Figuur 3.42) zijn groot, maar zijn nabij Delfzijl (het Oost Friesche Gaatje, Gaatje Bocht) voor een belangrijk deel gelijk aan de veranderingen t.o.v. de autonome ontwikkeling (rechterpaneel in Figuur 3.42). Dit betekent dat de bodemveranderingen hier voornamelijk het gevolg zijn van de aanleg van het overstromingsgebied. Ten Noorden van Eemshaven is de bodemontwikkeling ten opzichte van de autonome ontwikkeling beperkt, wat betekent dat de aanleg van het overstromingsgebied hier geen groot effect meer heeft.

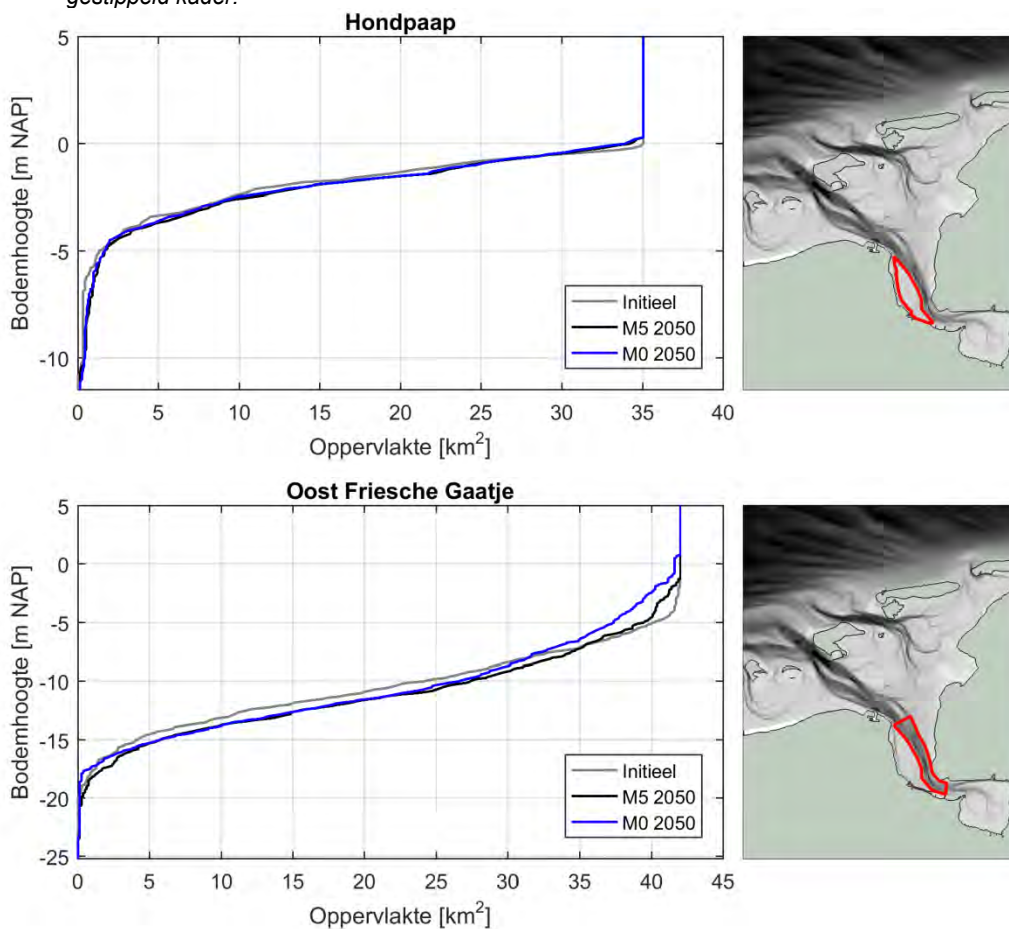


Figuur 3.41 Ontwikkeling van de bodemligging in het Eems estuarium nabij Delfzijl voor scenario toevoegen binnendijks intergetijdengebied (M5)

De hypsometrische curve van Hondpaap (Figuur 3.43, boven) laat de toegenomen erosie aan de flanken van het gebied zien. De curve van het Oost Friesche Gaatje (Figuur 3.43, onder) laat zien dat de geul verdiept, net zoals bij de autonome ontwikkeling.



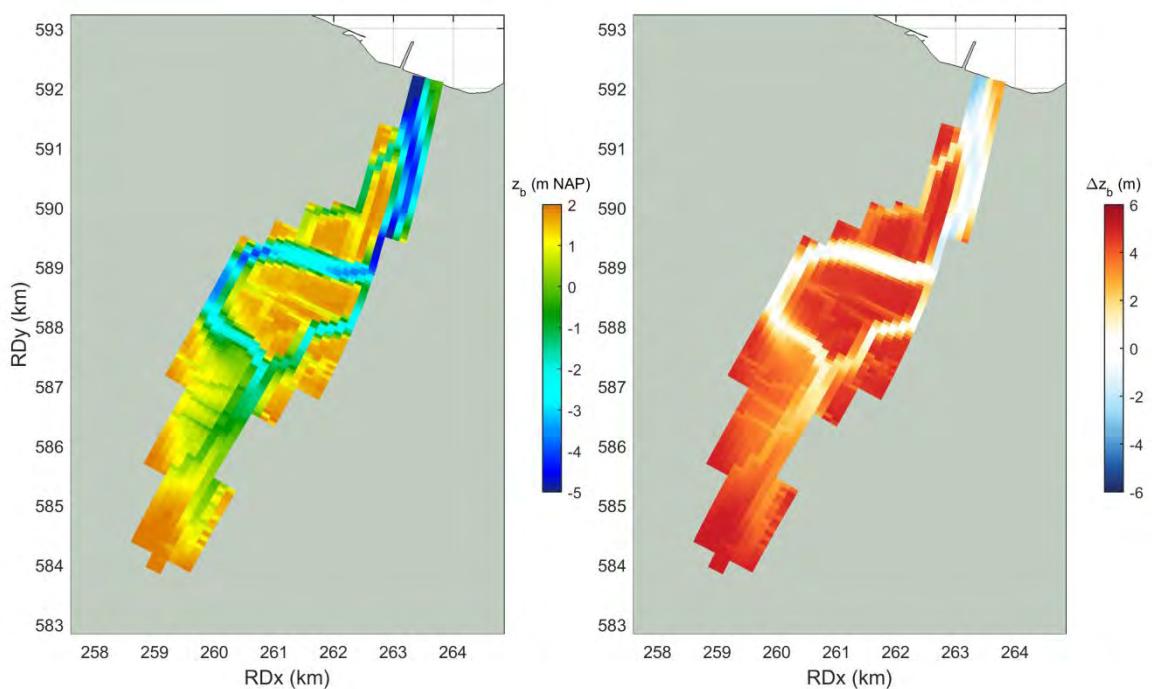
Figuur 3.42 Erosie-sedimentatiepatroon over de periode 2014-2050 (links) en verschil in bodemligging in 2050 (rechts) tussen het scenario 'toevoegen binnendijks intergetijdengebied' (M5) en de autonome ontwikkeling (M0). De nieuwe geul tussen het Oostfriesche Gaatje en het overstromingsgebied is aangegeven met een gestippeld kader.



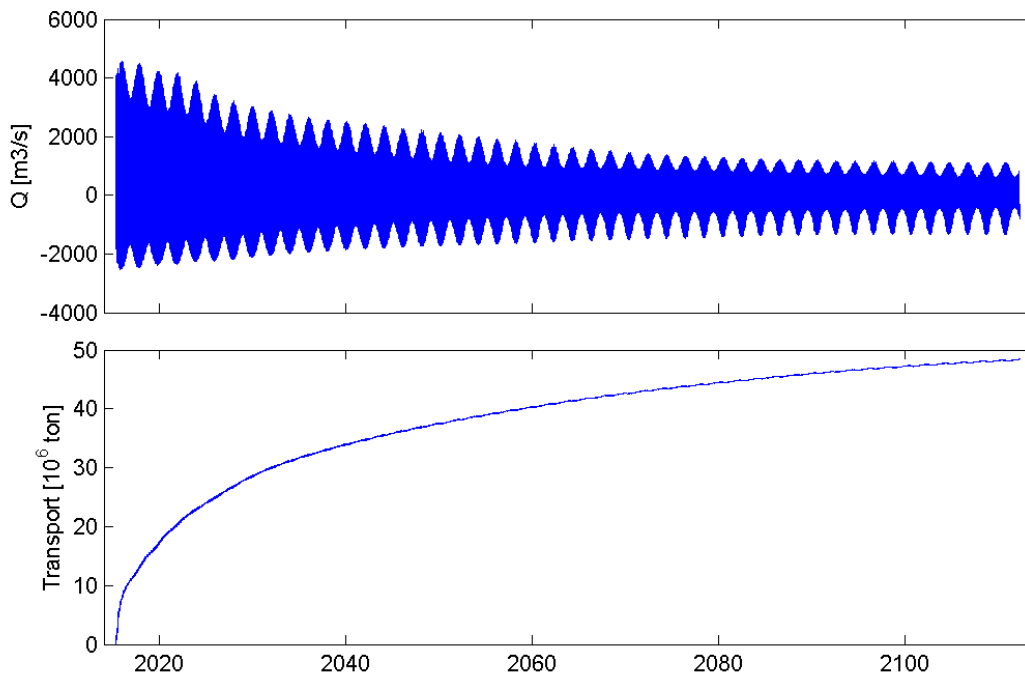
Figuur 3.43 Hypsometrische curven van Hondpaap (boven) en het Oost Friesche Gaatje (onder).

De morfologische ontwikkeling van het toegevoegde overstromingsgebied is gesimuleerd met het gedetailleerde model (weergegeven in Figuur 3.44). Het morfologische eindbeeld in 2050 geeft duidelijk weer dat het bekken sterk sedimenteert tot een hoogte van ongeveer 2 m NAP. De geulen in het bekken snijden zich in tot ongeveer -4 m NAP. Het erosie-sedimentatiepatroon laat zien dat de aanzanding/aanslibbing in het bekken tot wel vijf meter kan bedragen tijdens de gesimuleerde ontwikkeling van 2014 tot en met 2050. In 2050 is 37 miljoen ton bezonken. Als het model voor een periode van 100 jaar wordt gedraaid bezinkt 50 miljoen ton: in de eerste 35 jaar bezinkt dus 75% van het materiaal. De aanslibbing is het sterkst in de eerste jaren na opening (Figuur 3.45): ongeveer 50% van de totale aanslibbing vindt plaats in de eerste 10 jaar. De aanslibbing vermindert omdat

- (1) Het getijprisma afneemt (wat weer het gevolg is van de afname van het intergetijdegebied door aanslibbing) en
- (2) Doordat het overstromingsgebied een minder efficiënt sediment-invanggebied wordt (de stroomsnelheden blijven hoog in een grote deel van het gebied, zodat sedimentdeeltjes geërodeerd kunnen worden en weer naar buiten worden getransporteerd).



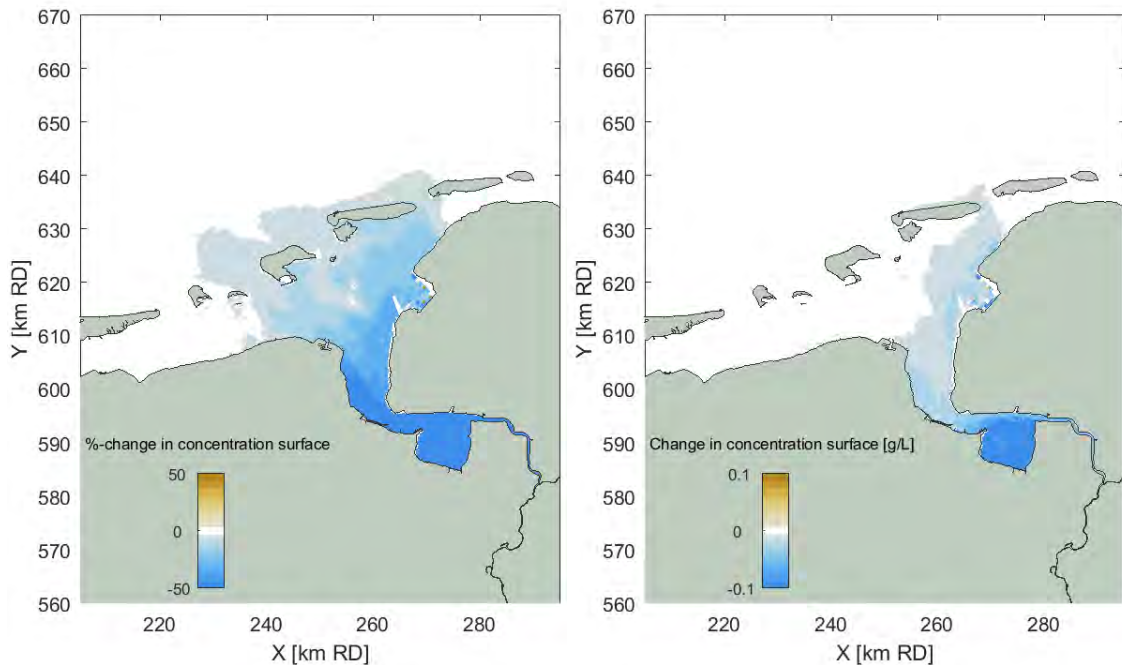
Figuur 3.44 Morfologisch eindbeeld in 2050 (links) en erosie-sedimentatiepatroon van het toegevoegde bekken.



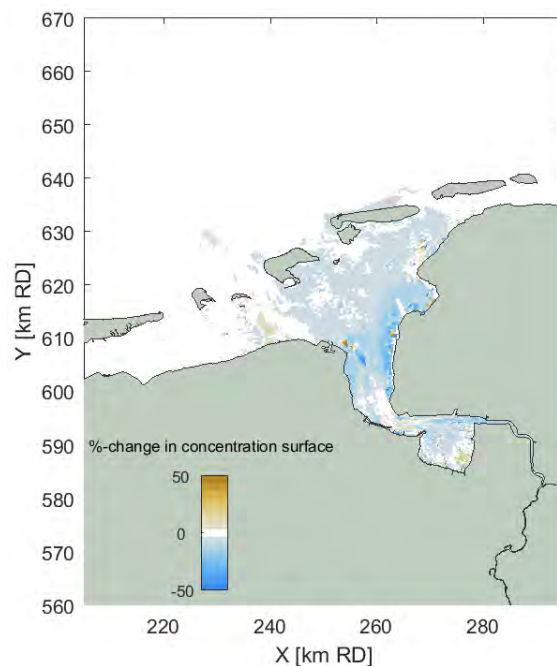
Figuur 3.45 Instantaan debiet (boven) en cumulatief transport (in miljoen ton, beneden) wat in het overstromingsgebied bezinkt gedurende een periode van 100 jaar. De asymptoot komt overeen met een compleet opgevuuld overstromingsgebied (een volume van 5 meter keer $15 \text{ km}^2 = 75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$; de opgevuilde massa is afhankelijk van de relatieve hoeveelheid zand (hoge dichtheid) en slib (lage dichtheid)).

3.7.2 Effect op slibconcentraties

Het toevoegen van het overstromingsgebied leidt in 2014 tot een sterke afname in de berekende sedimentconcentratie in het Eems Estuarium (Figuur 3.46). In 2014 is in het toegevoegde overstromingsgebied veel ruimte beschikbaar waar sediment kan bezinken. De afname in sedimentconcentratie is in 2050 veel beperkter (Figuur 3.47).



Figuur 3.46 Verandering in sedimentconcentratie (in %, links en g/l, rechts) in 2014 voor scenario toevoegen binnendijs intergetijdengebied (M5). Een blauwe verandering is een afname in de sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (M0). Er is geen sedimentconcentratie verandering t.o.v. de autonome ontwikkeling in het toegevoegde overstromingsgebied gevisualiseerd omdat dit gebied geen onderdeel uitmaakt van M0.

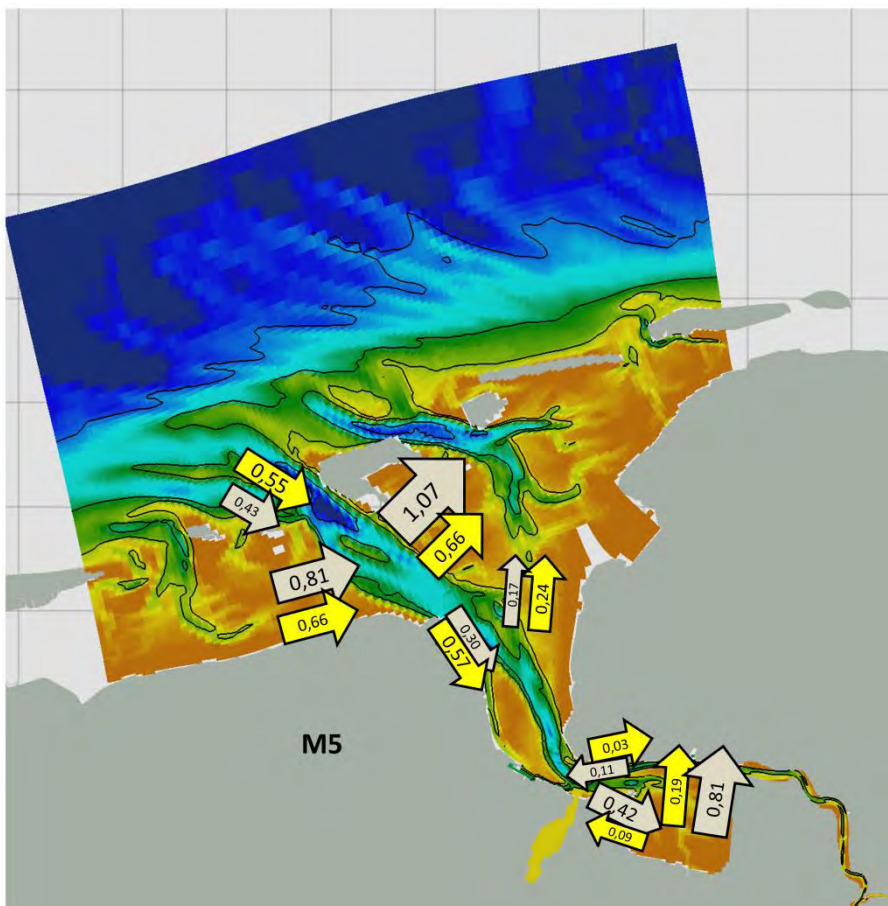


Figuur 3.47 Verandering in sedimentconcentratie (in %) in 2050 voor scenario toevoegen binnendijs intergetijdengebied (M5). Een blauwe verandering is een afname in de sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (M0). Er is geen sedimentconcentratie verandering in het toegevoegde overstromingsgebied gevisualiseerd omdat dit gebied geen onderdeel uitmaakt van M0.

3.7.3 Waterbeweging en slibtransport

De waterbeweging wordt verrassend weinig beïnvloed door het extra intergetijdgebied. Zowel de getijamplitude als residuele stroomsnelheid verandert slechts heel beperkt in 2014 (Figuur 3.22 en Figuur 3.38, resp.) en 2050 (Figuur 3.37 en Figuur 3.39, resp.). Opvallend genoeg neemt de netto sedimentflux door de Westereems richting het Eems Estuarium af (ten opzichte van de autonome ontwikkeling, vergelijk Figuur 3.48 met Figuur 3.7). Het sedimenttransport richting het overstromingsgebied wordt vooral gerealiseerd doordat het transport richting de Oostereems (over de Randzel) afneemt. Doordat veel sediment richting het nieuwe overstromingsgebied wordt getransporteerd, neemt de sedimentflux richting de Dollard sterk af.

De netto aanslibbing is sterk afhankelijk van de accommodatieruimte. In 2050 is deze accommodatieruimte dusdanig veel afgenomen dat de sedimentconcentratie niet veel meer gereduceerd wordt. Er is in de tussentijd een sedimentlaag van gemiddeld zo'n 4 m dikte afgezet in het nieuwe gebied (zie Figuur 3.44) met een volume van ca 60 miljoen m³ (wat voor geconsolideerd sediment overeenkomt met 60 miljoen ton droge stof).

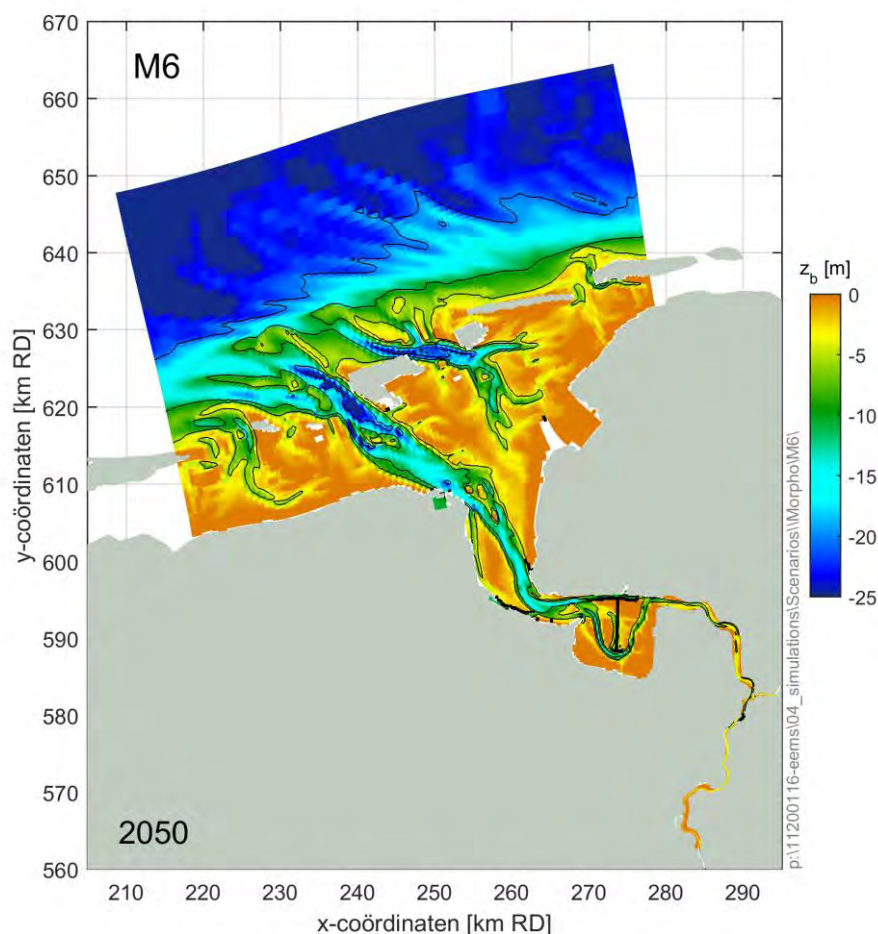


Figuur 3.48 Netto sedimenttransport (in miljoen ton/jaar) in 2014 (geel) en 2050 (grijs) voor scenario 'toevoegen intergetijdengebied' (M5). Zie Figuur 3.7 voor een gedetailleerde beschrijving.

3.8 Dynamiek Eems Rivier (M6)

3.8.1 Effect op morfologie

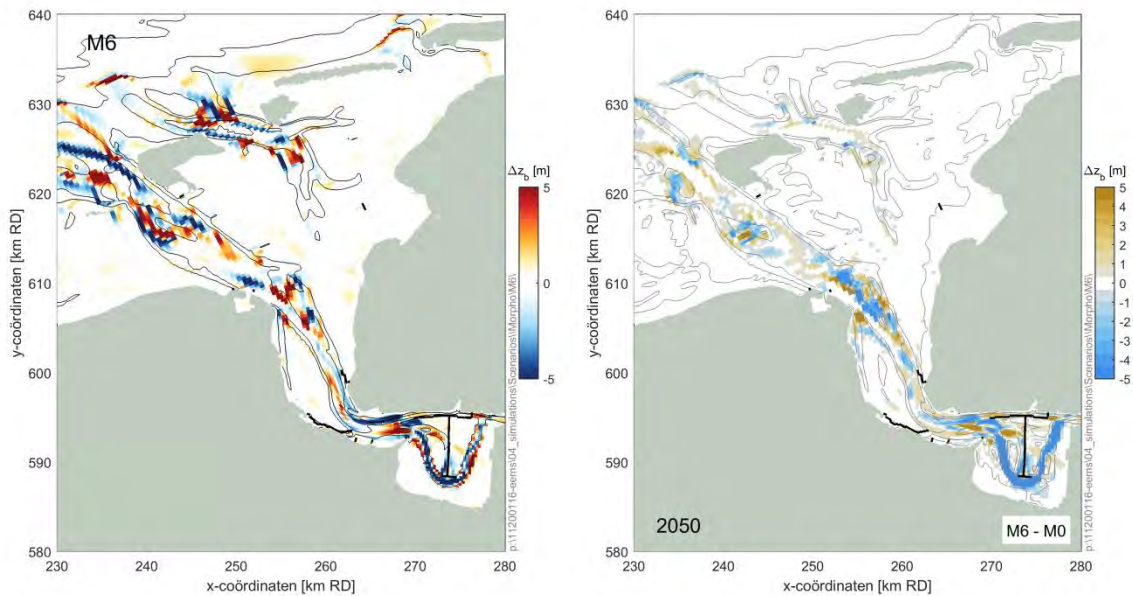
Het verlengen van de Eems Rivier door middel van een initieel aangelegde meanderbocht heeft effect op de morfologische ontwikkeling in het gehele estuarium en het waddegebied (Figuur 3.49 en Figuur 3.50).



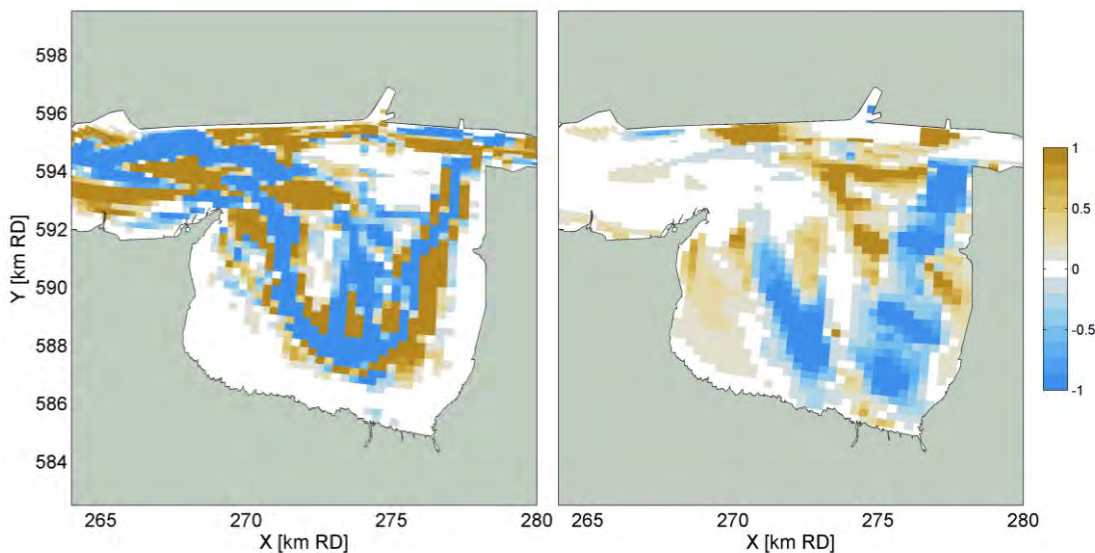
Figuur 3.49 Resulterende bodemligging in 2050 voor het scenario 'dynamiek Eems Rivier' (M6).

Ter plaatse van de Dollard wordt de voormalige geul Grote Gat opgevuld doordat de meanderbocht zich ontwikkelt als de dominante stroomvoerende geul. Mogelijk dragen de stortingen die gebeuren in het Grote Gat (stortvak NL02; zie Figuur 2.5) bij aan de ophoging van de voormalige geul. Ter plaatse van de Mond van de Dollard wordt zand afgezet (er ontstaat zelfs een kleine plaat), terwijl het uiteinde van het Grote Gat opvult met slib (Figuur 3.51). De wadplaten in de Dollard slibben aan (Figuur 3.51 rechts) tot ongeveer een meter hoger dan bij autonome ontwikkeling.

De meanderbocht wordt gedurende de simulatie smaller en dieper maar verandert niet veel van positie. Het gedeelte van de meanderbocht dat stroomopwaarts van de nieuwe strekdam gelegen is, lijkt wel te gaan hermeanderen gedurende de simulatie. De hypsometrische curven van het Dollard gebied (Figuur 3.52) duiden aan dat de ontwikkeling sterk gestuurd is door de aanleg van de meanderbocht, echter, gedurende de simulatie ontwikkelt deze wel tot een meer realistisch geulpatroon en een realistischere hoogteverdeling.



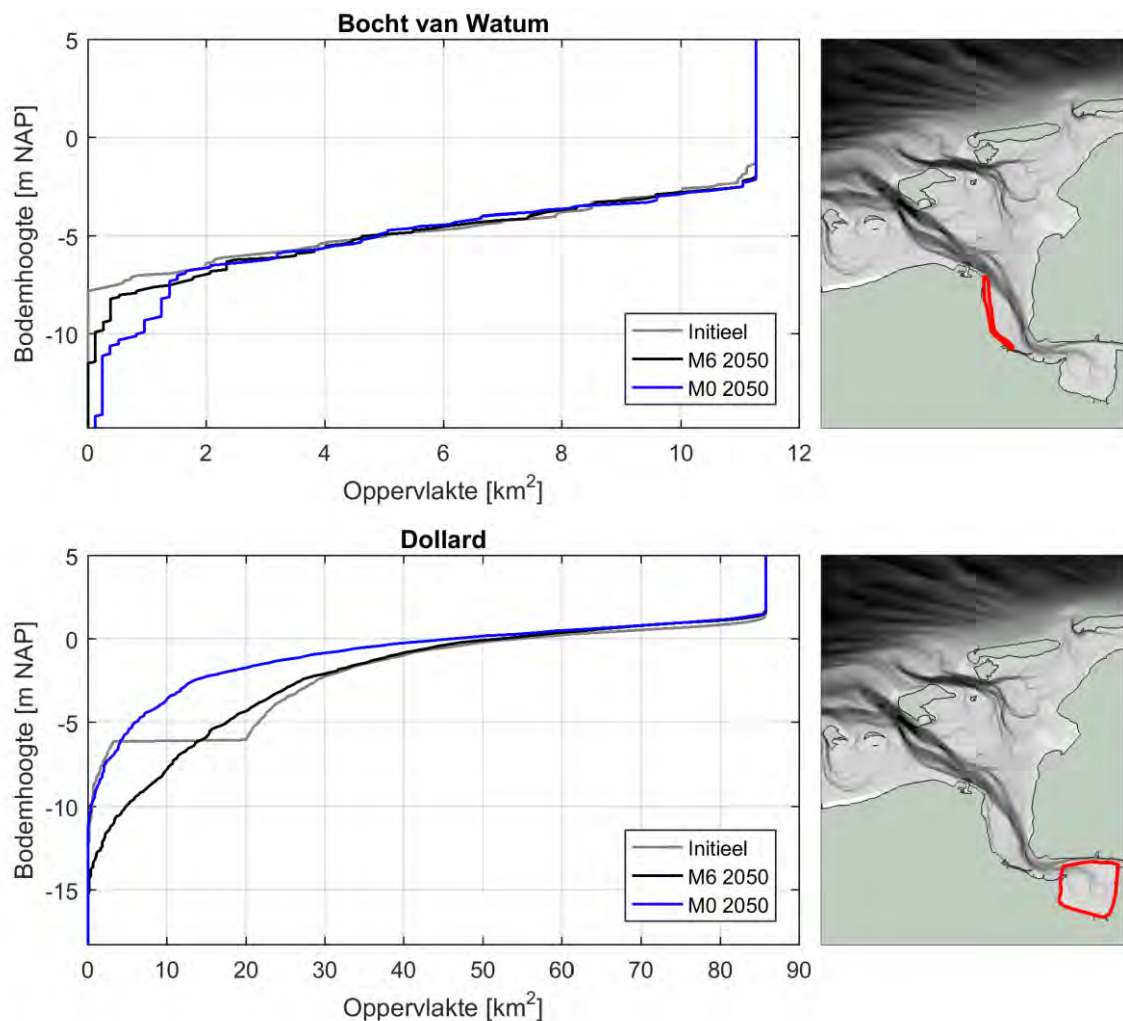
Figuur 3.50 Erosie-sedimentatiepatroon over de periode 2014-2050 (links) en verschil in bodemligging in 2050 (rechts) tussen de maatregelrichting 'dynamiek Eems Rivier' (M6) en de autonome ontwikkeling (M0).



Figuur 3.51 Verschil in bodemligging voor de maatregelrichting 'dynamiek Eems Rivier' (M6) ten opzichte van de autonome ontwikkeling, uitgesplitst naar sedimentfractie zand (links) en slib (rechts). Een positieve waarde is een toename in de bodemligging t.o.v. de autonome ontwikkeling (M0).

De belangrijkste ontwikkeling in het middendeel van het estuarium is het opbreken van de Doekeplaat in een aantal kleinere platen (Figuur 3.49). Het naastgelegen Doekegat wordt lokaal iets smaller (Figuur 3.50). Mogelijk mede hierdoor verdiept de Bocht van Watum (vooral geïllustreerd door de hypsometrische curve van de Bocht van Watum (Figuur 3.52) waar de diepte toeneemt ten opzichte van 2014, maar ook ten opzichte van de autonome ontwikkeling. Zoals al besproken in Deltares (2017a) is het ontbreken van aanslibbing in de Bocht van Watum een belangrijke tekortkoming van het LZS-model, en hierdoor is de

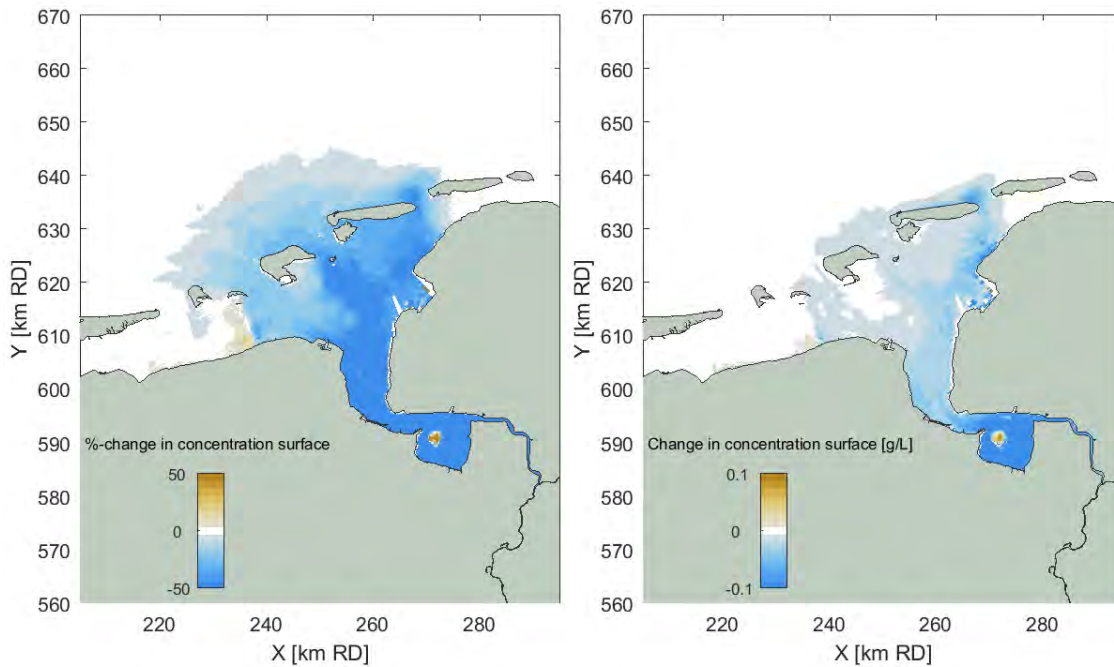
berekende verdieping niet realistisch. De uitkomst dat de meander in de Dollard leidt tot een sterkere verdieping van de Bocht van Watum dan bij autonome ontwikkeling is echter wel een aanwijzing dat de aanslibbing in de Bocht van Watum gaat verminderen. Het opbreken van de Doekeplaat in meerdere kleinere platen is een aanwijzing dat er meer natuurlijke meandering in het midden- en buitengebied zal gaan optreden.



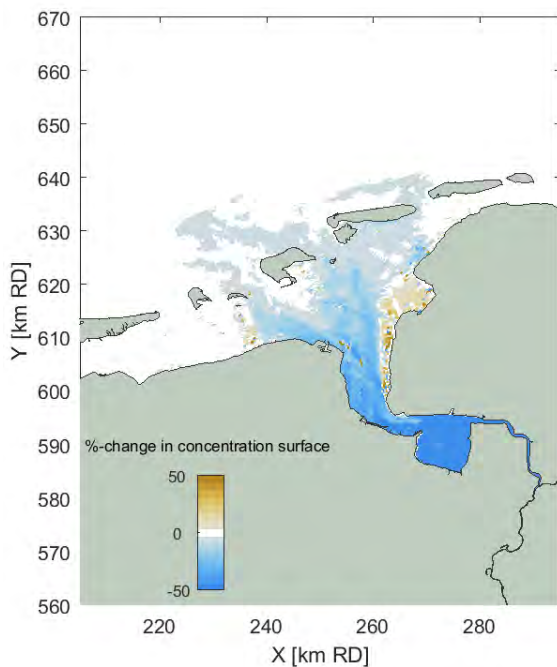
Figuur 3.52 Hypsometrische curven voor de Bocht van Watum en de Dollard.

3.8.2 Effect op slibconcentraties

Het aanleggen van een meander in de Dollard leidt volgens het model tot een sterke verlaging van de slibconcentratie (Figuur 3.53 en Figuur 3.54). Deze afname is het sterkst in 2014, maar nog steeds aanzienlijk in 2050. Deze afname kan het gevolg zijn van veranderingen in de waterbeweging, of van veranderingen in bezinkplaatsen.



Figuur 3.53 Verandering in sedimentconcentratie (in %, links en g/l, rechts) in 2014 voor scenario 'dynamiek Eems Rivier' (M6). Een blauwe verandering is een afname in de sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (S0).



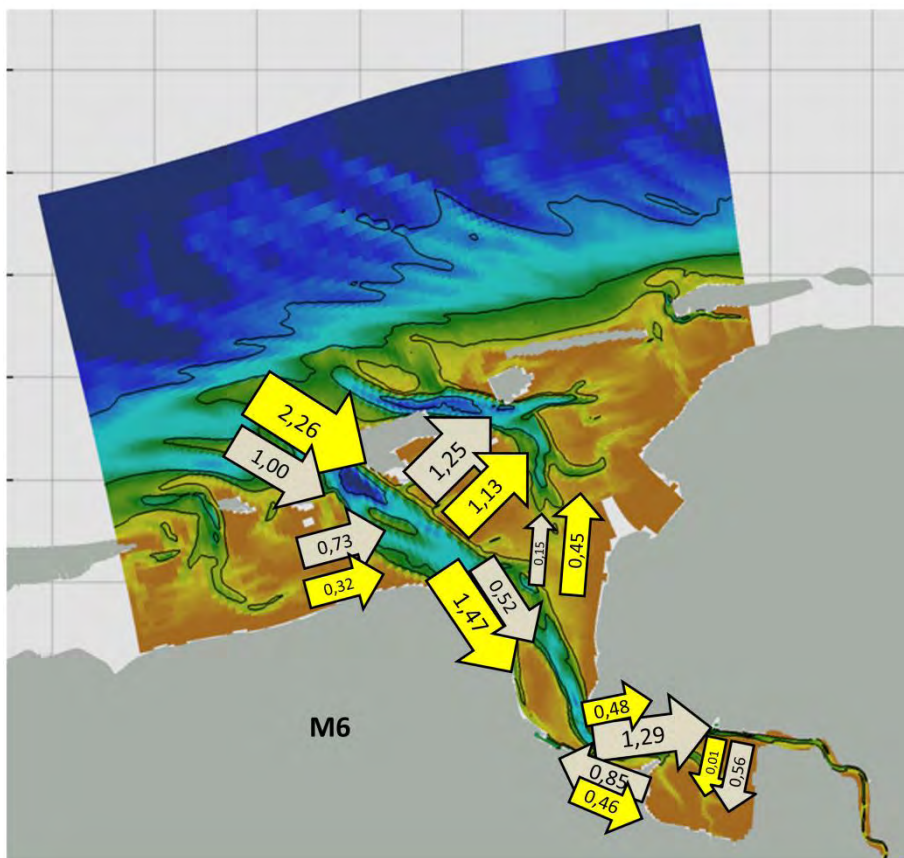
Figuur 3.54 Verandering in sedimentconcentratie (in %) in 2050 voor scenario 'dynamiek Eems Rivier' (M6). Een blauwe verandering is een afname in de sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling (S0).

3.8.3 Waterbeweging en slibtransport

Het getij neemt sterk af in de Eems Rivier (eerste 50 km na Papenburg). Initieel (2014) neemt de getijamplitude in de Eems Rivier af tot ~10 cm (buiten de schaal in Figuur 3.37) doordat de meander nog maar een beperkt watervolume kan doorlaten. In 2050 is de getijamplitude in de Eems Rivier ongeveer 20% lager (van 1,4m naar 1,2 m) dan bij de autonome ontwikkeling (Figuur 3.22). In het Eems Estuarium neemt de getijamplitude initieel met 5 tot 10% toe, waarschijnlijk als gevolg van getijresonantie. Na insnijding van de geul in de Dollard (in 2050) neemt de getijamplitude af (ten opzichte van 2014, maar ook ten opzichte van de autonome ontwikkeling). Deze is in 2050 vergelijkbaar met de maatregelrichting 'bevorderen sedimentatie' (M4).

De slibtransportpatronen in de Dollard (Figuur 3.55) zijn voor dit scenario lastig te interpreteren, omdat hierbij fluxen tussen vooraf gedefinieerde polygonen worden berekend (Figuur 2.14). Deze polygonen zijn niet meer representatief in de Dollard. Wat wel een duidelijk signaal is, is dat het netto sedimenttransport het Eems Estuarium in aanzienlijk hoger is dan bij autonome ontwikkeling (Figuur 3.7), vooral in 2014. Deze toename in netto flux is waarschijnlijk het gevolg van aanzienlijke netto sedimentatie. Via de meander worden diverse relatief luwe gebieden gecreëerd waar slib kan bezinken. Het is waarschijnlijk dat bezinking van slib op de platen van de Dollard, maar vooral in het oude Groote Gat en rond de aangelegde strekdam in de Dollard, initieel tot een grote onttrekking van slib uit het systeem zal leiden. Het gevolg hiervan is dat de sedimentconcentratie over het hele domein afneemt. In 2050 is er minder accommodatieruimte over dan in 2014, en daarom is het effect van deze maatregelrichting in 2050 beperkter dan in 2014. Het hydrologische effect van de meander (verkleining getijslag, daarmee getijprisma en dus ook de bruto slibtransporten) is wel permanent.

In het D3S-model speelt de Eems Rivier slechts een beperkte rol in de slibdynamiek (zie Deltares, 2017b), en daarom zal de verandering van het getij in de Eems Rivier ook niet tot een grote berekende verandering in de slibconcentratie in het Eems Estuarium hebben geleid. De zout-gedreven circulatie is in 2050 slechts beperkt veranderd (Figuur 3.39), en kan geen grote verandering in de sedimentconcentratie hebben veroorzaakt. In 2014 was deze zout-gedreven circulatie echter aanzienlijk sterker dan bij de autonome ontwikkeling (Figuur 3.38). Kennelijk is het effect van de afname van het getij (leidend tot een afname in de sedimentconcentratie) sterker dan de toename in de estuariene circulatie.



Figuur 3.55 Netto sedimenttransport (in miljoen ton/jaar) in 2014 (geel) en 2050 (grijs) voor scenario 'dynamiek Eems Rivier' (M6). Zie Figuur 3.7 voor een gedetailleerde beschrijving.

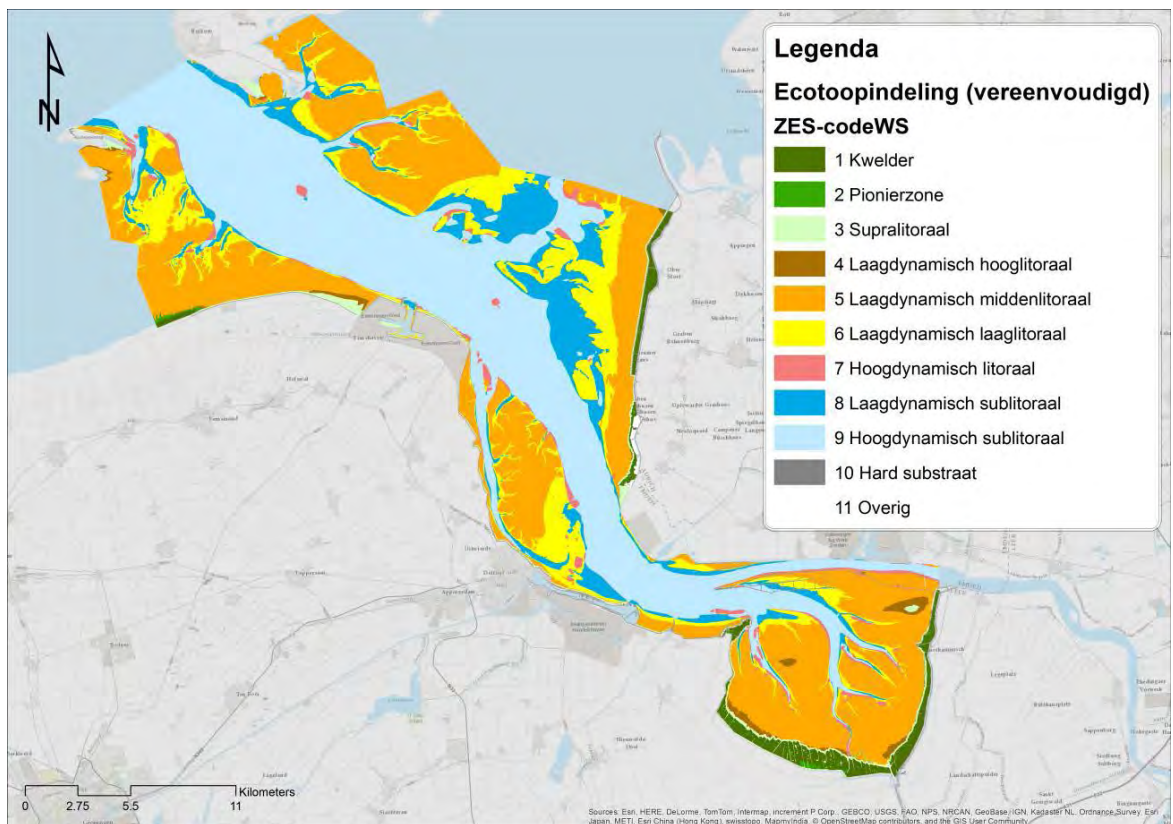
3.9 Effect maatregelen op ecotopen

3.9.1 Aanpak

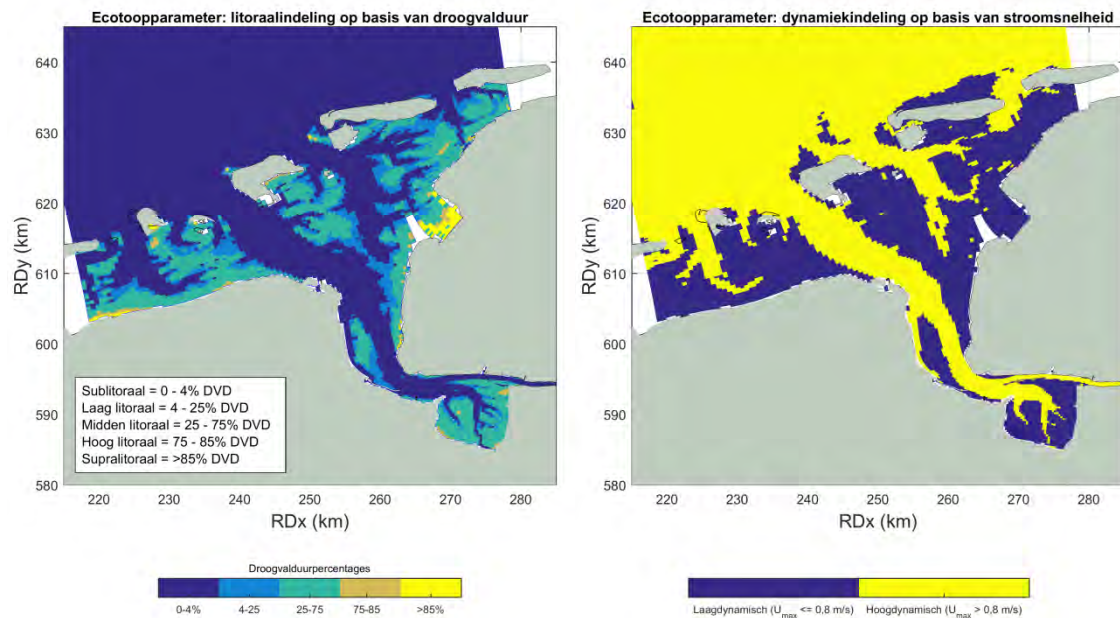
De modelresultaten worden gevisualiseerd als ecotopenkaart volgens de vereenvoudigde ecotopenverdeling opgesteld door Ysebaert et al. (2016) (hun Figuur 17, zie Figuur 3.56). Er wordt een indeling gemaakt op

- Litorale zone (linkerpaneel in Figuur 3.57). Hierbij is de litorale zone gedefinieerd als gebieden welke minimaal 4% van de tijd droog vallen; deze zijn vervolgens onderverdeeld in laag, midden, hoog, en supralitoraal.
- Dynamiek: gebieden waar de maximale stroomsnelheid 0.8 m/s overschrijdt. De litorale zones zijn vooral laagdynamisch, en daarom zijn alle litorale hoogdynamische gebieden geclusterd tot 1 ecotoop.

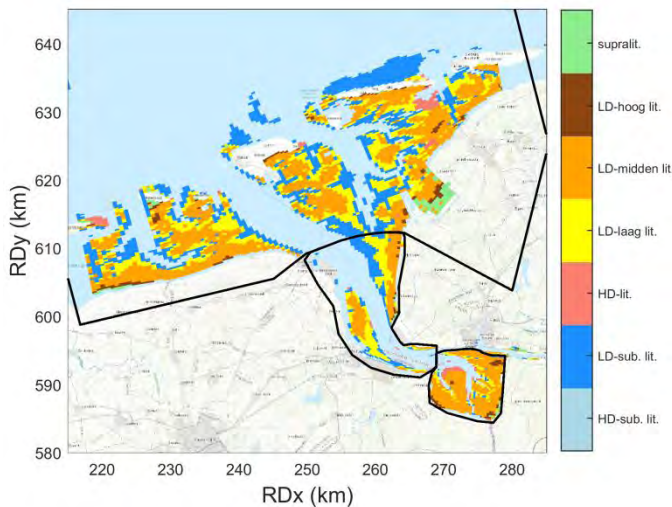
De ecotopen kwelder, pionierzone en hard substraat (zoals gedefinieerd door Ysebaert et al., 2016) zijn niet opgenomen in de ecotopenkaarten omdat deze niet bepaald kunnen worden aan de hand van de modelsimulaties. Combinatie van de kaarten in Figuur 3.57 leidt tot een ecotopenkaart in Figuur 3.58. De berekende ecotopen worden voor drie deelgebieden (met polygonen aangegeven in Figuur 3.58) en per maatregel uitgevoerd naar tabellen.



Figuur 3.56 Vereenvoudigde ecotopenkaart van het Eems-Dollard estuarium: Figuur 17 uit Ysebaert (2016).



Figuur 3.57 Ecotopen subkaart met onderverdeling naar litorale zone (links) en dynamiek (rechts), voor 2014 autonome ontwikkeling.



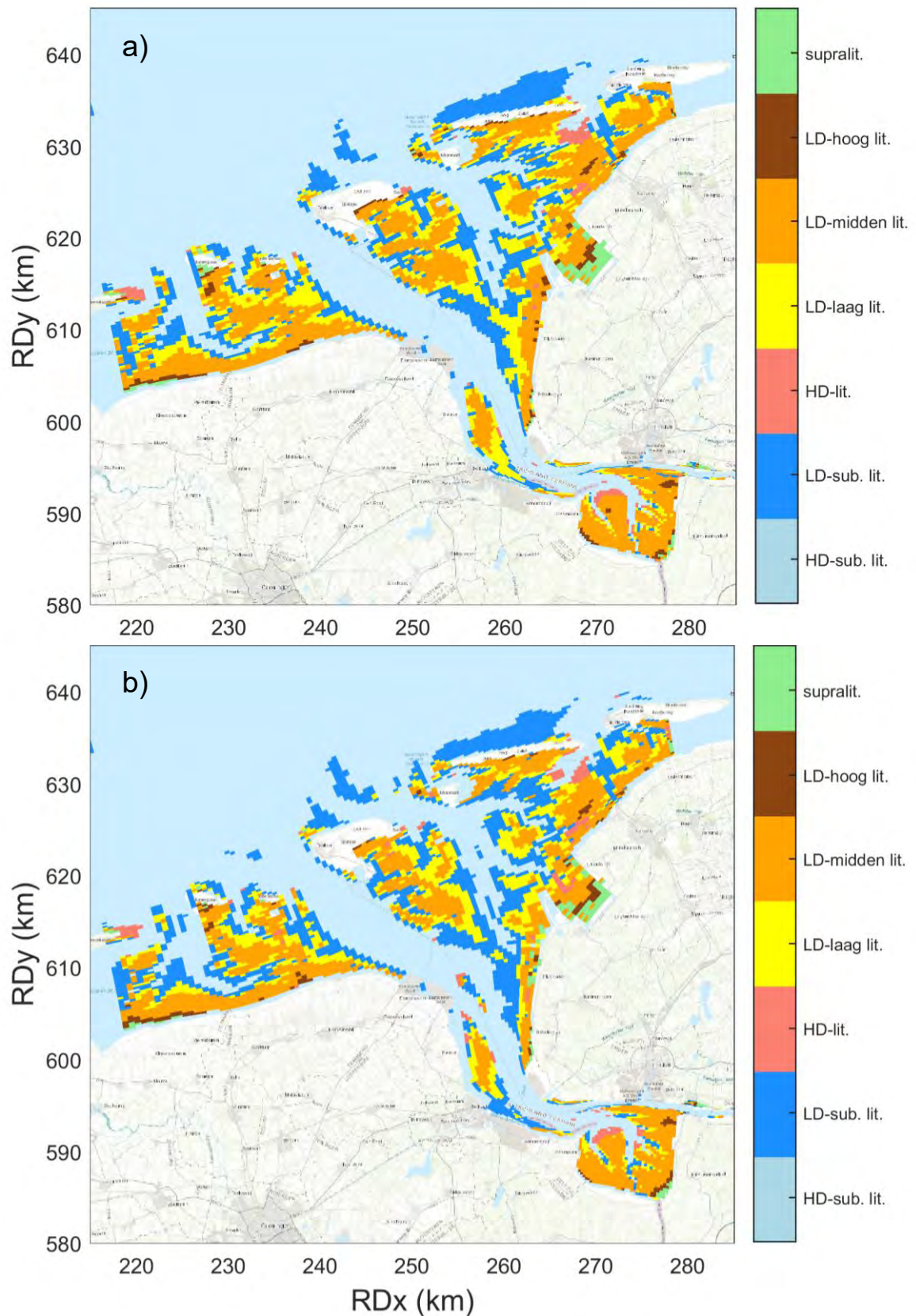
Figuur 3.58 Voorbeeld van een ecotopenkaart (2014, autonome ontwikkeling) met polygonen van drie deelgebieden (Eems buitengebied, Eems middengebied, en Dollard exclusief vaarwater naar Emden) waarvoor berekende areaalgrootte per ecotoop wordt uitgevoerd.

De ecotopenverdeling wordt daarnaast samengevat in een aantal tabellen (per deelgebied) om een onderlinge vergelijking van het effect van maatregelen inzichtelijk te maken. Tenslotte worden de veranderingen samengevat in hypsometrische curves van deelgebieden zodat de onderlinge effecten van de maatregelen goed te onderscheiden zijn.

3.9.2 Autonome ontwikkeling

De ecotopenkaart zoals deze is gemaakt naar de situatie van 2014 is weergegeven in Figuur 3.59a. Vergelijking van Figuur 3.59a met Figuur 3.56 laat zien dat er duidelijke overeenkomsten zijn tussen de twee kaarten. Beide kaarten laten zien dat het ecotoop Laagdynamisch middenlitoraal wijdverspreid is over het estuarium en dat het ecotoop Laagdynamisch laaglitoraal veel voorkomt aan de rand van het intergetijdengebied. Er zijn ook verschillen op te merken in areaalbedekking van bepaalde ecotopen. Deze verschillen worden veroorzaakt door:

- Een mogelijk andere werkwijze van berekenen doordat de ecotopenkaarten zijn opgesteld met behulp van andere software (hoewel de methode van Ysebaert et al. (2016) zo nauwkeurig mogelijk is aangehouden)
- Andere bronnen van data (gemodelleerde data in plaats van gemeten data)
- De resolutie van het rekenrooster ten opzichte van resolutie van de gemeten data.



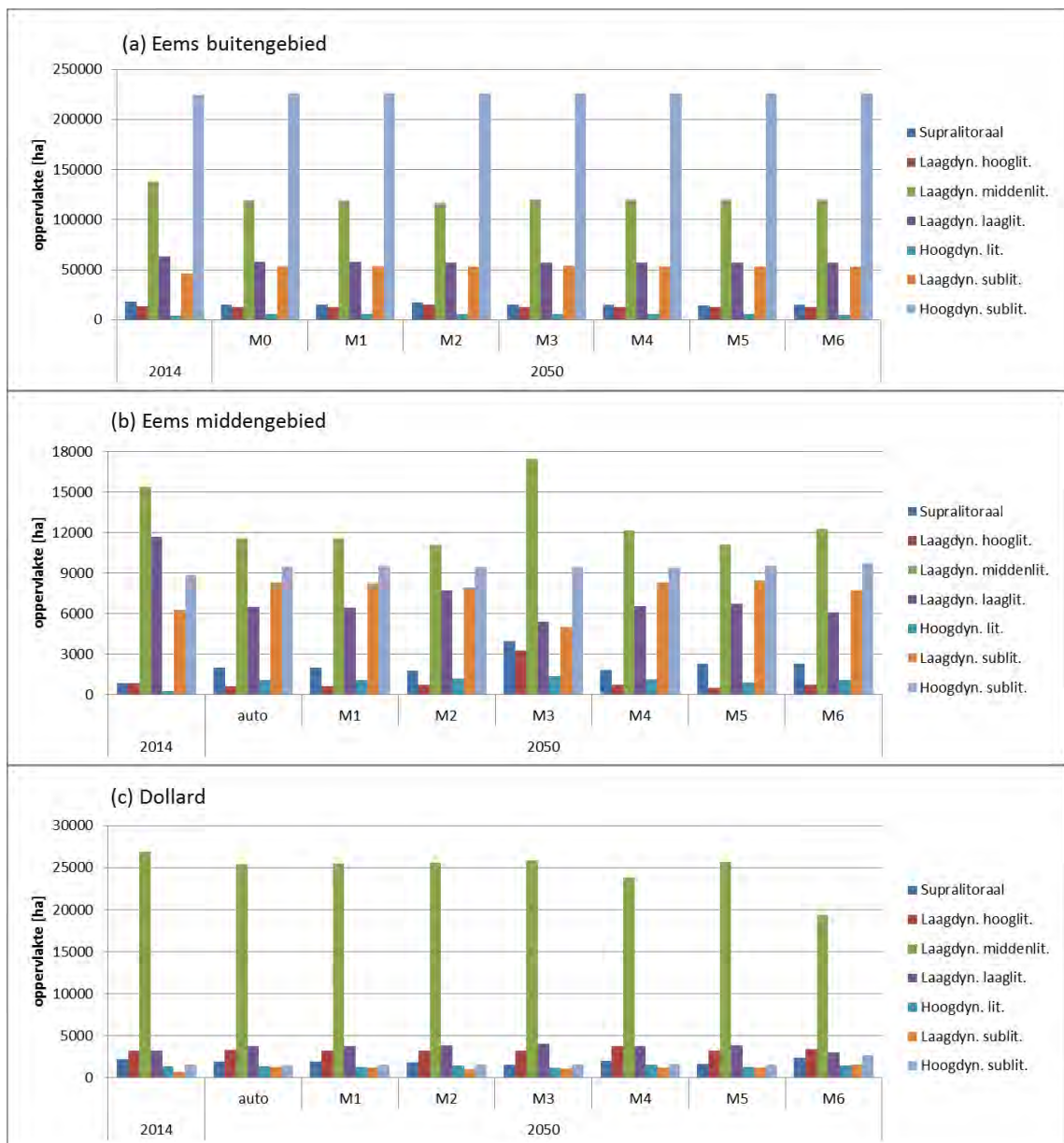
Figuur 3.59 Vereenvoudigde ecotopenkaart in 2014 (boven) en van de gesimuleerde autonome ontwikkeling in 2050 (onder).

De ecotopenkaart die gemaakt is aan de hand van de voorspelde situatie in 2050 (Figuur 3.59b) toont dat de veranderingen in verdeling van ecotoopareaal op estuariumschaal beperkt is. De belangrijkste ontwikkeling is een toename van het laagdynamisch-sublitoraal ten koste van het laagdynamisch-laaglitoraal. Dit is goed te verklaren aan de hand van de zeespiegelstijging (bij gelijke bodemligging en zeespiegelstijging gaat litoraal over in sublitoraal). Daarnaast ontstaat er een litoraal en sublitoraal gebied voor de Eemshaven als gevolg van aanzanding van de Doekeplaat.

3.9.3 Effect van maatregelen

De ecotopenkaarten voor de 6 maatregelrichtingen in 2050 (Figuur B.1 - Figuur B.6) zijn vergelijkbaar met de ecotopenkaart voor de autonome ontwikkeling (Figuur 3.59). Op het oog is hier nauwelijks onderscheid in te maken, en daarom zijn de areaalgroottes per ecotoop per deelgebied gevisualiseerd in staafdiagrammen (Figuur 3.60 – details in tabellen Tabel B.1 - Tabel B.3). Deze diagrammen laten de volgende trends zien:

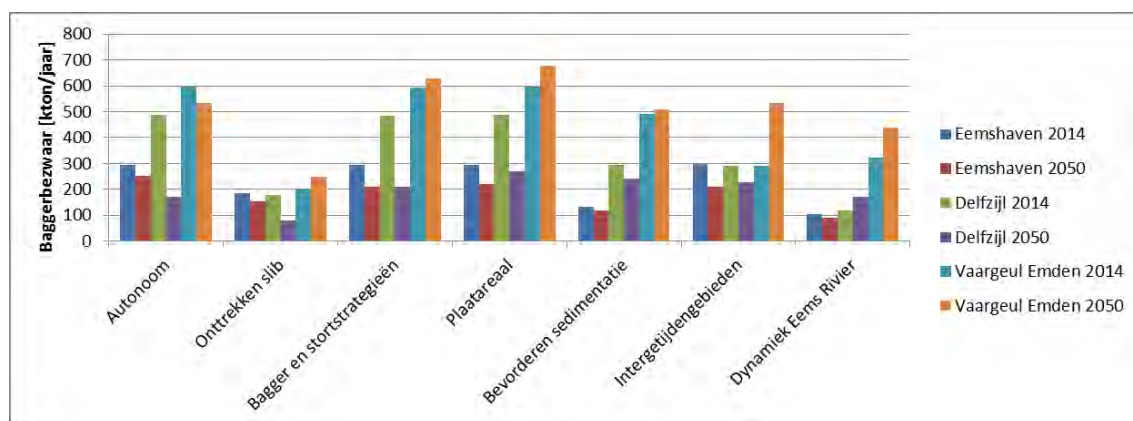
- In 2050 neemt het areaal supralitoraal af in het Eems buitengebied, voor de autonome ontwikkeling en de meeste scenario's. Dit is het gevolg van een sterkere zeespiegelstijging dan bodemophoging. De uitzondering is scenario M2 (waarbij een intergetijdengebied aangelegd wordt in het buitengebied) – hier blijft de areaalgrootte ongeveer gelijk aan 2014. In het middengebied van de Eems neemt de grootte van het supralitoraal juist toe, vooral bij scenario M3 (waar een intergetijdengebied in het middengebied wordt aangelegd). De veranderingen in het supralitoraal in de Dollard zijn beperkt.
- Het areaal laagdynamisch, hooglitoraal blijft in alle simulaties in alle deelgebieden vergelijkbaar, met uitzondering van scenario's welke als rechtstreeks doel hadden deze arealen te vergroten (scenario M3 in het middengebied, scenario M2 in het buitengebied).
- Het areaal laagdynamisch middenlitoraal neemt af in het buitengebied voor alle scenario's (met relatief weinig onderscheid tussen de verschillende scenario's) door zeespiegelstijging. In het middengebied neemt ook overal het areaal af, behalve voor scenario M3. In de Dollard blijft het areaal gelijk, met uitzondering van scenario M6 waarbij een meander wordt aangelegd.
- Het areaal laagdynamisch laaglitoraal neemt af in het buitengebied en het middengebied, maar neemt iets toe in de Dollard (met uitzondering van scenario M6, welke in een beperkte afname resulteert).
- Het areaal hoogdynamisch litoraal neemt toe in het buitengebied en het middengebied voor de autonome ontwikkeling en alle scenario's (met relatief weinig onderscheid voor de verschillende scenario's). In de Dollard blijft het areaal ongeveer gelijk.
- Het areaal laagdynamisch sublitoraal neemt in alle deelgebieden voor alle scenario's toe. Hierop is een uitzondering: bij scenario M3 neemt in het middengebied het areaal af als gevolg van de hoeveelheid aangelegd intergetijdengebied.
- Het areaal hoogdynamisch sublitoraal blijft gelijk in het buitengebied en de Dollard, maar neemt toe in het middengebied. Een uitzondering hierop is scenario M6, waarbij dit areaal toeneemt in de Dollard.



Figuur 3.60 Areaalgrootte van de berekende ecotopen voor de referentie 2014, de referentie 2050 (M0) en voor maatregelrichting M1 – M6 in 2050, voor drie deelgebieden (buitengebied van de Eems, het middengebied van de Eems, en de Dollard). Het totale oppervlakte is met name bij scenario M6 in de Dollard afgenomen door de afname in de getijslag.

3.10 Effect maatregelen op baggerbezwaar

De hoeveelheid sediment die in een haven of vaargeul bezinkt (Figuur 3.61 en Tabel 3.1), is afhankelijk van de sedimentconcentratie en van uitwisselingsmechanismes. Aangezien de havens zelf niet veranderen in de simulaties, zullen uitwisselingsmechanismes alleen kunnen veranderen door veranderingen in de waterdiepte van de toegangseuilen (erosie / sedimentatie). Een verandering in aanslibbing in havens en vaarwegen kan daarom het gevolg zijn van de verandering van de concentratie in het Eems Estuarium zelf, of door erosie/sedimentatie van de toegangseuilen. Zoals besproken in Deltares (2017b) neemt de sedimentconcentratie in het Eems Estuarium bij autonome ontwikkeling af door morfologische veranderingen in het modeldomein (dit hoeft niet realistisch te zijn, zoals besproken in Hoofdstuk 4). Hierdoor neemt ook de havenaanslibbing af. Het model is beter geschikt voor het bepalen van het relatieve effect van maatregelen op de slibconcentratie (neemt de concentratie lokaal toe of af door de maatregelen). De verandering van aanslibbing als gevolg van maatregelen ten opzichte van deze autonome situatie is daarom voldoende betrouwbaarder voor het interpreteren van het effect van maatregelen op aanslibbing (in tegenstelling tot de absolute veranderingen).



Figuur 3.61 Berekend baggerbezwaar in de meest slibrijke gebieden, in 2014 en 2050, voor de autonome ontwikkeling en voor maatregelrichtingen

Tabel 3.1 Baggerbezwaar (kton) berekend met het D3S-model, voor alle scenario's

Jaar	Scenario	Eemshaven	Delfzijl	Vaargeul Emden
2014	Autonoom	296	487	597
	Onttrekken slib	187	179	201
	Bagger en stortstrategieën	295	483	593
	Plaatareaal*	296	487	597
	Bevorderen sedimentatie	133	293	490
	Toevoegen intergetijdengebieden	298	291	291
	Dynamiek Eems Rivier	105	119	323
2050	Autonoom	251	173	532
	Onttrekken slib	154	81	247
	Bagger en stortstrategieën	209	209	627
	Plaatareaal*	221	268	678
	Bevorderen sedimentatie	118	242	510
	Toevoegen intergetijdengebieden	211	229	535
	Dynamiek Eems Rivier	89	173	440

*Zelfde als 2014 autonoom

Maatregel 'onttrekken slib' (M1) heeft een zeer groot effect op de slibconcentratie, maar een minimaal effect op de morfologie. De verandering in aanslibbingshoeveelheden berekend voor maatregel 1 vormen daarom een bovengrens van de invloed van veranderingen van de sedimentconcentratie op aanslibbing. Maatregelen waar het effect groter is dan voor maatregel 1 (of zelfs vergelijkbaar), worden aanvullend door veranderingen in de morfologie beïnvloed.

De veranderingen in de 'bagger en stortstrategieën' (M2) zijn sterk vergelijkbaar met het effect van het vergroten van het plaatareaal: weinig initieel effect op aanslibbing maar op termijn een toename in aanslibbing in Delfzijl en de vaargeul naar Emden omdat de concentratie daar toeneemt.

Het vergroten van het plaatareaal (M3) heeft geen initieel effect op aanslibbing, en ook op langere termijn is het effect zeer gering. In 2050 neemt de aanslibbing in de vaargeul naar Emden en in Delfzijl toe. Dit is te verklaren met de toegenomen sedimentconcentratie.

Een opvallende ontwikkeling bij maatregel 'bevorderen sedimentatie' (M4) is dat deze een zeer groot effect heeft op Eemshaven (op de lange en korte termijn) maar bij Delfzijl alleen op de korte termijn. In 2050 wordt bij Delfzijl zelfs een toename ten opzichte van de autonome ontwikkeling voorspeld. Deze veranderingen zijn groter dan verwacht mag worden op basis van de veranderingen in de sedimentconcentratie. Veranderingen in aanslibbing worden daarom sterk gestuurd door veranderingen in de morfologie.

Maatregel 'toevoegen intergetijdengebied' (M5) leidt tot een initiële reductie van aanslibbing (40% in Delfzijl, 50% in de vaargeul naar Emden), maar op termijn zal de aanslibbing vergelijkbaar zijn met de autonome ontwikkeling (of zelfs meer, zoals het model suggereert). Dit is het gevolg van het vollopen van het aangelegde overstromingsgebied, waardoor effecten op de slibconcentratie afnemen.

De omleiding van de Eems Rivier door de Dollard leidt tot een zeer sterke reductie in baggerbezwaar als gevolg van de afname in sedimentconcentratie. Er zijn echter een aantal kanttekeningen te plaatsen bij deze afname, zoals in meer detail besproken in Hoofdstuk 4.

4 Interpretatie effect maatregelen

4.1 Geschiktheid modelinstrumentarium

In het vorige hoofdstuk zijn de berekende modeluitkomsten gepresenteerd en kort besproken. Hierbij is slechts beperkt ingegaan op de mate waarin de uitkomsten logisch en betrouwbaar lijken te zijn. In dit hoofdstuk worden de uitkomsten beoordeeld via deskundigen oordeel (expert judgement). Leidende vragen bij de interpretatie zijn

- Hoe betrouwbaar zijn berekende patronen en hoeveelheden?
- Hoe geschikt zijn de gebruikte modellen voor de voorspellingen?

4.1.1 Autonome ontwikkeling

Bij de autonome ontwikkeling van het Eems Estuarium vinden de volgende belangrijke veranderingen plaats:

De toegangseuilen verzanden

De toegangseuilen naar het Eems Estuarium verzanden. Hierdoor wordt minder sediment het Eems Estuarium in getransporteerd, waarschijnlijk als gevolg van een afname in de estuariene circulatie maar ook door een (geringe) afname in de getijamplitude. Dit leidt tot een (geringe) afname van de sedimentconcentratie in een groot deel van het Eems Estuarium. De afname van de sedimentconcentratie als gevolg van de morfologische ontwikkeling is plausibel, ook al is de verandering relatief gering. Het is echter zeer de vraag of de berekende afname van de geuldiepte (zoals in Figuur 3.2) realistisch is. Het lijkt waarschijnlijk dat het een gevolg is van de aanstroomrichting van water vanuit de Noordzee naar het Eems estuarium. In het huidige LZS model is deze aanstroomrichting niet juist vanwege de definitie van de randen (Neumann randen) – zie Deltares, 2017a voor details.

Het estuarium wordt relatief dieper

De bijdrage van zeespiegelstijging aan de bodemveranderingen in een groot deel van het estuarium zijn zeer beperkt: de bodem van het estuarium groeit niet mee met de zeespiegelstijging. Hoewel dit mogelijk (beperkt) beïnvloed wordt door de verzanding van de toegangseuilen (zoals hiervoren besproken), is een dergelijke ontwikkeling voorzien voor veel estuaria wereldwijd (Prandle, 2006; van der Wegen, 2013; Le Cozannet et al. 2014; Robins et al., 2016). De daaruit volgende relatieve toename van de waterdiepte zal leiden tot meer zoutindringing en estuariene circulatie (Chua en Xu, 2014; Yang et al., 2015; Prandle en Lane, 2015). De reactie zal echter sterk verschillen per estuarium en is onvoorspelbaar, sterk beïnvloed door het lokale sedimentaanbod en transportprocessen. Op basis hiervan wordt er voorlopig van uitgegaan dat de modeluitkomsten realistisch zijn, en de relatieve waterdiepte in een groot deel van het estuarium zal toenemen.

Platen slibben aan

De hoge intergetijdenplaten in de Dollard slibben aan. Deze aanslibbing wordt slechts voor een deel gestuurd door zeespiegelstijging – ook zonder zeespiegelstijging slibben de platen aan. Het model suggereert echter ook dat de extra aanslibbing als gevolg van zeespiegelstijging minder sterk is dan de zeespiegelstijging zelf – een resultaat vergelijkbaar met van der Wegen et al. (2017). De meer zeewaarts gelegen platen slibben niet aan. Bij de modelontwikkeling is slechts beperkt aandacht geschonken aan de dynamiek van de platen. De berekende dynamiek is echter zeer gevoelig voor het type sediment (valsnelheid, kritische schuifspanning voor erosie – zie van Maren en Winterwerp, 2013) en forcering (golven, en

diverse asymmetrieën in het getij – zie Friedrichs, 2011; van der Wegen et al., 2017). Aanzanding van platen (bodemveranderingen als gevolg van afzetting van zand) is erg gevoelig voor de precieze zandtransportformulering – zie Dissanayake en Wurpts, 2013. In het LZS model is slib gemodelleerd als onrealistisch mobiel. Het is daarom niet aannemelijk dat het model de snelheid en de patronen van plaat aangroei juist voorspelt.

De geul richting de Dollard verdiept

De geul richting de Dollard schuurt uit. Hierdoor neemt het sedimenttransport richting de Dollard toe, wat leidt tot een toename van de sedimentconcentratie in de Dollard maar een afname in het middendeel van het estuarium. Deze berekende morfologische verandering lijkt niet betrouwbaar, omdat (1) deze geul al eeuwen bestaat, en deels via onderhoudsbaggerwerk op diepte gehouden moet worden, en (2) de bodem in dit gebied gekenmerkt wordt door harde lagen, welke geulinsnijding beperken. Er is echter onvoldoende gebiedskennis om deze harde lagen op een juiste manier te modelleren. De respons van het slibmodel lijkt echter wel logisch: door de diepere geul neemt het getijtransport maar vooral estuariene circulatie toe, waardoor de Dollard troebeler wordt en het Eems Estuarium juist minder troebel.

4.1.2 Maatregelrichting 'Onttrekken slib'

Bij de maatregel 'onttrekking slib' wordt al het sediment (zand en slib) wat gebaggerd wordt uit slibrijke gebieden (havens en het vaarwater naar Emden) onttrokken (effectief op land gestort). Sediment wat in de havens bezinkt en na baggeren weer in het estuarium verspreid wordt, genereert morfologische veranderingen. De berekende hoeveelheid zand welke volgens het LZS model in het vaarwater naar Emden wordt afgezet (en vervolgens gebaggerd en verspreid) is 10% van het gemeten baggervolume daar (zie Deltares, 2017a) – voor de haven van Delfzijl is dit 5%. Aangezien dit zeer slibrijke gebieden zijn, lijken dit realistische zandhoeveelheden. De hoeveelheid zand welke in Eemshaven bezinkt is verwaarloosbaar – dit lijkt niet overeen te komen met de werkelijkheid (een deel van het gebaggerd sediment in Eemshaven bestaat uit zandig materiaal). Het effect van het onttrekken van slib op de morfologie lijkt daarom voldoende nauwkeurig voor het vaarwater naar Emden en de haven van Delfzijl, maar niet voor de Eemshaven.

Het onttrekken van slib (berekend met het D3S model) leidt tot een sterke afname in de sedimentconcentratie (Figuur 3.12 en Figuur 3.13). Onttrekken is de enige maatregel welke tot een continue afname van de berekende sedimentconcentratie leidt (zowel in 2014 als in 2050). Er is geen mechanisme (zoals invulling van een bezinkgebied) wat tot een afname van het effect zou kunnen leiden, en daarom is deze persistentie aannemelijk. Maar hoewel een substantiële afname in de sedimentconcentratie verwacht mag worden wanneer al het sediment wat bezinkt in havens wordt onttrokken, kunnen wel vraagtekens gezet worden bij de mate van afname. Het D3S-model berekent een halvering van de sedimentconcentratie, wat erg veel lijkt.

Het daadwerkelijke effect van onttrekkingen wordt sterk beïnvloed door de hoeveelheid aanwezig erodeerbaar slib. Het model streeft naar een evenwichtsconditie, waarbij de berekende sedimentconcentratie en het sediment in de bodem in balans is met sedimentaanvoer (over de modelranden), transportprocessen welke het sediment herverdelen, en verliestermen (onttrekkingen). Als er daadwerkelijk grootschalige onttrekkingen uitgevoerd gaan worden, zal het effect van onttrekkingen op de sedimentconcentratie initieel gedempt worden door nalevering van slib vanuit de bodem en vanuit platen (slib zal een tijdlang geërodeerd worden vanaf de platen, waardoor deze

geleidelijk zandiger worden). Het is niet bekend hoeveel slib in werkelijkheid voldoende mobiel is om na te leveren – het is mogelijk dat de Dollard (tijdelijk) als slibbron gaat fungeren. Dit soort naleveringen is nu niet goed in het model ingebouwd.

4.1.3 Maatregelrichting ‘Bagger- en stortstrategieën’

Slibhoudend materiaal wat in het Blindes Randzelgat gestort wordt blijft merendeels liggen. Dit is een fysisch aannemelijk resultaat omdat de stroomsnelheid in een dergelijk zijgeultje erg laag is. Het effect van golven zal ook klein zijn, omdat het materiaal (vooral initieel) in relatief diep water wordt aangebracht.

Het belangrijkste effect van storten in het Blindes Randzelgat lijkt echter het vergroten van het debiet door het Oostfriesche Gaatje te zijn. Door verdieping van het Oostfriesche Gaatje neemt de getijamplitude en zout-gedreven residuele stroming toe. Dit leidt tot een toename van de sedimentconcentratie ten zuiden van Delfzijl (de Dollard). Hoewel een verdieping van de geul modelmatig betrouwbaar lijkt, en ook de respons van het slibmodel op de verdieping realistisch is, moet de mate waarin de geul verdiept voorzichtig worden geïnterpreteerd (zie ook §4.1.1).

4.1.4 Maatregelrichting ‘Vergroten Plaatareaal’

Het gebaggerde zandige sediment wordt op een ondiepe locatie met lage stroomsnelheden gestort. Daarom blijft het materiaal grotendeels liggen op de locatie van storting. In werkelijkheid zal dit materiaal getransporteerd worden door golfwerking: een proces dat niet met het huidige LZS-model wordt berekend. In werkelijkheid zal het aangebrachte sediment een meer diffuus patroon volgen.

Bij het interpreteren van het effect van deze maatregel moet er ook rekening gehouden worden met logistieke aspecten: de stortingen vinden plaats in ondiep water, waar baggerschepen niet of nauwelijks kunnen komen. Een dergelijke suppletie zou daarom met behulp van persleidingen uitgevoerd moeten worden.

Het beoogde effect van de vergroting van het plaatareaal (verlagen van het vloed-dominante karakter van de getijgolf) treedt op, maar wordt teniet gedaan door het vergroten van de getijamplitude als gevolg van verdieping van de geul. Deze verdieping (en daaraan gekoppeld een toename in de sedimentconcentratie in de Dollard) is een aannemelijke ontwikkeling (alhoewel de mate van de verdieping waarschijnlijk teveel is).

4.1.5 Maatregelrichting ‘Bevorderen sedimentatie’

In de luwtezone achter de verlengde punt van Reide zal zand bezinken in de geulen (het Kerkeriet) maar zullen de hoger gelegen platen opslibben. In het LZS-model wordt de slibdynamiek nog niet goed doorgerekend (zie Deltares, 2017a). Daarom is de berekende aanslibbing op de platen van 1 tot 2 meter (zoals weergegeven in Figuur 3.28) waarschijnlijk een onderschatting. Aangezien bijna de helft van de platen in de Dollard boven de NAP 0 lijn liggen (Figuur 3.33) leidt deze aanslibbing tot een reductie van het getijprisma. Doordat er veel ruimte is voor slib om te bezinken neemt de sedimentconcentratie sterk af in een groot deel van het Eems-estuarium (Figuur 3.34).

Een dergelijke afname door creëren van een grootschalig bezinkgebied komt overeen met verwachtingen. Een belangrijke bron van slib is het eroderende Grootte Gat. Om hoeveel slib het hier gaat is niet bekend (er zijn geen slibgehalte kaarten op de diepte waar erosie optreedt), en wordt ook niet berekend door het D3S-model. In werkelijkheid zal bij de erosie

van het Groote Gat (veel) slib vrijkomen, maar dit wordt niet door het model berekend. Het model overschat wel weer de mate van erosie van het Groote Gat: in werkelijkheid wordt de erosie geremd door harde lagen, welke niet in het model zijn opgenomen.

In 2050 neemt de slibconcentratie toe in het afgeschermd luwtegebied (Figuur 3.35). In het model is dit het gevolg van relatief ondiep water, waardoor bodemschuifspanningen relatief hoog zijn en er snel erosie optreedt. Deze uitkomst is gevoelig voor de absolute bodemhoogte berekend door het LZS-model. Zoals hierboven besproken, is het LZS-model echter te onnauwkeurig om dit in groot detail uit te rekenen. Daarnaast groeien in het model de platen dusdanig hoog dat hier in werkelijkheid vegetatie zou gaan groeien, waardoor het slib wordt vastgelegd. Als inderdaad grootschalige vestiging van vegetatie optreedt, is een toename van de sedimentconcentratie niet aannemelijk omdat de vegetatie het slib invangt en vastlegt.

Vanwege het grotere getijvolume wordt het Groote Gat dieper, maar niet breder. Deze laterale stabiliteit van het Groote Gat lijkt niet heel realistisch. Vanuit een fysisch oogpunt lijkt een migratie richting het westen logisch. Erosie van droogliggende banken / platen vereist echter kleinschalige processen (bresgroei, oevererosie) die niet in Delft3D zijn geïmplementeerd. Daarnaast zijn de gridcellen relatief groot ten opzichte van de geuldimensies waardoor elke geul typisch uit 2-4 cellen in de breedte bestaat. Eerder onderzoek suggereert dat minimaal 6 cellen over de breedte nodig zijn om een morfologisch accurate geuldynamiek te reproduceren.

4.1.6 Maatregelrichting 'Toevoegen binnendijks intergetijdengebied'

Het lokale model van de overstromingsvlakte genereert fysisch realistische patronen. De waterbeweging (inclusief zeespiegelstijging) is gebaseerd op het grootschalige model, en de aangenomen sedimentconcentratie aan de monding is gebaseerd op metingen. Hierdoor lijkt de snelheid waarmee het overstromingsgebied zich invult een redelijk nauwkeurige inschatting.

Het effect van het overstromingsgebied op de morfologie van het Eems Estuarium wordt berekend met het LZS-model. Het LZS-model wordt geïnitieerd met hetzelfde overstromingsgebied als het lokale modelletje. In het LZS-model vult dit gebied minder snel in dan het lokale model, omdat de slibconcentratie te laag is. Daarom blijft het debiet wat in en uit het overstromingsgebied stroomt hoog, terwijl dit in werkelijkheid afneemt (ongeveer 50%, zie Figuur 3.45). Het effect van het overstromingsgebied op de morfologie van het Eems Estuarium wordt daarom door het model overdreven. Desalniettemin zal er een substantieel effect op de morfologie te verwachten zijn bij het aanleggen van een overstromingsgebied van 15 km² (ter vergelijking: de Dollard is 100 km²). De door het model berekende neiging tot het ontstaan van een twee-geulen systeem tussen Delfzijl en Knock zou ook realistisch kunnen zijn.

De berekende invloed van het overstromingsgebied lijkt realistisch: wanneer het overstromingsgebied leeg is neemt de slibconcentratie sterk af. Wanneer het overstromingsgebied een intergetijdengebied is geworden, neemt aanslibbing sterk af, en daardoor neemt de sedimentconcentratie in het estuarium ook niet meer af. Een factor waarmee bij de D3S berekeningen geen rekening is gehouden, is het vrijkomen van slib door erosie van geulen. In werkelijkheid is dit geërodeerde slib een bronterm wat tot een toename van de slibconcentratie zou kunnen leiden.

4.1.7 Maatregelrichting 'Dynamiek Eems Rivier'

Het aanbrengen van de meander in de Dollard is een zeer rigoureuze ingreep. De gedetailleerde morfologische ontwikkeling is sterk afhankelijk van (1) horizontale en verticale variaties in materiaaltypen (zand / slib), (2) sterkteveranderingen als gevolg van consolidatie van slibrijk materiaal, (3) vegetatieontwikkeling, en (4) kleinschalige processen zoals oevererosie. Al deze processen kunnen niet goed worden doorgerekend omdat er geen goede wiskundige beschrijvingen voor bestaan, en/of de benodigde modelinvoer erg gebied specifiek is (en niet beschikbaar). Daarnaast zijn de roostercellen vrij groot ten opzichte van de morfologische eenheden. Wat wel verwacht mag worden is dat de orde-grootte ontwikkeling van de geul enigszins realistisch is. Vanwege genoemde onzekerheden is niet goed te zeggen in hoeverre de afname in de getijamplitude (20%, zie Figuur 3.22) realistisch is.

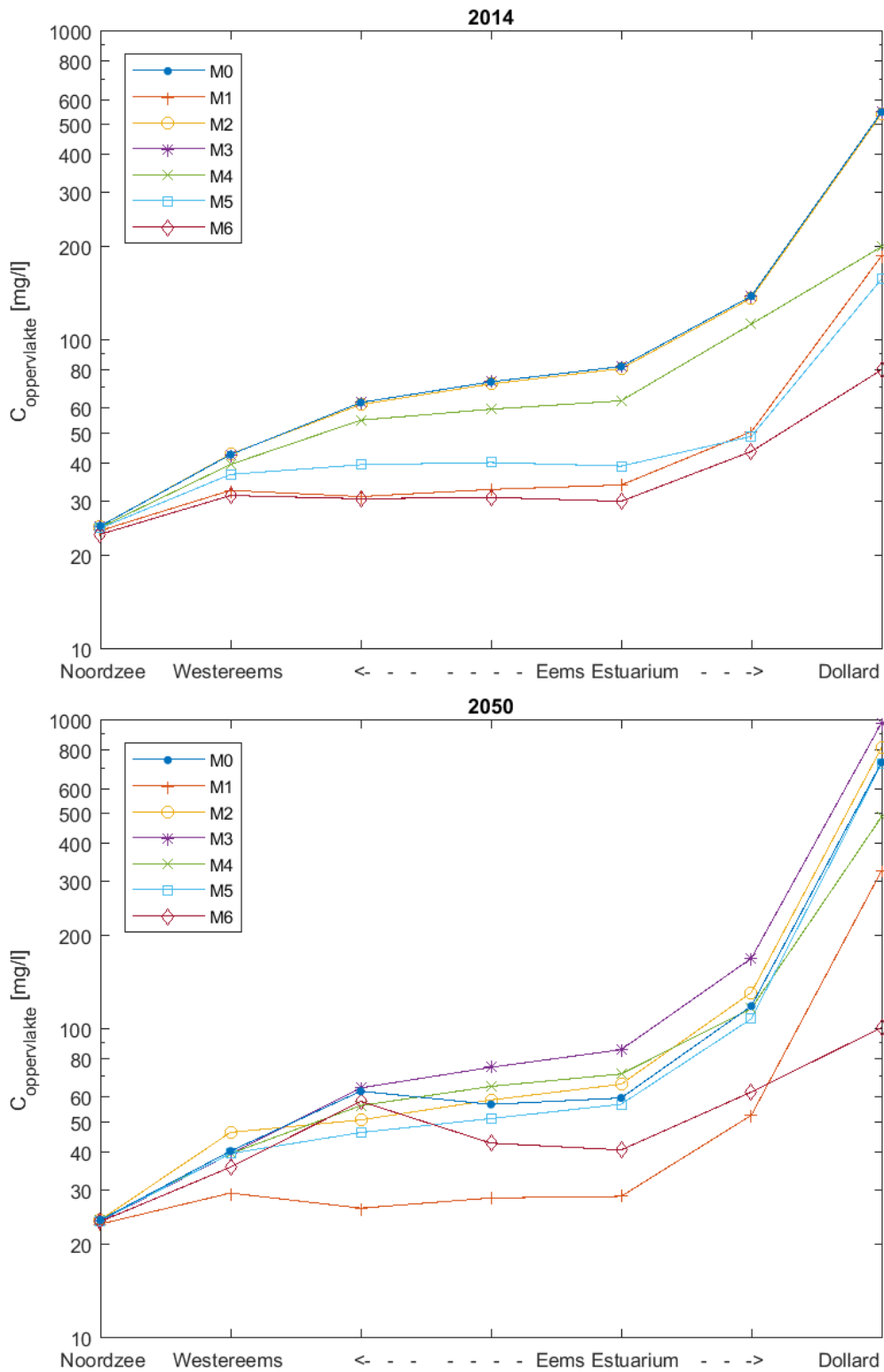
Het berekende effect van de meander op de slibdynamiek lijkt niet realistisch. Vooral in de Dollard wordt een significante afname van de slibconcentratie berekend. Deze sterke afname in de slibconcentratie is deels verklaarbaar doordat het model wel een afname in de slibconcentratie berekent doordat luwe gebieden ontstaan waar slib kan bezinken (qua invloed vergelijkbaar met maatregel 1), maar niet het vrijkomen van slib door uitschurende geulen. Door dit uitschuren zullen grote hoeveelheden slib vrijkomen, welke tot een toename in de slibconcentratie zorgen. Deze hoeveelheid is ingeschat op 16 miljoen ton, uitgaande van een 10 km lange geul met een breedte van 500 meter en een diepte van 6 meter wat een 4 meter dik slibpakket met 0.8 ton slib per m³ doorsnijdt (Deltares, 2017b). Dit materiaal zal vooral in de eerste jaren vrijkomen, en zal dan een significante bronterm vormen. Gemiddeld over de simulatieperiode (35 jaar) is het een bronterm van 0.5 miljoen ton, wat vergelijkbaar is met de jaarlijkse aanslibbing in Delfzijl of Eemshaven. Het vrijkomen van slib door geulerosie wordt niet berekend met de gebruikte modellen.

Een verlaging van de getijamplitude in de Eems Rivier zal een effect hebben op de getijdynamiek in de beneden Eems Rivier, en daarmee op het Eems Estuarium. De sedimenttransportprocessen in de Eems Rivier worden nu nog niet goed door het D3S-model gerepresenteerd (Deltares, 2017b) vanwege de complexe en slecht begrepen processen welke daar een rol spelen.

4.2 Synthese maatregelen en transportprocessen

Met het beschikbare modelinstrumentarium kan inzicht worden verkregen in het effect van maatregelrichtingen op de morfologie, op sedimenttransportprocessen en daardoor op vertroebeling. Vanwege de beperkingen in het model (gerelateerd aan tekortkomingen in proceskennis of invoer data, of simplificaties opgelegd door de rekentijd zoals de ruimtelijke resolutie en randvoorwaarden) hebben modellen een beperkte kwantitatief-voorspellende waarde. Modellen zijn echter wel zeer geschikt om de invloed van maatregelrichtingen op proces niveau te evalueren. In deze paragraaf worden de effecten van maatregelrichtingen op transportprocessen besproken.

Het effect van de maatregelen op de sedimentconcentratie is samengevat in Figuur 4.1. Bij de autonome ontwikkeling neemt de sedimentconcentratie af in het middengedeelte maar toe richting de Dollard. Maatregelen waar sediment wordt onttrokken leiden tot een verlaging (M1, M4, M5). Voor M4 en M5 (waarbij sediment bezinkt in luwe gebieden) is de verlaging het sterkst in 2014 omdat in 2050 de bezinkgebieden al deels zijn opgevuld. De sterke verlaging als gevolg van de meander in de Dollard (M6) moet voorzichtig worden geïnterpreteerd vanwege het grote aantal modeltekortkomingen en onzekerheden (zoals in §4.1.7 besproken).



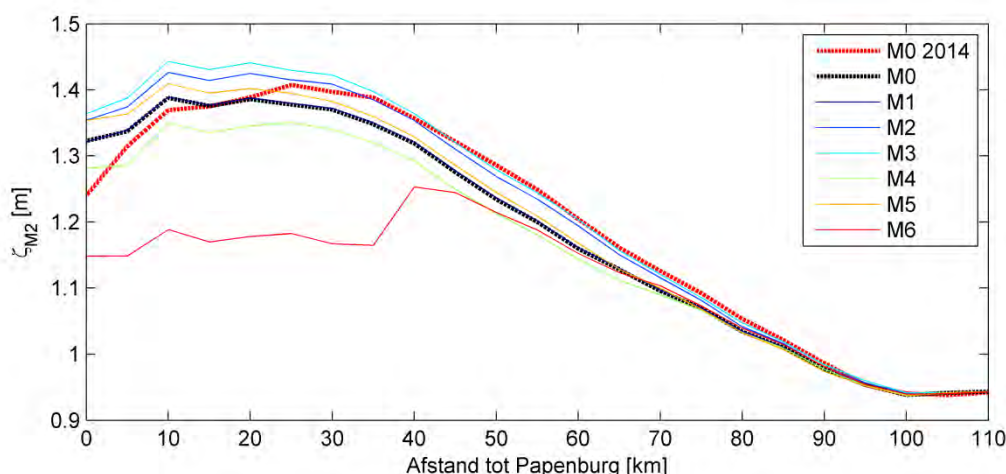
Figuur 4.1 Berekende jaarlijks gemiddelde oppervlakte sedimentconcentratie (logaritmische schaal) in de polygonen gedefinieerd in Figuur 2.14, voor de autonome ontwikkeling en maatregelrichtingen M1 t/m M6, voor 2014 (links) en 2050 (rechts). In 2014 overlappen M0, M2, en M3 omdat deze maatregelen op dat moment nog geen effect hebben.

4.2.1 Getijdynamiek

De getijamplitude neemt af bij de autonome ontwikkeling (waarschijnlijk als gevolg van de verondieping van de toegangsheulen naar het Eems Estuarium), zie Figuur 4.2. Tussen 2014 en 2050 neemt de berekende sedimentconcentratie af (Figuur 4.1). Dit suggereert een positieve relatie tussen getijamplitude en sedimentconcentratie. Dit wordt ondersteund door het effect van maatregelen: maatregelen waarbij de amplitude hoger is dan M0 (M2 en M3, zie Figuur 4.2) leiden tot een toename in de sedimentconcentratie ten opzichte van M0 (Figuur 4.1). Het is aannemelijk dat de getijamplitude afneemt als gevolg van de meander, en het is ook waarschijnlijk dat deze afname sterker is dan enig andere maatregel. De precieze afname (nu berekend als maximaal 15%) is echter onderhevig aan veel onzekerheden, en zou hoger of lager kunnen zijn.

De afname van de getijdynamiek bij autonome ontwikkeling is het gevolg van het verondiepen en versmallen van de toegangsheulen naar het Eems Estuarium. Zoals besproken in §4.1 is dit waarschijnlijk een modeltekortkoming, waarbij het morfologische model streeft naar een dynamisch evenwicht welke niet overeenkomt met de gemeten bodemligging en waarbij het getijdebiet lager is dan de huidige situatie. Het verdiepen van de geulen bij scenario M2 en M3 zou echter wel realistisch kunnen zijn. Wanneer zand systematisch uit het systeem wordt verwijderd, is op lange termijn een verruiming van de geul een aannemelijk resultaat.

Samenvattend: de berekende verlaging van de getijamplitude (en daarmee sedimentconcentratie) bij de autonome ontwikkeling is niet aannemelijk. De toename van de getijamplitude (en daarmee sedimentconcentratie) ten opzichte van de autonome ontwikkeling als gevolg van het onttrekken van gebaggerd zand (M2 / M3) is wel aannemelijk.



Figuur 4.2 Waterstandsamplitude ζ van de M_2 getijcomponent tussen Papenburg (km0) en de monding van de Eems (zie Figuur 2.15 voor locatie), in 2014 (autonome ontwikkeling M0) en 2050 (autonome ontwikkeling en de maatregelrichtingen M1 – M6). De resultaten voor scenario M1 zijn identiek aan M0 en daarom niet zichtbaar.

4.2.2 Estuariene circulatie

Verdieping leidt tot een verhoging van de getijamplitudes (en een verondieping tot een verlaging). Een verdieping leidt echter ook tot een versterking van de estuariene circulatie. Bij de autonome ontwikkeling is de estuariene circulatie in 2050 zwakker ontwikkeld nabij de monding (waar verondiepingen hebben plaatsgevonden) terwijl richting de Dollard de

estuariene circulatie toeneemt (als gevolg van een lokale verdieping): zie Figuur 3.8. Maatregelen waarbij de estuariene circulatie toeneemt (M2, M3 en M4) leiden tot een toename in sedimentconcentratie (Figuur 3.21 en Figuur 3.39). Een uitzondering hierop is M5: ook hier neemt de estuariene circulatie toe maar de concentratie neemt af – waarschijnlijk is dit het gevolg van invang van sediment in het aangelegde intergetijdengebied.

Het is daarom lastig vast te stellen in hoeverre de toename in de sedimentconcentratie bij scenario M2 en M3 het gevolg is van de toename in de getijamplitude of van de estuariene circulatie. Een aanwijzing wordt gegeven door scenario's M2 en M3. Bij M3 neemt de sedimentconcentratie sterker toe dan bij M2. De toename in getij is het sterkst bij M2 terwijl de estuariene circulatie juist sterker toeneemt bij scenario M3. Dit suggereert dat getij een grotere invloed heeft op de vertroebeling dan de estuariene circulatie. Het effect van de waterbeweging op slib is echter zeer complex en een dergelijke relatie kan niet eenduidig worden gelegd.

Geconcludeerd wordt dat zowel het getij als estuariene circulatie de vertroebeling beïnvloedt, waarbij de rol van getij iets groter lijkt dan die van estuariene circulatie. Een tweede conclusie die getrokken kan worden is dat de berekende slibconcentratie sterk reageert op veranderingen in de berekende morfologie (onafhankelijk of dit nu door estuariene circulatie of getijamplificatie komt).

4.2.3 Sediment onttrekken en bevorderen sedimentatie

Maatregelen gericht op het onttrekken van sediment zijn het meest effectief in het reduceren van de sedimentconcentratie. Sediment kan uit de waterfase van het systeem onttrokken worden door permanente onttrekking (op land brengen, zoals bij M1) of luwtezones creëren waarbij sediment permanent in/op de bodem vastgelegd wordt (M4; bevorderen sedimentatie en M5; Toevoegen binnendijs intergetijdengebied). In het eerste geval (M1) wordt de waterbeweging niet beïnvloed, in het tweede geval (M4 en M5) wordt de waterbeweging vooral lokaal beïnvloed. Van de doorgerekende maatregelrichtingen leidt onttrekken (M1) tot de grootste verlaging in de sedimentconcentratie, gevolgd door de aanleg van een binnendijs intergetijdengebied (M5) en het creëren van een luwe zone in de Dollard (M4). Storten van baggerspecie in het Blindes Randzelgat (M2) is niet succesvol gebleken – dit gebied is te dynamisch om als slib bezinklocatie te fungeren. Deze maatregel wordt daarom niet beschouwd als een sediment onttrekking.

Op de lange termijn is er een belangrijk verschil tussen maatregelen waarbij sediment uit het systeem wordt onttrokken (M1) en maatregelen waarbij sedimentatie wordt bevorderd (M4 en M5). Bij de eerste is de maatregel in 2050 even succesvol is als in de huidige situatie. Bij scenario's waar sedimentatie wordt bevorderd, neemt de efficiëntie af in de tijd, omdat het areaal waar slib kan bezinken afneemt (zowel in intergetijdengebieden als op kwelders). Deze aanslibbing kan hierbij zo sterk afnemen dat er geen significant effect meer is op de slibconcentratie. Hierdoor kan het gebeuren dat grootschalige morfologische veranderingen als gevolg van de maatregel om verkweldering te promoten, en welke een tegenovergesteld effect hebben op de vertroebeling, dominant worden. Dit kan dan leiden tot een toename in de sedimentconcentratie (scenario M4). Verkweldering leidt echter niet alleen tot een tijdelijke afname in de sedimentconcentratie door een tijdelijke onttrekking van sediment, maar ook tot een afname in het getijdebiet en daarmee slibaanvoer. Dit wordt nog door het model onderschat doordat verlanding versnelt wordt door vegetatiegroei, en het effect van vegetatie wordt niet berekend in de huidige modelopzet.

De berekende patronen en orde van grootte afname in de sedimentconcentratie door onttrekkingen / sedimentatie lijken aannemelijk, vooral in de volgende aspecten:

- De afname in de sedimentconcentratie is het sterkst voor onttrekkingen uit havens, gevolgd door het binnendijks intergetijdengebied; de sedimentatie achter de punt van Reide is het minst efficiënt. De reden hiervoor is de hoeveelheid sediment welke uit het systeem wordt onttrokken: dit is rond de twee miljoen ton/jaar voor scenario M1 en rond de 1 miljoen ton/jaar voor M5 – minder voor M4.
- Bij maatregelen waar sedimentatie wordt bevorderd, zal de efficiëntie van slibinvanging in de tijd afnemen. De met het huidige model berekende afname zal kwantitatief niet volledig juist zijn, maar de indicatie is aannemelijk. Maatregelen waar sedimentatie wordt bevorderd, moeten onderhouden worden: het bezonken sediment moet uit het systeem verwijderd worden.
- Een maatregel zoals creëren van een luwtegebied in de Dollard kan positieve en negatieve effecten hebben. Op de korte termijn overheersen de positieve effecten (de daadwerkelijke sedimentonttrekking) maar op de lange termijn zouden mogelijk nadelige veranderingen in de waterbeweging tot een toename in de sedimentconcentratie kunnen leiden. Dit dient nog verder onderzocht te worden.

4.2.4 Ecotopen

De dominante ecotopen in het Eemsgebied zijn het hoogdynamisch sublitoraal (dynamische geulen, vooral voorkomend in het buitengebied) en het laagdynamisch middenlitoraal (intergetijdengebieden, vooral sterk vertegenwoordigd in de Dollard). Als gevolg van zeespiegelstijging neemt het laagdynamisch middenlitoraal af terwijl het sublitoraal toeneemt. De arealen van de verschillende ecotopen kunnen direct worden beïnvloed door maatregelrichtingen. De grootste veranderingen treden hierbij op bij scenario M3 (vergroten plaatareaal) en M6 (dynamiek Eems Rivier).

4.3 Synthese en aanpassing maatregelrichtingen

Het grootste nadeel van de meest succesvolle maatregel (onttrekken slib; M1) is de opgave een betaalbare nuttige bestemming/toepassing voor het onttrokken slib te vinden. Dergelijke aspecten zijn geen onderdeel van de huidige slib – en morfologieberekeningen.

Maatregelen waarbij ook zandig sediment uit baggergeulen wordt onttrokken (M2, M3) hebben dusdanig veel nadelen dat wordt geadviseerd maatregelen met zandonttrekkingen niet verder te beschouwen.

Een belangrijk nadeel voor de berekeningen van sedimentatie achter de verlengde punt van Reide (M4) is dat het huidige model de aanslibbing op platen nog onnauwkeurig doorrekent. Dit zou eerst verbeterd moeten worden, bij voorkeur in combinatie met vastleggen van slib door vegetatie. Ook zou deze maatregel doorgerekend moeten worden in combinatie met verwijderen van afgezet slib, zodat de maatregel ook op de lange termijn effectief blijft.

Het toevoegen van een binnendijks intergetijdengebied (M5) heeft veel voordelen naast de effectieve afname in de sedimentconcentratie.

- Het levert een dynamisch gebied met veelzijdige natuurwaarden op.
- Het zal als een pilot fungeren voor het meegroeien van het land met de zee. Dit kan op twee manieren: (1) sediment wat bezinkt in het intergetijdengebied wordt verwijderd en aangebracht in nabijgelegen laaggelegen polders, of (2) er wordt een wisselpoldersysteem opgezet waar polders afwisselend onder water worden gezet.

- Hoewel de afgezette sliblagen zout zijn, en in eerste instantie niet geschikt voor landbouw, zal de opgehoogde bodem uiteindelijk veel rijker zijn dan de schrale laaggelegen veengronden (de veengronden zijn de meest laaggelegen gebieden in Oost Groningen).
- De maatregel zou gecombineerd kunnen worden met het herstel van een tweegeulensysteem. De modeluitkomsten suggereren dat het overstromingsgebied tot aanzienlijke morfologische veranderingen zal leiden. Door het overstromingsgebied te verbinden met de Bocht van Watum, kan de verlanding van deze laatste geul mogelijk worden gekeerd, en leiden tot een omslag waarbij de Bocht van Watum weer een significant effect op de waterbeweging heeft.

Geadviseerd wordt het effect van het periodiek verwijderen van afgezet sediment in het nieuwe intergetijdengebied op de ontwikkeling van het Eems Eestuarium in meer detail door te rekenen.

Het effect van de meander door de Dollard (M6) op waterbeweging, erosie van oude sliblagen, depositie in nieuwe luwtegebieden, en morfologische ontwikkeling (en daarmee nieuwe waterbeweging) is zo complex en onzeker dat het verder numeriek doorrekenen hiervan tot veel onzekerheden zal blijven leiden.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Binnen deze studie kunnen conclusies getrokken worden welke betrekking hebben op sedimenttransportprocessen, effectiviteit van maatregelen, algemene kennislacunes, en het modelinstrumentarium.

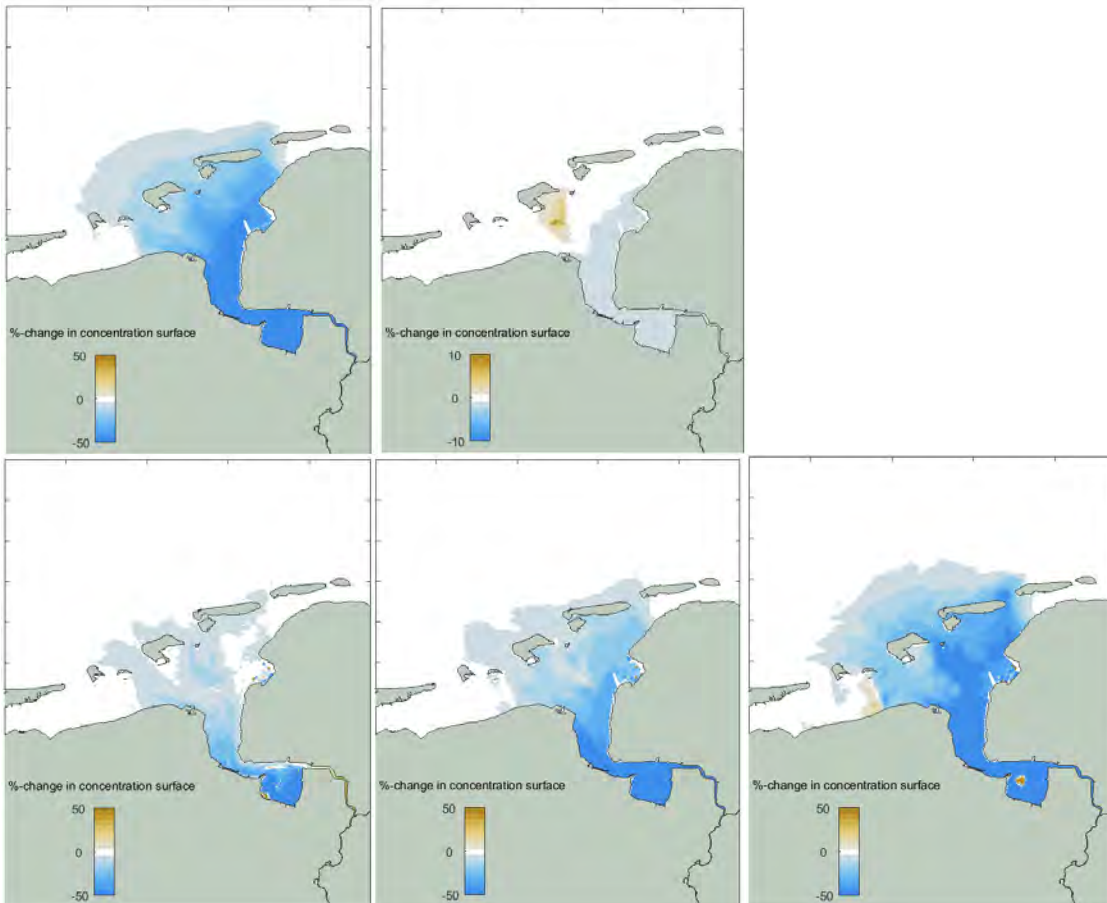
Sedimenttransportprocessen

- Sedimenttransport berekend met het D3S model is gevoelig voor morfologische veranderingen berekend met het LZS model. Een toename in geuldiepte en geulbreedte leiden tot een toename in het getij-gedreven transport; een toename in de diepte leidt ook tot een toename in de zout-gedreven estuariene circulatie. Welke van deze twee dominant is, is op basis van de huidige modelresultaten niet met zekerheid te zeggen. Interpretatie van het effect van maatregelen suggereert dat het getijvolume belangrijker is; eerdere studies (van Maren et al., 2015) suggereren echter dat de estuariene circulatie een grotere rol speelt.
- Het sedimenttransport in het estuarium wordt beperkt beïnvloed door zeespiegelstijging en door bodemdaling: de bodem zal de zeespiegelstijging waarschijnlijk niet bijhouden. De platen in de Dollard groeien wel mee. De modellen suggereren dat de plaataangroei vergelijkbaar is met de zeespiegelstijging; de exacte bijdrage van de zeespiegelstijging is echter niet eenduidig. Daarnaast groeit slechts een beperkt plaatareaal (vooral de hoog gelegen platen) substantieel mee met de zeespiegel.

Effectiviteit maatregelen

- De grootste berekende realistische reductie in de sedimentconcentratie wordt gerealiseerd door het onttrekken van slib uit de havens (M1 in Figuur 5.1 en Figuur 5.2). Modelmatig wordt nu veel slib onttrokken, een uitdaging is nog wel het vinden van een bestemming voor dit onttrokken slib.
- De meander in de Dollard leidt in de modelberekening tot een vergelijkbaar sterke afname in de slibconcentraties (M1 in Figuur 5.1 en Figuur 5.2) door aanslibbing en een afname in de getijamplitude. Er zijn echter dusdanig veel tekortkomingen in de modelmatige implementatie en in de kennis dat de berekende mate van afname niet realistisch is.
- Het creëren van accommodatieruimte voor slib via een verlengde punt van Reide (M4) of het creëren van een overstromingsgebied (M5) leiden initieel tot een sterke verlaging van de sedimentconcentratie (vergelijkbaar met onttrekkingen uit havens – zie Figuur 5.1). Op de langere termijn neemt de effectiviteit af (Figuur 5.2) omdat de accommodatieruimte verdwijnt. Deze maatregelrichtingen zouden daarom uitgevoerd moeten worden met een systeem waarbij het slib afgegraven wordt.
- Maatregelrichtingen waarbij zandig materiaal (gebaggerd uit vaargeulen) gebruikt wordt voor het creëren van intergetijdengebieden (M3) of storting in luwe gebieden (M2) leiden op termijn tot een toename van de slibconcentraties (Figuur 5.2) in het Eems Estuarium ten zuiden van Delfzijl omdat de veroorzaakte verdieping van de geul naar de Dollard leidt tot een toename in de getijamplitude en estuariene circulatie.
- De maatregelrichting waarbij een binnendijks overstromingsgebied wordt gecreëerd (M5) is effectief en veelzijdig: het leidt tot (1) een afname in de slibconcentraties

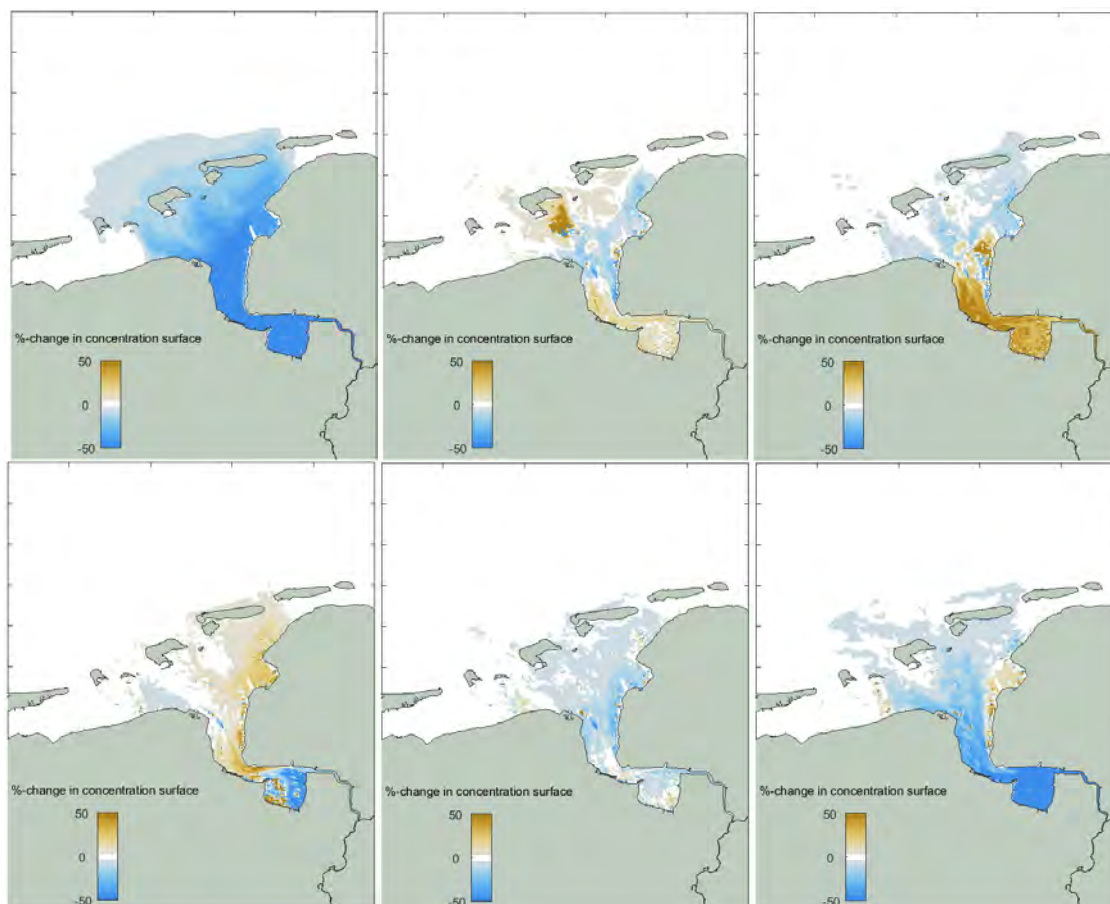
(Figuur 5.1), (2) een oplossing voor meegroeien van het land met zeespiegelstijging en verbeteren van de bodemkwaliteit, en (3) veelzijdige natuurgebieden.



Figuur 5.1 Verandering in jaargemiddelde sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling voor maatregelrichtingen M1, M2 (beide boven) en M4, M5, M6 (beneden) in 2014. M3 heeft geen verandering ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

Kennislacunes

- De platen in de Dollard lijken in een evenwichtsconditie te verkeren waar netto veranderingen beperkt zijn. Eerdere studies (Puccimar, 2011) suggereren dat de plaathoogte afhankelijk is van langjarige fluctuaties in het Gemiddeld Hoog Water (GHW). Waarom het GHW fluctueert dient echter ook verder uitgezocht te worden. Het effect van zeespiegelstijging is nog minder bekend. Er zijn ook geen metingen beschikbaar naar de effecten van zeespiegelstijging op intergetijdenplaten.
- De platen in de Dollard liggen voldoende hoog om begroeid te worden door vegetatie. Het is niet bekend waarom deze vegetatie ontwikkeling niet op gang komt. Bij een aantal maatregelen is de verwachting dat de aanslibbing nog verder toeneemt. In deze gevallen is meer kennis over vegetatieontwikkeling essentieel.
- De uitwisseling van water en sediment tussen de Eems Rivier en Eems Estuarium zijn onvoldoende begrepen. Deze tekortkoming wordt opgepakt in het spoor HV (zie ook Figuur 1.1) door het uitvoeren van veldmetingen.
- De morfologie van het estuarium wordt waarschijnlijk deels gestuurd door de aanwezigheid van harde kleilagen. De exacte ligging en het effect van de kleilagen op de morfologie is nog niet bekend. Dit onderzoek wordt opgepakt binnen het spoor HV (Figuur 1.1).



Figuur 5.2 Verandering in jaargemiddelde sedimentconcentratie ten opzichte van de autonome ontwikkeling voor maatregelrichtingen M1, M2, M3 (boven) en M4, M5, M6 (beneden) in 2050.

Modelinstrumentarium

- Het modelinstrumentarium geeft inzicht in het effect van maatregelen ten opzichte van de autonome ontwikkeling, en waar binnen het estuarium deze veranderingen plaats zullen vinden.
- Het model geeft een eerste orde inschatting van de onderlinge effectiviteit van maatregelen, en hoe lang deze maatregelen effectief zijn.
- De grootschalige morfologische berekeningen geven inzicht in de invloed van maatregelen op de geuldynamiek, zoals het ontstaan / veranderen van getijgeulen. Een aantal van deze effecten waren onvoorzien, waardoor dergelijke modeluitkomsten belangrijke inzichten leveren.
- Het model heeft een aantal tekortkomingen welke in toekomstige projectfasen verbeterd kunnen worden. Deze zijn gedetailleerd in §5.2.

5.2 Aanbevelingen

Op basis van deze studie worden een aantal aanbevelingen gegeven, gerelateerd aan modelverbetering en maatregelrichtingen.

Modelverbeteringen

Aanbevelingen rond modelverbeteringen zijn gebaseerd op voorliggende studie, maar ook op de modelopzet rapportages (Deltares 2017a, b). De voorgestelde verbeteringen zijn hierbij

als volgt (waarbij de volgorde een eerste orde inschatting geeft van het belang van de verbetering, met eerstgenoemde verbeterpunten als meest belangrijke):

- In het LZS model wordt op dit moment een versimpelde golfschematisatie gebruikt. Dit heeft twee gevolgen: (1) de ruimtelijke gradiënt in hydrodynamische energie wordt onderschat, en daarmee het transport richting de relatief luwe Dollard en (2) slib in het LZS model is te mobiel, waardoor aanslibbing in relatief luwe gebieden wordt onderschat.
- Het LZS model is opgezet met behulp van Neuman randen vanwege de morfologische stabiliteit van zandig sediment. Dit type randen heeft twee nadelen: (1) de fasering van de getijgolf op de Noordzee is niet realistisch, wat de in- en uitstroomrichting door de zeegaten beïnvloed en (2) er vindt aanslibbing plaats op de randen. Deze tekortkomingen kunnen in een vervolgstadium verbeterd worden.
- Het slibmodel is gevoelig voor de berekende veranderingen in de natte doorsnede (diepte en breedte) van de getijgeulen in de Eems. Een aantal van de bodemveranderingen zijn echter discutabel. Waarschijnlijk is de verondieping van de Westereems en het Huibertgat (en de daar uit voortkomende berekende afname in de sedimentconcentratie) het gevolg van deze randschematisatie (zoals hierboven besproken). Hier moet in een vervolgstadium meer aandacht aan besteed worden.
- Het slibmodel is gevoelig voor de berekende hoogte van de intergetijdenplaten. Het berekenen van de juiste aangroei van deze platen (in het morfologisch LZS model) is echter lastig: de netto bodemverandering is een relatief klein resultaat van twee grote bruto fluxen (erosie en sedimentatie). Daarnaast zijn de bruto fluxen sterk afhankelijk van sedimentparameters en golfcondities, en beide worden nog niet goed door het LZS model gereproduceerd. En ten slotte is het daadwerkelijke gedrag van de platen niet goed begrepen – zie ook kennislacunes.
- Om morfologische veranderingen als gevolg van aanslibbing beter te kunnen kwantificeren zal het slibtransport in het LZS model verbeterd moeten worden. Slibtransport is een driedimensionaal proces en een representatie in een 2D model (zoals het LZS model) zal tot onderschatting van het netto transport leiden. Bij de verdere ontwikkeling van het LZS model moet hier rekening mee gehouden worden.
- De interactie tussen het Eems Estuarium en de Eems Rivier wordt niet goed door het model gereproduceerd. Het beter begrijpen van deze interactie, en vervolgens verbeteren van modellen, is geagendeerd in vervolgstappen binnen het ED2050 HV spoor (zie Figuur 1.1). Dit is ook geïdentificeerd als kennislacune.
- De morfologische ontwikkeling van de getijgeulen wordt waarschijnlijk deels gestuurd door de aanwezigheid van harde kleilagen. Deze harde lagen hebben een belangrijke invloed op de morfologie van het estuarium. De diepteligging van deze harde lagen verschillen ruimtelijk, maar de exacte ligging is onvoldoende bekend. Deze kennislacune wordt op dit moment binnen het spoor HV opgepakt.
- Het model heeft een relatief lage roosterresolutie, vanwege de lange periode welke doorgerekend moet worden en het grote aantal simulaties. Bij een beperkte roosterresolutie kunnen getijgeulen zich niet goed ontwikkelen. Deze beperking in roosterresolutie kan verantwoordelijk zijn voor de berekende ver(on)diepingen, maar ook door de rechte geulen welke zich ontwikkeld bij scenario M4.
- De bocht van Watum snijdt in het LZS model in. In werkelijkheid slibt deze geul dicht. Dit kan het gevolg zijn van de tekortkomingen in het LZS slibmodel, of van de grove roosterresolutie.
- Uitschurende geulen lijden tot het vrijkomen van slib. Dit effect wordt niet meegenomen in het D3S-model. Wel in het LZS-model, maar dit model onderschat het slibgehalte in de bodem omdat deze informatie niet bekend is. Het D3S-model wordt aangestuurd met een uitgeschuurde bodem (verkregen uit het LZS-model). Het

vrijkomen van slib is daarom niet met het D3S-model uit te rekenen. Dit speelt een grote rol in maatregel 4 en 6, en een beperkte rol bij maatregel 5.

- In werkelijkheid gaan aanslibbende intergetijdenplaten over in kwelders. Kwelders zijn efficiënter dan platen in het vastleggen van sediment: op het moment dat de platen over gaan in kwelders versnelt daarom de aanslibbing. Deze overgang zou modelmatig gekwantificeerd kunnen worden. Hier is echter wel meer kennisontwikkeling voor nodig (zie kennislacunes in §5.1).

Maatregelrichtingen

- Maatregelrichtingen waarbij zand uit de vaargeulen wordt verwijderd (M2, M3) verhogen de slibconcentratie. Geadviseerd wordt deze niet verder te ontwikkelen.
- Om maatregelrichtingen waarbij aanslibbing bevorderd wordt (M4, M5) effectief te houden dienen deze gecombineerd te worden met verwijderingsstrategieën van het afgezette slib.
- Overstromingsgebieden (zoals maatregel M5) zouden dusdanig aangelegd kunnen worden dat hiermee het 2-geulen karakter van het Eems estuarium weer meer ontwikkeld kan worden. Bijvoorbeeld door een overstromingsgebied te verbinden met de Eems via de Bocht van Watum. Dit vereist meer onderzoek.
- Voor de maatregel waarbij baggerslib aan het systeem onttrokken wordt (M1) dienen bestemmingen gevonden te worden voor het onttrokken havenslib.
- Volgens de modellen lijkt de meander een sterk positief effect te hebben op de slibconcentratie. Diverse aspecten van de modellering moeten echter dusdanig verbeterd worden om een goede voorspelling mogelijk te maken. Het is bovendien de vraag of modelinstrumenten ooit in staat zullen zijn om de effecten van een dergelijk grote ingreep betrouwbaar te voorspellen.

6 Referenties

- Achete, F., van der Wegen, M., Roelvink, J. A., & Jaffe, B. (2017). How can climate change and engineered water conveyance affect sediment dynamics in the San Francisco Bay-Delta system?. *Climatic Change*, 142(3-4), 375-389.
- Chua, V. P., & Xu, M. (2014). Impacts of sea-level rise on estuarine circulation: an idealized estuary and San Francisco Bay. *Journal of Marine Systems*, 139, 58-67.
- Dankers, PJT, van Maren, DS, en Schmidt, C (2015). Plan van Aanpak Hydromorfologische Verbetering Eems Dollard Estuarium. ED2050 rapport, 74 p.
- de Jonge, V.N., Schuttelaars, H.M., van Beusekom, J.E.E., Talke, S.A., de Swart, H.E., 2014. The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary. *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.12.030>.
- Deltares, 2015. Mud dynamics in the Ems-Dollard, phase 3: Scenarios for improvement. Deltares report 1205711-003, 91 p.
- Deltares, 2017a. Hydromorfologische verbetering ED2050: opzet morfologisch model. Deltares rapport 11200116-000-ZKS-0003, 51 p.
- Deltares, 2017b. Hydromorfologische verbetering ED2050: opzet slibmodel. Deltares rapport 11200116-000-ZKS-0002, xxx p.
- Dissanayake, D. M. P . K., R. Ranasingh e, and J. A. Roelvink (2012), The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sealevel rise. *Clim. Chang.*, 113 (2), 253–276, doi: 10.1007/s10584-012-0402-z.
- Dissanayake, P., & Wurpts, A. (2013). Modelling an anthropogenic effect of a tidal basin evolution applying tidal and wave boundary forcings: Ley Bay, East Frisian Wadden Sea. *Coastal Engineering*, 82, 9-24.
- E&E (2015). Economie en Ecologie Eems-Dollard in balans: Eindrapport MIRT-onderzoek. Ministerie van Infrastructuur en Milieu en de Provincie Groningen, 27 p.
- Friedrichs, C. T., & Aubrey, D. G. (1988). Nonlinear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 30(3), 321–322. [http://doi.org/10.1016/0272-7714\(90\)90054-U](http://doi.org/10.1016/0272-7714(90)90054-U)
- Friedrichs, C. T. (2011). Tidal Flat Morphodynamics: A Synthesis. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Academic Press, Waltham, 137-170.
- Hansen, D.V., Rattray, M., 1965. Gravitational circulation in straits and estuaries. *J. Mar. Res.* 23, 104–122.
- Hibma, A., H. J. de Vriend and M. J. F. Stive (2003b), Numerical modelling of shoal pattern formation in well-mixed elongated estuaries, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(5–6), 981–991.
- Fabricius, K.E., De'ath, G., Humphrey, C., Zagorskis, I., Schaffelke, B., 2013. Intra-annual variation in turbidity in response to terrestrial runoff on near-shore coral reefs of the Great Barrier Reef. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 116,57–65.
- KNMI (2015). KNMI klimaatscenario's 2014.
- Kuang, C., Liang, H., Gu, J., Su, T., Zhao, X., Song, H., ... & Dong, Z. (2017). Morphological process of a restored estuary downstream of a tidal barrier. *Ocean & Coastal Management*, 138, 111-123.
- Le Cozannet, G., Garcin, M., Yates, M., Idier, D., & Meyssignac, B. (2014). Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. *Earth-science reviews*, 138, 47-60.
- Mulder, H.P.J., 2013. Baggervolumes in het Eems–Dollard Estuarium voor de periode 1960–2011. Ongepubliceerd rapport, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

- NAM (2014). Gewijzigd Winningsplan Groningenveld 2013.
- Meade, R.H., 1969. Landward transport of bottom sediments in estuaries of the Atlantic Coastal Plain. *J. Sedim. Petrol.* 39 (1), 222–234.
- Paarlberg, A. J., Guerrero, M., Huthoff, F., & Re, M. (2015). Optimizing dredge-and-dump activities for river navigability using a hydro-morphodynamic model. *Water*, 7(7), 3943-3962.
- Prandle, D. (2006). Dynamical controls on estuarine bathymetry: Assessment against UK database. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(1), 282-288.
- Prumm, M., & Iglesias, G. (2016). Impacts of port development on estuarine morphodynamics: Ribadeo (Spain). *Ocean & Coastal Management*, 130, 58-72.
- Prandle, D., & Lane, A. (2015). Sensitivity of estuaries to sea level rise: Vulnerability indices. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 160, 60-68.
- PUCCIMAR (2011). Verkenning afslag Eems-Dollardkwelders. PUCCIMAR-rapport 02 / A&W-rapport 1574
- Robins, P. E., Skov, M. W., Lewis, M. J., Giménez, L., Davies, A. G., Malham, S. K., ... & Jago, C. F. (2016). Impact of climate change on UK estuaries: A review of past trends and potential projections. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 169, 119-135.
- Schuttelaars, H. M., de Jonge, V. N., & Chernetsky, A. (2013). Improving the predictive power when modelling physical effects of human interventions in estuarine systems. *Ocean & coastal management*, 79, 70-82.
- Taal, M.D., Schmidt, C.A., Brinkman, A.G., Nolte, W., Van Maren, D.S., 2015: Slib en primaire productie in het Eems-estuarium. Een samenvatting van vier jaar meten, modelleren, kennis bundelen en verwerven. Eindrapport KRW slib Eems-Dollard. Deltares, Imares, en Rijkswaterstaat.
- Van der Wegen, M., Z. B. Wang, H. H. G. Savenije, and J. A. Roelvink (2008), Long-term morphodynamic evolution and energy dissipation in a coastal plain, tidal embayment, *J. Geophys. Res.*, 113, F03001, doi:10.1029/2007JF000898.
- Van der Wegen, M. (2013). Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 447-460.
- Van der Wegen, M., Jaffe, B., Foxgrover, A., & Roelvink, D. (2017). Mudflat Morphodynamics and the Impact of Sea Level Rise in South San Francisco Bay. *Estuaries and Coasts*, 40(1), 37-49.
- Van Maren, D. S., & Winterwerp, J. C. (2013). The role of flow asymmetry and mud properties on tidal flat sedimentation. *Continental Shelf Research*, 60, S71-S84.
- van Maren, D.S., van Kessel, T., Cronin, K., Sittoni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Cont. Shelf Res.* 95, 1–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.010>.
- van Maren, D. S., & Cronin, K. (2016). Uncertainty in complex three-dimensional sediment transport models: equifinality in a model application of the Ems Estuary, the Netherlands. *Ocean Dynamics*, 66(12), 1665-1679.
- van Maren, D.S. & van Kessel, T. (2016). Long-term effects of maintenance dredging on turbidity. *Terra et Aqua*.
- Yang, Z., Wang, T., Voisin, N., & Copping, A. (2015). Estuarine response to river flow and sea-level rise under future climate change and human development. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156, 19-30.
- Ysebaert, TJW, van der Wal, JT, Tangelder, M., de Groot, AV, Baptist, MJ (2016). Ecotopenkaart voor het Eems-Dollard estuarium. Imares rapport C059/15, 46 p.

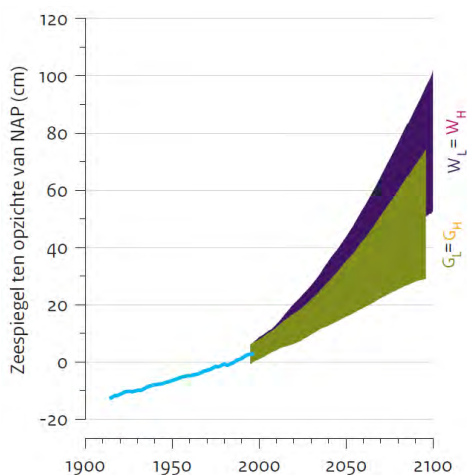
A Parameterisatie zeespiegelstijging

Inleiding

Binnen het project Hydromorfologische Verbetering ED2050 worden voorspellingen gedaan met een morfologisch model (het LZS model). Voor deze simulaties is een zeespiegelstijging nodig. In dit memo wordt kort beschreven op basis van welke overwegingen deze keuze is gemaakt. Hierin wordt onderscheid gemaakt in eustatische zeespiegelstijging (stijging van het zeeniveau) en bodemdaling.

Eustatische zeespiegelstijging

Voorspellingen voor de zeespiegelstijging in Nederland worden om de paar jaar uitgegeven door het KNMI. Het meest recente KNMI scenario is uit 2014 (KNMI, 2015); daarvoor is uitgegaan van de KNMI scenario's uit 2006. Er bestaat een grote onzekerheid in deze voorspelling, en als gevolg daarvan is er een grote spreiding in zeespiegelstijgingscurves (Figuur 1). Binnen deze zijn twee basisscenario's gedefinieerd: Gematigd (G) en Warm (W).



Figuur A.1 Zeespiegel aan de Nederlandse kust zoals waargenomen en volgens de KNMI'14-scenario's. In plaats van 30-jaar gemiddelden worden gladgestreken curves getoond, omdat zeespiegelstijging een proces is met een regelmatige verandering. Om de band voor WL en WH zichtbaar te maken is die iets verder doorgetrokken. Uit KNMI (2015).

Voor het definiëren van de zeespiegelstijging binnen het HV2050 project moeten twee keuzes worden gemaakt:

1. Welk scenario (warm of gematigd) moet worden gebruikt?
2. Welke KNMI voorspelling moet worden gebruikt (2006 of 2014)?

Het gebruik van een scenario met sterke zeespiegelstijging (W in Figuur A.1) heeft twee voordelen. Voor veiligheidsvraagstukken (dijkontwerp) wordt altijd uitgegaan van scenario's met de sterkste stijging. Dit scenario heeft daarom de sterkste beleidsmatige verankering. Daarnaast geeft het gebruik van een sterke stijging het meeste inzicht in het modelgedrag – hoe reageert de bodem zich op de zeespiegelstijging? Tijdens een expertoverleg op 22 december 2016 is daarom gekozen voor een scenario met sterke zeespiegelstijging.

De keuze voor KNMI 2006 of 2014 wordt bepaald op basis van (1) inhoudelijke gronden (welke voorspelling is het meest nauwkeurig) en (2) aansluiting bij bestaande studies (welke

definitie wordt standaard gehanteerd). Het 2014 scenario is gebaseerd op nieuwe inzichten, en daarom per definitie nauwkeuriger dan de voorspelling uit 2006. Een voordeel van de KNMI 2006 voorspelling is dat deze scenario's gehanteerd worden voor veiligheidsvraagstukken – dit scenario sluit daarom het beste aan bij bestaande studies. Echter, binnen het Nationaal Waterplan 2016 – 2021 wordt al uitgegaan van KNMI 2014. Ook het KNMI 2014 lijkt daarom voldoende beleidsmatig verankerd om te gebruiken binnen de studie ED2050. Gezien de grotere nauwkeurigheid wordt daarom gekozen voor KNMI 2014.

De bovengrens van het KNMI 2014 W scenario geeft een stijging van de zeespiegel (ten opzichte van het jaar 1990) van 40 cm in 1950 en 100 cm in 2100. Dit komt neer op een gemiddelde zeespiegelstijging van 0.67 cm /jaar van 1985 tot aan 2050, gevolgd door 1.2 cm/jaar tussen 2050 en 2100. Deze waarden worden aangehouden in de simulaties naar het effect van zeespiegelstijging.

Bodemdaling

De bodemdaling in het Eems estuarium wordt grotendeels veroorzaakt door gasonttrekking vanuit het gasveld Slochteren. De sterkste bodemdaling is tot nu toe opgetreden bij Loppersum (bijna 30 cm; zie Figuur A.2). De uiteindelijke verwachte maximale bodemdaling is bijna 50 cm (zie Figuur A.2). Het grootste deel van de totale bodemdaling heeft daarom al plaatsgevonden.

Voor de toekomstscenario's uit te rekenen binnen het project Hydromorfologische Verbetering ED2050 is de nog te verwachten bodemdaling van belang (historische bodemdalingen zijn al onderdeel van de gemeten bodems). De nog te verwachten bodemdaling is weergegeven in Figuur A.3 (linker paneel). Deze verwachting is gedigitaliseerd en geprojecteerd op het modelrooster (rechterpaneel in Figuur A.3). Deze bodemdaling wordt in het morfologisch Delft3D model (LZS) ingebouwd, en zal leiden tot een zakking van de bodem, maximaal nabij Delfzijl.

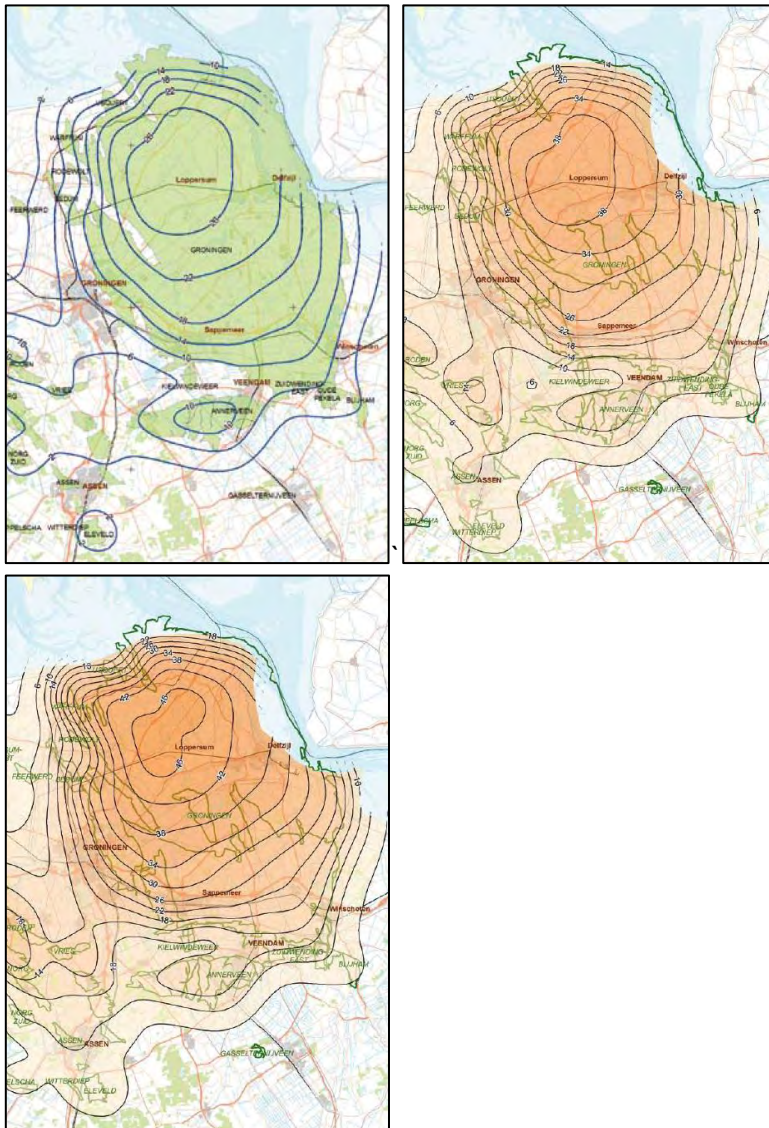
Samenvatting

De zeespiegelstijging gebruikt in het LZS model is 0.67 cm /jaar tot aan 2050, gevolgd door 1.2 cm/jaar tussen 2050 en 2100. Dit is het maximale KNMI '14 zeespiegelstijgingsscenario. Tot aan 2080 wordt een ruimtelijk variërende bodemdaling toegepast (maximaal 0.2 cm/jaar, nabij Delfzijl) gebaseerd op NAM voorspellingen.

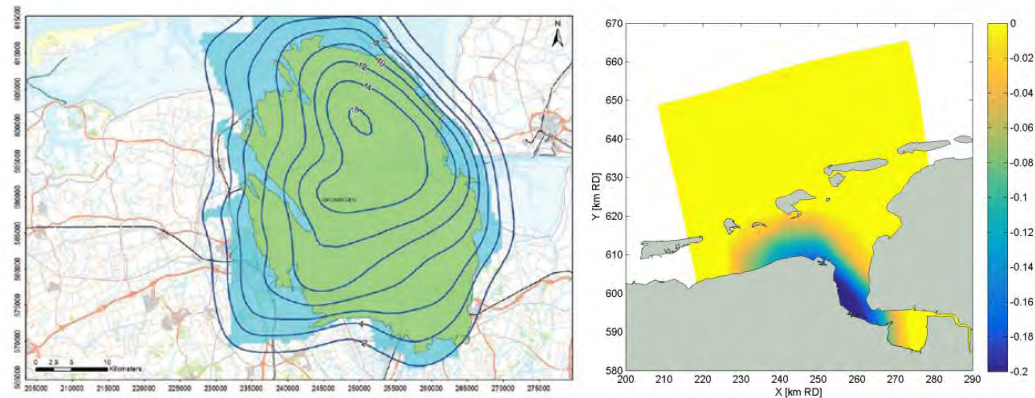
Referenties

KNMI(2015). KNMI '14 klimaatscenario's voor Nederland. Herziene uitgave, <http://www.klimaatscenarios.nl/correctie>

NAM (2010). Bodemdaling door Aardgaswinning, NAM-gasvelden in Groningen, Friesland en het noorden van Drenthe.



Figuur A.2 Hindcast van de bodemdaling in 2008 (links), de voorspelde bodemdaling in 2025 (midden) en 2070 (rechts). Uit NAM (2010).



Figuur A.3 Links: Nog te verwachten additionele bodemdaling (2013-2080) veroorzaakt door de gasproductie uit het Groningen veld (de contouren geven de bodemdaling in cm aan). Rechts: gedigitaliseerde bodemdaling (in m/eeuw) geprojecteerd op het modelrooster.

B Ecotopenverdeling maatregelrichtingen

Tabel B.1 Oppervlakte verdeling (in ha) van ecotopen in het Eems buitengebied

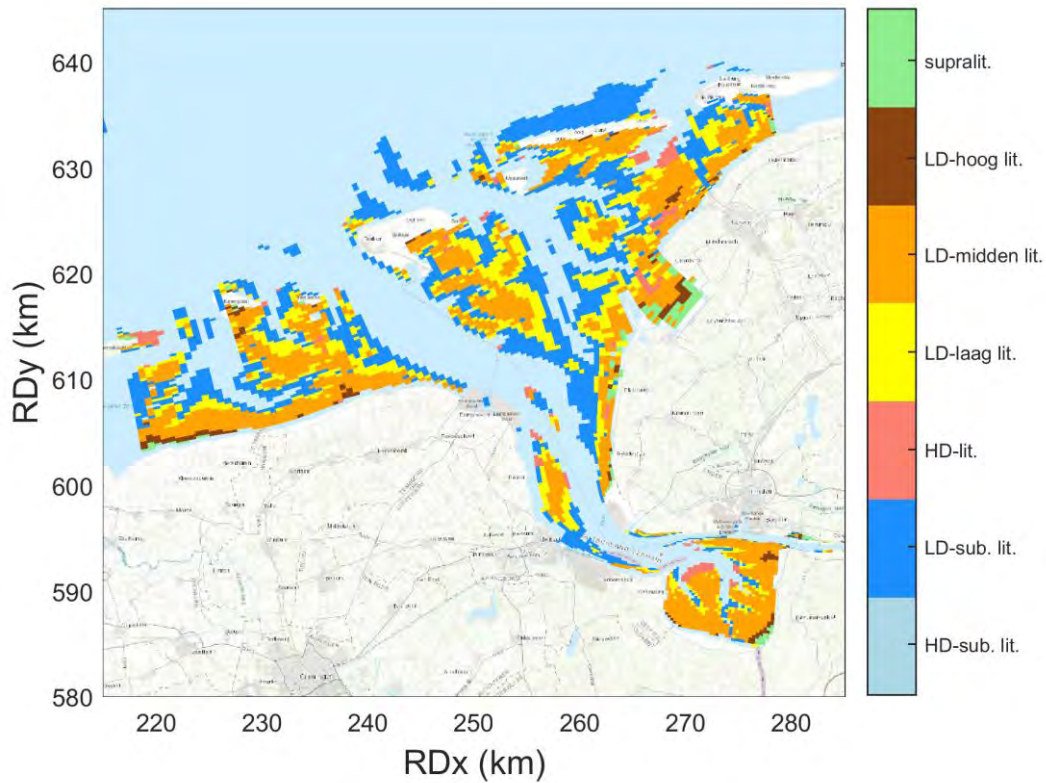
Ecotoop	2014	2050						
		auto	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Supralitoraal	17819	14688	14688	17509	14688	14784	14508	14823
Laagdyn. hooglit.	13725	12731	12731	14839	12843	12956	13037	12888
Laagdyn. middenlit.	138485	119627	119495	117428	120608	119946	119869	120300
Laagdyn. laaglit.	63224	57821	57815	57046	57314	57086	57136	56755
Hoogdyn. lit.	4361	5411	5411	5641	5669	5410	5438	5048
Laagdyn. sublit.	45873	53119	53215	53528	53974	53091	53362	53442
Hoogdyn. sublit.	224694	226456	226436	226054	225854	226539	226423	226502

Tabel B.2 Oppervlakte verdeling (in ha) van ecotopen in het Eems middengebied

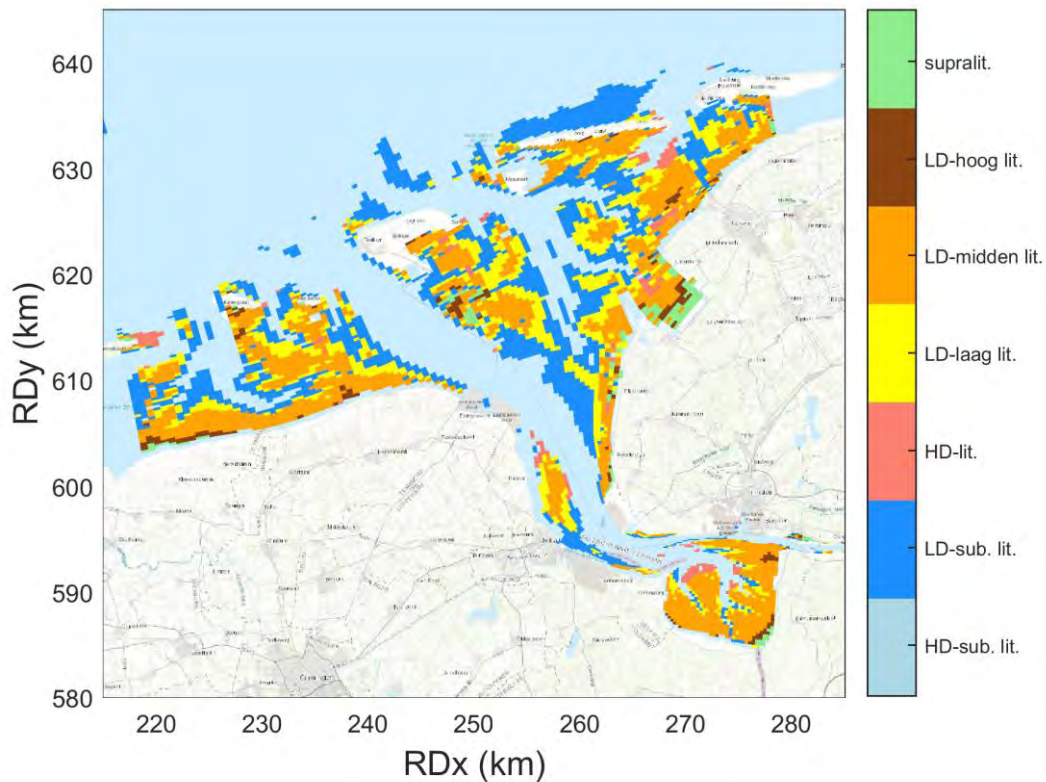
Ecotoop	2014	2050						
		auto	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Supralitoraal	803	1985	1985	1746	3961	1826	2255	2292
Laagdyn. hooglit.	808	598	598	692	3238	688	484	688
Laagdyn. middenlit.	15400	11535	11535	11096	17447	12166	11094	12256
Laagdyn. laaglit.	11651	6486	6431	7697	5405	6516	6730	6058
Hoogdyn. lit.	242	1054	1086	1169	1356	1104	892	1045
Laagdyn. sublit.	6263	8299	8196	7929	4974	8265	8444	7697
Hoogdyn. sublit.	8844	9486	9540	9436	9413	9360	9529	9694

Tabel B.3 Oppervlakte verdeling (in ha) van ecotopen in de Dollard

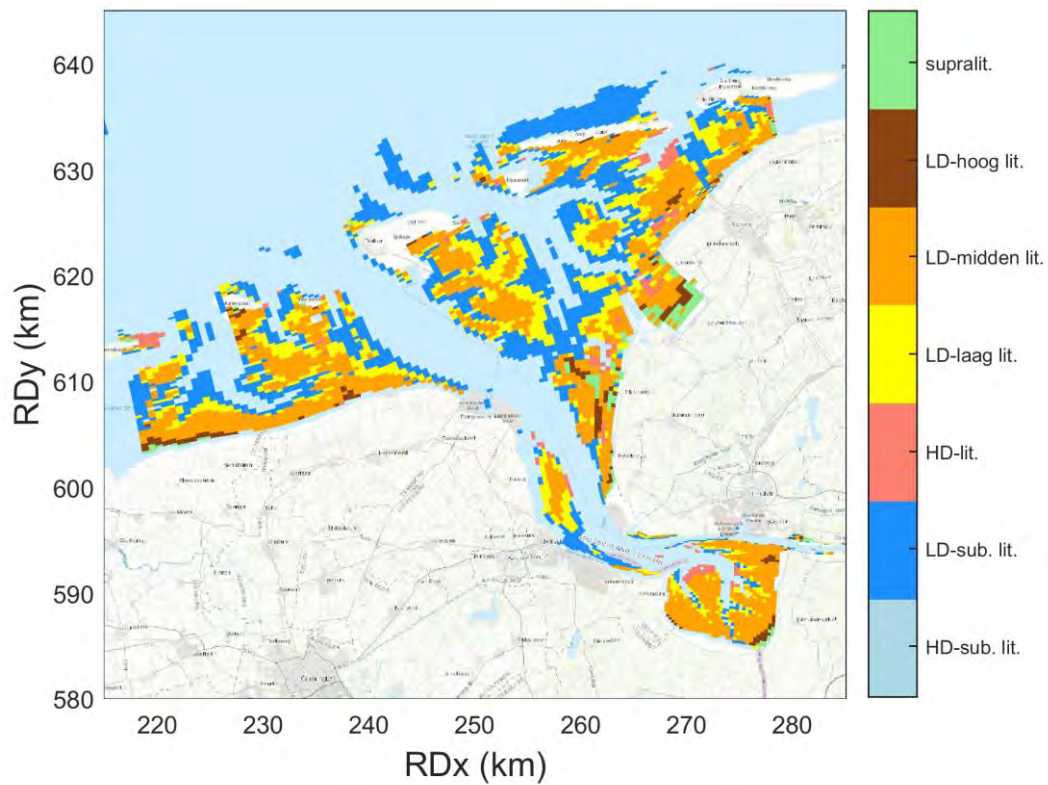
Ecotoop	2014	2050						
		auto	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Supralitoraal	2193	1895	1895	1842	1519	2003	1644	2348
Laagdyn. hooglit.	3208	3328	3237	3183	3228	3738	3232	3367
Laagdyn. middenlit.	26943	25441	25515	25649	25875	23863	25667	19374
Laagdyn. laaglit.	3171	3767	3764	3889	4072	3795	3884	2991
Hoogdyn. lit.	1402	1386	1318	1418	1217	1553	1277	1474
Laagdyn. sublit.	681	1227	1212	1017	1082	1188	1142	1519
Hoogdyn. sublit.	1583	1489	1521	1543	1526	1678	1546	2650



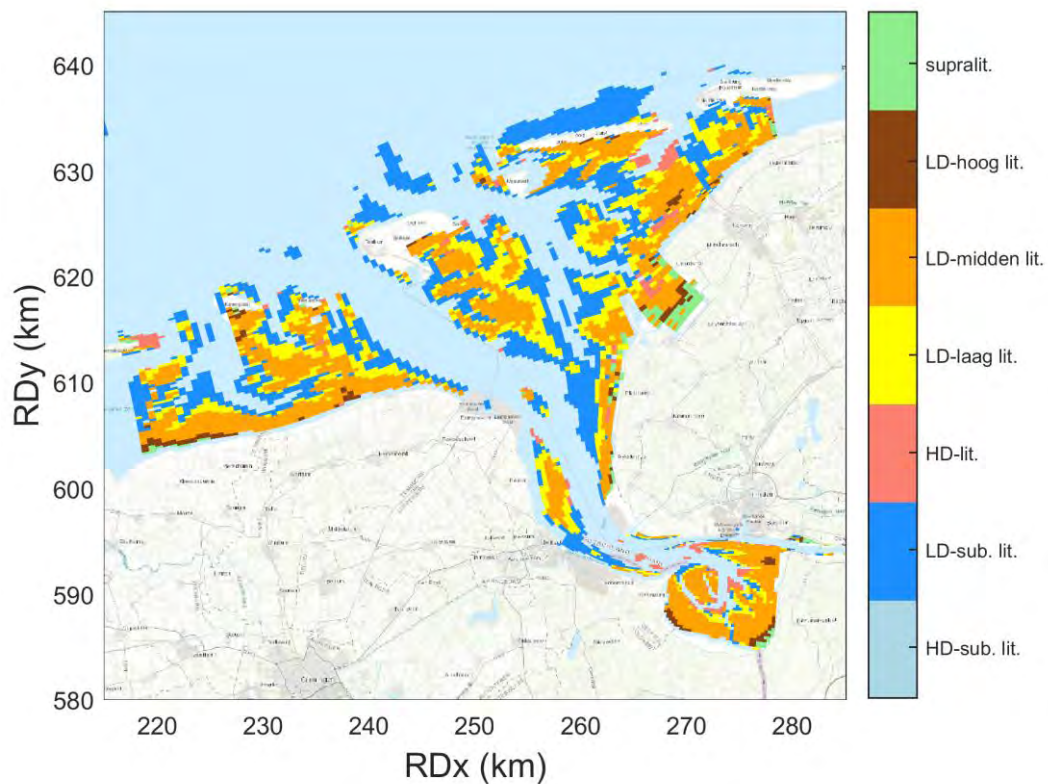
Figuur B.1 Vereenvoudigde ecotopenkaart in 2050 van het scenario 'onttrekken slib'.



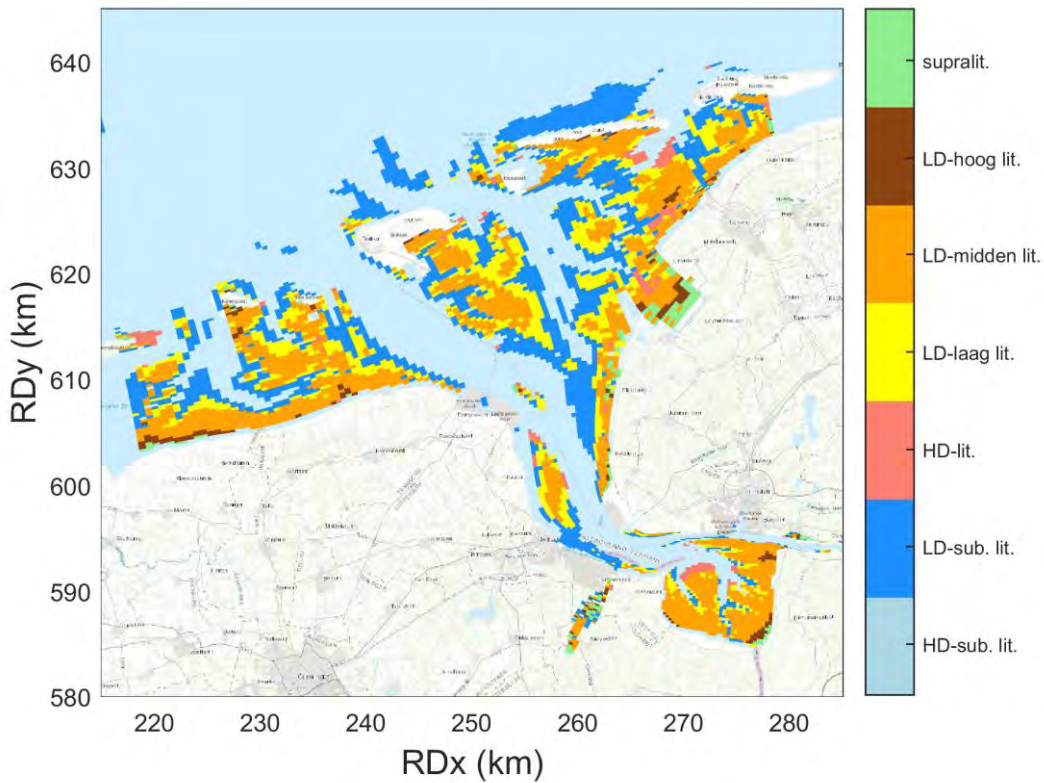
Figuur B.2 Vereenvoudigde ecotopenkaart in 2050 van het scenario 'bagger- en stortstrategieën'.



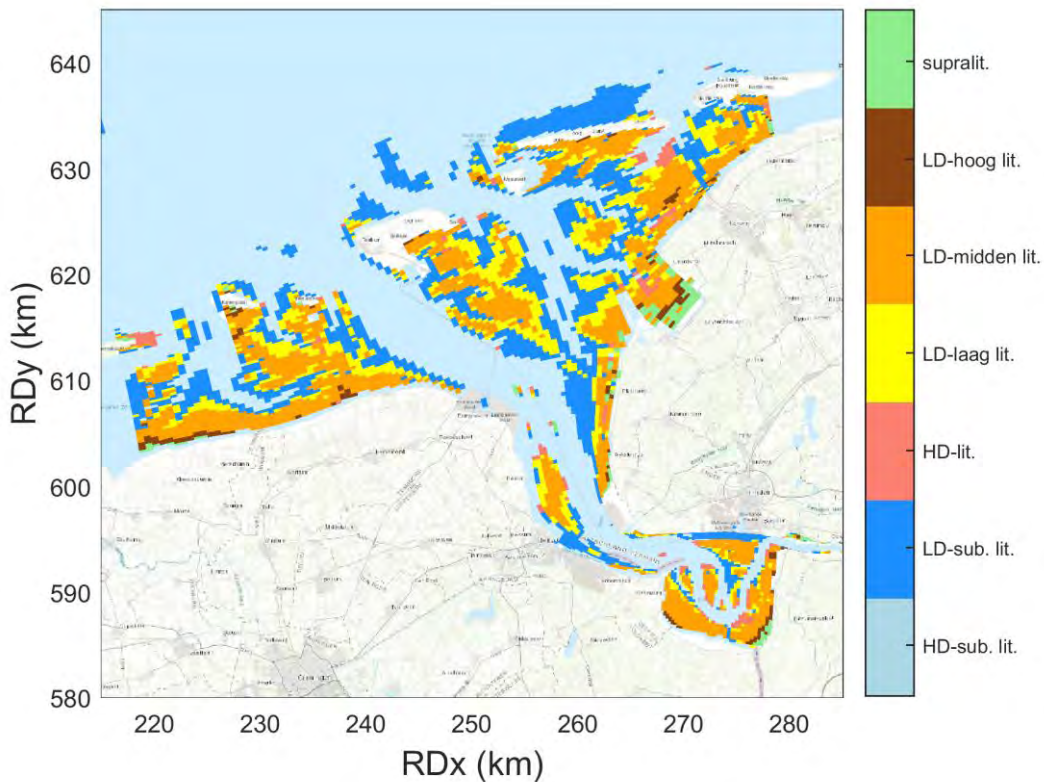
Figuur B.3 Vereenvoudigde ecotopenkaart in 2050 van het scenario 'vergroten plaatereaal'.



Figuur B.4 Vereenvoudigde ecotopenkaart in 2050 van het scenario 'bevorderen sedimentatie'.



Figuur B.5 Vereenvoudigde ecotopenkaart in 2050 van het scenario 'toevoegen binnendijks intergetijdengebied'.



Figuur B.6 Vereenvoudigde ecotopenkaart in 2050 van het scenario 'dynamiek Eems rivier'.